



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗΣ ΥΠΕΡΑΚΤΙΩΝ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ ΜΕΣΩ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΟΡΑΤΟΤΗΤΑΣ



ΙΦΙΓΕΝΕΙΑ ΚΟΥΤΣΟΥΡΑΔΗ

Επιβλέπων: Ανδρέας Ευστρατιάδης, Αναπληρωτής Καθηγητής, Πολιτικός Μηχανικός

Συνεπιβλέπων: Ρωμανός Ιωαννίδης, Επίκουρος Καθηγητής Politecnico di Milano, Πολιτικός Μηχανικός

Νοέμβριος 2025, Αθήνα



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗΣ ΥΠΕΡΑΚΤΙΩΝ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ
ΜΕΣΩ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΟΡΑΤΟΤΗΤΑΣ**

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΚΡΗΤΗΣ

ΙΦΙΓΕΝΕΙΑ ΚΟΥΤΣΟΥΡΑΔΗ

Επιβλέπων: Ανδρέας Ευστρατιάδης, Αναπληρωτής Καθηγητής, Πολιτικός Μηχανικός

Συνεπιβλέπων: Ρωμανός Ιωαννίδης, Επίκουρος Καθηγητής Politecnico di Milano, Πολιτικός Μηχανικός

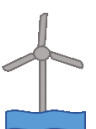
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Προλογίζοντας την παρούσα διπλωματική εργασία, οφείλω να αποτυπώσω την εκτίμησή μου και τις ευχαριστίες μου σε φανερούς και αφανείς συντελεστές εκπόνησης της εργασίας αυτής. Η συμβολή τους, είτε μέσα από την επιστημονική καθοδήγηση και την παροχή πολύτιμων γνώσεων, είτε μέσα από την ηθική υποστήριξη και την ενθάρρυνση σε δύσκολες στιγμές, υπήρξε καθοριστική.

Πρωτίστως οφείλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της παρούσας εργασίας και της πορείας αυτής, τον κύριο Ανδρέα Ευστρατιάδη, ο οποίος με τη συνεχή υποστήριξη, την ώθηση και την καθοδήγηση που μου έδειχνε, αποτέλεσε τον κύριο μοχλό έμπνευσης, διάρθρωσης και διαμόρφωσης της ακόλουθης μελέτης. Ο κύριος Ευστρατιάδης υπήρξε για εμένα όχι μόνο πρότυπο εκπαιδευτικού, αλλά και ανθρώπου, και η συνεργασία μας στις αίθουσες του Πολυτεχνείου αποτέλεσε για μένα πολύτιμη μαθησιακή και προσωπική εμπειρία. Ειλικρινά θεωρώ τιμή μου που ολοκληρώνω τις σπουδές μου υπό την καθοδήγησή του και δε θα μπορούσα να φανταστώ καταλληλότερο άνθρωπο να με συνοδεύσει σε αυτό το τελευταίο βήμα της ακαδημαϊκής μου πορείας.

Για την έμπνευση, την εκπαίδευση στα πρώτα βήματα του προγράμματος του GIS, αλλά και την παροχή συμβουλών στο πρακτικό κομμάτι της εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω και να εκφράσω τον αμέριστο σεβασμό μου στον κο Ρωμανό Ιωαννίδη. Η καθοδήγησή του δεν περιορίστηκε μόνο στην τεχνική εκμάθηση των εργαλείων του λογισμικού, αλλά επεκτάθηκε στην κατανόηση των διαδικασιών ανάλυσης και στην ανάπτυξη μεθοδικής προσέγγισης για την οργάνωση και διαχείριση των δεδομένων.

Τέλος, καθώς τα τελευταία χρόνια των σπουδών μου ήταν γεμάτα ένταση, απαιτήσεις και στιγμές αμφιβολίας, νιώθω την ανάγκη να εκφράσω την απέραντη ευγνωμοσύνη μου προς την οικογένειά μου. Οι συμβουλές, η στήριξη και η ενθάρρυνσή τους αποτέλεσαν καθοριστικό παράγοντα για την αντοχή και την επιμονή μου. Παράλληλα, θέλω να ευχαριστήσω τους αφανείς ήρωες της πορείας μου, που με μικρές αλλά σημαντικές πράξεις ενθάρρυνσης και καθοδήγησης, συνέβαλαν καθοριστικά στην προσωπική και ακαδημαϊκή μου εξέλιξη. Η παρουσία τους, έστω και αθόρυβη, αποτέλεσε πολύτιμη πηγή έμπνευσης και δύναμης, βοηθώντας με να φτάσω στην ολοκλήρωση αυτής της σημαντικής διαδρομής και να επιτύχω τους στόχους μου.



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα υπεράκτια αιολικά πάρκα γνωρίζουν ραγδαία ανάπτυξη παγκοσμίως και αναμένεται να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στην παραγωγή ενέργειας τα επόμενα χρόνια, ενισχύοντας την παγκόσμια μετάβαση προς τις καινοτόμες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η παρούσα μελέτη εστιάζει στην ανάλυση των υπεράκτιων αιολικών έργων και εν συνεχεία στη χωροθέτηση υπεράκτιων αιολικών πάρκων στον ελληνικό θαλάσσιο χώρο. Στόχος είναι η ανάδειξη των ιδιαίτερων πλεονεκτημάτων της Ελλάδας ως προς το υψηλό αιολικό δυναμικό, τη γεωγραφική της θέση και τις εκτεταμένες θαλάσσιες εκτάσεις, για τις δυνατότητες ανάπτυξης των υπεράκτιων αιολικών. Μέσα από μια πολυκριτηριακή ανάλυση λαμβάνονται υπόψη φυσικοί (άνεμος, βάθος, μορφολογία), τεχνικοί (υποδομές, απόσταση από το δίκτυο), περιβαλλοντικοί (προστατευόμενες περιοχές, μεταναστευτικές διαδρομές πτηνών, τουρισμός) και κοινωνικοοικονομικοί παράγοντες (ναυσιπλοΐα, αλιεία), ώστε να προσδιοριστούν οι πλέον κατάλληλες ζώνες εγκατάστασης.

Στο πλαίσιο της χωροθέτησης των υπεράκτιων αιολικών πάρκων στα ελληνικά χωρικά ύδατα, αξιοποιούνται τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ) εφαρμόζοντας μία συνδυαστική χρήση γεωχωρικών δεδομένων και θεματικών επιπέδων πληροφορίας. Η χρήση των ΣΓΠ επιτρέπει την ενσωμάτωση όλων των κριτηρίων και την αξιολόγησή τους, προσφέροντας μια συστηματική και αξιόπιστη βάση για τη λήψη αποφάσεων στον ενεργειακό σχεδιασμό. Εν συνεχεία με τη χρήση εργαλείων ανάλυσης ορατότητας, εκτιμάται η επίδραση των έργων στο τοπίο και στην παράκτια ζώνη.

Τα αποτελέσματα της μελέτης αναδεικνύουν πλήθος περιοχών με σημαντικό δυναμικό για την ανάπτυξη υπεράκτιων αιολικών στην Ελλάδα, συμβάλλοντας στη μετάβαση σε ενεργειακή αυτονομία, στη διαφοροποίηση του μίγματος ενέργειας και στην επίτευξη των στόχων της πράσινης μετάβασης. Για το σκοπό της πρακτικής εφαρμογής, εξετάζεται το παράδειγμα της Κρήτης, όπου διερευνώνται όλες οι δυνητικές περιοχές και, τελικώς, μελετάται σε βάθος η καταλληλότερη. Η μελέτη καταδεικνύει ότι η ορθολογική χωροθέτηση μέσω ΣΓΠ και η ενσωμάτωση της ανάλυσης ορατότητας αποτελούν κρίσιμα εργαλεία για τον στρατηγικό σχεδιασμό έργων μεγάλης κλίμακας, ενισχύοντας τη βιώσιμη ανάπτυξη και την κοινωνική αποδοχή.



ABSTRACT

Offshore wind farms are experiencing a rapid global growth and are expected to play a significant role in energy production the upcoming years, thereby boosting the global transition towards innovative renewable energy sources. The present study focuses on the analysis of offshore wind projects and consequently on the spatial planning of offshore wind farms in the Greek maritime area. The aim is to highlight Greece's significant advantages in terms of its high wind potential, its geographical location, and the extensive marine areas, in relation to the prospects of offshore wind development. Through a multi-criteria analysis, natural factors (wind, water depth, seabed morphology), technical parameters (infrastructure, distance from the grid), environmental considerations (protected areas, migratory bird routes, tourism), and socio-economic aspects (shipping, fishing areas) are taken into account in order to identify the most suitable zones for installation.

Within the framework of offshore wind farm siting in Greek territorial waters, Geographic Information Systems (GIS) are employed through a combined use of geospatial data and thematic information layers. The use of GIS enables the integration and evaluation of all criteria, providing a systematic and reliable basis for decision-making in energy planning. Subsequently, with the application of viewshed analysis, the visual impact of the projects on the landscape and coastal zone is assessed.

The results of the study reveal a wide range of areas with significant potential for offshore wind development in Greece, contributing to energy autonomy, diversification of the energy mix, and achieving the green transition targets. For the purpose of practical implementation, the case of Crete is examined, where all potential areas are investigated and, ultimately, the most suitable site is studied in depth. The study demonstrates that rational spatial planning through GIS and the integration of viewshed analysis constitute essential tools for the strategic design of large-scale projects, enhancing sustainable development and social acceptance.



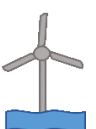


Περιεχόμενα

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	12
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	13
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ	15
ΕΥΡΕΤΗΣΙΟ ΣΧΕΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ.....	16
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΧΑΡΤΩΝ	17
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή	18
1.1 Εισαγωγικό σημείωμα.....	18
1.2 Αντικείμενο και στόχοι της εργασίας.....	18
1.3 Διάρθρωση εργασίας	19
Κεφάλαιο 2 Αιολική ενέργεια	21
2.1 Αιολική ενέργεια διεθνώς	21
2.2 Αιολική ενέργεια στην Ελλάδα.....	24
2.3 Υπεράκτια αιολική ενέργεια – Διεθνής Εμπειρία	27
2.3.1 Πλεονεκτήματα υπεράκτιων αιολικών πάρκων.....	29
2.3.2 Μειονεκτήματα των Υπεράκτιων Αιολικών Πάρκων	32
2.4 Υπεράκτια αιολική ενέργεια στην Ελλάδα.....	33
2.4.1 Υφιστάμενη κατάσταση.....	33
2.4.2 Προκλήσεις Υπεράκτιων Αιολικών Πάρκων	36
Κεφάλαιο 3 Προδιαγραφές υπεράκτιων αιολικών πάρκων	43
3.1 Ανεμολογικά στοιχεία	43
3.2 Βαθυμετρία και πυθμένας	46
3.3 Παλίρροιες και θαλάσσιες συνθήκες.....	47
3.4 Τρόποι θεμελίωσης υπεράκτιων ανεμογεννητριών	49
3.4.1 Θεμελίωση μονού πυλώνα Monopile	50
3.4.2 Θεμελίωση βαρύτητας με υδατοστεγές κιβώτιο Gravity-based foundation..	51
3.4.3 Θεμελίωση δικτύωματος Jacket foundation.....	52
3.4.4 Θεμελίωση τριπόδου Tripod foundation	53
3.4.5 Πλωτές εξέδρες Floating platforms.....	54
3.5 Έργα υποδομής και διασύνδεσης με την ηπειρωτική χώρα.....	56
3.5.1 Έργα υποδομής	56
3.5.2 Διαδικασία κατασκευής	57
3.5.3 Διασύνδεση με το δίκτυο	59
3.6 Δομή υπεράκτιων αιολικών έργων και προδιαγραφές υλικών κατασκευής	61
3.7 Λειτουργία και συντήρηση.....	64
3.8 Επιπτώσεις στο περιβάλλον.....	67



3.8.1	Θαλάσσιο περιβάλλον.....	68
3.8.2	Βιοποικιλότητα και έμβιοι οργανισμοί.....	70
3.8.3	Θαλάσσιες μεταφορές	71
3.8.4	Ακουστική όχληση	71
3.8.5	Οπτική όχληση.....	72
Κεφάλαιο 4	Χωροθέτηση υπεράκτιων αιολικών πάρκων	73
4.1	Χωροταξικός Σχεδιασμός Υπεράκτιων Αιολικών Πάρκων	73
4.1.1	Νομοθετικό πλαίσιο	73
4.1.2	Κριτήρια Αποστάσεων Χωροθέτησης Αιολικών Πάρκων.....	75
4.1.3	Ειδικά Κριτήρια Χωροθέτησης Υπεράκτιων Αιολικών Πάρκων	77
4.1.4	Επικυρωμένα Κριτήρια Χωροταξικού Σχεδιασμού	79
4.2	Κριτήρια χωροθέτησης.....	82
4.2.1	Χάρτης Αιολικού Δυναμικού	84
4.2.2	Χάρτης Βαθυμετρίας	86
4.2.3	Χάρτης Γραμμών Ναυσιπλοΐας	87
4.2.4	Χάρτης Περιβαλλοντικά Προστατευόμενων περιοχών.....	89
4.2.5	Χάρτης περιοχών στρατιωτικών ασκήσεων.....	90
4.2.6	Λοιποί χάρτες	91
Κεφάλαιο 5	Η ανάλυση ορατότητας στη χωροθέτηση υπεράκτιων αιολικών έργων.....	93
5.1	Γενικές αρχές χωρικής ανάλυσης.....	93
5.2	Η χρήση εργαλείων χωρικής ανάλυσης στη χωροθέτηση έργων ΑΠΕ	95
5.3	Η έννοια της ανάλυσης ορατότητας	96
5.4	Μεθοδολογία χωροθέτησης υπεράκτιων αιολικών πάρκων	96
5.4.1	Γενικά.....	96
5.4.2	Χωρική απεικόνιση κριτηρίων χωροθέτησης.....	98
Κεφάλαιο 6	Εφαρμογή στην περιοχή της Κρήτης.....	101
6.1	Επιλογή ευρύτερης περιοχής ενδιαφέροντος	101
6.2	Χωροθέτηση έργου	102
6.3	Διαμόρφωση υπεράκτιου πάρκου και βασικά τεχνικά μεγέθη.....	104
6.4	Ανάλυση ορατότητας	106
6.4.1	Μεθοδολογία ανάλυσης ορατότητας	106
6.4.2	Σενάριο 1: Μέγιστη απόσταση ορατότητας 20 km.....	107
6.4.3	Σενάριο 2: Μέγιστη απόσταση ορατότητας 30 km.....	108
6.4.4	Σενάριο 3: Μέγιστη απόσταση ορατότητας 40 km.....	111
Κεφάλαιο 7	Συμπεράσματα – Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα.....	114
7.1	Συμπεράσματα	114



7.2	Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα	115
7.3	Κριτική Αξιολόγηση και Προοπτικές	116
Βιβλιογραφία - Πηγές.....		118



ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1: Παγκόσμια κατανομή ενέργειας (Πηγή: IRENA 2025).....	21
Διάγραμμα 2: Χρονοδιάγραμμα με ορόσημα στην ανάπτυξη των υπεράκτιων αιολικών πάρκων	28
Διάγραμμα 3: Σημαία της αξιοπιστίας σε υπεράκτια αιολικά πάρκα (Πηγή: Offshorewindenergy)	67
Διάγραμμα 4: Διάγραμμα κατηγοριοποίησης κριτηρίων αποκλεισμού	83
Διάγραμμα 5: Διάγραμμα κατηγοριοποίησης κριτηρίων αξιολόγησης	84

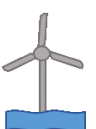


ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Παράδειγμα επικολλημένης πανίδας αποικισμού στα θεμέλια της ανεμογεννήτριας. (Παρατίθεται επεξήγηση: (a) Spirobranchus sp. and M. senile at the bottom of the HS03 substructure. (b) Substructure HS02, with Mytilus spp., Laminaria sp. and potential amphipod tubes at 3 m depth. (c) Substructure HS04, with grazing sea urchins and biofilm at 11 m depth. (d) Substructure HS01, with nudibranchs (A. papillosa) and barnacles (Balanoidea) at 48 m depth. Scale bar: 10 cm. – Rikard Karlsson et. al 2022)	31
Εικόνα 2: Εμφάνιση πάγου στα πτερύγια της ανεμογεννήτριας (Πηγή: Iceland)	39
Εικόνα 3: Φαινόμενο διάβρωσης σε υπεράκτια ανεμογεννήτρια (Πηγή: Abfad)	40
Εικόνα 4: Αναβάθμιση λιμένα Nantes Saint-Nazaire Port (Πηγή: Nantes-saint-nazaire-port).....	41
Εικόνα 5: Εξειδικευμένα σκάφη που απαιτούνται κατά την κατασκευή υπεράκτιου αιολικού πάρκου (Πηγή: Moo-Sung Ryu et al. 2022)	42
Εικόνα 6: Πλωτό σύστημα καταγραφής πλωτών Buoys (Πηγή: Akrocean)	45
Εικόνα 7: Δυνατότητες καταγραφής πλωτών συστημάτων πλωτών Buoys (Πηγή: Akrocean)	45
Εικόνα 8: Κατηγορίες θεμελιώσεων υπεράκτιων ανεμογεννητριών (Πηγή: Esther Dornhelm , et al. 2019).....	50
Εικόνα 9: Θεμελίωση μονού πυλώνα (Πηγή: Balmoraloffshore)	51
Εικόνα 10: Θεμελίωση βαρύτητας (Πηγή : Offshorewind)	52
Εικόνα 11: Θεμελίωση jacket (Πηγή: Wenbin Dong,Torgeir Moan, Zhen Gao).....	53
Εικόνα 12: Θεμελίωση τριπόδου (Πηγή: Micro-epsilon)	54
Εικόνα 13: Πλωτές εξέδρες (Πηγή: Wind Europe)	55
Εικόνα 14: Μεταφορά ρότορα διαμέτρου 70 m στο ΥΑΠ Yttre Stengrund της Σουηδίας	58
Εικόνα 15: Σκάφος μεταφοράς τμημάτων ανεμογεννητριών (Πηγή: WorkBoat365)	58
Εικόνα 16: Διαστάσεις σχεδιασμού της IEA 22 MW RWT (Μονάδες μέτρησης σε μέτρα και μοίρες, Πηγή: Zahle et al. 2024)	62
Εικόνα 17: Εργασίες συντήρησης σε υπεράκτια ανεμογεννήτρια (Πηγή: Macgregor)	66
Εικόνα 18: Εργασίες συντήρησης υπεράκτιας ανεμογεννήτριας με εναέρια πρόσβαση (Πηγή: Offshore wind innovation)	66
Εικόνα 19: Πιθανή νέα αποικία του είδους D. Pertusum στο Hywind Scotland Pilot Park. Buoyancy modules. Scale bar: 10 cm.. – Rikard Karlsson et. al 2022)	69
Εικόνα 20: Οι θεμελιώσεις τύπου jacket στο πάρκο Block Island Wind Farm (BIWF) και τα υποκείμενα αποτυπώματά τους κυριαρχούνταν από μύδια και συναφείς οργανισμούς. (Πηγή: Benthic and Eri faunal Monitoring at BIWF)	69
Εικόνα 21: Περιβάλλον προγράμματος QGIS	94
Εικόνα 22: Χάρτης απεικόνισης πολυγώνου επιλογής και κανάβου	105
Εικόνα 23: Απεικόνιση αποτελεσμάτων με απόσταση ορατότητας 20 km (Μονάδα μέτρησης: Μονάδες ορατών ανεμογεννητριών).....	107
Εικόνα 24: Απεικόνιση αποτελεσμάτων με απόσταση ορατότητας 30 km (Μονάδα μέτρησης: Μονάδες ορατών ανεμογεννητριών).....	108
Εικόνα 25: Απεικόνιση εναλλακτικών σεναρίων (Με κίτρινο περίγραμμα εμφανίζεται η περιοχή μελέτης, με ροζ η 1η εναλλακτική με μείωση 28 ανεμογεννητριών, με γαλάζιο η 2 ^η εναλλακτική μειωμένη εκ νέου κατά 13 ανεμογεννήτριες)	110
Εικόνα 26: Απεικόνιση αποτελεσμάτων των τριών σεναρίων (Μονάδα μέτρησης: Μονάδες ορατών ανεμογεννητριών).....	110
Εικόνα 27: Απεικόνιση αποτελεσμάτων με απόσταση ορατότητας 40 km (Μονάδα μέτρησης: Μονάδες ορατών ανεμογεννητριών).....	111



Εικόνα 28: Απεικόνιση εναλλακτικών σεναρίων (Με κίτρινο περίγραμμα εμφανίζεται η περιοχή μελέτης, με ροζ η 1η εναλλακτική με μείωση 42 ανεμογεννητριών, με γαλάζιο η 2η εναλλακτική μειωμένη εκ νέου κατά 39 ανεμογεννήτριες)	113
Εικόνα 29: Απεικόνιση αποτελεσμάτων των τριών σεναρίων (Μονάδα μέτρησης: Μονάδες ορατών ανεμογεννητριών).....	113



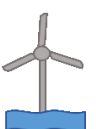
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Ισχυρότερες χώρες στην αξιοποίηση αιολικής ενέργειας (Πηγή: IRENA 2025) ...	23
Πίνακας 2: Κατανομή παραγωγής υπεράκτιας αιολικής ενέργειας 2024 (Πηγή: Energy Institute - Statistical Review of World Energy 2025).....	24
Πίνακας 3: Ενδεικτικά σενάρια χωροθέτησης ΘΑΠ σταθερού θεμελίου στην Ελλάδα με βάση το ΕΠΑΘΑΠ 2010/12 (Πηγή: ΕΛΕΤΑΕΝ).....	35
Πίνακας 4: Κατηγορίες Θεμελίωσης Υπεράκτιων Ανεμογεννητριών	50
Πίνακας 5: Λειτουργίες και Προβλεπόμενη συντήρηση επιμέρους εξοπλισμού ενός Υπεράκτιου αιολικού πάρκου	65
Πίνακας 6: Πίνακας Κριτηρίων Χωροταξικού σχεδιασμού (Κατηγορία: Αποκλεισμού ή Αξιολόγησης, Μονάδες μέτρησης m: μέτρα, km: χιλιόμετρα, nm: ναυτικό μίλι).....	80
Πίνακας 7: Κριτήρια που λήφθηκαν υπόψη κατά την παρούσα μελέτη.....	100



ΕΥΡΕΤΗΣΙΟ ΣΧΕΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Σχεδιάγραμμα 1: Σχηματική απεικόνιση εγκατάστασης υποβρύχιων καλωδίων (Πηγή: Submarine Cables, Subsea).....	60
Σχεδιάγραμμα 2: Παράδειγμα διασύνδεσης αιολικού πάρκου 600 MW (Πηγή: T. Ackermann, 2005).....	60
Σχεδιάγραμμα 3: Δομή υπεράκτιου αιολικού πάρκου (Πηγή: Silvio Rodrigues, et al.).....	61



ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΧΑΡΤΩΝ

Χάρτης 1: Χάρτης παγκόσμιας παραγωγής αιολικής ενέργειας ανά χώρα (Πηγή: IRENA 2025)	22
Χάρτης 2: Χάρτης Αιολικού Δυναμικού σε ύψος 100 m (Πηγή: Global Wind Atlas)	26
Χάρτης 3: Χάρτης εν λειτουργία αιολικών πάρκων στην Ελλάδα (Πηγή: ΕΛΕΤΑΕΝ)	27
Χάρτης 4: Περιοχές ανάπτυξης ΘΑΠ σύμφωνα με ΕΠΑΘΑΠ 2010/2012 (Πηγή: ΕΛΕΤΑΕΝ)	35
Χάρτης 5: Βαθυμετρικά χαρακτηριστικά (Πηγή: Navionics)	47
Χάρτης 6: Χάρτης αναλογικών και ψηφιακών σταθμογράφων στην Ελλάδα (Πηγή: Υδρογραφική Υπηρεσία Πολεμικού Ναυτικού)	49
Χάρτης 7: Χάρτης αιολικού δυναμικού (Πηγή: Global Wind Atlas)	85
Χάρτης 8: Χάρτης αιολικού δυναμικού Ελλάδας (Κλίμακα: 1:50, Ταχύτητες ανέμου σε m/s)	86
Χάρτης 9: Χαρτογράφηση βαθυμετρίας στην Ελλάδα (Πηγή: Navionics)	87
Χάρτης 10 : Χάρτης βαθυμετρίας (Κλίμακα 1:50, Βάθη σε m)	87
Χάρτης 11: Χάρτης γραμμών ναυσιπλοΐας (Πηγή: European Atlas of the Seas)	88
Χάρτης 12: Χάρτης γραμμών ναυσιπλοΐας επιβατικών (passanger) και εμπορικών πλοίων (cargo & tanker) (Κλίμακα: 1:50)	89
Χάρτης 13: Χάρτης Περιβαλλοντικά Προστατευόμενων Περιοχών (Κλίμακα 1:50, Περιοχές Απόλυτης Προστασίας της Φύσης σε Θαλάσσια Πάρκα, Περιοχές Προστασίας της Φύσης σε Θαλάσσια Πάρκα, Περιοχές του Ευρωπαϊκού Οικολογικού Δικτύου Natura 2000, Habitats Directive Annex I habitat maps)	90
Χάρτης 14: Περιοχές στρατιωτικών ασκήσεων (Κλίμακα 1:50)	91
Χάρτης 15: Χάρτης δεδομένων (Κλίμακα 1:4282650, Υπεράκτια εγκαταστάσεις, Κεντρικά λιμάνια, Φάροι, Υποθαλάσσια καλώδια και αγωγοί, Υποθαλάσσιες συνδέσεις, Περιοχές ανάπτυξης υδατοκαλλιεργειών)	92
Χάρτης 16: Συνολικός χάρτης απεικόνισης της Ελλάδας (Κλίμακα 1:41)	99
Χάρτης 17: Δορυφορική απεικόνιση της Κρήτης (Πηγή: Google Earth)	102
Χάρτης 18: Απαγορευμένες περιοχές επέμβασης στην Κρήτη (Με κόκκινο περίγραμμα αποτυπώνονται οι περιοχές στρατιωτικών ασκήσεων, Με πορτοκαλί και πράσινες "κηλίδες" αποτυπώνονται οι προστατευόμενες περιοχές του δικτύου Natura)	102
Χάρτης 19: Χάρτης Βαθυμετρίας στην περιοχή της Κρήτης (Κλίμακα: 1:12, Βάθη σε m)	103
Χάρτης 20: Χάρτης Ανεμολογικού δυναμικού Κρήτης (Κλίμακα: 1:12, Ταχύτητα σε m/s)	103
Χάρτης 21: Χάρτης σύγκρισης περιοχών μελέτης (Με ροζ πλαίσιο αποτυπώνεται η περιοχή βορειανατολικά απ' τα Μάλια, με κόκκινο η περιοχή βορειανατολικά από τον Άγιο Νικόλαο και τη Σητεία και με κίτρινο η περιοχή ανατολικά του Ζάκρου)	104



Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγικό σημείωμα

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη μελέτη χωροθέτησης υπεράκτιων αιολικών πάρκων στον ελληνικό θαλάσσιο χώρο, διερευνώντας τις τεχνικές και χωροταξικές παραμέτρους που καθορίζουν την καταλληλότητά τους. Στη συνέχεια, το ζήτημα της χωροθέτησης συμπληρώνεται από μια τεκμηριωμένη ανάλυση ορατότητας, η οποία εκτιμά τον οπτικό αντίκτυπο των έργων από την ξηρά και συμβάλλει στην ολοκληρωμένη αξιολόγηση των προτεινόμενων θέσεων. Η επιλογή του θέματος συνδέεται με τη διαρκώς αυξανόμενη σημασία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και ιδιαίτερα της αιολικής ενέργειας στο πλαίσιο της ενεργειακής μετάβασης και της κλιματικής ουδετερότητας. Η Ελλάδα χαρακτηρίζεται από πλούσιο θαλάσσιο χώρο και ισχυρό αιολικό δυναμικό. Συνεπώς διαθέτει όλες τις προϋποθέσεις για την ανάπτυξη σχετικών ενεργειακών έργων, ωστόσο οφείλει να υπερβεί σημαντικές προκλήσεις που αφορούν στην τεχνολογία, στη νομοθεσία, στο περιβάλλον και στην κοινωνική αποδοχή.

Στόχος της εργασίας είναι να συνδυάσει το θεωρητικό υπόβαθρο με πρακτικές εφαρμογές χωροθέτησης μέσω των συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών και πολυκριτηριακής ανάλυσης, ώστε να αναδειχθούν οι καταλληλότερες θαλάσσιες περιοχές ανάπτυξης υπεράκτιων αιολικών πάρκων. Παράλληλα, μέσω της ανάλυσης ορατότητας, επιχειρείται η εκτίμηση του οπτικού αντίκτυπου υπεράκτιου αιολικού πάρκου σε περιοχή που αξιολογείται ως βέλτιστη, στοιχείο που αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την κοινωνική αποδοχή τους.

1.2 Αντικείμενο και στόχοι της εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η σε βάθος μελέτη, ανάλυση και αξιολόγηση της δυνατότητας ανάπτυξης υπεράκτιων αιολικών πάρκων στον ελλαδικό χώρο. Η έρευνα προσεγγίζει το θέμα ολιστικά, εξετάζοντας όχι μόνο τις τεχνικές παραμέτρους εγκατάστασης ανεμογεννητριών στη θάλασσα, αλλά και το θεσμικό, περιβαλλοντικό και κοινωνικοοικονομικό πλαίσιο που καθορίζει τη βιωσιμότητα και αποδοχή τέτοιων έργων.

Κεντρικός στόχος είναι η αποτύπωση των δυνατοτήτων αλλά και των περιορισμών που χαρακτηρίζουν την ανάπτυξη υπεράκτιων αιολικών στην Ελλάδα, καθώς και η ανάδειξη των παραμέτρων που πρέπει να ληφθούν υπόψη για έναν ορθολογικό σχεδιασμό.

Για την επίτευξη των παραπάνω, αναπτύσσεται μια μεθοδολογία χωροθέτησης βασισμένη στη χρήση Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών και πολυκριτηριακής ανάλυσης. Κατά την ανάλυση, συνδυάζονται δεδομένα όπως ανεμολογικές συνθήκες, βαθυμετρικά στοιχεία, περιοχές περιβαλλοντικής προστασίας, γραμμές ναυσιπλοΐας και στρατιωτικές ζώνες, ώστε να προκύψουν χάρτες καταλληλότητας και να εντοπιστούν οι πλέον ενδεδειγμένες θαλάσσιες περιοχές.

Αφού οριστούν οι καταλληλότερες περιοχές μέσω της χωροταξικής ανάλυσης, πραγματοποιείται μια εξειδικευμένη μελέτη ορατότητας, σε μία επιλεγμένη περιοχή



μελέτης. Η μελέτη αυτή αποτελεί κρίσιμο συμπλήρωμα της χωροθέτησης, καθώς αξιολογεί τον οπτικό αντίκτυπο των υπεράκτιων αιολικών πάρκων από την ξηρά, με διαφορετικά σενάρια απόστασης, παρέχοντας ουσιαστικά τη βέλτιστη λύση χωροθέτησης ως προς την ορατότητα από την ακτή. Με τον τρόπο αυτό εκτιμάται η αισθητική όχληση, ιδίως σε περιοχές με τουριστική και πολιτιστική σημασία, και προτείνονται διορθωτικές παρεμβάσεις όπου απαιτείται. Η ορατότητα λειτουργεί συνεπώς ως καθοριστικό στάδιο για την τελική αξιολόγηση των περιοχών, με σκοπό την ενίσχυση της κοινωνικής αποδοχής και τη διασφάλιση της αρμονικής ένταξης των έργων στο τοπίο.

1.3 Διάρθρωση εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύσσεται σε επτά κεφάλαια, τα οποία ακολουθούν μια λογική αλληλουχία από το θεωρητικό υπόβαθρο μέχρι την ανάλυση και τα συμπεράσματα. Η πορεία ανάπτυξης της εργασίας κρίνεται απαραίτητη, για την κατανόηση και την ανάγνωση, δίχως ελλειπείς πληροφορίες ή τη δημιουργία αποριών.

Στο Κεφάλαιο 2, το οποίο αποτελεί το πρώτο κεφάλαιο ανάλυσης της παρούσας εργασίας, παρουσιάζεται η πορεία και η εξέλιξη της αιολικής ενέργειας σε διεθνές επίπεδο και στην Ελλάδα. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην υπεράκτια αιολική παραγωγή, καθώς και στις προοπτικές ανάπτυξής της στον ελλαδικό χώρο. Η Ελλάδα, αν και βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο στον συγκεκριμένο τομέα, διαθέτει τη δυνατότητα να αξιοποιήσει τη διεθνή εμπειρία και τεχνογνωσία, συμμετέχοντας σε εκπαιδευτικά προγράμματα, σεμινάρια και πρακτικές εφαρμογές. Μέσω της προσέγγισης αυτής, θα είναι σε θέση να προετοιμαστεί κατάλληλα για την υλοποίηση επόμενων σταδίων ανάπτυξης και να αντιμετωπίσει αποτελεσματικά τις προκλήσεις που προκύπτουν με την ένταξη της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας στο ενεργειακό της μίγμα.

Στο Κεφάλαιο 3 αναλύονται διεξοδικά οι τεχνικές προδιαγραφές ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου, οι τύποι θεμελίωσης, οι απαιτούμενες υποδομές, καθώς και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την εγκατάσταση και λειτουργία του. Παράλληλα, μελετώνται οι βασικές παράμετροι που επηρεάζουν το σχεδιασμό και την κατασκευή των πάρκων, όπως τα μετεωρολογικά και βαθυμετρικά χαρακτηριστικά, η δυναμική των ανέμων και οι γεωτεχνικές συνθήκες. Μέσα από αυτή την ανάλυση, παρέχεται ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο για την κατανόηση των τεχνικών και περιβαλλοντικών απαιτήσεων που σχετίζονται με την υπεράκτια αιολική ενέργεια.

Το Κεφάλαιο 4 εξετάζει τα κριτήρια χωροθέτησης, το ισχύον θεσμικό πλαίσιο και τους χάρτες δεδομένων που συνθέτουν το πλαίσιο χωροταξικού σχεδιασμού για την ανάπτυξη υπεράκτιων αιολικών πάρκων. Ο χωροταξικός σχεδιασμός και η επιλογή των πρώτων επιλεγμένων περιοχών κρίνεται καθοριστικής σημασίας, καθώς θα χαράξει την πορεία για το μέλλον και θα προσφέρει τα πρώτα θεμέλια στους εν δυνάμει επενδυτές. Στο κεφάλαιο αυτό καταρτίζονται ακόμα, τα κριτήρια που τίθενται για αποκλεισμό ή αξιολόγηση των περιοχών επέμβασης, ενώ πραγματοποιείται και η αναγκαία ανάλυσή τους.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται η έννοια η σημασία και η χρήση της ανάλυσης ορατότητας, ενώ παράλληλα αναλύεται η μεθοδολογία που εφαρμόζεται για την κατάρτιση χαρτών καταλληλότητας μέσω των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ). Το εν λόγω



κεφάλαιο μεταφέρει πρακτικά όλη τη θεωρητική μελέτη και τη βιβλιογραφία σε πρακτικά και χρήσιμα δεδομένα και στο εργαλείο μελέτης, περιγράφοντας το ρόλο, τη χρήση και τα αποτελέσματα των ΣΓΠ. Συμπληρωματικά, παρατίθεται ο τρόπος χρήσης και αξιοποίησής τους, με τέτοιο τρόπο ώστε να διευκολύνουν τη διαδικασία αξιολόγησης των περιοχών για υπεράκτια αιολικά έργα.

Στο Κεφάλαιο 6 πραγματοποιείται πολυκριτηριακή ανάλυση με στόχο την επιλογή της καταλληλότερης περιοχής μελέτης, βάσει των δεδομένων και των παραμέτρων που έχουν τεθεί στα προηγούμενα κεφάλαια. Σε αυτό το κεφάλαιο αξιολογούνται όλα τα κριτήρια και τεκμηριώνεται η τελική επιλογή της περιοχής, παρέχοντας μια ολοκληρωμένη εικόνα της διαδικασίας λήψης αποφάσεων με πλήρη τεκμηρίωση. Στη συνέχεια πραγματοποιείται η ανάλυση ορατότητας της επιλεγμένης περιοχής, εξετάζοντας διαφορετικά σενάρια απόστασης προκειμένου να εκτιμηθεί ο οπτικός αντίκτυπος των υπεράκτιων αιολικών έργων. Στο πλαίσιο αυτό γίνονται και δυσμενέστερες παραδοχές, ώστε να διασφαλιστεί η ακριβής εκτίμηση των επιπτώσεων. Επιπλέον, προτείνονται διορθωτικές παρεμβάσεις σε περιοχές όπου τα αποτελέσματα κρίνονται μη αποδεκτά, διασφαλίζοντας τη βιώσιμη και κοινωνικά αποδεκτή ανάπτυξη των έργων.

Στο Κεφάλαιο 8 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της εργασίας, συνοψίζοντας τα βασικά ευρήματα και τις κύριες παρατηρήσεις που προέκυψαν από την ανάλυση που προηγήθηκε. Επιπρόσθετα, αναδεικνύεται η σημασία της ορθής χωροθέτησης, της πολυκριτηριακής αξιολόγησης και της χρήσης των ΣΓΠ για την επιτυχή ανάπτυξη υπεράκτιων αιολικών πάρκων. Επιπλέον, διατυπώνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα και εφαρμογές, εστιάζοντας σε τομείς όπως η βελτιστοποίηση σχεδιασμού και θεμελίωσης, η αξιολόγηση των περιβαλλοντικών, με έμφαση στις οπτικές επιπτώσεις σε μεγαλύτερη κλίμακα. Μέσα από αυτές τις προτάσεις, η εργασία στοχεύει να αποτελέσει ένα εργαλείο αναφοράς για ερευνητές, φορείς και επενδυτές, προωθώντας την ορθολογική και βιώσιμη ανάπτυξη της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα. Τέλος, παρατίθεται και μία προσωπική κριτική αξιολόγηση της παρούσας κατάστασης και του σημείου που βρίσκονται οι αρμόδιοι φορείς και οι επενδυτές στην Ελλάδα.



Κεφάλαιο 2 Αιολική ενέργεια

2.1 Αιολική ενέργεια διεθνώς

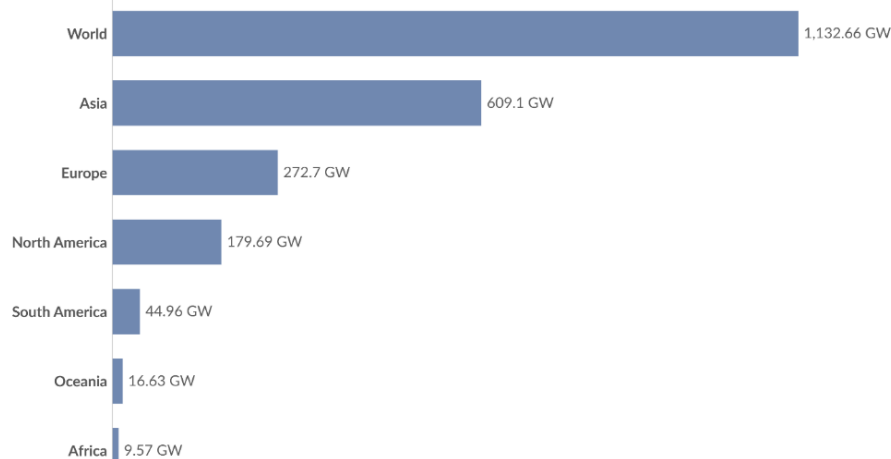
Η αιολική ενέργεια έχει γνωρίσει τεράστια ανάπτυξη σε παγκόσμια κλίμακα. Ήδη από τις αρχές του 1970 η ιδιαιτέρως τότε οικονομία της Ευρώπης, τέθηκαν τα πρώτα θεμέλια για την ανάπτυξη και την δημιουργία έργων εκμετάλλευσης των υπέρογκων αιολικών δυναμικών της.

Η αιολική ενέργεια είναι σήμερα μία από τις κύριες τεχνολογίες στην παγκόσμια μετάβαση προς καθαρότερες πηγές παραγωγής ηλεκτρισμού. Το 2024 και σύμφωνα με το Global Wind Energy Council σημειώθηκε ρεκόρ ετήσιων προσθηκών και συνολικής δυναμικότητας, καθώς ο κλάδος πρόσθεσε περίπου 117 GW νέας ισχύος, φτάνοντας συνολικά περίπου στα 1.13 TW εγκατεστημένης ισχύος, αριθμό που αφορά σε συνολικά χερσαία και υπεράκτια πάρκα. Οι κύριοι παράγοντες που οδήγησαν σε αυτή την επέκταση είναι το φθηνότερο κόστος τεχνολογίας (μεγάλα τουρμπίνα/μεγαλύτεροι ρότορες, υψηλότεροι πύργοι), καθώς ο ανταγωνισμός στην αγορά έχει εμφανίσει ραγδαία αύξηση, οι μαζικές πολιτικές και δημοπρατήσεις σε μεγάλες αγορές, ειδικά Κίνα, αλλά και στην Ευρώπη με πολλές χρηματοδοτούμενες ενέργειες και η διεύρυνση εργοστασιακών δυνατοτήτων στην εφοδιαστική αλυσίδα, που προκαλείται από την ολοένα και μεγαλύτερη εξέλιξη του κλάδου.

Installed wind energy capacity, 2024

Cumulative installed wind energy capacity including both onshore and offshore wind sources, measured in gigawatts (GW).

Our World
in Data



Data source: IRENA (2025)

OurWorldinData.org/renewable-energy | CC BY

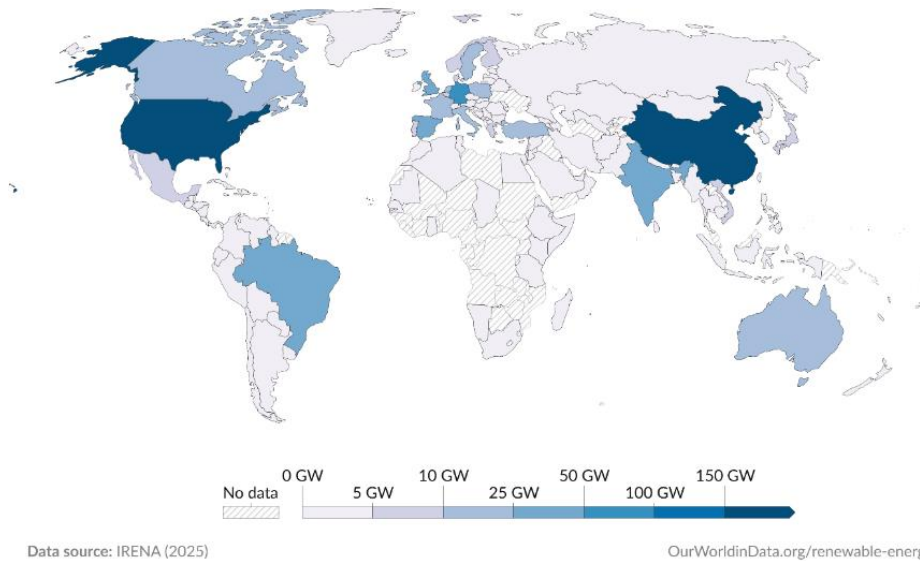
Διάγραμμα 1: Παγκόσμια κατανομή ενέργειας (Πηγή: IRENA 2025)

Σύμφωνα με την International Energy Agency (IEA), η επίτευξη στόχων για την κλιματική ουδετερότητα θα απαιτήσει κατ' ελάχιστο τριπλασιασμό των ετήσιων ρυθμών εγκαταστάσεων σε σχέση με το 2024, κάτι που θα εξαρτηθεί κυρίως από την επάρκεια χρηματοδότησης αλλά και από την ταχύτητα στις διαδικασίες χωροθέτησης και σύνδεσης στο δίκτυο.



Installed wind energy capacity, 2024

Cumulative installed wind energy capacity including both onshore and offshore wind sources, measured in gigawatts (GW).



Χάρτης 1: Χάρτης παγκόσμιας παραγωγής αιολικής ενέργειας ανά χώρα (Πηγή: IRENA 2025)

Η παγκόσμια αγορά αιολικής ενέργειας παρουσιάζει έντονη γεωγραφική συγκέντρωση, με λίγες χώρες να κυριαρχούν στην εγκατεστημένη ισχύ. Πρώτη και με διαφορά είναι η Κίνα, η οποία με περίπου 561 GW εγκατεστημένης ισχύος (με δεδομένα μέχρι το τέλος 2024) αποτελεί τη μεγαλύτερη αγορά παγκοσμίως. Η κινεζική αγορά καλύπτει σχεδόν το μεγαλύτερο μέρος των ετήσιων παγκόσμιων προσθηκών, ενισχύοντας έτσι τη δεσπόμενη θέση της. Οι Ηνωμένες Πολιτείες ακολουθούν με περίπου 136,6 GW εγκατεστημένο ενεργειακό αιολικό δυναμικό, διατηρώντας σταθερά τη δεύτερη θέση στον κόσμο.

Στην Ευρώπη, κορυφαία θέση κατέχει η Γερμανία με περίπου 63,5 GW, βασισμένα κυρίως σε χερσαία έργα. Άλλες σημαντικές ευρωπαϊκές αγορές περιλαμβάνουν την Ισπανία με περίπου 31,7 GW, το Ηνωμένο Βασίλειο με περίπου 30 GW και τη Γαλλία, με περίπου 22 GW. Στις υπόλοιπες χώρες σημαντικές αγορές αποτελούν η Ινδία με περίπου 50 GW και η Βραζιλία με εγκατεστημένη ισχύ περίπου 33 GW, οι οποίες και επενδύουν συστηματικά σε αιολικά έργα, αυξάνοντας ουσιαστικά και την παρουσία τους στην παγκόσμια αγορά.

Ενδεικτική είναι και η αντίστοιχη έρευνα που διεξήχθη από την IRENA με αναλυτική καταγραφή των χωρών και των ποσών παραγόμενης αιολικής ενέργειας. Σύμφωνα με τον πίνακα που ακολουθεί, εμφανής είναι η 20 ισχυρότερες χώρες σε αξιοποίηση και παραγωγή αιολικής ενέργειας κατά το έτος 2024.

Συνολικά, η κατανομή δείχνει ότι η αιολική ενέργεια είναι ένας τομέας όπου η ανάπτυξη επικεντρώνεται σε λίγες μεγάλες αγορές, με την Κίνα να ηγείται του κλάδου, ενώ οι ΗΠΑ, Γερμανία και άλλες επιλεγμένες χώρες συγκροτούν τη δεύτερη ζώνη ισχυρών δυνάμεων. Αξίζει να αναφερθεί ακόμα ότι στον εν λόγω πίνακα και για το ίδιο έτος η Ελλάδα βρίσκεται στην 24^η θέση με 5.36 GW.



Πίνακας 1: Ισχυρότερες χώρες στην αξιοποίηση αιολικής ενέργειας (Πηγή: IRENA 2025)

A/A	ΧΩΡΑ	ΠΑΡΑΓΩΓΗ 2024 (GW)
1	China	521.27
2	United States	152.65
3	Germany	72.82
4	India	48.16
5	Brazil	32.96
6	United Kingdom	32.15
8	Spain	31.81
9	France	24.59
10	Canada	17.52
11	Sweden	17.24
12	Australia	15.29
13	Italy	12.99
14	Turkey	12.97
15	Netherlands	11.68
16	Poland	10.06
17	Finland	8.36
18	Denmark	7.62
19	Mexico	7.32
20	Vietnam	6.18
...	...	...
24	Greece	5.36

Αντίστοιχα δεδομένα προκύπτουν και από την ανάλυση των επικυρωμένων και δημοσιευμένων δεδομένων της Energy Institute για το έτος του 2024. Πιο συγκεκριμένα, αποτυπώνεται με σαφήνεια η έντονη γεωγραφική συγκέντρωση της αιολικής ενέργειας, με την Κίνα να κυριαρχεί απόλυτα και να συγκεντρώνει το μεγαλύτερο ποσοστό της παγκόσμιας εγκατεστημένης ισχύος. Με πάνω από 521 GW, εκ των οποίων τα περισσότερα βρίσκονται στην ξηρά και ένα μικρότερο ποσοστό στη θάλασσα, η Κίνα έχει αναπτύξει ένα πολυδιάστατο δυναμικό που την καθιστά τον αδιαμφισβήτητο ηγέτη της αγοράς. Η ίδια χώρα και όσον αφορά στο υπεράκτιο περιβάλλον κατέχει τα ηνία, με υπερδιπλάσια εγκατεστημένη ισχύ σε σχέση με τη δεύτερη στην ίδια κατηγορία.

Οι Ηνωμένες Πολιτείες καταλαμβάνουν τη δεύτερη θέση με 152 GW, σχεδόν εξ ολοκλήρου σε χερσαία έργα. Η απουσία ουσιαστικής ανάπτυξης στη θαλάσσια αιολική ενέργεια υπογραμμίζει την υστέρηση της αμερικανικής αγοράς σε έναν τομέα, όπου η Ευρώπη έχει επενδύσει δυναμικά.

Η Ευρώπη παρουσιάζει ένα πιο διαφοροποιημένο προφίλ. Η Γερμανία και το Ηνωμένο Βασίλειο ξεχωρίζουν ως κορυφαίες αγορές, με σημαντική ανάπτυξη στα θαλάσσια έργα, ενώ χώρες όπως η Ολλανδία και το Βέλγιο έχουν στραφεί συστηματικά σε υπεράκτια έργα παρά το μικρότερο συνολικό τους μέγεθος. Παράλληλα, η Σκανδιναβία (Σουηδία, Νορβηγία, Φινλανδία, Δανία) βασίζεται κυρίως σε χερσαία έργα, αξιοποιώντας τοπικά πλεονεκτήματα σε αιολικό δυναμικό. Η Γαλλία βρίσκεται επίσης ψηλά, με προτεραιότητα στα χερσαία αιολικά, ενώ η ανάπτυξη των υπεράκτιων παραμένει περιορισμένη, κυρίως λόγω του αυστηρού νομοθετικού πλαισίου και των πολυδιάστατων κριτηρίων χρηματοδότησης τόσο από δημόσιους όσο και ιδιωτικούς φορείς.



Στην Ασία και τις χώρες του Ειρηνικού, χώρες όπως η Ταϊβάν, η Νότια Κορέα και η Ιαπωνία επενδύουν σε θαλάσσια αιολικά, επιβεβαιώνοντας την τάση της περιοχής να αναπτύσσει υποδομές στον τομέα αυτό. Η κατηγορία *Other Asia Pacific* εμφανίζεται με υπερβολικά υψηλά νούμερα, τα οποία πιθανότατα λειτουργούν ως συνοπτική συγκεντρωτική αναφορά και χρειάζονται περαιτέρω επεξήγηση.

Ο πίνακας παρουσιάζει τις χώρες με τη μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ αιολικής ενέργειας για το 2024, με διάκριση ανάμεσα σε ηπειρωτικό και θαλάσσιο δυναμικό.

Πίνακας 2: Κατανομή παραγωγής υπεράκτιας αιολικής ενέργειας 2024 (Πηγή: Energy Institute - Statistical Review of World Energy 2025)

A/A	A/A ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	ΧΩΡΑ	ΠΑΡΑΓΩΓΗ 2024 (GW)	ΗΠΕΡΙΩΤΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ 2024 (GW)	ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ 2024 (GW)
1	1	China	521.27	482.17	39.1
2	6	United Kingdom	32.15	17.4	14.75
3	3	Germany	72.82	63.61	9.22
4	15	Netherlands	11.68	6.93	4.75
5	30	Taiwan	3.89	0.92	2.97
6	18	Denmark	7.62	4.81	2.81
7	22	Belgium	5.59	3.33	2.26
8	9	France	24.59	23.1	1.49
9		<i>Other Asia Pacific</i>	7.25	7.15	1.10
10	21	Japan	5.83	5.54	0.290
11	11	Sweden	17.24	17.04	0.2
12	2	United States	152.65	152.48	0.17
13	35	South Korea	2.30	2.16	0.14
14	25	Norway	5.15	5.06	0.09
15	17	Finland	8.36	8.33	0.03

2.2 Αιολική ενέργεια στην Ελλάδα

Η αιολική ενέργεια στην Ελλάδα βρίσκεται σε φάση σταθερής ανάπτυξης και σταδιακής ωρίμανσης, αποτελώντας έναν από τους βασικούς πυλώνες της εγχώριας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Η χώρα έχει αξιοποιήσει σε σημαντικό βαθμό το αιολικό της δυναμικό στην ξηρά, με εγκαταστάσεις που έχουν κατανεμηθεί σε ορεινές και ημιορεινές περιοχές με υψηλούς και σταθερούς ανέμους. Η πορεία αυτή συνδέεται με τη βελτίωση των υποδομών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, την προοδευτική ενσωμάτωση των νησιών στο διασυνδεδεμένο δίκτυο και τη θεσμική θωράκιση που παρέχει ένα σχετικά ώριμο αδειοδοτικό πλαίσιο.

Αδιαμφισβήτητο γεγονός αποτελεί η ύπαρξη υπέρογκων ποσών διαθέσιμου αιολικού δυναμικού εντός των ελληνικών συνόρων. Το δυναμικό αυτό δύναται να ευνοήσει και να προσδώσει τις απαραίτητες ενεργειακές ποσότητες στις απομακρυσμένες και απρόσιτες περιοχές της Ελλάδας και δει τα νησιά. Η λειτουργία ενός συστήματος αποθήκευσης, διαχείρισης, χρήσης και προμήθειας του παραγόμενου ηλεκτρισμού θα συμβάλει τα μέγιστα στο ενεργειακό απόθεμα των νησιωτικών περιοχών.



Η συνολική εικόνα χαρακτηρίζεται από δύο τάσεις, αφενός την εδραίωση και τον κορεσμό σε αρκετές χερσαίες ζώνες, αφετέρου τη στροφή προς τη θάλασσα, όπου τα περιθώρια ανάπτυξης είναι πολλαπλάσια. Η δυναμική αυτή αναμένεται να καθορίσει την πορεία της αιολικής ενέργειας στη χώρα τις επόμενες δεκαετίες, με κύρια πρόκληση τον συγκερασμό της ενεργειακής αξιοποίησης με τις άλλες χρήσεις γης και θάλασσας.

Η κατανομή των χερσαίων αιολικών πάρκων στην Ελλάδα ακολουθεί τη γεωμορφολογία και το ανεμολογικό δυναμικό της χώρας. Οι περισσότερες εγκαταστάσεις βρίσκονται σε ημιορεινές και ορεινές περιοχές της ηπειρωτικής Ελλάδας, κυρίως στη Στερεά Ελλάδα, την Εύβοια, τη Θράκη και την Πελοπόννησο. Οι τοποθεσίες αυτές προσφέρουν υψηλές ταχύτητες ανέμου, μικρότερη πληθυσμιακή πίεση σε σχέση με τις αστικές περιοχές και σχετικά εύκολη πρόσβαση στο υφιστάμενο δίκτυο μεταφοράς. Επιπλέον, τα νησιά του Αιγαίου, αν και μικρότερης κλίμακας, φιλοξενούν αιολικά πάρκα τα οποία επωφελούνται από το ιδιαίτερα πλούσιο ανεμολογικό δυναμικό του Αιγαίου πελάγους.

