



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Επιλογή θέσης εγκατάστασης ανεμογεννητριών για
βέλτιστη παραγωγή ενέργειας

Τσιάμη Ηλιάνα

Α.Μ.: HN07475

Επιβλέπων: Δρ. Τσιάκαλος Αναστάσιος

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2023, ΚΟΖΑΝΗ

(Υπογραφή)

.....

ΗΛΙΑΝΑ ΤΣΙΑΜΗ

Ηλεκτρολόγος Μηχανικός Τ.Ε., ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

© 2023 – All rights reserved

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με την χρήση ανανεώσιμων πηγών αποτελεί ολοένα και πιο δελεαστική επιλογή για την παραγωγή ενέργειας τα τελευταία χρόνια, λόγω της μείωσης των αποθεμάτων συμβατικών καυσίμων του πλανήτη καθώς και του μικρού αποτυπώματος στο περιβάλλον. Για αυτόν τον σκοπό, ολοένα και περισσότερες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας χρησιμοποιούνται όπως για παράδειγμα ενέργεια προερχόμενη από τον ήλιο, το νερό και τον αέρα.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, θα γίνει ανάλυση στην χρήση της αιολικής ενέργειας, και πιο συγκεκριμένα στην επιλογή της βέλτιστης θέσης τοποθέτησης ανεμογεννητριών, για την επίτευξη μέγιστης παραγωγικότητας. Αρχικά, θα γίνει μία εισαγωγή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και έπειτα θα δοθεί έμφαση στην προερχόμενη από τον άνεμο ενέργεια.

Θα ακολουθήσει μία λεπτομερής περιγραφή του συστήματος της ανεμογεννήτριας λαμβάνοντας υπόψη τις κατηγορίες και τον εξοπλισμό που αποτελείται. Στην συνέχεια, ακολουθεί μία περιγραφή των αιολικών πάρκων, δηλαδή της σωστής λειτουργίας μίας συστοιχίας ανεμογεννητριών.

Έπειτα, γίνεται μία ενδελεχής περιγραφή στην διαδικασία εύρεσης βέλτιστης τοποθεσίας ενός αιολικού πάρκου, λαμβάνοντας υπόψη της παραμέτρους που έχουν παρουσιαστεί στα προηγούμενα κεφάλαια με απώτερο σκοπό την μεγιστοποίηση της παραγωγής ενέργειας.

Κλείνοντας, στο τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζονται τρόποι περεταίρω βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης μέσω της μικροχωροθέτησης του πάρκου δηλαδή την εύρεση της βέλτιστης θέσης της κάθε ανεμογεννήτριας.

Λέξεις Κλειδιά: Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, Αιολική ενέργεια, Βέλτιστη τοποθέτηση αιολικού πάρκου, Μικροχωροθέτηση

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή

ABSTRACT

The production of electricity using renewable sources is an increasingly attractive option for energy production in recent years, due to the reduction of the planet's conventional fuel reserves as well as the small footprint on the environment. For this purpose, more and more forms of renewable energy sources are used such as energy from the sun, water and wind.

In the context of this work, an analysis will be made in the use of wind energy, and more specifically in the selection of the optimal location for placing wind turbines, in order to achieve maximum productivity. First, there will be an introduction to renewable energy sources, and then there will be an emphasis on wind energy.

A detailed description of the wind turbine system will follow, taking into account its categories and the equipment it consists of. Then follows a description of wind farms, i.e. the proper operation of a wind turbine array.

Then, a thorough description is made in the process of finding an optimal location of a wind farm, taking into account the parameters that have been presented in the previous chapters with the ultimate goal of maximizing energy production.

In conclusion, in the last chapter of the work, ways to further improve the energy efficiency are presented through the micro-location of the park, i.e. finding the optimal position of each wind turbine.

Keywords: Renewable energy, Wind energy, Optimal wind farm siting, Micro-siting

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου κ. Τσιάκαλο Αναστάσιο για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα ιδιαίτερο και ενδιαφέρον αντικείμενο. Η ενασχόληση μου με αυτό μου έδωσε την δυνατότητα να αντιληφθώ την σημαντικότητα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου και την οικογένεια μου για την στήριξη που μου παρείχαν καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Περίληψη.....	i
Abstract	iii
Ευχαριστίες	v
Πίνακας Περιεχομένων	vii
Πίνακας Εικόνων.....	ix
Κατάλογος Πινάκων.....	xi
Εισαγωγή.....	1
Κεφάλαιο 1: Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	4
1.1 Εισαγωγή.....	4
1.2 Στατιστικά και στόχοι χρήσης ΑΠΕ.....	4
1.3 Συνοπτική περιγραφή κύριων μορφών ΑΠΕ.....	9
1.3.1 Ηλιακή ενέργεια	9
1.3.2 Γεωθερμική ενέργεια.....	10
1.3.3 Ενέργεια υδάτων	11
1.3.4 Βιομάζα	12
1.3.5 Ενέργεια από θαλάσσια κύματα	13
1.3.6 Αιολική ενέργεια	14
1.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα χρήσης ΑΠΕ	16
Κεφάλαιο 2: Ανεμογεννήτριες και αιολικά πάρκα	17
2.1 Ιστορική αναδρομή.....	17
2.2 Ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα περιστροφής.....	19
2.3 Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα περιστροφής	20
2.4 Σύγκριση τύπων άξονα / αριθμού πτερυγίων	22
2.5 Εξοπλισμός.....	23
2.6 Ισχύοντα πρότυπα και κανονισμοί	25
2.7 Στατιστικά χρήσης στην Ελλάδα.....	29
2.8 Μεγαλύτερη ανεμογεννήτρια σε χρήση για το έτος 2023	31
2.9 Αιολικά πάρκα-μία συστοιχία ανεμογεννητριών	32
2.10 Υποδομές αιολικών πάρκων.....	33
2.10.1 Συστήματα συλλογής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.....	33
2.10.2 Δρόμοι/Περιοχή εγκατάστασης.....	34
2.10.3 Συστήματα ελέγχου και συλλογής δεδομένων	34
2.10.4 Υποστηρικτικό προσωπικό.....	35
Κεφάλαιο 3: Μελέτη θέσης αιολικού πάρκου	36
3.1 Εισαγωγή.....	36
3.2 Κριτήρια επιλογής τοποθεσίας.....	36
3.2.1 Αρχικός προσδιορισμός γεωγραφικών περιοχών.....	36
3.2.2 Επιλογή υποψήφιων χώρων.....	41

3.2.3	Προκαταρκτική αξιολόγηση των υποψήφιων χώρων.	45
3.2.4	Τελική αξιολόγηση του χώρου.	45
3.2.5	Λεπτομερής τοποθέτηση ανεμογεννητριών (μικροχωροθέτηση).....	45
3.3	Γενικότερα ζητήματα κατά την χωροθέτηση.	45
Κεφάλαιο 4: μικροχωροθετηση Αιολικών πάρκων		47
4.1	Εισαγωγή.....	47
4.2	Απόρους ανεμογεννήτριας	48
4.3	Επίδραση διεύθυνσης ανέμου και ύπαρξης λόφου.....	52
4.4	Παράδειγμα βελτιστοποίησης μικροχωροθέτησης υπεράκτιου πάρκου	53
Συμπεράσματα.....		57
Βιβλιογραφία.....		58

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Κατανάλωση ενέργειας στην Ευρώπη [1].	1
Εικόνα 2: Χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην Ευρώπη, στόχοι για το μέλλον [3].	5
Εικόνα 3: Χρήση ΑΠΕ στην Ευρώπη ανά χώρα για τα έτη 2020 και 2021 [3].	5
Εικόνα 4: Ένταση εκπομπών αερίων θερμοκηπίου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη [4].	6
Εικόνα 5: Ένταση εκπομπών αερίων θερμοκηπίου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη, ανά χώρα [4].	7
Εικόνα 6: Χρήση ΑΠΕ στις μεταφορές στην Ευρώπη [5].	8
Εικόνα 7: Στατιστικά χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας για το έτος 2020 [6].	8
Εικόνα 8: Διάχυση ηλιακής ενέργειας [7].	9
Εικόνα 9: Γεωθερμική ενέργεια [9].	10
Εικόνα 10: Τεχνητή λίμνη Κρεμαστών [11].	11
Εικόνα 11: Πηγές βιομάζας [13].	13
Εικόνα 12: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από θαλάσσια κύματα [14].	13
Εικόνα 13: Ανεμόμυλοι του 1914 στην Μυτιλήνη [15].	14
Εικόνα 14: Αιολικό πάρκο ονομαστικής παραγωγής 63 MegaWatt στην Arizona των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής [16].	15
Εικόνα 15: Ανεμογεννήτρια κάθετου άξονα για άλεση σιτηρών, Αφγανιστάν [17].	17
Εικόνα 16: Η πρώτη ανεμογεννήτρια για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [17].	18
Εικόνα 17: Τύποι ανεμογεννητριών κάθετου άξονα περιστροφής [18].	19
Εικόνα 18: Ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα περιστροφής [19].	21
Εικόνα 19: Συντελεστής ισχύος για διάφορους σχεδιασμούς [17].	22
Εικόνα 20: Τοποθέτηση εξοπλισμού εντός της ανεμογεννήτριας [17].	24
Εικόνα 21: Κατηγοριοποίηση φορτίων κόπωσης [21].	28
Εικόνα 22: Κατηγοριοποίηση μέγιστων φορτίων ανέμου [21].	29
Εικόνα 23: Εγκατάσταση της μεγαλύτερης ανεμογεννήτριας στον κόσμο [23].	31
Εικόνα 24: Μέγεθος πτέρυγας σε σχέση με τον άνθρωπο [23].	32
Εικόνα 25: Αιολικό πάρκο στην περιοχή San Gioronio Pass στην Καλιφόρνια [18].	32
Εικόνα 26: Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας [18].	33
Εικόνα 27: Έλεγχος ανεμογεννήτριας [18].	35
Εικόνα 28: Τυπική καμπύλη ισχύος/τροφών ανεμογεννήτριας [24].	37
Εικόνα 29: Χάρτης μέσης ταχύτητας ανέμου [21].	38
Εικόνα 30: Χάρτης πυκνότητας ισχύος [21].	39
Εικόνα 31: Κατανομή ταχύτητας ανέμου ανα διεύθυνση [25].	40
Εικόνα 32: Χάρτης βάθους θάλασσας [21].	41
Εικόνα 33: Τραχύτητα εδάφους [21].	42
Εικόνα 34: Ταχύτητα ανέμου πάνω από έναν απότομο λόφο [27].	43
Εικόνα 35: Επίδραση δέντρων στην κατανομή ταχύτητας του ανέμου [27].	43
Εικόνα 36: Χάρτης υψόμετρου [21].	44
Εικόνα 37: Τρισδιάστατη απεικόνιση της πυκνότητας της χαμηλής ταχύτητας ροής σε προσομοιωμένο αιολικό πάρκο [28].	47
Εικόνα 38: Απόρους ανεμογεννήτριας [29].	48
Εικόνα 39: Κάτοψη πεδίου ταχύτητας [30].	49
Εικόνα 40: Επίδραση της ταχύτητας ανέμου στην αλληλεπίδραση των ανεμογεννητριών μεταξύ τους [29].	50
Εικόνα 41: Πλαγιά η οποία ακολουθεί κατανομή Gauss [32].	52
Εικόνα 42: Μικροχωροθέτηση βασισμένη σε εμπειρία [32].	52
Εικόνα 43: Βελτιστοποιημένη μικροχωροθέτηση για μία διεύθυνση ανέμου [32].	53

Εικόνα 44: Βελτιστοποιημένη μικροχωροθέτηση για δύο διευθύνσεις ανέμου [32].	53
Εικόνα 45: Στάδια βελτιστοποίησης [30].	54
Εικόνα 46: Αρίθμηση ανεμογεννητριών στο πραγματικό σύστημα [33].	55
Εικόνα 47: Συμμετρική βελτιστοποιημένη διάταξη [33].	55
Εικόνα 48: Ακανόνιστη/Στοχαστική βελτιστοποιημένη διάταξη [33].	55
Εικόνα 49: Επίπεδα τύρβης I15 [33].	56

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

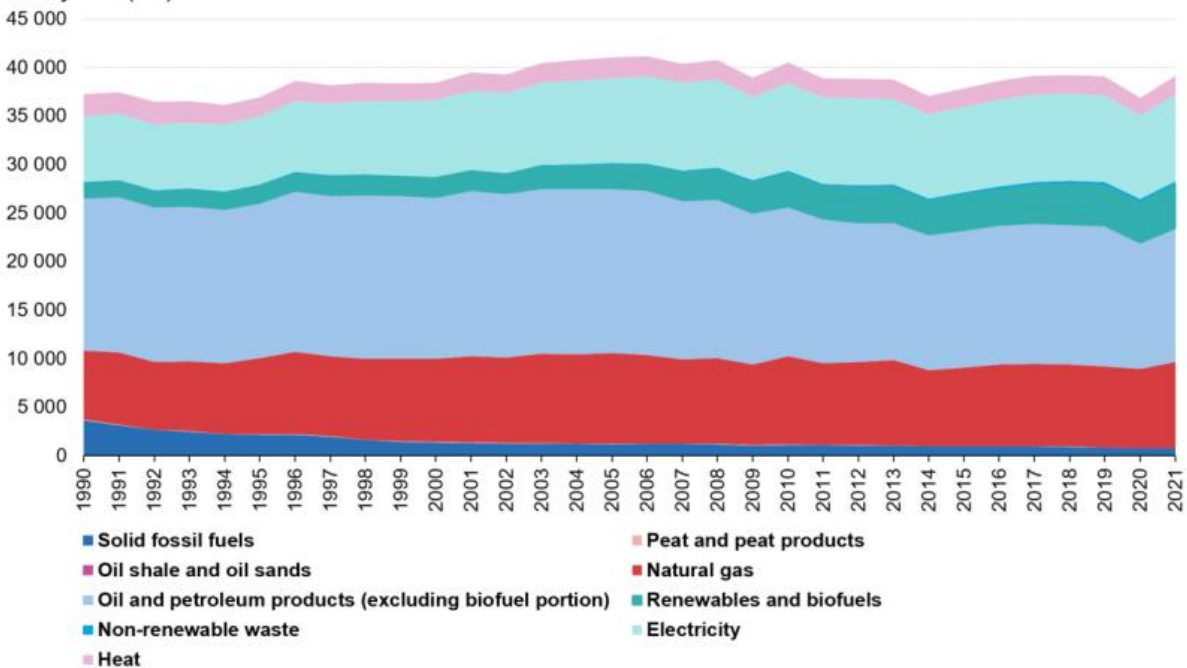
Πίνακας 1: Πρότυπα για σχεδιασμό και λειτουργία ανεμογεννητριών [20].	25
Πίνακας 2: Πρότυπα για υπεράκτιες ανεμογεννήτριες [20].	27
Πίνακας 3: Κατηγοριοποίηση ανέμου [20].	27
Πίνακας 4: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση ανεμογεννητριών [22].	30
Πίνακας 5: Κατανομή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από αιολικά πάρκα ανά περιοχή [22].	30

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι τελευταίες δεκαετίες συνοδεύονται με μία αύξηση της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1, μεταξύ του 1990 και 2021 η ποσότητα και το μερίδιο των στερεών ορυκτών καυσίμων στην κατανάλωση ενέργειας μειώθηκαν σημαντικά (από 9.6% το 1990 σε 3.6% το 2000, 2.8% το 2010 και 2.0% το 2021). Ωστόσο, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αύξησαν το μερίδιό τους στο σύνολο, από 4.3% το 1990 σε 5.3 % το 2000 και 8.8% το 2010, φθάνοντας τελικά το 11.8% το 2021. Το φυσικό αέριο παρέμεινε αρκετά σταθερό κατά την περίοδο αυτή, κυμαινόμενο από 18.8% (το 1990) έως 22.6% (το 2005 και το 2021). Το πετρέλαιο και τα προϊόντα πετρελαίου αντιπροσώπευαν το μεγαλύτερο μερίδιο (34.8%) στη διάρθρωση της τελικής κατανάλωσης ενέργειας το 2021, ακολουθούμενα από την ηλεκτρική ενέργεια (22.8%).

Final energy consumption by fuel, EU, 1990-2021

Petajoule (PJ)



Εικόνα 1: Κατανάλωση ενέργειας στην Ευρώπη [1].

Όπως αναφέρθηκε, η χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ολοένα και αυξάνεται τα τελευταία χρόνια. Στην παρούσα εργασία, θα μελετηθεί μία υποκατηγορία των ΑΠΕ, αυτή της αιολικής ενέργειας. Τα αιολικά πάρκα είναι ένα σύστημα αποτελούμενο από πολλές ανεμογεννήτριες και όπως είναι γνωστό, η απόδοση αυτού του συστήματος μπορεί να μεγιστοποιηθεί με την κατάλληλη επιλογή των παραμέτρων που το χαρακτηρίζουν. Εκτός

των παραμέτρων αυτών η αποτίμηση των χαρακτηριστικών του περιβάλλοντος στο οποίο αυτά λειτουργούν (άνεμος, υψόμετρο, πυκνότητα αέρα, ύπαρξη ανώμαλου εδάφους κτλ.) είναι μία συνθήκη η οποία πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σοβαρά καθ' όλη την διαδικασία σχεδιασμού.

Όλα τα παραπάνω αποτέλεσαν έμπνευση για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας, η οποία έχει ως κύριο σκοπό την διερεύνηση μεγιστοποίησης της αποδοτικότητας ενός αιολικού πάρκου ως προς την επιλογή της τοποθεσίας του αλλά και της μικροχωροθέτησης των ανεμογεννητριών στο πάρκο. Όπως είναι αναμενόμενο, η εργασία πρέπει να περιέχει τα κατάλληλα κεφάλαια, τα οποία περιγράφουν με λεπτομέρεια όλες τις πτυχές τις οποίες πρέπει να αναλυθούν έτσι ώστε να είναι δυνατή η επίτευξη του παραπάνω στόχου.

Αρχικά γίνεται μία εισαγωγή στις πιο σημαντικές μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας καθώς και στα πλεονεκτήματα τα οποία αυτές παρέχουν, δίνοντας μεγαλύτερη έμφαση στην αιολική. Επίσης, σημαντική κρίνεται η παράθεση στατιστικών χρήσης τόσο στην Ευρωπαϊκή Ένωση όσο και στην χώρα μας για να γίνει αντιληπτή η συνολική ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται καθώς και το ποσοστό αυτής που καλύπτεται από τις ΑΠΕ.

Στην συνέχεια, γίνεται μία ιστορική αναδρομή ως προς την χρήση των ανεμογεννητριών παρουσιάζοντας τα πρώτα συστήματα. Ακολουθώντας, παρατίθεται μία λεπτομερής περιγραφή τους ως μεμονωμένα στοιχεία, αναλύοντας τις υποκατηγορίες που τις περιγράφουν και την αρχή λειτουργίας τους. Έπειτα, από το μεμονωμένο στοιχείο μίας ανεμογεννήτριας γίνεται περιγραφή ενός συστήματος από ανεμογεννήτριες δηλαδή ενός αιολικού πάρκου. Παρουσιάζονται τα σημαντικότερα σημεία που περιγράφουν την υποδομή ενός πάρκου εστιάζοντας στα πιο σημαντικά για την απρόσκοπτη λειτουργία του.

Έχοντας λάβει υπόψη όλα τα παραπάνω, μπορεί να γίνει μία λεπτομερής ανάλυση σχετικά με το αντικείμενο της εργασίας που είναι η βέλτιστη επιλογή της θέσης ενός αιολικού πάρκου μακροσκοπικά στο κεφάλαιο 3, όπου, παρουσιάζονται τα στάδια χωροθέτησης και αναλύονται διεξοδικά.

Στην συνέχεια, κρίσιμη σχεδιαστική παράμετρος για την βέλτιστη απόδοση του συστήματος είναι και η μικροχωροθέτηση η οποία παρουσιάζεται στο τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας. Ακολουθεί μία περιγραφή των παραμέτρων που επιδρούν άμεσα στην μικροχωροθέτηση (απόρους ανεμογεννήτριας, τραχύτητα εδάφους) ακολουθώντας μερικά παραδείγματα από επιστημονικές δημοσιεύσεις.

Κλείνοντας, περιγράφονται τα συμπεράσματα τα οποία προέκυψαν από την εργασία και περιγράφουν τον κύριο σκοπό της εργασίας που είναι να βοηθήσει τον αναγνώστη να αντιληφθεί την σημαντικότητα της χωροθέτησης τόσο με μακρο- αλλά και μικρο-τάξη μεγέθους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

1.1 Εισαγωγή

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), ή νέες πηγές ενέργειας ή πράσινη ενέργεια είναι μορφές εκμεταλλεύσιμης ηλεκτρικής ενέργειας η οποία προέρχεται από ποικίλες φυσικές διαδικασίες, όπως ο άνεμος, ο ήλιος, η γεωθερμία και άλλες. Πιο συγκεκριμένα, με βάση την οδηγία 2009/28/ΕΚ της ΕΕ, ως ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές θεωρείται η αιολική, ηλιακή, αεροθερμική, γεωθερμική, υδροθερμική και ενέργεια των ωκεανών, υδροηλεκτρική, από βιομάζα, από τα εκλυόμενα στους χώρους υγειονομικής ταφής αέρια, από αέρια μονάδων επεξεργασίας λυμάτων και από βιοαέριο. [2]

Ο όρος «ήπιες» περιγράφει δυο βασικά χαρακτηριστικά τους. Αρχικά, για την εκμετάλλευσή τους δεν χρειάζεται κάποια ενεργητική διαδικασία, όπως εξόρυξη ή άντληση, αλλά απλώς η εκμετάλλευση της ήδη υπάρχουσας ενέργειας στη φύση. Επιπλέον, πρόκειται για μία μορφή ενέργειας φιλική προς το περιβάλλον, με μηδενικό αποτύπωμα.

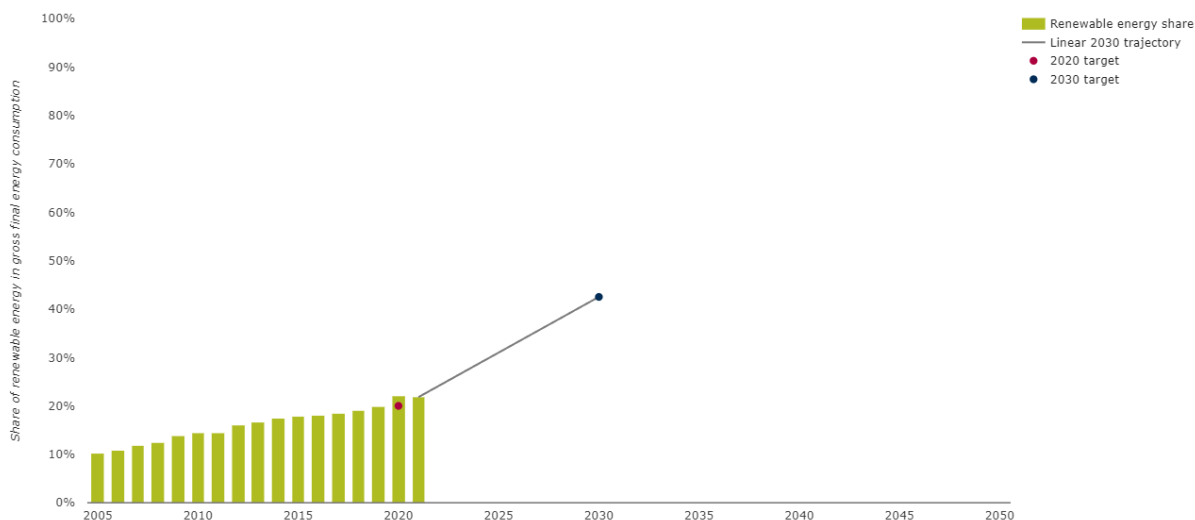
Ως «ανανεώσιμες πηγές» ορίζονται οι εναλλακτικές των συμβατικών πηγών ενέργειας που έχουν βάση τον άνθρακα. Ως αποτέλεσμα, οι ΑΠΕ έχουν προταθεί ως λύση στην επαναλαμβανόμενη εξάντληση των (μη ανανεώσιμων) συμβατικών αποθεμάτων ορυκτών καυσίμων.

1.2 Στατιστικά και στόχοι χρήσης ΑΠΕ

Όπως παρουσιάζεται και στην Εικόνα 2, η χρήση των ΑΠΕ έχει αυξηθεί ραγδαία τα τελευταία χρόνια. Είναι εμφανές ότι ο στρατηγικός στόχος που έχει τεθεί από την Ευρωπαϊκή ένωση για το έτος 2020 έχει επιτευχθεί με επιτυχία. Για το έτος 2021, το 22% της ενέργειας που καταναλώθηκε στην ΕΕ προήλθε από ΑΠΕ και είναι στα ίδια ποσοστά με το προηγούμενο έτος. Η κατανάλωση ΑΠΕ αυξήθηκε σε απόλυτες τιμές το 2021, λόγω της εκτεταμένης χρήσης τους στην θέρμανση, καθώς και της αυξημένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ηλιακή και αιολική ενέργεια. Ωστόσο, η αυτή η αύξηση επικαλύφθηκε από την ταχεία ανάκαμψη των συμβατικών πηγών ενέργειας μετά την πανδημία COVID-19.