Παράλληλα, η Ελλάδα βρίσκεται πλέον στη φάση της μετάβασης προς την αξιοποίηση του υπεράκτιου αιολικού δυναμικού της. Το ενδιαφέρον επικεντρώνεται κυρίως σε θαλάσσιες περιοχές με υψηλή ένταση ανέμων, αλλά και σε βάθη που απαιτούν προηγμένες τεχνολογικές λύσεις πλωτών ανεμογεννητριών. Η μετάβαση αυτή δεν είναι μόνο τεχνολογικά απαιτητική, αλλά και στρατηγικά κρίσιμη, καθώς συνδέεται με την ενεργειακή ασφάλεια της χώρας, τη μείωση της εξάρτησης από ορυκτά καύσιμα και τη δυνατότητα ανάδειξης της Ελλάδας ως περιφερειακού κόμβου πράσινης ενέργειας στη νοτιοανατολική Ευρώπη.

Στον αντίποδα, το υπεράκτιο πεδίο βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο σχεδιασμού αλλά με σαφείς κατευθύνσεις. Οι προτεινόμενες θαλάσσιες περιοχές χωροθέτησης εντοπίζονται κυρίως στο Βόρειο Αιγαίο, γύρω από την Εύβοια και την Ανατολική Κρήτη, καθώς και σε τμήματα του Ιονίου. Οι περιοχές αυτές παρουσιάζουν υψηλές εντάσεις ανέμων και ικανοποιούν τα βασικά κριτήρια τεχνικής βιωσιμότητας. Ωστόσο, η πλειονότητα χαρακτηρίζεται από μεγάλα βάθη, γεγονός που καθιστά τις ευρέως διαδεδομένες λύσεις με σταθερές βάσεις μη εφαρμόσιμες και οδηγεί σε μοντέλα πλωτής θεμελίωσης.

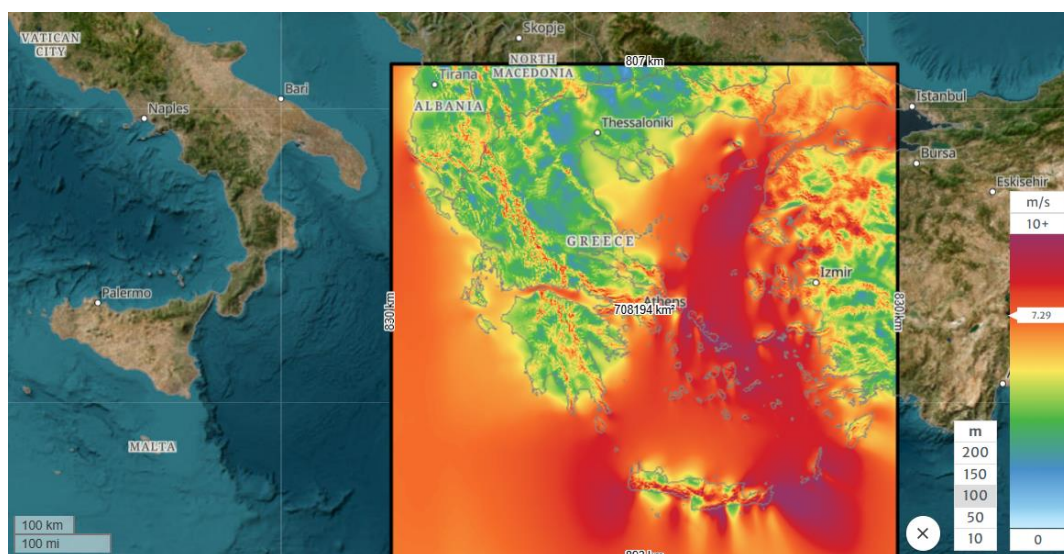
Η Ελλάδα αποτελείται από μεγάλες θαλάσσιες εκτάσεις, εντός των οποίων εντοπίζονται νησιά και βραχονησίδες, με μηδαμινό συγκριτικά μέγεθος. Συνέπεια αυτού είναι η δημιουργία μεγάλης έντασης ανέμων οι οποίοι κινούνται καθ' όλο το μήκος και πλάτος της χώρας. Ο αέρας στα περισσότερα νησιά κρίνεται ικανός και επαρκής για την ανάπτυξη αιολικών πάρκων ενισχύοντας δραστικά το ενεργειακό μίγμα του εκάστοτε τόπου.

Η εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού με την παραγωγή αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα ξεκίνησε τη δεκαετία του '80, όταν τοποθετήθηκαν οι πρώτες μικρές ανεμογεννήτριες πιλοτικού χαρακτήρα σε νησιωτικές περιοχές, κυρίως στην Κύθνο και τη Μύκονο, με στόχο την κάλυψη τοπικών αναγκών και την εξοικονόμηση καυσίμων σε αυτόνομα δίκτυα. Το πρώτο αιολικό πάρκο, εγκαταστάθηκε από την ΔΕΗ, το 1982 στην Κύθνο, περιλαμβάνοντας πέντε ανεμογεννήτριες, συνολικής ισχύος 100 kW. Το πραγματικό σημείο καμπής, ωστόσο, σημειώθηκε τη δεκαετία του 1990, με την ίδρυση της ΔΕΗ Ανανεώσιμες και την εγκατάσταση των πρώτων οργανωμένων αιολικών πάρκων σε Εύβοια, Λακωνία και νησιά του Αιγαίου.

Πέραν όμως της θαλάσσιας ζώνης, έντονοι άνεμοι – ικανοί να παράξουν μεγάλες ποσότητες αιολικής ενέργειας εντοπίζονται και στην ηπειρωτική χώρα. Στη στεριά οι πιο πρόσφορες περιοχές εγκατάστασης αιολικών πάρκων εντοπίζονται στην Πελοπόννησο και την δυτική και



βορειανατολική Ελλάδα, σύμφωνα και με το χάρτη του αιολικού δυναμικού, που παρατίθεται ακολούθως.



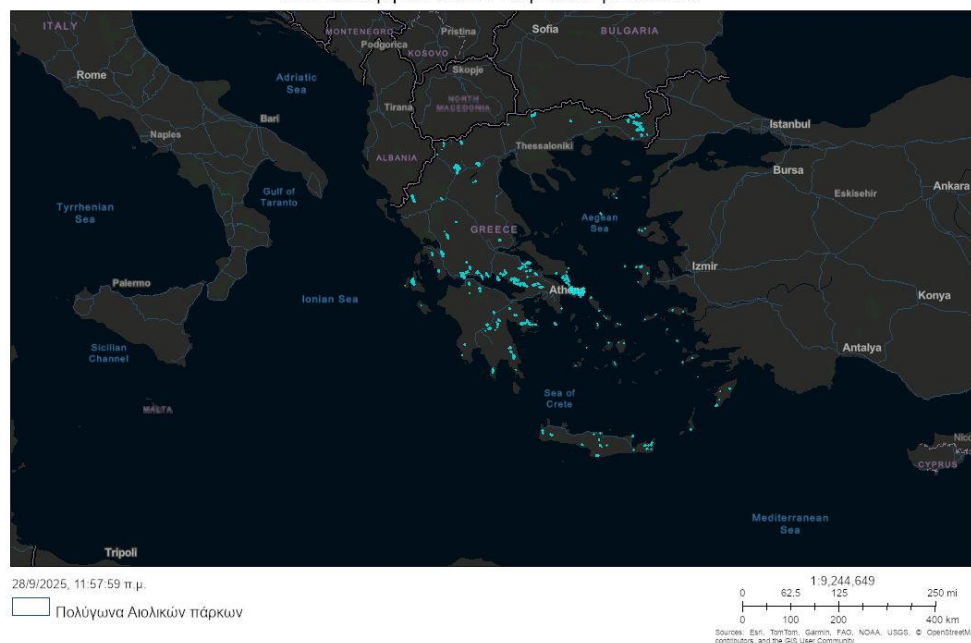
Χάρτης 2: Χάρτης Αιολικού Δυναμικού σε ύψος 100 m (Πηγή: Global Wind Atlas)

Στο πλαίσιο των εγχώριων δεδομένων, η Ελλάδα εκμεταλλεύεται το χερσαίο αιολικό της δυναμικό με την κατασκευή πλήθους αιολικών πάρκων, σε περιοχές της ηπειρωτικής χώρας αλλά και σε νησιά, κυρίως στην Κρήτη, στην Εύβοια και στα νησιά του Αιγαίου. Σύμφωνα με τα πιο πρόσφατα δεδομένα της Ελληνικής Επιστημονικής Ένωσης Αιολικής Ενέργειας (ΕΛΕΤΑΕΝ), στο τέλος του 2024 έχουν εγκατασταθεί και λειτουργούν 3.017 ανεμογεννήτριες με συνολική εγκατεστημένη ισχύ της τάξεως 5.351 MW.

Η αιολική ενέργεια στην Ελλάδα κατανέμεται κυρίως στη Στερεά Ελλάδα, που συγκεντρώνει περίπου το 44% της συνολικής παραγωγής (2.427 MW), ακολουθούμενη από την Πελοπόννησο με 13% (709 MW) και την Ανατολική Μακεδονία & Θράκη με 9% (535 MW). Άλλες περιοχές με αξιοσημείωτη συνεισφορά είναι η Δυτική Μακεδονία, Θεσσαλία, νησιωτικές περιοχές αλλά με μικρότερη συνολική ισχύ. Το μεγαλύτερο αιολικό πάρκο της χώρας είναι το Κάβο Ντόρο (Kafireas) στη νότια Εύβοια, με εγκατεστημένη ισχύ περίπου 167,9 MW και 73 ανεμογεννήτριες. Σημαντικό αντίκτυπο αποτελεί το γεγονός ότι μέχρι τα μέσα του 2025, το αιολικό δυναμικό της χώρας ενισχύθηκε περαιτέρω με την προσθήκη 37 νέων ανεμογεννητριών, που αύξησαν την εγκατεστημένη ισχύ κατά 152,2 MW.



Εν Λειτουργία Αιολικά Πάρκα στην Ελλάδα



Χάρτης 3: Χάρτης εν λειτουργία αιολικών πάρκων στην Ελλάδα (Πηγή: ΕΛΕΤΑΕΝ)

Σημαντική ωστόσο είναι η αναφορά στο μεγάλο ποσοστό των αντιτιθέμενων απόψεων του κοινού και των κατοίκων στην εγκατάσταση ανεμογεννητριών. Ενδεικτικό είναι το παράδειγμα των Κυκλάδων, όπου πληθώρα πλήρως μελετημένων και αδειοδοτημένων έργων, έχουν καθυστερήσει και ακυρωθεί λόγω της κοινής τοπικής γνώμης. Τα επιχειρήματα διαφέρουν και ποικίλουν, ωστόσο συνήθως στρέφονται γύρω από τον τουριστικό αντίκτυπο και την αισθητική υποβάθμιση που θα υποστούν οι περιοχές, ενώ συχνές είναι και οι αντιδράσεις στο πλαίσιο της ακουστικής ρύπανσης.

2.3 Υπεράκτια αιολική ενέργεια – Διεθνής Εμπειρία

Η υπεράκτια αιολική ενέργεια αποτελεί έναν από τους ταχύτερα αναπτυσσόμενους τομείς Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας διεθνώς. Σε αντίθεση με τα χερσαία αιολικά, τα υπεράκτια εκμεταλλεύονται σταθερότερα και ισχυρότερα αιολικά πεδία, επιτρέποντας την εγκατάσταση μεγαλύτερων ανεμογεννητριών και την ανάπτυξη πάρκων πολύ μεγάλης κλίμακας. Η ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας απαιτεί ιδιαίτερη τεχνογνωσία και μεγάλες επενδύσεις σε υποδομές, ωστόσο τα αποτελέσματα σε επίπεδο παραγωγής και σταθερότητας είναι εντυπωσιακά.

Η διαφορά χερσαίου με υπεράκτιο αιολικό πάρκο, παραμένει έντονη, με το Global Wind Energy Council να δηλώνει ότι το 2023–2024 περίπου το 93% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος προκύπτει από αιολικά πάρκα των ηπειρωτικών περιοχών, ενώ μόλις το 7% από υπεράκτια. Ωστόσο, η αξιοποίηση του υπεράκτιου αιολικού δυναμικού αυξάνεται ταχύτερα σε περιοχές με κατάλληλη πολιτική στήριξη και πλούσιο αιολικό δυναμικό (π.χ. Β. Θάλασσα, Κίνα, Ηνωμένο Βασίλειο). Λόγω των δεδομένων αυτών, οι Οδηγίες και οι βραχυπρόθεσμοι στόχοι που τίθενται από την παγκόσμια αγορά ενέργειας, βασίζουν μεγάλο μέρος της δυναμικότητας τους σε επιταχυνόμενη ανάπτυξη υπεράκτιου αιολικού.



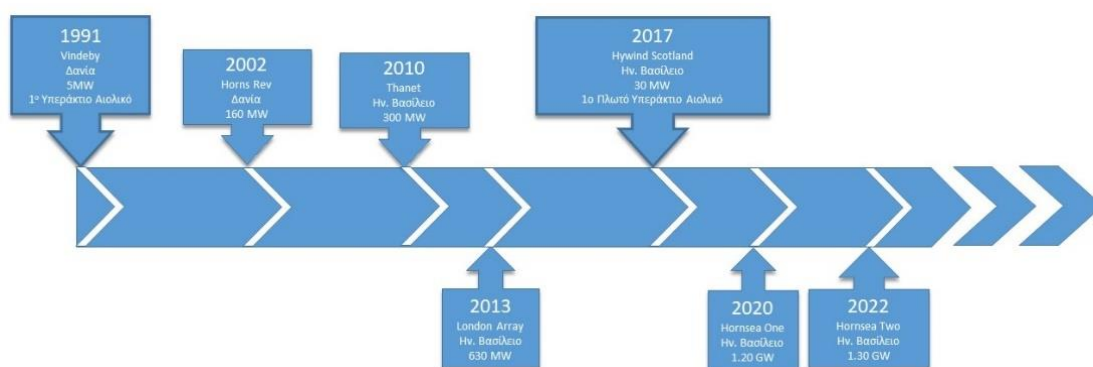
Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στο υπεράκτιο τμήμα ολοένα και εξελίσσονται, προσφέροντας υψηλότερους συντελεστές δυναμικότητας (capacity factors), αλλά και υψηλότερο κεφάλαιο και λειτουργικό κόστος. Η απαίτηση στις υποδομές του δικτύου με τα υποθαλάσσια καλώδια και του σταθμούς παρακολούθησης και διαχείρισης, ενώ ακόμα και οι ειδικές απαιτήσεις περιβαλλοντικής αδειοδότησης, αποτελούν τους κύριους παράγοντες της εξέλιξης αυτής. Η ανάγκη επέκτασης σε βαθύτερα νερά επιταχύνει την ανάγκη για τεχνολογίες πλωτών πάρκων παγκοσμίως.

Η πορεία της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας ξεκινά από τη δεκαετία του 1990 και συγκεκριμένα το 1991 στο Vindeby (Δανία), όπου στήθηκε το πρώτο υπεράκτιο αιολικό πάρκο παγκοσμίως, με 11 ανεμογεννήτριες θεμελιωμένες σε βάθη μεταξύ 2-5 m και ισχύος 450 kW η καθεμία. Παρότι μικρής κλίμακας, αποτέλεσε πιλότο για την απόδειξη της εφικτότητας της τεχνολογίας. Η επιτυχία της εν λόγω εγκατάστασης, έθεσε τις κατάλληλες βάσεις για την ανάπτυξη πλήθους ακόμα πάρκων και την ωρίμανση της αντίστοιχης τεχνολογίας, σε χώρες της Ευρώπης και δευτερευόντως της Ασίας.

Στις αρχές του 2000 εγκαταστάθηκαν τα πρώτα μεγάλα έργα σε ρηχά νερά έως 20–30 m βάθους στη Βόρεια Θάλασσα (Ηνωμένο Βασίλειο, Γερμανία, Ολλανδία). Ενδεικτικά, τα Horns Rev (Δανία, 2002) και London Array (Ηνωμένο Βασίλειο, 2013, 630 MW) έδειξαν πώς τα υπεράκτια έργα μπορούν να συμβάλουν σημαντικά στο εθνικό ενεργειακό μίγμα.

Από το 2010 και μετά πραγματοποιείται μία κλιμάκωση ισχύος και της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από υπεράκτια αιολικά, καθώς επέρχεται σταδιακή αύξηση διαμέτρου ρότορα (>150 m) και εγκατεστημένης ισχύος ανά ανεμογεννήτρια (>6–8 MW). Έργα όπως το Gemini (Ολλανδία, 600 MW) και το Gode Wind (Γερμανία, 582 MW) αποτελούν ορόσημα αυτής της εποχής.

Μέσα στην τελευταία δεκαετία, συμμετέχουν και μικρότερες χώρες σε μελέτες και έργα υπεράκτιων αιολικών. Παράλληλα, πραγματοποιείται ταχύτατη ανάπτυξη στην τεχνολογία των πλωτών υπεράκτιων ανεμογεννητριών για μεγαλύτερα βάθη, με έργα όπως το 1^ο πλωτό υπεράκτιο αιολικό πάρκο Hywind Scotland (2017, 30 MW, το πρώτο πλωτό) και το Kincardine (2021, 50 MW). Το έργο Hywind αφορά σε 5 ανεμογεννήτριες ισχύος 6 MW έκαστη, οι οποίες εγκαταστάθηκαν σε βάθη που κυμαίνονται μεταξύ 95 – 120 m και στα 25 km από την ακτή.



Διάγραμμα 2: Χρονοδιάγραμμα με ορόσημα στην ανάπτυξη των υπεράκτιων αιολικών πάρκων

Η διεθνής εμπειρία θέτει άρρηκτη σύνδεση μεταξύ της ανάπτυξης υπεράκτιων αιολικών και της τεχνολογικής προόδου μεγαλύτερων ανεμογεννητριών και καινοτόμες υποβάσεις και θεμέλια. Οι πλωτές πλατφόρμες με τη σειρά του, προβλέπεται να διευκολύνουν και



παράλληλα να επιταχύνουν το δρόμο για έργα σε μεγάλο θαλάσσιο βάθος (π.χ. Μεσόγειος, Ιαπωνία, ΗΠΑ δυτική ακτή).

Η μελέτη της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας έχει θέσει τις κατάλληλες βάσεις για την ωρίμανση έργων και κατασκευών θαλάσσιων αιολικών ανεμογεννητριών. Σε αυτό έχει συμβάλει τα μέγιστα η διαρκής επιστημονική έρευνα και μελέτη που πραγματοποιείται από δημόσιους και ιδιωτικούς φορείς, καθώς έχει επενδυθεί μεγάλο μέρος του ερευνητικού δυναμικού και των διατιθέμενων πόρων για την παροχή της απαραίτητης τεχνογνωσίας.

Αξίζει να αναφερθεί ακόμα, ότι τα υφιστάμενα υπεράκτια αιολικά πάρκα κατά κύριο λόγο είναι τύπου σταθερού πυθμένα, τύπου τριπόδου, οι οποίες όπως περιγράφεται αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο θεμελιώνονται σε βάθος μέχρι 50 m. Σε μεγαλύτερα βάθη προτιμώνται και κατασκευάζονται πλωτές υπεράκτιες ανεμογεννήτριες, οι οποίες συνδέονται με τον πυθμένα μέσω κατάλληλης καλωδίωσης.

Εν έτη 2025, οι μεγαλύτερες αγορές υπεράκτιων αιολικών πάρκων χωροθετούνται σε Κίνα, Ηνωμένο Βασίλειο, Γερμανία και στις Κάτω Χώρες. Σύμφωνα και με τους πίνακες που καταγράφηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο η Κίνα αποτελεί πρωτοπόρο σε ενεργειακή παραγωγή από υπεράκτια αιολικά πάρκα. Στην Ευρώπη, τη μεγαλύτερη δύναμη του τομέα αποτελεί το Ην. Βασίλειο με ισχύ σχεδόν στα 15 GW και πολλά έργα σε κατασκευή. Όσον αφορά τις ΗΠΑ, παρόλο που η κατασκευή του πρώτου υπεράκτιου πάρκου πραγματοποιήθηκε το 2016, η τεχνογνωσία και η επένδυση στον τομέα αυτό έχει αναπτυχθεί ραγδαία.

2.3.1 Πλεονεκτήματα υπεράκτιων αιολικών πάρκων

Τα υπεράκτια αιολικά πάρκα συνιστούν μία από τις πλέον υποσχόμενες τεχνολογίες ΑΠΕ, συνδυάζοντας υψηλή ενεργειακή απόδοση, μειωμένες κοινωνικές και περιβαλλοντικές συγκρούσεις και σημαντικά οικονομικά και στρατηγικά οφέλη. Παρά τις προκλήσεις κόστους και υποδομών, οι διεθνείς τάσεις δείχνουν ότι θα αποτελέσουν τον πυρήνα της ενεργειακής μετάβασης τις επόμενες δεκαετίες. Τα εν λόγω πάρκα παρουσιάζουν πληθώρα πλεονεκτημάτων τόσο συγκριτικά με τα αντίστοιχα πάρκα της ηπειρωτικής χώρας όσο και ξεχωριστά, ως μορφή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Σημαντικότερα εκ των πλεονεκτημάτων είναι τα εξής:

Υψηλότερες ταχύτητες ανέμου

Το αιολικό δυναμικό που πνέει στην ανοιχτή θάλασσα και ειδικότερα σε περιοχές μεγαλύτερου βάθους, είναι κατά κανόνα ισχυρότερο και πιο σταθερό, από τους αντίστοιχους ανέμους που συναντώνται σε χερσαίες και παράκτιες περιοχές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του συντελεστή δυναμικότητας (capacity factor), φτάνοντας συχνά το 45–60 %, έναντι 25–35 % για τα χερσαία πάρκα. Το αυξημένο αιολικό δυναμικό μπορεί να γίνει εύκολα εκμεταλλεύσιμο χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες ανεμογεννήτριες με το κατάλληλο ύψος πτερωτής, ώστε να αξιοποιείται πλήρως το εύρος ασφαλούς λειτουργίας της.

Μεγαλύτερη ισχύς ανεμογεννητριών

Οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες παρουσιάζουν σημαντικά μεγαλύτερο όφελος σε σχέση με τις χερσαίες, κυρίως λόγω της αυξημένης ισχύος που μπορούν να αποδώσουν. Η τεχνολογία τους επιτρέπει την εγκατάσταση πολύ μεγαλύτερων διαστάσεων μηχανών, με πτερύγια και



πύργους που θα ήταν δύσκολο να τοποθετηθούν στη στεριά λόγω χωροταξικών και κοινωνικών περιορισμών. Στη θάλασσα, όπου οι άνεμοι είναι εντονότεροι, πιο σταθεροί και λιγότερο διαταραγμένοι από φυσικά εμπόδια, η ενεργειακή απόδοση αυξάνεται σημαντικά, επιτρέποντας την αξιοποίηση ανεμογεννητριών με ονομαστική ισχύ που ξεπερνά τα 12–15 MW η καθεμία. Έτσι, με μικρότερο αριθμό εγκαταστάσεων επιτυγχάνεται μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, γεγονός που μειώνει το κόστος ανά παραγόμενη μονάδα και ενισχύει τη συμβολή των υπεράκτιων πάρκων στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών και στην επίτευξη στόχων ενεργειακής μετάβασης. Σημαντική παράμετρο αποτελεί επίσης και η μικρότερη απαίτηση έκτασης σε σχέση με όλα τα έργα παραγωγής ανανεώσιμης μορφής ενέργειας, με την ανάλογη παραγόμενη ισχύ.

Μείωση εκπομπών CO₂

Κάθε GW υπεράκτιας ισχύος αντιστοιχεί σε αποφυγή εκπομπών εκατομμυρίων τόνων CO₂ σε σχέση με την παραγωγή από ορυκτά καύσιμα. Ειδικότερα και σε χώρες όπως η Ελλάδα, οι ενεργειακές ανάγκες καλύπτονται κατά βάση από την καύση ορυκτών καυσίμων. Τα παράγωγα του πετρελαίου, του λιγνίτη καθώς και του φυσικού αερίου, τα οποία απαιτούν οι συμβατικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής, αυξάνουν τις εκπομπές του CO₂ και άλλων αέριων ρύπων, όπως είναι το SO_x και NO_x, όπως και τις ποσότητες υπτάμενης στάχτη ή/και σκουριάς. Η λειτουργία των αιολικών πάρκων, και κατά συνέπεια και των υπεράκτιων, αξιοποιούν μόνο την κίνηση του ανέμου για την παραγωγή ενέργειας, μη παράγοντας ουσιαστικά επιπλέον ρυπογόνα αέρια. Σχετικές ουσίες παράγονται μόνο κατά την περίοδο κατασκευής του αιολικού πάρκου, ενώ σύμφωνα με το Παγκόσμιο Συμβούλιο Ενέργειας (1994), η δαπανώμενη ενέργεια για την κατασκευή της αποσβένεται κατά το 1ο έτος λειτουργίας της.

Μεγαλύτερη προβλεψιμότητα

Πέρα από τις αυξημένες εντάσεις που πνέουν στη θάλασσα, οι αιολικές συνθήκες εμφανίζουν μικρότερη διακύμανση, επιτρέποντας καλύτερη ένταξη στο δίκτυο και μειώνοντας ανάγκες εξισορρόπησης.

Μείωση συγκρούσεων γης

Προφανές είναι και το χωροταξικό όφελος, καθώς η ηπειρωτική χώρα αξιοποιείται για πολλές και διαφορετικές χρήσεις γης. Αντίθετα, ο θαλάσσιος χώρος έχει περιοχές ιδανικές για την εγκατάσταση εν λόγω έργων. Συνεπώς, η εγκατάσταση στη θάλασσα αποφεύγει τις συγκρούσεις με γεωργικές, αστικές ή δασικές χρήσεις που παρατηρούνται στην ξηρά.

Περιορισμένη οπτική και ακουστική όχληση

Ταυτόχρονα επιλύεται και η σημαντικότερη ανθρώπινη αντίρρηση στα πλαίσια κατασκευής αιολικών πάρκων, η οπτική και η ακουστική όχληση. Συγκεκριμένα και λόγω της καμπυλότητας της γης, σε απόσταση μεγαλύτερη των 30–40 km από την ακτή, τα πάρκα είναι δυσδιάκριτα από την ξηρά και δεν προκαλούν ηχορύπανση (Pedersen, E.; Larsman, P., 2008).

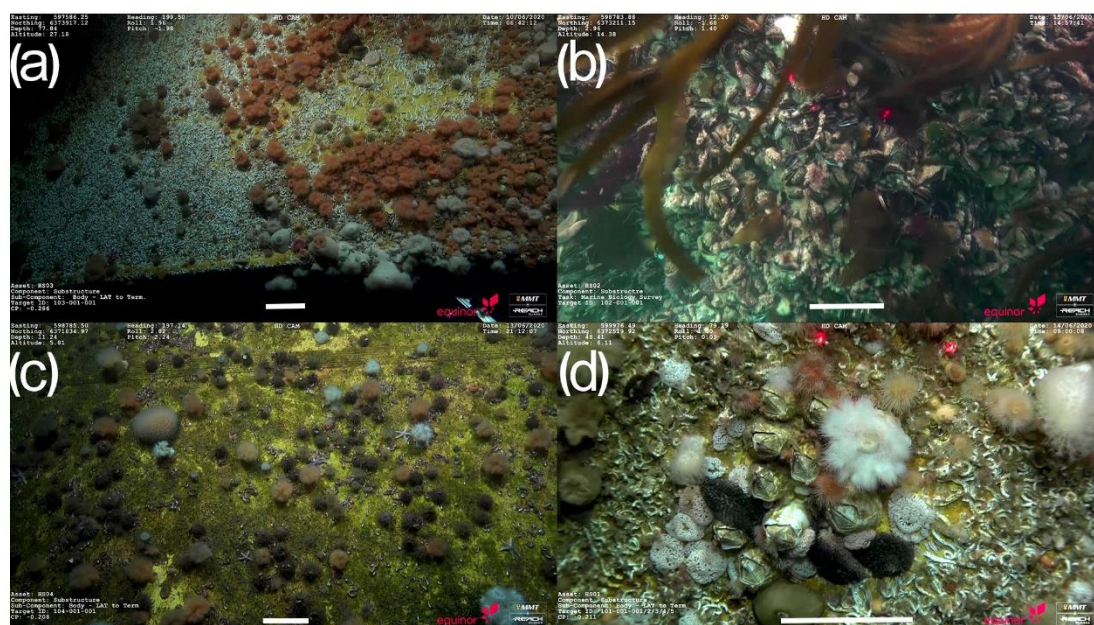
Ανάπτυξη υδροβιότοπων

Σημαντικό επίσης είναι ότι ο τρόπος εγκατάστασης και θεμελίωσης υπεράκτιων ανεμογεννητριών δύναται να μετατραπεί σε θαλάσσιο βιότοπο υπό τη μορφή τεχνητού



υφάλου, επιχείρημα που αντιτίθεται στη γενικότερη κοινή γνώμη. Σύμφωνα με αδιάσειστα στοιχεία αυξάνεται η ποικιλομορφία των έμβιων υποθαλάσσιων οργανισμών (Lindeboom et al., 2011) και των ιχθυοπληθυσμών. Εφόσον ακόμα, απαγορεύεται η αλιεία σε περιοχές θαλάσσιων εγκαταστάσεων η περιοχή μπορεί να μετατραπεί σε καταφύγιο άγριας ζωής (Esteban et al, 2011 και Dannheim et al, 2025).

Σε σχετική έρευνα που πραγματοποιήθηκε σε ένα από τα μεγαλύτερα υπεράκτια αιολικά πάρκα στο Hywind Scotland Pilot Park, παρατηρήθηκαν πάνω από 11 φυτικοί υδρόβιοι οργανισμοί, οι οποίοι ταξινομήθηκαν σε 121 διαφορετικά είδη (48 είδη ταυτοποιήθηκαν ως επικολημένη πανίδα (epifouling fauna), ενώ 73 ταυτοποιήθηκαν ως κινητά είδη). Η βιντεοσκόπηση πραγματοποιήθηκε με χρήση έγχρωμης κάμερας υψηλής ευκρίνειας, τοποθετημένης σε τηλεχειριζόμενο υποβρύχιο όχημα (WROV) εργασιακής κλάσης, με υποστήριξη από προβολείς LED και ειδικά σχεδιασμένα φώτα και αισθητήρες. (Rikard Karlsson et. al 2022).



Εικόνα 1: Παράδειγμα επικολημένης πανίδας αποικισμού στα θεμέλια της ανεμογεννήτριας. (Παρατίθεται επεξήγηση: (a) *Spirobranchus* sp. and *M. senile* at the bottom of the HS03 substructure. (b) Substructure HS02, with *Mytilus* spp., *Laminaria* sp. and potential amphipod tubes at 3 m depth. (c) Substructure HS04, with grazing sea urchins and biofilm at 11 m depth. (d) Substructure HS01, with nudibranchs (*A. papillosa*) and barnacles (*Balanoidea*) at 48 m depth. Scale bar: 10 cm. – Rikard Karlsson et. al 2022)

Δημιουργία βιομηχανικού κλάδου

Για την ανάπτυξη των υπεράκτιων αιολικών πάρκων απαιτούνται λιμενικές υποδομές, ναυπηγεία, ειδικά πλοία και εξειδικευμένο προσωπικό, γεγονός που δημιουργεί πλήθος θέσεων εργασίας και αναπτυξιακές προοπτικές για τοπικές οικονομίες. Οι συνοδές υποδομές που απαιτούνται σε τέτοιου είδους έργα είναι πολλές, μεγάλες και απαιτούν εργατικό δυναμικό με την απαραίτητη ανά τομέα εξειδίκευση.



2.3.2 Μειονεκτήματα των Υπεράκτιων Αιολικών Πάρκων

Ωστόσο, όπως όλα τα έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, έτσι και τα υπεράκτια αιολικά, εμφανίζουν ορισμένα αρνητικά σημεία. Είναι προφανές, ότι κατά την μελέτη και εν συνεχεία την κατασκευή ενός έργου τέτοιας εμβέλειας, οφείλουν να προβληθούν και αυτά τα στοιχεία.

Υψηλό Κόστος Επένδυσης και Λειτουργίας

Οι θαλάσσιες εγκαταστάσεις απαιτούν εξειδικευμένες θεμελιώσεις, όπως πασσαλόμπτυξη με monopiles ή jacket structures, ή ακόμα και πλωτές πλατφόρμες σε μεγάλα βάθη, που συνεπάγονται ιδιαίτερα δαπανηρές λύσεις σε σχέση με τις χερσαίες εφαρμογές. Παράλληλα, η ανάγκη κατασκευής υποθαλάσσιων δικτύων μεταφοράς υψηλής τάσης και η εγκατάσταση υπεράκτιων σταθμών μετατροπής αυξάνουν το κόστος, ενώ οι διαδικασίες συντήρησης και επισκευής είναι περίπλοκες, εξαρτώμενες από ειδικά σκάφη και ευνοϊκές καιρικές συνθήκες.

Στις θαλάσσιες περιοχές απαιτούνται μεγάλα κεφάλαια για την κάλυψη του κόστους τόσο της εγκατάστασης και της θεμελίωσης, όσο και της διασύνδεσης με την ηπειρωτική χώρα μέσω των υποβρυχίων καλωδίων. Η κατασκευή των ανεμογεννητριών θα πρέπει να είναι ανθεκτική θύελλες, έντονους κυματισμούς, αλλά και στη διάβρωση από το θαλασσινό νερό, χαρακτηριστικά που επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό και το κόστος των υλικών κατασκευής.

Επίδραση στα οικοσυστήματα

Τα έργα κατασκευάζονται μακριά από την ακτή, ώστε να μην παρεμποδίζουν την κίνηση των ιπτάμενων πληθυσμών και των θηλαστικών που αναζητούν την τροφή τους. Αυτό όμως συνεπάγεται με οικονομικά δυσμενέστερη τη μεταφορά της ενέργειας. Η υποθαλάσσια διασύνδεση αυξάνεται, αυξάνοντας έτσι και το κόστος μεταφοράς, λειτουργίας και συντήρησης. Σύμφωνα με σχετικό ΕΠΧΣΑΑ για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας «επιτρέπεται η χωροθέτηση αιολικών εγκαταστάσεων εντός των Ζωνών Ειδικής Προστασίας (ΖΕΠ) της ορνιθοπανίδας της Οδηγίας 79/409/ΕΟΚ, ύστερα από τη σύνταξη ειδικής ορνιθολογικής μελέτης και σύμφωνα με τις ειδικότερες προϋποθέσεις και περιορισμούς που θα καθορίζονται στην οικεία πράξη έγκρισης περιβαλλοντικών όρων».

Σε έρευνα που πραγματοποίησε η ελληνική WWF σχετικά με την υποτιθέμενη μείωση του πληθυσμού των πτηνών λόγω της πρόσκρουσής τους με τα πτερύγια των ανεμογεννητριών. Τα αποτελέσματα της διετής έρευνας αναφέρουν ότι η θνησιμότητα των πτηνών από τη συγκεκριμένη αιτία είναι μικρή. Εντύπωση έκανε το γεγονός ότι εξ αυτών η θνησιμότητα των αρπακτικών πουλιών ήταν μηδαμινή. Συμπληρωματικά, πρέπει να σημειωθεί ότι κατά τις νυχτερινές ώρες, οι ανεμογεννήτριες οφείλουν να φέρουν φωτεινή σήμανση, προκαλώντας ενδεχομένως κάποιο αποπροσανατολισμό κατά την κίνηση των πουλιών.

Ορισμένοι θαλάσσιοι οργανισμοί, ακόμα, εμφανίζουν ευαισθησία στα ηλεκτρομαγνητικά πεδία που δημιουργούνται από τα καλώδια υψηλής τάσης ρεύματος, που χρησιμοποιούνται στη διασύνδεση των ανεμογεννητριών με την στεριά (Gill, 2005). Κατά την κατασκευή (π.χ. πασσαλόμπτυξη) προκαλείται υποβρύχιος θόρυβος που επηρεάζει κητώδη και ψάρια. Ενδεχομένως και τα συστήματα αγκύρωσης, η υποθαλάσσια θεμελίωση και τα υλικά προστασίας έναντι της διάβρωσης, να επιφέρουν κάποιο αντίκτυπο στα θαλάσσια οικοσυστήματα, ωστόσο όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, έχουν εντοπιστεί περιπτώσεις κατά τις οποίες, έχει ευνοηθεί η ανάπτυξη θαλάσσιων οικοσυστημάτων.



Οπτικοακουστική όχληση

Είναι αδιαμφισβήτητο γεγονός ότι ειδικά κατά τη φάση κατασκευής, αυξάνεται η ακουστική όχληση από τα πλοία μεταφοράς των επιμέρους τμημάτων. Το θαλάσσιο οικοσύστημα ενδέχεται σε αυτό το διάστημα να επηρεαστεί, ειδικά κατά τη φάση της θεμελίωσης σύμφωνα με σχετικές μελέτες (Nedwell, Howell, 2004; Madsen et al., 2006).

Κατά τη φάση της λειτουργίας θόρυβος προκαλείται από την κίνηση των πτερυγίων, ο οποίος καλείται και αεροδυναμικός θόρυβος. Για τη μείωση του θορύβου οι κατασκευαστές μεριμνούν σχεδιάζοντας ιδανικότερα τα πτερύγια καθώς και το σχήμα των ανεμογεννητριών, ενώ ταυτόχρονα συνιστούν χαμηλότερο αριθμό στροφών. Από σχετικές μετρήσεις θορύβου που πραγματοποιήθηκαν, οι ανεμογεννήτριες δεν είναι επιβλαβείς, προς τα ακουστικά όργανα θαλάσσιων οργανισμών σε απόσταση μεγαλύτερη των 100 m από την πηγή (Thomsen et al., 2006). Γενικά τα επίπεδα θορύβου που προκαλεί μια Α/Γ είναι συγκριτικά πολύ χαμηλότερα από αυτά των αυτοκινητοδρόμων, τρένων, αεροπλάνων ή εργοταξίων. Οι προσπάθειες περιορισμού του όμως όσο το δυνατόν περισσότερο είναι απαραίτητες. Σε γενικά πλαίσια, επιδιώκεται ο θόρυβος να μην υπερβαίνει τα 40 dB τη νύχτα και τα 50 dB τη μέρα. Σημειώνεται ότι το ποσοστό μείωσης των ηχοεκπομπών, ώστε να βρίσκονται στα επιτρεπτά όρια, εξαρτάται ισχυρά και από την απόσταση μεταξύ Α/Γ και του εκάστοτε παρατηρητή.

Αντίστοιχα και η οπτική όχληση που ενδέχεται να προκαλείται στους ανθρώπους της ηπειρωτικής χώρας, αναμένεται να φέρει αντιδράσεις. Παρόλο που η όχληση είναι πολύ μικρότερου βεληνεκούς, από αντίστοιχα έργα στην ηπειρωτική χώρα, περιοχές με έντονη παραθαλάσσια κατοίκηση ή/και σημεία ενδιαφέροντος και παραλίες, αναμένεται να αντιτεθούν σε σχετικές επεμβάσεις.

Θαλάσσιες Μεταφορές

Στο πλαίσιο των θαλάσσιων μεταφορών, σημαντικό στοιχείο αποτελεί και η πιθανή ανάγκη χάραξης νέων γραμμών ναυσιπλοΐας. Σύμφωνα με το ΦΕΚ 2464/Β/03.12.200, ωστόσο, λαμβάνονται υπόψη κατά το βέλτιστο δυνατό οι κατοχυρωμένες γραμμές ναυσιπλοΐας επιβατικών και εμπορικών γραμμών και αποφεύγεται η κατασκευή εν λόγω πάρκων, από τις περιοχές διέλευσης των ακτοπλοϊκών γραμμών.

2.4 Υπεράκτια αιολική ενέργεια στην Ελλάδα

2.4.1 Υφιστάμενη κατάσταση

Η Ελλάδα, αποτελεί μία σημαντική χώρα στο πλαίσιο της εκμετάλλευσης της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας. Αυτό οφείλεται κυρίως στο αυξημένο αιολικό δυναμικό, στις μικρές αποστάσεις από ακτές ανεπτυγμένων αστικών κέντρων, όπως αυτά των νησιών, αλλά και στη βαθυμετρία, η οποία παρουσιάζει σημαντικά θετικά χαρακτηριστικά. Οι συζητήσεις μεταξύ των υπουργικών φορέων αλλά και των ιδιωτικών επιχειρήσεων και επενδυτών, έχουν ξεκινήσει ήδη εδώ και δεκαετίες.

Στο τέλος του 2008, θεσπίσθηκε το «Ειδικό Πλαίσιο Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης για τις Α.Π.Ε.» (ΚΥΑ 49828/2008, άρθρο 10) που περιλαμβάνει πρόβλεψη για

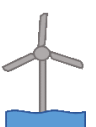


θαλάσσια αιολικά πάρκα και θέτει αρχικά κριτήρια χωροθέτησής τους (ΕΛΕΤΕΑΝ, 2013). Έπειτα, με τροποποίηση του νόμου του 2006 ορίζεται ότι επιτρέπεται η εγκατάσταση ΘΑΠ, σύμφωνα με τις ρυθμίσεις του άρθρου 10 του ΕΧΠ-ΑΠΕ και έπειτα από ειδικό σχέδιο που υποβάλλεται σε διαδικασία Στρατηγικής Περιβαλλοντικής Εκτίμησης (ΣΜΠΕ) και εγκρίνεται με Π.Δ. Με Π.Δ καθορίζεται η ακριβής θέση των θαλάσσιων αιολικών πάρκων, η θαλάσσια έκταση που καταλαμβάνουν καθώς και η μέγιστη εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς τους.

Το Εθνικό Πρόγραμμα Ανάπτυξης Θαλάσσιων Αιολικών Πάρκων (ΕΠΑΘΑΠ), ήταν το πρόγραμμα ανάπτυξης θαλάσσιων αιολικών πάρκων στο πλαίσιο του άρθρου 6Α του ν.3851/2010 και προσπάθησε να καθορίσει την ακριβή θέση των θαλάσσιων αιολικών πάρκων, τη θαλάσσια έκταση που καταλαμβάνουν και τη μέγιστη εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύ τους. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μελέτης, η συνολική ισχύς των θαλάσσιων αιολικών πάρκων με έδραση στον πυθμένα, που θα μπορούσαν πιθανά να εγκατασταθούν στον ελληνικό χώρο, κυμαίνεται από 1,700 MW (τυπικό σενάριο) έως 3,600 MW (μέγιστο σενάριο). Για την μελέτη εξετάστηκαν μόνο λύσεις Α/Γ σταθερού θεμελίου (για βάθη από 30 έως 50 m), καθώς η πλωτή τεχνολογία ΘΑΠ κρίθηκε τότε, ανώριμη. Πλωτές λύσεις ενδέχεται να εξεταστούν σε δεύτερη φάση του αντίστοιχου προγράμματος (ορίζοντας έως το 2025), εφόσον κριθεί σκόπιμο (ΚΑΠΕ, 2012).

Τα κριτήρια που ακολουθήθηκαν για την χωροθέτηση ήταν:

1. Το διαθέσιμο αιολικό δυναμικό,
2. Η συμβατότητα της ανάπτυξης των πάρκων με άλλες χρήσεις του συγκεκριμένου χώρου εντός 6 ναυτικών μιλίων,
3. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις (εξαίρεσης περιοχών Natura),
4. Η τεχνική δυνατότητα εγκατάστασης στην συγκεκριμένη θέση (σε μικρότερα βάθη των 50 m)
5. Η ευκολία σύνδεσης με το δίκτυο και τις μελετώμενες επεκτάσεις του (απόσταση 1.5 km από την ακτή),
6. Η ελαχιστοποίηση της οπτικής όχλησης και
7. Αποκλεισμός περιοχών που δεσμεύονται από τις Ένοπλες Δυνάμεις



Πίνακας 3: Ενδεικτικά σενάρια χωροθέτησης ΘΑΠ σταθερού θεμελίου στην Ελλάδα με βάση το ΕΠΑΘΑΠ 2010/12 (Πηγή: ΕΛΕΤΑΕΝ)

α/α	Όνομα ΘΑΠ	Τυπικό σενάριο χωροθέτησης Α/Γ		Μέγιστο σενάριο χωροθέτησης Α/Γ	
		Α/Γ	MW	Α/Γ	MW
1	Αλεξανδρούπολης	78	546	136	952
2	Σαμοθράκης	31	217	55	385
3	Φαναρίου	59	413	110	770
4	Θάσου	38	266	66	462
5	Βόρειας Λήμνου	32	224	58	406
6	Νότιας Λήμνου	10	70	18	126
7	Αη Στράτη	8	56	11	77
8	Κύμης	14	98	23	161
9	Πεταλιών	2	14	2	14
10	Καρπάθου	5	35	7	49
11	Λευκάδας	9	63	13	91
12	Οθωνών	20	140	27	189



Χάρτης 4: Περιοχές ανάπτυξης ΘΑΠ σύμφωνα με ΕΠΑΘΑΠ 2010/2012 (Πηγή: ΕΛΕΤΑΕΝ)

Η WWF Ελλάς αναφέρει για τη διαδικασία χωροθέτησης και αδειοδότησης, όπως αυτή προβλέπεται από το ν.3851/2010, ότι είναι η βέλτιστη δυνατή για τη χώρα, λόγω των πολλών τεχνικών, κοινωνικοοικονομικών και περιβαλλοντικών δυσκολιών και ασάφειας που διέπουν την ανάπτυξη θαλάσσιων αιολικών πάρκων.

Η πρώτη επίσημη αναφορά για την εξέλιξη των συζητήσεων αυτών, πραγματοποιείται μεταξύ 2022–2023 και αποτελεί περίοδο της στρατηγικής ωρίμανσης για την ανάπτυξη υπεράκτιων αιολικών, οπότε και θεσπίστηκε το νομικό πλαίσιο (Ν. 4964/2022), Την ίδια εποχή εκπονήθηκε και δόθηκε σε προσχέδιο το Εθνικό Πρόγραμμα Ανάπτυξης Υπεράκτιων



Αιολικών (Draft National Programme) το 2023, ενώ έχουν ήδη εκχωρηθεί οι πρώτες ερευνητικές/πilotικές άδειες και έχουν ξεκινήσει οι πρώτες προμετρήσεις και μετρήσεις. Το πρόγραμμα προτείνει 25 «Organized Development Areas» (Περιοχές Οργανωμένης Ανάπτυξης — ΠΟΑΥΑΠ) με συνολικό ελάχιστο δυναμικό ~12,4 GW και πρώτη φάση ~4,9 GW έως 2030–2032.

Από το φθινόπωρο 2023 έως σήμερα έχουν εκδοθεί οι πρώτες ερευνητικές/exploration licences για pilotικά σχήματα και pilot projects (π.χ. άδειες που ανακοινώθηκαν τον Νοέμβριο 2023). Η λογική των pilotικών έργων (pilot OWF) είναι να «απορροφήσουν» τεχνογνωσία, να δοκιμάσουν τεχνολογίες (συμπεριλαμβανομένων floating solutions) και να λειτουργήσουν ως αναφορά για μελλοντικές μαζικές εκχωρήσεις.

Από τις δηλώσεις τύπου της ΤΕΡΝΑ Ενεργειακή, εντοπίζεται εντονότερη επενδυτική κίνηση 2024–2025, με συστήματα κοινοπραξιών/επενδυτών, όπως για παράδειγμα οι ΤΕΡΝΑ Energy + Motor Oil / Masdar involvement, οι οποίες έχουν συνυπογράψει και αποκτήσει δικαιώματα για pilotικά πεδία στην περιοχή της Αλεξανδρούπολης (συνολικά ~400–600 MW pilot).

Η Hellenic Hydrocarbons and Energy Resources Management Company (HEREMA) με τη σειρά της έχει προχωρήσει σε στρατηγική για τη συλλογή μετεωρολογικών και ανεμολογικών δεδομένων, έχοντας αναθέσει συμβουλευτικά συμβόλαια (π.χ. appointment of OWC) για τη διαμόρφωση της στρατηγικής μετρήσεων και την αξιοποίηση floating Lidar/ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) campaigns όπου χρειάζεται. Τα συγκεκριμένα αποτελούν τα πρώτα βήματα για κάθε ΠΟΑΥΑΠ, καθώς οι μακροχρόνιες χρονοσειρές μετρήσεων για ανεμολογικά προφίλ, κυματικά δεδομένα, ρεύματα και βυθοτεχνική/γεωτεχνική διερεύνηση, αποτελούν αναπόσπαστα στοιχεία της μελέτης, της διερεύνησης και του σχεδιασμού οποιουδήποτε έργου.

2.4.2 Προκλήσεις Υπεράκτιων Αιολικών Πάρκων

Ίσως τη μεγαλύτερη πρόκληση κατά την ανάπτυξη ενός υπεράκτιου έργου και πόσο μάλλον αιολικού πάρκου, αποτελεί η αδειοδότηση και ο χωροταξικός σχεδιασμός. Τα προβλήματα αντιμετωπίζονται στη συλλογή δεδομένων για τη διαστασιολόγηση του έργου και το μετέπειτα σχεδιασμό του αλλά και στις αντιδράσεις που προκύπτουν λόγω της σύγκρουσης με τις ανθρώπινες δραστηριότητες και το φυσικό περιβάλλον. Κατά τον σχεδιασμό ενός ΘΑΠ, στο περιβάλλον δραστηριοποίησής του ενέχουν ακόμα κατασκευαστικού τύπου κίνδυνοι. Μερικοί από αυτούς, είναι η ανάπτυξη του πάγου στις ανεμογεννήτριες λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών που επικρατούν στα ανοιχτά, αλλά και το έντονο διαβρωτικό περιβάλλον της θάλασσας. Φυσικά και εφόσον η παρούσα μελέτη πραγματοποιείται για τον ελλαδικό χώρο, εντοπίζεται ιδιαίτερη δυσκολία στη χρηματοδότηση, αλλά και στην επικοινωνία των εν λόγω έργων στο κοινό.

Προκλήσεις στην αδειοδότηση και στο χωροταξικό σχεδιασμό

Η αδειοδότηση και ο χωροταξικός σχεδιασμός αποτελούν αναμφίβολα τη μεγαλύτερη πρόκληση κατά την ανάπτυξη υπεράκτιων αιολικών πάρκων, καθώς συνδυάζουν ένα πλέγμα τεχνικών, νομικών, περιβαλλοντικών και κοινωνικών παραμέτρων που απαιτούν μακροχρόνιο σχεδιασμό και ισχυρό θεσμικό πλαίσιο. Εφόσον ανάλογα έργα δεν έχουν εισαχθεί και κατασκευαστεί εντός των εθνικών συνόρων, η μελέτη και η κατασκευή τους



θεωρείται δύσκολη, λόγω της απουσίας σχετικής εμπειρίας του ανθρώπινου δυναμικού που απαιτεί.

Καταρχάς, ο χωροταξικός σχεδιασμός αφορά την οριοθέτηση των περιοχών στις οποίες επιτρέπεται η ανάπτυξη τέτοιων έργων, μέσα από ειδικά χωροταξικά εργαλεία όπως τα Πλαίσια Ολοκληρωμένου Χωροταξικού Σχεδιασμού για την Ανάπτυξη Υπεράκτιων Αιολικών Πάρκων (ΠΟΑΥΑΠ) στην Ελλάδα ή αντίστοιχες θαλάσσιες στρατηγικές στην ΕΕ. Η διαδικασία αυτή πρέπει να λάβει υπόψη:

- την απόσταση από την ακτογραμμή και τον οπτικό/τουριστικό αντίκτυπο,
- τις θαλάσσιες χρήσεις που ήδη υφίστανται (ναυσιπλοΐα, αλιεία, στρατιωτικές δραστηριότητες),
- τα οικολογικά ευαίσθητα οικοσυστήματα (π.χ. περιοχές Natura 2000, μεταναστευτικές διαδρομές πτηνών, οικοτόπους θαλάσσιων θηλαστικών).

Η αδειοδοτική διαδικασία έρχεται ως συνέχεια του χωροταξικού πλαισίου και περιλαμβάνει πολλαπλά στάδια: από την προκαταρκτική άδεια χωροθέτησης, τη μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων (ΜΠΕ), μέχρι τις τελικές άδειες εγκατάστασης και λειτουργίας. Εδώ παρατηρούνται συχνά μεγάλες καθυστερήσεις, καθώς απαιτείται συντονισμός πολλών φορέων (ΥΠΕΝ, ΡΑΑΕΥ, Υπουργείο Ναυτιλίας, Υπουργείο Εθνικής Άμυνας, τοπικές αρχές). Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, ο μέσος χρόνος αδειοδότησης για υπεράκτια αιολικά μπορεί να ξεπερνά τα 7-10 έτη, ενώ η Ε.Ε. με τον Κανονισμό για τις ΑΠΕ (RED III, 2023) πιέζει τα κράτη-μέλη να περιορίσουν τη διάρκεια στα 2-3 έτη για έργα στρατηγικής σημασίας.

Επιπλέον, η αδειοδότηση δεν περιορίζεται μόνο στη χωροθέτηση και στην περιβαλλοντική έγκριση, αλλά αγγίζει και ζητήματα σύνδεσης με το ηλεκτρικό δίκτυο, που αποτελούν βασικό παράγοντα κόστους και βιωσιμότητας. Τα υπεράκτια πάρκα απαιτούν υποβρύχια καλώδια υψηλής τάσης και σταθμούς μετατροπής, έργα που πρέπει να αδειοδοτηθούν ξεχωριστά, υπό τη σύμφωνη γνώμη του διαχειριστή, ο οποίος στην Ελλάδα είναι ο ΑΔΜΗΕ στην Ελλάδα. Η ανάπτυξη τέτοιων έργων απαιτεί επιπλέον επενδύσεις στο δίκτυο του Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΕΣΜΗΕ). Είναι σημαντικό ωστόσο να αναφερθεί, ότι λόγω της πληθώρας κατοικήσιμων νήσων, η Ελλάδα έχει ήδη ένα προχωρημένο και εμπλουτισμένο δίκτυο.

Συνολικά, η αδειοδότηση και ο χωροταξικός σχεδιασμός αποτελούν την το κυριότερο ίσως βήμα στη διαδικασίας ανάπτυξης υπεράκτιων αιολικών πάρκων. Χωρίς ένα σαφές πλαίσιο και ευκρινώς κατανοημένο ανά φάσεις, οι επενδύσεις δεν μπορούν να προχωρήσουν, ακόμα και αν υπάρχει διαθέσιμη τεχνολογία, χρηματοδότηση και ώριμο ενδιαφέρον από διεθνείς και εγχώριους φορείς.

Κοινωνική αποδοχή

Είναι αδιαμφισβήτητο γεγονός ότι με την πρόοδο και τη στροφή προς τα αιολικά και τα υπεράκτια αιολικά πάρκα, επόμενο είναι και η αναβάθμιση και η βελτίωση του αντίστοιχου εξοπλισμού. Οι απαιτήσεις των αρμόδιων εταιρειών αλλά και των κυβερνητικών οργανισμών -υπεύθυνων για την αδειοδότηση και την εφαρμογή των περιβαλλοντικών όρων- αυξάνονται με γοργούς ρυθμούς, όποτε και οι κατασκευαστικές εταιρείες καλούνται να προσφέρουν μηχανές υψηλής αξιοπιστίας, ανεπτυγμένης αισθητικής αλλά και κατά το δυνατόν μειωμένης ακουστικής όχλησης. Όπως είναι ευρέως γνωστό, η κοινή γνώμη αντιτίθεται έντονα σε τέτοιου είδους ενεργειακά έργα.



Εμφανώς μεγαλύτερη θα είναι η αντίδραση στην περίπτωση, νέων και πρωτάκουστων για τη χώρα έργων. Συχνά προτείνεται η ενδεδειγμένη και τακτική ενημέρωση του κοινού, για την πρόληψη και την αποφυγή τέτοιων αντιδράσεων, μέσω σεμιναρίων και διαφημιστικών καμπανιών οι οποίες θα ενημερώνουν σχετικά με τις εναλλακτικές πηγές ενέργειας. Η ενημέρωση αυτή για να κριθεί επιτυχής, οφείλει να πραγματοποιείται σε στάδια, ξεκινώντας από τις σχολικές ηλικίες και συνεχίζοντας δια βίου, μέσω σχετικών περιβαλλοντικών δράσεων και τακτικής προβολής διαφημιστικών μηνυμάτων.