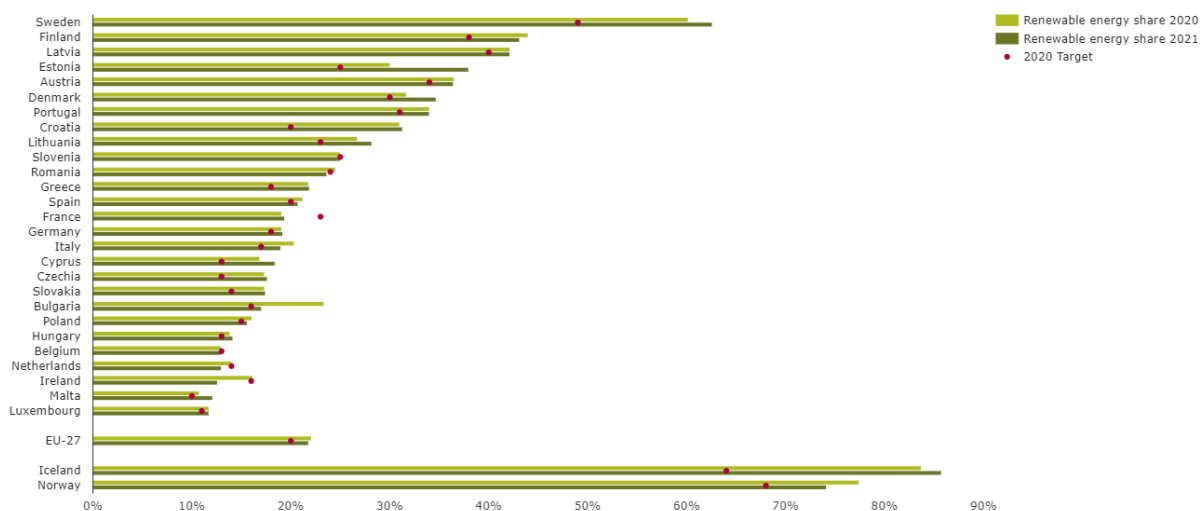
Με βάση τα [3], το μεγαλύτερο τμήμα στην παραγωγή ενέργειας με χρήση ΑΠΕ αποτελείται από την στερεή βιομάζα, η οποία χρησιμοποιείται ευρέως στη θέρμανση και τη βιομηχανία και αποτελεί το 41% του συνολικού ποσού για το έτος 2021. Ακολουθεί η αιολική ενέργεια

(13%), η υδροηλεκτρική ενέργεια (12%), τα υγρά βιοκαύσιμα (8%) και το βιοαέριο (6%). Οι αντλίες θερμότητας και τα ηλιακά φωτοβολταϊκά αν και καταλαμβάνουν χαμηλό ποσοστό (λιγότερο από 6%) παρουσιάζουν την μεγαλύτερη αύξηση, περισσότερο από 13% μεταξύ 2020 και 2021.



Εικόνα 2: Χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην Ευρώπη, στόχοι για το μέλλον [3].

Σε γενικές γραμμές, το ποσοστό ενέργειας προερχόμενο από ΑΠΕ πρέπει να έχει αυξητική τάση. Βέβαια, η επίτευξη του νέου στόχου (42.5%) για το 2030 θα σημάνει τριπλασιασμό του ρυθμού ανάπτυξης των ΑΠΕ κάτι που απαιτεί βαθύ μετασχηματισμό του ενεργειακού συστήματος.



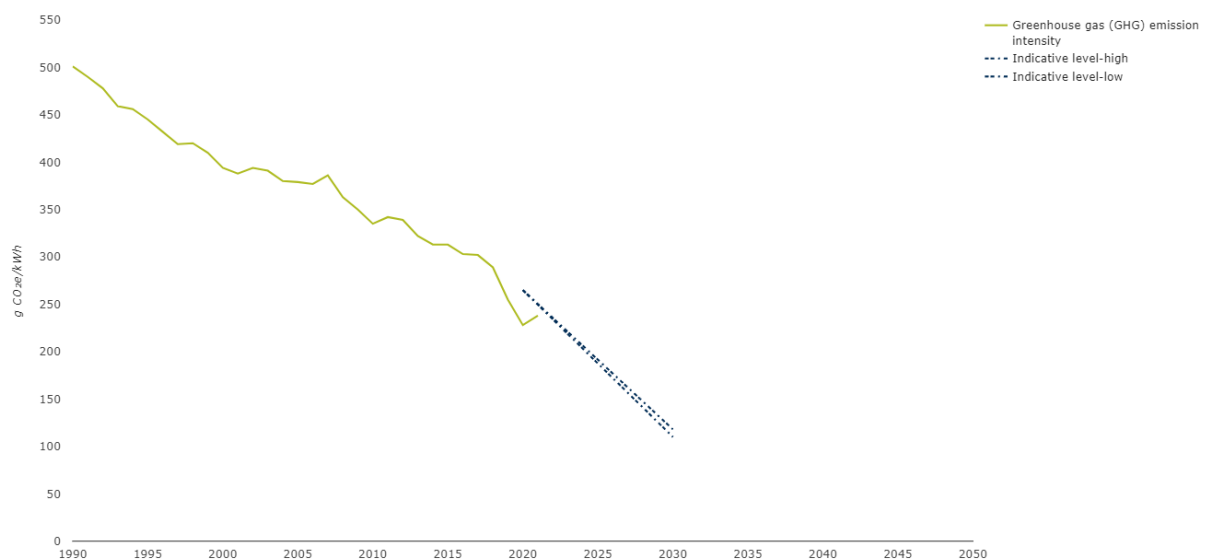
Εικόνα 3: Χρήση ΑΠΕ στην Ευρώπη ανά χώρα για τα έτη 2020 και 2021 [3].

Στην Εικόνα 3 είναι εμφανές ότι η Σουηδία, η Φινλανδία και η Λετονία είναι τα κράτη μέλη με το υψηλότερο ποσοστό χρήσης ΑΠΕ για το έτος 2021 λόγω της παραγωγής ενέργειας με

χρήση υδροηλεκτρικής ενέργειας και ευρεία χρήση στερεών βιοκαυσίμων. Το Λουξεμβούργο και η Μάλτα ανέφεραν τη χαμηλότερη χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αντιπροσωπεύοντας λιγότερο από το 12% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας.

Μόλις 15 από τα 27 κράτη μέλη της ΕΕ αύξησαν τα μερίδια ενέργειας προερχόμενα από ανανεώσιμες πηγές για τα έτη 2020 και 2021. Μεγαλύτερη αύξηση παρατηρήθηκε από την Εσθονία και τη Δανία, έχοντας αυξήσει το μερίδιό τους στις ΑΠΕ κατά περισσότερες από 3 ποσοστιαίες μονάδες. Αντίστροφα, τα ποσοστά χρήσης ΑΠΕ της Βουλγαρίας και της Ιρλανδίας μειώθηκαν κατά περισσότερο από 3 ποσοστιαίες μονάδες. Ωστόσο, θα πρέπει να τονιστεί, ότι οι αλλαγές για τις τέσσερις αυτές χώρες οφείλονται κυρίως σε λογιστικές διαδικασίες (π.χ. στατιστική μεταφορά ανανεώσιμης ενέργειας μεταξύ χωρών) και όχι σε πραγματικές αλλαγές στην κατανάλωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εντός της ΕΕ επίκειται να επηρεάσει δραστικά στην κλιματική αλλαγή και να αποτελέσει κύριο παράγοντα για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας της ΕΕ έως το 2050, σύμφωνα με πρόσφατα σενάρια. Στην Εικόνα 4 παρουσιάζεται η ένταση των αερίων που επιδρούν άμεσα στο φαινόμενο του θερμοκηπίου προερχόμενα από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

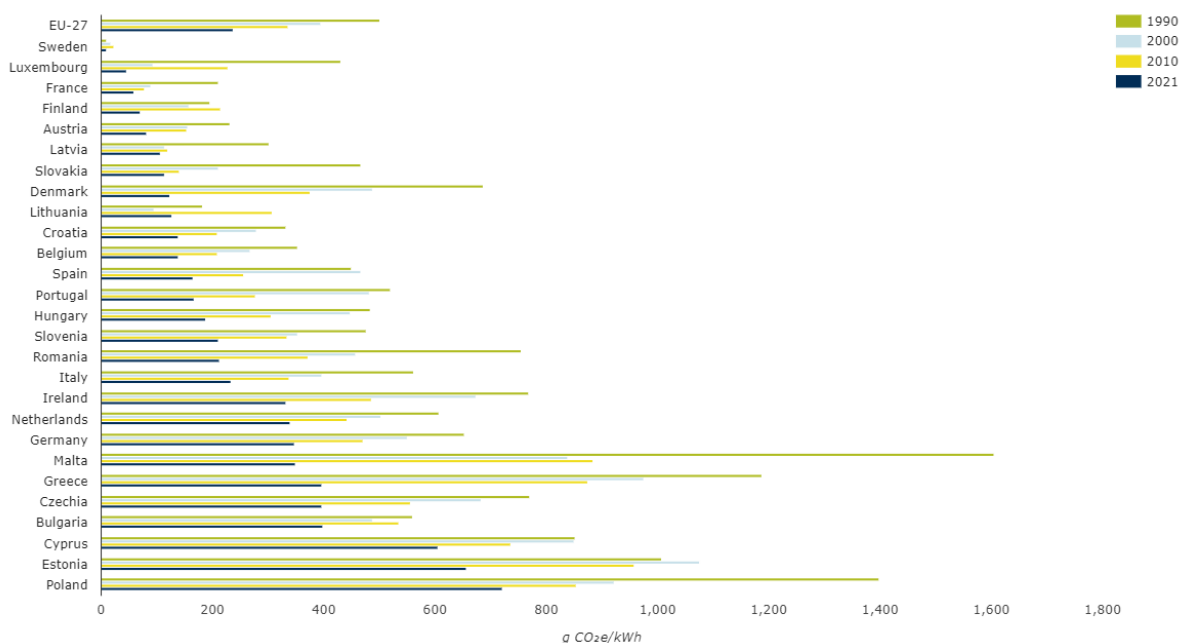


Εικόνα 4: Ένταση εκπομπών αερίων θερμοκηπίου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη [4].

Παρατηρείται ότι για το έτος 2021, οι εκπομπές είναι μειωμένες κατά 52% σε σχέση το 1990, αλλά αυξημένες 4% σε σχέση με το 2020, λόγω της αύξησης της επιχειρηματικής δραστηριότητας μετά την πανδημία COVID-19. Η αύξηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου για το 2021 σημειώθηκε λόγω μιας μικρής (1%) αύξησης της παραγωγής

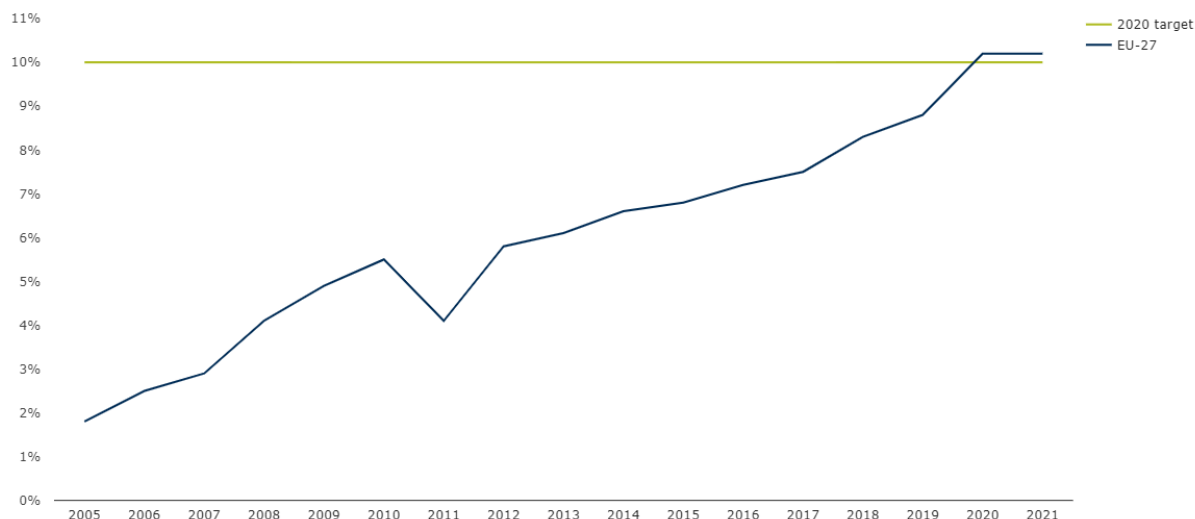
ενέργειας από ΑΠΕ το 2021, ενώ η παραγωγή ενέργειας με συμβατικές μεθόδους αυξήθηκε κατά 19% στο πλαίσιο της αύξησης της τιμής πώλησης του φυσικού αερίου. Μέχρι το 2010, η βελτίωση της αποδοτικότητας και η μείωση του αποτυπώματος συμβατικών μεθόδων παραγωγής ενέργειας έπαιξε τον πιο σημαντικό ρόλο στην μείωση των εκπομπών. Από το 2010, η μείωση οφείλεται σχεδόν αποκλειστικά στην μετάβαση από τα ορυκτά καύσιμα στα ανανεώσιμα καύσιμα στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Για να μειωθούν περαιτέρω οι εκπομπές κατά 55 % έως το 2030 στην ΕΕ και να επιτευχθεί ουδετερότητα έως το 2050, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε ολόκληρη την ΕΕ πρέπει να γίνεται εξολοκλήρου από ΑΠΕ. Στην Εικόνα 4 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι προβλέψεις που θα ήταν συνεπείς με τους στόχους της ΕΕ.

Όπως είναι λογικό, το ποσοστό εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου είναι διαφορετικό από χώρα σε χώρα (Εικόνα 5). Το 2021, η Πολωνία, η Εσθονία, η Κύπρος και η Βουλγαρία κατείχαν τα υψηλότερα ποσοστά εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου εντός της ΕΕ.



Εικόνα 5: Ένταση εκπομπών αερίων θερμοκηπίου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη, ανά χώρα [4].

Σε έξι επιπλέον κράτη μέλη, τα ποσοστά εκπομπών είναι υψηλότερα σε σχέση με τον μέσο όρο της ΕΕ (Τσεχία, Ελλάδα, Μάλτα, Γερμανία, Κάτω Χώρες και Ιρλανδία). Τα ποσοστά εκπομπών για την Σουηδία, το Λουξεμβούργο και τη Γαλλία, ήταν τα χαμηλότερα στην ΕΕ λόγω της χρήσης ΑΠΕ αλλά και πυρηνικής ενέργειας. Συγκριτικά με την περίοδο 1990-2021, τα υψηλότερα ποσοστά μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου καταγράφηκαν στο Λουξεμβούργο (89%), τη Δανία (82%), τη Μάλτα (78%) και τη Σλοβακία (76%).



Εικόνα 6: Χρήση ΑΠΕ στις μεταφορές στην Ευρώπη [5].

Η Εικόνα 6 παρουσιάζει την χρήση ΑΠΕ στις μεταφορές για τα έτη 2005-2021. Το 2009, η οδηγία (ΑΠΕ· 2009/28/ΕΚ) έθεσε τον στόχο, σύμφωνα με τον οποίο το 10% της συνολικής ενέργειας που χρησιμοποιείται στις μεταφορές θα πρέπει να προέρχεται από ΑΠΕ έως το 2020. Ο στόχος που τέθηκε για το 2020, επιτεύχθηκε με την χρήση βιοκαυσίμων με ποσοστό χρήσης 10,2%. Το 2005, το ποσοστό ήταν κάτω από το 2%. Αξίζει να τονιστεί ότι η χρήση ηλεκτρικών οχημάτων για οδικές και σιδηροδρομικές μεταφορές έχει διαδραματίσει μικρό ρόλο στην πρόοδο που έχει σημειωθεί μέχρι στιγμής.

Σε εθνικά επίπεδα, η ύπαρξη στατιστικών στοιχείων για συνεχόμενα έτη είναι περιορισμένη. Στην Εικόνα 7 παρουσιάζονται τα στατιστικά χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας για το έτος 2020.



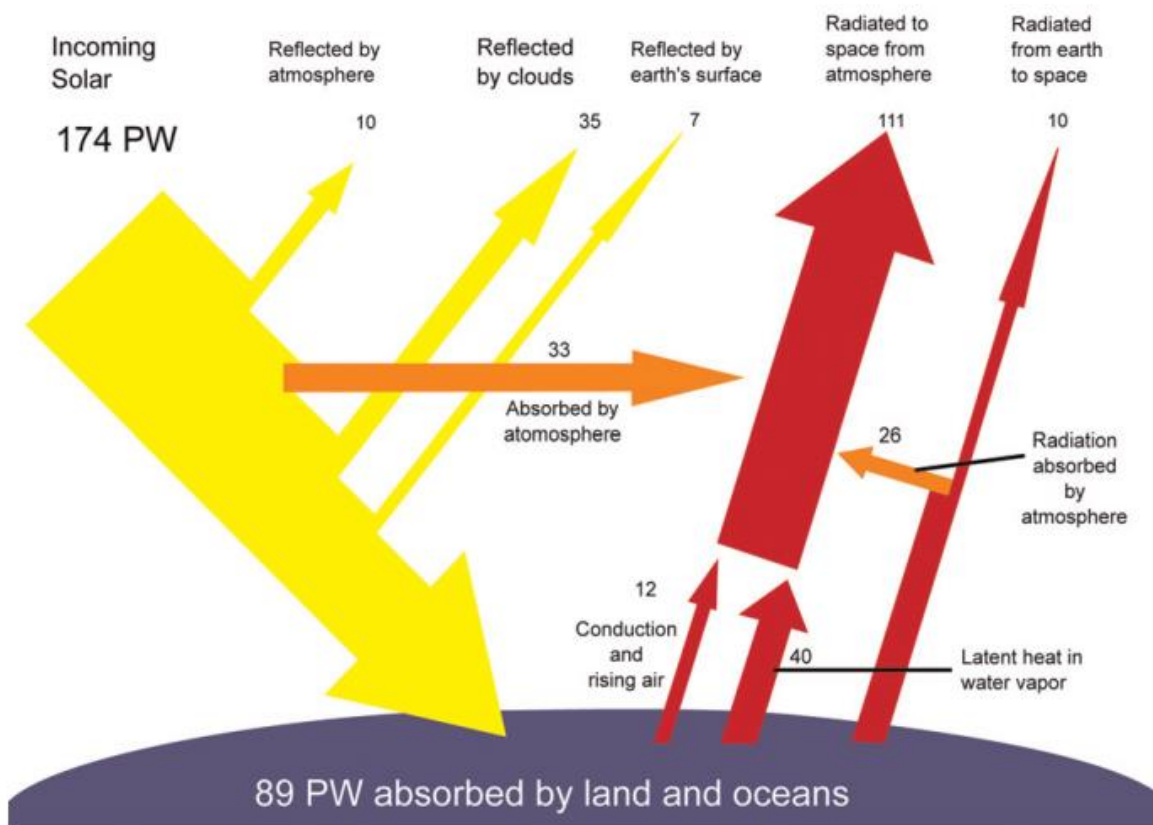
Εικόνα 7: Στατιστικά χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας για το έτος 2020 [6].

Το ενεργειακό ισοζύγιο διαμορφώθηκε ως εξής: 29% ΑΠΕ, 36% φυσικό αέριο, 11% λιγνίτης, 6% υδροηλεκτρικά και 18% εισαγωγές. Αξίζει να σημειωθεί ότι με βάση την Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ), έχει σημειωθεί αύξηση του μεριδίου των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή σε σχέση με το 2014.

1.3 Συνοπτική περιγραφή κύριων μορφών ΑΠΕ

1.3.1 Ηλιακή ενέργεια

Υπολογίζεται ότι η Γη δέχεται 174 PetaWatts ηλιακής ακτινοβολίας στην ανώτερη ατμόσφαιρα προερχόμενη από τον ήλιο [7]. Περίπου το 30% (52 PetaWatts) αντανακλάται πίσω στο διάστημα, ενώ τα υπόλοιπα 121 PetaWatts, απορροφούνται από τα σύννεφα, τους ωκεανούς και τις μάζες της γης. Συνολικά 89 PetaWatts απορροφούνται αρχικά από την επιφάνεια της γης, στεριά και θάλασσα. Ένα μικρό ποσοστό της παραπάνω ενέργειας αξιοποιείται για παραγωγή ενέργειας.



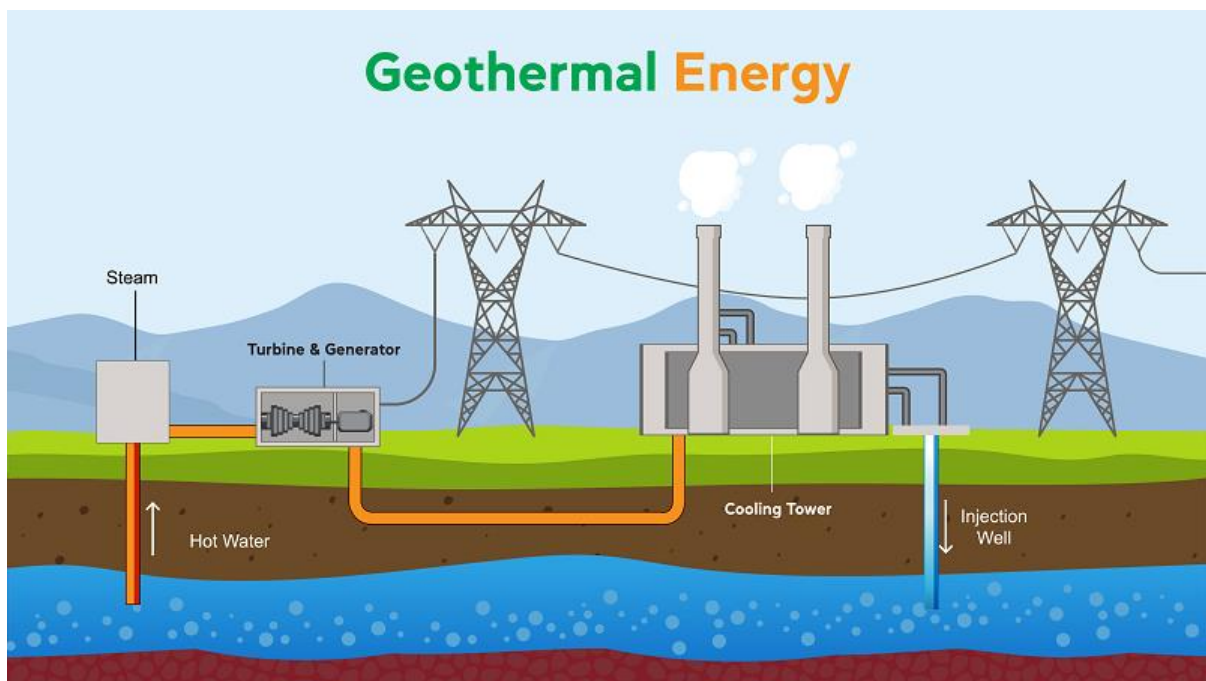
Εικόνα 8: Διάχυση ηλιακής ενέργειας [7].

Για παράδειγμα, οι ηλιακικοί θερμοσίφωνες, έχουν τη δυνατότητα να απορροφήσουν την ηλιακή ενέργεια και μέσω αυτής να θερμάνουν νερό για οικιακή και βιομηχανική χρήση. Επιπλέον, τα φωτοβολταϊκά συστήματα μετατρέπουν άμεσα την ηλιακή ενέργεια σε

ηλεκτρική. Με αυτόν τον τρόπο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολλές εφαρμογές για κάλυψη ενεργειακών αναγκών σε μικρή αλλά και μεγάλη κλίμακα. Στην χώρα μας, λόγω της ύπαρξης ηλιοφάνειας για όλο τον χρόνο, τα φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν υψηλό βαθμό απόδοσης [8].

1.3.2 Γεωθερμική ενέργεια

Η γεωθερμική ενέργεια (Εικόνα 9) αποτελεί μία μορφή ΑΠΕ, που παράγεται από την εκμετάλλευση του υπόγειου γεωθερμικού δυναμικού. Έχει μηδαμινό περιβαλλοντικό αποτύπωμα και μπορεί με τις σημερινές τεχνολογικές δυνατότητες να παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Τεχνικά, απαραίτητη προϋπόθεση για να θεωρηθεί ότι ένα υπόγειο θερμό ρευστό διαθέτει γεωθερμικό δυναμικό, πρέπει η θερμοκρασία του να υπερβαίνει τους 30 βαθμούς Κελσίου. Σε αντίθετη περίπτωση, ενεργειακά συστήματα θέρμανσης ή ψύξης χώρων μπορούν να αξιοποιήσουν το χαμηλό γεωθερμικό δυναμικό (θερμοκρασία < 30 βαθμών Κελσίου) υπογείων στρωμάτων υπεδάφους και νερού.



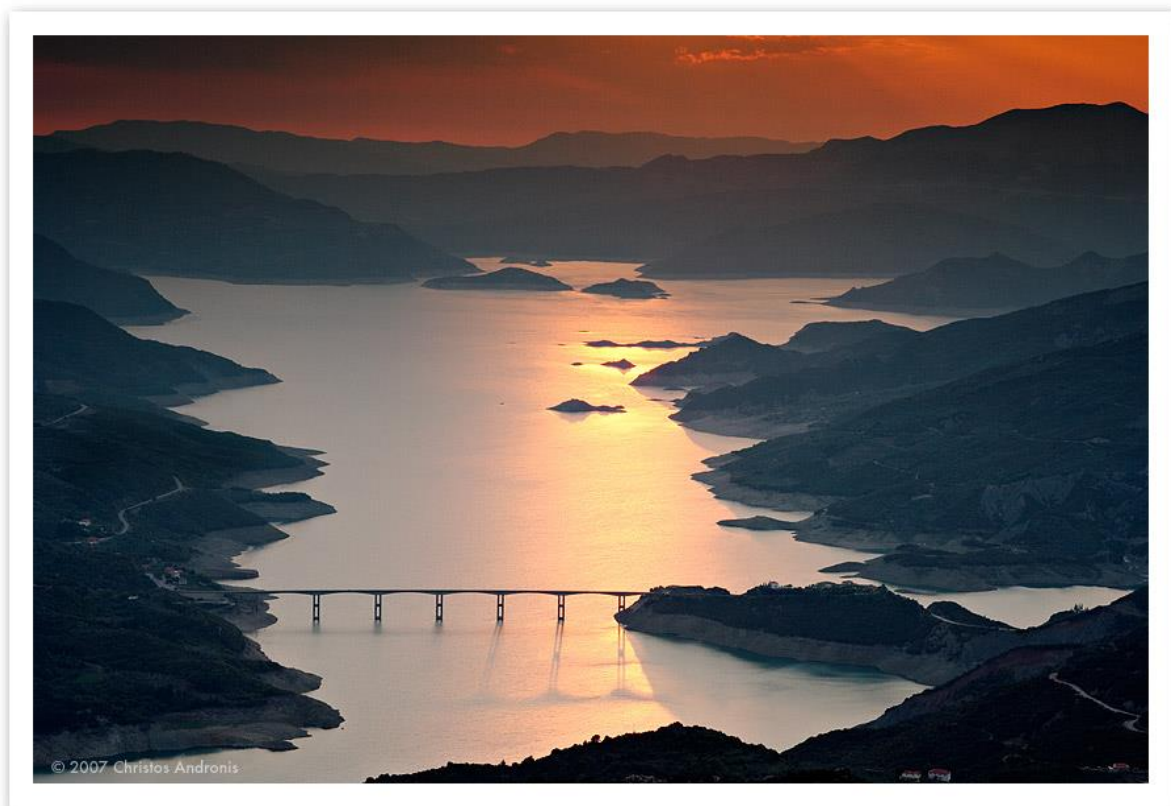
Εικόνα 9: Γεωθερμική ενέργεια [9].

Βασικές χρήσεις παγκοσμίως έχουν να κάνουν με την θέρμανση αγροτικών εγκαταστάσεων, ξήρανση γεωργικών προϊόντων, αφαλάτωση νερού, άλλες ήπιες βιομηχανικές χρήσεις αλλά και για τηλεθέρμανση κτιρίων, οικισμών, χωριών ή και πόλεων με την τελευταία να είναι η κύρια χρήση στην χώρα μας. Η χρήση της γεωθερμικής ενέργειας στην ηλεκτροπαραγωγή

είναι διαρκώς αυξανόμενη και αποτελεί αντικείμενο έρευνας για την αξιοποίηση και στην χώρα μας [10].

1.3.3 Ενέργεια υδάτων

Αποτελούνται από υδροηλεκτρικά εργοστάσια, τα οποία είναι από τις πιο διαδεδομένες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί, μετατρέπουν την δυναμική ενέργεια που έχει το τρεχούμενο νερό σε ηλεκτρική ενέργεια. Έχουν ελάχιστο ενεργειακό αποτύπωμα στο περιβάλλον χωρίς να ρυπαίνουν το περιβάλλον. Επιπλέον, με χρήση διπλών ταμιευτήρων νερού σε διαφορετικά υψόμετρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αποθήκες ενέργειας, χρησιμοποιώντας αντλίες για την μεταφορά νερού σε ώρες χαμηλής ζήτησης (για παράδειγμα το βράδυ) και στην αυξημένη παραγωγή ενέργειας όταν η ζήτηση είναι αυξημένη. Στους ταμιευτήρες αποθήκευσης του νερού παρατηρείται ανάπτυξη διαφόρων ειδών της χλωρίδας και τις πανίδας και αισθητικά βελτιώνουν την περιοχή που δημιουργούνται και αποτελούν πόλο έλξης επισκεπτών. Ωστόσο, πρέπει να αναφερθεί ότι λόγω των αναγκών σε έδαφος, πολλά χωριά αναγκάστηκαν να μετακινηθούν σε άλλες περιοχές, εγχείρημα δύσκολο για τους κάτοικους των περιοχών αυτών.



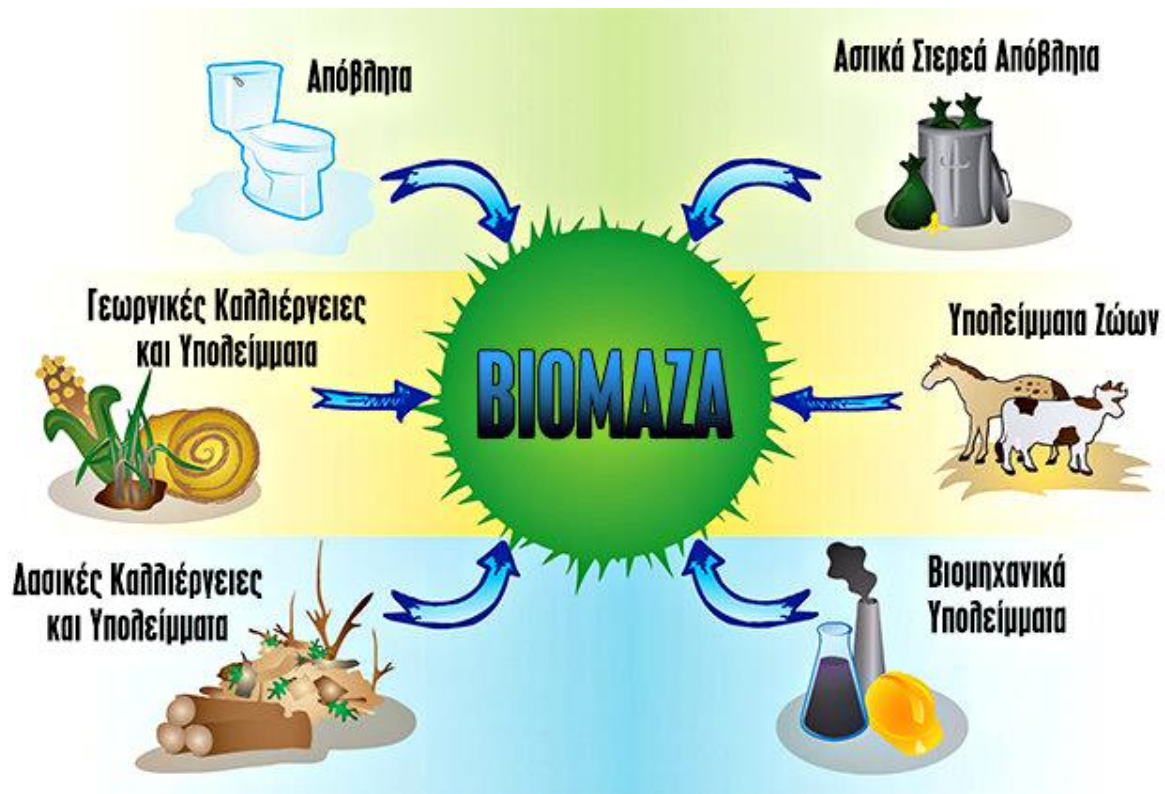
Εικόνα 10: Τεχνητή λίμνη Κρεμαστών [11].

Το μεγαλύτερο υδροηλεκτρικό εργοστάσιο στην χώρα μας βρίσκεται στην περιοχή των Κρεμαστών (Εικόνα 10) και κατασκευάστηκε το 1966 αποτελώντας την μεγαλύτερη τεχνητή λίμνη στην Ελλάδα. Υπάρχουν εγκατεστημένες 4 μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με συνολική ισχύ 440 MW. Το φράγμα έχει ύψος 153 μέτρα και σχηματίζει τεχνητή λίμνη 30.000 στρεμμάτων που μπορεί να χωρέσει 4,7 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα νερό. Αξίζει να σημειωθεί ότι χρειάστηκε να γίνει μετακίνηση περίπου 20 χωριών. Τα μόνα που δεν γκρεμίστηκαν κατά την μετεγκατάσταση είναι οι γέφυρες και οι εκκλησίες. Είναι το υψηλότερο χωμάτινο φράγμα της Ευρώπης και αποτελεί σημαντική πηγή ενέργειας για την χώρα μας [11].

1.3.4 Βιομάζα

Σύμφωνα με το ΦΕΚ 1450/2013 ένα προϊόν χαρακτηρίζεται ως βιομάζα αν είναι προϊόν βιολογικής προέλευσης (Εικόνα 11). Στην ουσία περιλαμβάνονται υλικά τα οποία αποτελούνται από φυτικές ύλες οποιουδήποτε τύπου, από τη γεωργία (άχυρα, ελαιοπυρήνες, κουκούτσια), τη δασοκομία (καυσόξυλα, πριονίδια), ζωικά απόβλητα (κοπριά) τη βιομηχανία τροφίμων καθώς και τα αστικά απορρίμματα, και μπορούν να μετατραπούν σε καύσιμο και να προσδώσουν το ενεργειακό τους περιεχόμενο με μορφή θερμότητας. Η βιομάζα χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας, ακόμα και για την παραγωγή υγρών βιοκαυσίμων. Σε ορισμένες περιπτώσεις, λόγω χάρη το ξύλο, δεν θα πρέπει να εκλύονται αλογονούχες ενώσεις ή βαρέα μέταλλα κατά την καύση, τα οποία είναι χημικά τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί κατά την επεξεργασία ή την συντήρηση.

Κύρια πλεονεκτήματα της χρήσης τους είναι το μηδαμινό αποτύπωμα στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, επειδή οι εκλύμενες ποσότητες του διοξειδίου κατά την καύση δεσμεύονται πάλι από τα φυτά για την δημιουργία της βιομάζας. Επίσης, η μη-ύπαρξη θείου κατά την καύση συνεπάγεται καμία επιβάρυνση στο φαινόμενο της όξινης βροχής. Κύρια μειονεκτήματα της χρήσης της, είναι η μη σταθερή προσφορά πρώτων υλών, κάτι που δυσχεραίνει την αποθήκευση, την επεξεργασία και την διανομή. Επιπλέον, το κόστος μίας παραγωγικής μονάδας βιομάζας είναι υψηλότερο σε σχέση με μία μονάδα παραγωγής συμβατικών καυσίμων [12].



Εικόνα 11: Πηγές βιομάζας [13].

1.3.5 Ενέργεια από θαλάσσια κύματα



Εικόνα 12: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από θαλάσσια κύματα [14].

Αρκετά μεγάλο ενδιαφέρον έχει παρουσιαστεί τα τελευταία χρόνια για την αξιοποίηση ενέργειας προερχόμενης από την θάλασσα. Υπάρχουν αρκετοί τρόποι αξιοποίησης της ενέργειας από την θάλασσα. Η κατηγοριοποίηση γίνεται λαμβάνοντας υπόψη την θέση της

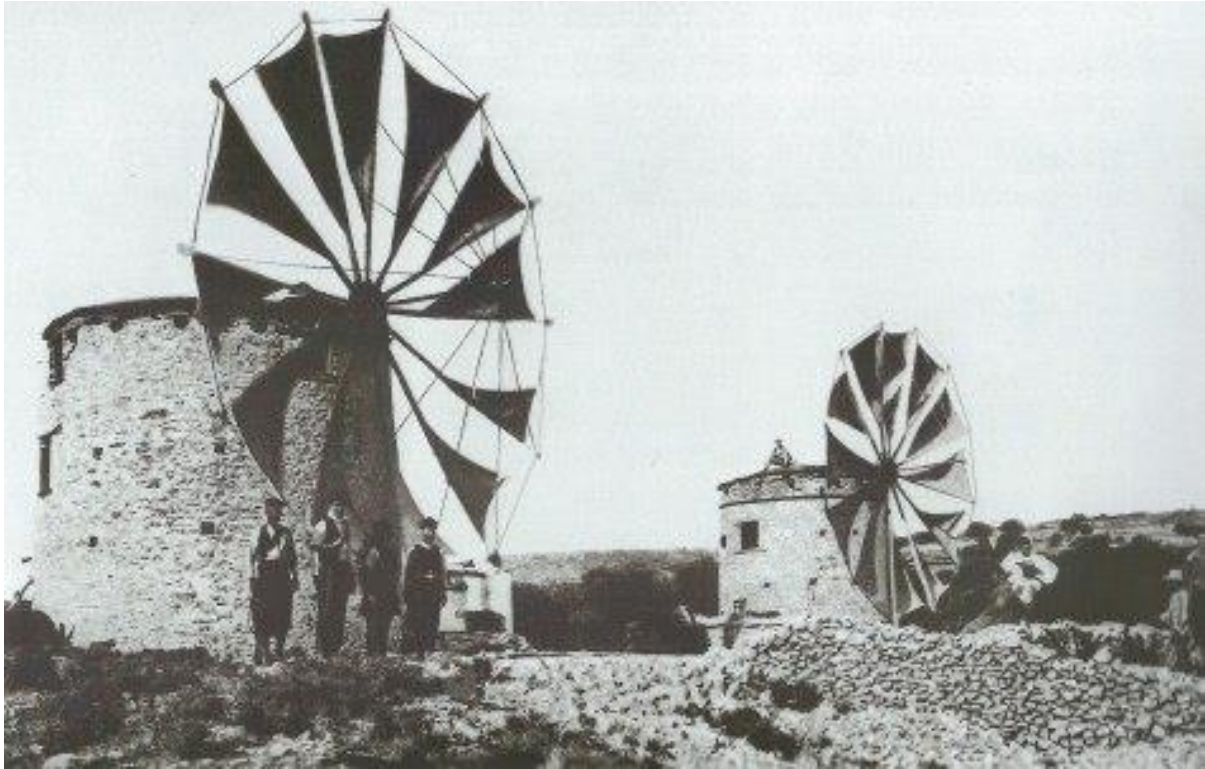
γεννήτριας ως προς την ακτή αλλά και την θέση της σε σχέση με την επιφάνεια του νερού. Μία τυπική διάταξη παρουσιάζεται στην

Εικόνα 12.

Η αρχή λειτουργίας βασίζεται στην διαφορά πίεσης μεταξύ της συσκευής και του κύματος. Το άνω μέρος του κυλίνδρου είναι κινούμενο. Όταν περάσει ένα κύμα, μετακινεί το κινούμενο μέρος το οποίο είναι συνδεδεμένο με μία γραμμική γεννήτρια η οποία παράγει ηλεκτρικό ρεύμα.

1.3.6 Αιολική ενέργεια

Η χρήση της ενέργειας του ανέμου από τον άνθρωπο αποτελεί μία πηγή ενέργειας από την αρχαιότητα. Χαρακτηριστικά παραδείγματα εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας είναι τα ιστιοφόρα και οι ανεμόμυλοι (Εικόνα 13). Στις μέρες μας, για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας χρησιμοποιούμε τις ανεμογεννήτριες (Α/Γ).



Εικόνα 13: Ανεμόμυλοι του 1914 στην Μυτιλήνη [15].

Οι ανεμογεννήτριες είναι συστήματα μετατροπής ενέργειας από την κινητική του ανέμου σε ηλεκτρική. Η μετατροπή αυτή γίνεται σε δύο βήματα. Στο πρώτο, μέσω της περωτής, γίνεται μετατροπή της ενέργειας του ανέμου σε μηχανική μέσω της περιστροφής της κύριας ατράκτου του συστήματος. Έπειτα, η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω μίας γεννήτριας.



Εικόνα 14: Αιολικό πάρκο ονομαστικής παραγωγής 63 MegaWatt στην Arizona των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής [16].

Το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται είτε καταναλώνεται άμεσα, είτε διοχετεύεται στο ηλεκτρικό δίκτυο για να καταναλωθεί αλλού. Στην περίπτωση που η παραγωγή υπερκαλύπτει την ζήτηση, η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τις ανεμογεννήτριες αποθηκεύεται για να χρησιμοποιηθεί αργότερα. Η αποθήκευση μπορεί να γίνει με δύο τρόπους, ανάλογα με το μέγεθος της παραγόμενης ενέργειας. Η χρήση μπαταριών είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας για μικρής κλίμακας, μη διασυνδεδεμένες στο κεντρικό δίκτυο μονάδες. Ο συνδυασμός των υδροηλεκτρικών εργοστασίων για την αποθήκευση ενέργειας είναι η κατάλληλη μέθοδος για την αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας μέσω της άντλησης ύδατος με χρήση ηλεκτρικής ενέργειας παραγόμενης από ανεμογεννήτριες και η ταμίευσή του σε τεχνητές λίμνες. Έτσι, όταν αυξηθεί η ζήτηση παράγεται ηλεκτρική ενέργεια με την χρήση του υδροηλεκτρικού εργοστασίου. Η χώρα μας διαθέτει εξαιρετικά πλούσιο αιολικό δυναμικό, σε αρκετές περιοχές της επικράτειας. Τα αιολικά πάρκα, αποτελούνται από συστοιχίες ανεμογεννητριών σε βέλτιστη διάταξη και χωροθέτηση για την καλύτερη δυνατή εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού.

1.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα χρήσης ΑΠΕ

Συνοψίζοντας από τα παραπάνω, τα πλεονεκτήματα μπορούν να παρουσιαστούν επιγραμματικά ως εξής:

- Αποτελούν ανεξάντλητες πηγές ενέργειας.
- Έχουν μηδενικό αποτύπωμα στο περιβάλλον.
- Μπορούν να εξυπηρετήσουν από μεγάλες έως μικρές ενεργειακές ανάγκες (για παράδειγμα στην περίπτωση ενός απομονωμένου νησιού).
- Έχουν χαμηλό λειτουργικό κόστος και μεγάλο προσδόκιμο ζωής των συστημάτων που τις αποτελούν.
- Συμβάλουν στην ενεργειακή αυτονομία μίας χώρας.

Ενώ για τα μειονεκτήματα:

- Χαρακτηρίζονται από χαμηλή πυκνότητα ισχύος σε σχέση με τους συμβατικούς τρόπους παραγωγής ενέργειας.
- Χρειάζονται λεπτομερείς μελέτες για την καταλληλότητα των περιοχών προς εφαρμογή (πχ. ύπαρξη ανέμου, ηλιοφάνειας κλπ.)
- Επίδραση στους κατοίκους της περιοχής, όπως παρουσιάστηκε στην περίπτωση της τεχνητής λίμνης των Κρεμαστών [11].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΚΑΙ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ

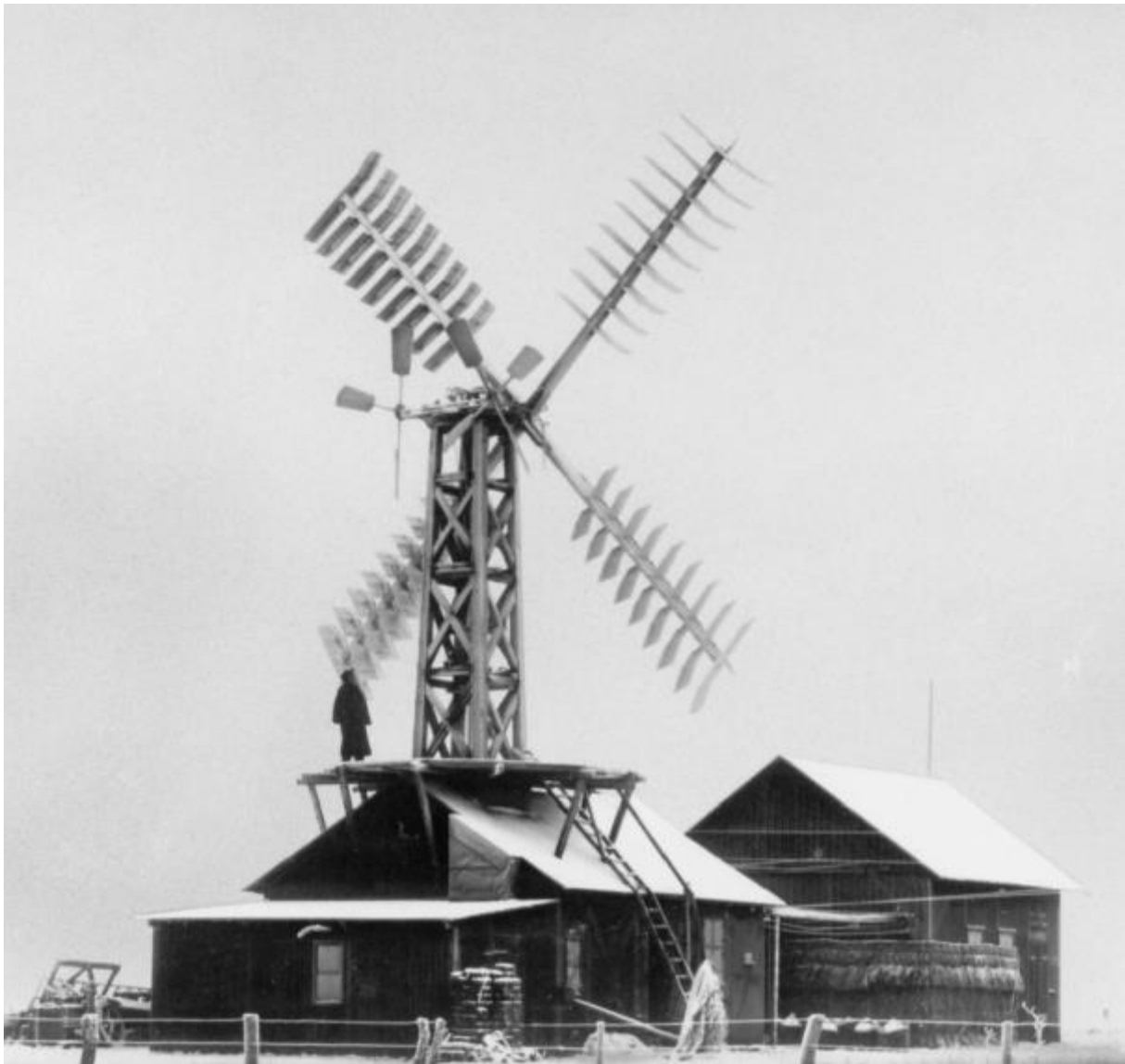
2.1 Ιστορική αναδρομή

Οι πρώτες αξιόπιστες πληροφορίες για την ύπαρξη ανεμόμυλων από ιστορικές πηγές προέρχονται από το 644 μ.Χ. [17]. Πρόκειται για ανεμόμυλους που βρίσκονται στην παραμεθόρια περιοχή του Σεϊστάν, στα περσικό-αφγανικά σύνορα. Μια μεταγενέστερη περιγραφή, συμπεριλαμβανομένου ενός σκίτσου, χρονολογείται από το έτος 945 και απεικονίζει ανεμόμυλο με κατακόρυφο άξονα περιστροφής ο οποίος εικάζεται ότι χρησιμοποιήθηκε για άλεση σιτηρών. Παρόμοιοι ανεμόμυλοι έχουν επιβιώσει στο Αφγανιστάν μέχρι σήμερα (Εικόνα 15). Παρόμοια συστήματα κατασκευάστηκαν σε όλο τον κόσμο από την Κίνα, την Ευρώπη αλλά και την Αμερική.



Εικόνα 15: Ανεμογεννήτρια κάθετου άξονα για άλεση σιτηρών, Αφγανιστάν [17].

Ωστόσο, έμφαση στην παρούσα εργασία δίνεται στα συστήματα παραγωγής ενέργειας. Η πρώτη ανεμογεννήτρια που είχε ως στόχο την παραγωγή ενέργειας από τον άνεμο σχεδιάστηκε από τον καθηγητή Poul La Cour του κέντρο εκπαίδευσης ενηλίκων στο Askov της Δανίας. Η κυβέρνηση της Δανίας, αναζητούσε τρόπους ηλεκτροδότησης απομακρυσμένων περιοχών της Δανίας. Ο La Cour κατασκεύασε μια πειραματική ανεμογεννήτρια που κινούσε ένα κλασικό «δυναμό» το 1891 (Εικόνα 16). Αξίζει να σημειωθεί ότι αμέσως μετά την κατασκευή της ανεμογεννήτριας, εμφανίστηκε το πρόβλημα της αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας. Ως λύση, χρησιμοποιήθηκε η ηλεκτρόλυση, μία μέθοδος που παράγει υδρογόνο με την χρήση συνεχούς ρεύματος. Έτσι, η αποθήκευση του υδρογόνου σημαίνει αποθήκευση ενέργειας. Από το 1885 έως το 1902, λαμπτήρες αερίου χρησιμοποιώντας αυτή τη μέθοδο φώτιζαν τους χώρους του σχολείου στο Askov [17].

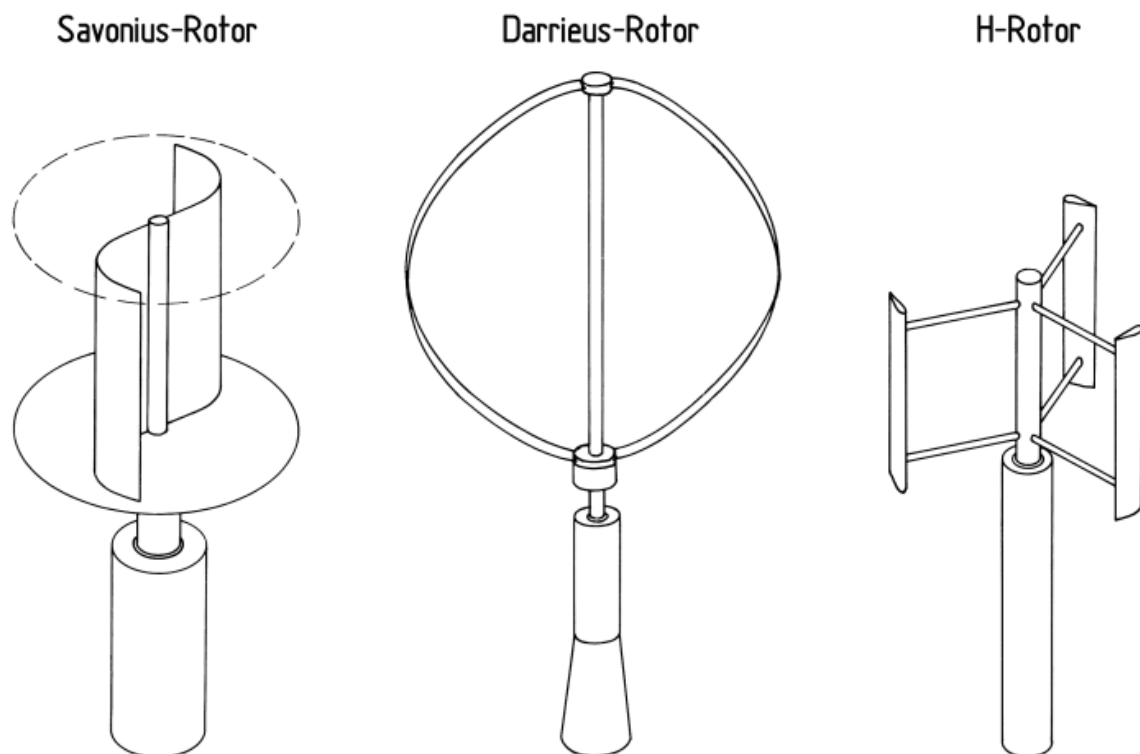


Εικόνα 16: Η πρώτη ανεμογεννήτρια για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [17].

Τα επόμενα χρόνια ο La Cour επέκτεινε την έρευνά του στο με κύριο σκοπό να δημιουργήσει έναν πρότυπο σταθμό δοκιμών για ανεμογεννήτριες. Ήταν ο πρώτος που πραγματοποίησε δοκιμές σε αεροδυναμική σήραγγα, την οποία είχε κατασκευάσει ο ίδιος, και έστησε έναν δεύτερο, μεγαλύτερο σταθμό δοκιμών στο 1897. Το 1903 ο La Cour ίδρυσε την Ένωση Δανικής Αιολικής Ενέργειας Μηχανικοί (DVES).