Ειδικά στον ελληνικό χώρο και σε περιοχές με υψηλό αιολικό δυναμικό οφείλουν τα αρμόδια υπουργεία και οι τοπικές αυτοδιοικήσεις, συντονίζουν και να προωθούν τέτοιες δράσεις και ενημερωτικές καμπάνιες, βασιζόμενοι σε ορθή επιστημονική τεκμηρίωση. Σκοπός είναι η προώθηση φιλοπεριβαλλοντικής στρατηγικής και η έμφαση στην αισθητική του τοπίου. Ενδεικτικό είναι το παράδειγμα της Δανίας, όπου και σύμφωνα με το γνωστό πρακτορείο ειδήσεων Reuters, η χώρα εκμεταλλεύτηκε το αιολικό δυναμικό στο ενεργειακό της ισοζύγιο σε ποσοστό 47%. Στην εν λόγω χώρα η συντριπτική πλειοψηφία των πολιτών ενθαρρύνει και προωθεί τις προσπάθειες ένταξης των ΑΠΕ στο εθνικό ενεργειακό μείγμα.

Σημαντική άποψη των αρνητών της κατασκευής υπεράκτιων πάρκων αποτελεί και η επίδραση που θα έχουν τα τελευταία στον τουρισμό. Η Ελλάδα είναι παγκοσμίως γνωστή για τους θαλάσσιους πόρους και τα νησιά της, τα οποία επισκέπτονται ετησίως εκατομμύρια τουρίστες από όλο τον κόσμο. Συνεπώς, η κατασκευή και η εγκατάσταση ανεμογεννητριών εντός της θάλασσας, θεωρείται ως αποτρεπτικός παράγοντας επίσκεψης τουριστών.

Συνοψίζοντας, σημαντική πρόκληση συνιστά η κοινωνική αποδοχή, η οποία παρόλο που δεν επηρεάζει άμεσα την αδειοδότηση ή το χωροταξικό σχεδιασμό, αποτελεί σημαντικό παράγοντα, που πρέπει να ληφθεί υπόψη. Ακόμα και αν τα υπεράκτια πάρκα βρίσκονται σε αποστάσεις που μειώνουν την οπτική και ακουστική όχληση, οι τοπικές κοινωνίες και φορείς (ιδίως αλιείς, τουριστικές επιχειρήσεις) συμμετέχουν ενεργά στη διαβούλευση και συχνά διατυπώνουν ενστάσεις, καθυστερώντας ή αναπροσανατολίζοντας τα έργα.

Παγοποίηση και ακραίες καιρικές συνθήκες

Οι υπεράκτιες αιολικές εγκαταστάσεις αποτελούν τεχνικά σύνθετα έργα μεγάλης κλίμακας, τα οποία λειτουργούν σε ένα από τα πιο απαιτητικά και «εχθρικά» περιβάλλοντα για υλικά και κατασκευές, το θαλασσινό. Η εμπειρία από χώρες με ώριμες αγορές, όπως το Ηνωμένο Βασίλειο, η Δανία και η Γερμανία, δείχνει ότι οι βασικές τεχνικές προκλήσεις που επηρεάζουν την ποιότητα, την αξιοπιστία και το κόστος των υπεράκτιων αιολικών πάρκων.

Μεγάλη πρόκληση για τις θαλάσσιες ανεμογεννήτριες αποτελεί η εμφάνιση πάγου, ειδικά σε περιοχές με χαμηλές θερμοκρασίες και ειδικά στη Βόρεια Ευρώπη. Ο πάγος αυτός διαχωρίζεται σε δύο κατηγορίες, στο θαλασσινό και στον ατμοσφαιρικό πάγο. Ο θαλασσινός πάγος δημιουργείται καθώς παγώνει το θαλασσινό νερό, και δύναται να μετακινηθεί λόγω των θαλάσσιων ρευμάτων και της διαφοράς θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας και του νερού. Ο ατμοσφαιρικός πάγος δημιουργείται από την ύπαρξη νερού στην ατμόσφαιρα, από τις εκάστοτε χιονοπτώσεις ή και από την αλιόσχηνη που προκαλείται από την εξάτμιση του θαλασσινού αλατιού, η οποία αποκαλείται και ως sea spray.

Στη Βόρεια Ευρώπη και τη Βαλτική, η παγοποίηση των πτερυγίων ή των υποδομών αποτελεί σοβαρό ζήτημα που επηρεάζει την παραγωγή και αυξάνει σημαντικά τις ανάγκες συντήρησης. Στην Ελλάδα, η παγοποίηση δεν αποτελεί κύρια πρόκληση, ωστόσο ενδεχόμενα



ακραία φαινόμενα (ισχυρές καταιγίδες, μεσογειακοί κυκλώνες – «Medicanes») αναμένεται να θέσουν νέα φορτία και πιέσεις στις δομές, ιδιαίτερα στις πλωτές εγκαταστάσεις.

Όλα τα παραπάνω εμποδίζουν την εύρυθμη λειτουργία της ανεμογεννήτριας. Συγκεκριμένα, όταν εμφανίζεται πάγος στα πτερύγια της ανεμογεννήτριας, προκαλείται αυτομάτως πληθώρα προβλημάτων στη σχεδίαση των ανεμογεννητριών, στα συνεργεία συντήρησης – όχι μόνο δυσχεραίνοντας την προσβασιμότητα στην εγκατάσταση, αλλά δημιουργώντας επικίνδυνες συνθήκες, με το ενδεχόμενο αποκοπής τμημάτων- καθώς και στην οικονομική απόδοση και λειτουργία του θαλάσσιου πάρκου.

Επιπλέον, ο πάγος στην επιφάνεια της θάλασσας εμφανίζει μηχανικά προβλήματα κατά τη λειτουργία των ανεμογεννητριών, με τα επιπλέον φορτία που ασκούνται τόσο στον πύργο της, όσο και στη θεμελίωση. Είναι προφανές ότι αυτό έχει ως συνέπεια να μειώνεται ο χρόνος ζωής του έργου, καθιστώντας παράλληλα προτιμότερο να πραγματοποιείται κατάλληλος σχεδιασμός και να εξοπλίζεται σχετικά η κατασκευή.

Η εμφάνιση του πάγου στις κατασκευές προφανώς ενέχει και άλλους κινδύνους. Ενδεικτικά αναφέρεται η δυσλειτουργία που θα προκύψει και στις συσκευές καταγραφής των ανεμολογικών δεδομένων, αλλά και η αύξηση του θορύβου και των δονήσεων που εμφανίζονται στην κατασκευή.

Για την αντιμετώπιση των περιστατικών αυτών, προτείνεται η χρήση ειδικών μονάδων θέρμανσης, οι οποίες μεταφέρουν ζεστό αέρα εντός των πτερυγίων, ο οποίος τελικώς εξατμίζεται μέσω μιας βαλβίδας στην κορυφή τους.



Εικόνα 2: Εμφάνιση πάγου στα πτερύγια της ανεμογεννήτριας (Πηγή: [Icwind](#))

Διάβρωση των κατασκευών

Σε όλες τις κατασκευές που αναπτύσσονται σε υπεράκτιο περιβάλλον, οφείλει και λαμβάνεται ιδιαίτερη μέριμνα στην αντιμετώπιση και την προστασία από το έντονα διαβρωτικό περιβάλλον της θάλασσας. Η διάβρωση των μετάλλων και των παραγώγων τους, προκαλείται από πληθώρα παραγόντων που εντοπίζονται σε μεγάλο βαθμό στη θάλασσα. Το



θαλάσσιο περιβάλλον είναι ιδιαίτερα διαβρωτικό, λόγω της υψηλής περιεκτικότητας του νερού σε αλάτι, της αυξημένης συγκέντρωσης οξυγόνου, της υγρασίας και των ακραίων θερμοκρασιακών μεταβολών. Η διάβρωση του επιμέρους εξοπλισμού, επιβαρύνει σε μεγάλο βαθμό το κόστος συντήρησης κατά τη λειτουργία της κατασκευής.

Οι θεμελιώσεις (μονοπάσσαλοι, τρίποδες, jackets, ή πλωτές πλατφόρμες) βρίσκονται μόνιμα σε επαφή με το νερό και υπόκεινται σε ηλεκτροχημική διάβρωση. Είναι προφανές και επόμενο, ότι για να αντιμετωπιστεί το προαναφερθέν πρόβλημα, απαιτείται κατάλληλος εξοπλισμός και προσαρμογές κατά τον σχεδιασμό και κατά την επιλογή των υλικών κατασκευής. Η ολοκληρωτική αντιμετώπιση δεν μπορεί επιτευχθεί, καθώς σε βάθος χρόνου η κατασκευή, είναι βέβαιο ότι θα εμφανίσει σχετικά προβλήματα. Ένας τρόπος αντιμετώπισης του φαινομένου, είναι η προσθήκη επιστρώσεων ψευδαργύρου ή πετρελαϊκών παραγώγων. Σε τέτοιες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται ειδικά κράματα, επιστρώσεις (coatings) και αντιδιαβρωτικά υλικά όπως το ανοξείδωτο ατσάλι, ο χαλκός και το πλαστικό, τα οποία περιορίζουν σε μεγάλο βαθμό τη διάβρωση.

Όσον αφορά το εσωτερικό μέρος της ατράκτου, σύμφωνα με τις κατασκευαστικές διατάξεις η θερμοκρασία πρέπει να διατηρείται σταθερή στους 15 °C και η ατμόσφαιρα ξηρή, ώστε να διασφαλίζεται η σωστή λειτουργία του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού. Για το λόγο αυτό, επιβάλλεται η ύπαρξη συστημάτων θέρμανσης και αφύγρανσης της ατμόσφαιρας εντός του περιμετρικού περιβλήματος. Αντίστοιχοι μηχανισμοί έχουν προβλεφθεί για τη θέρμανση των ανεμόμετρων και των ανεμοδεικτών. Συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται ηλεκτρικά καλώδια και στον εξοπλισμό των κιβωτίων των ταχυτήτων, της γεννήτριας και του μετασχηματιστή, προβλέπονται ξεχωριστά συστήματα ψύξης εξωτερικά της ατράκτου.

Στην Ελλάδα, λόγω της υψηλής αλατότητας και της θερμοκρασίας της Μεσογείου, η διάβρωση αναμένεται να είναι εντονότερη σε σύγκριση με τον Βόρειο Ατλαντικό, καθιστώντας απαραίτητη τη χρήση υλικών υψηλής αντοχής και συχνές επιθεωρήσεις.



Εικόνα 3: Φαινόμενο διάβρωσης σε υπεράκτια ανεμογεννήτρια (Πηγή: [Abfad](#))

Δυναμικά φορτία από κύματα, ρεύματα και άνεμο

Αδιαμφισβήτητο γεγονός αποτελεί ότι οι κατασκευές στην ανοιχτή θάλασσα, υφίστανται συνεχή καταπόνηση από θαλάσσια ρεύματα και κυματισμό, σε συνδυασμό με μεταβαλλόμενες ανεμολογικές συνθήκες. Το αποτέλεσμα είναι κόπωση των υλικών (fatigue loading), που μπορεί να προκαλέσει πλήθος προβλημάτων ή ακόμα και να μειώσει τον κύκλο

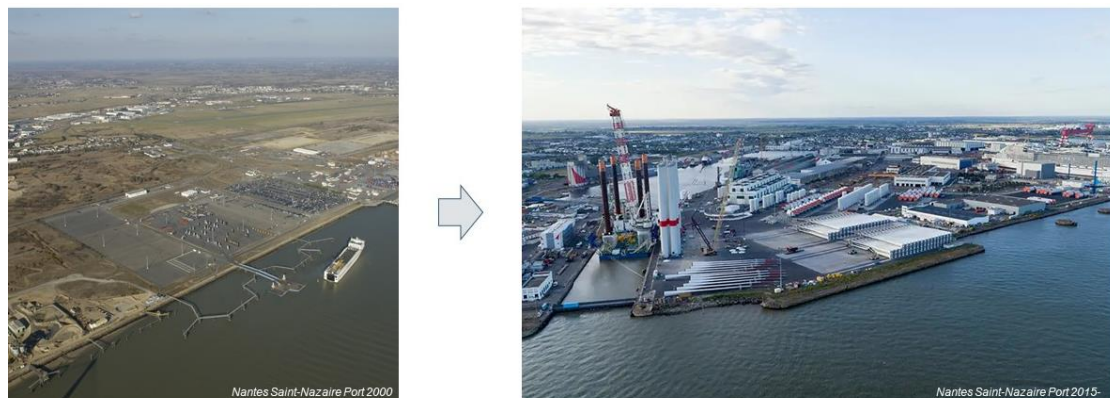


ζωής των υποδομών αν δεν ληφθεί υπόψη στον σχεδιασμό. Η ελληνική θάλασσα χαρακτηρίζεται από ισχυρούς ανέμους με έντονα μελτέμια και κυματισμούς στο Αιγαίο, γεγονός που μπορεί να εντείνει τα προβλήματα κόπωσης και να δυσκολέψει τη σταθερότητα των κατασκευών γενικότερα.

Κατασκευαστικές δυσκολίες και logistics

Πέρανα από τις δυσκολίες στην κατασκευή και την επιλογή κατάλληλων υλικών, σημαντική πρόκληση απαιτεί και η επιτόπια συναρμολόγηση των ανεμογεννητριών. Η μεταφορά και εγκατάσταση υπεράκτιων ανεμογεννητριών απαιτεί ειδικά πλοία ανύψωσης (jack-up vessels), γερανούς μεγάλης αντοχής και πολύπλοκες λιμενικές υποδομές.

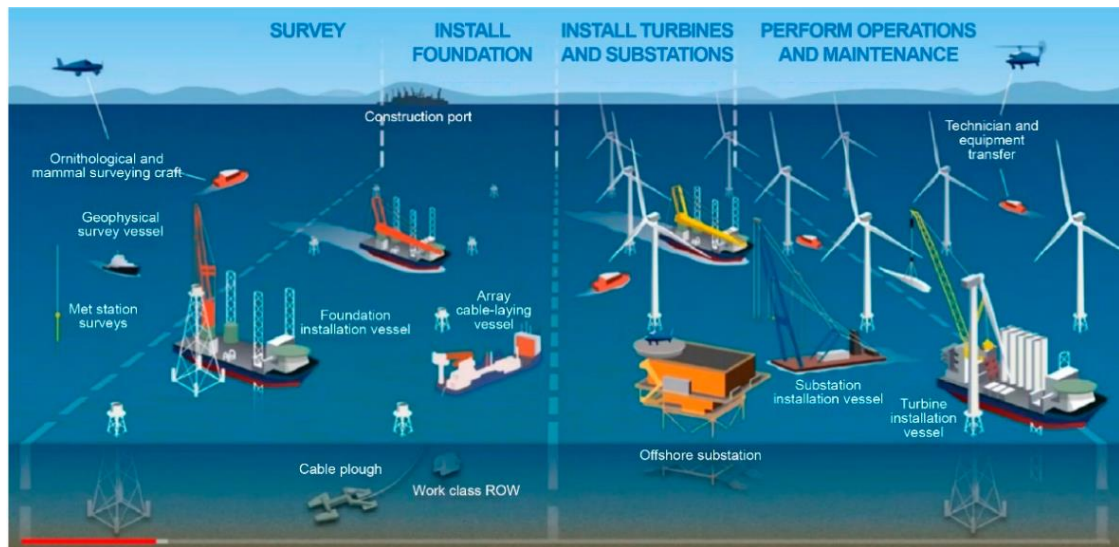
Μία από τις μεγαλύτερες σχετικές μεταβάσεις από λιμάνι/ναυπηγείο, σε πολυχρηστικό ναυπηγείο προετοιμασίας και κατασκευής υπεράκτιων ανεμογεννητριών έχει πραγματοποιήσει ο λιμένας Nantes Saint-Nazaire Port. Το εν λόγω λιμάνι από τις αρχές της δημιουργίας των πρώτων ΘΑΠ κλήθηκε να προσαρμοστεί στις απαιτήσεις διαχείρισης μεγάλων και βαρέων τμημάτων ανεμογεννητριών. Ειδικότερα, χρειάστηκε να γίνει επέκταση και ενίσχυση δρόμων βαρέως τύπου, ώστε τα αρθρωτά φορτηγά (SPMT trailers) να μεταφέρουν μεγάλες μονάδες (πτερύγια, πυλώνες κτλ) από τις προβλήτες στον χώρο συναρμολόγησης, ειδικοί χώροι αποθήκευσης εξαρτημάτων (blades, nacelles, μαϊγονικές συνθέσεις), και πλωτών υποδομών, νέο πύργο γερανό βάρους 25 tn, καθώς και πλωτούς προσβάσιμους χώρους για υπηρεσιακά σκάφη.



Εικόνα 4: Αναβάθμιση λιμένα Nantes Saint-Nazaire Port (Πηγή: [Nantes-saint-nazaire-port](http://nantes-saint-nazaire-port.com))

Στην Ελλάδα, κατάλληλες λιμενικές εγκαταστάσεις είναι περιορισμένες και θα χρειαστούν αναβάθμιση ώστε να υποστηρίξουν συναρμολόγηση, συντήρηση και logistics για μεγάλης κλίμακας έργα.





Εικόνα 5: Εξειδικευμένα σκάφη που απαιτούνται κατά την κατασκευή υπεράκτιου αιολικού πάρκου (Πηγή: [Moo-Sung Ryu et al. 2022](#))



Κεφάλαιο 3 Προδιαγραφές υπεράκτιων αιολικών πάρκων

3.1 Ανεμολογικά στοιχεία

Τα κυριότερα στοιχεία βάσει των οποίων επιλέγεται η θέση εγκατάστασης ενός θαλάσσιου αιολικού πάρκου αποτελούν μεταξύ άλλων, οι άνεμοι που πνέουν στην περιοχή, η συχνότητα και η κατεύθυνσή τους. Η συστηματική συλλογή και ανάλυση ανεμολογικών δεδομένων αποτελεί το θεμέλιο για τον σχεδιασμό και την αξιολόγηση κάθε υπεράκτιου αιολικού πάρκου. Ο άνεμος αποτελεί την πρωτογενή ενεργειακή πηγή και καθορίζει τόσο τη δυναμικότητα του έργου όσο και την τεχνικοοικονομική του βιωσιμότητα. Η ποιότητα, η διάρκεια και η αξιοπιστία των μετρήσεων μειώνουν την αβεβαιότητα και επιτρέπουν την ασφαλή επένδυση, με αποτέλεσμα να αποτελούνται απαραίτητο στοιχείο διαστασιολόγησης.

Τα ανεμολογικά δεδομένα χρησιμοποιούνται πρωτίστως σε μαθηματικά μοντέλα υπό τη μορφή ιστορικών χρονοσειρών, για την εκτίμηση της μέσης ετήσιας ταχύτητας ανέμου, η οποία αποτελεί βασικό δείκτη ενεργειακού δυναμικού. Παράλληλα, συμβάλλουν στον προσδιορισμό της κατανομής των ταχυτήτων (συνήθως μέσω καταληλότητας Weibull), στη μελέτη των ακραίων τιμών και στη διερεύνηση της χρονικής και εποχικής διακύμανσης. Με αυτά τα στοιχεία μπορεί να εκτιμηθεί η Ετήσια Ενεργειακή Παραγωγή, αλλά και να προσδιοριστούν οι φορτίσεις στις ανεμογεννήτριες, οι απαιτήσεις σχεδιασμού των θεμελιώσεων και η συνολική αξιοπιστία του πάρκου.

Η ταχύτητα του ανέμου διαφέρει σημαντικά ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος μιας περιοχής. Σε ηπιότερα γεωγραφικά πλάτη εμφανίζεται υπεράκτια ροή με λιγότερες νηνεμίες. Το σημαντικό βέβαια σε αυτούς τους τόπους είναι, το γεγονός ότι η ταχύτητα των ανέμων εμφανίζεται για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα υψηλότερη από τη χαρακτηριστική ταχύτητα ασφαλούς λειτουργίας των ανεμογεννητριών – η οποία είναι της τάξεως των 3,5 m/s – κατά συνέπεια έχει μεγαλύτερη προβλεψιμότητα.

Για να θεωρηθεί μια θαλάσσια περιοχή κατάλληλη για ανάπτυξη υπεράκτιου αιολικού πάρκου, η μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου σε ύψος πλήμνης (100–150 m) θα πρέπει να υπερβαίνει κατά κανόνα τα 7–7,5 m/s. Τιμές άνω των 9 m/s χαρακτηρίζουν περιοχές υψηλού δυναμικού, με ιδιαίτερα ελκυστικούς συντελεστές δυναμικότητας (capacity factors >45%). Αντιθέτως, τιμές κάτω των 6,5 m/s καθιστούν την επένδυση οικονομικά αμφίβολη και συνήθως δεν προτιμάται.

Η ανάλυση της διεύθυνσης και της κατεύθυνσης του ανέμου είναι εξίσου κρίσιμες. Η επικράτηση συγκεκριμένων διευθύνσεων επιτρέπει βέλτιστη διάταξη των ανεμογεννητριών, ώστε να περιοριστούν οι απώλειες λόγω αλληλεπίδρασης μεταξύ των κατασκευών. Αντίθετα, περιοχές με έντονη εναλλαγή κατευθύνσεων, απαιτούν πιο σύνθετες διατάξεις και αυξάνουν την αβεβαιότητα. Η σταθερότητα της διεύθυνσης συμβάλλει στην καλύτερη πρόβλεψη παραγωγής και στην παράταση της διάρκειας ζωής του εξοπλισμού.

Σημαντικό πλεονέκτημα του αιολικού δυναμικού στα ανοιχτά, αποτελεί το γεγονός ότι ο άνεμος αυξάνεται όσο πιο απομακρυσμένα μετριέται από την ακτή και όσο πιο ψηλά από την επιφάνεια του εδάφους. Παρότι τα υπεράκτια πάρκα βρίσκονται σε ανοικτό θαλάσσιο



περιβάλλον, η τοπογραφία των παράκτιων περιοχών και των νησιών μπορεί να επιδράσει σημαντικά στη ροή του ανέμου. Ορεινοί όγκοι, ακρωτήρια ή εκτεταμένα νησιωτικά συμπλέγματα δημιουργούν ζώνες σκίασης, έντονες διαφοροποιήσεις στη διεύθυνση και τοπικές αναταράξεις. Σε τέτοιες περιπτώσεις απαιτείται προσεκτική χαρτογράφηση του δυναμικού και χρήση αριθμητικών μοντέλων υψηλής ανάλυσης, ώστε να αποτυπωθεί στο βέλτιστο βαθμό η κατανομή του δυναμικού.

Η ακριβής αποτύπωση του αιολικού δυναμικού στο θαλάσσιο περιβάλλον, ωστόσο, αποτελεί μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις στην ανάπτυξη υπεράκτιων αιολικών πάρκων. Σε αντίθεση με την ηπειρωτική χώρα, όπου υπάρχει εκτεταμένο δίκτυο μετεωρολογικών σταθμών, στα ανοιχτά πελάγη η διαθεσιμότητα μετρητικών δεδομένων είναι εξαιρετικά περιορισμένη.

Τα δορυφορικά δεδομένα που λαμβάνονται από τις δορυφορικές παρατηρήσεις και καταγραφές, ολοένα και αυξάνονται παρέχοντας μία προκαταρκτική πληροφορία με άμεσες και χρόνιες μετρήσεις. Τα δεδομένα αυτά, προσφέρουν μεγάλη χρονική κάλυψη αλλά χαμηλότερη ακρίβεια σε τοπική κλίμακα.

Η επιβεβαίωση των δεδομένων πραγματοποιείται μέσω πλήθους μετεωρολογικών οργάνων και συστημάτων ανεμολογικών μετρήσεων, όπως είναι οι ακόλουθοι:

- Μετεωρολογικοί ιστοί (Met Masts), οι οποίοι τοποθετούνται σε θεμελιωμένες εξέδρες στη θάλασσα, παρέχουν ακριβείς επιτόπιες μετρήσεις ταχύτητας και διεύθυνσης του ανέμου σε πολλαπλά ύψη, ωστόσο έχουν πολύ υψηλό κόστος εγκατάστασης και συντήρησης.
- LiDAR (Light Detection and Ranging), τα οποία βασίζονται στην εκπομπή παλμικής ακτινοβολίας λέιζερ στην ατμόσφαιρα, για να μετρήσουν την ταχύτητα σωματιδίων στον αέρα, τοποθετούνται συνήθως σε πλωτές πλατφόρμες (floating LiDAR buoys) και συλλέγουν δεδομένα σε ύψη έως και 250 m. Η ανακαλούμενη ή οπισθοσκεδασόμενη ακτινοβολία λέιζερ, επιστρέφει στην συσκευή, όπου και καταγράφεται. Τα συστήματα αυτά ενδείκνυται για την καταγραφή αφενός του αιολικού δυναμικού και αφετέρου των θαλάσσιων μετρήσεων. Οι σταθμοί αυτοί έχουν χαμηλότερο κόστος, ενώ προσφέρουν ευελιξία κατά την εγκατάσταση και τη συντήρηση.
- Πλωτοί μετεωρολογικοί σταθμοί / Buoys, οι οποίοι εξοπλίζονται με ανεμόμετρα, LiDAR, GPS και άλλους αισθητήρες. Είναι οι πιο διαδεδομένοι μετρητές καθώς συνδυάζουν τη συλλογή πλήθους πληροφοριών με πρόσθετα εξαρτήματα στους πλωτήρες τους, έχουν ευελιξία στη μετακίνηση, παρέχοντας τη δυνατότητα καταγραφής σε πραγματικές θέσεις υποψήφιων πάρκων. Όλα τα παραπάνω τους έχουν καθιερώσει ως η βασική διεθνής πρακτική για ανεμολογικές καμπάνιες σε βαθιά νερά. Τα συστήματα αυτά ενδείκνυται για την καταγραφή αφενός του αιολικού δυναμικού και αφετέρου των θαλάσσιων μετρήσεων.

Εφόσον έχει επιλεγθεί η περιοχή χωροθέτησης του αιολικού πάρκου, για την διασταύρωση των δορυφορικών δεδομένων, στήνονται μετεωρολογικοί ιστοί. Οι εν λόγω ιστοί αφορούν σε λεπτές κατασκευές μεγάλου ύψους, στην κορυφή των οποίων ενσωματώνονται ανεμόμετρα. Οι κατασκευές αυτές ανέρχονται άνω του ύψους των πτερυγίων, μετρώντας κατά αυτόν τον τρόπο τα χαρακτηριστικά του ανέμου της περιοχής.



Τα Buoy, συμπληρωματικά, παρέχουν εκτενείς κυματογραφικές, ανεμολογικές και μετρήσεις παλιρροιών. Οι πλατφόρμες προσφέρουν τη δυνατότητα παρακολούθησης και απεικόνισης των ταχυτήτων ανέμου σε μεγαλύτερα υψόμετρα, ενώ ευνοεί και την πραγματοποίηση πειραμάτων.



Εικόνα 6: Πλωτό σύστημα καταγραφής πλωτών Buoy (Πηγή: Akrocean)

Οι πιο προηγμένοι σταθμοί περιλαμβάνουν ραντάρ και ακουστικούς αισθητήρες, μέσω των οποίων καταγράφουν κινήσεις των ιπτάμενων πληθυσμών σε ένα εύλογο εύρος περιμετρικά τους. Σε χώρες που συνορεύουν με ανοιχτή ωκεάνια θάλασσα, έχουν προσαρμοστεί και πραγματοποιηθεί κατάλληλες προσθήκες, οι οποίες σε συνάρτησή με τα ανεμολογικά και ωκεανογραφικά δεδομένα, καταγράφουν κινήσεις πτηνών και θαλάσσιων θηλαστικών, καιρικών συνθηκών και κλιματολογικών δεδομένων, κινήσεις των σκαφών, καθώς και την ποιότητα των υδάτων.



Εικόνα 7: Δυνατότητες καταγραφής πλωτών συστημάτων πλωτών Buoy (Πηγή: Akrocean)

Η ανάπτυξη των υπεράκτιων αιολικών πάρκων παγκοσμίως, έχει ευνοήσει και έχει υποστηρίξει την ανάπτυξη σχετικού εξοπλισμού, καθώς και την έρευνα γύρω από την εγκατάστασή του. Πλήθος προμηθευτών και κατασκευαστών, έχει ήδη πραγματοποιήσει επενδύσεις και εν συνεχεία εγκαταστάσεις σχετικών κατασκευών, σε πληθώρα θαλάσσιων περιοχών των ελληνικών χωρικών υδάτων. Σημειώνεται ωστόσο, ότι πριν την εκπόνηση μελέτης υπεράκτιου αιολικού πάρκου σε επιλεγμένη τοποθεσία, απαιτείται η πρωτύτερη



εγκατάσταση του συγκεκριμένου συστήματος, για χρονικό διάστημα τουλάχιστον 5 χρόνων, καθώς κατ' αυτόν τον τρόπο υπάρχουν βάσιμα τοπικά δεδομένα.

3.2 Βαθυμετρία και πυθμένας

Ένα εξίσου σημαντικό δεδομένο που απαιτείται για την κατασκευή οποιουδήποτε θαλάσσιου έργου είναι η μορφολογία του βυθού. Η ανάγκη της καταγραφής των πυθμένων όλων των υδάτινων περιοχών, καθώς και απεικόνιση και χαρτογράφησή τους, ορίζεται ως βαθυμετρία. Η βαθυμετρία και η γεωτεχνική φύση του πυθμένα είναι κρίσιμες παράμετροι για την ανάπτυξη υπεράκτιων αιολικών πάρκων, καθώς καθορίζουν τη δυνατότητα και τον τύπο θεμελίωσης που θα επιλεγεί.

Το βάθος της θάλασσας παρουσιάζει έντονες και απότομες διακυμάνσεις, οι οποίες με τη σειρά τους επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά των ρευμάτων και του κύματος. Για παράδειγμα η εμφάνιση υποθαλάσσιων αμμόλοφων ή άλλα ρηχά σημεία, μειώνουν αισθητά τα εκάστοτε μέγιστα ύψη κύματος, καθώς το κύμα «θα σπάσει» πάνω στον αμμόλοφο. Ένα ακόμα ενδεχόμενο που διαφοροποιεί τους κυματισμούς είναι η ύπαρξη υφάλων ή/και έντονες κλίσεις που ενδεχομένως να απαιτήσουν μετρήσεις σε κοντινότερες αποστάσεις μεταξύ των επιλεγμένων θέσεων εγκατάστασης. Δυσμενέστερη περίπτωση αποτελεί, ένας εντελώς ανομοιόμορφος βυθός, στην περιοχή κατασκευής του αιολικού πάρκου, καθώς έτσι δυσχεραίνονται τόσο οι υπολογισμοί, όσο και η εγκατάσταση και η θεμελίωση των ανεμογεννητριών.

Αντίστοιχα, η ποικιλομορφία των θαλάσσιων πυθμένων δυσχεραίνει ιδιαίτερα την τυποποίηση της θεμελίωσης, καθώς τα διαφορετικά υλικά (άμμος, ιλύς, χαλίκι, βράχος, αλλά και μικτές συνθήκες), καλούνται να αντιμετωπιστούν με διαφορετικό τρόπο. Ενδεικτικό είναι ότι ακόμη και μικρές αποκλίσεις στη σκληρότητα του πυθμένα, μπορεί να έχουν τεράστιες επιπτώσεις στη στατική επάρκεια και στο κόστος της θεμελίωσης.

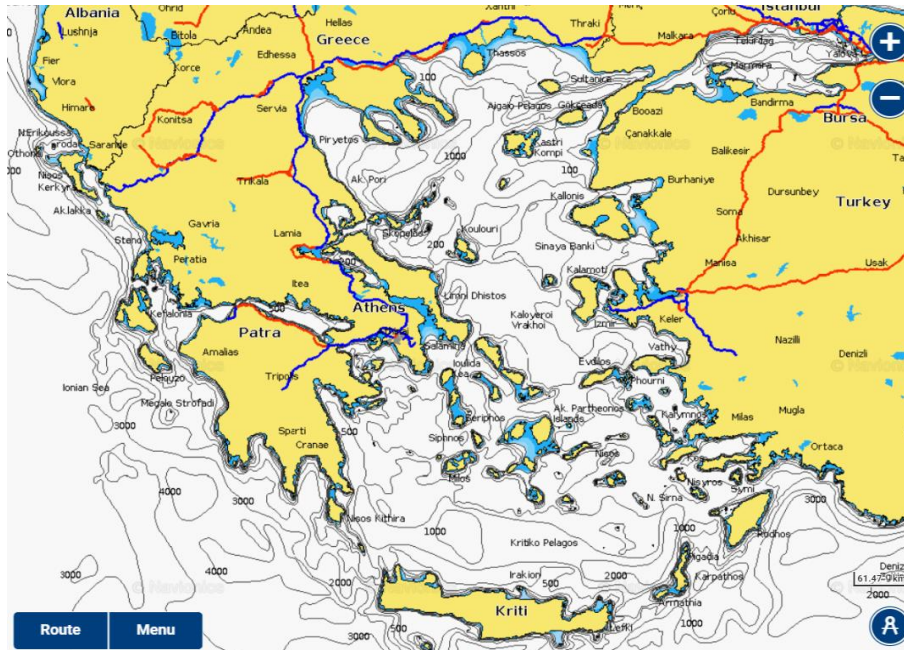
Η συλλογή και καταμέτρηση των δεδομένων πραγματοποιείται μέσω πλήθους οργάνων και συστημάτων μετρήσεων, οι πιο διαδεδομένοι και αξιοποιήσιμοι εκ των οποίων είναι οι ακόλουθοι:

- Δορυφορική Αποτύπωση, η οποία αντίστοιχα με τα δορυφορικά δεδομένα του ανέμου, αποτελεί προκαταρκτικά δεδομένα για μεγάλες κλίμακες. Τα συλλεγόμενα δεδομένα, θα πρέπει να επιβεβαιωθούν με ακριβέστερη μέτρηση για να μπορέσουν να αξιοποιηθούν στο λεπτομερή σχεδιασμό.
- Υδρογραφικές Έρευνες (Bathymetric Surveys), στις οποίες χρησιμοποιούνται συστήματα πολυδεσμικών ηχοβολιστών (multibeam echo sounders) για την ακριβή τρισδιάστατη χαρτογράφηση του βυθού και παρέχουν λεπτομερή αποτύπωση σε εκατοστά ακρίβειας, απαραίτητη για τον χωροταξικό σχεδιασμό.
- Γεωφυσικές Έρευνες (Geophysical Surveys), οι οποίες πραγματοποιούνται με τεχνικές όπως sonar πλευρικής σάρωσης (side scan sonar), υποδορυφορική τομογραφία (sub-bottom profiling) και μαγνητόμετρα χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό στρώσεων, εμποδίων και θαλάσσιων ιζημάτων. Οι έρευνες αυτές κρίνονται απαραίτητες για να εκτιμηθεί το πάχος των ιζημάτων, η φύση και η ύλη του υποστρώματος.



- Γεωτεχνικές Έρευνες (Geotechnical Surveys), οι οποίες περιλαμβάνουν δοκιμαστικές γεωτρήσεις πυρήνα και δειγματοληψίες με βαρύτητα με επιτόπιους ελέγχους (Cone Penetration Tests CPT), παρέχοντας απαραίτητα δεδομένα για την αντοχή τη συνεκτικότητα και την πυκνότητα του εδάφους.

Σύμφωνα με τα δεδομένα που είναι αναρτημένα και διαθέσιμα από την υδρογραφική υπηρεσία του Navionics, τα βάθη που συναντώνται εντός του ελληνικού χώρου δεν υπερβαίνουν τα 3500 m.



Χάρτης 5: Βαθυμετρικά χαρακτηριστικά (Πηγή: Navionics)

Ο πυθμένας και γενικότερα τα υλικά από τα οποία αποτελείται το υπέδαφος, είναι αναγκαία για την θεμελίωση και την εγκατάσταση των ανεμογεννητριών. Μία επιπλέον παράμετρο αποτελούν οι ενδεχόμενες δονήσεις, οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν αλλοίωση στον πυθμένα, οπότε και οφείλει να είναι γνωστό το υποθαλάσσιο εδαφικό υπόβαθρο, ώστε να προσαρμοστούν οι μηχανισμοί, τα μηχανήματα και τα εργαλεία εγκατάστασής τους.

3.3 Παλίρροιες και θαλάσσιες συνθήκες

Όπως συμβαίνει σε οποιοδήποτε έργο και κατασκευή, οι παράμετροι σχεδιασμού και κατασκευής εξαρτώνται από τις συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον δραστηριοποίησης. Κατά αντίστοιχο τρόπο, και στα υπεράκτια αιολικά πάρκα είναι σημαντική η μελέτη του γύρω περιβάλλοντος. Πέρα από τον άνεμο και τα κύματα σημαντικά είναι και άλλα θαλάσσια χαρακτηριστικά, όπως για παράδειγμα οι παλίρροιες, τα θαλάσσια ρεύματα και οι κυματισμοί που δημιουργούνται.

Οι παλίρροιες και τα θαλάσσια ρεύματα αποτελούν κρίσιμους περιβαλλοντικούς παράγοντες που επηρεάζουν τόσο τη φάση κατασκευής όσο και τη μακροχρόνια λειτουργία υπεράκτιων



αιολικών πάρκων. Οι βασικές δυσκολίες εντοπίζονται κυρίως στη μεγάλη χωρική και χρονική μεταβλητότητα που παρουσιάζουν, καθώς οι παλιρροϊκές ταλαντώσεις και τα ρεύματα επηρεάζονται από πλήθος παραγόντων, μεταξύ των οποίων τη μορφολογία της ακτογραμμής, τα βάθη, τα θαλάσσια στενά και την αλληλεπίδρασή τους με τον άνεμο.

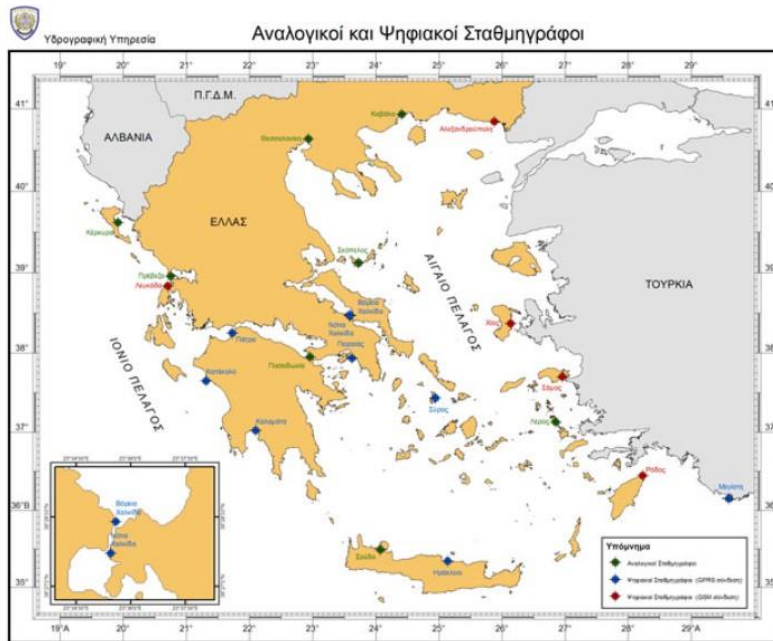
Η κατανόηση και ακριβής αποτύπωση των παλιρροϊκών φαινομένων και των θαλάσσιων ρευμάτων είναι καθοριστικής σημασίας για όλα τα στάδια ανάπτυξης ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου. Κατά τον σχεδιασμό των θεμελιώσεων και των υποθαλάσσιων καλωδιώσεων, τα ρεύματα επηρεάζουν την ευστάθεια των κατασκευών και συνδέονται άμεσα με το φαινόμενο της διάβρωσης του πυθμένα, καθιστώντας απαραίτητη την εφαρμογή ειδικών μέτρων προστασίας. Παράλληλα, για τις πλωτές ανεμογεννήτριες, οι παλιρροϊκές μεταβολές και οι πλευρικές δυνάμεις από ρεύματα επιβάλλουν αυστηρές απαιτήσεις στον σχεδιασμό των αγκυρώσεων.

Στη φάση κατασκευής, η ένταση των ρευμάτων καθορίζει τα «παράθυρα εργασίας» και επηρεάζει την ασφάλεια και τη δυνατότητα πρόσβασης βαρέων πλοίων και ανυψωτικών μέσων, ενώ κατά τη λειτουργία και συντήρηση οι ίδιες παράμετροι καθορίζουν την εφικτότητα πρόσβασης και την αξιοπιστία των επεμβάσεων. Τέλος, η ολοκληρωμένη μελέτη των παλιρροϊκών και υδροδυναμικών συνθηκών συμβάλλει στην ακριβέστερη εκτίμηση του ενεργειακού δυναμικού, καθώς η αλληλεπίδρασή τους με τον άνεμο επηρεάζει ουσιαστικά το πραγματικό ποσοστό διαθεσιμότητας του πάρκου.

Για τη βέλτιστη εκτίμηση των δεδομένων, απαιτούνται μακροχρόνιες σειρές δεδομένων και προχωρημένα υδροδυναμικά μοντέλα, τα οποία προσθέτουν πολυπλοκότητα στην προσομοίωση. Για τον προσδιορισμό των διαφόρων παλιρροϊκών επιπέδων, πραγματοποιούνται μακροχρόνιες μετρήσεις με τη βοήθεια σταθμηγράφων (παλιρροιογράφων), τα οποία χρησιμοποιούνται για τη βαθμονόμηση και την επιβεβαίωση υδροδυναμικών μοντέλων, μετρώντας τη μέση και μέγιστη πλήμνη, τη μέση και μέγιστη στάθμη των υδάτων, καθώς και την κατώτατη ρηχία. Σημαντικά όργανα μέτρησης αποτελούν και τα ADCP (Acoustic Doppler Current Profilers), τα οποία είναι υποβρύχιοι αισθητήρες που μετρούν την ταχύτητα και κατεύθυνση ρευμάτων σε διάφορα βάθη, και ενδείκνυται για μακροχρόνια παρακολούθηση.

Η Υδρογραφική Υπηρεσία του Πολεμικού Ναυτικού, διατηρεί ένα δίκτυο μόνιμα εγκατεστημένων σταθμηγράφων σε 23 περιοχές του Ελληνικού θαλάσσιου χώρου, σε λιμένες του Ελληνικού θαλάσσιου χώρου για την παρακολούθηση αυτών των μεταβολών. Οι σταθμοί προσφέρουν την δυνατότητα εικοσιτετράωρης καταγραφής της μεταβολής της θαλάσσιας στάθμης σε αναλογική μορφή.





Χάρτης 6: Χάρτης αναλογικών και ψηφιακών σταθμογράφων στην Ελλάδα (Πηγή: Υδρογραφική Υπηρεσία Πολεμικού Ναυτικού)

3.4 Τρόποι θεμελίωσης υπεράκτιων ανεμογεννητριών

Τα έργα υποδομής και θεμελίωσης αποτελούν τον κύριο άξονα της τεχνικής υλοποίησης ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου, καθώς καθορίζουν τόσο την αντοχή, όσο και τη βιωσιμότητα του έργου. Πρόκειται για σύνθετες κατασκευαστικές διαδικασίες που λαμβάνουν υπόψη τις γεωτεχνικές, ωκεανογραφικές και περιβαλλοντικές συνθήκες της εκάστοτε θαλάσσιας περιοχής.

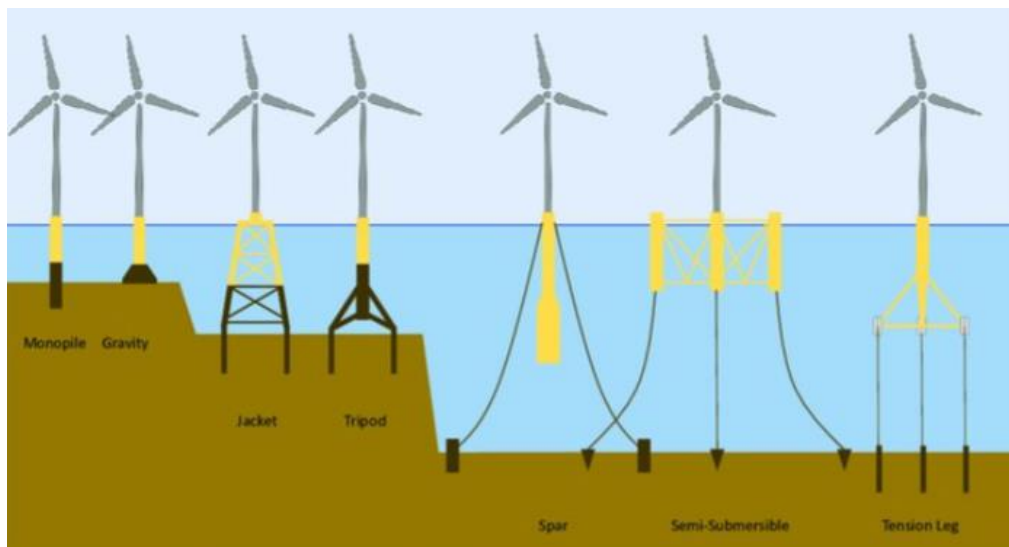
Ένα από τα περιπλοκότερα έργα κατά τη μελέτη και την κατασκευή ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου, αποτελούν οι εργασίες θεμελίωσης των ανεμογεννητριών. Η επιλογή θεμελίωσης εξαρτάται από το βάθος, τη γεωλογία του πυθμένα και τα φορτία που αναμένεται να ασκηθούν. Ειδικά στα μεγαλύτερα βάθη, οι οικοδομικές εργασίες στοιχίζουν αρκετά παραπάνω από τις αντίστοιχες εργασίες στη στεριά. Σε πολλές περιπτώσεις απαιτούνται παραπάνω θεμέλια από τα προβλεπόμενα. Οι προβλεπόμενες θεμελιώσεις είναι πέντε ειδών και διαχωρίζονται βάσει του βάθους όπου προβλέπεται να εγκατασταθεί. Πιο συγκεκριμένα τα πέντε συστήματα είναι:

- 1) η θεμελίωση μονού πυλώνα Monopile,
- 2) η θεμελίωση βαρύτητας με υδατοστεγές κιβώτιο Gravity-based foundation,
- 3) η θεμελίωση δικτύωματος Jacket foundation,
- 4) η θεμελίωση τριπόδου Tripod foundation,
- 5) και οι πλωτές εξέδρες Floating platforms.



Πίνακας 4: Κατηγορίες Θεμελίωσης Υπεράκτιων Ανεμογεννητριών

Κατηγορία	Περιγραφή	Βάθος Εφαρμογής	Παραδείγματα Έργων
Monopile	Χαλύβδινος πάσσαλος μεγάλων διαστάσεων (διάμετρος 6–12 μ.) που πακτώνεται στον πυθμένα. Απλή, κυρίαρχη τεχνολογία.	0 – 40 μ.	Horns Rev (Δανία), London Array (Ην. Βασίλειο)
Gravity Base	Βαριά βάση από σκυρόδεμα, τοποθετείται με το ίδιο της το βάρος στον πυθμένα. Απαιτεί επίπεδο βυθό.	0 – 30 μ.	Vindeby (Δανία), Thornton Bank (Βέλγιο)
Jacket	Μεταλλική εσχάρα τετραποδικής μορφής, πακτώνεται με πασσάλους. Κατάλληλη για μεγάλα βάθη.	30 – 60 μ.	Beatrice (Ην. Βασίλειο), BorWin (Γερμανία)
Tripod	Συνδυασμός monopile με τρία διαγώνια σκέλη. Ιστορική λύση, περιορισμένη χρήση σήμερα.	25 – 50 μ.	Borkum West II (Γερμανία)
Floating (Πλωτές)	Ανεμογεννήτρια τοποθετημένη σε πλωτή πλατφόρμα (spar, semi-submersible, tension leg). Κατάλληλη για πολύ μεγάλα βάθη.	> 50 μ. έως και > 1000 μ.	Hywind Scotland (Ην. Βασίλειο), WindFloat Atlantic (Πορτογαλία)



Εικόνα 8: Κατηγορίες Θεμελίωσεων υπεράκτιων ανεμογεννητριών (Πηγή: Esther Dornhelm , et al. 2019)

3.4.1 Θεμελίωση μονού πυλώνα Monopile

Η θεμελίωση τύπου Monopile αποτελεί την πιο διαδεδομένη τεχνική υποστήριξης υπεράκτιων ανεμογεννητριών, η οποία χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο στα μικρότερα βάθη και πλησιέστερα στην ακτή. Πρόκειται για έναν μεταλλικό κυλινδρικό σωλήνα μεγάλων διαστάσεων (διάμετρος 6–12 m, μήκος 30–60 m), που πακτώνεται κατακόρυφα στον θαλάσσιο πυθμένα.

Η περίπτωση αυτή δεν απαιτεί ιδιαίτερη επεξεργασία του πυθμένα, ωστόσο πραγματοποιείται μόνο σε εδάφη που αποτελούνται από χαλίκια ή άμμο, καθώς οι περιοχές αυτές δεν χρειάζονται και δαπανηρές ή εκτεταμένες γεωτρήσεις. Ο βυθός και το εδαφικό του υλικού, επηρεάζουν τόσο τον χαλύβδινο πυλώνα που θα τοποθετηθεί, όσο και το βάθος στο



οποίο θα θεμελιωθεί τα οποία συνήθως κυμαίνονται από 10 έως 20 m. Η τοποθέτηση γίνεται με υδραυλική σφύρα ή δονητική διάτρηση, ώστε ο πυλώνας να διεισδύσει σε βάθος που εξασφαλίζει επαρκή ευστάθεια.

Η έδραση του τύπου αυτού προτείνεται για βάθος υδάτων έως και 40 m και εντοπίζεται σε πάρκα της Βαλτικής και της Βορείου Θάλασσας. Είναι ιδιαιτέρως διαδεδομένη, με ευρεία χρήση και δοκιμασμένη τεχνολογία, όντας σχετικά απλή στο σχεδιασμό και την εγκατάσταση, με την Ευρώπη να την αξιοποιεί σε άνω του 70% των υπεράκτιων έργων, μέχρι στιγμής.

Ο τύπος αυτός δεν παρουσιάζει έντονη διάβρωση των υλικών, καθώς πρόκειται για υψηλής αντοχής χάλυβα με αντιδιαβρωτική προστασία και συνεπώς, συνήθως δεν χρειάζονται επιπλέον μέτρα.

Τα πλεονεκτήματα αυτού του είδους των είναι μεταξύ άλλων τα μικρά βάρη τους, τα οποία έχουν ως συνέπεια και τη διευκόλυνση στη μεταφορά και την τοποθέτηση και το γεγονός ότι δεν απαιτούν ιδιαίτερες προετοιμασίες για τη θεμελίωσή τους. Ακόμα, πρόκειται για τον τρόπο θεμελίωσης με το χαμηλότερο κόστος παραγωγής και εγκατάστασης, λόγω της πλέον τυποποιημένης διαδικασίας και αλυσίδας προμηθευτών, αλλά και της μεγάλης εμπειρίας στον κλάδο.



Εικόνα 9: Θεμελίωση μονού πυλώνα (Πηγή: Balmoraloffshore)

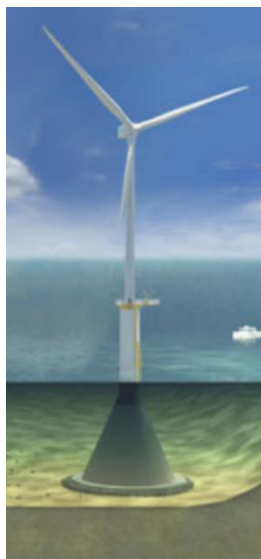
3.4.2 Θεμελίωση βαρύτητας με υδατοστεγές κιβώτιο Gravity-based foundation

Η θεμελίωση βαρύτητας (Gravity-Based Foundation – GBF) αποτελεί μία από τις πρώτες μεθόδους στήριξης υπεράκτιων ανεμογεννητριών και διακρίνεται για την ευστάθεια της κατασκευής, η οποία εξασφαλίζεται από το ίδιο το βάρος της θεμελίωσης και όχι από την πακτώσή της στον πυθμένα.

Το βασικό της στοιχείο είναι ένα υδατοστεγές κιβώτιο από σκυρόδεμα με χαλύβδινες ενισχύσεις, συνήθως κυλινδρικής ή πολυγωνικής διατομής, το οποίο εδράζεται απευθείας στον θαλάσσιο πυθμένα. Η διάμετρός του πυλώνας κυμαίνεται μεταξύ 15–20 m και έχει



ύψος που ξεπερνά τα 10 μ. Το κέλυφός τους ουσιαστικά είναι από οπλισμένο σκυρόδεμα και η διατομή του διαφέρει βάσει και των συνθηκών του περιβάλλοντος δραστηριοποίησης σε ανοικτής οροφής ή κλειστής.



Εικόνα 10: Θεμελίωση βαρύτητας (Πηγή : [Offshorewind](#))

Η εν λόγω θεμελίωση δεν είναι και τόσο συχνή λόγω του μεγάλου βάρους του σκυροδέματος και της ανάγκης εκτεταμένων υποβρύχιων εργασιών για την εξομάλυνση και ισοπέδωση του πυθμένα. Για την εγκατάσταση απαιτείται προετοιμασία πυθμένα με εξομάλυνση ή στρώση λιθορριπής, ώστε να αποφευχθεί ανομοιομορφή καθίζηση.

Αφότου τοποθετηθούν στο νερό, στηρίζονται πάνω του τα επιμέρους τμήματα της ανεμογεννήτριας, συμπεριλαμβανομένου του πυλώνα, του μηχανισμού περιστροφής, των λεπίδων και του ηλεκτρομηχανολογικού υλικού. Η κατασκευή επικαλύπτεται από μεμβράνες -που εισχωρούν στον πυθμένα- και περιμετρική διάστρωση των πετρωμάτων. Η μεν προστατεύει την κατασκευή έναντι διάβρωσης και η δε εξασφαλίζει την αποφυγή της απομάκρυνσης του εδάφους στήριξης. Κάτι τέτοιο προκαλεί ωστόσο περιορισμούς στην εφαρμογή, καθώς κρίνεται απαγορευτική η χρήση του σε περιοχές με μαλακό ή αμμώδη πυθμένα, όπου η καθίζηση μπορεί να μειώσει τη σταθερότητα.

Οι θεμελιώσεις βαρύτητας με υδατοστεγές κιβώτιο αποτέλεσαν πρωτοποριακή λύση στα πρώτα υπεράκτια έργα και προσφέρουν πλεονεκτήματα σε ό,τι αφορά την απουσία πασσαλόμπηξης και τη μεγάλη ανθεκτικότητα. Ωστόσο, η μεγάλη μάζα και οι απαιτήσεις σε υποδομές περιόρισαν την ευρεία τους χρήση, ενώ πλέον επιλέγονται μόνο σε ειδικές περιπτώσεις, κυρίως σε ρηχά ύδατα και όπου οι συνθήκες πυθμένα είναι αρκετά ευνοϊκές.

3.4.3 Θεμελίωση δικτύματος Jacket foundation

Η θεμελίωση τύπου Jacket αποτελεί μία από τις πλέον διαδεδομένες λύσεις για την εγκατάσταση υπεράκτιων ανεμογεννητριών, ιδίως σε περιοχές με μεσαία έως μεγαλύτερα βάθη.