2.2 Ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα περιστροφής

Ο παλαιότερος σχεδιασμός των ανεμογεννητριών περιλαμβάνει σχέδια κάθετου άξονα περιστροφής (Εικόνα 17). Οι ρότορες κάθετου άξονα κατασκευάστηκαν αρχικά ως ρότορες τύπου οπισθέλκουσας (Εικόνα 17, αριστερά) και ονομάζονται τύπου "Savonius". Αντίστοιχη εφαρμογή τέτοιου τύπου ρότορα είναι για στη μέτρηση ταχύτητας του ανέμου. Το 1925 ο Γάλλος μηχανικός Darrieus πρότεινε έναν νέο σχεδιασμό, μια πολλά υποσχόμενη ιδέα για την εφαρμογή στις σύγχρονες ανεμογεννήτριες (Εικόνα 17, μέση). Ο ονομαζόμενος ρότορας "Darrieus", αποτελείται από λεπίδες οι οποίες ακολουθούν ένα περίπλοκο μοτίβο περιστροφής γύρω από τον κάθετο άξονα. Ως αποτέλεσμα, το σχήμα των πτερυγίων είναι δύσκολα κατασκευάσιμο. Μια παραλλαγή του ρότορα τύπου "Darrieus" είναι ο "H-rotor" (Εικόνα 17, δεξιά). Αντί για περίπλοκα πτερύγια γίνεται χρήση ευθείων πτερυγίων που συνδέονται με τον άξονα με δοκούς.



Εικόνα 17: Τύποι ανεμογεννητριών κάθετου άξονα περιστροφής [18].

Όπως συμβαίνει και με τους ρότορες οριζόντιου άξονα, οι ρότορες κάθετου άξονα κατασκευάζονται κατά προτίμηση με δύο ή τρία πτερύγια. Κύρια πλεονεκτήματα των ανεμογεννητριών κάθετου άξονα είναι ότι τα μηχανικά και τα ηλεκτρικά συστήματα εδράζονται στο έδαφος κάνοντας την τοποθέτηση και την συντήρηση εξαιρετικά εύκολη. Επιπλέον, σε αυτά τα συστήματα δεν υπάρχει σύστημα εκτροπής της ανεμογεννήτριας. Ωστόσο ο χαμηλός λόγος στροφών-ταχύτητας, η αδυναμία αυτόματης εκκίνησης και ο δύσκολος έλεγχος της ισχύς εξόδου κάνουν αυτά τα συστήματα δύσκολα για εφαρμογή.

2.3 Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα περιστροφής

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα περιστροφής πραγματοποιούνται με σχεδιασμό που βασίζεται σε τύπο έλικας (Εικόνα 18). Αυτός ο σχεδιασμός, χρησιμοποιείται τόσο σε ευρωπαϊκές ανεμογεννήτριες όσο και σε αμερικάνικες. Ο σχεδιασμός ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα είναι ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος. Η υπεροχή αυτού του σχεδιασμού βασίζεται στα ακόλουθα στοιχεία:

- A. Η ταχύτητα του ρότορα και η ισχύς εξόδου μπορούν να ελεγχθούν άμεσα, ρυθμίζοντας την κλίση των πτερυγίων (έλεγχος βήματος πτερυγίων). Επιπλέον, ο έλεγχος κλίσης των πτερυγίων αποτελεί την πιο αποτελεσματική προστασία από τις ακραίες ταχύτητες ανέμου, ειδικά σε μεγάλες ανεμογεννήτριες.
- B. Είναι εφικτή η αεροδυναμική βελτιστοποίηση του σχήματος των πτερυγίων επιτυγχάνοντας υψηλότερη απόδοση.

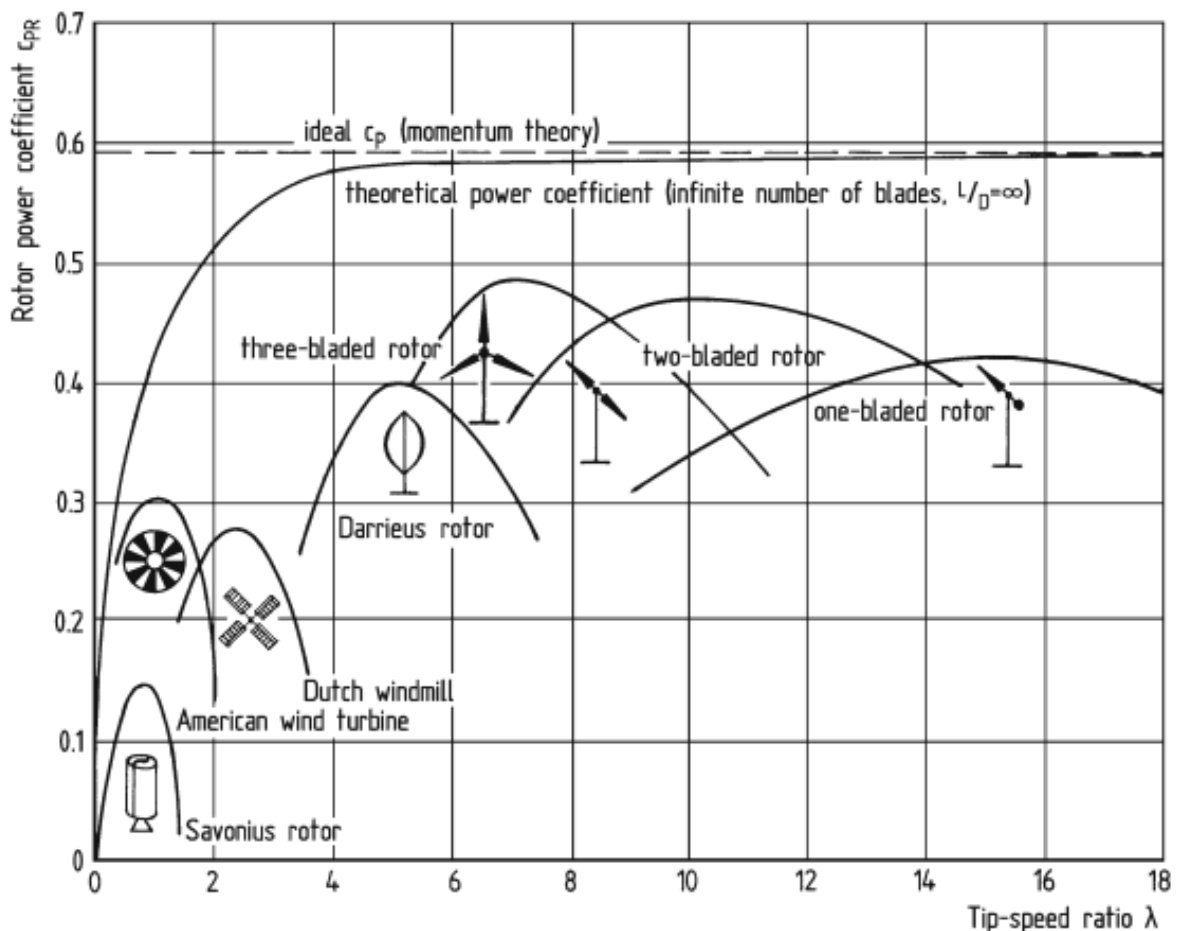
Τα παραπάνω πλεονεκτήματα είναι ο κύριος λόγος για τον οποίο οι περισσότερες ανεμογεννήτριες για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που έχουν κατασκευαστεί μέχρι σήμερα αποτελούνται από ρότορες οριζόντιου άξονα. Φυσικά υπάρχουν κατασκευαστικές παραλλαγές που διαφέρουν από την τυποποιημένη ιδέα παρουσιάζοντας απλοποιήσεις όπως η απουσία ελέγχου της γωνίας κλίσης των πτερυγίων, σε μικρού μεγέθους ανεμογεννήτριες.



Εικόνα 18: Ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα περιστροφής [19].

2.4 Σύγκριση τύπων άξονα / αριθμού πτερυγίων

Η Εικόνα 19 παρουσιάζει τις ποιοτικές διαφορές στους συντελεστές ισχύος για ρότορες διαφορετικών διαμορφώσεων συναρτήσει του λόγου ταχύτητας άκρου λ (tip speed ratio). Ο λόγος ταχύτητας άκρου ορίζεται από τον λόγο της εφαπτομένης συνιστώσας της ταχύτητας στο άκρο των πτερυγίων προς την ταχύτητα του αέρα.



Εικόνα 19: Συντελεστής ισχύος για διάφορους σχεδιασμούς [17].

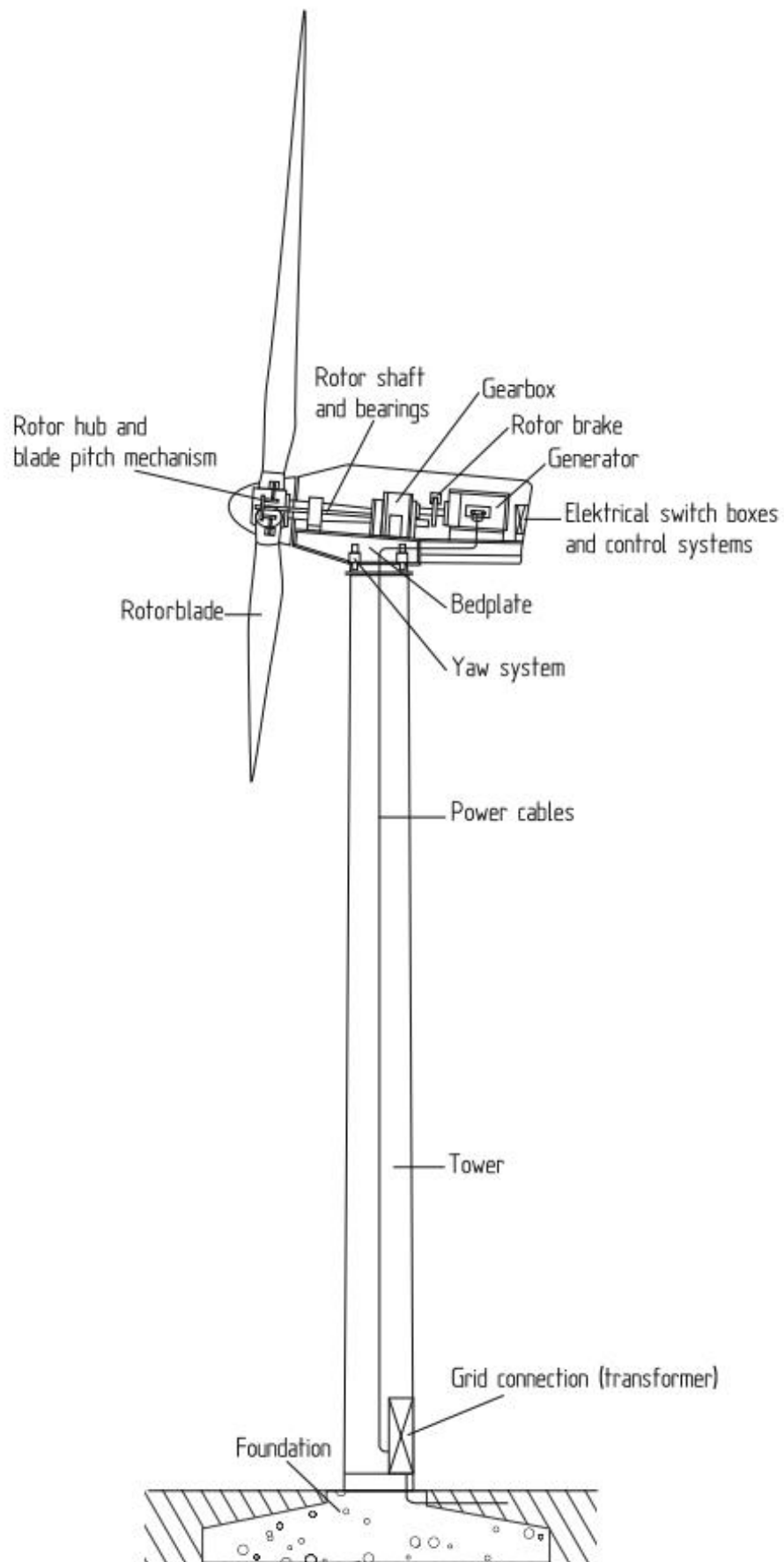
Η θεωρία ορμής από τον Betz παρέχει την ιδανική σταθερή ισχύ συντελεστή 0.593 που δεν εξαρτάται από τον λόγο λ . Λαμβάνοντας υπόψη τη γωνιακή ορμή του ρότορα δείχνει ότι ο συντελεστής ισχύος γίνεται συνάρτηση του λόγου ταχύτητας του άκρου. Επιπλέον, ο συντελεστής ισχύος παρουσιάζει μια βέλτιστη τιμή σε μια συγκεκριμένη τιμή ταχύτητας άκρου, με καλή προσέγγιση. Ωστόσο, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η παραπάνω θεωρία περιλαμβάνει αρκετές απλουστεύσεις που περιγράφουν την ισχύ περιγράφοντας την έλικα ως σχήμα δίσκου.

Οι τύποι οπισθέλκουσας περιγράφονται με χαμηλό λόγο ταχύτητας άκρου. Η ισχύς τους παράγεται κυρίως από την οπισθέλκουσα των επιφανειών που κινούνται από τον άνεμο και

τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά των ίδιων των πτερυγίων. Οι συντελεστές ισχύος είναι χαμηλοί, με τιμές περίπου 0.2 έως 0.3. Ωστόσο, με ταχύτερα περιστρεφόμενους ρότορες θα μπορούσε να επιτευχθεί υψηλότερη τιμή στον συντελεστή. Σύγχρονοι ρότορες με πτερύγια τελευταίας γενιάς επιτυγχάνουν μέγιστη τιμή συντελεστή ισχύος άνω του 0.5, πολύ κοντά στην ιδανική τιμή του Betz. Είναι εμφανές ότι αν και με την αύξηση των αριθμών των πτερυγίων έχουμε μείωση του λόγου λ , ο συντελεστής ισχύος αυξάνεται.

2.5 Εξοπλισμός

Ακόμη και για τις ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα περιστροφής υπάρχουν πολλές παραλλαγές σχετικά με την χωροθέτηση του εξοπλισμού εντός τους. Στο παρόν κεφάλαιο ωστόσο θα γίνει μία συνοπτική επεξήγηση της πιο κοινής χωροθέτησης που συναντάμε μέχρι και σήμερα (Εικόνα 20). Αρχικά, η άτρακτος αποτελείται από τον πύργο και την βάση στο πάνω μέρος του όπου εδράζεται η κύρια άτρακτος της ανεμογεννήτριας. Από την μία μεριά της ατράκτου τοποθετούνται τα πτερύγια μαζί με τον μηχανισμό αλλαγής γωνίας κλίσης ενώ από την άλλη μεριά συνδέεται ένα κιβώτιο για να επιτευχθεί αύξηση των στροφών της ατράκτου. Με αυτόν τον τρόπο οι γεννήτριες που χρησιμοποιούνται έχουν καλύτερο βαθμό απόδοσης. Επιπλέον, εντός του μηχανοστασίου της ανεμογεννήτριας βρίσκονται και όλα τα απαραίτητα κυκλώματα για την λειτουργία της. Επιπλέον, πολλές φορές, για καλύτερη εκμετάλλευση του ανέμου όλο το άνω μέρος της ανεμογεννήτριας μπορεί να περιστραφεί ως προς τον πύργο μέσω ενός ειδικού μηχανισμού στην βάση. Κάτω από τον πύργο, γίνεται προσεκτική τοποθέτηση μέσω βάσεων που βρίσκονται εντός του εδάφους και παραλαμβάνουν όλα τα φορτία που προκύπτουν. Τέλος, μέσω καλωδίων γίνεται η μεταφορά της παραγόμενης ενέργειας από την γεννήτρια σε μετασχηματιστές και έπειτα στο δίκτυο.



Εικόνα 20: Τοποθέτηση εξοπλισμού εντός της ανεμογεννήτριας [17].

2.6 Ισχύοντα πρότυπα και κανονισμοί

Η διεθνής ηλεκτροτεχνική επιτροπή (International Electrotechnical Commission / IEC) είναι υπεύθυνη για την συγγραφή του προτύπου IEC 61400 η οποία άρχισε το 1995 και σχετίζεται με τις ανεμογεννήτριες [20]. Αποτελείται από ένα σύνολο απαιτούμενων κανονισμών που αφορούν τον σχεδιασμό, την εγκατάσταση και την λειτουργία των ανεμογεννητριών με στόχο την απρόσκοπτη λειτουργία τους κατά την διάρκεια ζωής τους. Όπως είναι προφανές βλάβες οι οποίες προκαλούν φθορά ή καταστροφή των ανεμογεννητριών, μόλυνση του περιβάλλοντος είτε τραυματισμό του προσωπικού πρέπει να αποφεύγονται αυστηρά και μέτρα αποφυγής πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τον σχεδιασμό. Για αυτόν τον λόγο, το πρότυπο χωρίζεται σε κεφάλαια τα οποία αφορούν πολλαπλές πτυχές σχεδιασμού και χρήσης και παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1).

Πίνακας 1: Πρότυπα για σχεδιασμό και λειτουργία ανεμογεννητριών [20].

Κεφάλαιο	Περιγραφή ¹
IEC 61400-1:2005 AMD1:2010	Design requirements
IEC 61400-2:2013	Small wind turbines
IEC 61400-3:2009	Design requirements for offshore wind turbines
IEC 61400-4:2012	Design requirements for wind turbine gearboxes
IEC 61400-6:2020	Tower and foundation design requirements
IEC 61400-11:2012	Acoustic noise measurement techniques
IEC 61400-12-1:2005	Power performance measurements of electricity producing wind turbines
IEC 61400-12-2:2013 COR1:2016	Power performance of electricity-producing wind turbines based on nacelle anemometry / Corrigendum 1
IEC 61400-12-1:2017	Power performance measurements of electricity producing wind turbines. Remote sensing devices like Sodar / lidar measurements

¹ Τα πρότυπα που παρουσιάζονται δεν έχουν μεταφραστεί επίσημα στα Ελληνικά οπότε αναγράφονται με τους αγγλικούς τίτλους.

IEC 61400-13:2015	Measurement of mechanical loads
IEC 61400-14:2005	Declaration of apparent sound power level and tonality values
IEC 61400-21:2008	Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines
IEC 61400-22:2010	Conformity testing and certification (IEC 61400-22:2010 was withdrawn on 2018-08-31, and replaced with the deliverables for the wind sector (WE-OMC) contained in the IECRE Conformity Assessment System.)
IEC 61400-23:2014	Full-scale structural testing of rotor blades
IEC 61400-24:2010	Lightning protection
IEC 61400-25-1:2006	Communications for monitoring and control of wind power plants - Overall description of principles and models
IEC 61400-25-2:2015	Communications for monitoring and control of wind power plants - Information models
IEC 61400-25-3:2015	Communications for monitoring and control of wind power plants - Information exchange models
IEC 61400-25-4:2008	Communications for monitoring and control of wind power plants - Mapping to communication profile
IEC 61400-25-5:2006	Communications for monitoring and control of wind power plants - Conformance testing
IEC 61400-25-6:2010	Communications for monitoring and control of wind power plants - Logical node classes and data classes for condition monitoring
IEC TS 61400-26-1:2011	Time-based availability for wind turbine generating systems
IEC TS 61400-26-2:2014	Production-based availability for wind turbines
IEC 61400-27-1:2015	Electrical simulation models - Wind turbines

Εκτός των παραπάνω προτύπων, περαιτέρω πρότυπα πρέπει να ικανοποιούνται στην περίπτωση των υπεράκτιων ανεμογεννητριών. Τα επιπλέον πρότυπα για την εγκατάσταση και λειτουργία υπεράκτιων ανεμογεννητριών είναι κατά ISO και παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 2).

Πίνακας 2: Πρότυπα για υπεράκτιες ανεμογεννήτριες [20].

Κεφάλαιο	Περιγραφή ²
ISO 19900	General requirements for offshore structures
ISO 19902	Fixed steel offshore structures
ISO 19903	Fixed concrete offshore structures
ISO 19904-1	Floating offshore structures – mono-hulls, semisubmersibles and spars
ISO 19904-2	Floating offshore structures - tension-leg platforms
API RP 2A-WSD	Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore steel platforms - working stress design

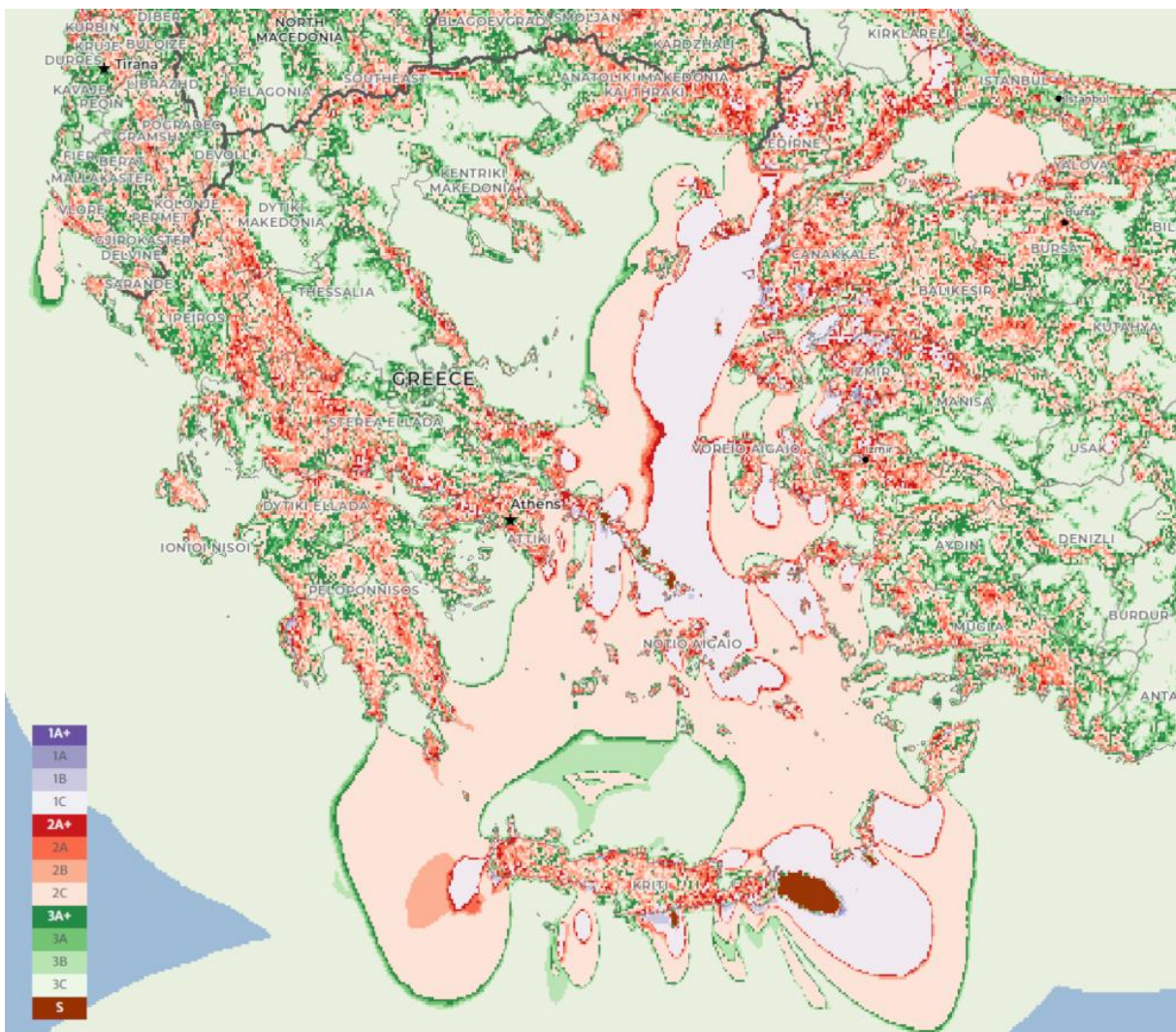
Όπως είναι γνωστό, οι ανεμογεννήτριες σχεδιάζονται για συγκεκριμένες συνθήκες ανέμου. Για αυτόν τον λόγο, έχουν δημιουργηθεί κατηγορίες στις οποίες περιγράφεται η μέση ταχύτητα αέρα, η τύρβη του αέρα, και η μέγιστη ταχύτητα ανέμου σε χρονικό ορίζοντα 50 χρόνων. Στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 3) παρουσιάζονται οι σημαντικότερες κατηγορίες ανέμου. Περισσότερες πληροφορίες υπάρχουν στο πρότυπο IEC 61400-1.

Πίνακας 3: Κατηγοριοποίηση ανέμου [20].