Πρόκειται για μια μεταλλική εσχάρα, σχεδιασμένη σε τετραγωνικό ή τριγωνικό πρίσμα με κωνική διαμόρφωση προς την κορυφή, κατασκευασμένη από χαλύβδινους σωλήνες, η οποία πακτώνεται στον πυθμένα μέσω 3 ή 4 πασσάλων (pile legs).

Ο σχεδιασμός της προέρχεται από την τεχνογνωσία των πλατφορμών εξόρυξης πετρελαίου και φυσικού αερίου στη Βόρεια Θάλασσα. Η δομή τους είναι χαλύβδινα και χρησιμοποιείται σε πληθώρα έργων ανοικτής θαλάσσης, ειδικά σε έργα εκμετάλλευσης και εξόρυξης πετρελαίου. Η δυσκαμψία της κατασκευής αυτής είναι αρκετά καλή συγκριτικά με το βάρος και το κόστος της.

Ο τρόπος θεμελίωσης Jacket, εμφανίζει υψηλή αντοχή σε οριζόντια φορτία από κύματα και ρεύματα, λόγω της δικτυωτής μορφής του, η οποία αποσβένει υδροδυναμικές δυνάμεις. Συμπληρωματικά, προτιμάται διότι εμφανίζει δυνατότητα προσαρμογής σε διαφορετικά γεωτεχνικά υποστρώματα

Η κατασκευή συναρμολογείται στη στεριά και μεταφέρεται και εγκαθίσταται στην τοποθεσία σχεδιασμού μέσω πλωτών μέσων. Η εγκατάσταση κρίνεται σχετικά πολύπλοκη εγκατάσταση, καθώς απαιτεί ακριβείς γεωτεχνικές μελέτες και ειδικό εξοπλισμό για την τοποθέτηση των πασσάλων.



Εικόνα 11: Θεμελίωση jacket (Πηγή: Wenbin Dong, Torgeir Moan, Zhen Gao)

3.4.4 Θεμελίωση τριπόδου Tripod foundation

Η θεμελίωση τριπόδου (tripod foundation) αποτελεί εξέλιξη της λύσης μονού πυλώνα (monopile), ειδικά σχεδιασμένη για εγκαταστάσεις σε μεσαία βάθη, όπου οι προαναφερθείσες θεμελιώσεις κρίνονται επισφαλείς ως προς την έδραση.

Το τρίποδο είναι μία μεταλλική κατασκευή με κεντρικό σωλήνα, στον οποίο εδράζεται η ανεμογεννήτρια, και τρία διαγώνια σκέλη που το καθένα φέρει χαλύβδινο πάσσαλο, ο οποίος με τη σειρά του, πακτώνεται στον πυθμένα. Η στήριξη γίνεται μέσω των πασσάλων που τοποθετούνται σε κάθε σκέλος, προσφέροντας αυξημένη ευστάθεια. Ο σχεδιασμός



παρουσιάζει της βάσης, χαρακτηρίζεται από ανθεκτικότητα σε μεγάλες ανεμοπιέσεις και έντονα κύματα, χάρη στη διασπορά των φορτίων.

Η εγκατάσταση της κατασκευής πραγματοποιείται σε δύο φάσεις, με την τοποθέτηση των πασσάλων να προηγείται και την στήριξη του τριπόδου να έπεται. Χαρακτηριστικό της είναι ακόμα, το γεγονός ότι δεν χρειάζεται ιδιαίτερη και εξειδικευμένη προετοιμασία ο πυθμένας και σε συνδυασμό με τη σταθερότητα που προσφέρει σε παντός τύπου εδάφη – εξαιρουμένων των βραχωδών – είναι ευνοϊκή και η χρήση της σε ανώμαλους και ανομοιόμορφους πυθμένες.

Η θεμελίωση Tripod αποτελεί σημαντική ενδιάμεση τεχνολογία μεταξύ monopile και jacket, αρκετά δημοφιλή κατά τα πρώτα βήματα της υπεράκτιας αιολικής ανάπτυξης. Πλέον χρησιμοποιείται σπανιότερα λόγω της επικράτησης jacket foundations σε μεγαλύτερα βάθη και monopiles σε ρηχά.



Εικόνα 12: Θεμελίωση τριπόδου (Πηγή: [Micro-epsilon](#))

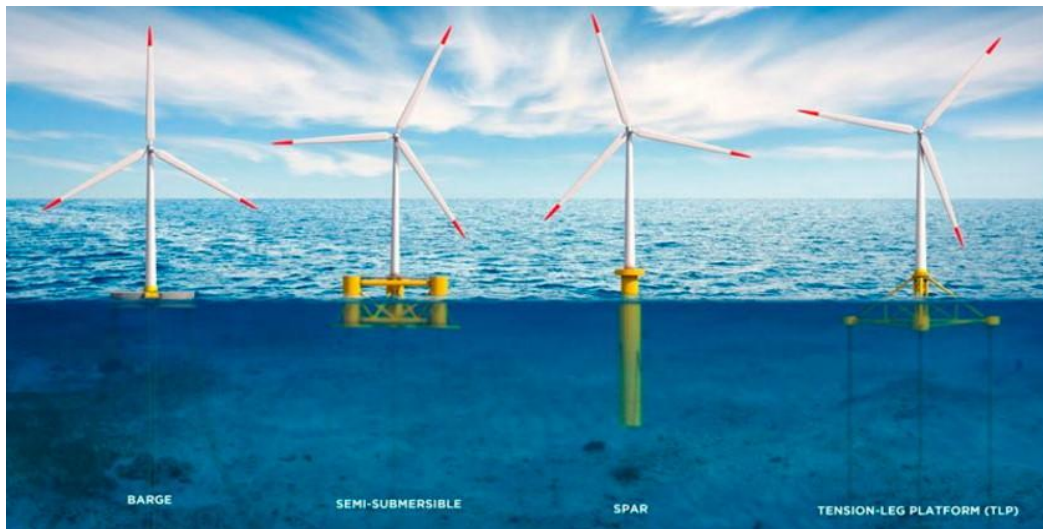
3.4.5 Πλωτές εξέδρες Floating platforms

Η θεμελίωση μέσω πλωτών εξεδρών αποτελεί την πλέον καινοτόμο και ραγδαία αναπτυσσόμενη λύση στον τομέα της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας. Σε αντίθεση με τις συμβατικές λύσεις (monopile, gravity, jacket, tripod), οι οποίες πακτώνονται στον πυθμένα, οι πλωτές εξέδρες επιπλέουν στην επιφάνεια και αγκυρώνονται με συστήματα πρόσδεσης (π.χ. αλυσίδες, συρματοσχοινα, αγκυροβόλια) στον θαλάσσιο πυθμένα. Έτσι επιτρέπουν την εγκατάσταση αιολικών πάρκων σε μεγάλα θαλάσσια βάθη, όπου η εφαρμογή σταθερών θεμελιώσεων είναι τεχνικά ή οικονομικά ανέφικτη.

Οι τέσσερις πιο συχνές υποθαλάσσιες συνδέσεις που συναντώνται είναι οι Spar, Semi-Submersible και Tension Leg. Οι διαφορές μεταξύ των τριών εμφανίζονται στον σχεδιασμό του θεμελίου και παρουσιάζονται εποπτικά στην εικόνα που ακολουθεί:



- Barge-type floating platform: επίπεδη πλωτή κατασκευή, παρόμοια με φορτηγίδες (barges), η οποία διακρίνεται για την πλευστότητα και το μεγάλο πλάτος, που ενισχύουν την παροχή ευστάθειας
- Spar-buoy: επιμήκης, κυλινδρική κατασκευή που βυθίζεται βαθιά στο νερό, εξασφαλίζοντας ευστάθεια μέσω βάρους και πλευστότητας.
- Semi-submersible: εξέδρα με πολλαπλούς πλωτήρες που μοιράζουν το βάρος και παρέχουν σταθερότητα.
- Tension Leg Platform (TLP): εξέδρα αγκυρωμένη με τεντωμένα σκοινιά ή ράβδους, η οποία περιορίζει τις κατακόρυφες μετακινήσεις.



Εικόνα 13: Πλωτές εξέδρες (Πηγή: Wind Europe)

Οι συγκεκριμένες πλατφόρμες είναι αγκυροβολημένες στον πυθμένα της θάλασσας μέσω καλωδίων, ενώ ο συγκεκριμένος τύπος περιορίζει περισσότερο τα όρια του αιολικού πάρκου προκειμένου να αποφεύγονται τα ατυχήματα και η παρεμπόδιση της ασφαλούς ναυσιπλοΐας. Κατασκευαστικά δηλαδή, πρόκειται για ένα θεμέλιο το οποίο εκμεταλλεύεται τις ανωστικές δυνάμεις των υδάτων για να επιπλέει, ενώ συγκρατείται στη συγκεκριμένη τοποθεσία μέσω της προαναφερθείσας αγκύρωσης.

Τα πλωτά υπεράκτια αιολικά πάρκα είναι η τεχνολογία που προωθείται και σχεδιάζεται σε μεγαλύτερο βαθμό τα τελευταία χρόνια, καθώς αυξάνουν κατά πολύ τα ποσά παραγόμενης ενέργειας, λόγω της εκμετάλλευσης των αυξημένων ταχυτήτων ανέμου. Όπως είναι λογικό, σε μεγαλύτερες αποστάσεις από τη στεριά, λόγω και της απουσίας φυσικών και άλλων εμποδίων, ο άνεμος εμφανίζει μεγαλύτερες ριπές και πιο σταθερή πνοή. Το στοιχείο αυτό αποτελεί και το μεγαλύτερο κέρδος για των πλωτά ΘΑΠ, όχι μόνο λόγω της καλύτερης αποδοτικότητας του συστήματος, αλλά και λόγω του ότι μειώνεται αισθητά η οπτικοακουστική όχληση συγκριτικά με τις ανεμογεννήτριες της ηπειρωτικής χώρας ή/και άλλες υπεράκτιες ανεμογεννήτριες.

Ο συγκεκριμένος τύπος επιδέχεται και μεγαλύτερης ισχύος και διαστάσεων ανεμογεννήτριες, με τα μεγέθη να φτάνουν και τα 12 - 15 MW, μελετώντας ταυτόχρονα και μεγαλύτερες διάρκειες ζωής.



Στα θετικά στοιχεία, συγκαταλέγεται επίσης, η μειωμένη επίδραση στο περιβάλλον τόσο με την οπτικοακουστική όχληση – όπως αναφέρθηκε και παραπάνω- αλλά και όσον αφορά το παράκτιο περιβάλλον και τα αναπτυσσόμενα οικοσυστήματα. Επιπρόσθετα, προσόν αυτού του τύπου θεμελίωσης αποτελεί η προσαρμοστικότητα που εμφανίζει σε διαφορετικές γεωμορφολογίες και μηδενική ανάγκη βαθιάς θεμελίωσης στον πυθμένα.

3.5 Έργα υποδομής και διασύνδεσης με την ηπειρωτική χώρα

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας και εφόσον πραγματοποιείται εκτενής ανάλυση όλων των παραγόντων που συνδράμουν στην επιλογή, μελέτη και εν συνεχεία κατασκευή ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου, κρίνεται σκόπιμη η ανάλυση του τρόπου και της διαδικασίας που ακολουθείται κατά την εγκατάσταση και τη διασύνδεση του πάρκου με το δίκτυο της ηπειρωτικής χώρας.

3.5.1 Έργα υποδομής

Η ανάπτυξη υπεράκτιων αιολικών πάρκων προϋποθέτει ένα ευρύ φάσμα έργων υποδομής, τα οποία εμπλέκουν διαφορετικούς θεσμικούς και ιδιωτικούς φορείς. Τα έργα των υπεράκτιων αιολικών πάρκων, έχουν προαπαιτούμενο τις κατάλληλα εξειδικευμένες υποστηρικτικές υποδομές στην ξηρά.

Οι δομές αυτές διαχωρίζονται στις λιμενικές εγκαταστάσεις, στα εξειδικευμένα ναυπηγεία και στο δίκτυο συλλογής, διαχείρισης και παραγωγής. Ειδικότερα απαιτούνται εκτεταμένες προβλήτες, αποθηκευτικοί χώροι, ναυπηγεία και χώροι προ-συναρμολόγησης των τμημάτων ανεμογεννητριών (πύργοι, ρότορες, θεμελιώσεις), με τον απαραίτητο εξοπλισμό. Τα ναυπηγεία πρέπει να είναι κατάλληλως δομημένα ώστε να μπορέσουν να υποστηρίξουν τα έργα σε όλες τις φάσεις. Σε αντίθετη περίπτωση και όπως το παράδειγμα του Nantes Saint-Nazaire στη Γαλλία, που αναφέρθηκε πρωτύτερα, θα πρέπει οι λιμενικές και βιομηχανικές εγκαταστάσεις να αναβαθμιστούν κατάλληλως, για την υποστήριξη των υπεράκτιων έργων. Αντίστοιχα, το δίκτυο απαιτείται να είναι πλήρως εξοπλισμένο τόσο υποθαλασσίως, όσο και στην ηπειρωτική χώρα, ώστε να απορροφά την παραγόμενη ισχύ.

Ειδικότερα, οι σημαντικότερες υποδομές που απαιτούνται κατά την κατασκευή ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου περιγράφονται ακολούθως:

Λιμενικές και ναυπηγικές υποδομές

Οι λιμενικές εγκαταστάσεις αποτελούν βασικό στοιχείο για την προετοιμασία, συναρμολόγηση και υποστήριξη της εγκατάστασης ανεμογεννητριών και πλωτών θεμελιώσεων. Την ευθύνη φέρουν το Υπουργείο Ναυτιλίας και Νησιωτικής Πολιτικής, καθώς και οι Οργανισμοί Λιμένων που διαχειρίζονται τις αντίστοιχες εγκαταστάσεις.

Οι χώροι αυτοί στεγάζονται στη στεριά που απέχει κατά το δυνατό μικρότερη απόσταση από την υπεράκτια κατασκευή. Ο χώρος αυτός, είναι κατάλληλα σχεδιασμένος ώστε να μπορούν να πραγματοποιηθούν όλες οι διεργασίες κατασκευής των βάσεων και των επιμέρους τμημάτων. Συμπληρωματικά και όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, βασική χρήση των χώρων αποτελεί η αποθήκευση και η φύλαξη των εξαρτημάτων των ανεμογεννητριών και του



λοιπού εξοπλισμού. Ο σκοπός σχεδιασμού και ύπαρξης εν λόγω υποδομών έγκειται στη διευκόλυνση της φορτοεκφόρτωσης από και προς τα σκάφη μεταφοράς, η διασφάλιση της ακεραιότητας των εξαρτημάτων και η αποφυγή φαινομένων βανδαλισμού και κλοπής.

Θεμελιώσεις

Οι δομές στήριξης (μονοπάσσαλοι, jacket, τρίποδα, πλωτές πλατφόρμες) υλοποιούνται από τους ιδιώτες επενδυτές ή αναδόχους έργων, υπό την αδειοδοτική εποπτεία της Ρυθμιστικής Αρχής Αποβλήτων, Ενέργειας και Υδάτων (ΡΑΑΕΥ) και του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ).

Υποθαλάσσια καλώδια

Η προσαיγιάλωση των υποθαλάσσιων καλωδίων και η σύνδεσή τους με το χερσαίο δίκτυο είναι κρίσιμες παράμετροι για τη μεταφορά της παραγόμενης ενέργειας. Υπεύθυνος για τις διασυνδέσεις με το εθνικό δίκτυο είναι ο Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ), ενώ η ΡΑΑΕΥ έχει την ευθύνη της αδειοδότησης. Αντίστοιχα, για την ένταξη της παραγωγής στο εθνικό ηλεκτρικό σύστημα υπεύθυνος είναι ο ΑΔΜΗΕ για τις γραμμές υψηλής και υπερυψηλής τάσης, ενώ ο ΔΕΔΔΗΕ εμπλέκεται σε περιπτώσεις που απαιτείται σύνδεση σε μέση τάση. Επιπρόσθετα, απαιτείται και η εκπόνηση εργασιών εκσκαφής του πυθμένα και σε τμήμα της στεριάς και τη διάνοιξη καναλιών για την τοποθέτηση των καλωδίων μεταφοράς ρεύματος.

Θαλάσσιοι υποσταθμοί

Οι θαλάσσιοι υποσταθμοί συγκεντρώνουν την παραγωγή και ανυψώνουν την τάση πριν την αποστολή στην ξηρά. Την ανάπτυξή τους αναλαμβάνουν οι ιδιώτες επενδυτές, με αδειοδοτικό έλεγχο από τη ΡΑΑΕΥ και το ΥΠΕΝ.

Κέντρα ελέγχου και SCADA

Η λειτουργία των υπεράκτιων αιολικών πάρκων παρακολουθείται μέσω εξειδικευμένων κέντρων ελέγχου, τα οποία αναπτύσσονται από τους ίδιους τους επενδυτές, σε συνεργασία με τον ΑΔΜΗΕ για την ασφαλή ενσωμάτωση στο δίκτυο.

Σκάφη εγκατάστασης και συντήρησης

Η μεταφορά προσωπικού και εξοπλισμού, καθώς και η συντήρηση των ανεμογεννητριών, γίνεται με εξειδικευμένα σκάφη που διαχειρίζονται ιδιωτικοί φορείς (κατασκευαστές και χειριστές). Την εποπτεία για τη ναυσιπλοΐα και την ασφάλεια έχει το Υπουργείο Ναυτιλίας.

Μετεωρολογικές και ωκεανογραφικές υποδομές

Η παρακολούθηση ανέμου, κυματισμού και ρευμάτων γίνεται από τον εκάστοτε επενδυτή για τις ανάγκες του έργου. Συμπληρωματικά, το Ελληνικό Κέντρο Θαλασσίων Ερευνών (ΕΛΚΕΘΕ) και άλλοι ερευνητικοί φορείς παρέχουν επιστημονική υποστήριξη.

3.5.2 Διαδικασία κατασκευής

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η κατασκευή του μεγαλύτερου μέρους των επιμέρους συστημάτων πραγματοποιείται στην ξηρά. Συνεπώς η ήδη συναρμολογημένη άτρακτος και τα επιμέρους τμήματα, μεταφέρονται στην περιοχή εγκατάστασης, εφόσον έχει ολοκληρωθεί η κατασκευή της έδρασης. Πριν τη συναρμολόγηση, εγκαθίστανται ακόμα και τα ηλεκτρικά καλώδια, ώστε να μπορέσουν να συνδεθούν με την υπόλοιπη ανεμογεννήτρια.



Προφανώς η πρόσβαση του συνεργείου του αναδόχου κατασκευής πραγματοποιείται με ειδικά σκάφη, ειδικά σχεδιασμένα για την αντοχή αυξημένου μεγέθους και βάρους ανεμογεννητριών, τα οποία σε ορισμένες περιπτώσεις φτάνουν και σε μέγεθος φορτηγίδας. Σε διαφορετική περίπτωση και σε μικρότερης έκτασης έργα η μεταφορά των εξαρτημάτων γίνεται μέσω της πλεούμενης πλατφόρμας και υπό την αρωγή σκάφους ρυμούλκησης. Εκτός από τα σκάφη μεταφοράς του εξοπλισμού, διαφορετικά σκάφη αξιοποιούνται για τη μετακίνηση του εργατικού δυναμικού, για τη μεταφορά των καλωδιώσεων και με ενσωματωμένο γεράνο για την εκπόνηση των σε μεγαλύτερου ύψους εργασιών.



Εικόνα 14: Μεταφορά ρότορα διαμέτρου 70 m στο ΥΑΠ Yttre Stengrund της Σουηδίας



Εικόνα 15: Σκάφος μεταφοράς τμημάτων ανεμογεννητριών (Πηγή: WorkBoat365)

Σύμφωνα με βιβλιογραφικές αναφορές η θεμελίωση μονού πυλώνα απαιτεί ένα βαρύ υδραυλικό σφυρί, ικανό να τοποθετήσει τους σωλήνες χάλυβα διαμέτρου περίπου 4 m σε βάθος περίπου 20 m. Η θεμελίωση τύπου τριπόδου, απαιτεί τη προσυναρμολόγησή του στη στεριά και τη μεταφορά του στην χωροθετημένη περιοχή. Σημαντική αναφορά αποτελεί επίσης και του κριτηρίου νηνεμίας της θαλάσσιας στάθμης, καθώς με αυξημένους κυματισμούς, δεν δύναται να πραγματοποιηθούν οι απαιτούμενες εργασίες.



Συνοπτικά λοιπόν, η πορεία που ακολουθείται ξεκινά με την προετοιμασία του υποθαλάσσιου βυθού και τη διάστρωση όλων των απαιτούμενων υλικών για τον περιορισμό της διάβρωσης των υλικών, ήτοι σκύρα. Επόμενο βήμα αποτελεί η τοποθέτηση της θεμελίωσης σε περίπτωση που υπάρχει, ή της βάσης έδρασης στα πλωτά έργα, καθώς και η διάνοιξη των καναλιών από όπου θα διέρχεται η καλωδίωση. Στη συνέχεια πραγματοποιούνται όλες οι συνδέσεις των επιμέρους τεμαχίων στον ειδικά διαμορφωμένο χώρο στην ξηρά, ενώ παράλληλα μεταφέρονται και τοποθετούνται τα καλώδια από το εξειδικευμένο συνεργείο. Τα καλώδια εφόσον τοποθετηθούν, συνηθίζεται να καλύπτονται με σκυρόδεμα, το οποίο εν συνεχεία καλύπτεται από πέτρες και χαλίκια. Εφόσον έχουν ολοκληρωθεί όλες οι προγενέστερες διεργασίες, μεταφέρονται και εγκαθίστανται τα επιμέρους τμήματα των ανεμογεννητριών, μέσω ανυψωτικών εξεδρών ή γερανών εγκατεστημένων στην φορτηγίδα μεταφοράς, ευνοώντας έτσι την απευθείας συναρμολόγηση.

3.5.3 Διασύνδεση με το δίκτυο

Η διασύνδεση ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου με το εθνικό ηλεκτρικό σύστημα αποτελεί κρίσιμο στάδιο, καθώς εξασφαλίζει την ασφαλή και αποδοτική μεταφορά της παραγόμενης ενέργειας από τις ανεμογεννήτριες προς τους καταναλωτές.

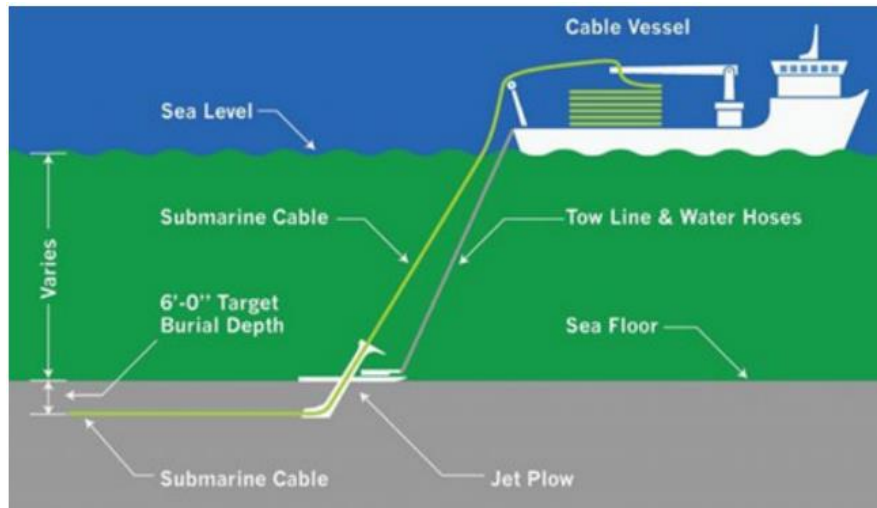
Η μεταφορά της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος γίνεται σε υψηλές τάσεις, ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες κατά τη μεταφορά της σε μεγάλες αποστάσεις. Απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί η επίτευξη κατά το δυνατό σταθερότερης τάσεως και συχνότητας, εντός των ορίων λειτουργίας των ανεμογεννητριών. Συνεπώς αποφεύγονται τοποθεσίες που παρουσιάζουν μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου αλλά και μεγαλύτερη μεταβλητότητα μεταξύ των δεδομένων του αιολικού δυναμικού.

Η σταθερότητα της συχνότητας επιτυγχάνεται και μέσω του ελέγχου των στροφών του κινητήρα, όπως ακριβώς συμβαίνει και σε αυτές της ηπειρωτικής χώρας. Συνεπώς, η προσαρμογή των στροφών των ανεμογεννητριών προσφέρει τη μεγαλύτερη μετατροπή αιολικής ενέργειας, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα σταθερότητα στην συχνότητα και στη τάση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

Σημαντική επίσης είναι και η αναφορά στην ποιότητα των υποβρύχιων καλωδιώσεων, τα οποία είναι αρκετά πιο ακριβά από τα αντίστοιχα, που αξιοποιούνται στην στεριά. Ο λόγος αυτού είναι η προσαρμογή και ο σχεδιασμός των καλωδίων σε συνθήκες βυθού και όλων των παραγόντων που εμφανίζει το θαλάσσιο περιβάλλον. Τα καλώδια αυτά θωρακίζονται πολλαπλές φορές και φέρουν ειδικά διαμορφωμένη μόνωση.

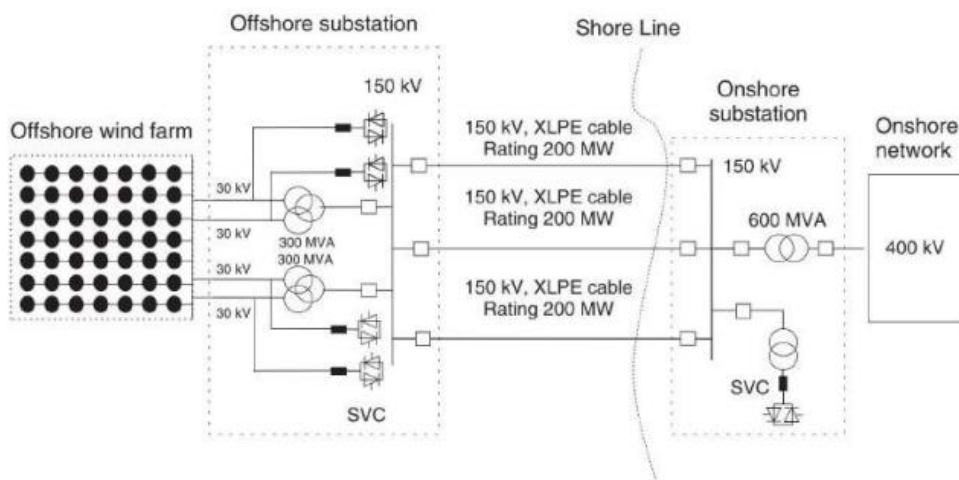
Για τη μεταφορά της παραγόμενης ενέργειας, αρχικώς οι ανεμογεννήτριες συνδέονται μεταξύ τους μέσω ενδιάμεσων καλωδίων, που συγκεντρώνουν την παραγόμενη ενέργεια σε έναν θαλάσσιο υποσταθμό. Από τον υποσταθμό αυτό, η ενέργεια μεταφέρεται στην ξηρά με υποθαλάσσιο καλώδιο εξαγωγής (export cable). Στο σημείο προσαιγιάλωσης, το καλώδιο συνεχίζει με υπόγεια χερσαία όδευση μέχρι έναν χερσαίο υποσταθμό, όπου τελικώς γίνεται η τελική ανύψωση ή μετατροπή της τάσης και η ένταξη στο εθνικό δίκτυο μεταφοράς.





Σχεδιάγραμμα 1: Σχηματική απεικόνιση εγκατάστασης υποβρύχιων καλωδίων (Πηγή: [Submarine Cables, Subsea](#))

Συμπληρωματικά και εφόσον χρησιμοποιείται διασύνδεση με τη στεριά μεγαλύτερη των 33 kV, απαιτείται και η ύπαρξη υπεράκτιου υποσταθμού, με το ανάλογο προσωπικό για τη συνεχή παρακολούθηση. Οι υποσταθμοί αυτοί φέρουν όλο τον απαιτούμενο εξοπλισμό, ενώ ταυτόχρονα χρειάζονται και αυξημένη εξωτερική προστασία από τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Οι υποσταθμοί μεταφέρονται σε προκατασκευασμένα τμήματα και τοποθετούνται στη θάλασσα με γερανοφόρα πλοία, στις προμελετημένες τοποθεσίες.



Σχεδιάγραμμα 2: Παράδειγμα διασύνδεσης αιολικού πάρκου 600 MW (Πηγή: [T. Ackermann, 2005](#))

Απαιτούμενο στοιχείο κάθε υπεράκτιου πάρκου, αποτελεί η ύπαρξη συστήματος ελέγχου SCADA, το οποίο θα συνδέει τις ανεμογεννήτριες, τον υποσταθμό και τους μετεωρολογικούς σταθμούς με τον κεντρικό υπολογιστή παρακολούθησης. Το σύστημα ουσιαστικά καταγράφει και επιβλέπει όλες τις ανεμογεννήτριες συνολικά, επιτρέποντας στο χειριστή ταυτόχρονα, τον καθορισμό και την διενέργεια διορθωτικών κινήσεων όπου αυτές απαιτούνται. Συμπληρωματικά, καταγράφει ενδεχόμενες βλάβες που προκύπτουν στις ανεμογεννήτριες ενημερώνοντας έγκαιρα τον υπεύθυνο, καθώς και τη γενικότερη ενεργειακή απόδοση του συνόλου των κατασκευών, σύμφωνα με τα υφιστάμενα δεδομένα.

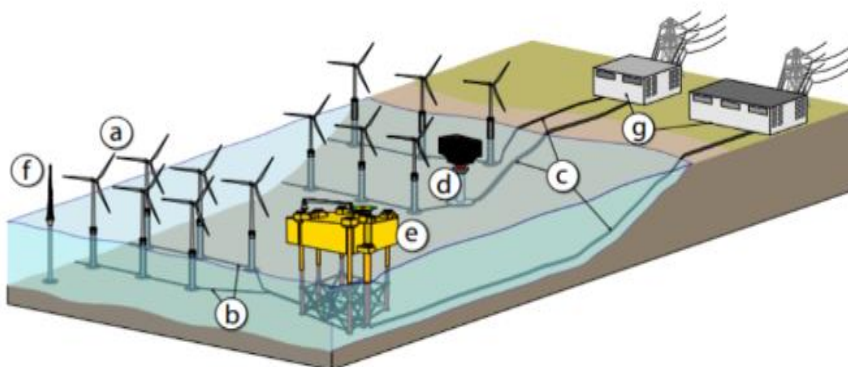


3.6 Δομή υπεράκτιων αιολικών έργων και προδιαγραφές υλικών κατασκευής

Η δομή των υπεράκτιων αιολικών έργων χαρακτηρίζεται από την αλληλεπίδραση πολλαπλών επιμέρους συστημάτων που εξασφαλίζουν την αποδοτική και ασφαλή λειτουργία τους. Οι ανεμογεννήτριες, τοποθετημένες σε θεμελιώσεις κατάλληλες για το βάθος και τις γεωτεχνικές συνθήκες του θαλάσσιου πυθμένα, συνδέονται μέσω υποθαλάσσιων καλωδίων σε ένα ενιαίο δίκτυο μεταφοράς ισχύος. Το δίκτυο αυτό συγκλίνει σε υπεράκτιο υποσταθμό, όπου η παραγόμενη ενέργεια ανυψώνεται σε υψηλότερη τάση, ώστε να είναι τεχνικά και οικονομικά εφικτή η μεταφορά της στην ξηρά. Παράλληλα, μετεωρολογικοί και ωκεανογραφικοί σταθμοί παρέχουν δεδομένα για την παρακολούθηση και βελτιστοποίηση της λειτουργίας του πάρκου, ενώ ο τελικός χερσαίος υποσταθμός διασυνδέει την εγκατάσταση με το εθνικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα βασικότερα επιμέρους τμημάτων ενός ΥΑΠ παρουσιάζονται στην εικόνα που ακολουθεί και περιλαμβάνουν συνήθως:

- a) Ανεμογεννήτριες: Τοποθετούνται υπεράκτια σε διατεταγμένη διάταξη. Αποτελούνται από τον πύργο, την άτρακτο και τα πτερύγια,
- b) Υποθαλάσσια καλώδια διασύνδεσης: Μεταφέρουν την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τις ανεμογεννήτριες σε κεντρικό υποσταθμό,
- c) Κύριο υποβρύχιο δίκτυο: Ενοποιεί την ισχύ του πάρκου και τη διοχετεύει στον υποσταθμότα καλώδια συλλογής,
- d) Μετεωρολογικό σταθμό: Συλλέγει δεδομένα αιολικού δυναμικού και θαλάσσιων συνθηκών για έλεγχο και βελτιστοποίηση λειτουργίας,
- e) Υπεράκτιο υποσταθμό: Αναβαθμίζει την τάση και σταθεροποιεί την ενέργεια πριν τη μεταφορά προς την ξηρά. Συνήθως τοποθετείται σε έργα με θεμελίωση jacket ή σε πλωτή κατασκευή,
- f) Θεμελιώσεις: Διαφορετικοί τύποι (μονοπάσσαλοι, τρίποδες, jacket, πλωτές πλατφόρμες), ανάλογα με το βάθος και τη γεωτεχνική σύσταση του πυθμένα,
- g) Χερσαίο υποσταθμό: Τελική διασύνδεση με το εθνικό ηλεκτρικό δίκτυο.



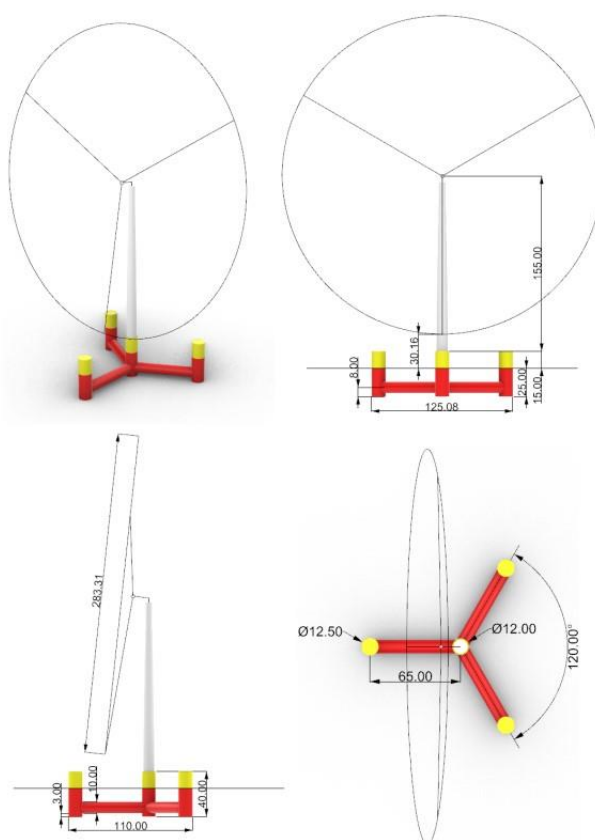
Σχεδιάγραμμα 3: Δομή υπεράκτιου αιολικού πάρκου (Πηγή: Silvio Rodrigues, et al.)

Η ραγδαία ανάπτυξη που γνωρίζει παγκοσμίως η υπεράκτια αιολική ενέργεια, έχει ως άμεση απόρροια, την αντίστοιχη ανάπτυξη των τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται στις υπεράκτιες



ανεμογεννήτριες. Σημαντικό στοιχείο αποτελεί η μελέτη και η δημιουργία σύγχρονων πυλώνων και κατασκευών με αισθητή αύξηση του ύψους των πύργων τους, στοχεύοντας στην εκμετάλλευση ισχυρότερων και πιο σταθερών ανέμων σε μεγαλύτερα υψόμετρα. Το ύψος του πυλώνα (hub height) αναφέρεται στην απόσταση από την επιφάνεια της θάλασσας μέχρι το κέντρο του ρότορα. Η αύξηση του ύψους του πυλώνα επιτρέπει την εκμετάλλευση ισχυρότερων ανέμων που επικρατούν σε μεγαλύτερα υψόμετρα, βελτιώνοντας την απόδοση της ανεμογεννήτριας. Επιπλέον, η αύξηση του ύψους συμβάλλει στη μείωση των επιπτώσεων του φαινομένου του "wake effect", όπου οι άνεμοι που περνούν από μια ανεμογεννήτρια επηρεάζουν την απόδοση των επόμενων.

Οι νέες τεχνολογίες στοχεύουν στην κατασκευή ανεμογεννητριών με συνολικό ύψος που θα υπερβαίνει τα 300 m και διάμετρο πτερυγίων που θα καλύπτουν το μεγαλύτερο ύψος του πυλώνα. Η μεγαλύτερη εγκατεστημένη υπεράκτια ανεμογεννήτρια στον κόσμο είναι η Dongfang DEW-26 MW, η οποία διαθέτει ύψος πυλώνα 185 μέτρα, ισχύ 26 MW και διάμετρο ρότορα 310 μέτρα. Η συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια, που αναπτύχθηκε από την κινεζική εταιρεία Dongfang Electric, είναι η ισχυρότερη και μεγαλύτερη σε μέγεθος υπεράκτια ανεμογεννήτρια που έχει κατασκευαστεί μέχρι σήμερα και έχει εγκατασταθεί στο Wind Power Equipment Testing and Certification Innovation Base στην Κίνα, που λειτουργεί ως κέντρο δοκιμών και πιστοποίησης εξοπλισμού ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ενδεικτική είναι η μελέτη της Διεθνούς Υπηρεσίας Ενέργειας (IEA), η οποία έχει σχεδιάσει μια αναφορά ανεμογεννήτριας 22 MW με διάμετρο ρότορα 284 μέτρα και ύψος πυλώνα 170 μέτρα, στοχεύοντας σε βελτιστοποίηση της απόδοσης και της ανθεκτικότητας σε θαλάσσιες συνθήκες.



Εικόνα 16: Διαστάσεις σχεδιασμού της IEA 22 MW RWT (Μονάδες μέτρησης σε μέτρα και μοίρες, Πηγή: [Zahle et al. 2024](#))



Λόγω των διαφορετικών συνθηκών που επικρατούν στο θαλάσσιο περιβάλλον, οι υπεράκτιες Α/Γ, απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή κατά τον σχεδιασμό και την εγκατάστασή τους. Η επιλογή και οι προδιαγραφές των υλικών κατασκευής αποτελούν κρίσιμο παράγοντα για τη βιωσιμότητα και τη διάρκεια ζωής των υπεράκτιων αιολικών έργων. Όπως αναφέρεται στο πρότυπο DNV-RP-0416, οι πύργοι και οι θεμελιώσεις κατασκευάζονται συνήθως από χάλυβα υψηλής αντοχής, ενισχυμένο με επιστρώσεις και συστήματα καθοδικής προστασίας για την αποτροπή της διάβρωσης. Αντίστοιχα, και σύμφωνα με το πρότυπο DNV-ST-0376, τα πτερύγια των ανεμογεννητριών κατασκευάζονται από σύνθετα υλικά, όπως υαλονήματα ή ανθρακονήματα σε μήτρα εποξειδικής ρητίνης, προκειμένου να συνδυάζουν χαμηλό βάρος και υψηλή μηχανική αντοχή. Τέλος, τα υποθαλάσσια καλώδια διαθέτουν ειδική θωράκιση και επικάλυψη πολυαιθυλενίου, ώστε να αντέχουν τόσο στις μηχανικές καταπονήσεις όσο και στις επιθετικές θαλάσσιες συνθήκες, ενώ οι υποσταθμοί σχεδιάζονται με ενισχυμένες μεταλλικές δομές και ανθεκτικά συστήματα μόνωσης (Ramboll 2021).

Όσον αφορά τον τεχνικό εξοπλισμό των υπεράκτιων αιολικών εγκαταστάσεων, οι προδιαγραφές καθίστανται πιο εξειδικευμένες και αυστηρές προκειμένου να ανταποκριθούν στις ιδιαίτερες απαιτήσεις του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Ειδικότερα, όλα τα δομικά στοιχεία καλύπτονται με συστήματα αντιδιαβρωτικής προστασίας, ενώ οι άτρακτοι των ανεμογεννητριών απαιτούν ενισχυμένη σφράγιση ώστε να αποτρέπεται η διείσδυση υγρασίας και αλατιού. Η γεννήτρια είναι εφοδιασμένη με κλειστό σύστημα ψύξης για μεγαλύτερη αξιοπιστία, ενώ η εύρυθμη λειτουργία των Α/Γ διασφαλίζεται μέσω ολοκληρωμένων συστημάτων παρακολούθησης και ελέγχου.

Για τη συντήρηση και επισκευή των επιμέρους τμημάτων προβλέπεται ειδικός γερανός, ενώ η πρόσβαση σκαφών συντήρησης εξυπηρετείται από πλατφόρμες σύνδεσης και ενδεχόμενους πλωτούς προβόλους, οι οποίοι σχεδιάζονται με ειδικές ενισχύσεις ώστε να εξασφαλίζεται η ασφάλεια του προσωπικού ακόμη και υπό συνθήκες θαλασσοταραχής. Τέλος, όλες οι εγκαταστάσεις φέρουν επαρκή φωτισμό και σήμανση, σύμφωνα με τους διεθνείς κανόνες ναυσιπλοΐας, ώστε να διασφαλίζεται η ορατότητα και η ασφάλεια στη θάλασσα.

Συμπληρωματική ειδική μέριμνα λαμβάνεται και για το ύψος των Α/Γ. Λόγω τω εντονότερων πνοών των ανέμων στο θαλάσσιο χώρο, δύναται να αξιοποιηθούν και πύργοι μικρότερου ύψους, αξιοποιώντας ουσιαστικά όλα τα διαθέσιμα εύρη των αέριων μαζών. Το ύψος προφανώς καθορίζεται και από τις λοιπές ωκεανογραφικές συνθήκες, οι οποίες επηρεάζουν και τη διάμετρο του ρότορα.

Οι αέριες μάζες και τα ανεμολογικά φορτία που παρατηρούνται στις υπεράκτιες περιοχές διαφοροποιούνται σημαντικά σε σχέση με εκείνα της ηπειρωτικής χώρας, γεγονός που επηρεάζει άμεσα τον σχεδιασμό και τη θεμελίωση των ανεμογεννητριών. Η μέση ταχύτητα του ανέμου είναι γενικά μεγαλύτερη, καθώς απουσιάζουν τα φυσικά εμπόδια που περιορίζουν και επιβραδύνουν τις αιολικές ροές. Παράλληλα, οι κυματισμοί που αναπτύσσονται στη θάλασσα ασκούν ουσιαστική επίδραση τόσο στην επιλογή του τύπου θεμελίωσης όσο και στη διαδικασία εγκατάστασης. Ενδεικτικό παράδειγμα αποτελεί ότι στις βορειότερες περιοχές, επιπρόσθετα φορτία προκύπτουν από την επικάθηση και τις κινήσεις των θαλάσσιων πάγων, οι οποίες μπορούν να δημιουργήσουν ακραίες καταπονήσεις. Επιπλέον, σε θαλάσσιες ζώνες πλησιέστερες στην ενδοχώρα, τα φορτία επηρεάζονται από την αλληλεπίδραση με χερσαία ρεύματα που προκαλούν στροβιλισμούς ή μεταβολές στην κατεύθυνση πνοής των ανέμων. Τέλος, τα θαλάσσια ρεύματα ενδέχεται να επηρεάσουν τη



σταθερότητα και τη μακροχρόνια συμπεριφορά των θεμελιώσεων, καθιστώντας αναγκαία την προσεκτική γεωτεχνική και υδροδυναμική μελέτη πριν από την εγκατάσταση.

Η εκάστοτε τοποθεσία, σε συνδυασμό με τον τύπο της κατασκευής, αποτελεί συνάρτηση πολλών παραγόντων, με αποτέλεσμα να μην υφίστανται τυποποιημένοι τύποι και υλικά που να εφαρμόζονται ομοιόμορφα σε όλες τις περιπτώσεις. Για τον λόγο αυτό, στο πλαίσιο της θεμελίωσης απαιτούνται εξειδικευμένες μελέτες, οι οποίες σε περιοχές ανοιχτού πελάγους περιλαμβάνουν συχνά καταδυτικές αποστολές και εκτεταμένες δειγματοληψίες τόσο εντός όσο και εκτός της υπό μελέτη περιοχής. Οι επικρατούσες γεωτεχνικές και περιβαλλοντικές συνθήκες, τα διαθέσιμα υλικά κατασκευής, αλλά και το οικονομικό πλαίσιο του φορέα υλοποίησης αποτελούν βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν την τελική επιλογή των υλικών. Παράλληλα, κρίσιμο παράγοντα αποτελεί η ταυτόχρονη εκτίμηση ζητημάτων λειτουργικότητας και μελλοντικής συντήρησης, ώστε η κατασκευή να ανταποκρίνεται όχι μόνο στις αρχικές απαιτήσεις αντοχής και σταθερότητας αλλά και στη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητά της.

Συνολικά, η επιτυχία των υπεράκτιων αιολικών έργων εξαρτάται από την αρμονική συνύπαρξη μιας σύνθετης δομής και των υψηλών προδιαγραφών υλικών που την απαρτίζουν. Η βελτιστοποίηση της διασύνδεσης των επιμέρους συστημάτων, σε συνδυασμό με την αντοχή των κατασκευαστικών στοιχείων στις ιδιαίτερες θαλάσσιες συνθήκες, διασφαλίζει την αποδοτική παραγωγή ενέργειας, την ελαχιστοποίηση του κόστους συντήρησης και τη μακροπρόθεσμη συμβολή των εγκαταστάσεων στη βιώσιμη ενεργειακή ανάπτυξη.

3.7 Λειτουργία και συντήρηση

Από τη στιγμή που θα τεθούν σε λειτουργία, όλα τα αιολικά πάρκα, παρακολουθούνται και ελέγχονται καθημερινά από χειριστές της εταιρείας παραγωγής ενέργειας. Ειδικότερα, όλες οι μετρήσεις που αφορούν σε ανεμολογικά δεδομένα, καιρικά φαινόμενα, αποδοτικότητα και παραγωγικότητα της εκάστοτε ανεμογεννήτριας, καταμετρώνται καταγράφονται και συλλέγονται στα μέσα παρακολούθησης του συστήματος ελέγχου.

Συνηθέστερα το σύστημα ελέγχου πραγματοποιεί παράλληλα τις λειτουργίες τόσο του εποπτικού ελέγχου όσο και της συλλογής δεδομένων και ονομάζεται SCADA. Με το εν λόγω σύστημα, μπορούν να αποθηκεύονται και να συγκρίνονται δεδομένα, εντοπίζοντας έτσι υπολειτουργίες και προβλήματα που ενδεχομένως να παρουσιάζουν οι κατασκευές. Οι πληροφορίες που συλλέγονται ποικίλουν περιλαμβάνοντας πληροφορίες σχετικά με τα ανεμολογικά στοιχεία, την αποδοτικότητα της εκάστοτε μηχανής αλλά και συγκεκριμένα τον αριθμό ωρών λειτουργίας και αδράνειας της ανεμογεννήτριας, αντίστοιχα.

Γενικά οι ανεμογεννήτριες κατασκευάζονται και προβλέπονται για χρήση με 20-25 χρόνια ζωής, ωστόσο και όταν εγκαθίστανται σε απομακρυσμένα μέρη και σε δυσχερέστερες συνθήκες με δυσκολότερες συνθήκες συντήρησης, ενδέχεται να μην εξαντλήσουν αυτό το προσδόκιμο ζωής. Οι ανεμογεννήτριες, ειδικά οι ψηλότερες και πιο σύνθετες που εγκαθίστανται υπεράκτια, επηρεάζονται από πλήθος παραγόντων, δημιουργώντας παράλληλα μεγάλες διακυμάνσεις στην αποδοτικότητά τους. Παράγοντες όπως οι καιρικές συνθήκες, η ταχύτητα του ανέμου, οι δονήσεις της έλικας και των πτερυγίων μπορούν να



αλλοιώσουν την διαδικασία παραγωγής. Σε μεγάλο βαθμό ορισμένες συνθήκες μπορούν να οδηγήσουν σε ανεπανόρθωτες ζημιές, ακόμα και την καταστροφή τους.

Αδιαμφισβήτητο γεγονός αποτελεί η ανάγκη προληπτικής και τακτικής συντήρησης των υπεράκτιων αιολικών γεννητριών, η οποία περιλαμβάνει πέρα από τις εργασίες που πραγματοποιούνται και στα χερσαία πάρκα και αυτές που απαιτούνται λόγω της ύπαρξης του υδάτινου και του θαλασσινού περιβάλλοντος. Συνεπώς η συντήρηση είναι δυσκολότερη εργασία από την αντίστοιχη των πάρκων της ηπειρωτικής χώρας.

Η λειτουργία και συντήρηση ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου είναι κρίσιμη για την απρόσκοπτη παραγωγή ενέργειας και περιλαμβάνει όλες τις επιμέρους υποδομές: ανεμογεννήτριες, καλώδια, υποσταθμούς και συστήματα ελέγχου. Η συντήρηση είναι συνδυασμός προληπτικών ενεργειών (τακτικοί έλεγχοι, λίπανση, επιθεωρήσεις) και διορθωτικών παρεμβάσεων (αντικατάσταση/επισκευή εξοπλισμού), και περιλαμβάνει ενέργειες, όπως αυτές αναφέρονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 5: Λειτουργίες και Προβλεπόμενη συντήρηση επιμέρους εξοπλισμού ενός Υπεράκτιου αιολικού πάρκου

Υποσύστημα	Λειτουργία	Συντήρηση
Ανεμογεννήτριες	Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, έλεγχος ταχύτητας, γωνίας πτερυγίων, συνεχής παρακολούθηση μέσω SCADA	Τακτικοί έλεγχοι μηχανικών μερών, λίπανση, αντικατάσταση αναλώσιμων, έλεγχος διάβρωσης σε πύργους/θεμελιώσεις
Ενδιάμεσα καλώδια (inter-array)	Μεταφορά ενέργειας από Α/Γ προς θαλάσσιο υποσταθμό	Υποβρύχιοι έλεγχοι, θερμική παρακολούθηση, επισκευές με καλωδιακά πλοία
Υποθαλάσσια καλώδια εξαγωγής (export)	Μεταφορά ενέργειας από τον θαλάσσιο υποσταθμό στην ξηρά	Επιθεωρήσεις όδευσης, επισκευή/αντικατάσταση τμημάτων, πρόσθετη προστασία με σκυρόδεμα ή βράχους
Θαλάσσιος υποσταθμός	Συγκέντρωση ενέργειας και ανύψωση τάσης	Έλεγχος μετασχηματιστών, διακοπών, συστημάτων ψύξης, επιθεώρηση διάβρωσης δομής
Χερσαίος υποσταθμός	Μετατροπή τάσης και σύνδεση με εθνικό δίκτυο	Έλεγχος εξοπλισμού (μετασχηματιστές, διακόπτες), συντήρηση γείωσης και αντικεραυνικής προστασίας
Συστήματα ελέγχου (SCADA)	Παρακολούθηση των τμημάτων, τηλεμετρία και έλεγχος	Ενημέρωση λογισμικού, αντικατάσταση αισθητήρων
Μέσα πρόσβασης και υποστήριξης	Σκάφη και ελικόπτερα για μεταφορά προσωπικού/εξοπλισμού	Επιθεώρηση σκαφών, συντήρηση εξοπλισμού ασφαλείας, εκπαίδευση πληρωμάτων

Σε κάθε περίπτωση ο εκάστοτε κατασκευαστής προμηθεύει απαραίτητως τους διαχειριστές με τα αντίστοιχα εγχειρίδια σωστής συντηρήσεως και τους απαραίτητους συστηματικούς ελέγχους. Οι έλεγχοι αυτοί αποσκοπούν στη αναγνώριση και τη επιδιόρθωση επικείμενων βλαβών και αστοχιών που σε βάθος χρόνου δύναται να εμφανίσουν προβλήματα, ενώ ταυτόχρονα επιδιώκουν τη βελτιστοποίηση των επιμέρους εξαρτημάτων, μεγιστοποιώντας έτσι και την αποδοτικότητα της κάθε μηχανής.

Αδιαμφισβήτητο γεγονός αποτελεί ότι η απόσταση και η προσβασιμότητα επιβαρύνουν τις απαιτούμενες εργασίες προσδίδοντας μεγάλο κόστος και δυσχέρεια στην συντήρησή τους. Σε πάρκα που χωροθετούνται στο ανοιχτό πέλαγος, κατά τους χειμερινούς μήνες και σε περιόδους ακραίων καιρικών φαινομένων, κρίνεται αδύνατη η άφιξη συνεργείου προς



επιδιόρθωση ή βελτιστοποίηση διαδικασιών, κάτι που δύναται να καθυστερήσει τις προγραμματισμένες εργασίες για μεγάλα χρονικά διαστήματα.

Αυξημένη δυσκολία στη συντήρηση και επιδιόρθωση παρουσιάζουν βλάβες που απαιτούν την απομάκρυνση τμήματος του πυλών, της έλικας ή οποιουδήποτε άλλου στοιχείο, και την επιστροφή του στη στεριά και δει στο εργοστάσιο κατασκευής. Ορισμένοι έλεγχοι ωστόσο πρέπει να πραγματοποιούνται επιτόπου, από εξειδικευμένο και καλά εκπαιδευμένο συνεργείο. Η πολυπλοκότητα και το ρίσκο των επιτόπιων διαδικασιών πολλές φορές, περιλαμβάνουν και το ρίσκο της πρόσβασης σε μεγάλο υψόμετρο για την επισκευή τμημάτων όπως ο ρότορας και τα πτερύγια. Η πρόσβαση αυτή πολλές φορές πραγματοποιείται μόνο με ιπτάμενα μέσα.



Εικόνα 17: Εργασίες συντήρησης σε υπεράκτια ανεμογεννήτρια (Πηγή: [Macgregor](#))

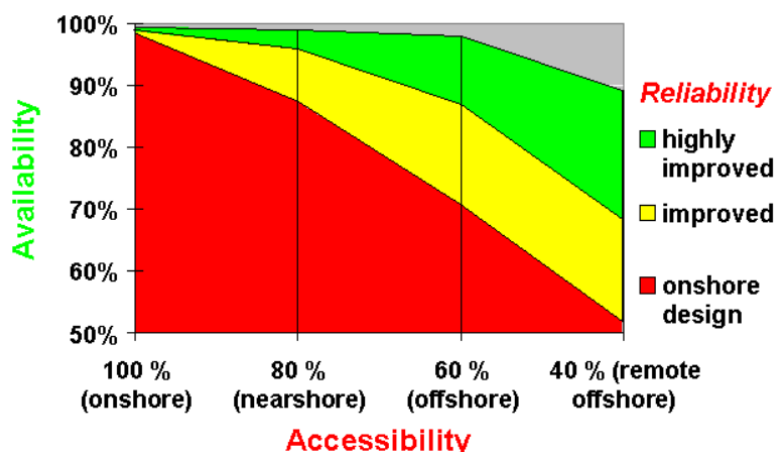


Εικόνα 18: Εργασίες συντήρησης υπεράκτιας ανεμογεννήτριας με εναέρια πρόσβαση (Πηγή: [Offshore wind innovation](#))

Στο πλαίσιο της σύγκρισης μεταξύ υπεράκτιων αιολικών πάρκων και των αντίστοιχων της ηπειρωτικής χώρας και σύμφωνα με υφιστάμενα δεδομένα από εν λειτουργία πάρκα και με τις δύο μεθόδους, έχει καταγραφεί και σχεδιαστεί το ακόλουθο διάγραμμα αποτύπωσης της αποδοτικότητας και της αξιοπιστίας των ανεμογεννητριών, βάσει της προσβασιμότητας. Πιο συγκεκριμένα, αποτυπώνεται ο συντελεστής απόδοσης του εκάστοτε πάρκου, βάσει της



απόστασής του από την ξηρά. Ταυτόχρονα, εντοπίζεται και η αξιοπιστία ενός τέτοιου έργου σε σχέση πάντα με την τοποθεσία του σε σχέση με τη στεριά. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα που ακολουθεί η αξιοπιστία, η αποδοτικότητα και η προσβασιμότητα παρουσιάζουν μία άμεση και πάγια αλληλεπίδραση, τόσο σε χερσαίες και παράκτιες, όσο και ιδιαίτερας απομακρυσμένες από την στεριά τοποθεσίες.



Διάγραμμα 3: Σημαία της αξιοπιστίας σε υπεράκτια αιολικά πάρκα (Πηγή: Offshorewindenergy)

Από το εν λόγω διάγραμμα γίνεται εύκολα αντιληπτό, ότι η αξιοπιστία εξαρτάται απόλυτα από την απόσταση της ανεμογεννήτριας από την ακτή. Όπως αναφέρθηκε εκτενώς και σε προηγούμενες ενότητες, αυτό οφείλεται κυρίως στους πολλούς παράγοντες που επηρεάζουν την ομαλή λειτουργία ενός έργου στην ανοικτή θάλασσα. Παράλληλα και η αποδοτικότητα μίας μηχανής επηρεάζεται από την τοποθεσία, όπου αυτή έχει εγκατασταθεί, κάτι που οφείλεται εξολοκλήρου στους παράγοντες του περιβάλλοντος, καθώς και στην δυνατότητα παρακολούθησης και συντήρησης σε τακτική και άμεση βάση.

Ενδεικτικό παράδειγμα αποτελούν οι προδιαγεγραμμένες χερσαίες ανεμογεννήτριες, οι οποίες παρουσιάζουν αισθητή μείωση έως και στο 50% όταν εγκαθίστανται σε μεγάλα βάθη. Αντίθετα, οι εξειδικευμένα σχεδιασμένες και βελτιωμένες ανεμογεννήτριες είναι αισθητά πιο αξιόπιστες και λειτουργικές, σε υπεράκτια αιολικά πάρκα που χωροθετούνται σε μεγάλα βάθη.

3.8 Επιπτώσεις στο περιβάλλον

Σε συνέχεια της κατασκευής και της εγκατάστασης ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου, σημαντικό και πολλές φορές αποτρεπτικό παράγοντα αποτελούν οι επιπτώσεις που φέρει ένα τέτοιο έργο. Οι επιπτώσεις διαχωρίζονται κατά κύριο λόγο σε αυτές που προκαλούνται στο φυσικό περιβάλλον, έχοντας το μεγαλύτερο αντίκτυπο και πολλές φορές μακροπρόθεσμες μεταβολές, στις οικονομικές, στις κοινωνικές και στις αισθητικές.

Σε οποιοδήποτε τεχνικό έργο δημιουργούνται επιπτώσεις που κατατάσσοντας σε άμεσες και έμμεσες, σε βραχυπρόθεσμες, μακροπρόθεσμες και μόνιμες, αλλά και σε θετικές και αρνητικές. Άμεση απόρροια τους είναι οι μεταβολές στον εκάστοτε τομέα, οπότε και



αποτελούν το σημαντικότερο επιχείρημα αντίδρασης των σκεπτικιστών και των αντίθετων στην υλοποίηση του έργου.

Η αντικειμενική και μακροσκοπική αξιολόγηση των επιπτώσεων αυτών είναι ιδιαιτέρως αναγκαία, ώστε να μελετηθούν όλες αυτές οι επιπτώσεις και να εξεταστούν με ακρίβεια και κατά πόσο είναι για το έργο αποτρεπτικές.

Αδιαμφισβήτητο γεγονός αποτελεί ότι η στροφή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και εν προκειμένω στην εκμετάλλευση της υπεράκτιας αιολικής, προσδίδει μεγάλα οφέλη σε σχέση με τη μείωση της χρήσης των ορυκτών πόρων. Κατά συνέπεια, ελαχιστοποιούνται και οι εκπεμπόμενοι από την καύση τους ρύποι, οι οποίοι στην περίπτωση του αιολικού πάρκου πρόκειται να παραχθούν μόνο κατά την κατασκευή του έργου.

3.8.1 Θαλάσσιο περιβάλλον

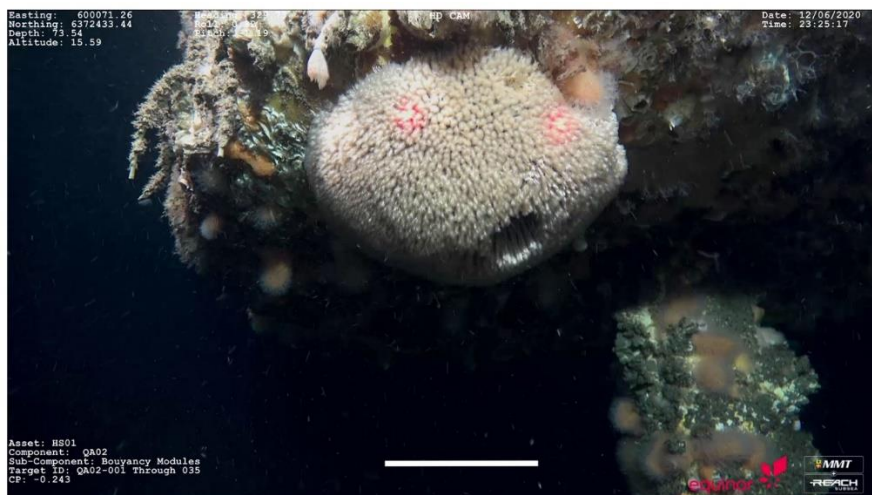
Κατ' αντιστοιχία με όλα τα μεγάλης κλίμακας έργα και ειδικότερα τα έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, έτσι και τα θαλάσσια έργα, αδιαμφισβήτητα προκαλούν ποικίλες επιπτώσεις στο φυσικό περιβάλλον. Τα οικοσυστήματα των θαλάσσιων οργανισμών διαταράσσονται, οι υδρόβιοι φυτικοί οργανισμοί αναστατώνονται και οι δρόμοι των μεταναστευτικών πτηνών παρεμποδίζονται.

Επίσης, αυξάνεται προσωρινά η παρουσία πλοίων με κίνδυνο ατυχημάτων ή διαρροών. Κατά τη φάση κατασκευής του έργου, είναι απαραίτητη η χρήση γεωτρυπάνων και λοιπών βαριών μηχανών, τα οποία πέρα από τους κραδασμούς και την ακουστική όχληση που προκαλούν στους έμβιους θαλάσσιους οργανισμούς, αλλοιώνουν και μεταβάλλουν το υπέδαφος. Αυτό προκαλεί αύξηση θολότητας και απώλεια ενδιαιτημάτων βενθικών οργανισμών. Ακόμα, αδιαμφισβήτητη είναι η παρουσία πλήθους σκαφών, κόσμου και μηχανημάτων, τα οποία πρόκειται να διαταράξουν τις καθημερινές συνθήκες των οικοσυστημάτων, τουλάχιστον κατά το σύνολο της περιόδου των εργασιών. Επίσης, η προσωρινή αύξηση της παρουσίας των πλοίων ενέχει κινδύνους ατυχημάτων ή διαρροών.

Το σύνολο του εξοπλισμού και των διαφόρων συστημάτων αγκύρωσης, συντήρησης, καθώς και το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που δημιουργείται, ενδέχεται να μειώσει αισθητά το βένθος του θαλάσσιου οικοσυστήματος. Μία τέτοια κατάσταση ενδέχεται να προκαλέσει έντονες μεταβολές στο σύνολο της τροφικής αλυσίδας του οικοσυστήματος. Σε κάθε περίπτωση πριν την κατασκευή ενός θαλάσσιου αιολικού πάρκου και κατά το στάδιο της μελέτης, είναι απαραίτητη η ενδελεχής καταγραφή και αξιολόγηση μέτρων και τρόπων αντιμετώπισης τέτοιων φαινομένων, με βάση τις υφιστάμενες αποικίες και τους χαρτογραφημένους πληθυσμούς τους.

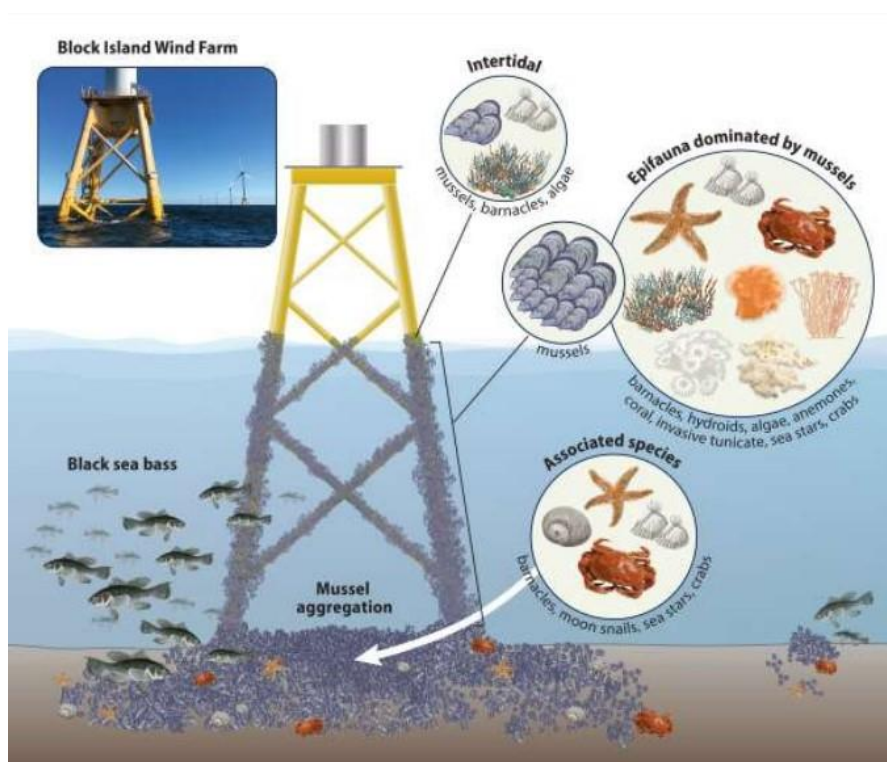
Ωστόσο και όπως αναφέρθηκε ανωτέρω, οι επιπτώσεις αυτές θα είναι προσωρινές, καθότι θα υφίστανται μόνο κατά την περίοδο εργασιών και παρότι θα έχουν άμεσο αντίκτυπο στο περιβάλλον, λίγους μήνες μετά την ολοκλήρωση του έργου, θα εξαφανιστούν επαναφέροντας το περιβάλλον στην πρωτύτερη κατάστασή του. Συμπληρωματικά, κατά τη λειτουργία, τα θεμέλια και οι υποδομές των ανεμογεννητριών λειτουργούν ως τεχνητοί ύφαλοι, προσελκύοντας ψάρια, μαλάκια και άλλους θαλάσσιους οργανισμούς, εμπλουτίζοντας την τοπική βιοποικιλότητα.





Εικόνα 19: Πιθανή νέα αποικία του είδους *D. Pertusum* στο Hywind Scotland Pilot Park. Buoyancy modules. Scale bar: 10 cm.. – Rikard Karlsson et. al 2022)

Οι μεγάλοι πληθυσμοί ψαριών που ενδέχεται να φέρουν τις διαδρομές τους στα τμήματα αυτά, μπορούν να σχεδιάσουν διαφορετικούς δρόμους κίνησης, αποφεύγοντας τα υποθαλάσσια τμήματα των πυλώνων και τα θεμέλια των ανεμογεννητριών. Εξέταση των μακροχρόνιων μεταβολών με ετήσια παρακολούθηση και καταγραφή, πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της έρευνας του έργου «Benthic and Epifaunal Monitoring During Wind Turbine Installation and Operation at the Block Island Wind Farm (BIWF), Rhode Island – Project Report».



Εικόνα 20: Οι θεμελιώσεις τύπου jacket στο πάρκο Block Island Wind Farm (BIWF) και τα υποκείμενα αποτυπώματά τους κυριαρχούνταν από μύδια και συναφείς οργανισμούς. (Πηγή: [Benthic and Epifaunal Monitoring at BIWF](#))



3.8.2 Βιοποικιλότητα και έμβιοι οργανισμοί

Στο πλαίσιο του φυσικού περιβάλλοντος, πέρα από τους υποθαλάσσιους πληθυσμούς αρκετές είναι και οι επιπτώσεις στους πληθυσμούς των πτηνών, οι οποίοι μπορεί να φέρουν τους μεταναστευτικούς διαδρόμους τους στις περιοχές των θαλάσσιων αιολικών πάρκων. Η επίπτωση αυτή, ίσως φέρει και τη σημαντικότερη αξία στην επιλογή της περιοχής χωροθέτησης, περιορίζοντας έντονα τις εν λόγω διαδρομές. Έντονος είναι ο κίνδυνος σύγκρουσης με τα πτερύγια ή τον κορμό των ανεμογεννητριών, πράγμα που αποτελεί μακροπρόθεσμη και άμεση αρνητική επίπτωση. Στο πλαίσιο μελετών και ερευνών που έχουν πραγματοποιηθεί σε ευρωπαϊκές χώρες που αντιμετωπίζουν ανάλογα προβλήματα, όπως είναι η Δανία ή η Ισπανία, καταγράφεται ότι με την πάροδο του χρόνου τα πουλιά εκπαιδεύονται και προσαρμόζονται με τα τμήματα των ανεμογεννητριών.

Κατά τη φάση της κατασκευής, οι δραστηριότητες που σχετίζονται με πασσαλόμηση, πόντιση καλωδίων και έντονη ναυσιπλοΐα προκαλούν αυξημένη όχληση στο θαλάσσιο περιβάλλον. Η παρουσία βαρέων μηχανημάτων και πλοίων οδηγεί σε προσωρινή απομάκρυνση θαλάσσιων θηλαστικών, όπως δελφινιών και φαλαινών, από τις περιοχές έργου, ενώ τα πτηνά αποφεύγουν τις περιοχές με έντονη ανθρώπινη δραστηριότητα. Αν και οι επιπτώσεις αυτές είναι κατά κύριο λόγο βραχυπρόθεσμες, αποτελούν κρίσιμη παράμετρο για την προστασία ευαίσθητων οικολογικών περιοχών.

Κατά τη λειτουργία του υπεράκτιου αιολικού πάρκου, οι ανεμογεννήτριες και οι υποδομές τους παραμένουν μόνιμα στοιχεία του θαλάσσιου τοπίου. Η σημαντικότερη επίπτωση αφορά τα μεταναστευτικά πτηνά, τα οποία διατρέχουν κίνδυνο πρόσκρουσης με τα κινούμενα πτερύγια. Παράλληλα, η παρουσία του πάρκου μπορεί να τροποποιήσει τις διαδρομές μετακίνησης θαλάσσιων θηλαστικών, που είτε αποφεύγουν τις περιοχές με συνεχείς χαμηλού επιπέδου θορύβους είτε επαναπροσαρμόζουν τις συνήθειές τους. Ωστόσο όπως αναφέρθηκε και ανωτέρω, οι θεμελιώσεις των ανεμογεννητριών μπορούν να λειτουργήσουν ως τεχνητοί ύφαλοι, προσφέροντας νέους χώρους διαβίωσης και τροφής για διάφορα θαλάσσια είδη, με αποτέλεσμα τη σταδιακή αύξηση της τοπικής βιοποικιλότητας.

Επιπρόσθετα και καθώς τα αιολικά πάρκα επιβάλλεται να περιλαμβάνουν κάποιο φωτισμό κατά τις νυκτερινές ώρες, ενδέχεται να αποπροσανατολίσουν και να μπερδέψουν τις κινήσεις και τις περιόδους κίνησης των πτηνών. Ταυτόχρονα και κατά την περίοδο της μέρας, εντοπίζονται προτάσεις χρωματισμού των πτερυγίων με μαύρο χρώμα, ώστε να γίνεται εύκολα αντιληπτό από τα πτηνά, ενώ παράλληλα ο σχεδιασμός τους αποτρέπει με κάθε τρόπο και σε κάθε σημείο την δημιουργία φωλιών.

Η σοβαρότερη αρνητική επίπτωση αφορά την πιθανότητα πρόσκρουσης πτηνών στα πτερύγια, ιδίως σε περιόδους έντονης μετανάστευσης. Επιπλέον, η συνεχής παρουσία υποβρύχιων θορύβων ενδέχεται να προκαλέσει αλλαγές στη συμπεριφορά των θαλάσσιων θηλαστικών, επηρεάζοντας τον τρόπο επικοινωνίας και τις διαδρομές αναζήτησης τροφής. Σε ορισμένες περιπτώσεις, παρατηρείται και απομάκρυνση ειδών από περιοχές όπου εγκαθίστανται αιολικά πάρκα, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε αλλαγές στη χωρική κατανομή πληθυσμών.

Όσον αφορά τα σμήνη πτηνών, σημαντικότερες επιπτώσεις προκύπτουν στους πληθυσμούς που χρησιμοποιούν τα περάσματα για αποδημητικούς σκοπούς και όχι σε μόνιμους πληθυσμούς. Για το λόγο αυτό και έπειτα από τη χαρτογράφησή τους από εξειδικευμένους



επιστήμονες, απαγορεύεται ρητά, η τοποθέτηση ανεμογεννητριών σε ζώνες προστατευόμενων περιοχών, συμπεριλαμβανομένου και των δρόμων των μεταναστευτικών πληθυσμών.

Οι επιπτώσεις των υπεράκτιων αιολικών πάρκων στη βιοποικιλότητα και στα πτηνά είναι σύνθετες και συχνά αντιφατικές, συνδυάζοντας αρνητικούς κινδύνους με θετικά οικολογικά οφέλη. Ενώ ο κίνδυνος πρόσκρουσης και η όχληση στα θαλάσσια θηλαστικά αποτελούν σημαντικές ανησυχίες, η δημιουργία νέων βιότοπων και η μείωση της αλιευτικής πίεσης προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα. Συνεπώς, η αξιολόγηση είναι μικτή και εξαρτάται από τον χωροταξικό σχεδιασμό, την τεχνολογία που θα εφαρμοστεί και την εφαρμογή κατάλληλων μέτρων μετριασμού, όπως προσαρμογή του ύψους και της διάταξης των ανεμογεννητριών ή προσωρινές διακοπές λειτουργίας κατά τις περιόδους μεταναστευτικών ροών.

3.8.3 Θαλάσσιες μεταφορές

Κατά τη φάση κατασκευής αναμένεται αυξημένη κίνηση πλοίων εγκατάστασης, η οποία, όπως σημειώθηκε και ανωτέρω αυξάνει τις πιθανότητες ενδεχόμενων συγκρούσεων, ατυχημάτων και θαλάσσιας ρύπανσης. Αντίθετα, κατά τη λειτουργία, τα πάρκα αποτελούν ζώνες περιορισμένης πρόσβασης. Αυτό μειώνει τον κίνδυνο συγκρούσεων σε περιοχές εντός του πάρκου αλλά δημιουργεί πιθανές παρακάμψεις για τις ναυτιλιακές οδούς.

Στο πλαίσιο σχεδιασμού και χωροθέτησης ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου λαμβάνονται και οι θαλάσσιες μεταφορές υπόψη, καθώς σε ορισμένες περιπτώσεις ενδέχεται να μην μπορούν να τροποποιηθούν ακτοπλοϊκά, εμπορικά ή και στρατιωτικά δρομολόγια. Προς αποφυγή των ανεμογεννητριών, τα πλοία πρόκειται να χρειαστούν να μεταβάλλουν τα δρομολόγια και τις πορείες τους. Η επίπτωση αυτή παρόλο που καλείται δευτερεύουσα, είναι μία μακροπρόθεσμη μεταβολή, που τις περισσότερες φορές απαιτεί μεγαλύτερο κόστος από τις ναυτιλιακές εταιρείες και μεγαλύτερης διαρκείας δρομολόγια.

Σημαντικό στοιχείο ακόμα αποτελεί και τα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που δημιουργούν οι ανεμογεννήτριες, καθώς αυτό θα αποτυπώνεται στα ραντάρ και τις κατευθυντήριες συσκευές των καπετάνιων, παρεμποδίζοντας σημαντικά και δυσχεραίνοντας τις συνθήκες πλοήγησης. Άμεση συνέπεια είναι και η αντίστοιχη αποτύπωση στα ραντάρ εναέριας κυκλοφορίας των στρατιωτικών και εμπορικών αεροσκαφών. Η σωστή και λεπτομερής χαρτογράφηση των περιοχών ύπαρξης πάρκων και κατάλληλης επισήμανσής στα ηλεκτρονικά και δορυφορικά μέσα.

3.8.4 Ακουστική όχληση

Σημαντική επίπτωση σε έργα αιολικών πάρκων αποτελεί και η ακουστική όχληση που δημιουργείται τόσο κατά την περίοδο της κατασκευής, όσο και κατά τη λειτουργία των ανεμογεννητριών. Ιδιαίτερα κατά την κατασκευή του έργου τα πλοία, τα μηχανήματα, οι εργασίες αλλά και το προσωπικό δημιουργούν αυξημένα επίπεδα θορύβου, επηρεάζοντας έντονα τους υποθαλάσσιους έμβιους οργανισμούς, καθώς και τα πτηνά. Συμπληρωματικά, η



πασσαλόμψη και η χρήση βαρέων μηχανημάτων προκαλεί έντονους υποβρύχιους θορύβους, που επηρεάζουν ιδιαίτερα τα κητώδη και άλλα θαλάσσια θηλαστικά.

Η όχληση αυτή σε αρκετά μικρότερο βαθμό συνεχίζεται και με το πέρας των εργασιών και κατά τη λειτουργία του πάρκου. Ο θόρυβος αυτός πέρα από τα υποθαλάσσια μηχανήματα, προκύπτει και από την περιστροφή της έλικας, επηρεάζοντας έτσι άμεσα και μακροπρόθεσμα τα θαλάσσια οικοσυστήματα. Τρόπος αντιμετώπισης αυτού είναι ο εκσυγχρονισμένος και μεθοδικός σχεδιασμός των πτερυγίων, αλλά και η χαμηλότερης έντασης περιστροφής των πτερυγίων. Στο ίδιο πλαίσιο ο θάλαμος μονώνεται με κατάλληλα υλικά, προς τη βέλτιστη ηχομόνωση, ενώ ακόμα τόσο το κιβώτιο όσο και η γεννήτρια τοποθετούνται σε καλά φυλαγμένους και μονωμένους χώρους.

Σημαντικές βέβαια είναι οι μετατροπές και τα βήματα προόδου που γίνονται σε παγκόσμια κλίμακα για την ελαχιστοποίηση και την δημιουργία αθόρυβων μηχανημάτων και εξαρτημάτων τόσο για τις ανεμογεννήτριες που εγκαθίστανται στην ηπειρωτική χώρα, όσο και στο θαλάσσιο περιβάλλον. Στο πλαίσιο της κατασκευής, ο ακουστικός αντίκτυπος θεωρείται από τους σημαντικότερους περιβαλλοντικούς κινδύνους, ωστόσο ο μεγαλύτερος έντασης θόρυβος αποτελεί προσωρινή κατάσταση.

3.8.5 Οπτική όχληση

Τελευταία αλλά εξίσου σημαντική επίπτωση που προκύπτει από τη δημιουργία ενός αιολικού πάρκου, είναι και η οπτική όχληση που αυτές δημιουργούν. Οι οπτικές επιπτώσεις είναι υποκειμενικές· επηρεάζουν αρνητικά περιοχές με έντονη τουριστική δραστηριότητα, αλλά με σωστή χωροθέτηση και αποστάσεις μπορούν να μετριαστούν.

Αδιαμφισβήτητο γεγονός αποτελεί ότι κατά την εγκατάσταση στην ενδοχώρα πολλαπλασιάζονται αισθητά οι παράγοντες και οι συνθήκες όχλησης, καθώς εμφανίζονται περισσότεροι παρατηρητές. Ο λόγος αυτού έγκειται στον πιο κλειστό χώρο που βρίσκεται και πλησιέστερα στις κατοικημένες περιοχές.

Αντίθετα λοιπόν, η εγκατάσταση σε μεγάλης έκτασης περιοχές και με μεγάλες αποστάσεις από τον ανθρώπινο παράγοντα, η οπτικοαισθητική αξιολόγηση δεν επηρεάζει κατά τον ίδιο βαθμό. Προς αυτή την κατεύθυνση κινούνται και οι κατασκευάστριες εταιρείες, με τροποποιήσεις και χρωματισμούς που ενσωματώνονται ομαλά στο υφιστάμενο περιβάλλον ανά περίπτωση. Η οπτική και αισθητική αποδοχή έχει εμφανώς βελτιώσει τις συνθήκες προσθήκης ενός αιολικού πάρκου, επιτυγχάνοντας μία επιθυμητή ομοιομορφία και μειώνοντας τις αρνητικές απόψεις του πληθυσμού.

Στο πλαίσιο αυτό και στην κλίμακα των υπεράκτιων αιολικών έργων πρόκειται να μελετηθεί ο αντίκτυπος που φέρουν αυτές, σε σύγκριση με τις ακτογραμμές του ελλαδικού χώρου και τις τοποθεσίες από τα σημαντικότερα σημεία προσέλκυσης κόσμου, πρόκειται να πραγματοποιηθεί αντίστροφη μελέτη ορατότητας, προς διερεύνηση τοποθεσιών που θα φέρουν τις λιγότερες οπτικές και αισθητικές οχλήσεις.



Κεφάλαιο 4 Χωροθέτηση υπεράκτιων αιολικών πάρκων

4.1 Χωροταξικός Σχεδιασμός Υπεράκτιων Αιολικών Πάρκων

Η ανάπτυξη των υπεράκτιων αιολικών πάρκων, γνωρίζει ραγδαία αύξηση σε παγκόσμιο επίπεδο. Αυτό κατά κύριο λόγο οφείλεται, στην ανάγκη εύρεσης εναλλακτικών τρόπων συλλογής και διαχείρισης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Τα πλεονεκτήματα και κυρίως ο υπέρογκος διαθέσιμος χώρος που υφίσταται προς ανέγερση και εγκατάσταση υπεράκτιων αιολικών πάρκων, τα καθιστά μία εκ των σημαντικότερων προτεραιοτήτων διεθνώς, διερεύνησης και μελέτης κατάλληλων περιοχών για την χωροθέτησή τους. Τη σημαντικότερη διαδικασία του συνόλου της μελέτης, αποτελεί ο προσδιορισμός κατάλληλων περιοχών εγκατάστασης ενός ΥΑΠ.

Οι προοπτικές του ελλαδικού χώρου στην εν λόγω ανάπτυξη, είναι πολλαπλές, κάτι που οφείλεται στην ταυτόχρονη διαθεσιμότητα απεριόριστου χώρου ανάπτυξης, σε συνδυασμό με την ιδανική απόσταση από τις χερσαίες περιοχές. Σε αυτό το πλαίσιο κινείται και η Ελλάδα τα τελευταία χρόνια, καταρτίζοντας ένα οριοθετημένο και αποτελεσματικό ρυθμιστικό άξονα για τα έργα της αιολικής ενέργειας.

4.1.1 Νομοθετικό πλαίσιο

Από τα μέσα της δεκαετίας του ογδόντα, έχει ξεκινήσει η συζήτηση για τη θεσμοθέτηση και τη δημιουργία ενός νομοθετικού πλαισίου για την εγκατάσταση αιολικών πάρκων. Ναυαρχίδα αποτελεί ο νόμος 1559/1985 «Ρύθμιση θεμάτων εναλλακτικών μορφών ενέργειας και ειδικών θεμάτων ηλεκτροπαραγωγής από συμβατικά καύσιμα και άλλες διατάξεις», στον οποίο πραγματοποιείται μία πρωταρχική χαρτογράφηση κυρίως για τον μετριασμό του μονοπωλίου που κατείχε τότε η ΔΕΗ.

Σχεδόν μία δεκαετία μετά ψηφίστηκε ο Ν. 2244/1994 «Ρύθμιση θεμάτων ηλεκτροπαραγωγής από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και από συμβατικά καύσιμα και άλλες διατάξεις», ο οποίος καθορίζει πρακτικά μία συμβατική τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ΑΠΕ. Εν συνεχεία και σε συνδυασμό με την οδηγία 96/92 της Ευρωπαϊκής Ένωσης, ο εν λόγω νόμος τροποποιήθηκε το 1999, οπότε και θεσμοθετήθηκε ο Ν. 2773/1999 «Απελευθέρωση της αγοράς ενέργειας - Ρύθμιση θεμάτων ενεργειακής πολιτικής και λοιπές διατάξεις». Ο τελευταίος αποτελεί τα θεμέλια δημιουργίας της ΡΑΕ καθώς και του Διαχειριστή Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΕΣΜΗΕ), προς παρακολούθηση της παραγωγής και της μεταπώλησης και πάταξης των υπέρογκων τιμολογιακών καθεστώτος των ανερχόμενων παραγωγών.

Στο πλαίσιο απλοποίησης των διαδικασιών αδειοδότησης των έργων ΑΠΕ, θεσμοθετήθηκε ο Ν. 2941/2001 «Απλοποίηση διαδικασιών ίδρυσης εταιρειών, αδειοδότησης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, ρύθμιση θεμάτων της Α.Ε. ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΝΑΥΠΗΓΕΙΑ και άλλες διατάξεις», με κύριο θέμα τις διατάξεις περιορισμού των κατασκευών εντός των επιτρεπτών περιβαλλοντικών και δει δασικών ορίων.



Σύμφωνα με το Ν. 3468/2006 «Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και Συμπαγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας Υψηλής Απόδοσης και λοιπές διατάξεις», καταρτίζεται ένα τιμολογιακό πρότυπο περιλαμβάνοντας όλες τις μορφές παραγωγής ενέργειας, ανάλογα με την αξιοποίησή τους από το Διασυνδεδεμένο Σύστημα ή τα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά.

Έκτοτε και παρόλο που η βάση παραμένει η ίδια και η ανάγκη για αξιοποίηση των ΑΠΕ, εμφανέστερη και πιο απαραίτητη από ποτέ, έχουν θεσμοθετηθεί και ισχύουν πλήθος νόμων, προς αδειοδότηση και επέκταση και στις υπεράκτιες περιοχές. Ειδικότερα, με την ψήφιση του νόμου 3851/2010 «Επιτάχυνση της ανάπτυξης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και άλλες διατάξεις σε θέματα αρμοδιότητας του Υπουργείου Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής», εισάγεται ο όρος «θαλάσσιες περιοχές» ως επιλέξιμες για χωροθέτηση αιολικών εγκαταστάσεων, αναγνωρίζοντας ουσιαστικά για πρώτη φορά ότι οι ΑΠΕ μπορούν να αναπτυχθούν και εκτός ξηράς.

Στο χωροταξικό σκέλος (συνδυαστικά με το Ειδικό Χωροταξικό Πλαίσιο για τις ΑΠΕ – ΚΥΑ 49828/2008), διατηρήθηκε η δυνατότητα υπεράκτιας ανάπτυξης, χωρίς όμως να ορίζονται συγκεκριμένες προϋποθέσεις ή θαλάσσιες ζώνες. Τα κριτήρια που τίθενται προσανατολίζονται στους περιβαλλοντικούς, ενεργειακούς και πολιτικοοικονομικούς σκοπούς. Πιο συγκεκριμένα, για την αδειοδότηση ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου, απαιτείται η σύνταξη και η λεπτομερής μελέτη στρατηγικής μελέτης περιβαλλοντικών επιπτώσεων (ΣΜΠΕ), αποτυπώνοντας ουσιαστικά την επιρροή του υπό μελέτη έργου στο υφιστάμενο περιβάλλον της περιοχής.

Το μεγάλο βήμα για την ανάπτυξη των υπεράκτιων αιολικών πάρκων (ΥΑΠ) στην Ελλάδα θεσμοθετήθηκε σε ενιαία και ολοκληρωμένη βάση με τον Νόμο 4964/2022 (ΦΕΚ Α' 150/30.07.2022). Ο εν λόγω νόμος αποτελεί καίριο στοιχείο, καθώς εισάγει για πρώτη φορά σαφές πλαίσιο για τον σχεδιασμό, αδειοδότηση και ανάπτυξη των ΥΑΠ, καθορίζοντας τους αρμόδιους φορείς και τις διαδικασίες. Κεντρικός ρόλος αποδίδεται στην Ελληνική Διαχειριστική Εταιρεία Υδρογονανθράκων και Ενεργειακών Πόρων Α.Ε (ΕΔΕΥΕΠ - HEREMA), η οποία ανέλαβε την ευθύνη για τον εντοπισμό και την οριοθέτηση των Περιοχών Οργανωμένης Ανάπτυξης Υπεράκτιων Αιολικών Πάρκων (ΠΟΑΥΑΠ). Παράλληλα, ο Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ) ορίστηκε υπεύθυνος για τον σχεδιασμό και την υλοποίηση των διασυνδέσεων στο Εθνικό Σύστημα Μεταφοράς, ενώ η Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ) ανέλαβε την προκήρυξη διαγωνισμών για την παροχή λειτουργικής ενίσχυσης στα έργα ΥΑΠ.

Η διαδικασία ανάπτυξης των ΥΑΠ περιλαμβάνει διακριτά στάδια, τα οποία οριοθετούνται από Υπουργικές Αποφάσεις και Προεδρικά Διατάγματα. Σε πρώτο επίπεδο, εκδίδεται Κοινή Υπουργική Απόφαση που εγκρίνει το Εθνικό Πρόγραμμα Ανάπτυξης ΥΑΠ και τη συνοδευτική Στρατηγική Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΣΜΠΕ). Στη συνέχεια, με Προεδρικά Διατάγματα οριοθετούνται οι Περιοχές Οργανωμένης Ανάπτυξης Υπεράκτιων Αιολικών Πάρκων (ΠΟΑΥΑΠ) και καθορίζονται οι όροι ανάπτυξης σε κάθε θαλάσσια ζώνη.

Εν συνεχεία η HEREMA εκχωρεί δικαιώματα έρευνας σε επενδυτές που πληρούν συγκεκριμένα τεχνικά και οικονομικά κριτήρια, ενώ οι επενδυτές αυτοί αναλαμβάνουν την εκπόνηση ερευνητικών μελετών (π.χ. βυθομετρικών, ανεμολογικών). Στο τελικό στάδιο, η ΡΑΕ διενεργεί διαγωνιστικές διαδικασίες για την επιλογή έργων που θα λάβουν ενίσχυση και θα προχωρήσουν σε φάση κατασκευής.



Η ελληνική στρατηγική εντάσσεται στο ευρύτερο ευρωπαϊκό πλαίσιο της Πράσινης Συμφωνίας και των δεσμεύσεων για την κλιματική ουδετερότητα έως το 2050. Σύμφωνα με το χρονοδιάγραμμα που έχει παρουσιάσει η ΕΛΕΤΑΕΝ, οι στόχοι για τα υπεράκτια αιολικά στην Ελλάδα ανέρχονται σε περίπου 1,9 GW έως το 2030, 6,2 GW έως το 2035 και 17,3 GW έως το 2050. Για την επίτευξη των στόχων αυτών, κρίσιμη είναι η ολοκλήρωση του Πιλοτικού Προγράμματος στον Θρακικό Πέλαγος (μέγιστης ισχύος 600 MW), το οποίο προβλέπεται ως το πρώτο έργο μεγάλης κλίμακας που θα λειτουργήσει ως οδηγός για την περαιτέρω ανάπτυξη της αγοράς.

Συνολικά, το υφιστάμενο θεσμικό πλαίσιο συγκροτεί μια πολυεπίπεδη στρατηγική που ξεκινά από τον κεντρικό ενεργειακό σχεδιασμό και καταλήγει στις λεπτομέρειες αδειοδότησης και λειτουργίας. Παράλληλα, παραμένει υπό διαμόρφωση, με τις Υπουργικές Αποφάσεις και τα Προεδρικά Διατάγματα να εξειδικεύουν σταδιακά το σύνολο των όρων ανάπτυξης, ώστε να διασφαλιστεί η ισορροπία ανάμεσα στην ενεργειακή αξιοποίηση και την περιβαλλοντική προστασία.

Το πιο πρόσφατο ΦΕΚ Δ 227/17.04.2025, με το οποίο εγκρίνεται η Εθνική Χωρική Στρατηγική για τον Θαλάσσιο Χώρο (ΕΧΣΘΧ), αποτελεί το βασικό θεσμικό πλαίσιο που καθορίζει την πολιτική και τις κατευθύνσεις για τη βιώσιμη ανάπτυξη και την οργάνωση των δραστηριοτήτων στον ελληνικό θαλάσσιο χώρο. Ανάμεσα στις κύριες προτεραιότητές της περιλαμβάνεται η προώθηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, με ιδιαίτερη έμφαση στην αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού μέσω της ανάπτυξης υπεράκτιων αιολικών πάρκων.

Η στρατηγική αυτή επηρεάζει άμεσα τα υπεράκτια αιολικά έργα, καθώς ορίζει τις αρχές, τα κριτήρια και τις κατευθύνσεις που θα διέπουν τη χωροθέτηση και αδειοδότησή τους. Θέτει το πλαίσιο για τον καθορισμό ειδικών θαλάσσιων ζωνών ανάπτυξης ΑΠΕ, λαμβάνοντας υπόψη περιβαλλοντικά, κοινωνικά και οικονομικά κριτήρια, και διασφαλίζει τη συνύπαρξή τους με άλλες χρήσεις του θαλάσσιου χώρου, όπως η ναυσιπλοΐα, η αλιεία και ο τουρισμός. Συνεπώς, το ΦΕΚ Δ 227/2025 λειτουργεί και θα λειτουργήσει ως θεμέλιο για την υλοποίηση του εθνικού προγράμματος υπεράκτιων αιολικών πάρκων και την ενσωμάτωσή τους στον συνολικό θαλάσσιο χωροταξικό σχεδιασμό της χώρας.

4.1.2 Κριτήρια Αποστάσεων Χωροθέτησης Αιολικών Πάρκων

Στον τομέα των υπεράκτιων αιολικών πάρκων στην Ελλάδα, τα πρώτα κριτήρια χωροθέτησης στο θαλάσσιο χώρο και στις ακατοίκητες νησίδες, βασίζονται στο Ειδικό Πλαίσιο Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης για τις ΑΠΕ (ΕΧΠ-ΑΠΕ, ΚΥΑ 49828/2008) και πιο συγκεκριμένα στο Άρθρο 10 αυτού, το οποίο αναφέρει ενδεικτικά ότι:

- Η χωροθέτηση ΘΑΠ επιτρέπεται σε όλες τις θαλάσσιες περιοχές, εφόσον προϋποτίθεται η αξιοποίηση αιολικής ενέργειας. Σημαντική σημείωση επ' αυτού αποτελεί ότι οι εν λόγω περιοχές δεν πρέπει να εντάσσονται στις απαγορευμένες ζώνες αποκλεισμού, όπως αυτές αναφέρονται στη συνέχεια,
- Οφείλει να τηρούνται οι ελάχιστες αποστάσεις μεταξύ των ανεμογεννητριών αλλά και μεταξύ των ζωνών αποκλεισμού και του πάρκου, ώστε να διασφαλίζεται η αποδοτικότητα και η εύρυθμη λειτουργία των αιολικών σταθμών,



- Η εγκατάσταση Α/Γ, δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί σε απόσταση μικρότερη των 1,500 m από ακτές, οι οποίες εντάσσονται στο πρόγραμμα παρακολούθησης της ποιότητας των νερών κολύμβησης του Υπουργείου Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων (Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε νυν ΥΠΕΝ),
- Δεν επιτρέπεται η εγκατάσταση Α/Γ σε κλειστούς κόλπους, με εύρος ανοίγματος μικρότερο των 1.500 μέτρων,
- Ελάχιστες αποστάσεις από χώρους με περιβαλλοντικό ενδιαφέρον, με στοιχεία πολιτιστικής κληρονομιάς, καθώς και από οικισμούς και κατοικημένες περιοχές.
- Οφείλουν να τηρούνται οι ελάχιστες αποστάσεις, σχετικά με παραγωγικές ζώνες και δραστηριότητες του τριτογενή τομέα παραγωγής,
- Η χερσαία όδευση μέχρι τον υποσταθμό διασύνδεσης δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 20 km,
- Οφείλει να περιορίζεται η οπτικοακουστική όχληση που προκαλείται στο τοπίο και στο περιβάλλον,
- Είναι αναγκαία η διασύνδεση και η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας με το εκάστοτε σύστημα – είτε της ηπειρωτικής χώρας είτε των διασυνδεδεμένων νησιών,
- Το βάθος θεμελίωσης ή αγκύρωσης των επιλεγθέντων ανεμογεννητριών της βάσης της Α/Γ, εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά βάσει των προδιαγραφών, των στατικών μελετών και της δυναμικής συμπεριφοράς των κατασκευών.

Τον Οκτώβριο του 2023, παρουσία της πολιτικής ηγεσίας του ΥΠΕΝ, του υπουργείου ναυτιλίας και αξιωματούχων του Ελληνικού Πολεμικού Ναυτικού, και στελεχών της ΕΔΕΥΕΠ/HEREMA παρουσιάστηκε το Σχέδιο Εθνικού Προγράμματος Ανάπτυξης Υπεράκτιων Αιολικών Πάρκων (ΕΠΑ-ΥΑΠ) και η σχετική Στρατηγική Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΣΜΠΕ). Το Σχέδιο προτείνει ένα δίκτυο περιοχών για βραχυπρόθεσμη (μέχρι 2030–2032) και μακροπρόθεσμη ανάπτυξη, με εκτίμηση συνολικής ελάχιστης ισχύος περίπου 12,4 GW στις 25 προτεινόμενες περιοχές, ενώ για την πρώτη φάση (μέχρι 2030–2032) οριοθετείται δεξαμενή περίπου 4,9 GW σε 10 επιλέξιμες περιοχές. Το σχέδιο, όπως αναρτήθηκε κατά την επίσημη ανακοίνωση της HEREMA, τονίζει ότι η πλειονότητα των περιοχών ενδείκνυται για πλωτή τεχνολογία λόγω θαλάσσιων βαθυμετρικών συνθηκών.

Στα μέσα ενημέρωσης αναφέρθηκε, ότι οι περιοχές που προκρίθηκαν για τα πρώτα έργα περιλαμβάνουν —μεταξύ άλλων—: Ανατολική Κρήτη, Νότια Ρόδο, Κεντρικό Αιγαίο, άξονα Ευβοίας–Χίου, Ιόνιο (και στις αποδόσεις/αναφορές εμφανίσθηκαν και τα Διαπόντια / Πατραϊκός σε κάποιες αναφορές), με στόχο την εγκατάσταση ~2–2,5 GW στις επιλεγμένες περιοχές εντός της πρώτης φάσης.

Τέλος, η διαχείριση της επόμενης φάσης (ΣΜΠΕ — δημόσια διαβούλευση, εκπόνηση τεχνικών μελετών ανά περιοχή, οριοθέτηση «οικοπέδων» εγκατάστασης με Προεδρικά Διατάγματα και μετέπειτα διαγωνιστικές διαδικασίες) περιγράφεται με χρονοδιάγραμμα πλάνο για τη δημοσιοποίηση ΣΜΠΕ, προκήρυξη διαγωνισμών για τεχνικές μελέτες και ΣΜΠΕ ανά περιοχή, καθώς και οριοθέτηση με Προεδρικά Διατάγματα.

Στο πλάνο της HEREMA εφαρμόσθηκαν «20 κριτήρια αποκλεισμού» με στόχο να εξαιρεθούν θαλάσσιες ζώνες που δεν είναι συμβατές με την εγκατάσταση ΥΑΠ ή όπου η εγκατάσταση θα προκαλούσε σημαντικές συγκρούσεις χρήσεων/ευαισθησίες. Στη δημοσιογραφική και τεχνική αναφορά αυτά τα κριτήρια περιγράφονται συνοπτικά με τις ακόλουθες κατηγορίες (όπως εμφανίζονται στο Σχέδιο/ ΣΜΠΕ και στις συνοδευτικές παρουσιάσεις):



- Θεσμικά / ασφάλειας: θαλάσσιες ζώνες που σχετίζονται με εθνική/αμυντική ασφάλεια, στρατιωτικές δραστηριότητες και περιοχές με ειδικούς περιορισμούς πρόσβασης.
- Ναυτιλιακές / επιχειρησιακές χρήσεις: σημαντικοί ναυτιλιακοί διάδρομοι, λιμενικές προσεγγίσεις, αλιευτικές ζώνες και ζώνες υδατοκαλλιέργειας όπου οι δραστηριότητες συγκρούονται άμεσα με διεπαφή πάρχου.
- Αεροπορική συμβατότητα: περιοχές γύρω από αεροδρόμια και ραντάρ όπου οι ανεμογεννήτριες ενδέχεται να προκαλέσουν παρεμβολές ή να απαιτούν ειδικές αποστάσεις/μέτρα συμβατότητας.
- Αποστάσεις από ακτογραμμή / οπτικό / τουριστικό ενδιαφέρον: «ελάχιστες αποστάσεις από την ακτογραμμή» για λόγους οπτικής επίδρασης, τουριστικής προστασίας και αξιοποίησης παραλίων.
- Περιβαλλοντικοί / βιοδιαφορικά χώροι: προστατευόμενες περιοχές (Natura, Ramsar, περιοχές με παρουσία θαλάσσιων θηλαστικών και σοβαρών ενδιαιτημάτων πτηνών), αρχαιολογικοί και πολιτιστικοί χώροι.
- Τεχνικο-οικονομικά κριτήρια: βαθυμετρία (προτίμηση πλωτής τεχνολογίας σε βαθύτερα νερά), μέσες ταχύτητες ανέμου σε υλοποιήσιμα ύψη (π.χ. ανταγωνιστική ταχύτητα σε 100–150 m ύψος στον άξονα της ανεμογεννήτριας), πρόσβαση σε λιμένες / κατασκευαστική /διαθεσιμότητα τερματικών εγκαταστάσεων.

Οι παραπάνω κατηγορίες εφαρμόζουν ζώνες αποκλεισμού στο χάρτη εφαρμογής το ΣΜΠΕ και το σχέδιο ώστε οι τελικές ΠΟΑΥΑΠ να είναι λειτουργικά και περιβαλλοντικά αποδεκτές. Η χρήση δεσμευτικών αποκλεισμών αποτελεί διεθνές βέλτιστο πρότυπο για στρατηγικό χωρικό σχεδιασμό υπεράκτιων έργων και μειώνει αβεβαιότητες στο στάδιο των αδειοδοτήσεων.

4.1.3 Ειδικά Κριτήρια Χωροθέτησης Υπεράκτιων Αιολικών Πάρκων

Οι θαλάσσιες περιοχές που δύναται να αναπτυχθούν θαλάσσια αιολικά πάρκα, οφείλουν να ταυτίζονται με κάποια πρωταρχικά κριτήρια χωροθέτησης, τα οποία νομοθετούνται και αναφέρονται σχετικά. Τα κριτήρια αυτά περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων, περιβαλλοντικές μελέτες, πλήρη χαρτογράφηση των υπό μελέτη υδάτων, του βυθού και των χρήσεων γης.

Ειδικότερα, ίσως το σημαντικότερο δικαιολογητικό αποτελεί η περιβαλλοντική μελέτη – ΣΜΠΕ, όπου πρέπει να παρουσιάζονται επαρκείς χάρτες κινδύνου για θαλάσσια θηλαστικά, βυθούς χαρακτηρισμένους ως σημαντικά ενδιαιτήματα, μεταναστευτικά περάσματα πτηνών κ.λπ. Οι αποστάσεις ασφαλείας και τα μέτρα μετριασμού προσαρμόζονται με βάση τα ευρήματα, αξιολογώντας την επίδραση του έργου και τις επιπτώσεις που αναμένεται αυτό να επιφέρει στο φυσικό και ανθρωπιστικό περιβάλλον της περιοχής. Όλες οι περιοχές του ευρωπαϊκού δικτύου Natura 2000 απορρίπτονται εκ των ουκ άνευ, λόγω της σπανιότητας και των προστατευόμενων ειδών που περιλαμβάνουν.

Αντίστοιχα, κατά τη μελέτη λαμβάνονται υπόψη οι θαλάσσιες χρήσεις, κατόπιν χαρτογράφησης της αλιείας, των υδατοκαλλιεργειών, της ναυσιπλοΐας, των λιμένων, των ναυπηγικών δρόμων και διεθνών διαδρόμων. Συγκεκριμένες συγκρούσεις πρέπει να λυθούν



με καθορισμούς ζωνών αποκλεισμού ή τεχνικό διαχωρισμό, όπως για παράδειγμα ακτίνα 6 ναυτικών μιλίων περιμετρικά της ζώνης του πάρκου αλιείας.

Απαραίτητο στοιχείο αποτελούν τα γεωτεχνικά, βυθο-γεωλογικά, καθώς και η βαθυμετρία, τα οποία πρόκειται να επηρεάσουν και την τεχνολογία έδρασης (fixed vs floating). Στα ελληνικά πελάγη μεγάλος όγκος των προτεινόμενων περιοχών προκρίνει πλωτά σχέδια, λόγω βάθους και γεωμορφολογίας. Ο σχεδιασμός πρέπει να συσχετίσει βαθμίδες βάθους με Ισοσταθμισμένο Κόστος Ενέργειας (Levelized Cost of Energy – LCOE) και κόστος αγκύρωσης/σύνδεσης. Για παράδειγμα και εφόσον προβλέπεται η εγκατάσταση ανεμογεννητριών μονού πυλώνα περιορίζεται η έκταση του πάρκου, έως το βάθος των 150 m.

Σημαντικό στοιχείο αποτελεί και το αιολικό δυναμικό της περιοχής, το οποίο αξιοποιείται για την αξιολόγηση της τοποθεσίας και δεν αποτελεί αποτρεπτικό παράγοντα για την ανάπτυξη του έργου, εκτός από ελάχιστες περιπτώσεις με πολύ χαμηλές μέσες ταχύτητες $< 5 \text{ m/s}$. Τα ανεμολογικά και κυματικά περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων τις στατιστικές ταχύτητες ανέμου σε συγκεκριμένο ύψος ανεμογεννήτριας (hub height) και κυματικές συνθήκες που υπαγορεύουν μέγεθος, καθώς και τον τύπο πλωτής δομής. Για τα εν λόγω δεδομένα απαιτούνται τοπικές μετρήσεις μέσω εξειδικευμένων εργαλείων (Προφιλόμετρο Ρεύματος Ακουστικής Doppler Profiler – ADCP, Light Detection And Ranging – LIDAR, και σηματοδότες τύπου - buoy) και μακροχρόνιες χρονοσειρές.

Κατά τη μελέτη, λαμβάνεται υπόψη και η διασύνδεση με δίκτυο και με διεθνείς διασυνδέσεις εφόσον πρόκειται για γειτονικά σε συννορεύοντες χώρες. Όλα τα κριτήρια διασύνδεσης, οι υποσταθμοί συλλογής, παρακολούθησης, λειτουργίας και διαχείρισης, πορείας των ηπειρωτικών διαδρομών καλωδιώσεων και η προσβασιμότητα στο έργο αποτελούν στοιχεία συνυπολογισμού σε όλες τις μελέτες.

Τέλος, σημαντικό και μη εξαιρετέο παράγοντα αποτελεί η ανάλυση οπτικοακουστικών επιπτώσεων, οι οποίες αξιολογούνται κατόπιν υπολογισμού των ζωνών ορατότητας, ειδικά ως προς τουριστικές ακτές και παραθαλάσσιες περιοχές υψηλού ενδιαφέροντος. Η οπτική όχληση που το έργο ενδέχεται να προκαλέσει σε σημεία φυσικού κάλλους, πολιτιστικού και πολιτισμικού ενδιαφέροντος και σε ιστορικά μνημεία, κρίνεται ιδιαιτέρως σημαντική. Ευρέως γνωστή είναι η στάση της Ελλάδας - σε αντίθεση με το εξωτερικό – ότι οι περιοχές φυσικού κάλλους, τα ιστορικά σημεία ενδιαφέροντος και οι τουριστικές δραστηριότητες, «προστατεύονται» αυστηρά, διατηρώντας μεγάλη εμβέλεια, από οποιαδήποτε τεχνική υποδομή δημόσιας ή ιδιωτικής ιδιοκτησίας.

Καθώς και σύμφωνα με το Σχέδιο Εθνικού Προγράμματος Ανάπτυξης Υπεράκτιων Αιολικών Πάρκων της HEREMA, προβλέπεται ανάγκη να δοθεί προτεραιότητα για πλωτή τεχνολογία, λόγω των αυξημένων βαθών του ελλαδικού χώρου, είναι κρίσιμη η εμπρόθεσμη μελέτη και μέριμνα για τις λιμενικές υποδομές και γενικότερα την εφοδιαστική αλυσίδα.

Αντίστοιχα, τονίζεται ότι σε περιοχές με πυκνή ναυτιλιακή κίνηση ή εγγύτητα σε αεροδρόμια, απαιτούνται εξειδικευμένες τεχνικές (ναυτιλιακές μελέτες, ραντάρ, συνεργασία με ΥΠΕΘΑ/Υπουργείο Ναυτιλίας) πριν την τελική υιοθέτηση οικοπέδων.



4.1.4 Επικυρωμένα Κριτήρια Χωροταξικού Σχεδιασμού

Βάσει των δεδομένων που δημοσιοποιήθηκαν στο πλαίσιο του Σχέδιο Εθνικού Προγράμματος Ανάπτυξης Υπεράκτιων Αιολικών Πάρκων της HEREMA και της ΣΜΠΕ, ανακοινώθηκαν τα παρακάτω βασικά αποκλειστικά κριτήρια.

1. **Περιοχές Εθνικής / Αμυντικής Ασφάλειας:** Ζώνες που αφορούν στρατιωτικές δραστηριότητες ή εθνικούς στόχους όπου επιβλέπεται αυστηρός έλεγχος πρόσβασης.
2. **Περιοχές Επιβατικής Ναυσιπλοΐας / Αλιείας / Υδατοκαλλιέργειας:** Επιφανειακοί ή υποθαλάσσιοι διάδρομοι σημαντικοί για πλοήγηση ή αλιευτική δραστηριότητα.
3. **Περιοχές Ραντάρ / Αεροπορικών Διαδρομών / Αεροδρομίων:** Περιοχές όπου η εγκατάσταση μπορεί να προκαλέσει παρεμβολές ή να θέσει σε κίνδυνο αεροπορικές λειτουργίες.
4. **Ελάχιστη Απόσταση από την Ακτογραμμή (οπτικά / τουριστικά):** Προστασία της ορατής εικόνας από τουριστικά ευαίσθητες ζώνες της ακτής.
5. **Καταδυτικοί Αρχαιολογικοί Χώροι / Πολιτιστική Κληρονομιά:** Περιοχές με πολιτιστικά ευρήματα ή μνημεία που δεν επιτρέπεται να υποστούν αλλοίωση.
6. **Ζώνες Natura 2000 / Ramsar / Βιοποικιλότητας:** Περιοχές προστατευόμενες για ορνιθοπανίδα ή συναφή οικοσυστήματα.
7. **Προστατευόμενοι Υγρότοποι / Φυσικά Ενδιαιτήματα:** Επικοινωνίες με οικοσυστήματα λεκάνης ή θάλασσας υψηλής οικολογικής αξίας.
8. **Ζώνες Μεταναστευτικών Διαδρομών Πτηνών / Υδρόβιων Θηλαστικών:** Όπου η παρουσία έργου θα επιβάρυνε γεννητικές ή μετεωριστικές δραστηριότητες.
9. **Βυθομετρικές Συνθήκες (βαθιά ύδατα):** Συνθήκες που επιτρέπουν ή επιβάλλουν πλωτή τεχνολογία (floating), αποκλείοντας fixed-bottom λύσεις.
10. **Μέσες Ταχύτητες Ανέμου σε Hub Height (Υψος ανεμογεννήτριας):** Περιοχές με ανεπαρκή ενεργειακό δυναμικό για βιώσιμη παραγωγή.
11. **Λιμενικές / Ναυπηγικές υποδομές / Πρόσβαση στην ακτή:** Απαιτείται ισχυρή υποδομή logistics για την κατασκευή και συντήρηση.
12. **Συγκρούσεις με άλλες Θαλάσσιες Χρήσεις:** Υδατοκαλλιέργειες, τουρισμός, αλιεία, αναψυχή κ.ά.
13. **Εθνική Αποκλειστική Οικονομική Ζώνη (ΑΟΖ) / Διπλωματικές Ζώνες:** Ζώνες με περιορισμένη διακρατική διαχείριση ή συντεταγμένες από άλλους φορείς.
14. **Υπάρχουσες Υποθαλάσσιες Υποδομές (αλυσιδωτές/υποβρύχιες γραμμές):** Αποφυγή παρεμβολών με υπάρχουσες υποδομές ενέργειας ή επικοινωνιών.
15. **Σοβαρά Ρεύματα / Κυματικές Συνθήκες:** Δυσχεραίνουν τη θαλάσσια εγκατάσταση και λειτουργία.