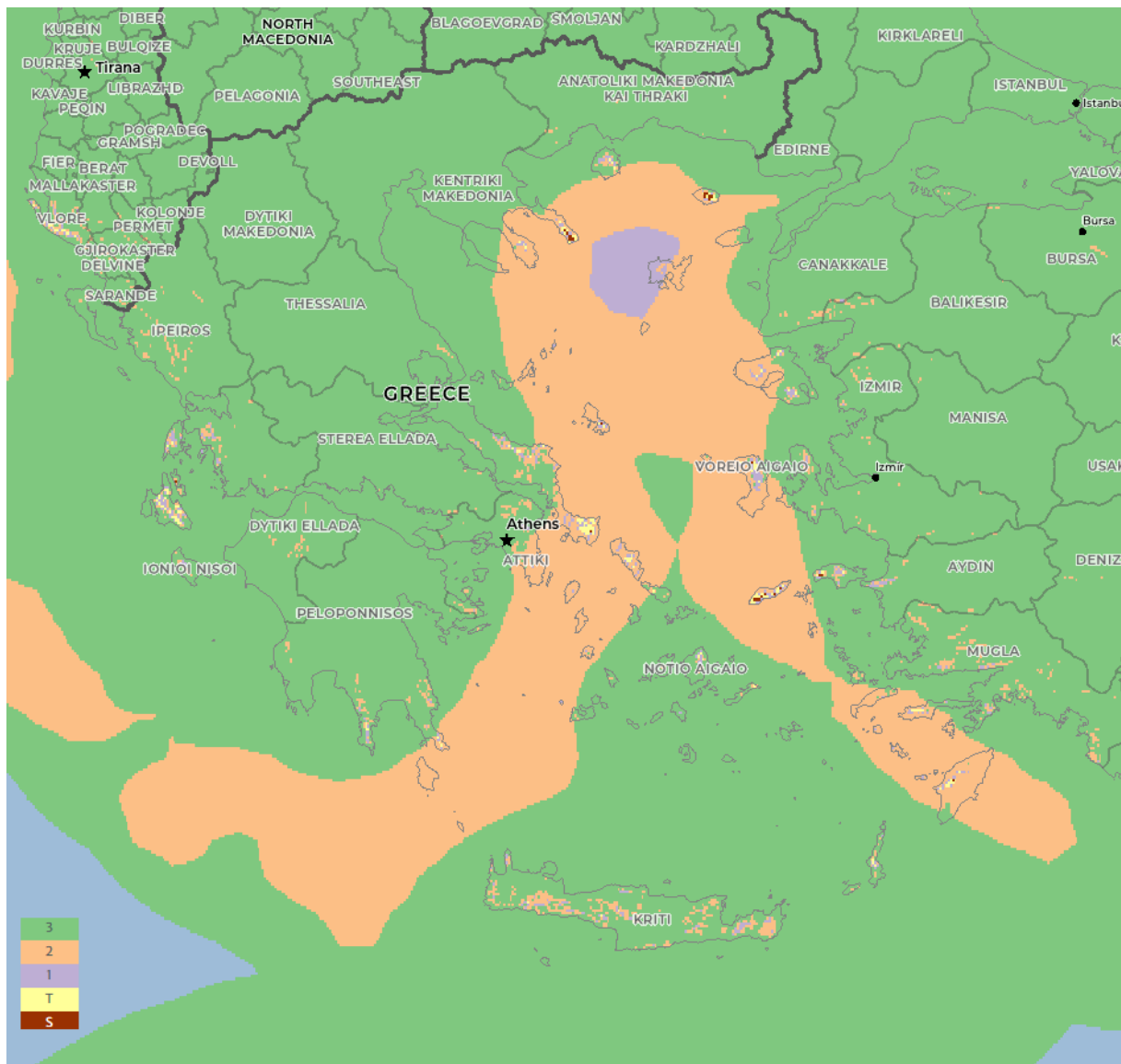
Κατηγορία	Μέγεθος τύρβης	Ετήσια μέση ταχύτητα	Μέγιστη ταχύτητα σε χρονικό ορίζοντα 50 ετών
Ia Υψηλός άνεμος	Υψηλή τύρβη 18%	10 m/s (36 km/h; 22 mph)	70 m/s (250 km/h; 160 mph)
Ib Υψηλός άνεμος	Χαμηλή τύρβη 16%	10 m/s (36 km/h; 22 mph)	70 m/s (250 km/h; 160 mph)
IIa Μέσος άνεμος	Υψηλή τύρβη 18%	8.5 m/s (31 km/h; 19 mph)	59.5 m/s (214 km/h; 133 mph)
IIb Μέσος άνεμος	Χαμηλή τύρβη 16%	8.5 m/s (31 km/h; 19 mph)	59.5 m/s (214 km/h; 133 mph)
IIIa Χαμηλός άνεμος	Υψηλή τύρβη 18%	7.5 m/s (27 km/h; 17 mph)	52.5 m/s (189 km/h; 117 mph)
IIIb Χαμηλός άνεμος	Χαμηλή τύρβη 16%	7.5 m/s (27 km/h; 17 mph)	52.5 m/s (189 km/h; 117 mph)
IV		6.0 m/s (22 km/h; 13 mph)	42 m/s (150 km/h; 94 mph)

² Τα πρότυπα που παρουσιάζονται δεν έχουν μεταφραστεί επίσημα στα Ελληνικά οπότε αναγράφονται με τους αγγλικούς τίτλους.

Η μέση ταχύτητα του ανέμου είναι ένα μέγεθος που εκφράζει την παραγωγικότητα της περιοχής στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η τύρβη είναι ένα σημαντικό μέγεθος διότι οι διακυμάνσεις στην ταχύτητα του ανέμου έχουν ως αποτέλεσμα την δημιουργία δυναμικών φαινομένων στα οποία παρουσιάζεται το φαινόμενο της κόπωσης των κατασκευαστικών στοιχείων της ανεμογεννήτριας. Η μέγιστη ταχύτητα του ανέμου είναι ένα απαραίτητο μέγεθος για την διαστασιολόγηση και τον σχεδιασμό των συστημάτων ασφαλείας της ανεμογεννήτριας (λόγου χάρη των φρένων). Στην συνέχεια, παρουσιάζονται οι κλάσεις κατά IEC που αφορούν τα φορτία κόπωσης και τα μέγιστα φορτία (Εικόνα 21 και Εικόνα 22 αντίστοιχα). Στα φορτία κόπωσης λαμβάνονται υπόψη φαινόμενα απόρου της ροής. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα υπομνήματα των εικόνων, οι αριθμοί 1,2,3 αντιστοιχούν στις κατηγορίες I, II, III κλπ.



Εικόνα 21: Κατηγοριοποίηση φορτίων κόπωσης [21].



Εικόνα 22: Κατηγοριοποίηση μέγιστων φορτίων ανέμου [21].

2.7 Στατιστικά χρήσης στην Ελλάδα

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, οι στόχοι που έχουν τεθεί από την ευρωπαϊκή ένωση σε σχέση με την χρήση των ΑΠΕ στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έναντι των συμβατικών μεθόδων ολοένα και αυξάνεται. Στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 4) παρουσιάζεται το μέγεθος της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανεμογεννήτριες για την τελευταία δεκαετία. Όπως είναι αναμενόμενο, για κάθε χρόνο παρουσιάζεται αύξηση της ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας με την μέγιστη αύξηση να παρουσιάζεται τα έτη 2019 και 2020 με 25.8 και 15.1 ποσοστιαίες μονάδες αντίστοιχα. Λαμβάνοντας υπόψη και τους στόχους που έχουν παρουσιαστεί στην Εικόνα 2 η αύξηση δικαιολογείται με σκοπό την επίτευξη των στόχων που είχαν τεθεί για το έτος 2020.

Πίνακας 4: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση ανεμογεννητριών [22].

Έτος	Παραγωγή (MW)	Αύξηση (MW)	Αύξηση (%)
2013	1,865	116	6.7
2014	1,980	115	6.2
2015	2,152	172	8.7
2016	2,369	217	10.1
2017	2,651	282	12
2018	2,844	193	7.3
2019	3,576	732	25.8
2020	4,113	537	15.1
2021	4,457	344	8.4
2022	4,879	422	9.5

Στην συνέχεια στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 5) παρουσιάζεται η κατανομή των περιοχών παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας από ανεμογεννήτριες σε φθίνουσα σειρά.

Πίνακας 5: Κατανομή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από αιολικά πάρκα ανά περιοχή [22].

Περιοχή	Συνολική ισχύς (kW)	Ποσοστό (%)
Κεντρική Ελλάδα	2,025,695	42.8
Πελοπόννησος	506,150	10.7
Ανατολική Μακεδονία & Θράκη	421,470	8.9
Δυτική Ελλάδα	328,350	6.9
Υπεράκτιες	301,000	6.4
Κεντρική Μακεδονία	204,800	4.3
Κρήτη	185,000	3.9
Δυτική Μακεδονία	180,900	3.8
Νότιο Αιγαίο	180,535	3.8
Αττική	152,760	3.
Ήπειρος	103,700	2.2
Ιόνια νησιά	85,800	1.8
Βόρειο Αιγαίο	39,210	0.8
Θεσσαλία	17,000	0.4

Σχεδόν η μισή ηλεκτρική ενέργεια παράγεται στην κεντρική Ελλάδα. Ένας πιθανός λόγος είναι ότι στην κεντρική Ελλάδα βρίσκεται η Αθήνα όπου συγκεντρώνεται και η μεγαλύτερα

κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας γενικότερα. Στην συνέχεια ακολουθεί η Πελοπόννησος με το τελευταίο διψήφιο ποσοστό παραγωγής και στην συνέχεια όλες οι υπόλοιπες περιοχές.

2.8 Μεγαλύτερη ανεμογεννήτρια σε χρήση για το έτος 2023

Μόλις εγκαταστάθηκε η μεγαλύτερη ανεμογεννήτρια στον κόσμο από την εταιρίας Three Gorges Energy. Πρόκειται για υπεράκτια ανεμογεννήτρια ισχύος 16 mW (Εικόνα 23). Το ύψος του πύργου είναι στα 152 μέτρα και ζυγίζει 385 τόνους. Αποτελείται από 3 πτερύγια μήκους 123 μέτρων τα οποία ζυγίζουν 54 τόνους. Κάθε επιπλέον μέτρο στο μήκος των πτερυγίων επιδρά σημαντικά στην αύξηση της επιφάνειας της ανεμογεννήτριας. Το γεγονός ότι μπορεί να στηριχθεί το μεγάλο βάρος των πτερύγων με επιτυχία στην άτρακτο αποτελεί σπουδαίο επίτευγμα στον τομέα της μηχανολογίας. Σε κάθε περιστροφή παράγονται 34.2 kWh ενέργειας, ενώ σε κάθε χρόνο υπολογίζεται ότι θα παράγεται 66 gWh παρέχοντας ηλεκτρική ενέργεια σε 36000 σπίτια.



Εικόνα 23: Εγκατάσταση της μεγαλύτερης ανεμογεννήτριας στον κόσμο [23].

Μιας και στην περιοχή εγκατάστασης εμφανίζονται συχνά ανεμοστρόβιλοι, ο σχεδιασμός περιλαμβάνει αντοχή σε ταχύτητες ανέμου έως 287 km/h αφήνοντας περιθώριο ασφάλειας μίας και στην περιοχή έχουν καταγραφεί ταχύτητες ανέμων έως 260 km/h. Οι ανεμογεννήτριες ολοένα και αυξάνονται σε μέγεθος. Πηγές αναφέρουν ότι αναμένονται ανακοινώσεις για συστήματα 20-mW. Είναι δύσκολο να καταλάβει κανείς το μέγεθος τους, μία προσπάθεια απεικόνισης γίνεται στην Εικόνα 24.



Εικόνα 24: Μέγεθος πτέρυγας σε σχέση με τον άνθρωπο [23] Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.

2.9 Αιολικά πάρκα-μία συστοιχία ανεμογεννητριών

Όταν υπάρχουν περισσότερες από μία ανεμογεννήτριες σε λειτουργία, τότε έχουμε τα ονομαζόμενα αιολικά πάρκα.



Εικόνα 25: Αιολικό πάρκο στην περιοχή San Gioronio Pass στην Καλιφόρνια [18].

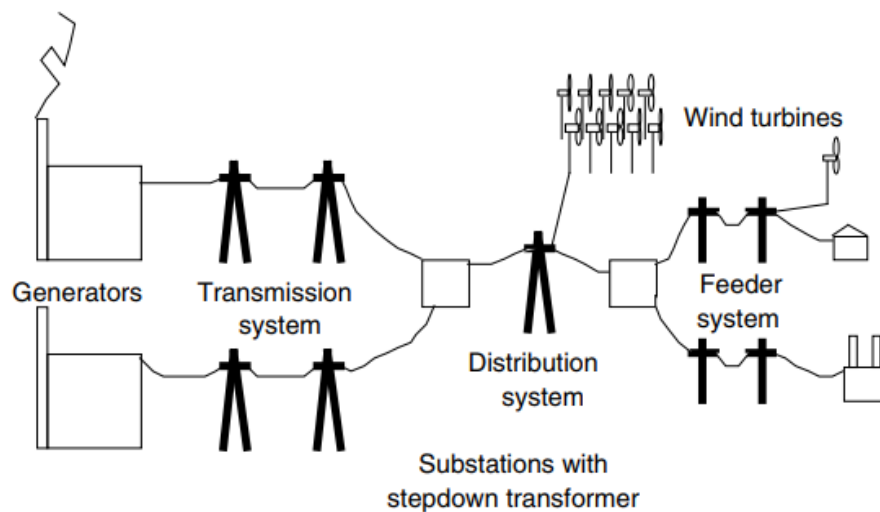
Τα πλεονεκτήματα χρήσης αιολικών πάρκων έναντι μεμονωμένων ανεμογεννητριών είναι πολλαπλά. Σε γενικές γραμμές, η συγκέντρωση συστημάτων που χρειάζονται τις ίδιες επισκευές, την ίδια επίβλεψη και τις ίδιες εγκαταστάσεις αυξάνουν τα οικονομικά οφέλη. Τα αιολικά πάρκα εμφανίστηκαν στην Αμερική στις αρχές της δεκαετίας του '70 (Εικόνα 25).

2.10 Υποδομές αιολικών πάρκων

Στην περίπτωση των αιολικών πάρκων, υπάρχουν μεγαλύτερες ανάγκες σε ηλεκτρικά συστήματα συλλογής παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, δρόμους, συστήματα συλλογής πληροφοριών αλλά και προσωπικού υποστήριξης.

2.10.1 Συστήματα συλλογής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Ανάλογα την απόσταση μεταξύ των ανεμογεννητριών αλλά και του πάρκου από το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας ενδέχεται να γίνεται αύξηση της τάσης του ρεύματος μέσω χρήσης μετασχηματιστών όπως φαίνεται στην Εικόνα 26.



Εικόνα 26: Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας [18].

Όπως είναι γνωστό, οι απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας είναι αντιστρόφως ανάλογες της τάσης, έτσι με υψηλή τάση οι απώλειες είναι μικρές. Ανάλογα την απόσταση των ανεμογεννητριών μεταξύ του πάρκου γίνεται η βέλτιστη τοποθέτηση μετασχηματιστών ώστε να επιτυγχάνεται η μεγαλύτερη μείωση των απωλειών αλλά και του κόστους προμήθειας και συντήρησης των μετασχηματιστών. Άλλη μία παράμετρος που επηρεάζει άμεσα το κόστος είναι αν οι γραμμές μεταφοράς ενέργειας είναι υπόγειες ή υπέργειες διότι σε μερικές χώρες

όπως στην Αμερική, πρέπει να είναι υποχρεωτικά υπόγειες, κάτι που αυξάνει αισθητά το κόστος.

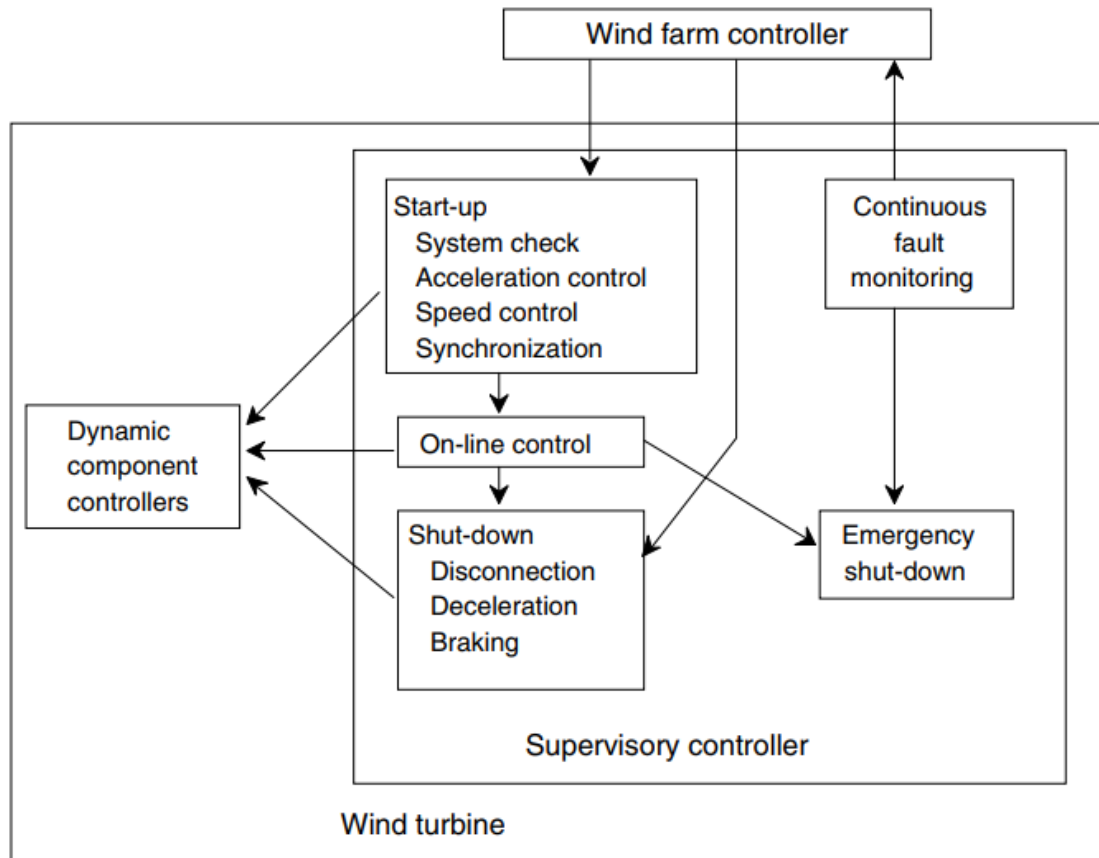
2.10.2 Δρόμοι/Περιοχή εγκατάστασης

Αρχικά, η ανάδοχος εταιρία που της ανήκει το πάρκο προς κατασκευή και είναι υπεύθυνη για την λειτουργία του, πρέπει να κάνει όλες τις ενέργειες που απαιτούνται σχετικά με την αδειοδότηση του. Ο χώρος λειτουργίας όλων των συστημάτων πρέπει να είναι στην πλήρη κυριότητα της. Από το νομοθετικό πλαίσιο που περιγράφει αυτές τις επενδύσεις είναι γνωστό ότι η έκδοση της άδειας εγκατάστασης και λειτουργίας του πάρκου είναι αρκετά χρονοβόρα μιας και έχει εμπλεκόμενους πολλούς δημόσιους φορείς (Υπουργείο Ανάπτυξης, Πολεοδομία, Δημοτικές Αρχές, Υπουργείο Γεωργίας, ΔΕΔΗΕ, ΡΑΕ)

Η διάνοιξη δρόμων για την μεταφορά, εγκατάσταση και συντήρηση του πάρκου είναι αναγκαία. Όταν το έδαφος είναι ανώμαλο και δύσβατο, τα κόστη διάνοιξης δρόμων είναι υψηλά. Επιπλέον, η παρέμβαση στο περιβάλλον μέσω της διάνοιξης δρόμων θα πρέπει να είναι η μικρότερη δυνατή και για αισθητικούς λόγους αλλά και για λόγους διάβρωσης του εδάφους. Τέλος, η ασφάλεια του προσωπικού επηρεάζει την χάραξη, η οποία πρέπει να γίνεται μακριά από τα πτερύγια των ανεμογεννητριών.

2.10.3 Συστήματα ελέγχου και συλλογής δεδομένων

Τα μοντέρνα αιολικά πάρκα διαθέτουν συστήματα επιτήρησης και συλλογής δεδομένων για κάθε μία ανεμογεννήτρια χωριστά. Αυτά τα συστήματα συνήθως ονομάζονται SCADA και εμφανίζουν πληροφορίες για το αιολικό πάρκο στον πίνακα ελέγχου. Τυπικά μεγέθη που παρουσιάζονται περιλαμβάνουν το μέγεθος της παραγόμενης ενέργειας, τον αριθμό των συστημάτων σε λειτουργία, την ταχύτητα του ανέμου και προφανώς πιθανές βλάβες ή ενδείξεις για επισκευή/συντήρηση. Επιπλέον, πιο λεπτομερείς πληροφορίες εμφανίζονται όπως για παράδειγμα η κατάσταση και οι συνθήκες λειτουργίας του εξοπλισμού (π.χ. θερμοκρασία κιβωτίου). Στην Εικόνα 27 παρουσιάζεται ένα τυπικό διάγραμμα ελέγχου μίας ανεμογεννήτριας.



Εικόνα 27: Έλεγχος ανεμογεννήτριας [18].

2.10.4 Υποστηρικτικό προσωπικό

Στις περιπτώσεις μεγάλων αιολικών πάρκων, ειδικά εκπαιδευμένο προσωπικό επιτηρεί την λειτουργία του πάρκου. Είναι διαθέσιμο για προγραμματισμένες εργασίες συντήρησης στα πλαίσια λειτουργίας του πάρκου. Ωστόσο, είναι διαθέσιμο για άμεση επέμβαση σε περίπτωση μη-προγραμματισμένης βλάβης ή αστοχίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΛΕΤΗ ΘΕΣΗΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ

3.1 Εισαγωγή

Οι ανεμογεννήτριες αποτελούν τμήματα ενός ευρύτερου συστήματος που περιλαμβάνει υποσυστήματα παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας. Η ενσωμάτωση μίας ανεμογεννήτριας ή ενός συστήματος από πολλές ανεμογεννήτριες πρέπει να περιλαμβάνει αποφάσεις σχετικά με την τοποθεσία εγκατάστασης των ανεμογεννητριών, τη σύνδεση με το ευρύτερο σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και τη λειτουργία των ανεμογεννητριών. Σε αυτό το κεφάλαιο, αναλύεται το κυρίως θέμα της παρούσας εργασίας και παρουσιάζονται οι διάφορες πτυχές που πρέπει να ληφθούν υπόψη για τον σχεδιασμό, και την τοποθέτηση ενός συστήματος από ανεμογεννήτριας επικεντρώνοντας στα μεγάλα συστήματα χερσαίων ανεμογεννητριών. Ο σχεδιασμός συστημάτων υπεράκτιων ανεμογεννητριών είναι εκτός του αντικειμένου αυτής της εργασίας και δεν θα αναλυθεί περαιτέρω.

Όπως είναι γνωστό, οι ανεμογεννήτριες μπορούν να εγκατασταθούν είτε ως μεμονωμένες μονάδες, είτε ως συστοιχίες γνωστές ως αιολικά πάρκα. Λόγω του μεγέθους μίας ανεμογεννήτριας, η επιλογή της τοποθεσίας πρέπει να γίνει με ιδιαίτερη προσοχή διότι πιθανά λάθη σε αυτές τις περιπτώσεις είναι ιδιαίτερα δαπανηρά. Κύριος στόχος είναι η μεγιστοποίηση της ενέργειας που δεσμεύεται από τον άνεμο. Ωστόσο, πολλοί περιορισμοί μπορούν να περιορίσουν τον σχεδιασμό ενός αιολικού πάρκου. Στα επόμενα κεφάλαια παρουσιάζεται με λεπτομέρεια η διαδικασία επιλογής θέσης. Σημαντικές αλληλεπιδράσεις μπορούν να συμβούν μεταξύ των ανεμογεννητριών και με τα συστήματα στα οποία αυτές συνδέονται. Όταν πολλαπλές ανεμογεννήτριες βρίσκονται μαζί σε κοντινή απόσταση από κάθε μία η κόπωση, και επομένως η διάρκεια ζωής αυτών των ανεμογεννητριών που βρίσκονται κάτω από άλλες ανεμογεννήτριες μπορεί να επηρεαστεί.

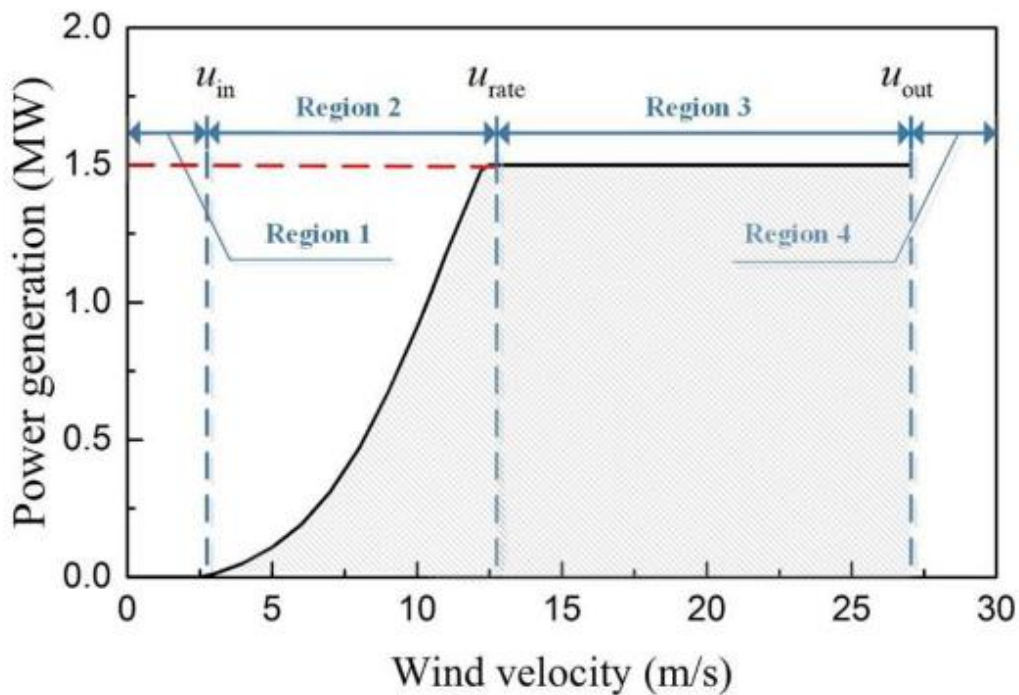
3.2 Κριτήρια επιλογής τοποθεσίας

Η επιλογή τοποθεσίας ενός αιολικού πάρκου μπορεί να αναλυθεί σε 5 στάδια τα οποία παρουσιάζονται στην συνέχεια.

3.2.1 Αρχικός προσδιορισμός γεωγραφικών περιοχών.