16. **Θέματα Κυκλοφορίας / Λιμενικά Σχέδια:** Επιβάρυνση ή αποσταθεροποίηση θαλάσσιας κυκλοφορίας και επαγγελματικής δραστηριότητας.
17. **Προοπτική Ανάπτυξης Ναυτιλιακής Οικονομίας / Ναυπηγικής Δραστηριότητας:** Διασφάλιση συνέχισης χρήσης για μελλοντικές αναπτυξιακές δραστηριότητες.
18. **Τουριστικές Εγκαταστάσεις (Παραλίες, Οικοτουριστικά Κέντρα):** Αποφυγή οπτικής όχλησης σε περιοχές υψηλής επισκεψιμότητας.
19. **Δυνατότητες Περιβαλλοντικών Μετριάσμων:** Περιοχές που απαιτούν αυστηρά περιβαλλοντικά μέτρα ή όπου αυτά δεν είναι εφικτά.
20. **Άλλες Χρήσεις (σαφής οδηγία αφαίρεσης):** Ολοκληρωτική απάλειψη περιοχών όπου η σύγκρουση χρήσης είναι μη αναστρέψιμη.

Πίνακας 6: Πίνακας Κριτηρίων Χωροταξικού σχεδιασμού (Κατηγορία: Αποκλεισμού ή Αξιολόγησης, Μονάδες μέτρησης m: μέτρα, km: χιλιόμετρα, nm: ναυτικό μίλι)

A/A	Κριτήριο Χωροθέτησης	Κατηγορία κριτηρίου – Εμβέλεια αποκλεισμού	Τεκμηρίωση δεδομένων
1	Περιοχές Εθνικής - Αμυντικής Ασφάλειας	Αποκλεισμός (0 m — εξαιρούνται περιοχές στρατιωτικής χρήσης)	UNCLOS - Εθνική πρακτική για στρατιωτικές ζώνες (un.org)
2	Περιοχές Επιβατικής Ναυσιπλοΐας - Αλιείας - Υδατοκαλλιέργειας	Αποκλεισμός & Αξιολόγηση Ελάχιστη εμβέλεια ≥ 1 nm από κύριους διαύλους & 0 m εντός υδατοκαλλιέργειών	COLREGs (ναυτιλιακοί κανόνες) Automatic Identification System (AIS) Πυκνότητα πλοίων για οριοθέτηση διαύλων (EMODnet AIS, vessel density maps). (imo.org)
3	Περιοχές Ραντάρ - Αεροπορικών Διαδρομών - Αεροδρομίων	Αποκλεισμός & Αξιολόγηση – Αποφυγή — Ενδεικτική εμβέλεια ≥ 5 km ή σύμφωνα με ANSP/ΥΠΑ (κατά περίπτωση)	Eurocontrol guidelines για επιπτώσεις ανεμογεννητριών στα ραντάρ & EASA FAA (eurocontrol.int)
4	Ελάχιστη Απόσταση από την Ακτογραμμή	Αποκλεισμός & Αξιολόγηση – Αποφυγή — Ενδεικτική εμβέλεια ≥ 2 nm (Κριτήριο Ορατότητας τουριστικών ζωνών)	Εθνικές/ευρωπαϊκές πρακτικές χωροθέτησης ΑΠΕ και Ειδικά Χωροταξικά Πλαίσια (EUR-Lex)
5	Καταδυτικοί Αρχαιολογικοί Χώροι - Πολιτιστική Κληρονομιά	Αποκλεισμός - (0 m)	UNESCO Convention Εθνική αρχαιολογική νομοθεσία — υποβρύχιες πολιτιστικές ζώνες προστατεύονται πλήρως. (un.org)
6	Ζώνες Natura 2000 - Ramsar - Βιοποικιλότητας	Αποκλεισμός - (0 m)	Habitats Directive 92/43/EEC & Birds Directive 2009/147/EC Natura2000 (The Habitats Directive)
7	Προστατευόμενοι Υγρότοποι - Φυσικά Ενδιαιτήματα	Αποκλεισμός — Ενδεικτική εμβέλεια ≥ 0 m ή σύμφωνα (κατά περίπτωση))	Ramsar, EU & εθνικά μητρώα προστατευόμενων υγροτόπων (Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Περιβάλλοντος)



A/A	Κριτήριο Χωροθέτησης	Κατηγορία κριτηρίου – Εμβέλεια αποκλεισμού	Τεκμηρίωση δεδομένων
8	Ζώνες Μεταναστευτικών Διαδρομών Πτηνών - Υδροβίων Θηλαστικών	Αποκλεισμός — Ελάχιστη εμβέλεια ≥ 5 km γύρω από κύριες διαδρομές / κρίσιμα σημεία (αυξάνεται ανά είδος)	Οδηγίες BirdLife / EEA για διαδρομές μετανάστευσης — MSP (Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Περιβάλλοντος)
9	Βυθομετρικές Συνθήκες	Αποκλεισμός & Αξιολόγηση – Fixed-bottom: 60–100 m Floating: 100-1000 m	EMODnet / GEBCO bathymetry και τεχνικές/εκτιμήσεις (IEA/ESMAP, DNV, liter.) — τεχνικά όρια βάθους για fixed vs floating. (GEBCO)
10	Μέσες Ταχύτητες Ανέμου	Αποκλεισμός & Αξιολόγηση – Ελάχιστη τιμή: ≥ 6 m/s (μέση ταχύτητα στο hub height)	Global/IEA/ESMAP τεχνικές αξιολογήσεις & πρακτικές εκτιμήσεις τεχνικής βιωσιμότητας. (esmap.org)
11	Λιμενικές - Ναυπηγικές υποδομές - Πρόσβαση στην ακτή	Αποκλεισμός & Αξιολόγηση – Μέγιστη εμβέλεια: ≤ 60 km (κατά περίπτωση)	UK Crown Estate / BOEM / (Bureau of Ocean Energy Management)
12	Συγκρούσεις με άλλες Θαλάσσιες Χρήσεις	Αποκλεισμός - (0 m)	EU MSP Directive 2014/89/EU — αρχές συνύπαρξης χρήσεων και ιεράρχηση. (EUR-Lex)
13	Εθνική ΑΟΖ - Διπλωματικές Ζώνες	Αποκλεισμός & Αξιολόγηση — Ελάχιστη εμβέλεια ≥ 5 km (κατά περίπτωση)	UNCLOS — νομικό πλαίσιο ΑΟΖ / εθνικά θαλάσσια σύνορα (un.org)
14	Υπάρχουσες Υποθαλάσσιες Υποδομές (γραμμές-καλώδια)	Αποκλεισμός & Αξιολόγηση — Ελάχιστη εμβέλεια ≥ 500 m (κατά περίπτωση)	BOEM/ICPC/EMODnet οδηγία για buffer γύρω από υποθαλάσσιες γραμμές (Bureau of Ocean Energy Management)
15	Σοβαρά Ρεύματα - Κυματικές Συνθήκες	Αποφυγή περιοχών με δυσμενείς oceanographic indices — απαιτείται μοντελοποίηση (no fixed buffer)	Copernicus Marine Service / εγχώρια ωκεανογραφικά δεδομένα & DNV design criteria — site-specific. (cinea.ec.europa.eu)
16	Θέματα Κυκλοφορίας - Λιμενικά Σχέδια	Αποκλεισμός & Αξιολόγηση — Ελάχιστη εμβέλεια ≥ 1 nm από κύριους διαύλους (κατά περίπτωση)	IMO/COLREGs & EMODnet πυκνότητα πλοίων / εθνικά λιμενικά σχέδια. (imo.org)
17	Προοπτική Ανάπτυξης Ναυτιλιακής - Ναυπηγικής Δραστηριότητας	Αποκλεισμός - (0 m)	Εθνικά/περιφερειακά θαλάσσια χωροταξικά σχέδια & EU MSP Directive. (EUR-Lex)
18	Τουριστικές Εγκαταστάσεις (Παραλίες, Οικοτουριστικά Κέντρα)	Αποκλεισμός & Αξιολόγηση — Ελάχιστη εμβέλεια ≥ 2 nm (κατά περίπτωση)	Ειδικά Χωροταξικά και πρακτικές χωρών. (Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Περιβάλλοντος)
19	Δυνατότητες Περιβαλλοντικών Μετριάσεων	Αξιολόγηση – Κατά περίπτωση	EIA Directive (2011/92/EU & αναθεωρήσεις) Εθνική νομοθεσία EIA/SEA. (Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Περιβάλλοντος)
20	Άλλες Χρήσεις (σαφής οδηγία αφαίρεσης)	Αποκλεισμός - (0 m) με μη αναστρέψιμη σύγκρουση χρήσης	EU MSP Directive Εθνικά χωροταξικά εργαλεία (EUR-Lex)



4.2 Κριτήρια χωροθέτησης

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω τα κριτήρια χωροθέτησης ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου, ορίζονται και θεσμοθετούνται από την ελληνική νομοθεσία. Ειδικότερα, τα κριτήρια διαχωρίζονται σε όσα αποτελούν αποτρεπτικούς παράγοντες – αποκλείοντας τη δυνατότητα κατασκευής έργων – και σε αυτά που αφορούν στην αξιολόγηση των τοποθεσιών, προς την εύρεση της βέλτιστης δυνατής περιοχής.

Περιοχές αποκλεισμού

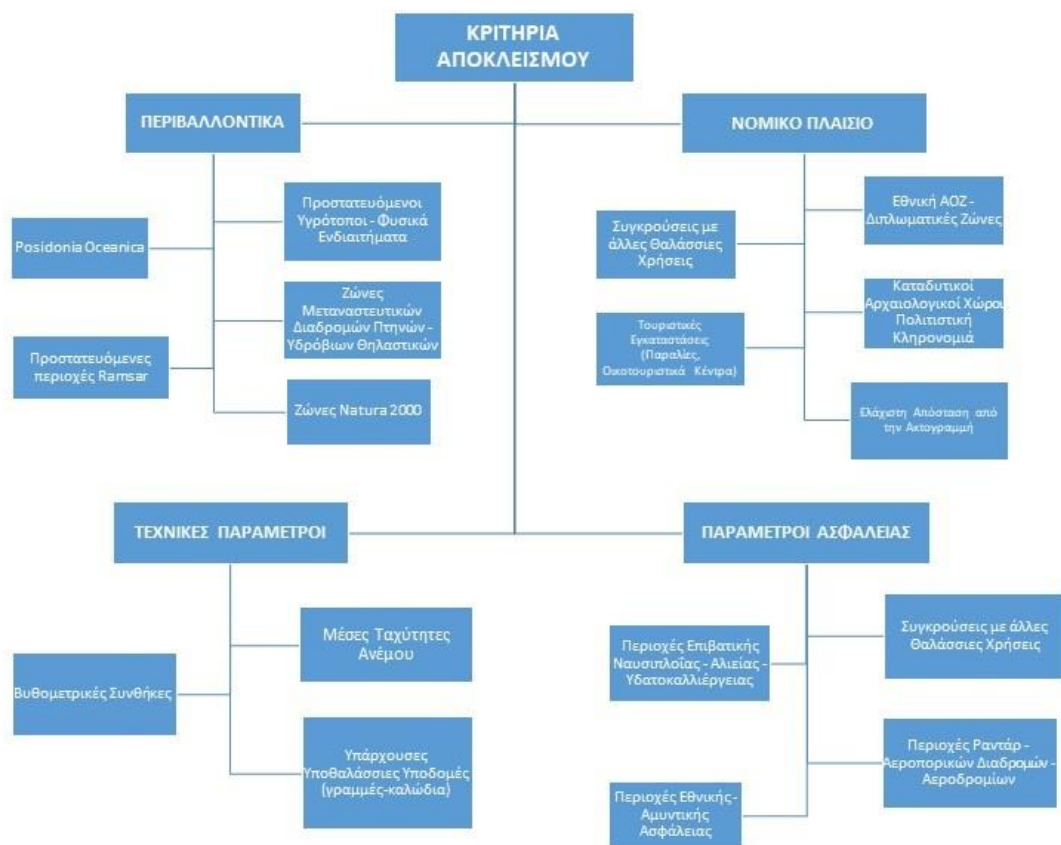
Η βέλτιστη χωροθέτηση ενός θαλάσσιου αιολικού πάρκου εντός των επιτρεπόμενων από την νομοθεσία ορίων υπάγεται σε ορισμένους περιορισμούς. Οι περιορισμοί αυτοί καλούνται ζώνες αποκλεισμού και είναι οι περιοχές που έχουν οριοθετηθεί και χαρτογραφεί πλήρως από τις αρμόδιες υπηρεσίες.

Οι περιοχές αποκλεισμού περιλαμβάνουν ζώνες στις οποίες η εγκατάσταση υπεράκτιων αιολικών πάρκων δεν είναι επιτρεπτή, είτε για λόγους ασφάλειας, είτε για λόγους προστασίας του περιβάλλοντος, είτε λόγω ασυμβατότητας με άλλες κρίσιμες χρήσεις. Σε αυτή την κατηγορία εντάσσονται:

- Θαλάσσιες εκτάσεις που σχετίζονται με εθνική άμυνα, στρατιωτικές εγκαταστάσεις και δραστηριότητες υψηλής στρατηγικής σημασίας. (Κρ. 1)
- Ζώνες ναυσιπλοΐας, λιμενικών διαδρόμων και υποδομών που είναι κρίσιμες για την εμπορική και επιβατική ναυτιλία. (Κρ. 2)
- Περιοχές που συνδέονται με αεροπορικές λειτουργίες, πλησίον αεροδρομίων και λοιπών υποδομών, όπου η παρουσία ανεμογεννητριών μπορεί να προκαλέσει σοβαρές παρεμβολές. (Κρ. 3)
- Θαλάσσιοι ή παράκτιοι χώροι με αρχαιολογικό ή πολιτιστικό ενδιαφέρον, οι οποίοι προστατεύονται από το θεσμικό πλαίσιο. (Κρ. 5)
- Προστατευόμενες περιβαλλοντικές περιοχές, όπως οι ζώνες Natura 2000, Ramsar ή άλλες περιοχές βιοποικιλότητας και υγρότοποι. (Κρ. 6, Κρ. 7)
- Περιοχές με υποθαλάσσιες ενεργειακές και τηλεπικοινωνιακές υποδομές, στις οποίες δεν επιτρέπονται παρεμβάσεις. (Κρ. 14)
- Ζώνες που χαρακτηρίζονται από σοβαρά φυσικά εμπόδια, όπως ισχυρά θαλάσσια ρεύματα ή ακραίες κυματικές συνθήκες. (Κρ. 15)
- Εκτάσεις που έχουν ήδη αποδοθεί αποκλειστικά σε άλλες θαλάσσιες χρήσεις ή όπου η σύγκρουση είναι αδύνατο να αρθεί. (Κρ. 20)

Οι ζώνες αυτές αποτελούν τα απορριπτέες περιοχές χωροθέτησης, καθώς η ύπαρξή τους αποκλείει εξ αρχής κάθε σκέψη εγκατάστασης.





Διάγραμμα 4: Διάγραμμα κατηγοριοποίησης κριτηρίων αποκλεισμού

Περιοχές Αξιολόγησης για τη βέλτιστη Χωροθέτηση

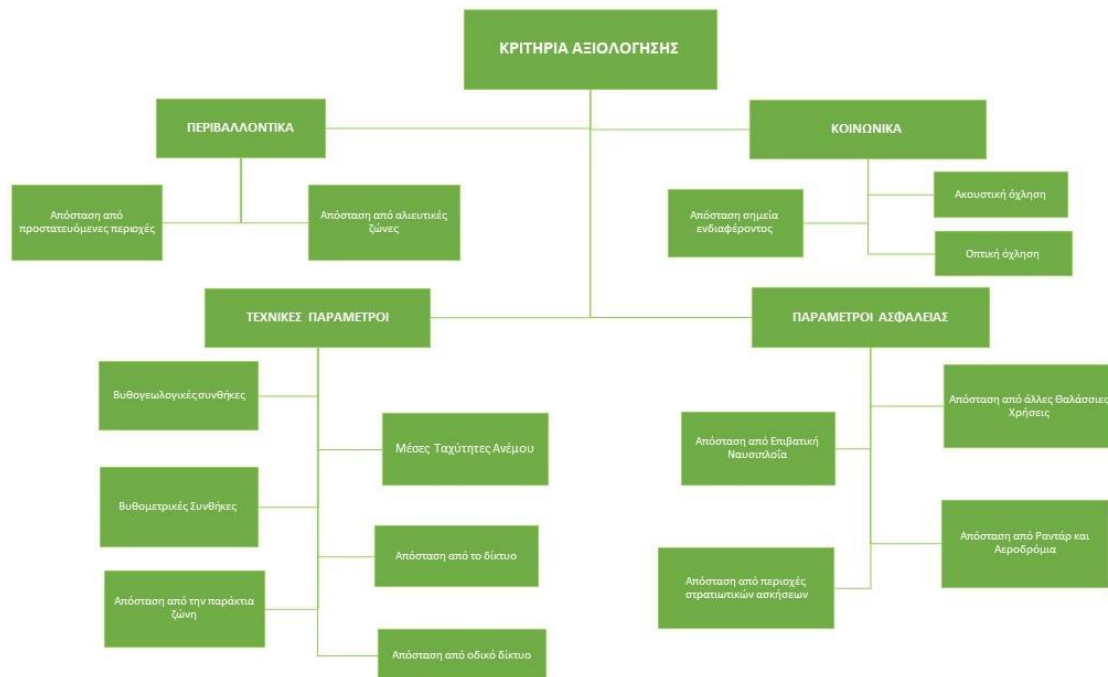
Εκτός από τις περιοχές αποκλεισμού όμως, σημασία έχουν και ορισμένα στοιχεία που απαιτούνται για την εύρεση μιας βέλτιστης τοποθεσίας για την κατασκευή ενός τέτοιου έργου. Οι περιοχές αξιολόγησης δεν αποκλείουν την εγκατάσταση, αλλά αποτελούν παραμέτρους που επηρεάζουν τη βιωσιμότητα, την απόδοση και τη συνολική καταλληλότητα ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου. Σε αυτή την κατηγορία περιλαμβάνονται:

- Χωρικοί περιορισμοί σχετιζόμενοι με την απόσταση από την ακτογραμμή, κυρίως για λόγους οπτικού τοπίου και τουριστικής προστασίας. (Κρ. 4, Κρ. 18)
- Οικολογικές διαδρομές όπως εκείνες που αφορούν μετανάστευση πτηνών και θαλάσσιων θηλαστικών, όπου η χωροθέτηση απαιτεί προσεκτική εκτίμηση. (Κρ. 8)
- Γεωμορφολογικές και βυθομετρικές συνθήκες, οι οποίες καθορίζουν το είδος θεμελίωσης (fixed-bottom ή floating) και το τεχνολογικό κόστος. (Κρ. 9)
- Δεδομένα αιολικού δυναμικού, που προσδιορίζουν αν η περιοχή διαθέτει επαρκή ανέμους για αποδοτική λειτουργία. (Κρ. 10)
- Διαθεσιμότητα λιμενικών και ναυπηγικών υποδομών για την υποστήριξη της κατασκευής, μεταφοράς και συντήρησης. (Κρ. 11, Κρ. 16)
- Υφιστάμενη ή δυνητική παρουσία άλλων θαλάσσιων χρήσεων (τουρισμός, υδατοκαλλιέργειες, αλιεία), που πρέπει να συνυπολογιστούν. (Κρ. 12)



- Θέματα που σχετίζονται με την εθνική ΑΟΖ και διπλωματικούς περιορισμούς, τα οποία μπορεί να απαιτούν διακρατικές συμφωνίες. (Κρ. 13)
- Προοπτικές μελλοντικής ανάπτυξης ναυτιλιακών ή λιμενικών δραστηριοτήτων, που επηρεάζουν τη βιωσιμότητα μιας επένδυσης. (Κρ. 17)
- Ειδικές περιβαλλοντικές απαιτήσεις ή δυνατότητες μετριασμού που πρέπει να ληφθούν υπόψη ώστε να διασφαλιστεί η συμμόρφωση με τους κανονισμούς. (Κρ. 19)

Οι περιοχές αξιολόγησης αποτελούν το δεύτερο φίλτρο της χωροθέτησης: δεν αποκλείουν εκ των προτέρων μια τοποθεσία, αλλά επηρεάζουν την τελική επιλογή με βάση την τεχνική, οικονομική και περιβαλλοντική βιωσιμότητα.



Διάγραμμα 5: Διάγραμμα κατηγοριοποίησης κριτηρίων αξιολόγησης

4.2.1 Χάρτης Αιολικού Δυναμικού

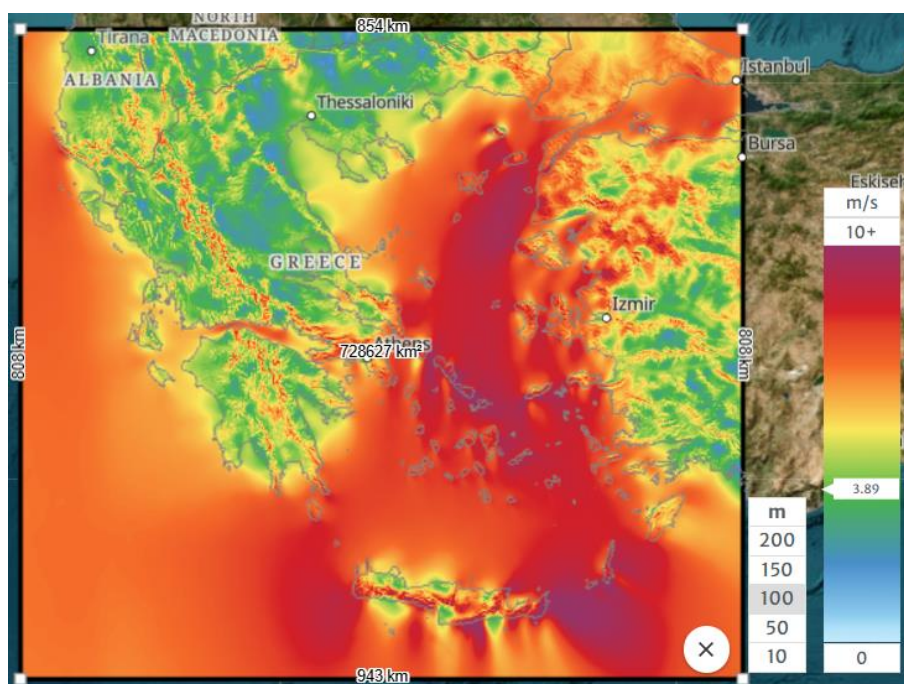
Ο χάρτης αιολικού δυναμικού αποτελεί βασικό εργαλείο για τη χωροθέτηση υπεράκτιων και χερσαίων αιολικών πάρκων, καθώς απεικονίζει γεωγραφικά την κατανομή και την ένταση των ανέμων σε μια περιοχή. Μέσα από τέτοιους χάρτες αποτυπώνεται η μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου (συνήθως σε ύψος αναφοράς 10–150 m, ανάλογα με τη γενιά ανεμογεννητριών), καθώς και η ενεργειακή πυκνότητα, επιτρέποντας την εκτίμηση της παραγωγικής ικανότητας ενός μελλοντικού έργου.

Η Ελλάδα, λόγω της γεωγραφικής της θέσης στο νοτιοανατολικό άκρο της Μεσογείου και της εκτεταμένης ακτογραμμής της, χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα υψηλό αιολικό δυναμικό. Οι ισχυροί βόρειοι άνεμοι (μελτέμια) στο Αιγαίο, οι τοπικές θερμικές κυκλοφορίες και η



σταθερότητα του αιολικού προφίλ, καθιστούν τη χώρα μια από τις πλέον ευνοϊκές περιοχές στην Ευρώπη για ανάπτυξη αιολικής ενέργειας.

Στους επίσημους χάρτες που έχουν παραχθεί για τον ελληνικό χώρο από το ΚΑΠΕ – Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, το Global Wind Atlas και πρόσφατα από τη HEREMA - στο πλαίσιο της προώθησης υπεράκτιων έργων - αποτυπώνεται ότι οι περιοχές του κεντρικού και νοτίου Αιγαίου (Κυκλάδες, Δωδεκάνησα, Κρήτη) διαθέτουν μέσες ταχύτητες ανέμου άνω των 7,5–8,5 m/s σε ύψος 100 m, ενώ στο Ιόνιο Πέλαγος οι ταχύτητες είναι χαμηλότερες (περίπου 6–7 m/s), αλλά με σχετικά πιο ήπιο κυματικό περιβάλλον. Στη Βόρεια Ελλάδα (Θράκη, ανατολικό Αιγαίο) οι ταχύτητες φτάνουν επίσης σε υψηλά επίπεδα, ενώ ο συνδυασμός με εκτεταμένες παράκτιες ζώνες ενισχύει τις δυνατότητες χωροθέτησης.

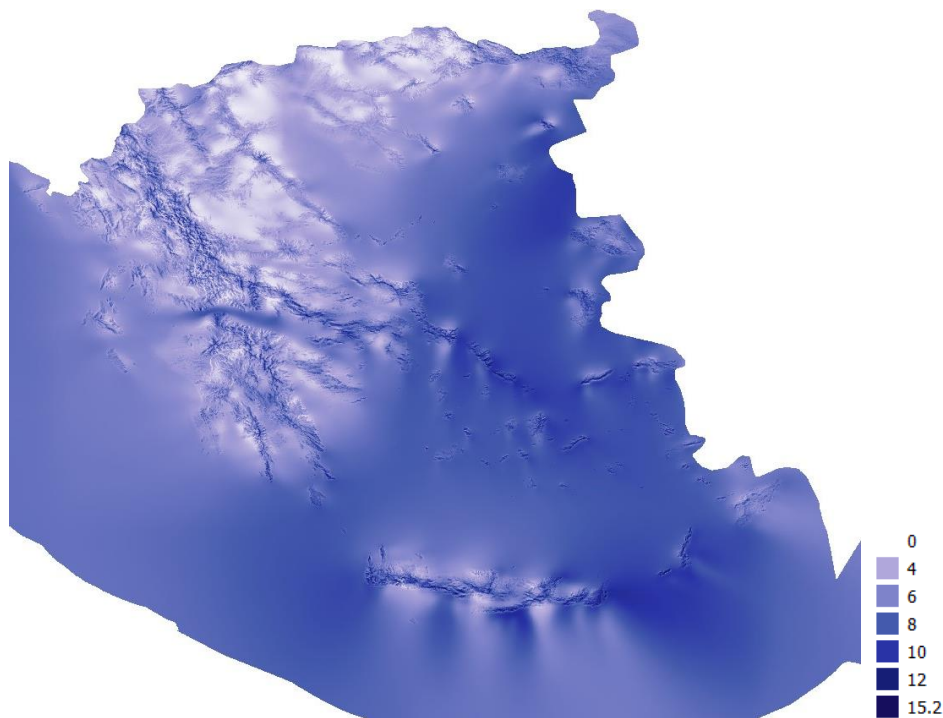


Χάρτης 7: Χάρτης αιολικού δυναμικού (Πηγή: Global Wind Atlas)

Σημαντικό στοιχείο αποτελεί το γεγονός ότι σε πηγές όπως η υπηρεσία Global Wind Atlas υπάρχει δυνατότητα υψομετρικής προσαρμογής, με τα δεδομένα εκτείνονται σε διαφορετικά ύψη hub height, επιτρέποντας ακριβέστερη πρόβλεψη απόδοσης.

Η αξιολόγηση για την Ελλάδα δείχνει ότι η χώρα διαθέτει από τα υψηλότερα αιολικά αποθέματα στην Ευρώπη, γεγονός που ενισχύει τη στρατηγική ανάπτυξης υπεράκτιων αιολικών πάρκων. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως στην Ελλάδα το αιολικό δυναμικό στα 100 m απόλυτου υψομέτρου εμφανίζει μέση τιμή ταχυτήτων ανέμου στα 8,42 m/s. Για το σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από την υπηρεσία ([Globalwindatlas](https://globalwindatlas.com)).





Χάρτης 8: Χάρτης αιολικού δυναμικού Ελλάδας (Κλίμακα: 1:50, Ταχύτητες ανέμου σε m/s)

4.2.2 Χάρτης Βαθυμετρίας

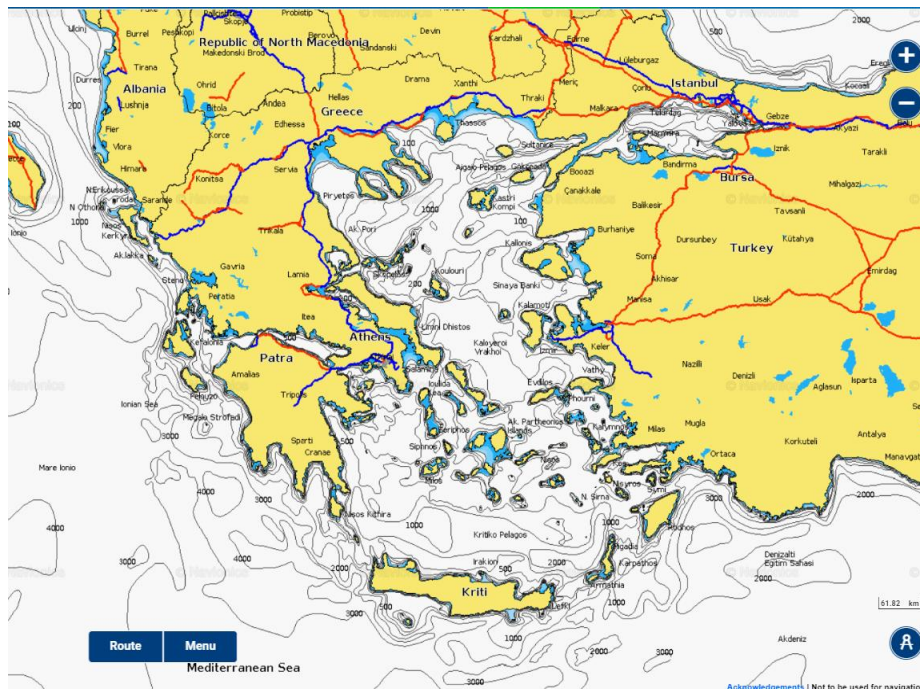
Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η βαθυμετρία αποτελεί κριτήριο αξιολόγησης μιας τοποθεσίας ως ικανής ή μη για την εγκατάσταση ενός τέτοιου έργου, καθώς απεικονίζει το βάθος της θάλασσας και τις μεταβολές του υποθαλάσσιου ανάγλυφου. Αποτελεί εργαλείο-κλειδί για τον καθορισμό της κατάλληλης τεχνολογίας θεμελίωσης (fixed-bottom ή floating), την τεχνική μέθοδο της εγκατάστασης και το συνολικό κόστος κατασκευής.

Η Ελλάδα χαρακτηρίζεται από πολύπλοκο υποθαλάσσιο ανάγλυφο λόγω της γεωλογικής και τεκτονικής της ιστορίας. Η Μεσόγειος Θάλασσα είναι σε γενικές γραμμές βαθύτερη σε σχέση με τις βόρειες ευρωπαϊκές θάλασσες, όπου αναπτύχθηκαν τα πρώτα υπεράκτια αιολικά.

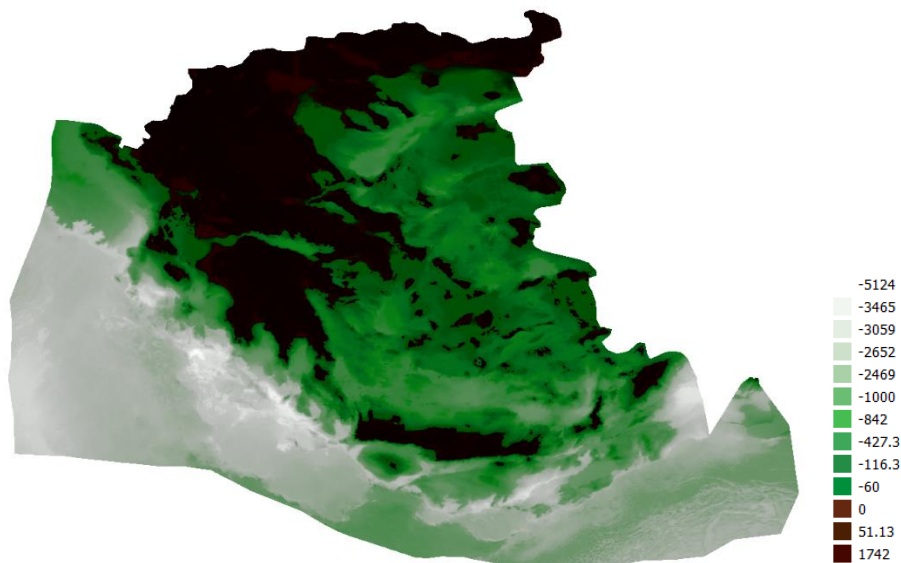
Ειδικότερα, στο Αιγαίο Πέλαγος, τα βάθη αυξάνονται απότομα, με τα παράκτια ρηχά νερά (<50 m) είναι σχετικά περιορισμένα και να βρίσκονται κυρίως γύρω από νησιά και ηπειρωτικές ακτές. Αντίστοιχα, στο Ιόνιο, οι ακτές έχουν ακόμη πιο απότομη κλίση, με μεγάλα βάθη (>200 m) πολύ κοντά στην ακτογραμμή. Στο Θρακικό Πέλαγος και στο βόρειο Αιγαίο, παρατηρούνται εκτενέστερες ρηχές ζώνες, πιο ευνοϊκές για fixed-bottom λύσεις, ενώ στο Κρητικό, τα βάθη αυξάνονται επίσης έντονα, με αποτέλεσμα οι πλωτές τεχνολογίες να είναι μονόδρομος.

Στην Ελλάδα, η πλειοψηφία των θαλάσσιων εκτάσεων που εμφανίζουν υψηλό αιολικό δυναμικό εμπίπτουν στη ζώνη των >100 m, γεγονός που εξηγεί γιατί η εθνική στρατηγική επικεντρώνεται στην ανάπτυξη πλωτών υπεράκτιων αιολικών πάρκων. Όπως παρατηρείται στον Χάρτη που ακολουθεί, από τα διαθέσιμα δεδομένα της υπηρεσίας του Navionics ([Navionics](#)) σε αποστάσεις μεγαλύτερες των 25 km από την ακτογραμμή, τα βάθη κατά κύριο λόγο ξεπερνούν τα 200 m.





Χάρτης 9: Χαρτογράφηση βαθυμετρίας στην Ελλάδα (Πηγή: Navionics)



Χάρτης 10 : Χάρτης βαθυμετρίας (Κλίμακα 1:50, Βάθη σε m)

4.2.3 Χάρτης Γραμμών Ναυσιπλοΐας

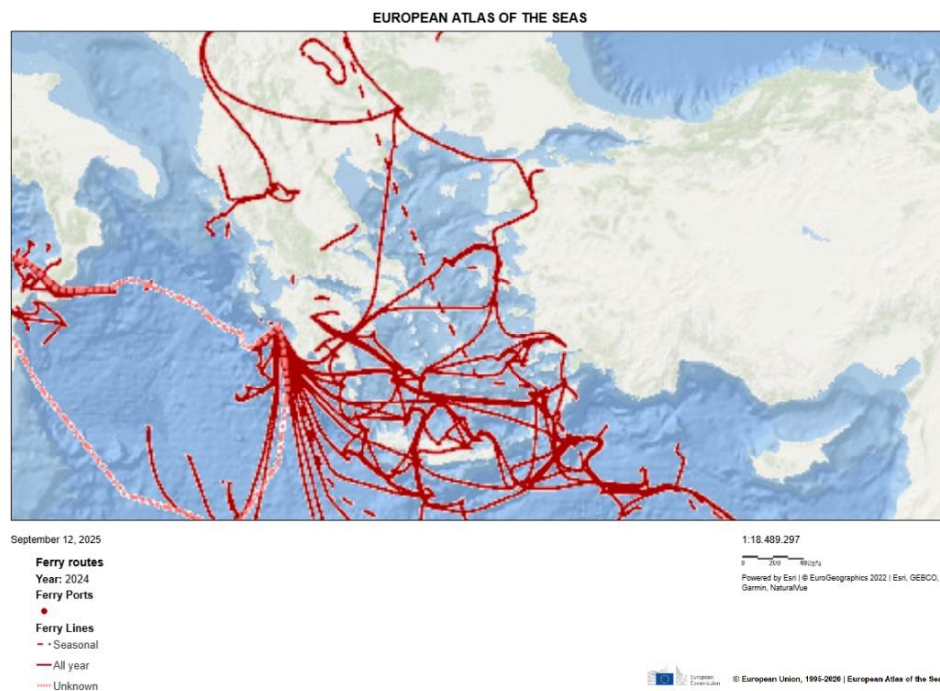
Ο χάρτης γραμμών ναυσιπλοΐας αποτυπώνει τα κύρια θαλάσσια δρομολόγια που χρησιμοποιούνται από επιβατικά, εμπορικά και φορτηγά πλοία. Η χαρτογράφηση των διαδρόμων είναι κρίσιμη για την ασφάλεια της ναυσιπλοΐας και για την αποφυγή συγκρούσεων ή παρεμπόδισης της ελεύθερης κυκλοφορίας στη θάλασσα.



Η Ελλάδα διαθέτει ένα από τα πιο πυκνά δίκτυα θαλάσσιων γραμμών στην Ευρώπη, λόγω της εκτεταμένης νησιωτικότητας, της σημασίας της επιβατικής ακτοπλοΐας για τη σύνδεση ηπειρωτικών και νησιωτικών περιοχών, καθώς και της στρατηγικής θέσης της χώρας σε διεθνείς εμπορικούς διαδρόμους.

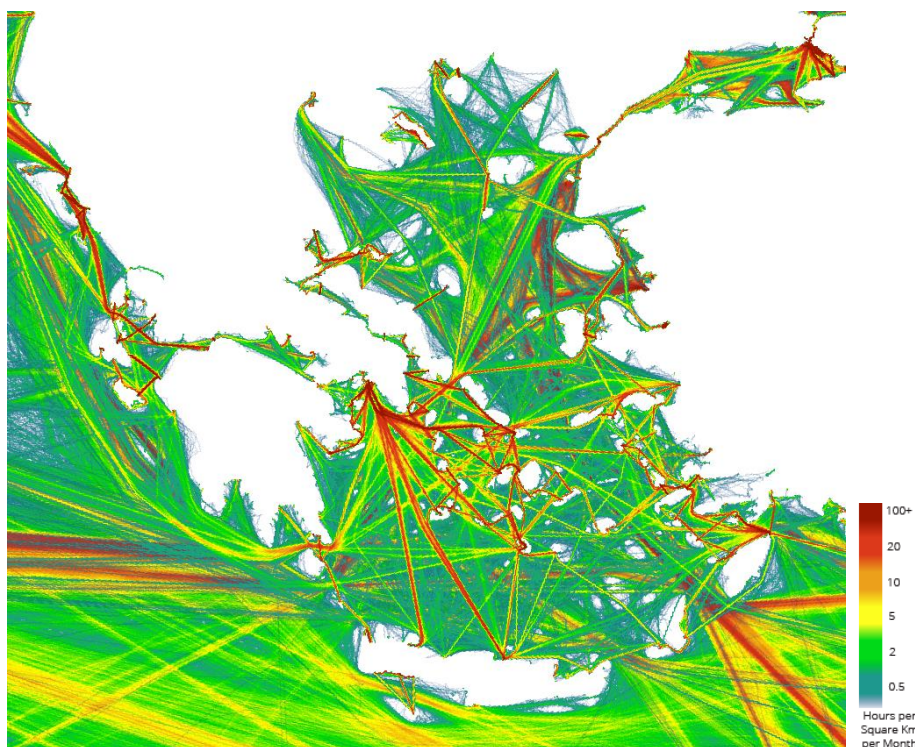
Τις κύριες ζώνες ναυσιπλοΐας, αποτελούν τα τρία μεγαλύτερα ελληνικά πελάγη το Αιγαίο, το Ιόνιο και το Κρητικό, ενώ σημαντικό στοιχείο αποτελούν και οι διεθνείς διάδρομοι μεταξύ Ανατολικής Μεσόγειου – Σουέζ – Μαύρης Θάλασσας, με τμήματα που διέρχονται κοντά από ελληνικά ύδατα.

Η προσθήκη των γραμμών ναυσιπλοΐας στη χωροθέτηση υπεράκτιων αιολικών πάρκων είναι απαραίτητη για την ασφαλή πλεύση όλων των μέσων. Ενδεχόμενη εγκατάσταση ανεμογεννητριών σε τέτοιες ζώνες θα αύξανε τον κίνδυνο συγκρούσεων και θα δημιουργούσε περιορισμούς στη ναυσιπλοΐα. Για το λόγο αυτό οι απαιτούμενες αποστάσεις κρίνονται κατά περίπτωση με γνώμονα την πυκνότητα μιας γραμμής. Ενδεικτικό παράδειγμα αποτελούν οι περιοχές όπως το κεντρικό Αιγαίο, όπου οι αποκλειστικές ζώνες γύρω από τις ακτοπλοϊκές γραμμές, περιορίζουν σημαντικά τις διαθέσιμες εκτάσεις για εγκατάσταση πάρκων.



Χάρτης 11: Χάρτης γραμμών ναυσιπλοΐας (Πηγή: [European Atlas of the Seas](#))





Χάρτης 12: Χάρτης γραμμών ναυσιπλοΐας επιβατικών (passenger) και εμπορικών πλοίων (cargo & tanker)
(Κλίμακα: 1:50)

4.2.4 Χάρτης Περιβαλλοντικά Προστατευόμενων περιοχών

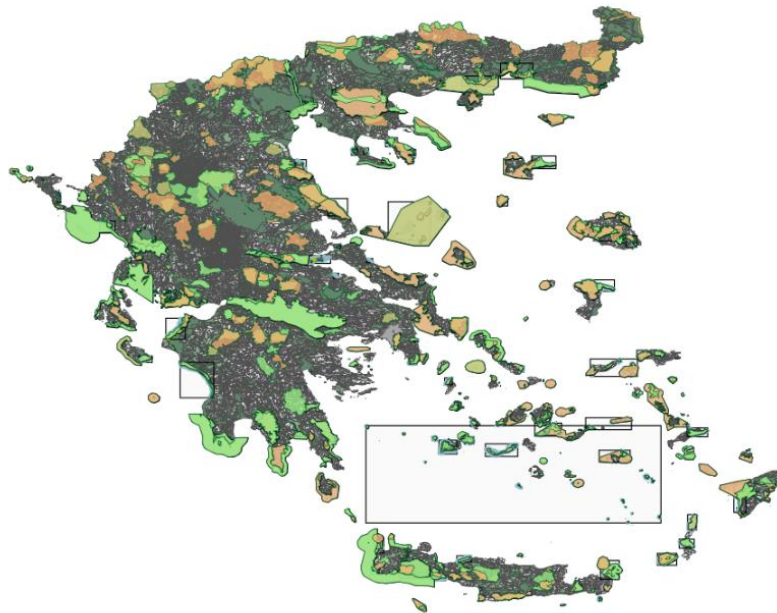
Η χαρτογράφηση των προστατευόμενων περιοχών αποτελεί βασικό εργαλείο για τον στρατηγικό χωροταξικό σχεδιασμό υπεράκτιων αιολικών πάρκων. Στην Ελλάδα, το δίκτυο προστατευόμενων περιοχών περιλαμβάνει κυρίως τις περιοχές του Δικτύου Natura 2000 (Ειδικές Ζώνες Διατήρησης – SCI και Ζώνες Ειδικής Προστασίας – SPA), τους υγροτόπους διεθνούς σημασίας της Σύμβασης Ramsar, καθώς και θαλάσσιες ή παράκτιες περιοχές που έχουν χαρακτηριστεί ως προστατευόμενες λόγω της βιοποικιλότητας και των ευαίσθητων οικοσυστημάτων τους. Οι ζώνες αυτές θεωρούνται περιοχές αποκλεισμού για την εγκατάσταση ΑΠΕ, προκειμένου να διασφαλιστεί η διατήρηση των ειδών και των οικοτόπων.

Για τη χωροθέτηση υπεράκτιων αιολικών πάρκων, η ενσωμάτωση των δεδομένων των προστατευόμενων περιοχών σε Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ) επιτρέπει τον ακριβή καθορισμό των περιοχών που αποκλείονται από την ανάπτυξη. Οι διαθέσιμες βάσεις δεδομένων προέρχονται κυρίως από το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ), το Εθνικό Κτηματολόγιο, αλλά και ευρωπαϊκούς οργανισμούς όπως το ΕΕΑ (European Environment Agency) και το UNEP-WCMC (World Database on Protected Areas).

Η αξιολόγηση των δεδομένων αυτών αναδεικνύει ότι στην Ελλάδα μεγάλο μέρος των παράκτιων και θαλάσσιων περιοχών βρίσκεται υπό καθεστώς προστασίας, ειδικά στο Ιόνιο, το Αιγαίο και το Ανατολικό Αιγαίο, γεγονός που περιορίζει τις δυνατότητες ανάπτυξης έργων κοντά στις ακτές αλλά ταυτόχρονα κατευθύνει τον σχεδιασμό προς πιο απομακρυσμένες θαλάσσιες περιοχές με μικρότερη περιβαλλοντική επιβάρυνση.



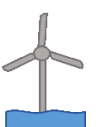
Ένας δεύτερος αξιοσημείωτος και σημαντικός τύπος προστασίας, ο οποίος μελετάται όπου υπάρχει θαλάσσιο περιβάλλον, είναι αυτός των λιβαδιών της Ποσειδωνίας. Η ωκεάνιος Ποσειδωνία (*Posidonia oceanica*) είναι είδος θαλάσσιου φανερογάμου και είναι ενδημικό στη Μεσόγειο Θάλασσα. Πρόκειται για ένα είδος φυτού που καλείται θαλάσσιο αγγειόσπερμο, το οποίο σχηματίζει μεγάλα υποθαλάσσια λιβάδια που αποτελούν σημαντικό μέρος του οικοσυστήματος. Ο καρπός της διασπείρεται ελεύθερα, επιπλέει και τέλος εκβράζεται στις ακτές υπό τη μορφή στρογγυλών μπαλών από το φύλλωμα της, γνωστές ως μπάλες Ποσειδωνίας. Το συγκεκριμένο είδος εντοπίζεται διαρκώς σε περιοχές και ακτές της Ελλάδας και γενικότερα της Μεσογείου. Τα τελευταία χρόνια μελετάται και δίνεται ιδιαίτερη βαρύτητα, στον τρόπο με τον οποίο θα μπορούσε να μεταφυτευθεί το φυτό όταν συναντάται σε τοποθεσίες έργων. Σύμφωνα με βιβλιογραφικές αναφορές, έχει επιτευχθεί η μεταφύτευσή του σε περιοχές της Ιταλίας. Το συγκεκριμένο είδος προστατεύεται από την εθνική και κοινοτική νομοθεσία και αποτελεί ωφέλιμο βιοτικό στοιχείο για τα θαλάσσια οικοσυστήματα.



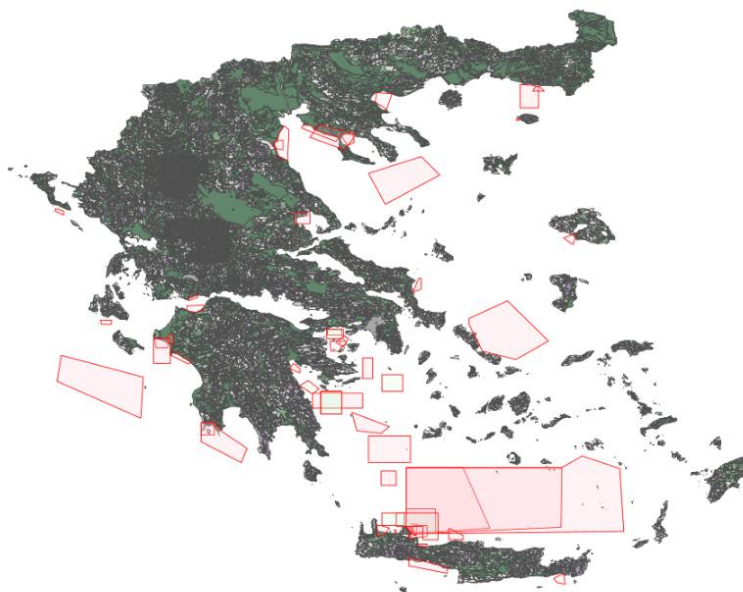
Χάρτης 13: Χάρτης Περιβαλλοντικά Προστατευόμενων Περιοχών (Κλίμακα 1:50, Περιοχές Απόλυτης Προστασίας της Φύσης σε Θαλάσσια Πάρκα, Περιοχές Προστασίας της Φύσης σε Θαλάσσια Πάρκα, Περιοχές του Ευρωπαϊκού Οικολογικού Δικτύου Natura 2000, Habitats Directive Annex I habitat maps)

4.2.5 Χάρτης περιοχών στρατιωτικών ασκήσεων

Οι περιοχές στρατιωτικών ασκήσεων είναι θαλάσσιες ζώνες που προορίζονται για τη διεξαγωγή εκπαίδευσης του Πολεμικού Ναυτικού, της Αεροπορίας και άλλων δυνάμεων (ναυτικά πυρά, αεροβομβαρδισμοί, ναυτικές ασκήσεις κ.λπ.). Όλες οι θαλάσσιες περιοχές, οι οποίες χρησιμοποιούνται από τον Ελληνικό Στρατό για εκπαιδευτικούς ή πολεμικούς σκοπούς, αποτελούν περιοχές αποκλεισμού και δεν λαμβάνονται υπόψιν για οποιαδήποτε άλλη χρήση. Οι περιοχές στρατιωτικών ασκήσεων που περιλαμβάνονται στη



χαρτογράφηση της παρούσας μελέτης βασίστηκαν στις επίσημες δημοσιεύσεις του Hellenic Navy Hydrographic Service.



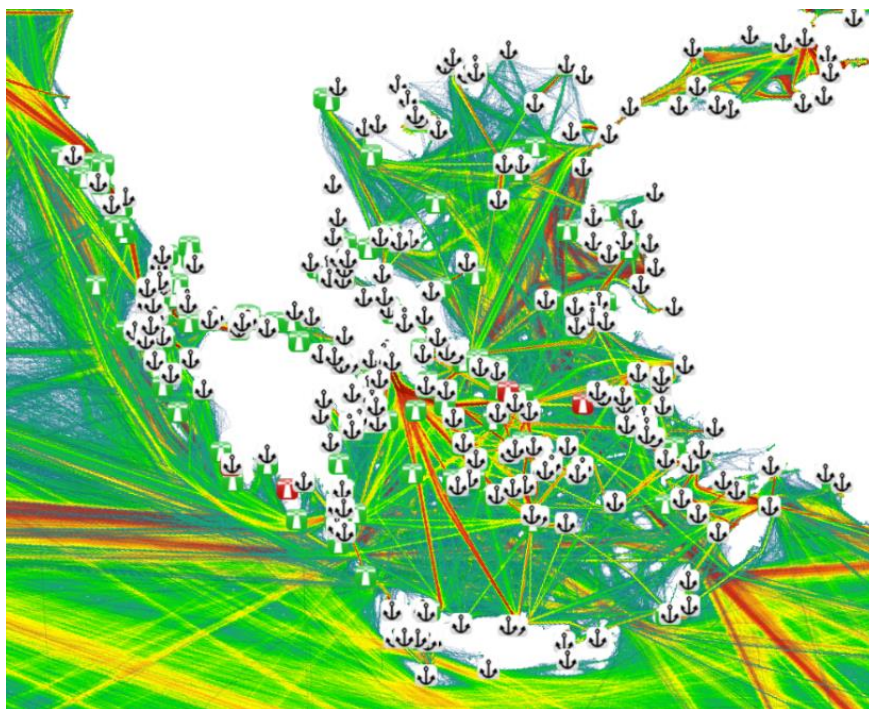
Χάρτης 14: Περιοχές στρατιωτικών ασκήσεων (Κλίμακα 1:50)

4.2.6 Λοιποί χάρτες

Για την ολοκληρωμένη αξιολόγηση της χωροθέτησης υπεράκτιων αιολικών πάρκων αξιοποιήθηκαν πρόσθετα δεδομένα, τα οποία οργανώθηκαν και αναλύθηκαν στο περιβάλλον ΣΓΠ. Ειδικότερα, ενσωματώθηκαν θεματικά επίπεδα που αφορούν τις υδατοκαλλιέργειες, τα Εθνικά Θαλάσσια Πάρκα, το Χωροταξικό Πλαίσιο και τα υποθαλάσσια καλώδια, καθώς αποτελούν κρίσιμες συνιστώσες χωρικού σχεδιασμού και περιβαλλοντικής προστασίας.

Παράλληλα, για μια σειρά από κριτήρια, τα οποία δεν διατίθενται σε μορφή ψηφιακών δεδομένων, χρησιμοποιήθηκαν διαθέσιμοι διαδικτυακοί χάρτες και οπτική αξιολόγηση. Σε αυτήν την κατηγορία εντάσσονται τα αεροδρόμια, τα διεθνή σύνορα, οι Ζώνες Μεταναστευτικών Διαδρομών Πτηνών, τα ναυπηγεία, τα λιμάνια, καθώς και οι τουριστικές εγκαταστάσεις (παραλίες, οικοτουριστικά κέντρα). Η επιλογή αυτής της προσέγγισης βασίστηκε στην απουσία ελεύθερων, δομημένων γεωχωρικών δεδομένων, με αποτέλεσμα η αξιολόγηση να βασιστεί στο βέλτιστο δυνατό διαθέσιμο υλικό.





Χάρτης 15: Χάρτης δεδομένων (Κλίμακα 1:4282650, Υπεράκτια εγκαταστάσεις, Κεντρικά λιμάνια, Φάροι, Υποθαλάσσια καλώδια και αγωγοί, Υποθαλάσσιες συνδέσεις, Περιοχές ανάπτυξης υδατοκαλλιεργειών)

Τέλος, ορισμένα κριτήρια, όπως οι αερομεταφορές (διάδρομοι πτήσεων και εναέριας ζώνες), δεν κατέστη δυνατό να ληφθούν υπόψη, λόγω πλήρους έλλειψης σχετικών δεδομένων σε προσβάσιμη μορφή.



Κεφάλαιο 5 Η ανάλυση ορατότητας στη χωροθέτηση υπεράκτιων αιολικών έργων

5.1 Γενικές αρχές χωρικής ανάλυσης

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιείται το εργαλείο QGIS και συγκεκριμένα η έκδοση 3.2.3. Το QGIS ξεχωρίζει για την ταχύτητα εκτέλεσης, τη σταθερότητά του και το ιδιαίτερα φιλικό περιβάλλον χρήσης, γεγονός που το καθιστά ένα από τα πλέον διαδεδομένα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ) παγκοσμίως. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα χρησιμοποιείται εκτενώς τόσο για ερευνητικούς και εκπαιδευτικούς σκοπούς, όσο και σε ιδιωτικούς και επαγγελματικούς τομείς, καλύπτοντας έτσι ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών.

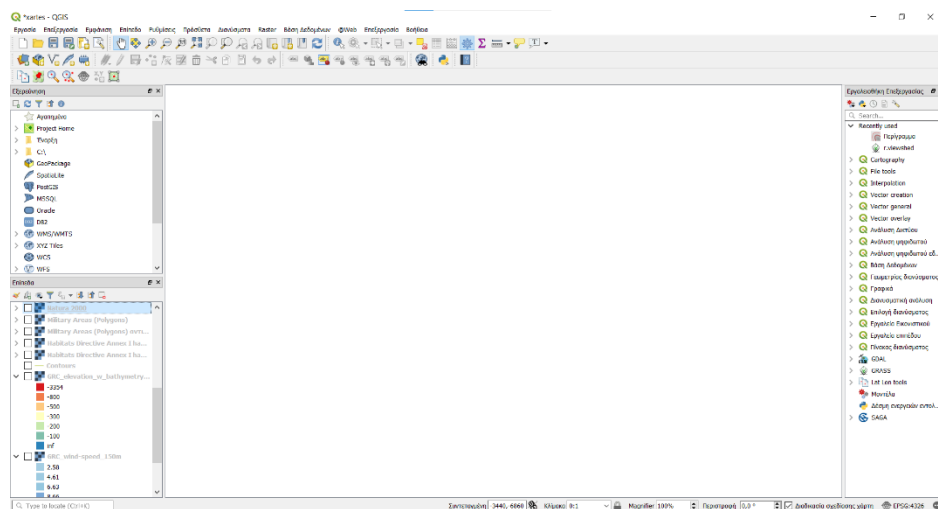
Για τις ανάγκες της παρούσας έρευνας, βασικό στάδιο αποτέλεσε η αναζήτηση και εισαγωγή Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (Digital Elevation Model – DEM) που αφορά την περιοχή της Ελλάδας. Τα ψηφιακά μοντέλα εδάφους λειτουργούν ως θεμελιώδες υπόβαθρο σε όλες τις χαρτογραφικές απεικονίσεις, καθώς στηρίζονται σε ισοϋψείς καμπύλες και αποδίδουν με ακρίβεια το ανάγλυφο του εδάφους, με παραμέτρους τριών διαστάσεων, προσφέροντας έτσι τη δυνατότητα χωρικής ανάλυσης και απεικόνισης των μορφολογικών χαρακτηριστικών μιας περιοχής.

Επιπλέον, κρίθηκε απαραίτητη η συλλογή και ενσωμάτωση δεδομένων που αφορούν στα κριτήρια αποκλεισμού αλλά και σε εκείνα της βέλτιστης χωροθέτησης, ώστε να διασφαλιστεί η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Τα δεδομένα αυτά αντλήθηκαν από διάφορες πηγές και εντοπίστηκαν σε μορφές πλήρως συμβατές με το QGIS. Στη συνέχεια, εισήχθησαν στο λογισμικό είτε με τη μορφή υπερσυνδέσεων (web services), που παρέχουν δυναμική ενημέρωση και άμεση πρόσβαση στις βάσεις δεδομένων, είτε ως στατικά αρχεία, τα οποία επιτρέπουν τη μόνιμη αποθήκευση και επεξεργασία τους.

Η διαδικασία αυτή επέτρεψε την ολοκληρωμένη αποτύπωση των χωρικών δεδομένων στο περιβάλλον του QGIS, παρέχοντας ένα ενιαίο και δομημένο πλαίσιο για την ανάλυση. Με τον τρόπο αυτό, διευκολύνεται τόσο η διερεύνηση των περιοριστικών παραμέτρων όσο και η



επιλογή των βέλτιστων τοποθεσιών, ενώ παράλληλα διασφαλίζεται η δυνατότητα συνεχούς επικαιροποίησης και περαιτέρω επεξεργασίας των δεδομένων.



Εικόνα 21: Περιβάλλον προγράμματος QGIS

Κύριο πλεονέκτημα του QGIS αποτελεί η δυνατότητα οπτικοποίησης και διαχείρισης τόσο των εισαγόμενων δεδομένων όσο και των παραγόμενων αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τις διαδικασίες ανάλυσης. Η λειτουργία αυτή διευκολύνει τον χρήστη στην άμεση κατανόηση του χωρικού περιεχομένου, αλλά και στον εντοπισμό σφαλμάτων που μπορεί να σχετίζονται με την κλίμακα, τον προσανατολισμό ή τη γεωαναφορά των δεδομένων.

Σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, όπως έργα υποδομής και μελέτες ενεργειακού σχεδιασμού, απαιτείται η αξιοποίηση δεδομένων με μακροχρόνια χρονοϊστορία. Η συλλογή πληροφοριών από έγκυρες, τεκμηριωμένες και κατά το δυνατόν διαχρονικές πηγές αποτελεί βασική προϋπόθεση, ώστε να περιοριστούν οι πιθανότητες σφαλμάτων και να αυξηθεί η ακρίβεια των υπολογισμών. Κατά συνέπεια, η ποιότητα και η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων του QGIS εξαρτώνται άμεσα από την ποιότητα των πρωτογενών δεδομένων, καθώς και την ορθότητα των παραμέτρων που εισάγονται στο σύστημα.

Το QGIS υποστηρίζει πλήθος μορφών δεδομένων, τόσο raster (πλεγματικά), όσο και vector (διανυσματικά), επιτρέποντας την εισαγωγή, επεξεργασία και εξαγωγή χωρικών πληροφοριών. Παράλληλα, παρέχει υποστήριξη για πληθώρα άλλων μορφών αρχείων (π.χ. JPEG, PDF, TIFF), γεγονός που διευκολύνει τη διαλειτουργικότητα με διαφορετικές βάσεις δεδομένων και εργαλεία ανάλυσης. Μέσω των ενσωματωμένων εργαλείων και αλγορίθμων, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εκτελεί χωρικές αναλύσεις, να πραγματοποιεί γεωαναφορά και μετατροπή συστημάτων συντεταγμένων, να παράγει στατιστικά δεδομένα και δυναμικούς χάρτες, καθώς και να αναπτύσσει μοντέλα επεξεργασίας που ενισχύουν την ακρίβεια και την τεκμηρίωση των αποτελεσμάτων.



5.2 Η χρήση εργαλείων χωρικής ανάλυσης στη χωροθέτηση έργων ΑΠΕ

Όπως συμβαίνει σε όλα τα μεγάλης κλίμακας έργα, η υλοποίηση ενός αιολικού πάρκου προϋποθέτει αυστηρό σχεδιασμό και λεπτομερή μελέτη όλων των τεχνικών δεδομένων. Όταν μάλιστα πρόκειται για νέες τεχνολογίες και καινοτόμες εφαρμογές, οι διαδικασίες σχεδιασμού και ωρίμανσης των έργων οφείλουν να είναι ακόμη πιο εξειδικευμένες.

Η πρώτη και καθοριστική φάση αφορά τον εντοπισμό της καταλληλότερης τοποθεσίας, λαμβάνοντας υπόψη όλους τους περιοριστικούς παράγοντες. Για τον σκοπό αυτό, είναι απαραίτητη η ύπαρξη αξιόπιστων και επικαιροποιημένων δεδομένων που σχετίζονται με την τοπογραφία, το φυσικό περιβάλλον, την κοινωνία και κάθε άλλη παράμετρο που μπορεί να λειτουργήσει ως κριτήριο αποκλεισμού. Η συλλογή των δεδομένων αυτών βασίζεται τόσο σε δορυφορικές παρατηρήσεις όσο και σε μετρήσεις από επίγειους σταθμούς, ανάλογα με τις ανάγκες κάθε έργου.

Στο πλαίσιο αυτό, ιδιαίτερα σημαντική είναι η αξιοποίηση των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών γνωστά και ως Geographic Information Systems (ΣΓΠ ή GIS), τα οποία έχουν γνωρίσει ραγδαία ανάπτυξη τις τελευταίες δεκαετίες. Τα συστήματα αυτά αποτελούν πλέον θεμελιώδη εργαλεία για την επιλογή θέσεων εγκατάστασης έργων υποδομής και για πληθώρα άλλων εφαρμογών, παρέχοντας τη δυνατότητα απεικόνισης και χωρικής ανάλυσης δεδομένων, συμβάλλοντας έτσι στον εντοπισμό της βέλτιστης λύσης ανά περίπτωση. Ουσιαστικά, μέσω των ΣΓΠ μπορούν να ποσοτικοποιηθούν όλοι οι παράγοντες που επηρεάζουν το εκάστοτε έργο, προσφέροντας μια αξιόπιστη μέθοδο επίλυσης σύνθετων ζητημάτων χωροθέτησης.

Στην περίπτωση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, η χρήση των ΣΓΠ είναι καθοριστική, καθώς επιτρέπουν την ενσωμάτωση περιβαλλοντικών, κοινωνικών, τοπογραφικών, ιστορικών και άλλων παραμέτρων, ώστε να τεκμηριώνεται η επιλογή της βέλτιστης θέσης εγκατάστασης. Με τον τρόπο αυτό, συνυπολογίζονται οι δυνητικές αρνητικές επιπτώσεις αλλά και η ενεργειακή απόδοση, οδηγώντας σε πιο αποδοτικά και ισορροπημένα αποτελέσματα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα ΣΓΠ δεν περιορίζονται μόνο στη χωροθέτηση, αλλά αποτελούν ολοκληρωμένα εργαλεία επεξεργασίας και ανάλυσης γεωγραφικών πληροφοριών. Περιλαμβάνουν ένα σύνολο υπολογιστικών διαδικασιών που διευκολύνουν τη συλλογή, την ανάλυση, την αναπαράσταση, την αξιολόγηση και την εξαγωγή συμπερασμάτων. Ενδεικτικά, έχει υποστηριχθεί ότι «Γεωγραφικό Πληροφοριών είναι μια οργανωμένη συλλογή μηχανικών υπολογιστικών συστημάτων (hardware), λογισμικών συστημάτων (software), χωρικών δεδομένων και ανθρώπινου δυναμικού, με σκοπό τη συλλογή, καταχώρηση, ενημέρωση, διαχείριση, ανάλυση και απόδοση, κάθε μορφής πληροφορίας που αφορά στο γεωγραφικό περιβάλλον» (Κουτσόπουλος, 2005α).

Συνολικά, τα ΣΓΠ συμβάλλουν καθοριστικά στην επίλυση περίπλοκων ζητημάτων σχεδιασμού, χωροθέτησης και επιλογής τοποθεσιών. Τα πλεονεκτήματά τους συνδέονται με τη βελτίωση μαθηματικών μοντέλων πρόβλεψης και διαχείρισης των περιβαλλοντικών συνθηκών, καθώς και με την αξιοποίηση της προόδου στην πληροφορική και στη συλλογή δεδομένων πεδίου.



5.3 Η έννοια της ανάλυσης ορατότητας

Η ανάλυση ορατότητας (visibility analysis) είναι ένα βασικό εργαλείο που χρησιμοποιείται στο χωρικό και στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό υποδομών, με στόχο την εκτίμηση του πώς και από πού γίνεται ορατό ένα έργο υποδομής. Η ανάλυση ορατότητας αποτελεί καίριο παράγοντα για την αξιολόγηση των οπτικών επιπτώσεων των έργων υποδομής στο τοπίο, τόσο ποσοτικά, όσο και ποιοτικά, μετρώντας τις περιοχές από τις οποίες ένα έργο υποδομής (π.χ. ανεμογεννήτρια, φράγμα, φωτοβολταϊκά) είναι ορατό, λαμβάνοντας υπόψη το ανάγλυφο, υψομετρικές διαφορές, ύψος του έργου και ύψος του παρατηρητή.

Το εργαλείο αυτό δημιουργεί χάρτες, οι οποίοι καλούνται Ζώνες Θεωρητικής Ορατότητας (Zones of Theoretical Visibility, ZTV – Ioannidis 2022), που δείχνουν θεωρητικά, όλες τις περιοχές από τις οποίες ένα έργο θα μπορούσε να είναι ορατό υπό ιδανικές συνθήκες, χωρίς εμπόδια όπως δέντρα, κτίρια κ.ά. με αυτόν τον τρόπο είναι χρήσιμα στο στάδιο πριν την τελική χωροθέτηση των έργων, ώστε να εντοπίζονται περιοχές υψηλού κινδύνου οπτικών επιπτώσεων και να αποφεύγονται ή να σχεδιάζονται με πιο προσεκτικό τρόπο. Όσον αφορά στα έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η ανάλυση ορατότητας χρησιμοποιείται για να συγκριθούν διαφορετικές τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ως προς την τοποθεσία και τη διάταξη κατά την οποία προκαλούν μεγαλύτερες οπτικές επιπτώσεις στο τοπίο.

Η ανάλυση ορατότητας, μπορεί να ενσωματωθεί σε μεθόδους σχεδιασμού που περιλαμβάνουν τη γνώμη των κοινοτήτων, διότι αποκαλύπτει προοπτικές που επηρεάζουν την αισθητική και την αντίληψη του τοπίου. Ταυτόχρονα, βοηθά στην κατάρτιση πολιτικών και κατευθύνσεων στο πλαίσιο των χωρικών ή περιφερειακών σχεδίων προστασίας του τοπίου. Η ανάλυση συνήθως απαιτεί να έχει ήδη καθορίσει τη θέση των υποδομών ώστε να γίνει η μελέτη, καθιστώντας τη απαραίτητο εργαλείο σε προχωρημένα στάδια σχεδιασμού. Επιπλέον, οι ZTV είναι θεωρητικές — δε λαμβάνουν πάντα υπόψη πρακτικά εμπόδια ή την αντίληψη του ανθρώπινου παρατηρητή (π.χ. πόσο έντονα διακρίνεται κάτι σε διαφορετική απόσταση, ποια είναι η οπτική αντίθεση).

Η ανάλυση ορατότητας πέρα από μία αριθμητική ή γεωμετρική μέθοδο, σχετίζεται άμεσα με την αντίληψη του τοπίου από τους ανθρώπους, με την αισθητική αξία, με την πολιτισμική ταυτότητα του χώρου. Σημαντικό αποτέλεσμα αυτής αποτελεί ο συνδυασμός αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την ανάλυση, με πρακτικές αρχιτεκτονικού σχεδιασμού, με γνώμονα τη βελτιστοποίηση των έργων υποδομής (π.χ. μορφή, υλικό, χρώμα, διαμόρφωση προσόψεων υποδομών, ενσωμάτωση στο έδαφος), και κατά συνέπεια την διευκόλυνση της κοινωνικής αποδοχής των έργων και τη μείωση των αντιδράσεων (Ioannidis 2022).

5.4 Μεθοδολογία χωροθέτησης υπεράκτιων αιολικών πάρκων

5.4.1 Γενικά

Η μεθοδολογική προσέγγιση που εφαρμόστηκε για την επιλογή και αξιολόγηση των κατάλληλων περιοχών εγκατάστασης υπεράκτιων αιολικών πάρκων στον ελλαδικό θαλάσσιο



χώρο στηρίχθηκε σε ένα σύνολο παραμέτρων και κριτηρίων. Οι βασικότερες συνιστώσες περιλαμβάνουν:

- Το ισχύον θεσμικό και νομοθετικό πλαίσιο που διέπει την ανάπτυξη υπεράκτιων αιολικών εγκαταστάσεων στην Ελλάδα.
- Τη διεθνή επιστημονική εμπειρία και τις βέλτιστες πρακτικές που έχουν αναπτυχθεί σε ευρωπαϊκό και παγκόσμιο επίπεδο.
- Τις ιδιαιτερότητες του ελληνικού θαλάσσιου περιβάλλοντος και τους χωρικούς περιορισμούς που το χαρακτηρίζουν.
- Τα αποτρεπτικά και περιοριστικά κριτήρια που σχετίζονται με την ορατότητα και την αισθητική όχληση των πάρκων.

Πρωταρχικό στάδιο της διαδικασίας αποτελεί ο σαφής καθορισμός του προβλήματος. Το στάδιο αυτό είναι καίριο, καθώς περιλαμβάνει τον προσδιορισμό του στόχου της έρευνας και την οριοθέτηση του πλαισίου της μελέτης. Η διατύπωση του προβλήματος οφείλει να είναι σαφής, αναλυτική και τεκμηριωμένη, ώστε να καταστεί δυνατή η επιλογή της καταλληλότερης μεθοδολογίας για την επίλυση του.

Στο πλαίσιο του καθορισμού του προβλήματος της χωροθέτησης των υπεράκτιων αιολικών πάρκων, παρατηρείται ότι το πρόβλημα αφορά σε δύο παραμέτρους, καθώς συμπεριλαμβάνονται ορισμένα κριτήρια τα οποία δεν επιτρέπεται να παραλειφθούν, ήτοι κριτήρια αποκλεισμού, και ορισμένα τα οποία πρόκειται να βελτιστοποιήσουν το αποτέλεσμα, κριτήρια βελτιστοποίησης.

Η διαδικασία εκπόνησης της μεθοδολογίας περιλαμβάνει τέσσερα βασικά στάδια:

1. Εισαγωγή δεδομένων. Περιλαμβάνει τον εντοπισμό, τη συλλογή και την εισαγωγή όλων των απαιτούμενων χωρικών και μη χωρικών δεδομένων, τα οποία θα αποτελέσουν τις παραμέτρους για την ανάλυση.
2. Διαχείριση δεδομένων. Τα δεδομένα οργανώνονται σε κατάλληλες βάσεις, ώστε να είναι εύκολα προσβάσιμα και επεξεργάσιμα. Συνοδεύονται από μεταδεδομένα και υπομνήματα, που διευκολύνουν την κατανόηση και την ανάκτησή τους.
3. Ανάλυση δεδομένων. Τα στοιχεία υποβάλλονται σε επεξεργασία, με στόχο την απλοποίηση και την εστίαση στις κρίσιμες παραμέτρους. Μέσα από διαδικασίες επεξεργασίας, γεωαναφοράς και χωρικής ανάλυσης, προκύπτουν χαρτογραφικές και αριθμητικές απεικονίσεις που αποδίδουν τα απαραίτητα αποτελέσματα.
4. Εξαγωγή και παρουσίαση αποτελεσμάτων. Τα τελικά αποτελέσματα αποδίδονται σε μορφή χαρτών, πινάκων και γραφημάτων, προσφέροντας σαφή εικόνα των περιοχών που πληρούν τα κριτήρια αποκλεισμού και βελτιστοποίησης.

Τελικό στάδιο αποτελεί η εξαγωγή συμπερασμάτων και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, ώστε να διαπιστωθεί αν οι στόχοι που τέθηκαν στο αρχικό στάδιο του καθορισμού του προβλήματος έχουν επιτευχθεί. Η μελέτη που εκπονήθηκε στο εργαλείο εν προκειμένω του QGIS, θεωρείται επιτυχής μόνο αν απαντώνται οι στόχοι που τέθηκαν στο πρώτο βήμα, του καθορισμού του προβλήματος.



5.4.2 Χωρική απεικόνιση κριτηρίων χωροθέτησης

Η κατάρτιση του χάρτη πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού QGIS, το οποίο αποτελεί ένα ελεύθερο και ανοικτού κώδικα Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ). Η μεθοδολογία περιλάμβανε διαδοχικά στάδια, ώστε να διασφαλιστεί η ορθότητα, η συνέπεια και η αξιοπιστία του τελικού παραδοτέου χάρτη.

Αρχικώς, πραγματοποιήθηκε ο σαφής καθορισμός του προβλήματος. Το αντικείμενο που διερευνά η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά στη χωροθέτηση υπεράκτιων αιολικών πάρκων στα ελληνικά χωρικά ύδατα, σε συνδυασμό με την εφαρμογή της ανάλυσης ορατότητας, για την πρόβλεψη και τη μείωση στο βέλτιστο δυνατό της οπτικοακουστικής όχλησης.

Συνεπώς, σε πρώτο στάδιο, απαιτείται η αναγνώριση και η χαρτογράφηση των διαθέσιμων θαλάσσιων περιοχών που πληρούν τις απαραίτητες προδιαγραφές για την εγκατάσταση αιολικών πάρκων, σύμφωνα με το ισχύον θεσμικό και νομοθετικό πλαίσιο. Στη συνέχεια, στο πλαίσιο της μεθοδολογίας, ενσωματώνονται πρόσθετοι παράγοντες που σχετίζονται με τον οπτικό αντίκτυπο. Οι παράμετροι αυτοί λειτουργούν ως περιοριστικοί και αποτρεπτικοί όροι στην αντίστροφη ανάλυση ορατότητας, ώστε να αξιολογηθεί με πληρότητα η καταλληλότητα των προτεινόμενων θέσεων εγκατάστασης. Εφόσον, λοιπόν καθορίστηκε το πρόβλημα, ξεκίνησε η διαδικασία υλοποίησης, σύμφωνα με τα τέσσερα στάδια που περιγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα.

Αρχικά πραγματοποιήθηκε συγκέντρωση όλων των απαραίτητων γεωχωρικών δεδομένων από εθνικές και ευρωπαϊκές βάσεις (π.χ. ΥΠΕΝ Geoportal, EMODnet κτλ). Τα δεδομένα ενσωματώθηκαν στο QGIS είτε μέσω απευθείας συνδέσεων WMS/WFS, είτε μέσω εισαγωγής αρχείων shapefile, raster και geoTIFF. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στην τεκμηρίωση της προέλευσης και της χρονολογίας των δεδομένων. Αντίστοιχα, προστέθηκε το «υπόβαθρο» το οποίο αποτελεί το Ψηφιακό μοντέλο εδάφους της Ελλάδας (Digital Elevation Model). Για να διασφαλιστεί η συμβατότητα των δεδομένων, έγινε αναπροβολή τους σε κοινό σύστημα συντεταγμένων. Χρησιμοποιήθηκε το ΕΓΣΑ '87 (EPSG:2100), το οποίο είναι το επίσημο εθνικό σύστημα αναφοράς για γεωχωρικές εφαρμογές στην Ελλάδα.

Τα δεδομένα οργανώθηκαν σε θεματικά επίπεδα (layers), όπως περιοχές αποκλεισμού, ζώνες περιβαλλοντικής προστασίας, υποδομές, μορφολογία βυθού, αιολικό δυναμικό. Για κάθε κατηγορία εφαρμόστηκαν διαδικασίες φιλτραρίσματος, ώστε να διατηρηθούν μόνο οι πληροφορίες που σχετίζονταν με την περιοχή μελέτης.

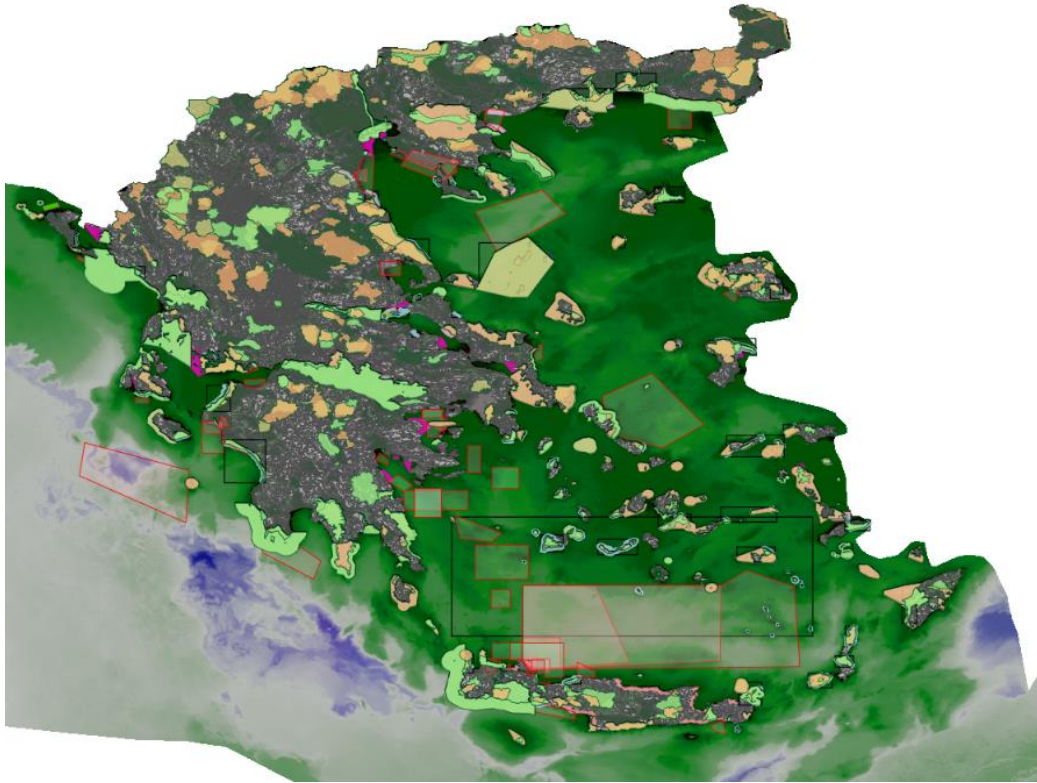
Πραγματοποιήθηκε ανάλυση με εργαλεία του QGIS (buffer, intersection, clip) για τον καθορισμό των τελικών περιοχών που πληρούν τα κριτήρια. Οι επικαλύψεις επέτρεψαν τον συνδυασμό πολλών παραμέτρων, σύμφωνα με τα κριτήρια αποκλεισμού και αντίστοιχα της αξιολόγησης.

Εφόσον εισήχθησαν στο εργαλείο QGIS όλα τα παραπάνω δεδομένα, πραγματοποιήθηκε η διαχείριση των δεδομένων, για την καλύτερη ανάλυση και κατανόηση των απεικονιζόμενων στοιχείων. Ειδικότερα, στους χάρτες του αιολικού δυναμικού και της βαθυμετρίας από τους οποίους εξαρτώνται άμεσα τα αποτελέσματα των περιοχών χωροθέτησης, πραγματοποιήθηκε επεξεργασία στην απεικόνιση των δεδομένων. Για παράδειγμα, για τις ταχύτητες ανέμου δημιουργήθηκε μία ομαλά μεταβαλλόμενη αποτύπωση των ταχυτήτων ανέμου. Αντίστοιχη επεξεργασία πραγματοποιήθηκε στο χάρτη της βαθυμετρίας.



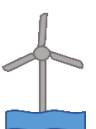
Στη συνέχεια καθορίστηκε το σύστημα συμβολισμού κάθε θεματικού επιπέδου, με χρωματική κωδικοποίηση που επιτρέπει την ευδιάκριτη απεικόνιση των χωρικών σχέσεων. Επιπλέον, εφαρμόστηκαν κατάλληλες ετικέτες και δημιουργήθηκαν κατηγοριοποιημένοι χάρτες. Όλα τα δεδομένα αναλύθηκαν με κατάλληλη ταξινόμηση κατά προτεραιότητα, ώστε να φαίνονται πρώτα τα βασικά κριτήρια αποκλεισμού και εν συνεχεία όλοι οι παράγοντες βαθμονόμησης. Ακολούθως εντάχθηκαν και τα κριτήρια που αφορούν στην ανάλυση ορατότητας (οικιστικές περιοχές, σημεία ενδιαφέροντος κτλ).

Ως αποτέλεσμα παρήχθη μία συνολική εικόνα του γενικού χάρτη.



Χάρτης 16: Συνολικός χάρτης απεικόνισης της Ελλάδας (Κλίμακα 1:41)

Στο πλαίσιο βέλτιστης κατανόησης των κριτηρίων που λήφθηκαν υπόψη κατά την παρούσα μελέτη, παρατίθεται πίνακας αποτύπωσης όλων των κριτηρίων, όπως αυτά παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο Επικυρωμένα Κριτήρια Αποκλεισμού, του παρόντος.



Πίνακας 7: Κριτήρια που λήφθηκαν υπόψη κατά την παρούσα μελέτη

A/A	Κριτήριο	Περιγραφή	Παρατηρήσεις
1	Περιοχές Εθνικής / Αμυντικής Ασφάλειας	Ζώνες που αφορούν στρατιωτικές δραστηριότητες ή εθνικούς στόχους.	Λήφθηκε Υπόψη (Πηγή: Emodnet)
2	Περιοχές Επιβατικής Ναυσιπλοΐας / Αλιείας / Υδατοκαλλιέργειας	Επιφανειακοί ή υποθαλάσσιοι διάδρομοι σημαντικοί για πλοήγηση ή αλιευτική δραστηριότητα.	Λήφθηκε Υπόψη Μερικώς (Πηγή: Emodnet) Αδυναμία διάκρισης τύπου διαδρομών ναυσιπλοΐας
3	Περιοχές Ραντάρ / Αεροπορικών Διαδρομών / Αεροδρομίων	Αποφυγή παρεμβολών ή κινδύνων σε αεροπορικές λειτουργίες.	Λήφθηκε Υπόψη Μερικώς (Πηγή: Emodnet) Αδυναμία εύρεσης δεδομένων αεροπορικών διαδρομών
4	Ελάχιστη Απόσταση από την Ακτογραμμή	Προστασία της οπτικής εικόνας σε τουριστικά ευαίσθητες ζώνες.	Λήφθηκε Υπόψη
5	Καταδυτικοί Αρχαιολογικοί Χώροι	Περιοχές με πολιτιστικά ευρήματα ή μνημεία.	Λήφθηκε Υπόψη (Πηγή: Emodnet)
6	Ζώνες Natura 2000 / Ramsar	Προστατευόμενες περιοχές βιοποικιλότητας και οικοσυστημάτων.	Λήφθηκε Υπόψη (Πηγή: ΥΠΕΝ)
7	Προστατευόμενοι Υγρότοποι	Υγρότοποι υψηλής οικολογικής αξίας.	Λήφθηκε Υπόψη (Πηγή: ΥΠΕΝ)
8	Ζώνες Μεταναστευτικών Διαδρομών	Περιοχές με πτηνά ή υδρόβια θηλαστικά σε κρίσιμες φάσεις.	Λήφθηκε Υπόψη (Πηγή: ΥΠΕΝ- Emodnet)
9	Βυθομετρικές Συνθήκες	Περιοχές με βάθη ακατάλληλα για πλωτές λύσεις.	Λήφθηκε Υπόψη (Πηγή: ΥΠΕΝ)
10	Μέσες Ταχύτητες Ανέμου	Περιοχές με ανεπαρκές αιολικό δυναμικό.	Λήφθηκε Υπόψη
11	Λιμενικές / Ναυπηγικές Υποδομές	Ανάγκη υποδομής logistics για κατασκευή/συντήρηση.	Λήφθηκε Υπόψη (Πηγή: Emodnet)
12	Συγκρούσεις με άλλες Θαλάσσιες Χρήσεις	Υδατοκαλλιέργειες, τουρισμός, αλιεία κ.ά.	Λήφθηκε Υπόψη (Πηγή: ΥΠΕΝ- Emodnet)
13	ΑΟΖ / Διπλωματικές Ζώνες	Ζώνες με περιορισμούς λόγω διακρατικών συμφωνιών.	Λήφθηκε Υπόψη Εποπτικά
14	Υποθαλάσσιες Υποδομές	Αποφυγή παρεμβολών με υφιστάμενα καλώδια/αγωγούς.	Λήφθηκε Υπόψη (Πηγή: Emodnet)
15	Σοβαρά Ρεύματα / Κυματικές Συνθήκες	Δυσχεραίνουν την εγκατάσταση και λειτουργία.	Δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα
16	Θέματα Κυκλοφορίας / Λιμενικά Σχέδια	Επιβάρυνση θαλάσσιας κυκλοφορίας.	Δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα
17	Προοπτική Ανάπτυξης Ναυτιλιακής Οικονομίας	Διασφάλιση μελλοντικών χρήσεων.	Δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα
18	Τουριστικές Εγκαταστάσεις	Αποφυγή οπτικής όχλησης σε τουριστικά κέντρα.	Λήφθηκε Υπόψη (Πηγή: Emodnet)
19	Περιβαλλοντικοί Μετριάσμοι	Απαιτούνται αυστηρά μέτρα.	Λήφθηκε Υπόψη Εποπτικά
20	Άλλες Χρήσεις	Αποκλεισμός περιοχών με μη αναστρέψιμες συγκρούσεις χρήσης.	Λήφθηκε Υπόψη Μερικώς (Πηγή: Emodnet) Για χρήσεις που υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα



Κεφάλαιο 6 Εφαρμογή στην περιοχή της Κρήτης

6.1 Επιλογή ευρύτερης περιοχής ενδιαφέροντος

Η Ελλάδα, έχοντας κύριο και κατ' εξοχή χαρακτηριστικό της το υγρό στοιχείο αλλά και τα αναπτυγμένα νησιά, ενδείκνυται για την ανάπτυξη υπεράκτιων αιολικών πάρκων. Περιοχές όπως το ΒΑ Αιγαίο, το νότιο με τα Δωδεκάνησα και την Κρήτη, αλλά και το Ιόνιο, εμφανίζουν πλήθος σημαντικών ευνοϊκών παραγόντων ανάπτυξης εν λόγω έργων.

Ιδιαίτερα σημαντική είναι η οριοθέτηση των αποδεκτών ζωνών επέμβασης, όπως αυτές ανακοινώθηκαν από την Ελληνική Διαχειριστική Εταιρεία Υδρογονανθράκων και Ενεργειακών Πόρων Α.Ε (ΕΔΕΥΕΠ), στο πλαίσιο σύνταξης του Εθνικού Προγράμματος Ανάπτυξης Υπεράκτιων Αιολικών Πάρκων. Όπως αναφέρθηκε ανωτέρω τις δοθείσες προς επένδυση περιοχές αποτελούν:

- Ιόνιο Πέλαγος
- Κεντρικό Αιγαίο
- Άξονας Εύβοιας-Χίου
- Νότια Ρόδος
- Ανατολική Κρήτη

Καθώς η συγκεκριμένη μελέτη, ταυτίζεται χρονικά με μία περίοδο, στην οποία οι συζητήσεις των επενδυτών, των μελετητών και του Υπουργείου, ολοένα και διογκώνονται, δίχως να έχουν πραγματοποιηθεί πρακτικές ενέργειες, θα πρέπει να συνυπολογιστεί και ο παράγοντας της κοινής γνώμης.

Από τις περιοχές που καθορίζονται ανωτέρω και στο πλαίσιο ενός πιλοτικού έργου, προτείνεται να γίνει επένδυση σε μία περιοχή η οποία θα έχει επαρκή εμπειρία με έργα ΑΠΕ, αλλά και κατάλληλες υποδομές που θα μπορέσουν να υποστηρίξουν την επένδυση. Σε κάθε περίπτωση και σε μελλοντικό χρόνο θα χρειαστεί να δημιουργηθούν και να κατασκευαστούν πολλά έργα υποδομών, διαχείρισης και λειτουργίας, τα οποία ωστόσο είναι ιδιαιτέρως δύσκολο να χρηματοδοτηθούν στο πλαίσιο ενός καινοτόμου ή πιλοτικού προγράμματος.

Ο χάρτης του ανεμολογικού δυναμικού αποτυπώνει την ισχυρή αιολική δραστηριότητα της Κρήτης, ιδιαίτερα κατά μήκος των ακτών, υπογραμμίζοντας τη σημαντική δυνατότητα αξιοποίησης του αιολικού δυναμικού ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας.

Παρά τον αρχικό αποκλεισμό ορισμένων ζωνών λόγω πολιτιστικών και οικολογικών ευαισθησιών—όπως της Κάτω Ζάκρου και της Σπιναλόγκας— κατόπιν κατοχύρωσης επαρκούς απόστασης από καίριους αρχαιολογικούς χώρους, επανεντάχθηκε στο Εθνικό Πρόγραμμα.

Τέλος, και συνυπολογίζοντας τα υπόλοιπα κριτήρια της έρευνας παρατηρείται ότι στην Κρήτη υπάρχουν αρκετές «ελεύθερες» εκτάσεις, από τους περιορισμούς των στρατιωτικών ασκήσεων, των προστατευόμενων περιοχών Natura 2000 και των γραμμών ναυσιπλοΐας.

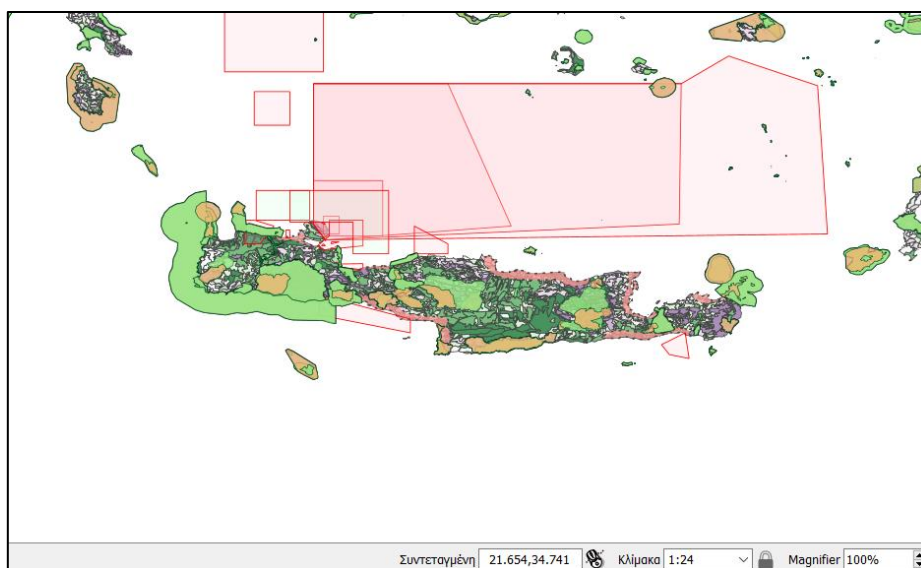




Χάρτης 17: Δορυφορική απεικόνιση της Κρήτης (Πηγή: Google Earth)

6.2 Χωροθέτηση έργου

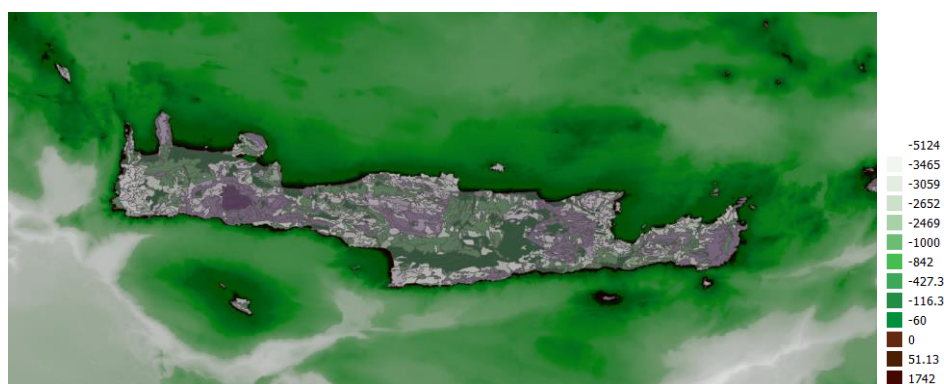
Πρώτο βήμα στην επιλογή μελέτης αποτελεί η απόρριψη των απαγορευμένων περιοχών επέμβασης, όπως είναι οι προστατευόμενες περιοχές και οι περιοχές των στρατιωτικών ασκήσεων. Η γεωγραφική θέση της Κρήτης προσφέρει σημαντικές δυνατότητες για την ανάπτυξη υπεράκτιων αιολικών πάρκων, ωστόσο η επιλογή της κατάλληλης περιοχής χωροθέτησης απαιτεί συνδυαστική αξιολόγηση περιβαλλοντικών, τεχνικών και στρατηγικών παραμέτρων.



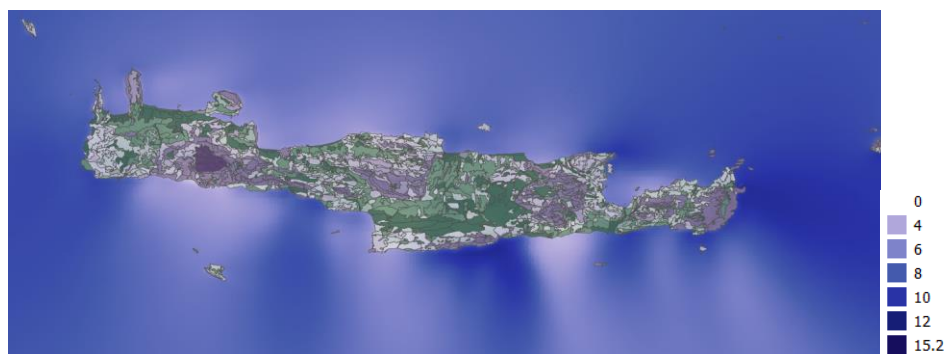
Χάρτης 18: Απαγορευμένες περιοχές επέμβασης στην Κρήτη (Με κόκκινο περίγραμμα αποτυπώνονται οι περιοχές στρατιωτικών ασκήσεων, Με πορτοκαλί και πράσινες "κηλίδες" αποτυπώνονται οι προστατευόμενες περιοχές του δικτύου Natura)



Στη βόρεια πλευρά του νησιού, παρά την ύπαρξη ισχυρού και σταθερού αιολικού δυναμικού, εντοπίζονται σοβαροί περιορισμοί που σχετίζονται με τη στρατιωτική δραστηριότητα (συχνές ασκήσεις και ζώνες ασφάλειας), την έντονη ναυσιπλοΐα που διέρχεται από το Αιγαίο, αλλά και την παρουσία εκτεταμένων περιοχών Natura 2000, οι οποίες αυξάνουν τις περιβαλλοντικές δεσμεύσεις. Στη νότια ακτογραμμή, το αιολικό δυναμικό παραμένει αξιοποιήσιμο, ωστόσο τα απότομα αυξανόμενα βάθη του Λιβυκού πελάγους καθιστούν τεχνικά δυσκολότερη και οικονομικά πιο απαιτητική την εγκατάσταση ανεμογεννητριών, περιορίζοντας έτσι την καταλληλότητα της περιοχής. Αντιθέτως, η ανατολική Κρήτη εμφανίζει πιο ευνοϊκές συνθήκες, καθώς συνδυάζει επαρκές αιολικό δυναμικό με σχετικά ηπιότερους περιορισμούς σε ναυσιπλοΐα και στρατιωτικές ζώνες, ενώ τα βάθη παραμένουν ομαλά μεταβαλλόμενα και συνεπώς ιδανικά για την εφαρμογή σύγχρονων τεχνολογιών πλωτών ανεμογεννητριών. Συνεπώς, η ανατολική ακτογραμμή αναδεικνύεται ως η πλέον κατάλληλη ζώνη χωροθέτησης υπεράκτιου αιολικού πάρκου για την Κρήτη, ισορροπώντας τεχνική εφικτότητα, ενεργειακή απόδοση και περιβαλλοντική συμβατότητα.



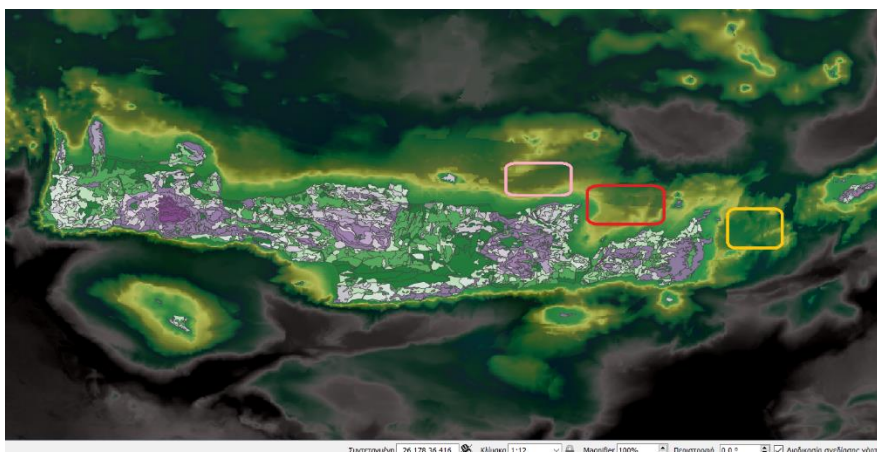
Χάρτης 19: Χάρτης Βαθυμετρίας στην περιοχή της Κρήτης (Κλίμακα: 1:12, Βάθη σε m)



Χάρτης 20: Χάρτης Ανεμολογικού δυναμικού Κρήτης (Κλίμακα: 1:12, Ταχύτητα σε m/s)

Συνδυάζοντας όλα τα παραπάνω δεδομένα και θέτοντας ως κύριο γνώμονα την πρόταση πλωτού αιολικού πάρκου και όχι σταθερής έδρασης, αξιοποιώντας βαθυμετρία άνω των 200 m, προκύπτουν περιοχές βορειανατολικά του Αγίου Νικόλαου και της Σητείας, ανατολικά του Ζάκρου και του Ξηρόκαμπου Λασιθίου αλλά και βορειανατολικά των Μάλιων. Εκ των τριών, η περιοχή της Σητείας και αυτή στα Μάλια, κρίνονται πιο τουριστικές, ενώ συμπληρωματικό παράγοντα αποτελεί το σημαντικό αιολικό δυναμικό που παρουσιάζεται στα ανατολικά του Ζάκρου, μεταξύ Κρήτης και Κάσου.





Χάρτης 21: Χάρτης σύγκρισης περιοχών μελέτης (Με ροζ πλαίσιο αποτυπώνεται η περιοχή βορειανατολικά απ' τα Μάλια, με κόκκινο η περιοχή βορειανατολικά από τον Άγιο Νικόλαο και τη Σητεία και με κίτρινο η περιοχή ανατολικά του Ζάκρου)

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω, επιλέγεται η περιοχή ανατολικά του Ζάκρου, μεταξύ Κρήτης και Κάσου. Η φυσιογνωμία της περιοχής αποτελείται από έντονη μορφολογική αντίθεση με παρθένες κοιλάδες με σκιασμένες πηγές και πλαταμώνες, συνδυασμένες με τραχείς λοφίσκους. Στην περιοχή υπάρχει και το γνωστό Φαράγγι των Νεκρών, με απότομες χαράδρες, απόκρημνες πλαγιές και μονοπάτια και το φοινικόδασος του Βάι. Αναλογικά με την έκταση που καταλαμβάνουν οι περιοχές, η κινητικότητα και η αστικοποίηση και η πολεοδομική ανάπτυξη, δεν εντοπίζονται, αποτελώντας ακόμα έναν καίριο παράγοντα επιλογής της περιοχής.

6.3 Διαμόρφωση υπεράκτιου πάρκου και βασικά τεχνικά μεγέθη

Η περιοχή μελέτης οριοθετήθηκε με τη δημιουργία πολυγώνου, το οποίο σχηματίστηκε με βάση τα διαθέσιμα χωρικά δεδομένα βαθυμετρίας. Συγκεκριμένα, καθορίστηκαν τα όρια που αντιστοιχούν στο εύρος θαλάσσιου βάθους περίπου 300–800 μέτρων, καθώς αυτή η ζώνη θεωρείται καταλληλότερη για την ανάπτυξη πλωτών αιολικών εγκαταστάσεων, σύμφωνα με τα τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών, όπως αυτά αναλύθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο. Το πολύγωνο αυτό αποτέλεσε την τελική γεωγραφική ενότητα ανάλυσης, στην οποία πραγματοποιήθηκαν όλα τα επόμενα στάδια της μελέτης.

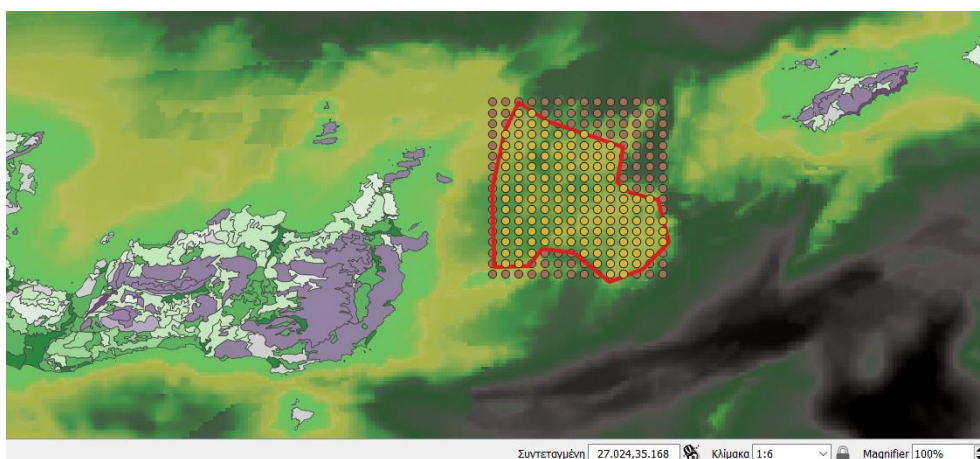
Εντός του πολυγώνου δημιουργήθηκε κάνναβος που κάλυπτε το σύνολο της έκτασης. Ο κάνναβος κατασκευάστηκε στο περιβάλλον Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ) με σημεία που θα ισαπέχουν μεταξύ τους απόσταση που θα αποτελεί μία εύλογη παραδοχή της απόστασης μεταξύ των ανεμογεννητριών.

Για την εκτίμηση της διάταξης των ανεμογεννητριών χρησιμοποιήθηκε η παραδοχή ελάχιστης απόστασης 7D (επτά φορές η διάμετρος του ρότορα), όπως συνήθως συστήνεται στη διεθνή βιβλιογραφία για την αποφυγή απωλειών από τη σκίαση και τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης.



Με δεδομένη την εκτιμώμενη διάμετρο ρότορα στα 240 m, η ελάχιστη απόσταση μεταξύ δύο ανεμογεννητριών υπολογίζεται σε περίπου 1,7 km. Η παράμετρος αυτή αποτέλεσε καθοριστικό κριτήριο για την τελική τοποθέτηση των υποψήφιων θέσεων εντός του πολυγώνου μελέτης, ώστε να διασφαλίζεται τόσο η τεχνική αρτιότητα του αιολικού πάρκου όσο και η δυνατότητα μελλοντικής επέκτασης.

Από τον αρχικό κάνναβο που δημιουργήθηκε, επιλέχθηκαν αποκλειστικά τα σημεία τα οποία βρίσκονταν εντός του πολυγώνου μελέτης. Η διαδικασία αυτή εξασφάλισε ότι τα σημεία παρατήρησης ανταποκρίνονται γεωγραφικά στη χωρική ενότητα ενδιαφέροντος και δεν περιλαμβάνουν εξωτερικές ή μη σχετικές περιοχές. Οπότε συνολικά υπολογίστηκαν 138 σημεία, τα οποία αντιστοιχούν στις ανεμογεννήτριες του πάρκου.



Εικόνα 22: Χάρτης απεικόνισης πολυγώνου επιλογής και κανάβου

Η χρήση των εσωτερικών σημείων βελτίωσε την ακρίβεια της ανάλυσης, αποφεύγοντας την εισαγωγή δεδομένων εκτός των πραγματικών ορίων μελέτης, ενώ ταυτόχρονα δημιουργεί μια αντιπροσωπευτική δειγματοληψία, που επιτρέπει την ομοιόμορφη εξέταση του οπτικού αποτυπώματος σε όλη την έκταση του πολυγώνου.

Τα εσωτερικά σημεία αποτέλεσαν στη συνέχεια την είσοδο στη διαδικασία υπολογισμού της ορατότητας, παρέχοντας τις χωρικές συντεταγμένες για τον καθορισμό των πιθανών ζωνών οπτικής επαφής με τις ανεμογεννήτριες.

Για την εκτέλεση της ανάλυσης έγιναν ορισμένες βασικές παραδοχές που αφορούν τα τεχνικά χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών αλλά και τις συνθήκες παρατήρησης. Οι βασικές θεωρήσεις αποτελούν τα ύψη θέασης (το ύψος του παρατηρητή) αλλά και το ύψος της προβολής (το ύψος της ανεμογεννήτριας), με αρκετά δυσμενείς συνθήκες για τα βέλτιστα δυνατά αποτελέσματα.

Εν προκειμένω το ύψος της ανεμογεννήτριας: ορίστηκε στα 300 m, τιμή που αντιστοιχεί σε σύγχρονα πρότυπα υπεράκτιων ανεμογεννητριών μεγάλης κλίμακας. Η διάμετρος του ρότορα εκτιμήθηκε στα 240 m, γεγονός που επηρεάζει άμεσα τόσο την ενεργειακή απόδοση όσο και το οπτικό αποτύπωμα των εγκαταστάσεων.

Αντίστοιχα, το ύψος παρατηρητή ορίστηκε στα 1,70 m, το οποίο αντιπροσωπεύει τον μέσο όρο ύψους ενήλικου ανθρώπου σε όρθια θέση. Η παραδοχή αυτή εξασφαλίζει ότι τα αποτελέσματα της ορατότητας θα είναι συγκρίσιμα με την εμπειρία ενός τυπικού παρατηρητή από την ακτογραμμή.



Η ενσωμάτωση αυτών των παραδοχών στο μοντέλο κρίθηκε απαραίτητη, ώστε οι υπολογισμοί να προσομοιώνουν με ρεαλιστικό τρόπο τις συνθήκες παρατήρησης και να παρέχουν αξιόπιστη εικόνα για το εύρος της οπτικής όχλησης που ενδέχεται να προκληθεί από την εγκατάσταση ανεμογεννητριών στην περιοχή.

Τέλος, σημειώνεται ότι και παρόλο που το Παρόλο που το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM) παρέχει τρισδιάστατη αναπαράσταση της μορφολογίας της περιοχής, κρίθηκε απαραίτητο να ληφθεί υπόψη και η καμπυλότητα της γης. Η ενσωμάτωση αυτής της παραμέτρου στο μοντέλο αυξάνει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, δεδομένου ότι σε αποστάσεις αρκετών χιλιομέτρων η καμπυλότητα μπορεί να επηρεάσει ουσιαστικά την οπτική γραμμή μεταξύ παρατηρητή και ανεμογεννήτριας.

Συγκεκριμένα, σε γεωγραφικά πλάτη αντίστοιχα με της Κρήτης ($\sim 35^\circ$ N), η καμπυλότητα της γης οδηγεί σε απώλεια ορατότητας περίπου 7,8 m ανά 10 km απόστασης. Αυτό σημαίνει ότι σε αποστάσεις της τάξης των 20–30 km, η κορυφή του αντικειμένου μπορεί να αποκρύπτεται κατά δεκάδες μέτρα, εάν δεν ληφθεί υπόψη η καμπυλότητα. Η παράμετρος αυτή, σε συνδυασμό με την ατμοσφαιρική διάθλαση, η οποία μερικώς αντισταθμίζει το φαινόμενο, διασφαλίζει ότι τα αποτελέσματα της ανάλυσης αντανακλούν με μεγαλύτερη ακρίβεια τις πραγματικές συνθήκες παρατήρησης.

6.4 Ανάλυση ορατότητας

6.4.1 Μεθοδολογία ανάλυσης ορατότητας

Η εκτίμηση της οπτικής όχλησης από την εγκατάσταση ανεμογεννητριών στην Ανατολική Κρήτη πραγματοποιήθηκε μέσω της μεθόδου ανάλυσης ορατότητας (viewshed analysis). Η συγκεκριμένη μέθοδος επιτρέπει τον υπολογισμό των τμημάτων της περιοχής από τα οποία είναι δυνατή η οπτική επαφή με ένα συγκεκριμένο αντικείμενο, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τη γεωμορφολογία του εδάφους όσο και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αντικειμένου και του παρατηρητή.