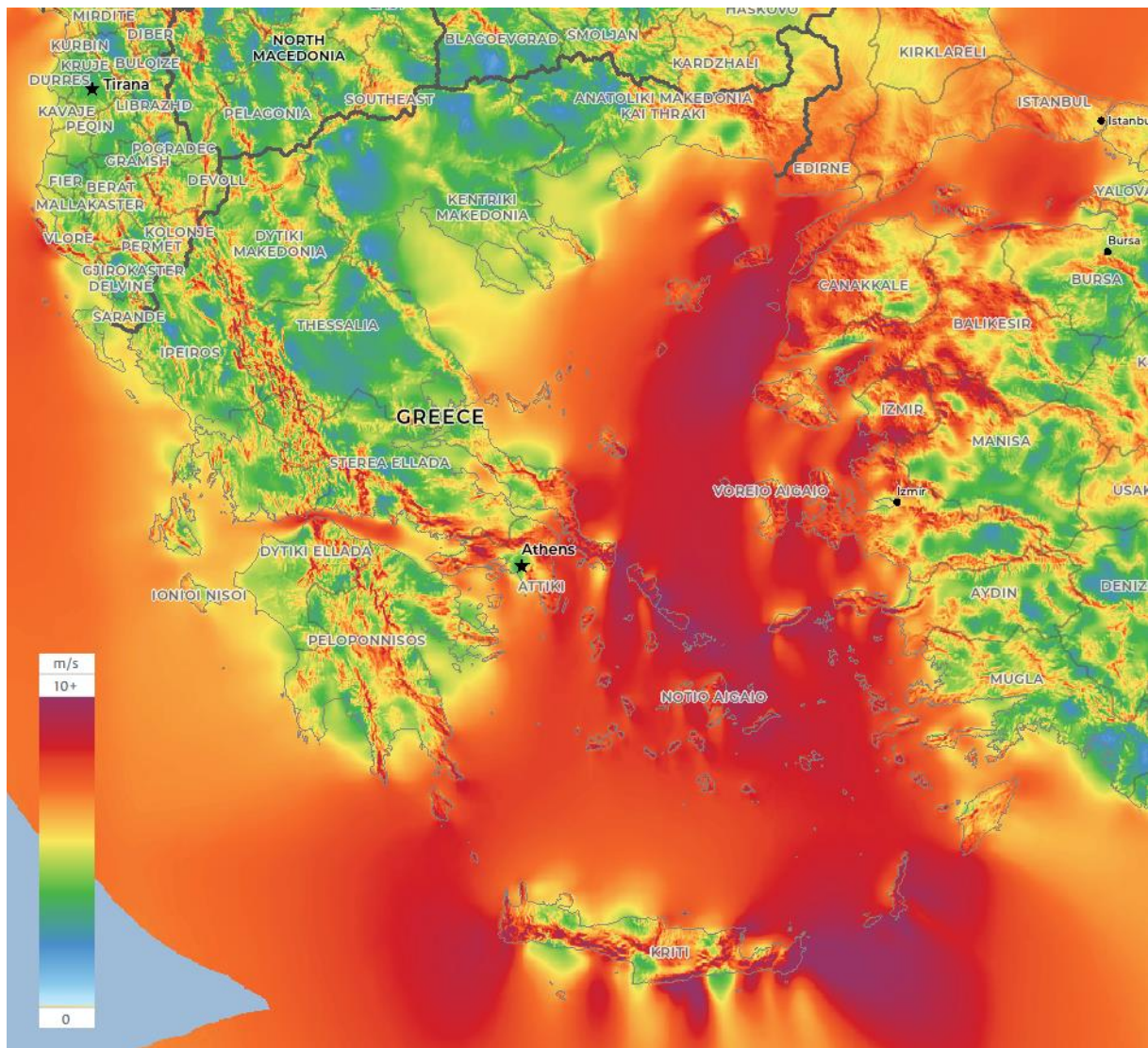
Περιοχές με υψηλό μέσο άνεμο αποτελούν ιδανικές υποψήφιες. Τα γενικά χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών που θα χρησιμοποιηθούν καθορίζονται σε αυτό το στάδιο, ανάλογα με

την μέση ταχύτητα ανέμου. Κλασικό παράδειγμα αποτελεί η καμπύλη ισχύος συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 28. Στις περιοχές 1 και 4, το σύστημα πρέπει να βρίσκεται εκτός λειτουργίας μιας και στην πρώτη περίπτωση ο άνεμος είναι πολύ χαμηλός για την αποδοτική παραγωγή ενέργειας ενώ στην δεύτερη οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στα δομικά στοιχεία της ανεμογεννήτριας είναι πολύ υψηλές με αποτέλεσμα την μόνιμη βλάβη. Οι περιοχές 2 και 3 είναι περιοχές στις οποίες το σύστημα μπορεί να λειτουργήσει με το βέλτιστο βαθμό απόδοσης.



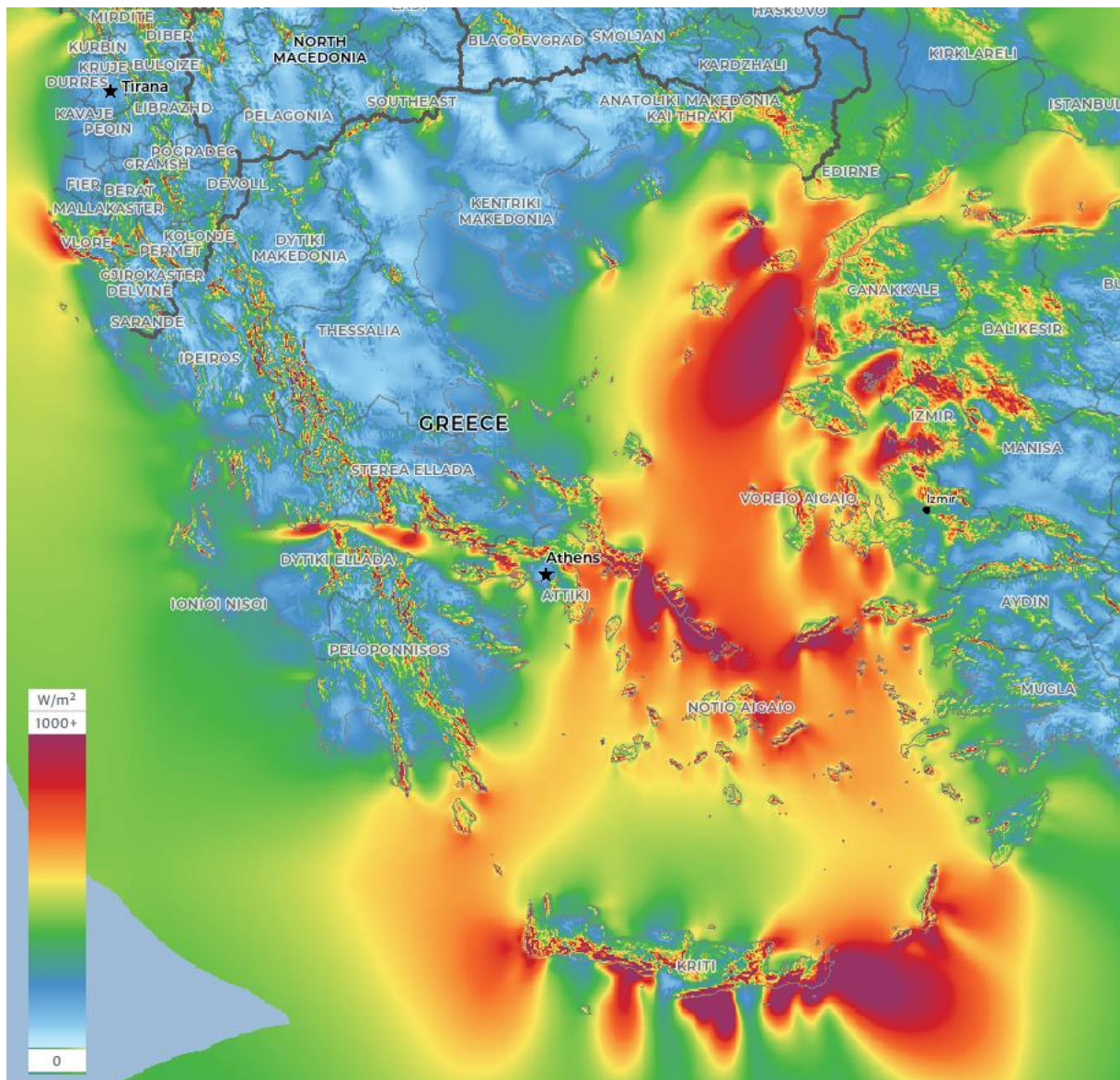
Εικόνα 28: Τυπική καμπύλη ισχύος/στροφών ανεμογεννήτριας [24].

Οποιαδήποτε διαθέσιμο μέσο σχετικό με πληροφορίες για τις ταχύτητες ανέμου χρησιμοποιείται σε αυτό το στάδιο όπως για παράδειγμα χρησιμοποιώντας έναν άτλαντα αιολικών πόρων. Για παράδειγμα στην Εικόνα 29, παρουσιάζεται η μέση ταχύτητα ανέμου για την χώρα μας.



Εικόνα 29: Χάρτης μέσης ταχύτητας ανέμου [21].

Ωστόσο, το παρόν μέγεθος δεν είναι το πιο αντιπροσωπευτικό για την αξιολόγηση μίας περιοχής. Για αυτόν τον λόγο χρησιμοποιείται η πυκνότητα ισχύος η οποία υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη και την πυκνότητα του αέρα της περιοχής ($1/2 \rho v^3$) και έχει μονάδες ισχύος ανά τετραγωνικό μέτρο (W/m^2). Στην Εικόνα 30 παρουσιάζεται η πυκνότητα ισχύος στην χώρα μας.

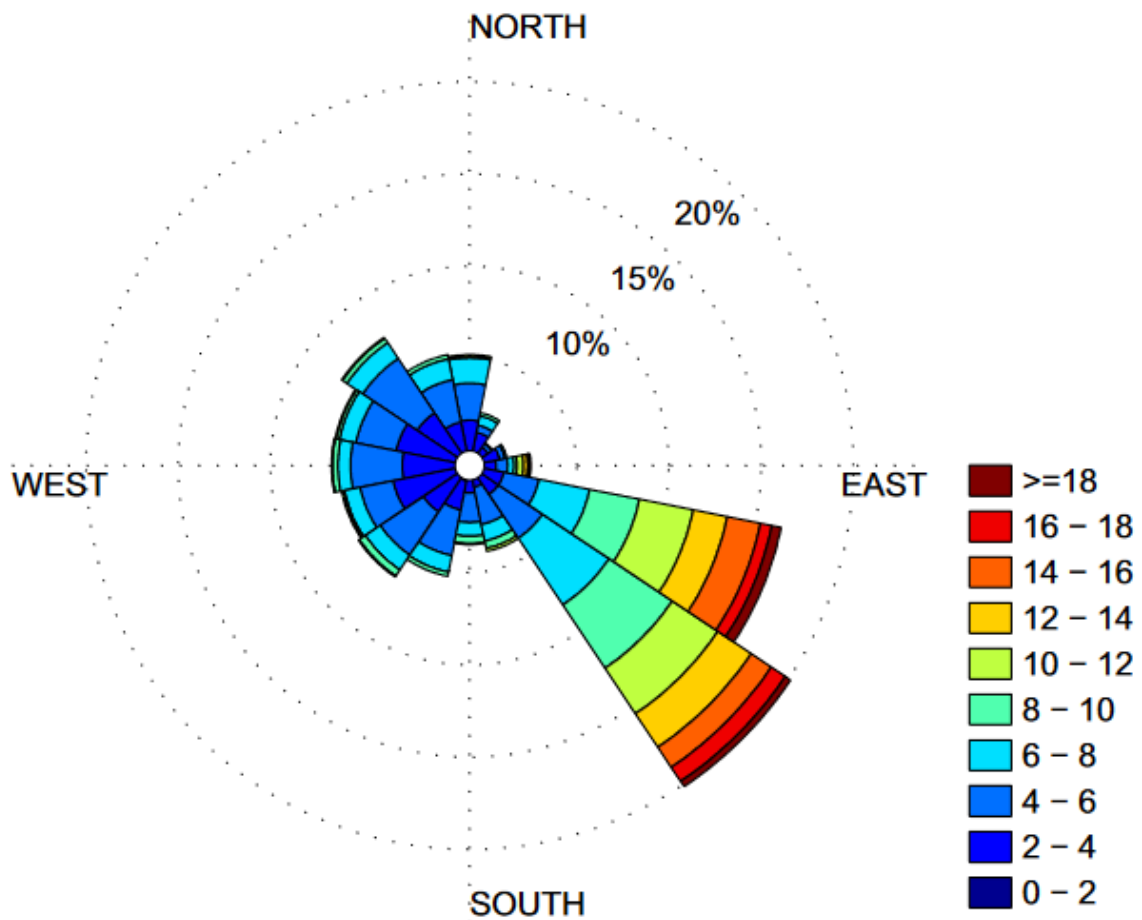


Εικόνα 30: Χάρτης πυκνότητας ισχύος [21].

Είναι εμφανές ότι συγκρίνοντας τους δύο χάρτες προκύπτει ότι ο χάρτης πυκνότητας ισχύος παρουσιάζει περιοχές (π.χ. στην κεντρική και ορεινή Ελλάδα) οι οποίες έχουν διαφορετική κατανομή από αυτή του χάρτη μέσης ταχύτητας αέρα. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται πιο μικρές περιοχές υψηλής ισχύος πράγμα αναμενόμενο, αφού λαμβάνεται υπόψη η πυκνότητα του αέρα η οποία αλλάζει σε σχέση με το υψόμετρο.

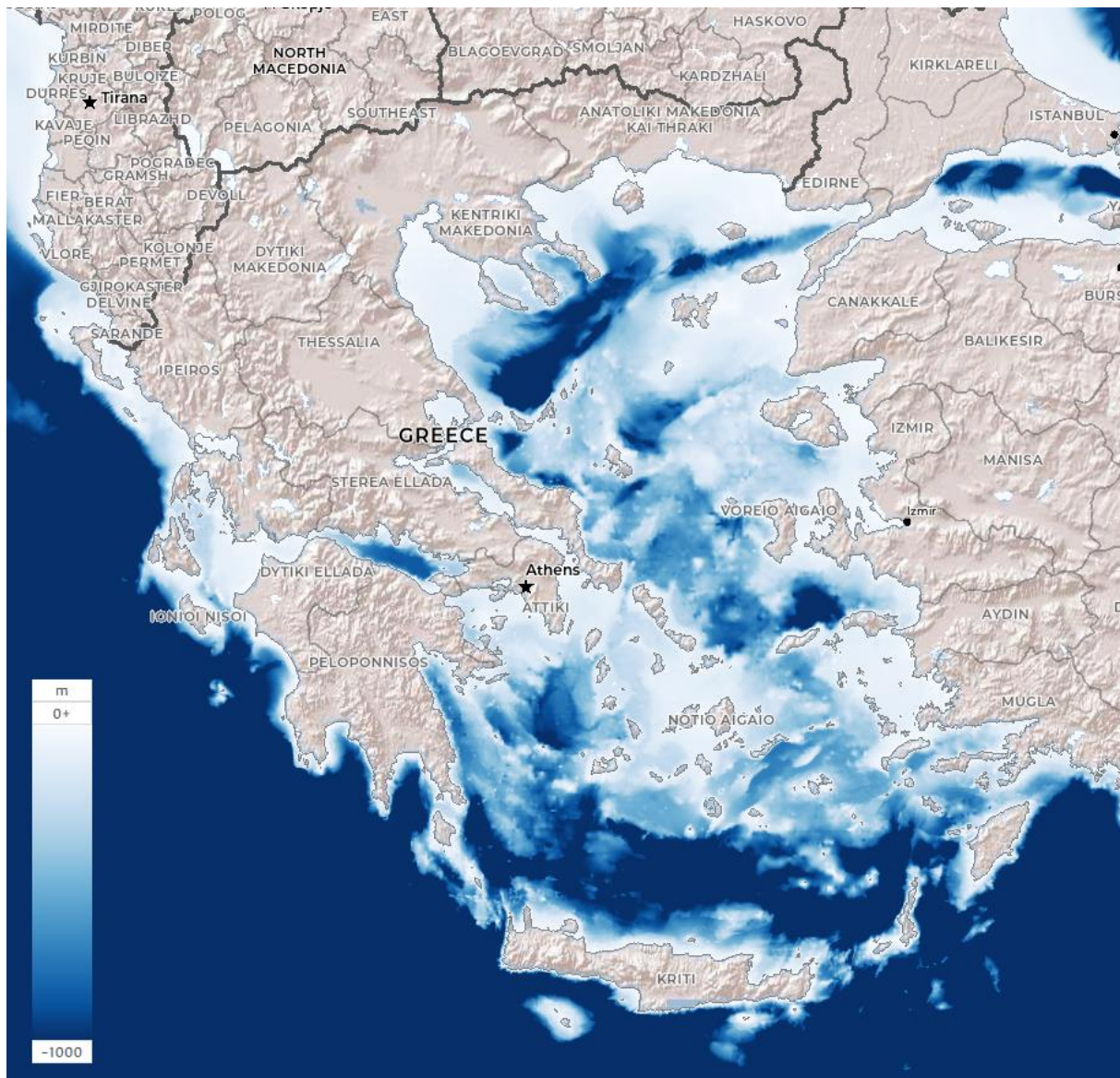
Αξίζει να σημειωθεί ότι πέρα από την ποσοτική παράμετρο που καθορίζει την ισχύ που περιεγράφηκαν (ταχύτητα ανέμου ή πυκνότητα ισχύος) σημαντική είναι και η κατεύθυνση του ανέμου. Στις περισσότερες περιπτώσεις δεν είναι σταθερή όποτε για αυτό τον λόγο κατασκευάζονται διαγράμματα (ροζέτες) κατανομής της ταχύτητας του ανέμου [25] όπως

παρουσιάζεται στην Εικόνα 31. Η επίδραση που έχουν στην μικροκωροθέτηση του πάρκου είναι μεγάλη, περισσότερη ανάλυση με λεπτομέρειες θα παρουσιαστούν στο κεφάλαιο 4.



Εικόνα 31: Κατανομή ταχύτητας ανέμου ανα διεύθυνση [25].

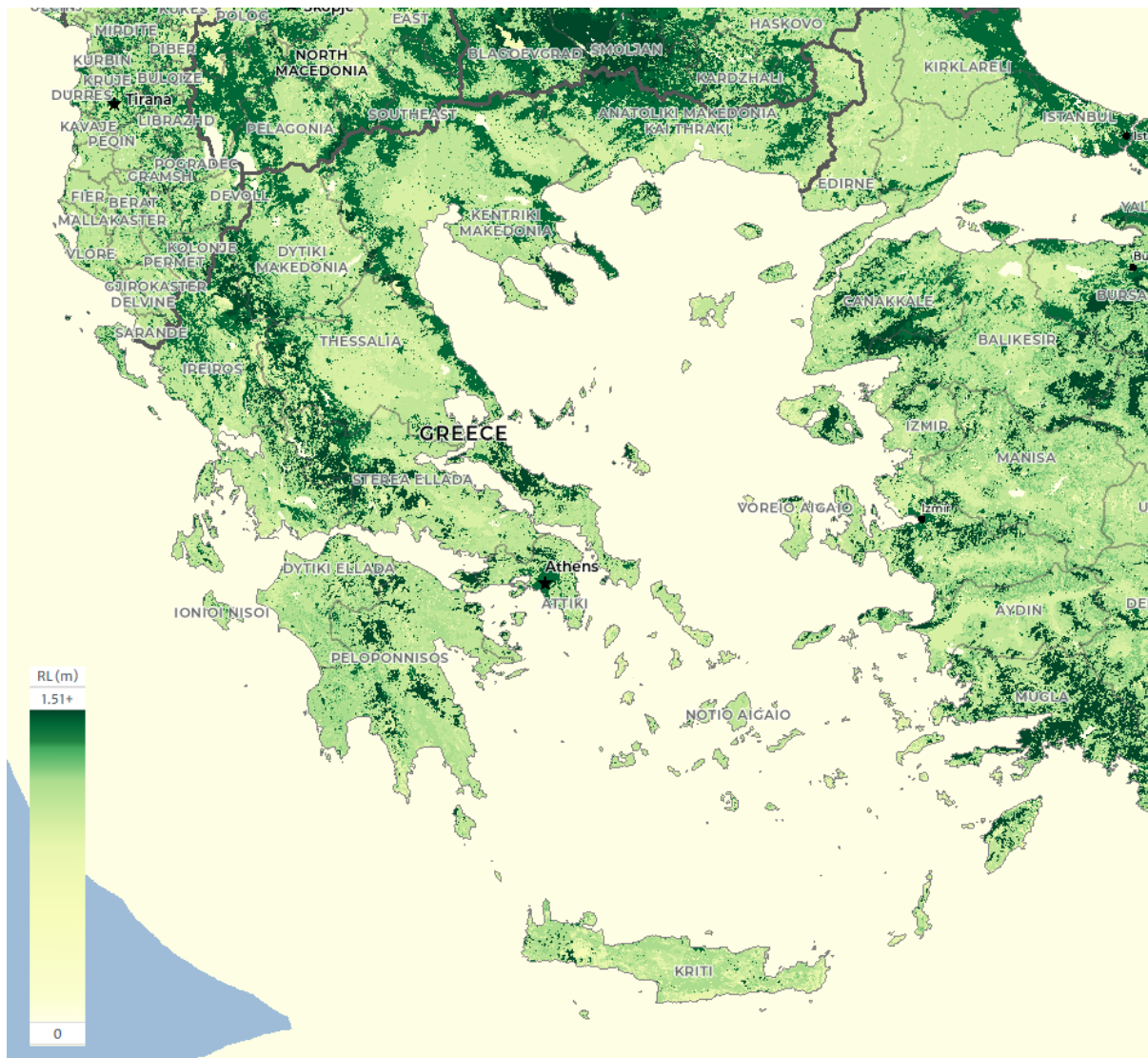
Σε περιπτώσεις υπεράκτιων αιολικών πάρκων, χρησιμοποιούνται χάρτες που περιγράφουν το βάθος της θάλασσας (Εικόνα 32). Αν το βάθος δεν υπερβαίνει τα 50 μέτρα [26], τότε είναι εύκολη η τοποθέτηση ανεμογεννητριών αφού μπορούν να στηριχθούν στον πυθμένα της θάλασσας. Σε αντίθετη περίπτωση, τα συστήματα είναι πλωτά και το συμβατικό επιτρεπόμενο βάθος της θάλασσας για ένα τέτοιο πάρκο είναι στα 1000 m.



Εικόνα 32: Χάρτης βάθους θάλασσας [21].

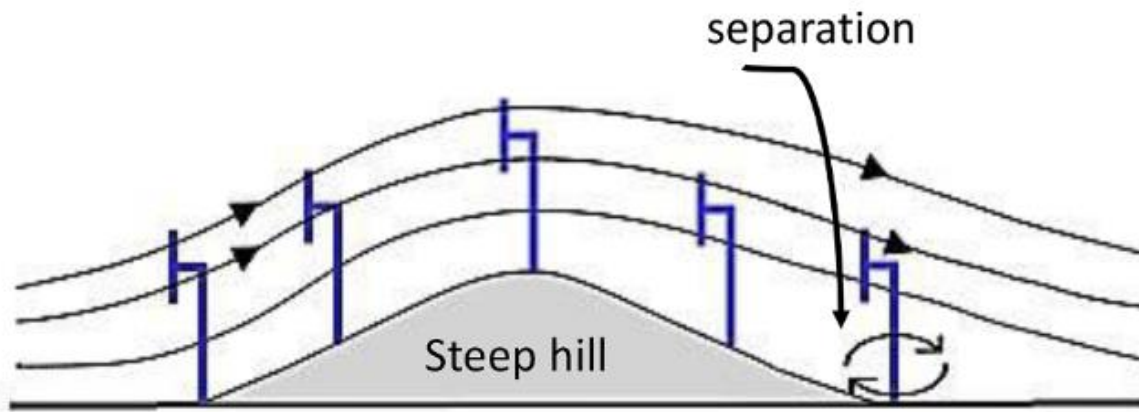
3.2.2 Επιλογή υποψήφιων χώρων.

Το σύνολο περιοχών από το προηγούμενο στάδιο αξιολογείται από ειδικούς ως προς την καταλληλότητα των ανεμογεννητριών σε σχέση με την ποιότητα του ανέμου. Επιπλέον, γίνεται έρευνα για την δημόσια αποδοχή ανεμογεννητριών στις περιοχές εκείνες όπως και οικολογικές μελέτες για την πιθανή διατάραξη του περιβάλλοντος. Εξετάζεται αν η φύση του εδάφους για κάθε υποψήφια περιφέρεια είναι τέτοια ώστε να είναι εφικτή η εγκατάσταση αλλά και η τοποθέτηση των ανεμογεννητριών. Στην Εικόνα 33 παρουσιάζεται η «τραχύτητα» της χώρας μας. Η τιμή της επηρεάζεται άμεσα από την ύπαρξη περίπλοκου ανάγλυφου (δάση, πόλεις, ανώμαλο έδαφος κ.α.) και έχει άμεση επίδραση στην ταχύτητα και την ποιότητα του αέρα.



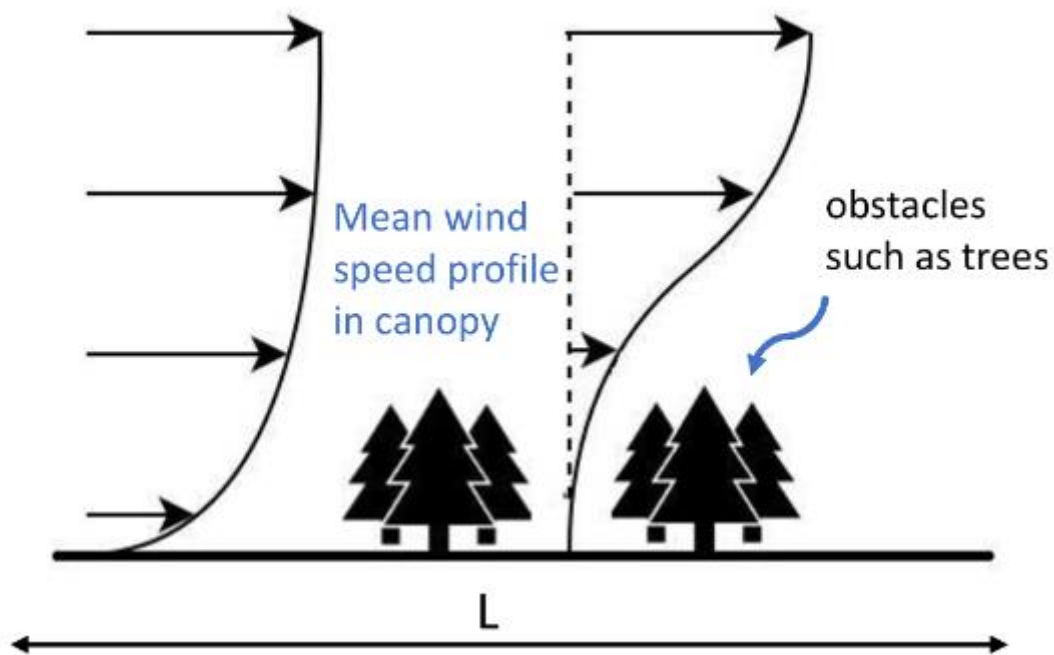
Εικόνα 33: Τραχύτητα εδάφους [21].