Στην παρούσα μελέτη, το εργαλείο εφαρμόστηκε με τη χρήση του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (DEM) της περιοχής, των σημείων παρατήρησης που προέκυψαν από τον κάνναβο, καθώς και των σημείων τοποθέτησης των ανεμογεννητριών εντός του πολυγώνου μελέτης. Για κάθε σημείο παρατήρησης εξετάστηκε αν υπάρχει απρόσκοπτη γραμμή θέασης προς τις θέσεις των ανεμογεννητριών, με δεδομένο ύψος παρατηρητή τα 1,70 m και ύψος στόχου τα 300 m, αντιπροσωπευτικά των τεχνικών χαρακτηριστικών σύγχρονων υπεράκτιων ανεμογεννητριών, αλλά και όλες οι παραδοχές που αναφέρονται παραπάνω.

Η διαδικασία οδήγησε στη δημιουργία θεματικών επιπέδων ορατότητας, τα οποία απεικονίζουν αφενός τα τμήματα της περιοχής από τα οποία οι ανεμογεννήτριες είναι ορατές και αφετέρου τον αριθμό των ανεμογεννητριών που γίνονται ορατές από κάθε σημείο. Τα παραγόμενα αυτά επίπεδα δεν περιορίστηκαν σε απλή δυαδική αναπαράσταση (ορατό / μη ορατό), αλλά παρείχαν και πολυτιμότερες πληροφορίες σχετικά με την ένταση της οπτικής όχλησης, καθώς η ορατότητα πολλαπλών ανεμογεννητριών από το ίδιο σημείο ενισχύει την οπτική επιβάρυνση.



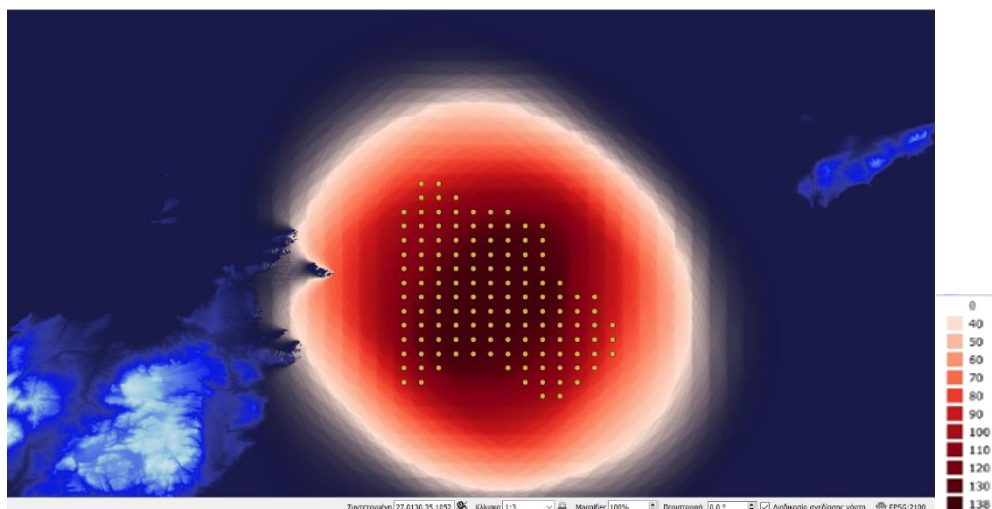
Τα αποτελέσματα αποτέλεσαν τη βάση για τον υπολογισμό ποσοτικών δεικτών ορατότητας και την ερμηνεία της χωρικής κατανομής της όχλησης. Η σύνδεση των χαρτογραφικών επιπέδων με τις χρήσεις γης και την παρουσία οικισμών στην Ανατολική Κρήτη επέτρεψε μια ολοκληρωμένη αποτίμηση της επίδρασης που μπορεί να έχει η ανάπτυξη του υπεράκτιου οιολικού πάρκου στο τοπίο και στην εμπειρία του παρατηρητή.

Για τη διερεύνηση του δυσμενέστερου δυνατού σεναρίου, το μοντέλο εκτελέστηκε με τρεις διαφορετικές παραμέτρους μέγιστης απόστασης ορατότητας, διατηρώντας σταθερές όλες τις υπόλοιπες παραδοχές σχετικά με το ύψος των ανεμογεννητριών, τη διάμετρο του ρότορα και το ύψος του παρατηρητή. Με τον τρόπο αυτό εξετάστηκαν εναλλακτικά σενάρια οπτικής όχλησης σε διαφορετικές κλίμακες απόστασης, ώστε να αποτιμηθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια το εύρος της πιθανής οπτικής επιβάρυνσης στο τοπίο.

Η διαδικασία οδήγησε στη δημιουργία θεματικών επιπέδων ορατότητας, τα οποία καταγράφουν τόσο τις περιοχές όπου οι ανεμογεννήτριες είναι ορατές όσο και τον αριθμό αυτών που καθίστανται ορατές από κάθε σημείο. Τα αποτελέσματα αυτά αποτέλεσαν τη βάση για τον υπολογισμό δεικτών ορατότητας και την εκτίμηση των χωρικών διαφοροποιήσεων στην ένταση της οπτικής όχλησης. Τα αποτελέσματα κρίνονται «αποδεκτά» όταν δεν εμφανίζεται σημαντική όχληση σε αστικά κέντρα της Κρήτης ή/και οικισμούς.

6.4.2 Σενάριο 1: Μέγιστη απόσταση ορατότητας 20 km

Στο πρώτο σενάριο, με μέγιστη απόσταση ορατότητας τα 20 km, το αποτέλεσμα καταγράφει περιορισμένη χωρική εξάπλωση της οπτικής όχλησης, η οποία παραμένει συγκεντρωμένη στον άμεσο θαλάσσιο χώρο γύρω από το πολύγωνο εγκατάστασης. Η περιοχή υψηλής ορατότητας περιβάλλει τον κάρναβο των σημείων, αλλά δεν εκτείνεται μέχρι την παράκτια ζώνη της Ανατολικής Κρήτης, ούτε μέχρι κατοικημένους οικισμούς ή άλλα σημαντικά σημεία ενδιαφέροντος.



Εικόνα 23: Απεικόνιση αποτελεσμάτων με απόσταση ορατότητας 20 km (Μονάδα μέτρησης: Μονάδες ορατών ανεμογεννητριών)



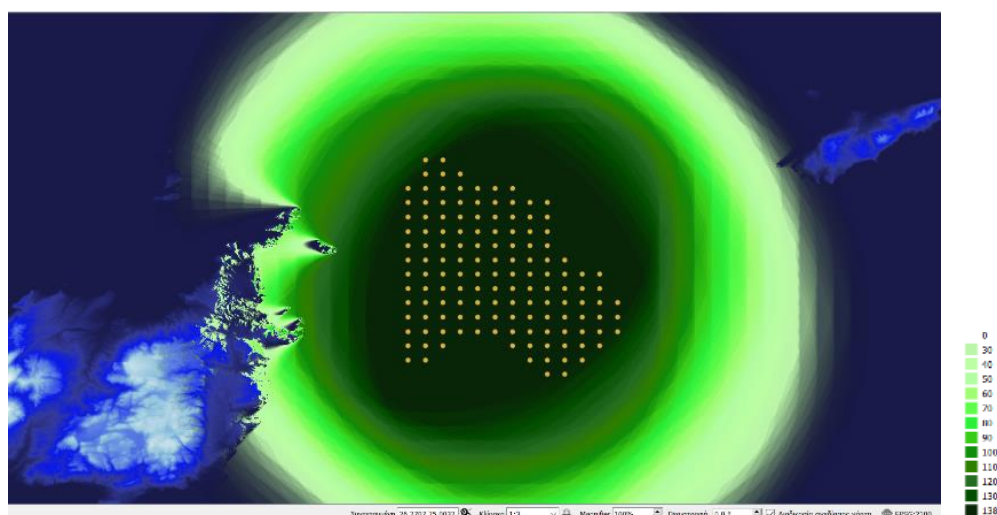
Αυτό σημαίνει ότι σε απόσταση έως 20 χιλιομέτρων η πιθανότητα να είναι ορατές οι ανεμογεννήτριες από τη στεριά είναι περιορισμένη, με την οπτική επίδραση να αφορά κυρίως θαλάσσιες εκτάσεις. Οι αποχρώσεις του κόκκινου χρώματος υποδηλώνουν ότι από το μεγαλύτερο αν όχι όλη την παράκτια ζώνη, δε θα είναι δυνατή η θέαση οποιουδήποτε σημείου του αιολικού πάρκου. Ειδικότερα, το μόνο προσβάσιμο από στεριάς σημείο που δύναται να έχει οπτική επαφή με ορισμένες ανεμογεννήτριες είναι το ανατολικό άκρο της Κρήτης. Στο συγκεκριμένο σημείο της Κρήτης, χωροθετούνται ελάχιστες παραλίες ενώ ο πλησιέστερος οικισμός απέχει περίπου 17 km.

Το σενάριο κρίνεται αποδεκτό, οπότε και δεν προτείνεται κάποια διορθωτική παρέμβαση.

6.4.3 Σενάριο 2: Μέγιστη απόσταση ορατότητας 30 km

6.4.3.1 Αποτελέσματα ανάλυσης

Στο δεύτερο σενάριο, με μέγιστη απόσταση ορατότητας τα 30 km, η εξάπλωση της ζώνης ορατότητας διευρύνεται σημαντικά σε σχέση με το προηγούμενο σενάριο των 20 km. Το αποτέλεσμα δείχνει ότι οι ανεμογεννήτριες καθίστανται πλέον ορατές και από τμήματα της παράκτιας ζώνης της Ανατολικής Κρήτης, κυρίως γύρω από το ακρωτήριο Σίδερο και τις περιοχές Ζάκρου και Ξηρόκαμπου. Ωστόσο, η ορατότητα παραμένει σε γενικές γραμμές περιορισμένη στις βόρειες και ανατολικές ακτές, χωρίς να επεκτείνεται προς την ενδοχώρα ή προς περισσότερο κατοικημένα τμήματα του νησιού. Αυτό σημαίνει ότι σε αποστάσεις της τάξης των 30 χιλιομέτρων, η πιθανότητα οπτικής επαφής με το αιολικό πάρκο αυξάνεται, αλλά εξακολουθεί να περιορίζεται σε συγκεκριμένα παράκτια σημεία και να μην επιδρά σε ευρύτερες ζώνες με έντονη ανθρώπινη δραστηριότητα.



Εικόνα 24: Απεικόνιση αποτελεσμάτων με απόσταση ορατότητας 30 km (Μονάδα μέτρησης: Μονάδες ορατότητας ανεμογεννητριών)

Δεδομένου ότι οι περιοχές του Ξηρόκαμπου και της Ζάκρου αποτελούν παραθεριστικές και τουριστικές ζώνες με ιδιαίτερη σημασία για την τοπική ανάπτυξη, κρίθηκε σκόπιμο να εξεταστεί και ένα εναλλακτικό σενάριο χωροθέτησης. Στο σενάριο αυτό προβλέπεται η



αφαίρεση μίας και κατά τόπους δύο σειρών ανεμογεννητριών από τον κάνναβο της αρχικής διάταξης, με στόχο να περιοριστεί η οπτική όχληση που γίνεται αντιληπτή από τις παραλιακές ζώνες και τους βασικούς οικισμούς. Η διαφοροποίηση αυτή δεν αλλοιώνει δραστικά τη λειτουργικότητα του αιολικού πάρκου, ωστόσο προσφέρει μία πιο ισορροπημένη προσέγγιση μεταξύ της ενεργειακής αξιοποίησης και της προστασίας της τουριστικής φυσιογνωμίας της Ανατολικής Κρήτης.

6.4.3.2 Διορθωτικές παρεμβάσεις

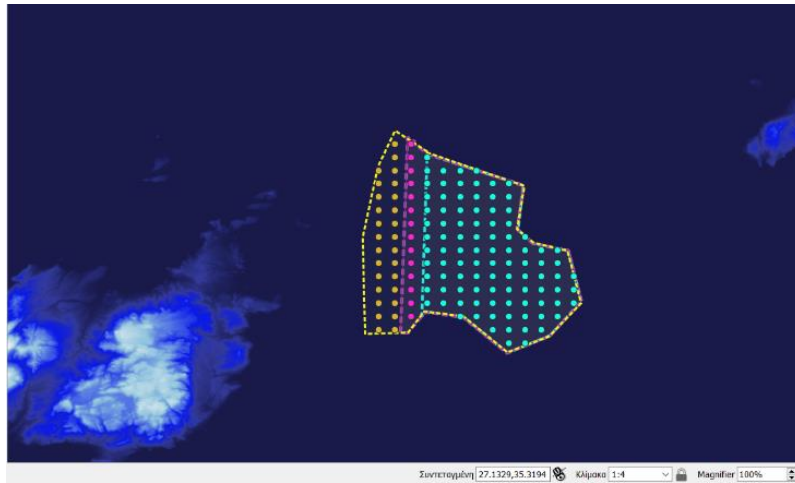
Στο πλαίσιο της ανάλυσης εξετάστηκε εναλλακτικό σενάριο μείωσης του συνολικού αριθμού ανεμογεννητριών από 138 σε 110 (μείωση κατά 28 στοιχεία). Η διαφοροποίηση αυτή υλοποιήθηκε με την αφαίρεση κατά τόπους δύο σειρών ανεμογεννητριών στην ανατολική πλευρά του πολυγώνου, η οποία αποτελεί και τη δυσμενέστερη συνθήκη, όντας πλησιέστερη στην ακτή. Αποκλειστικό στόχο αποτελεί ο περιορισμός της πιθανής οπτικής όχλησης προς τις παραθεριστικές και τουριστικές ζώνες του Ξηροκάμπου και της Ζάκρου.

Η ανάλυση ορατότητας εκτελέστηκε με τις ίδιες παραδοχές, προκειμένου να διασφαλιστεί η ορθή σύγκριση των αποτελεσμάτων με το αρχικό σενάριο. Η σύγκριση των δύο εκδοχών κατέδειξε ότι η μείωση του αριθμού ανεμογεννητριών δεν επιφέρει ουσιαστική διαφοροποίηση στην έκταση του ορατού πεδίου. Η χωρική κατανομή του παραμένει σε γενικές γραμμές σταθερή, με μικρές αποκλίσεις στην ένταση της ορατότητας, οι οποίες δεν επηρεάζουν τα κύρια μορφολογικά και τοπολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης.

Για λόγους ερευνητικής πληρότητας κρίθηκε σκόπιμο να εκτελεστεί και δεύτερο εναλλακτικό σενάριο, το οποίο προβλέπει περαιτέρω μείωση κατά μία επιπλέον σειρά ανεμογεννητριών, ώστε να αξιολογηθεί σε μεγαλύτερο βάθος η πιθανή διαφοροποίηση της οπτικής επίδρασης.

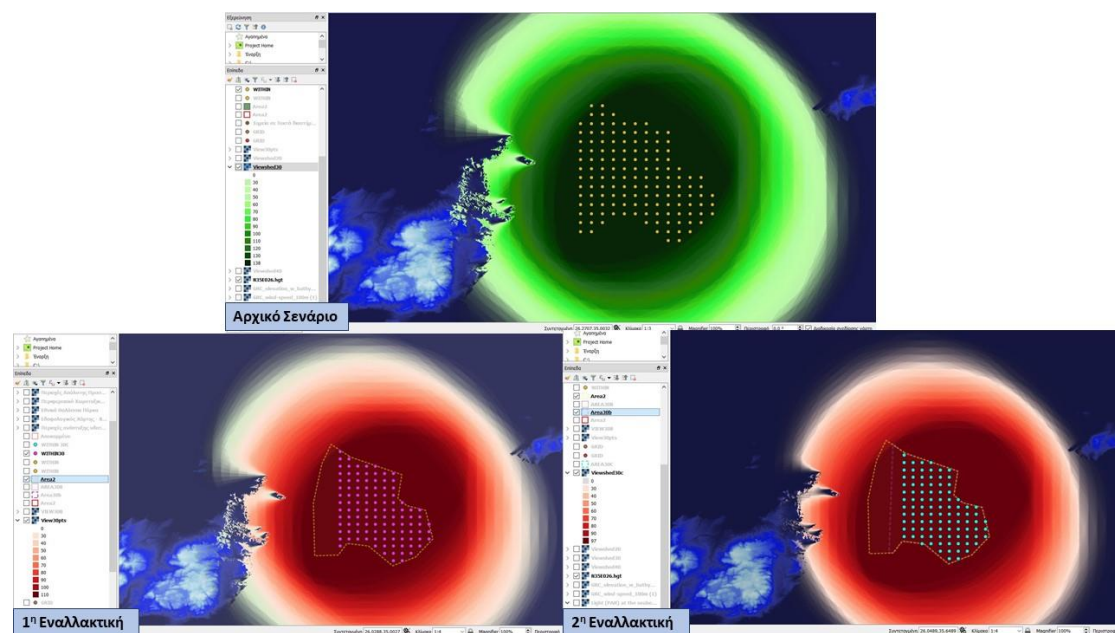
Στο πλαίσιο της ανάλυσης εξετάστηκε και δεύτερο εναλλακτικό σενάριο, το οποίο περιλαμβάνει περαιτέρω μείωση μίας ακόμη σειράς ανεμογεννητριών στην ανατολική πλευρά του πολυγώνου. Η διαμόρφωση αυτή διαφοροποιείται από το αρχικό σενάριο και το πρώτο εναλλακτικό, καθώς οδηγεί σε αισθητή μείωση του αριθμού των μονάδων. Ειδικότερα, η προσαρμογή αυτή οδήγησε σε συνολικό αριθμό 97 ανεμογεννητριών, διαφοροποιούμενο σημαντικά από το αρχικό σενάριο των 138, καθώς και από το πρώτο εναλλακτικό με 110. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν μια πιο περιορισμένη ζώνη ορατότητας, η οποία αφορά κυρίως τις παράκτιες περιοχές, οι οποίες όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, αποτελούν περιοχές τουριστικού ενδιαφέροντος και πιο συγκριμένα παραλίες.





Εικόνα 25: Απεικόνιση εναλλακτικών σεναρίων (Με κίτρινο περίγραμμα εμφανίζεται η περιοχή μελέτης, με ροζ η 1η εναλλακτική με μείωση 28 ανεμογεννητριών, με γαλάζιο η 2^η εναλλακτική μειωμένη εκ νέου κατά 13 ανεμογεννήτριες)

Σε σύγκριση με το αρχικό σενάριο, όπου η ορατότητα εκτείνεται σε σημαντικά τμήματα του θαλάσσιου και παράκτιου χώρου, το πρώτο εναλλακτικό σενάριο παρουσιάζει μερικό περιορισμό της, χωρίς όμως ουσιαστική διαφοροποίηση για τις παράκτιες ζώνες. Το δεύτερο εναλλακτικό σενάριο, αντίθετα, επιφέρει μεγαλύτερη μείωση της ορατότητας, με αποτέλεσμα λιγότερο εμφανή παρουσία του αιολικού πάρκου από συγκεκριμένα τμήματα των παραλίων.



Εικόνα 26: Απεικόνιση αποτελεσμάτων των τριών σεναρίων (Μονάδα μέτρησης: Μονάδες ορατών ανεμογεννητριών)

Συνεπώς, η αξιολόγηση δείχνει ότι η μείωση του αριθμού ανεμογεννητριών επιδρά περισσότερο στο λειτουργικό μέγεθος και την ενεργειακή δυναμικότητα του πάρκου, παρά στο οπτικό του αποτύπωμα. Από ερευνητική σκοπιά, τα εναλλακτικά σενάρια προσφέρουν χρήσιμη βάση σύγκρισης και τεκμηρίωσης, επιβεβαιώνοντας ότι η επιλογή χωροθέτησης αποτελεί τον ισάξιο παράγοντα διαμόρφωσης της οπτικής όχλησης, με αυτόν του πλήθους των ανεμογεννητριών.



6.4.4 Σενάριο 3: Μέγιστη απόσταση ορατότητας 40 km

6.4.4.1 Αποτελέσματα ανάλυσης

Στο τρίτο σενάριο, με μέγιστη απόσταση ορατότητας τα 40 km, η χωρική εξάπλωση της ορατότητας αυξάνεται αισθητά σε σχέση με τα προηγούμενα σενάρια των 20 και 30 km. Η οπτική επίδραση καλύπτει πλέον μεγαλύτερο τμήμα της ανατολικής Κρήτης, επηρεάζοντας τόσο τα βόρεια όσο και τα νότια παράλια, ενώ οι υψηλές τιμές ορατότητας καταγράφονται κυρίως στις περιοχές με ανοιχτό ορίζοντα προς το ανατολικότερο τμήμα του νησιού.

Η ανάλυση της ορατότητας σε απόσταση 40 km αναδεικνύει σημαντική αύξηση του αριθμού ανεμογεννητριών που καθίστανται ορατές από τα παράλια της ανατολικής Κρήτης. Συγκεκριμένα, από το ανατολικότερο τμήμα του νησιού (περιοχές Ξηρόκαμπου και Ζάκρου) προκύπτει ότι μπορεί να διακριθεί μεγάλος αριθμός ανεμογεννητριών. Η ορατότητα επεκτείνεται δυτικότερα, περιλαμβάνοντας παράκτιες ζώνες μέχρι και το Παλαιόκαστρο, όπου επίσης διακρίνεται τμήμα του πάρκου.

Κατά μήκος των βορείων παραλίων, το οπτικό αποτύπωμα είναι εμφανές σε περιοχές κατοίκησης και τουριστικής δραστηριότητας, με σταδιακή μείωση της έντασης προς τα δυτικά. Αντίστοιχα, στα νότια παράλια, το φαινόμενο είναι εντονότερο στα ανατολικά όρια και αμβλύνεται σε μικρότερο βαθμό, όσο απομακρύνεται η θέαση προς τη Σητεία. Σε όλες τις περιπτώσεις, οι τιμές δεν αναφέρονται μόνο στη συνολική παρουσία του πάρκου, αλλά στο πλήθος των ανεμογεννητριών που είναι ορατές, έστω και μερικώς, γεγονός που καθιστά την εικόνα περισσότερο αντιληπτή σε περιοχές με ανοιχτό ορίζοντα προς τα ανατολικά.



Εικόνα 27: Απεικόνιση αποτελεσμάτων με απόσταση ορατότητας 40 km (Μονάδα μέτρησης: Μονάδες ορατών ανεμογεννητριών)

Στο σενάριο των 40 km, η αύξηση της απόστασης ορατότητας οδηγεί σε σημαντική διεύρυνση της χωρικής εξάπλωσης της οπτικής όχλησης, η οποία πλέον περιλαμβάνει εκτεταμένες παράκτιες ζώνες της ανατολικής Κρήτης. Παράλληλα, η ανάλυση καταδεικνύει ότι το αιολικό πάρκο καθίσταται ορατό και από τα παράκτια της νοτιοδυτικής Κάσου. Αν και η συγκεκριμένη περιοχή δεν εντάσσεται σε ζώνες κατοικημένου ή τουριστικού ενδιαφέροντος, η καταγραφή της ορατότητας σε αυτό το σημείο αναδεικνύει την κλίμακα της γεωγραφικής εξάπλωσης του έργου και την εμβέλειά του στο θαλάσσιο τοπίο.



Η εξέλιξη αυτή αναδεικνύει την ανάγκη εξέτασης εναλλακτικών σεναρίων με μειωμένο αριθμό ανεμογεννητριών, προκειμένου να εκτιμηθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια ο βαθμός στον οποίο μπορούν να περιοριστούν οι επιπτώσεις στην οπτική ακεραιότητα του τοπίου. Η συγκριτική αξιολόγηση των σεναρίων, ενισχύει την τεκμηρίωση του μοντέλου και παρέχει πιο ολοκληρωμένη εικόνα για την ισορροπία ανάμεσα στη λειτουργικότητα του έργου και τη διαχείριση της οπτικής όχλησης.

6.4.4.2 Διορθωτικές παρεμβάσεις

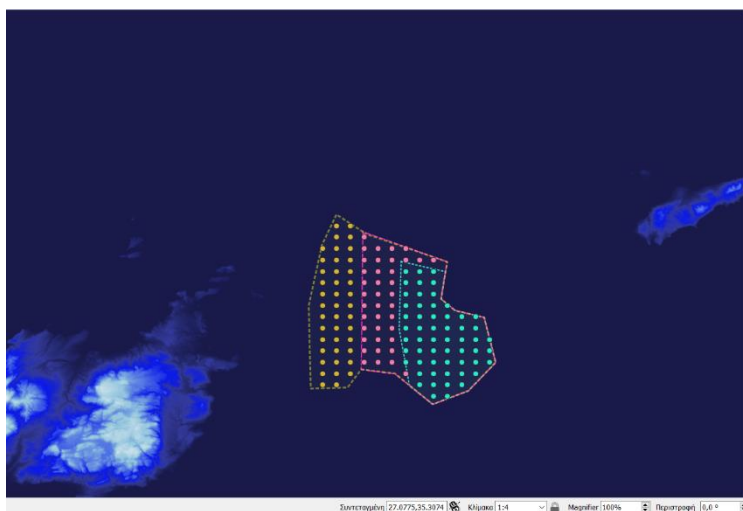
Το πρώτο εναλλακτικό σενάριο διαμορφώθηκε με τη βελτιστοποίηση της διάταξης μέσω αφαίρεσης περιμετρικών ανεμογεννητριών, ώστε να περιοριστεί η οπτική τους παρουσία. Η διαδικασία αυτή οδήγησε στη δημιουργία ενός νέου εσωτερικού κανάβου, 96 μονάδων, με στόχο την εκτίμηση του βαθμού περιορισμού της οπτικής όχλησης.

Στην περίπτωση του πρώτου εναλλακτικού σεναρίου με μέγιστη απόσταση ορατότητας τα 40 km, τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η συνολική χωρική εξάπλωση της ζώνης ορατότητας παραμένει ουσιαστικά αμετάβλητη σε σχέση με το αρχικό σενάριο της ίδιας απόστασης. Η κύρια διαφοροποίηση εντοπίζεται στην ένταση της οπτικής παρουσίας, καθώς το πλήθος των ανεμογεννητριών που καθίστανται ορατές εμφανίζει ελαφρώς εντονότερη συγκέντρωση σε συγκεκριμένα τμήματα των παράκτιων ζωνών. Αντίθετα, οι εκτάσεις από τις οποίες γίνεται ορατό το πάρκο, δεν εμφανίζουν ιδιαίτερο περιορισμό ή/και μείωση. Παράλληλα, η ανάλυση επισημαίνει ότι η ορατότητα εκτείνεται και προς τα παράκτια της νοτιοδυτικής Κάσου, γεγονός που επιβεβαιώνει τη διευρυμένη ακτίνα επιρροής του έργου, ακόμη και σε περιοχές χωρίς θεσμοθετημένες ζώνες ενδιαφέροντος.

Η αξιολόγηση του σεναρίου υποδεικνύει ότι, αν και η χωρική κατανομή δεν διαφοροποιείται αισθητά, η διαφοροποίηση στο πλήθος των ορατών ανεμογεννητριών έχει σημασία για την ποιοτική αποτύπωση της οπτικής όχλησης. Συνεπώς, η συμβολή της εναλλακτικής αυτής έγκειται κυρίως στη διερεύνηση της έντασης του φαινομένου, παρά στον περιορισμό της γεωγραφικής του εμβέλειας, αναδεικνύοντας την ανάγκη συνέχισης της ανάλυσης με περαιτέρω σενάρια μείωσης της οπτικής όχλησης.

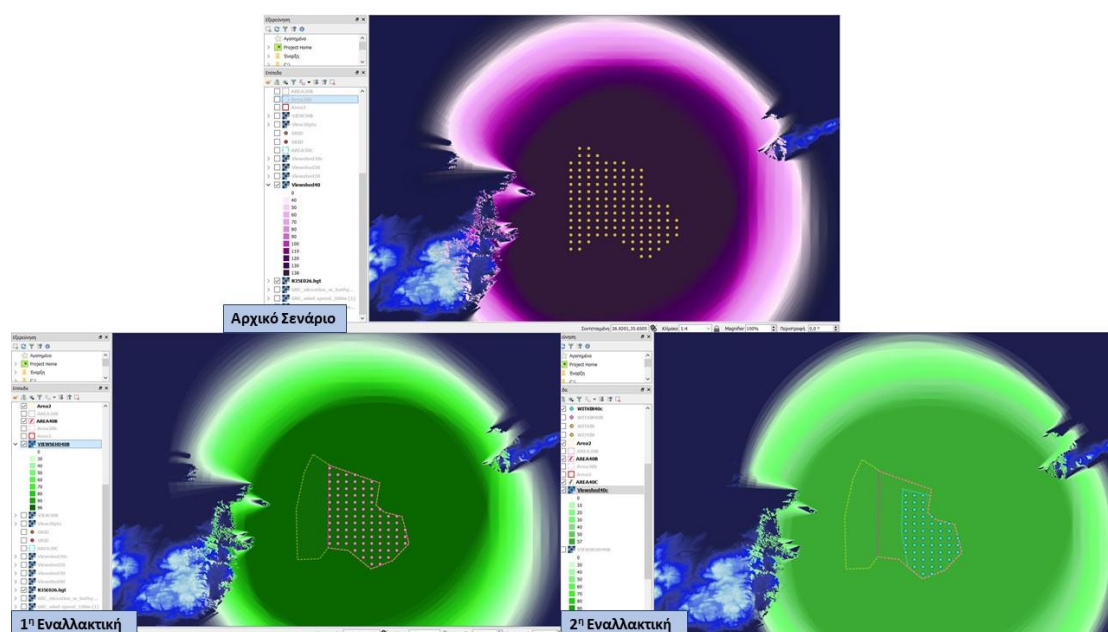
Στο δεύτερο εναλλακτικό σενάριο εφαρμόστηκαν τα ίδια κριτήρια χωρικού περιορισμού του πάρκου, με περαιτέρω μείωση του πλήθους των ανεμογεννητριών σε 57 ανεμογεννήτριες. Η ανάλυση δείχνει ότι, υπό τις ίδιες σταθερές παραμέτρους, η συνολική χωρική εξάπλωση της ζώνης ορατότητας παραμένει πρακτικά αμετάβλητη σε σχέση με το πρώτο εναλλακτικό σενάριο. Ωστόσο, στις παράκτιες ζώνες της ανατολικής Κρήτης, καθώς και στη νοτιοδυτική Κάσο, παρατηρείται αισθητά μικρότερος αριθμός ανεμογεννητριών που καθίστανται οπτικά αντιληπτές, γεγονός που συνδέεται άμεσα με τη μείωση της συνολικής διάταξης του πάρκου.





Εικόνα 28: Απεικόνιση εναλλακτικών σεναρίων (Με κίτρινο περίγραμμα εμφανίζεται η περιοχή μελέτης, με ροζ η 1η εναλλακτική με μείωση 42 ανεμογεννητριών, με γαλάζιο η 2η εναλλακτική μειωμένη εκ νέου κατά 39 ανεμογεννήτριες)

Η συγκριτική αξιολόγηση των τριών σεναρίων σε απόσταση 40 km αναδεικνύει ότι η χωρική εξάπλωση της ζώνης ορατότητας παραμένει σχεδόν ταυτόσημη ανεξαρτήτως πλήθους ανεμογεννητριών. Η διαφοροποίηση εντοπίζεται κυρίως στο πλήθος των ανεμογεννητριών που καθίστανται οπτικά αντιληπτές, το οποίο μειώνεται προοδευτικά με τη μετάβαση από το αρχικό στο 1ο και στη συνέχεια στο 2ο εναλλακτικό σενάριο. Στα παράκτια της ανατολικής Κρήτης, αλλά και στη νοτιοδυτική Κάσο, η μείωση αυτή αποτυπώνεται με σαφήνεια, αν και δεν αναιρεί το γεγονός ότι η συνολική ορατότητα του πάρκου παραμένει εκτεταμένη.



Εικόνα 29: Απεικόνιση αποτελεσμάτων των τριών σεναρίων (Μονάδα μέτρησης: Μονάδες ορατών ανεμογεννητριών)

Συνεπώς, η διαχείριση του οπτικού αποτυπώματος μέσω μείωσης του αριθμού ανεμογεννητριών οδηγεί σε περιορισμένα οφέλη αναφορικά με την έκταση της ζώνης ορατότητας, αλλά σε πιο ουσιαστική διαφοροποίηση ως προς τον αριθμό των μονάδων που γίνονται αντιληπτές από τα παράλια σημεία.



Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα – Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα

7.1 Συμπεράσματα

Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε καταδεικνύει ότι η Ελλάδα διαθέτει εξαιρετικά υψηλό υπεράκτιο αιολικό δυναμικό, το οποίο μπορεί να αποτελέσει στρατηγικό πυλώνα της ενεργειακής μετάβασης και της απανθρακοποίησης του εθνικού ενεργειακού μίγματος. Οι εκτεταμένες θαλάσσιες ζώνες, η γεωγραφική θέση της χώρας και οι ισχυροί άνεμοι του Αιγαίου και του Ιονίου προσφέρουν ευνοϊκές προϋποθέσεις για την ανάπτυξη έργων μεγάλης κλίμακας.

Σε τεχνικό και οικονομικό επίπεδο, τα περισσότερα ζητήματα θεωρούνται επιλύσιμα. Οι σύγχρονες τεχνολογίες θεμελίωσης, συμπεριλαμβανομένων των πλωτών πλατφορμών, καθιστούν εφικτή την εγκατάσταση ανεμογεννητριών ακόμη και σε μεγάλα βάθη. Παράλληλα, η εμπειρία από άλλες χώρες δείχνει ότι το υψηλό αρχικό κόστος αντισταθμίζεται από τη σταθερή παραγωγή ενέργειας και την αποφυγή εκπομπών CO₂. Αντίστοιχα, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις μπορούν να περιοριστούν μέσω ορθού σχεδιασμού, ενώ οι περισσότερες τεχνικοοικονομικές προκλήσεις έχουν λύσεις ή μπορούν να παρακαμφθούν με εναλλακτικά σενάρια.

Ωστόσο, η κοινωνική αποδοχή και ειδικότερα η οπτική όχληση αποτελούν ζητήματα που απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή. Η μελέτη ορατότητας ανέδειξε ότι, παρότι τα υπεράκτια πάρκα βρίσκονται σε σημαντική απόσταση από την ακτή, η αισθητική επίδραση στο τοπίο παραμένει αντιληπτή, ιδίως σε περιοχές τουριστικού ενδιαφέροντος. Η διεθνής εμπειρία αποδεικνύει ότι η κοινωνική αντίδραση, εάν δεν αντιμετωπιστεί προληπτικά, μπορεί να οδηγήσει σε καθυστερήσεις ή ακόμα και ακυρώσεις έργων.

Για την ενίσχυση της κοινωνικής αποδοχής απαιτείται μια συνδυαστική στρατηγική, όπου πρωταρχικό ρόλο κατέχει η εξειδικευμένη προσέγγιση σε περιοχές υψηλής τουριστικής ή πολιτιστικής αξίας, με κατάλληλη χωροθέτηση σε μεγαλύτερες αποστάσεις ή χρήση τεχνικών μείωσης της οπτικής όχλησης. Εξίσου σημαντική είναι η διαφάνεια σε όλα τα στάδια χωροθέτησης και αδειοδότησης, με ανοιχτή πρόσβαση στα δεδομένα και τις μελέτες, καθώς και η συστηματική ενημέρωση του κοινού μέσα από σεμινάρια, ημερίδες και στοχευμένες καμπάνιες. Μέσα από τέτοιες δράσεις, που θα εστιάζουν όχι μόνο στα τεχνικά ζητήματα αλλά και στην παρουσίαση της ίδιας της μελέτης και των αποτελεσμάτων της, καλλιεργείται κλίμα εμπιστοσύνης, ενισχύεται η ενεργειακή παιδεία και αμβλύνονται οι κοινωνικές αντιδράσεις, διευκολύνοντας έτσι την ομαλή ανάπτυξη των υπεράκτιων αιολικών πάρκων στην Ελλάδα.

Συνολικά, η παρούσα εργασία καταδεικνύει ότι η ανάπτυξη υπεράκτιων αιολικών πάρκων στην Ελλάδα δεν είναι μόνο τεχνικά εφικτή αλλά και στρατηγικά αναγκαία. Εφόσον δοθεί η απαιτούμενη βαρύτητα στην κοινωνική διάσταση, με συνδυασμό παιδείας, διαλόγου και συμμετοχής των τοπικών κοινωνιών, η χώρα μπορεί να αξιοποιήσει το μοναδικό αιολικό της δυναμικό και να καταστεί περιφερειακός ηγέτης στη Μεσόγειο στον τομέα της πράσινης ενέργειας.



7.2 Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα

Η ανάλυση των δεδομένων και των αποτελεσμάτων υποδεικνύει πιθανές βελτιώσεις στη μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε, οι οποίες θα μπορούσαν να ενισχύσουν την αξιοπιστία και την ακρίβεια των επόμενων εφαρμογών.

Μια σημαντική κατεύθυνση για μελλοντική έρευνα αφορά στην εξειδίκευση της επιλογής ανεμογεννητριών κατάλληλων για τις συνθήκες της επιλεγμένης περιοχής, λαμβάνοντας υπόψη το βάθος του θαλάσσιου χώρου, τα ύψη πυλώνων και τα μήκη πτερυγίων. Παράλληλα, η μελέτη ορατότητας θα πρέπει να επαναληφθεί για τα συγκεκριμένα μοντέλα ανεμογεννητριών, ώστε να εκτιμηθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια ο οπτικός αντίκτυπος των έργων και να προταθούν πιθανές βελτιώσεις στη χωροθέτηση ή στο σχεδιασμό των πτερυγίων, εξασφαλίζοντας μια ολιστική προσέγγιση τεχνικής και περιβαλλοντικής βιωσιμότητας.

Μια δεύτερη πρόταση για μελλοντική έρευνα αφορά στην ενδεδειγμένη αναζήτηση περαιτέρω χωρικών δεδομένων και στον εντοπισμό των κύριων σημείων ενδιαφέροντος στην υπό μελέτη περιοχή στα παράκτια της Κρήτης. Τα δεδομένα αυτά θα μπορούσαν να ενσωματωθούν σε Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ), επιτρέποντας τη χωροθέτηση και την οργάνωση των θέσεων για την εκ νέου μελέτη της ορατότητας. Συγκεκριμένα, θα ήταν σκόπιμο να προστεθούν στοιχεία όπως τα ακριβή όρια των αεροδρόμιων, των Ζωνών Μεταναστευτικών Διαδρομών Πτηνών, των ναυπηγείων, των λιμανιών, καθώς και τουριστικών εγκαταστάσεων (παραλίες, οικοτουριστικά κέντρα) και άλλα δεδομένα που αναφέρονται στην παράγραφο 4.2.6. Ορισμένα από αυτά, όπως οι αερομεταφορές (διάδρομοι πτήσεων και εναέριες ζώνες), δεν ήταν δυνατό να αναπαραχθούν κατά την ανάλυση, καθώς δεν βρέθηκαν διαθέσιμα στοιχεία στο διαδίκτυο. Η χρήση συγκεκριμένων, τεκμηριωμένων θέσεων θα ενισχύσει την ακρίβεια της εκτίμησης του οπτικού αντίκτυπου και θα παρέχει μια πιο πρακτικά εφαρμόσιμη βάση για τη χωροθέτηση υπεράκτιων αιολικών εγκαταστάσεων.

Η τρίτη κατεύθυνση για περαιτέρω έρευνα αφορά τη διαστασιολόγηση των ανεμογεννητριών και τον υπολογισμό του παραγόμενου ενεργειακού δυναμικού, από το προτεινόμενο πάρκο, προκειμένου να εκτιμηθεί η συνεισφορά του υπεράκτιου πάρκου στο τοπικό και εθνικό ενεργειακό σύστημα. Η ανάλυση αυτή θα επιτρέψει την ένταξη των αποτελεσμάτων στο ευρύτερο ενεργειακό δυναμικό της περιοχής, αξιολογώντας την απόδοση υπό διαφορετικά μετεωρολογικά και τεχνικά σενάρια, και θα αποτελέσει τη βάση για τη βέλτιστη σχεδίαση και λειτουργία του έργου.

Στο ίδιο πλαίσιο, κρίνεται σκόπιμο να πραγματοποιηθεί μια ενδεδειγμένη οικονομική αξιολόγηση της προτεινόμενης θέσης στην ανατολική Κρήτη, με στόχο την πλήρη αποτύπωση της βιωσιμότητας του έργου. Συγκεκριμένα, προτείνεται η εκπόνηση μιας ολοκληρωμένης ανάλυσης κόστους-οφέλους (Cost-Benefit Analysis), η οποία θα συνυπολογίζει όχι μόνο το αρχικό κόστος εγκατάστασης, λειτουργίας και συντήρησης των υπεράκτιων ανεμογεννητριών, αλλά και τις μακροπρόθεσμες αποδόσεις σε επίπεδο παραγόμενης ενέργειας, μείωσης εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και ενίσχυσης της ενεργειακής ασφάλειας. Παράλληλα, η ανάλυση θα πρέπει να ενσωματώνει σε βέλτιστο βαθμό τις έμμεσες κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις, όπως τη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας, την ενίσχυση της τοπικής οικονομίας και την πιθανή τουριστική ή περιβαλλοντική επιρροή. Ένα



τέτοιο ολιστικό εργαλείο εκτίμησης θα προσφέρει σαφέστερη εικόνα για τη στρατηγική σημασία της συγκεκριμένης χωροθέτησης και θα ενισχύσει την τεκμηρίωση των αποφάσεων που αφορούν την ανάπτυξη υπεράκτιων αιολικών πάρκων στην Κρήτη.

7.3 Κριτική Αξιολόγηση και Προοπτικές

Η Ελλάδα παρουσιάζει σημαντικές προοπτικές για την ανάπτυξη υπεράκτιων αιολικών πάρκων, δεδομένων των πολλών ευνοϊκών παραγόντων που διαθέτει, όπως η εκτεταμένη ακτογραμμή με ισχυρούς και σταθερούς ανέμους, η γεωγραφική θέση που της επιτρέπει την εκμετάλλευση της ανανεώσιμης ενέργειας και η αυξανόμενη ενεργειακή ζήτηση σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο. Επιπλέον, η χώρα διαθέτει εμπειρία στη διαχείριση ενεργειακών έργων και τεχνογνωσία από προηγούμενες επενδύσεις σε χερσαία αιολικά πάρκα και άλλα έργα ΑΠΕ.

Παρά το γεγονός ότι τις προηγούμενες δεκαετίες υπήρχε αισθητή στασιμότητα και αδράνεια από όλους τους φορείς και σε όλες τις διαδικασίες, με έντονες αντιδράσεις σε επίπεδο θεσμικό και κοινωνικό, η τελευταία πενταετία χαρακτηρίζεται από σημαντική πρόοδο. Τα αρμόδια Υπουργεία και οι άμεσα εμπλεκόμενοι φορείς, έχουν αναλάβει ενεργά τις υποχρεώσεις τους, προωθώντας το νομοθετικό πλαίσιο και διευκολύνοντας τις διαδικασίες αδειοδότησης και ανάπτυξης έργων. Αυτό έχει δημιουργήσει ένα πιο σταθερό και προβλέψιμο περιβάλλον για επενδυτές και μελετητές.

Ιδιαίτερη σημασία έχει η στρατηγική κίνηση των μεγάλων επενδυτών και κατασκευαστών, οι οποίοι, και παρά τα συνεχή εμπόδια στην αξιοποίηση της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα, έχουν επενδύσει στο δυναμικό τους, στη συγκρότηση εξειδικευμένων ομάδων και στην ανάπτυξη τεχνογνωσίας μέσω συμμετοχής σε διεθνείς μελέτες, συνέδρια, σεμινάρια και παρουσιάσεις. Αυτή η κίνηση δείχνει ότι η χώρα αρχίζει να ενσωματώνεται στα διεθνή δίκτυα γνώσης και τεχνολογίας για τα υπεράκτια αιολικά έργα. Παράλληλα, με τους επενδυτές και η HEREMA έχει αναλάβει ενεργά πρωτοβουλίες για την προώθηση των προκαταρκτικών διαδικασιών χωροθέτησης και την υποστήριξη όλων των εμπλεκόμενων κατασκευαστών και επενδυτών.

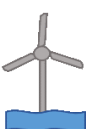
Οι κατασκευαστές με τη σειρά τους αρχίζουν να οργανώνουν τις ομάδες τους και να αναλαμβάνουν πρωτοβουλίες για την καλύτερη προετοιμασία τους ενόψει μελλοντικών διαγωνισμών. Αυτό περιλαμβάνει τη λήψη συμβουλευτικών υπηρεσιών σχετικά με χωροθέτηση, κοστολόγηση, κατασκευές και μελέτες σε ευρύτερο πλαίσιο, καθώς και τη συλλογή δεδομένων που θα τους επιτρέψει να κοστολογήσουν και να σχεδιάσουν σωστά τα πάρκα όταν θα έρθει η ώρα. Επιπλέον, η δράση τους υποστηρίζεται από ξένες, διεθνείς εταιρείες και μελετητικούς-συμβουλευτικούς ομίλους, ενώ ταυτόχρονα δείχνουν τη διάθεσή τους, προς τις αρμόδιες αρχές και τη HEREMA, πιέζοντας συνεχώς για την επιτάχυνση και την επίσπευση των διαδικασιών.

Συνολικά, παρά τα βήματα προόδου της τελευταίας πενταετίας, η Ελλάδα εξακολουθεί να έχει σημαντικά βήματα να διανύσει όσον αφορά τις υποστηρικτικές υποδομές, καθώς η απουσία κρίσιμων δομών, όπως τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, οι λιμενικές εγκαταστάσεις για την κατασκευή και μεταφορά των ανεμογεννητριών, καθώς και το απαραίτητο δίκτυο διασύνδεσης και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, ειδικά προς νησιά και



πιο απομακρυσμένες περιοχές, είναι προβλήματα που θα πρέπει να επιλυθούν εμπρόθεσμα. Σε αντίθετη περίπτωση, και κατά τη διάρκεια ανάληψης ή/και κατασκευής του έργου, θα χρειαστεί η μελέτη και χρηματοδότηση των συνοδών έργων υποδομής, τα οποία όχι μόνο θα καθυστερήσουν το έργο, αλλά θα αυξήσουν και τον αρχικό προβλεπόμενο προϋπολογισμό. Η ανάπτυξη υπεράκτιων αιολικών πάρκων δεν μπορεί να στηριχθεί μόνο στην εγκατάσταση των τουρμπινών, αλλά απαιτεί ολοκληρωμένη προετοιμασία των τεχνικών, επιχειρησιακών και υποστηρικτικών δομών, ώστε η χώρα να αξιοποιήσει πλήρως τις δυνατότητες που προσφέρει το δυναμικό της.

Συνολικά, η Ελλάδα βρίσκεται στην αρχή μιας πιο ενεργητικής και στοχευμένης στρατηγικής για την υπεράκτια αιολική ενέργεια, με εμφανή πλέον στόχο τη δημιουργία και την κατασκευή, και η περαιτέρω ανάπτυξη θα εξαρτηθεί τόσο από την ολοκλήρωση των υποστηρικτικών υποδομών, όσο και από τη συνέχιση της ενεργούς συμμετοχής της χώρας στην διεθνή τεχνολογική και ερευνητική κοινότητα.



Βιβλιογραφία - Πηγές

- Ρ. Ιωαννίδης, «Χωρικός και αρχιτεκτονικός σχεδιασμός για την ένταξη των έργων υποδομής στο τοπίο: Συμπεράσματα από τα έργα ανανεώσιμης ενέργειας και τα φράγματα», 2022
- Ο. Δασκάλου, «Μεθοδολογία βέλτιστης χωροθέτησης και διαστασιολόγησης φωτοβολταϊκών και αιολικών πάρκων με χρήση συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών (GIS)», 2016
- Sofia Spyridonidou, Dimitra G. Vagiona, EvaLoukogeorgaki, « Strategic Planning of O shore Wind Farms in Greece», 2021
- Δ.Β. Κανελλόπουλος, «Αιολική Ενέργεια: Σχεδιάζοντας στις Αυλές των Ανέμων», Εκδόσεις Ίων, 2008
- Μ. Κεφαλά, «Εκτίμηση αιολικού δυναμικού στην περιοχή της Κεφαλονιάς βάσει του ειδικού χωροταξικού σχεδιασμού για τις ΑΠΑ», 2015
- Κ. Κυριακίδης, «Υπεράκτια αιολικά πάρκα: Δομικά στοιχεία, ισχύουσα κατάσταση, μελλοντικές προοπτικές και ενεργειακή μελέτη στον Ελλαδικό χώρο», 2021
- Π.Γ. Μαρίνης, «Μεθοδολογία Χωροθέτησης Υπεράκτιου Αιολικού Πάρκου με Χρήση Μεθόδων GIS και Αξιολόγησή του για Κάλυψη Ενεργειακών Αναγκών της νήσου Ρόδου», 2021
- Τ. Καλογεροπούλου, «Υπεράκτια αιολικά πάρκα», 2010
- Ι. Σιάχος, Ν. Μπίστας, «Παράκτια αιολικά πάρκα», 2019
- Μ. Μαρίνης, Χ. Κωσταντόπουλος, «Θαλάσσια αιολικά πάρκα», 2016
- Ι. Μακρίδης, «Αξιολόγηση παραμέτρων απόδοσης αιολικού πάρκου», 2013
- J.F. Walker, N. Jenkins, (μετάφραση Η. Μακρής, επιμέλεια Ι. Βελαώρας), «Αιολική Ενέργεια και Ανεμογεννήτριες», Εκδόσεις Ίων, 2007
- Pedersen, E.; Larsman, P., «The impact of visual factors on noise annoyance among people living in the vicinity of wind turbines», 2008
- Maslov, N.; Claramunt, C.; Wang, T.; Tang, T., « Method to Estimate the Visual Impact of an Offshore Wind Farm», 2017
- Frank Thomsen, Karin Lüdemann, Rudolf Kafemann and Werner Piper, « Effects of offshore wind farm noise on marine mammals and fish», 2006
- Pandora Gkeka-Serpetsidaki, Theocharis Tsoutsos, « A methodological framework for optimal siting of offshore wind farms: A case study on the island of Crete», 2021
- Moo-Sung Ryu, Sang-Ryul Kim, Dong-Ho Cho, Joon-Goo Kang, «Innovative Single-Day Installation Vessel for Offshore Wind Turbines», 2022
- Ελληνική Διαχειριστική Εταιρεία Υδρογονανθράκων και Ενεργειακών Πόρων Α.Ε - HEREMA, *επίσημη ιστοσελίδα φορέα*
- Global Wind Energy Council – GWEC , *επίσημη ιστοσελίδα φορέα*
- Υπουργείο Ανάπτυξης, «Θεσμικό πλαίσιο για θαλάσσια αιολικά πάρκα: Η διεθνής εμπειρία και οι βασικές αρχές σχεδιασμού για την Ελλάδα», 2021
- Konstantinos Gazos, Dimitra G. Vagiona, «Suitability Assessment for Offshore Wind Farms’ Deployment in Thrace, Greece», 2024
- Vasiliki I. Chalastani, Elissavet Feloni, Carlos M. Duarte, Vasiliki K. Tsoukala «Identifying Sustainable Offshore Wind Farm Sites in Greece Under Climate Change», 2025
- European Parliament and Council, "Directive 2014/89/EU establishing a framework for maritime spatial planning", 2014.



- European Commission, "Council Directive 92/43/EEC on the conservation of natural habitats and of wild fauna and flora", 1992.
- European Commission, "Directive 2009/147/EC on the conservation of wild birds", 2009.
- Dannheim, J., Beermann, J., Coolen, J. W. P., Vanaverbeke, J., Degraer, S., Birchenough, S. N. R., Garcia, C., Lacroix, G., Fiorentino, D., Lindeboom, H., Krone, R., Pehlke, H., Braeckman, U., & Brey, T. , "Offshore wind turbines constitute benthic secondary production hotspots on and around constructions", 2025.
- Rikard Karlsson, Malin Tivefälv, Iris Duranović, Svante Martinsson, Ane Kjøllhamar, and Kari Mette Murvoll , "Artificial hard-substrate colonisation in the offshore Hywind Scotland Pilot Park", 2022
- Zoë Hutchison, Monique LaFrance Bartley, Paul English, John King, Sean Grace, Boma Kresning, Christopher Baxter, Kristen Ampela, Mark Deakos, Anwar Khan, "Benthic and Epifaunal Monitoring During Wind Turbine Installation and Operation at the Block Island Wind Farm (BIWF), Rhode Island – Project Report", 2020.
- United Nations, "United Nations Convention on the Law of the Sea (UNCLOS)", 1982.
- International Maritime Organization (IMO), "Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea (COLREGs)", 1972.
- EMODnet, "Human Activities and Vessel Density Data Portal", 2023.
- International Cable Protection Committee (ICPC), "Recommendations for submarine cable route planning", 2016.
- Bureau of Ocean Energy Management (BOEM), "Guidelines for offshore renewable energy facilities", 2018.
- General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO), "Bathymetric Data Sets", 2020.
- International Energy Agency (IEA) & World Bank ESMAP, "Offshore Wind Technical Potential Report", 2019.
- Det Norske Veritas (DNV), "Offshore Standard DNV-OS-J101: Design of Offshore Wind Turbine Structures", 2014.
- Eurocontrol, "Guidelines on wind turbines and aviation safety", 2016.
- Federal Aviation Administration (FAA), "Title 14 CFR Part 77 - Objects Affecting Navigable Airspace", 2015.
- European Environment Agency (EEA), "Natura 2000 Data Sets", 2022.
- Zahle, Frederik; Barlas, Athanasios; Lønbæk, Kenneth; Bortolotti, Pietro; Zalkind, Daniel; Wang, Lu ; Labuschagne, Casper ; Sethuraman, Latha; Barter, Garrett, "Definition of the IEA Wind 22-Megawatt Offshore Reference Wind Turbine", 2024
- European Commission, "Directive 2011/92/EU on the assessment of the effects of certain public and private projects on the environment (EIA Directive)", 2011.
- Iberdrola Biodiversity, «Biodiversity Report 2024» 2025.
- IEA Wind TCP, «Recommended practices for wind resource assessment of offshore wind energy projects.» , 2021
- Ramboll, «Floating offshore wind – application of standards, regulations, project certification & classification – Risk and Opportunities mapping», 2021
- DNV, «Offshore Wind: Measurement Requirements and Guidelines», 2022.
- Bhattacharya, S., «Design of Foundations for Offshore Wind Turbines. Wiley», 2019
- Carbon Trust, «Offshore Wind Geotechnical and Geophysical Investigations», 2020
- Χρύσα Λιάγγου, «Οι έξι περιοχές όπου θα αναπτυχθούν τα υπεράκτια αιολικά πάρκα», 2023 - Άρθρο



- Euronews Green, «The turbines could power 1.5 million Greek homes by 2030, under plans for the Aegean, Ionian and Mediterranean seas.», 2023 – Άρθρο
- David Foxwell, «Offshore wind a ‘national priority,’ says Greek government, as it launches development plan», 2023 – Άρθρο

**Όλα τα στοιχεία από άρθρα που χρησιμοποιήθηκαν στην συγκεκριμένη διπλωματική και αφορούν στην παρουσίαση του Εθνικού Προγράμματος Ανάπτυξης Υπεράκτιων Αιολικών Πάρκων, έχουν επιβεβαιωθεί από επιτόπια παρουσία μου και διασταύρωση των γραφόμενων, από την εν λόγω εκδήλωση.*