Επιπλέον της τοπικής «τραχύτητας» του εδάφους, πολύ σημαντικό μέγεθος για την αξιολόγηση μίας περιοχής είναι η ύπαρξη υψομετρικών διακυμάνσεων λόγω λόφων, βουνών, οροσειρών ή δέντρων. Ο άνεμος έχει την τάση να επιταχύνεται στις κορυφογραμμές βουνών. Αντίθετα, σε πεδιάδες και στους πρόποδες βουνών επιβραδύνει [27] όπως φαίνεται στην Εικόνα 34. Μάλιστα είναι πιθανή και η δημιουργία αποκόλλησης του οριακού στρώματος του ανέμου, έχοντας ως αποτέλεσμα την δημιουργία τυρβώδους ροής. Σε εκείνα τα σημεία πρέπει να αποφεύγεται η τοποθέτηση ανεμογεννητριών διότι πέρα από την χαμηλή παραγωγικότητα, η καταπόνηση στα κατασκευαστικά στοιχεία του συστήματος είναι αυξημένη.



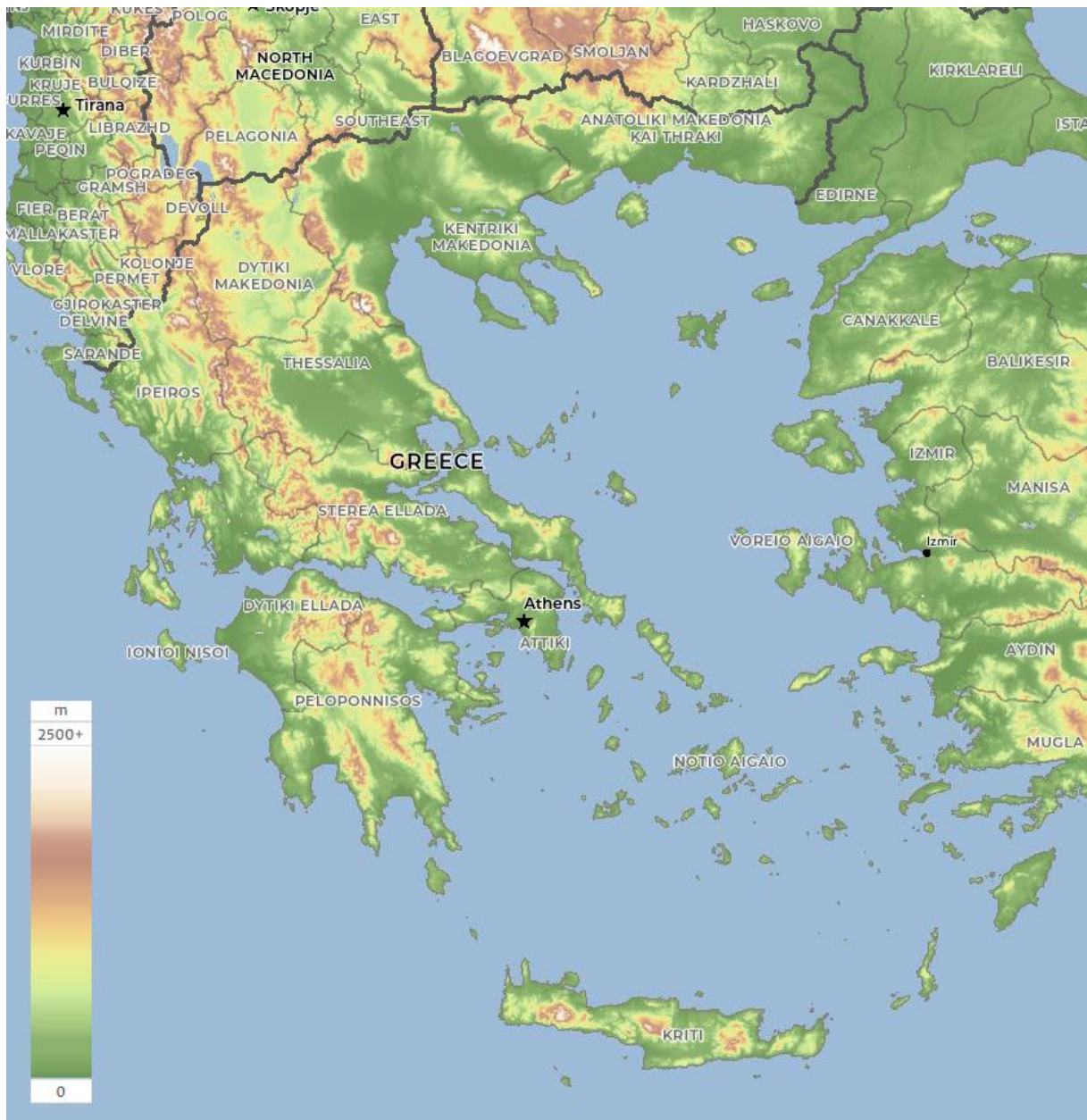
Εικόνα 34: Ταχύτητα ανέμου πάνω από έναν απότομο λόφο [27].

Επιπλέον των ανωμαλιών του εδάφους, διαταράξεις του ανέμου μπορούν να προκληθούν και από την ύπαρξη δέντρων. Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 35 η ύπαρξη εμποδίων όπως είναι τα δέντρα έχουν ως αποτέλεσμα την αισθητή μείωση της ταχύτητας.



Εικόνα 35: Επίδραση δέντρων στην κατανομή ταχύτητας του ανέμου [27].

Επιπροσθέτως, σε αυτό το στάδιο σχεδιασμού λαμβάνεται υπόψη και ο χάρτης υψόμετρου (Εικόνα 36). Είναι χάρτης υψηλής σημαντικότητας αφού η εγκατάσταση μίας ανεμογεννήτριας σε υψηλό υψόμετρο επιδρά άμεσα στην κατανομή της ταχύτητας του ανέμου αλλά σχετίζεται και άμεσα με τα κόστη εγκατάστασης και λειτουργίας.



Εικόνα 36: Χάρτης υψόμετρου [21].

Επιπρόσθετα των παραπάνω χαρτών, γίνεται και η χρήση των χαρτών που παρουσιάστηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο (Εικόνα 21 και Εικόνα 22) σχετικά με τα φορτία κόπωσης και τις μέγιστες ταχύτητες ανέμων με σκοπό την επιλογή των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών των ανεμογεννητριών. Επίσης, σε αυτό το στάδιο, είναι δυνατόν να περιλαμβάνονται αρχικές μοντελοποιήσεις με χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών, οποίες θα βοηθήσουν περαιτέρω στη αξιολόγησή τους. Τέλος οποιαδήποτε γεωλογικά, κοινωνικά και πολιτιστικά ζητήματα λαμβάνονται υπόψη.

3.2.3 Προκαταρκτική αξιολόγηση των υποψήφιων χώρων.

Σε αυτό το στάδιο, δημιουργείται μία λίστα η οποία περιέχει τις δυνητικές περιοχές τοποθέτησης σε μία κατάταξη, ανάλογα με το οικονομικό δυναμικό και εξετάζονται οι πιο βιώσιμες τοποθεσίες. Οποιαδήποτε ζητήματα που αφορούν το περιβάλλον, την κοινωνία και την ασφαλή λειτουργία του πάρκου εξετάζονται και λαμβάνονται σοβαρά υπόψη αν επιδρούν δυσμενώς στην επιλογή μίας πιθανής τοποθεσίας. Έπειτα, επιλέγονται οι καλύτερες περιοχές προς αξιοποίηση και ο σχεδιασμός συνεχίζεται στο επόμενο στάδιο.

3.2.4 Τελική αξιολόγηση του χώρου.

Για τις καλύτερες υποψήφιες τοποθεσίες που υπάρχουν στην κατάταξη, γίνεται μία ακριβής μελέτη ως προς την ποιότητα του ανέμου η οποία πολλές φορές περιλαμβάνει και μετρήσεις αιολικών πόρων. Στις μετρήσεις θα πρέπει να περιλαμβάνονται δεδομένα αναταράξεων εκτός από την ταχύτητα του ανέμου και τις επικρατούσες διευθύνσεις του.

3.2.5 Λεπτομερής τοποθέτηση ανεμογεννητριών (μικροχωροθέτηση).

Μόλις επιλεγεί η βέλτιστη τοποθεσία, πρέπει να προσδιοριστούν οι ακριβείς θέσεις των ανεμογεννητριών και η ποσότητα ενέργειας που θα παράγουν. Χρησιμοποιούνται μοντελοποιήσεις υψηλής ακρίβειας οι οποίες λαμβάνουν υπόψη την αλληλεπίδραση των ανεμογεννητριών μεταξύ τους και την επίπτωση που αυτή έχει στην παραγωγή ενέργειας. Μια τοποθεσία σε ανώμαλο και πολύπλοκο έδαφος απαιτεί λεπτομερείς μετρήσεις σε πολλές τοποθεσίες για τον προσδιορισμό του τοπικού πεδίου ανέμου. Περισσότερες λεπτομέρειες θα ακολουθήσουν στο επόμενο κεφάλαιο.

3.3 Γενικότερα ζητήματα κατά την χωροθέτηση.

Κατά την μελέτη χωροθέτησης που παρουσιάστηκε, τα εξής ζητήματα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη:

Οικονομικά ζητήματα: Κόστος των δικαιωμάτων πρόσβασης, συνολική παραγωγή ενέργειας, πιθανές απώλειες ενέργειας, φόροι, κόστη απόκτησης συστημάτων και λειτουργίας τους.

Τοπογραφικά ζητήματα: Πρόσβαση και κλίση εδάφους, ποιότητα εδάφους στα σημεία τοποθέτησης ανεμογεννητριών, αντικεραυνική προστασία, πιθανότητα διάβρωσης.

Νομικά ζητήματα: Ιδιοκτησία της γης, δικαιώματα παρακείμενης γης, υπάρχουσα περιβαλλοντική μόλυνση.

Ζητήματα αδειοδότησης: Αριθμός των απαιτούμενων αδειών, προηγούμενες αποφάσεις αδειοδότησης, πιθανοί περιορισμοί, χρονοδιαγράμματα για την ολοκλήρωση των διαδικασιών.

Περιβαλλοντικά ζητήματα: Παρουσία περιβαλλοντικά ευαίσθητων περιοχών όπως διάδρομοι διέλευσης πουλιών και η παρουσία απειλούμενων ειδών.

Ζητήματα αποδοχής του κοινού: Οπτικές επιπτώσεις, επιπτώσεις θορύβου, παρουσία πολιτιστικών, ιστορικών ή αρχαιολογικά σημαντικών περιοχών, ανταγωνιστικές χρήσεις γης.

Ζητήματα ασφάλειας: Εγγύτητα σε κατοικημένες περιοχές ή μονοπάτια πεζοπορίας.

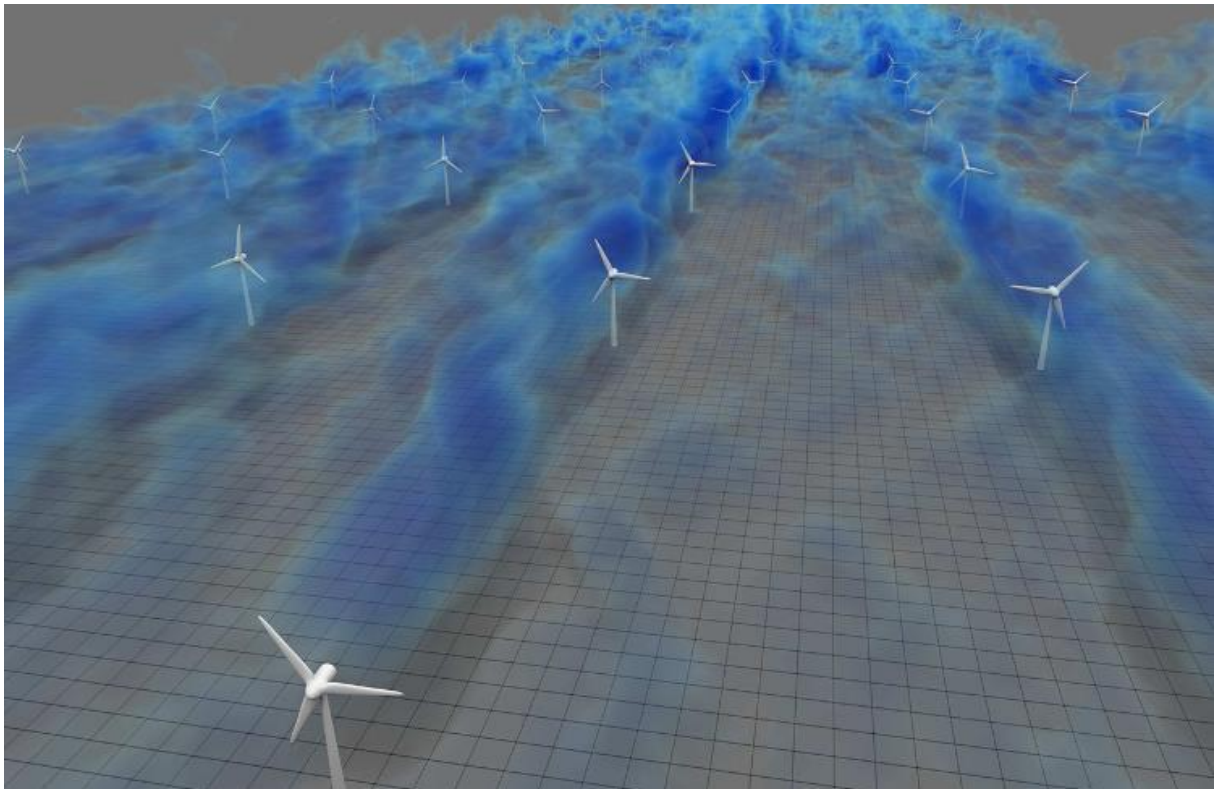
Ζητήματα διασύνδεσης: Εγγύτητα των γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΙΚΡΟΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ

4.1 Εισαγωγή

Αφού έχει επιλεγθεί η τοποθεσία στην οποία θα εγκατασταθεί το αιολικό πάρκο μία κρίσιμη παράμετρος σχεδιασμού του είναι η μικροχωροθέτηση των ανεμογεννητριών. Ως μικροχωροθέτηση ορίζεται η θέση της κάθε μεμονωμένης ανεμογεννήτριας λαμβάνοντας υπόψη την αλληλεπίδραση των ανεμογεννητριών μεταξύ τους. Όπως θα αναλυθεί στην συνέχεια με χρήση βελτιστοποίησης μπορεί να αυξηθεί έως και 13.5% η αποδοτικότητα του πάρκου.

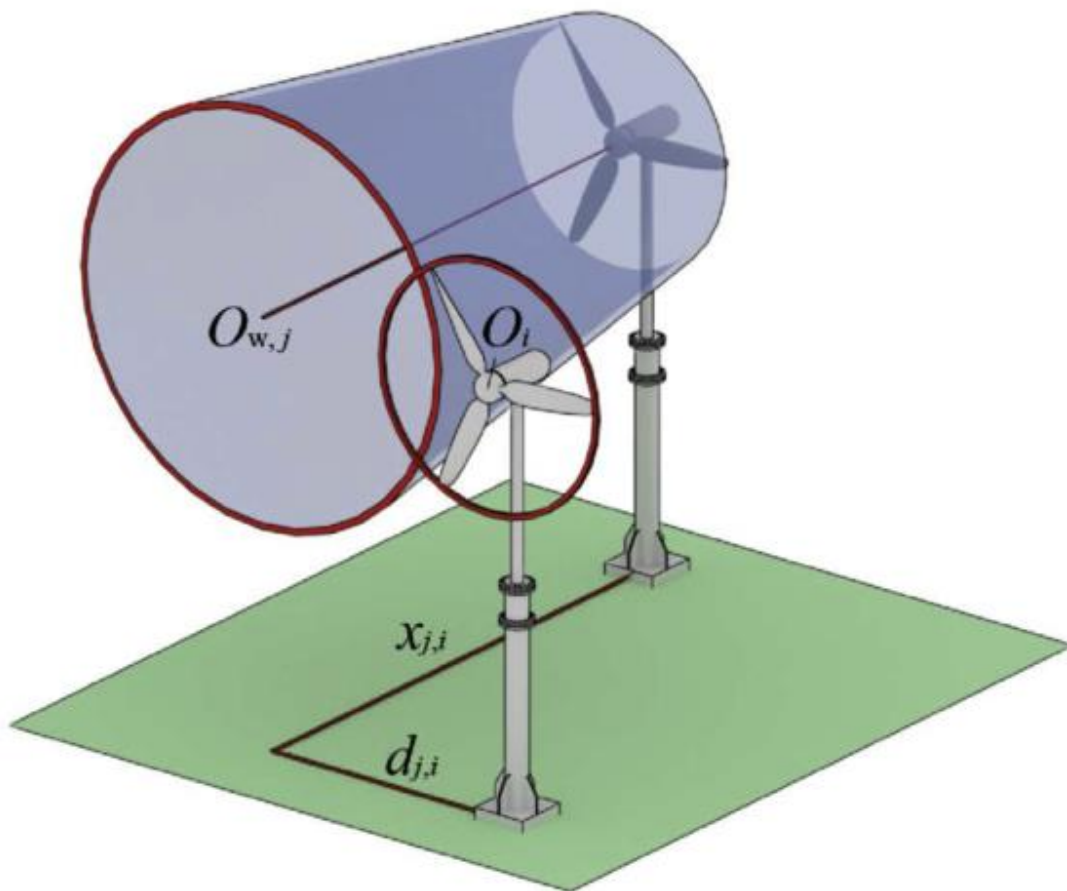
Μια τρισδιάστατη απεικόνιση πυκνότητας της χαμηλής ταχύτητας ροής παρουσιάζεται στην Εικόνα 37. Με μπλε χρώμα απεικονίζονται οι περιοχές στις οποίες η ταχύτητα είναι χαμηλή που όπως είναι αναμενόμενο, οι περιοχές βρίσκονται κυρίως πίσω από τους στρόβιλους [28].



Εικόνα 37: Τρισδιάστατη απεικόνιση της πυκνότητας της χαμηλής ταχύτητας ροής σε προσομοιωμένο αιολικό πάρκο [28].

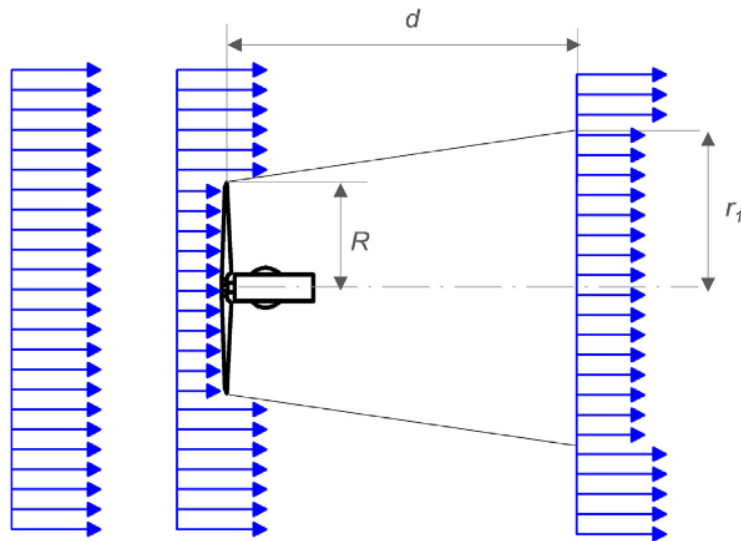
4.2 Απόρους ανεμογεννήτριας

Από τεχνική σκοπιά, το πιο σημαντικό μέγεθος που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τον σχεδιασμό των αιολικών πάρκων είναι η επίδραση των ανεμογεννητριών μεταξύ τους. Η επίδραση υπάρχει λόγω της δημιουργίας απόρου, αέρα δηλαδή ο οποίος είναι χαμηλής ποιότητας, υψηλά τυρβώδης, με χαμηλότερη ταχύτητα κινούμενος σχηματίζοντας έναν κώνο όπως φαίνεται στην Εικόνα 38. Η κλίση του κώνου εξαρτάται άμεσα από το μέγεθος της ανεμογεννήτριας και τον συντελεστή ώσης αυτής [29].



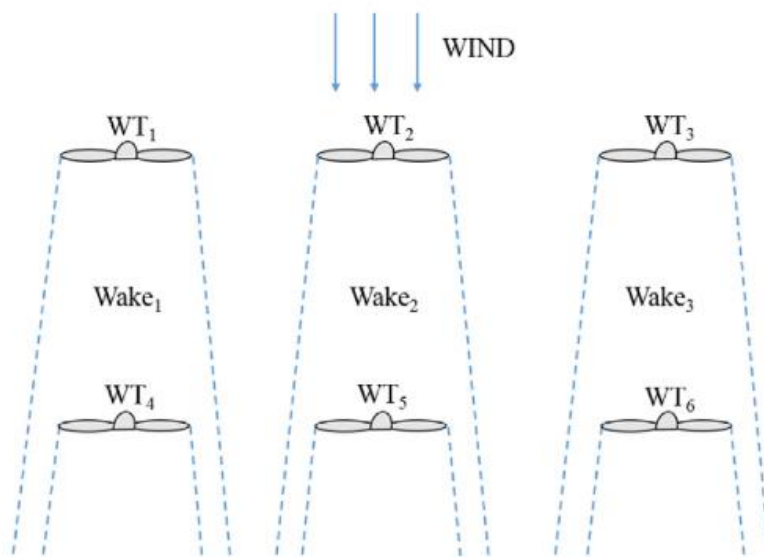
Εικόνα 38: Απόρους ανεμογεννήτριας [29].

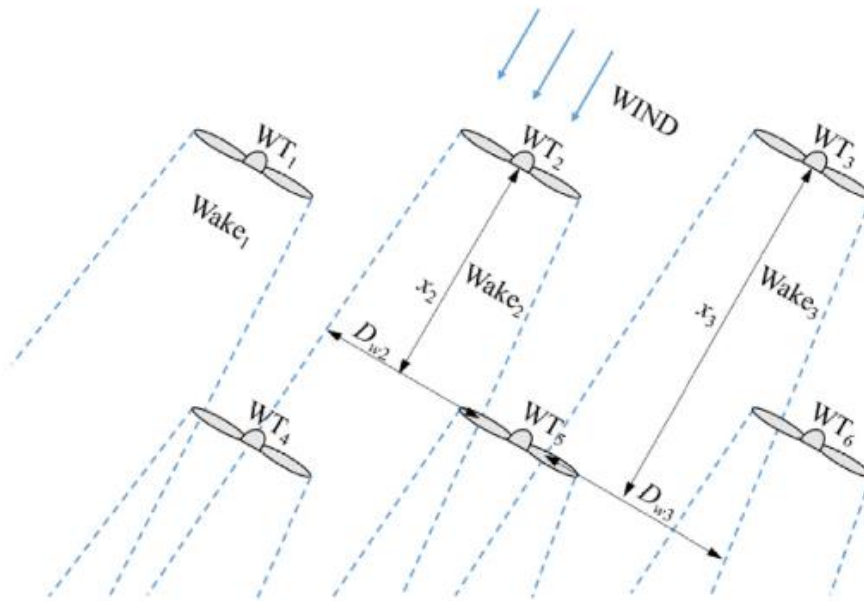
Οι διαστάσεις x και d πρέπει να έχουν επιλεγθεί με τέτοιο τρόπο ώστε η αλληλεπίδραση του απόρου της μίας ανεμογεννήτριας να έχει τις μικρότερες επιπτώσεις σε αυτήν που βρίσκεται πίσω της. Πέρα από την δημιουργία τύρβης, η ταχύτητα εντός του κώνου που περιεγράφηκε είναι αισθητά μικρότερη. Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 39 το πεδίο ταχυτήτων είναι σαφώς επηρεασμένο από την ύπαρξη της ανεμογεννήτριας.



Εικόνα 39: Κάτοψη πεδίου ταχύτητας [30].

Ωστόσο, οι ανεμογεννήτριες έχουν την δυνατότητα περιστροφής ανάλογα με την διεύθυνση του ανέμου για την μεγιστοποίηση του βαθμού απόδοσης. Όμως αξίζει να τονιστεί ότι μία τέτοια περιστροφή σε επίπεδο αιολικού πάρκου έχει άμεση επίδραση στον απόρου και συνεπώς στην αλληλεπίδραση των ανεμογεννητριών μεταξύ τους [31] όπως φαίνεται και στην Εικόνα 40. Είναι εμφανές ότι στην πρώτη περίπτωση η δεύτερη σειρά των ανεμογεννητριών είναι πλήρως καλυμμένη από τον απόρου ενώ στην περίπτωση ενός πλευρικού ανέμου, η αλληλοεπικάλυψη των ανεμογεννητριών από τους κώνους απόρου είναι σαφώς μικρότερη.





Εικόνα 40: Επίδραση της ταχύτητας ανέμου στην αλληλεπίδραση των ανεμογεννητριών μεταξύ τους [29].

Για τους παραπάνω λόγους, ορίζεται ο βαθμός απόδοσης του πάρκου ως σύστημα του λόγου της παραγόμενης ενέργειας του πάρκου ως προς την ενέργεια του θα πρόκυπτε αν οι ανεμογεννήτριες ήταν τοποθετημένες μεμονωμένα. Όσο αυτός ο βαθμός απόδοσης πλησιάζει την μονάδα, τόσο μικρότερη επίδραση υπάρχει μεταξύ των ανεμογεννητριών μεταξύ τους. Όπως είναι αναμενόμενο, μετά από κάποια απόσταση μεταξύ των ανεμογεννητριών, η επίδραση στις απώλειες λόγω τύρβης είναι αμελητέα. Ωστόσο, πέρα από τον βαθμό απόδοσης, η παρουσία αέρα κακής ποιότητας έχει άμεση επίδραση στην διάρκεια ζωής της ανεμογεννήτριας. Ο κύριος λόγος είναι η παρουσία κόπωσης των κατασκευαστικών στοιχείων η οποία μπορεί να οδηγήσει σε πρόωρη αστοχία.

Για τον υπολογισμό των απωλειών εφαρμόζονται τα εξής μοντέλα τα οποία παρουσιάζονται με αύξων βαθμό πολυπλοκότητας:

- **Μοντέλα τραχύτητας εδάφους.**

Τα μοντέλα τραχύτητας εδάφους βασίζονται σε δεδομένα από εργαστηριακές δοκιμές αεροδυναμικής σήραγγας. Τα πρώτα μοντέλα χαρακτηρισμού των απωλειών ενέργειας του πάρκου έγιναν με αυτόν τον τρόπο. Αυτά τα μοντέλα συνήθως υποθέτουν ένα λογαριθμικό προφίλ ταχύτητας ανέμου. Το αιολικό πάρκο έχει άμεση επίδραση ως προς την τραχύτητα της επιφάνειας που οδηγεί σε ένα τροποποιημένο προφίλ ταχύτητας μέσα σε αυτό. Αυτό το τροποποιημένο προφίλ ταχύτητας, όταν χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της απόδοσης

του στροβίλου, έχει ως αποτέλεσμα κατάλληλα χαμηλότερη ισχύς εξόδου για το συνολικό αεριοδυναμικό πάρκο. Τα μοντέλα αυτά βασίζονται συνήθως σε κανονικές συστοιχίες στροβίλων σε επίπεδο έδαφος.

- **Ημι-εμπειρικά μοντέλα.**

Τα ημι-εμπειρικά μοντέλα παρέχουν περιγραφές της απώλειας ενέργειας μετά από μεμονωμένες τουρμπίνες. Αυτά τα μοντέλα βασίζονται σε απλοποιημένες υποθέσεις σχετικά με την λειτουργία της ανεμογεννήτριας και στη διατήρηση της ορμής της. Μπορούν να περιλαμβάνουν εμπειρικές σταθερές που προέρχονται είτε από δεδομένα μοντέλου αεροσήραγγας είτε από δοκιμές πεδίου ανεμογεννητριών. Είναι χρήσιμα για την περιγραφή των σημαντικών πτυχών της απώλειας ενέργειας και, ως εκ τούτου, για τη μοντελοποίηση των απωλειών συστοιχίας αεριοδυναμικών πάρκων.

- **Μοντέλα ιξώδους (eddy viscosity models).**

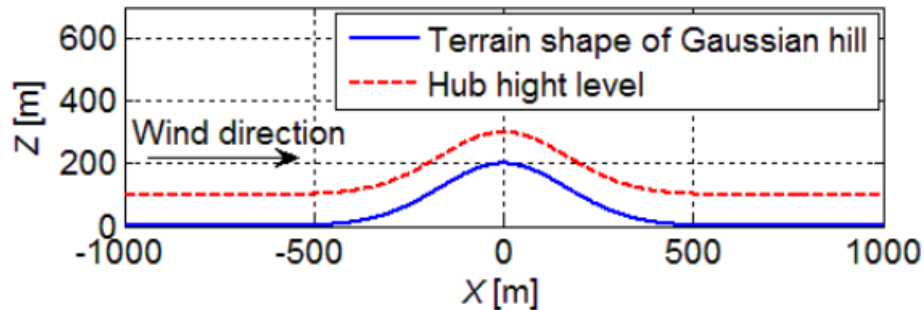
Τα μοντέλα ιξώδους βασίζονται σε λύσεις απλοποιημένων εξισώσεων Navier-Stokes. Οι εξισώσεις Navier-Stokes είναι οι εξισώσεις που περιγράφουν τη διατήρηση της ορμής ενός ρευστού με σταθερό ιξώδες και πυκνότητα. Είναι ένα σύνολο διαφορικών εξισώσεων σε τρεις διαστάσεις. Η χρήση των εξισώσεων Navier-Stokes για την περιγραφή της μέσης τυρβώδους ροής έχει ως αποτέλεσμα όρους που χαρακτηρίζουν τις τυρβώδεις διατμητικές τάσεις. Τα μοντέλα ιξώδους χρησιμοποιούν παραδοχές όπως η αξονική συμμετρία. Αυτά τα μοντέλα παρέχουν αρκετά ακριβείς περιγραφές των προφίλ ταχύτητας χωρίς σημαντική υπολογιστική προσπάθεια και χρησιμοποιούνται επίσης σε υπολογισμούς απώλειας συστοιχιών.

- **Προσομοίωση ροής με επίλυση εξισώσεων Navier–Stokes.**

Τέλος, υπάρχει μια ποικιλία προσεγγίσεων για την επίλυση του πλήρους συνόλου των εξισώσεων Navier-Stokes. Αυτά τα μοντέλα απαιτούν σημαντική υπολογιστική ισχύ και μπορούν να χρησιμοποιήσουν πρόσθετα μοντέλα για να περιγράψουν τη μεταφορά και τη διάχυση της τυρβώδους κινητικής ενέργειας ώστε να επιτευχθεί σύγκλιση. Αυτά τα μοντέλα είναι τα καλύτερα κατάλληλα για ακαδημαϊκή έρευνα, για λεπτομερείς περιγραφές της συμπεριφοράς λειτουργίας και για καθοδήγηση της ανάπτυξης απλούστερων μοντέλων, σαν τα παραπάνω.

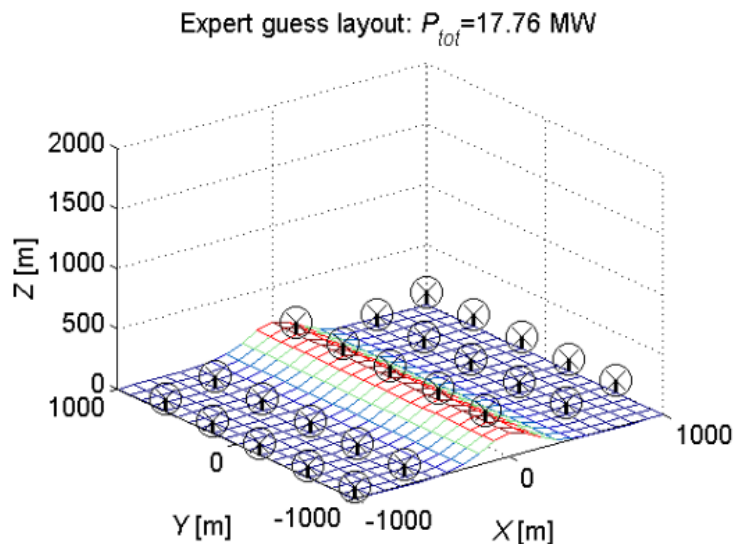
4.3 Επίδραση διεύθυνσης ανέμου και ύπαρξης λόφου.

Μία ενδιαφέρουσα μελέτη παρουσιάζεται [32] λαμβάνοντας υπόψη την ύπαρξη πλαγιάς η οποία ακολουθεί κατανομή Gauss όπως φαίνεται στην Εικόνα 41.

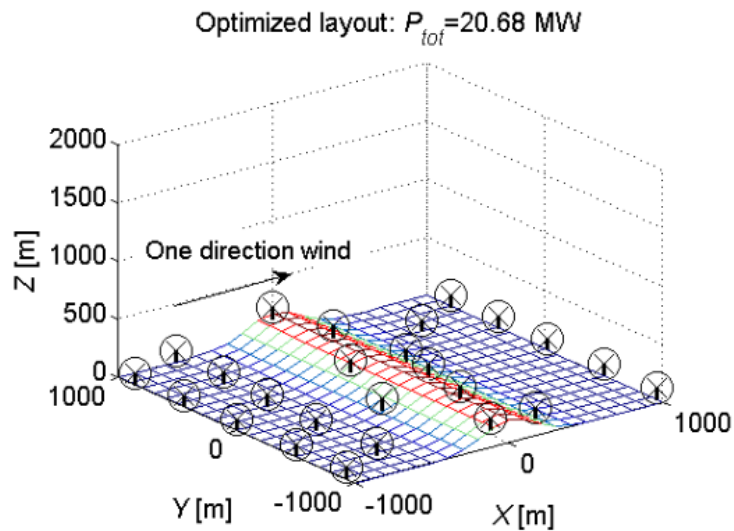


Εικόνα 41: Πλαγιά η οποία ακολουθεί κατανομή Gauss [32].

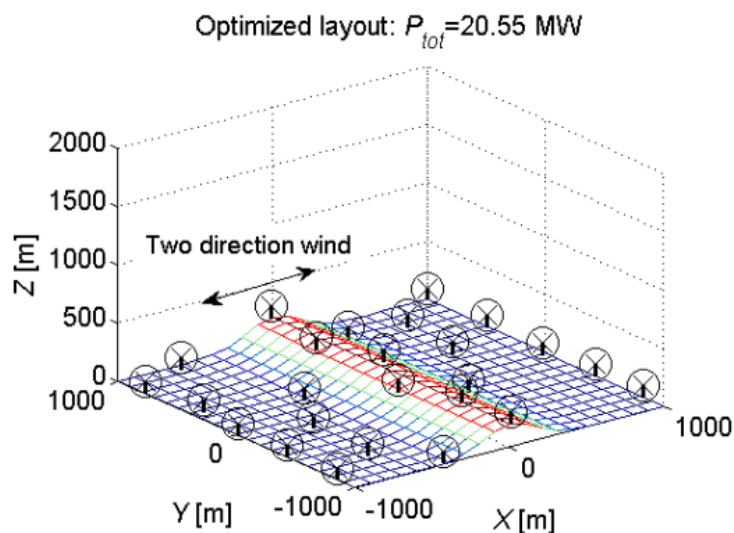
Τα αποτελέσματα της μελέτης δείχνουν ότι για 25 συστήματα ανεμογεννητριών μικροχωροθέτηση βασισμένη στην εμπειρία παρουσιάζεται στην Εικόνα 42. Αποτελείται από 5 σειρές, 5 ανεμογεννητριών εκάστη και η συνολική παραγωγικότητα φτάνει τα 17.76 mW. Στην Εικόνα 43 παρουσιάζονται αποτελέσματα από 2 βελτιστοποιήσεις, στα οποία την μία φορά λαμβάνεται υπόψη ότι ο άνεμος έχει μία διεύθυνση, ενώ στην δεύτερη ότι έχει δύο. Οι επαναλήψεις του αλγόριθμου έφταναν τις 10000, ωστόσο τα αποτελέσματα είναι εντυπωσιακά. Η αύξηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας είναι κατά μέσο όρο στα 20.6 mW για τις δύο περιπτώσεις, μία αύξηση της τάξης του 13.5%.



Εικόνα 42: Μικροχωροθέτηση βασισμένη σε εμπειρία [32].



Εικόνα 43: Βελτιστοποιημένη μικροχωροθέτηση για μία διεύθυνση ανέμου [32].

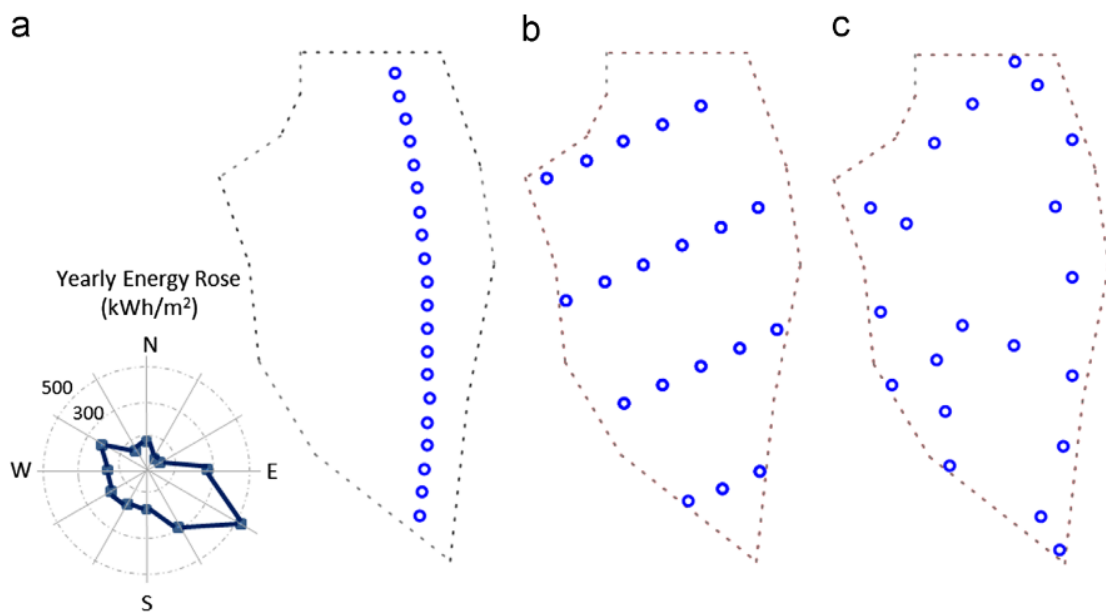


Εικόνα 44: Βελτιστοποιημένη μικροχωροθέτηση για δύο διευθύνσεις ανέμου [32].

4.4 Παράδειγμα βελτιστοποίησης μικροχωροθέτησης υπεράκτιου πάρκου

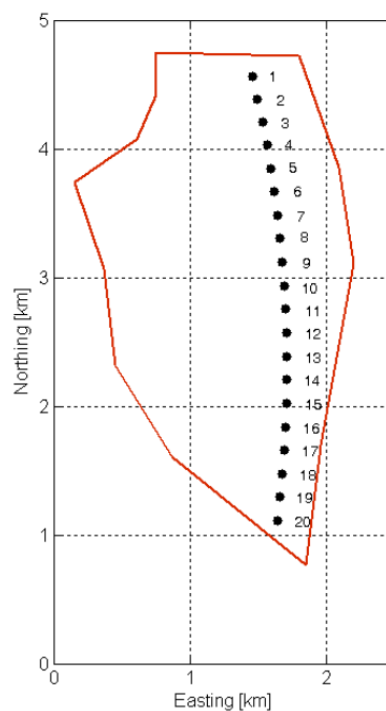
Αρκετές μελέτες δείχνουν ότι οι υπάρχουσες διαμορφώσεις των ανεμογεννητριών σε ένα πάρκο δεν είναι απαραίτητως οι βέλτιστες όσον αφορά τη συνολική ενέργεια και την τελική κερδοφορία του πάρκου. Αυτή η έλλειψη βελτιστοποίησης παρουσιάζεται στην Εικόνα 45 όπου φαίνονται οι ακόλουθες ρυθμίσεις του υπεράκτιου αιολικού πάρκου Middelgrunden [30], [33] το οποίο βρίσκεται 3.5 km από την Κοπεγχάγη. Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζονται στην Εικόνα 46 η αρίθμηση της πραγματικής διάταξης των 20 ανεμογεννητριών που αποτελούν το πάρκο μαζί και με τα όρια σχεδιασμού που περιγράφονται με κόκκινη γραμμή, όπως και στην Εικόνα 45α. Στην Εικόνα 47 παρουσιάζεται η συμμετρική βελτιστοποιημένη διάταξη όπως στην Εικόνα 45β. Τέλος, στην Εικόνα 48 παρουσιάζεται η στοχαστική

βελτιστοποιημένη διάταξη όπως στην Εικόνα 45γ. Οι διατάξεις που εμφανίζονται στα (β) και (γ) θα παρείχαν αύξηση της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας κατά 5% και 6%, αντίστοιχα.



Εικόνα 45: Στάδια βελτιστοποίησης [30].

Προφανώς, αυτή η βελτίωση θα είχε σημαντικές επιπτώσεις σε επίπεδο ετήσιων εσόδων και κατά συνέπεια στην κερδοφορία του έργου. Ως εκ τούτου, δικαιολογείται η σημαντικότητα που θα πρέπει να δίνεται στις τεχνικές βελτιστοποίησης της μικροχωροθέτησης που εφαρμόζονται σε ένα αιολικό πάρκο.



Εικόνα 46: Αρίθμηση ανεμογεννητριών στο πραγματικό σύστημα [33].



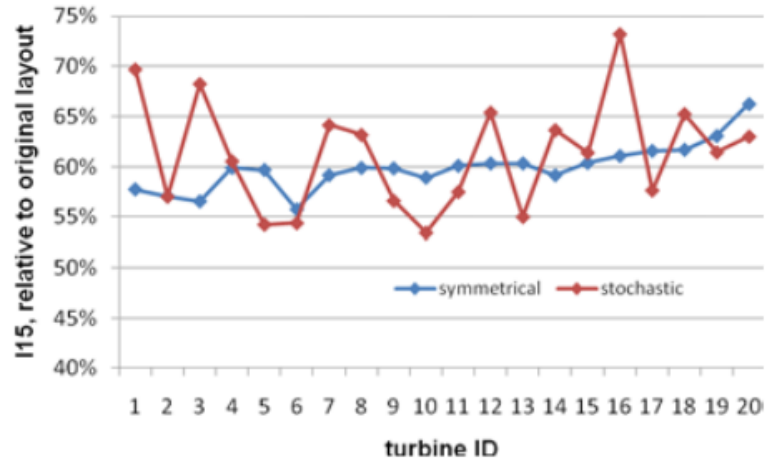
Εικόνα 47: Συμμετρική βελτιστοποιημένη διάταξη [33].



Εικόνα 48: Ακανόνιστη/Στοχαστική βελτιστοποιημένη διάταξη [33].

Η διαδικασία συμμετρικής βελτιστοποιημένης διάταξης, είναι πολύ γρήγορη, και απαιτεί μόνο ένα μικρό και πεπερασμένο αριθμό επαναλήψεων. Οι προκύπτουσες διατάξεις είναι συγκρίσιμες με τις στοχαστικές όσον αφορά την καθαρή ενεργειακή απόδοση. Η διαφορά μεταξύ των δύο μεθόδων ως προς το ενεργειακό όφελος είναι $0.13 \text{ mW}/\text{έτος}$ το οποίο θεωρείται αμελητέο, αν το συγκρίνει κανείς με το υπολογιστικό κόστος για τον υπολογισμό της στοχαστικής μικροχωροθέτησης.

Επίσης, την συμμετρική βελτιστοποίηση μειώνονται τα μέγιστα φορτία των ανεμογεννητριών, αν και η ελάχιστη απόσταση μεταξύ τους είναι πιθανό να είναι μεγαλύτερη, από ό,τι για μια διάταξη που επιτυγχάνεται με τη χρήση στοχαστικής διαδικασίας βελτιστοποίησης.



Εικόνα 49: Επίπεδα τύρβης I15 [33].

Επιπροσθέτως, η ισοδύναμη τύρβη σχεδιασμού στα 15 m/s σύμφωνα με το IEC 61400-1 υπολογίστηκε για όλες τις ανεμογεννήτριες. Τα αποτελέσματα, σε σχέση με την αρχική διάταξη για το I15, φαίνονται στην Εικόνα 49. Είναι εμφανές ότι οι βελτιστοποιημένες διατάξεις προσφέρουν σημαντικά χαμηλότερες τιμές τυρβώδους ροής σε σχέση με την πραγματική διάταξη.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ολοένα και πιο σημαντική κρίνεται η αξιοποίηση των ΑΠΕ τόσο σε ευρωπαϊκό αλλά και σε παγκόσμιο επίπεδο. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της Ελλάδας είναι ότι διαθέτει αρκετά υψηλό αιολικό δυναμικό, μία κρίσιμη παράμετρο για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε το τι πρέπει να γνωρίζουμε για την επιλογή της θέσης εγκατάστασης ενός αιολικού πάρκου τόσο σε μακροσκοπικό επίπεδο (επιλογή τοποθεσίας) όσο και σε μικροσκοπικό (μικροχωροθέτηση). Αρχικά έγινε μία λεπτομερής περιγραφή μίας ανεμογεννήτριας ως μονάδα αλλά και ενός συστήματος από αυτές δηλαδή ένα αιολικό πάρκο.

Από την μελέτη που παρουσιάστηκε προέκυψε ότι εκτός από τα χαρακτηριστικά του ανέμου της κάθε υποψήφιας περιοχής πρέπει να εξετάζονται μια σειρά από παραμέτρους η οποίες επιδρούν στην επιλογή της τοποθεσίας με εξίσου σημαντικό βαθμό. Η εύκολη πρόσβαση στο σημείο εγκατάστασης, η απόσταση από το δίκτυο της ΔΕΗ, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις, οι ακραίες μετεωρολογικές συνθήκες της περιοχής είναι παράμετροι οι οποίες δεν ποσοτικοποιούνται εύκολα αλλά είναι σημαντικές για την απρόσκοπτη λειτουργία του πάρκου.

Επιπλέον, παρουσιάστηκαν με λεπτομέρεια οι παράμετροι που επηρεάζουν την μικροχωροθέτηση των ανεμογεννητριών εντός του πάρκου. Ο σημαντικότερος παράγοντας είναι ο απόρους της ανεμογεννήτριας ο οποίος ανάλογα με την διεύθυνση του ανέμου μπορεί να επιδράσει με μεταβαλλόμενο την ενεργειακή αποδοτικότητα. Τέλος παρουσιάζονται μερικά παραδείγματα χωροθέτησης από υπάρχων αιολικό πάρκο και τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η ενεργειακή αποδοτικότητα μπορεί να αυξηθεί έως και 13.5% με την χρήση αλγορίθμων βελτιστοποίησης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] “Energy statistics - an overview - Statistics Explained.” https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_statistics_-_an_overview#Final_energy_consumption (accessed Sep. 08, 2023).
- [2] “Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.),” *Rae Website*. <https://www.rae.gr/ape/> (accessed Sep. 08, 2023).
- [3] “Share of energy consumption from renewable sources in Europe (8th EAP).” <https://www.eea.europa.eu/ims/share-of-energy-consumption-from> (accessed Sep. 08, 2023).
- [4] “Greenhouse gas emission intensity of electricity generation in Europe.” <https://www.eea.europa.eu/ims/greenhouse-gas-emission-intensity-of-1> (accessed Sep. 08, 2023).
- [5] “Use of renewable energy for transport in Europe.” <https://www.eea.europa.eu/ims/use-of-renewable-energy-for> (accessed Sep. 08, 2023).
- [6] “Στατιστικά χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας 2020,” *Rae Website*. <https://www.rae.gr/statistika-rae-2020/> (accessed Sep. 08, 2023).
- [7] C. J. Rhodes, “Solar Energy: Principles and Possibilities,” *Science Progress*, vol. 93, no. 1, pp. 37–112, Mar. 2010, doi: 10.3184/003685010X12626410325807.
- [8] “Ηλιακή ενέργεια / Φωτοβολταϊκά - ΥΠΕΝ.” <https://ypen.gov.gr/energeia/ape/technologies/iliaki-fotovoltaika/> (accessed Sep. 08, 2023).
- [9] “Geothermal Energy,” *WTS Energy*. <https://www.wtsenergy.com/glossary/geothermal-energy/> (accessed Sep. 08, 2023).
- [10] “Γεωθερμική ενέργεια- ΥΠΕΝ.” <https://ypen.gov.gr/energeia/ape/technologies/geothermia/> (accessed Sep. 08, 2023).
- [11] “Λίμνη Κρεμαστών,” Oct. 09, 2018. <https://www.limnikremaston.gr/> (accessed Sep. 08, 2023).
- [12] “ΚΑΠΕ-Κεντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας.” <http://www.cres.gr/cres/index.html> (accessed Sep. 08, 2023).
- [13] “Hellenic College - Βιομάζα.” <https://hellenic-college.gr/wp-content/uploads/works/energy-sources/biomaza.htm> (accessed Sep. 08, 2023).
- [14] K. Veerabhadrapa *et al.*, “Power Generation Using Ocean Waves: A Review,” *Global Transitions Proceedings*, vol. 3, no. 2, pp. 359–370, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.glt.2022.05.001.

-
- [15] “Ανεμόμυλοι στην Ελλάδα | greek culture/ελληνικός πολιτισμός.” <https://greekcultureellinikopolitismos.wordpress.com/2016/11/10/%CE%B1%CE%BD%CE%B5%CE%BC%CF%8C%CE%BC%CF%85%CE%BB%CE%BF%CE%B9-%CF%83%CF%84%CE%B7%CE%BD-%CE%B5%CE%BB%CE%BB%CE%AC%CE%B4%CE%B1/> (accessed Sep. 08, 2023).
- [16] “A global leader in renewables energy - Iberdrola.” <https://www.iberdrola.com/> (accessed Sep. 08, 2023).
- [17] E. Hau, *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. doi: 10.1007/978-3-642-27151-9.
- [18] J. F. Manwell, “Wind Energy Explained: Theory, Design and Application”.
- [19] “Wind turbine - Wikipedia.” https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_turbine (accessed Sep. 10, 2023).
- [20] “International Electrical Commission - IEC.” <https://iec.ch/homepage> (accessed Sep. 08, 2023).
- [21] “Global Wind Atlas.” <https://globalwindatlas.info> (accessed Sep. 08, 2023).
- [22] “Wind energy database.” <https://www.thewindpower.net/index.php> (accessed Sep. 08, 2023).
- [23] “World’s largest wind turbine is now fully operational and connected,” *New Atlas*, Jul. 20, 2023. <https://newatlas.com/energy/worlds-largest-wind-turbine-myse-16-260/> (accessed Sep. 08, 2023).
- [24] X.-Y. Tang, Q. Yang, B. Stoevesandt, and Y. Sun, “Optimization of wind farm layout with optimum coordination of turbine cooperations,” *Computers & Industrial Engineering*, vol. 164, p. 107880, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.cie.2021.107880.
- [25] B. Saavedra-Moreno, S. Salcedo-Sanz, A. Paniagua-Tineo, L. Prieto, and A. Portilla-Figuera, “Seeding evolutionary algorithms with heuristics for optimal wind turbines positioning in wind farms,” *Renewable Energy*, vol. 36, no. 11, pp. 2838–2844, Nov. 2011, doi: 10.1016/j.renene.2011.04.018.
- [26] “Going Global Expanding Offshore Wind to Emerging Markets.” Energy Sector Management Assistance Program, Oct. 2019.
- [27] M. Elgendi, M. AlMallahi, A. Abdelkhalig, and M. Y. E. Selim, “A review of wind turbines in complex terrain,” *International Journal of Thermofluids*, vol. 17, p. 100289, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.ijft.2023.100289.

-
- [28] R. J. A. M. Stevens, D. F. Gayme, and C. Meneveau, “Effects of turbine spacing on the power output of extended wind-farms,” *Wind Energy*, vol. 19, no. 2, pp. 359–370, 2016, doi: 10.1002/we.1835.
- [29] M. Song, K. Chen, and J. Wang, “A two-level approach for three-dimensional micro-siting optimization of large-scale wind farms,” *Energy*, vol. 190, p. 116340, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.energy.2019.116340.
- [30] J. Serrano González, M. Burgos Payán, J. M. R. Santos, and F. González-Longatt, “A review and recent developments in the optimal wind-turbine micro-siting problem,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 30, pp. 133–144, Feb. 2014, doi: 10.1016/j.rser.2013.09.027.
- [31] K. Yang, G. Kwak, K. Cho, and J. Huh, “Wind farm layout optimization for wake effect uniformity,” *Energy*, vol. 183, pp. 983–995, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.07.019.
- [32] J. Feng and W. Z. Shen, “Wind farm layout optimization in complex terrain: A preliminary study on a Gaussian hill,” *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 524, no. 1, p. 012146, Mar. 2014, doi: 10.1088/1742-6596/524/1/012146.
- [33] A. Neubert, A. Shah, and W. Schlez, “MAXIMUM YIELD FROM SYMMETRICAL WIND FARM LAYOUTS”.