

ΙΟΝΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΤΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ



Πτυχιακή Εργασία :

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ
ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΦΟΙΤΗΤΡΙΑΣ : ΣΕΜΠΕΚΟΥ ΜΑΡΚΕΛΛΑ
Αρ. Μητρώου Π2015052

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΒΛΑΜΟΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

ΚΕΡΚΥΡΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2022

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Επιβλέπων:

Παναγιώτης Βλάμος

Καθηγητής Ιονίου Πανεπιστημίου

Μέλη:

Μάρκος Αυλωνίτης

Αναπληρωτής Καθηγητής Ιονίου Πανεπιστημίου

Θεόδωρος Ανδρόνικος

Αναπληρωτής Καθηγητής Ιονίου Πανεπιστημίου

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου οι οποίοι συνέβαλαν τα μέγιστα για να ολοκληρώσω τις σπουδές μου καθώς και τον κ. Βλάμο ο οποίος επέβλεπε την πτυχιακή μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει ως θέμα τους αλγόριθμους βελτιστοποίησης της απόδοσης της λειτουργίας των ανεμογεννητριών. Ολοκληρώθηκε μέσα από πέντε ενότητες. Πιο αναλυτικά η πρώτη ενότητα αφορά εισαγωγικά στοιχεία σχετικά με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τον άνεμο ως ενεργειακό πόρο τονίζοντας τα θετικά και αρνητικά σημεία της αιολικής ενέργειας. Στη συνέχεια η δεύτερη ενότητα εστίασε στις ανεμογεννήτριες, τις κατηγορίες και τις λειτουργίες της. Επίσης αναφέρθηκαν οι αιολικές μονάδες παραγωγής ενέργειας, ή αιολικά πάρκα, που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Η τρίτη ενότητα εμβάθυνε στο βέλτιστο σχεδιασμό, στους αλγόριθμους βελτιστοποίησης και τους γενετικούς αλγόριθμους. Η τέταρτη ενότητα εμβάθυνε στη διερεύνηση του προβλήματος κάνοντας αναφορά σε διάφορων ειδών πάρκα, τον άνεμο, τη μέτρηση, την ισχύ και τη πυκνότητα του αέρα αλλά και την τοπογραφία μιας περιοχής. Η πέμπτη και τελευταία ενότητα στη συνέχεια αναφέρθηκε στην εφαρμογή και τη λειτουργία του αλγόριθμου, τη βελτιστοποίηση και τον έλεγχο νέας λύσης καθώς και τον τερματισμό του αλγόριθμου. Τέλος η εργασία έκλεισε με τα συμπεράσματα και τις προτάσεις.

ABSTRACT

The subject of this thesis is the optimization algorithms of the performance of the operation of wind turbines. It is completed through five sections. In more detail the first section deals with introductory information about renewable energy sources and wind as an energy resource highlighting the positive and negative points of wind energy. Furthermore the second module is focused on wind turbines, their categories and functions. They were also mentioned wind power plants and wind farms that generate electricity. The third section delved into optimal design, optimization algorithms and genetic algorithms. The fourth section looked into the investigation of the problem by referring to different types of parks, wind, measurement, strength and density of air and also the topography of an area. The fifth and final section addressed the implementation and operation of the algorithm, the optimization and verification of a new solution and the termination of the algorithm. Finally, the thesis ends with conclusions and suggestions.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες	3
Περίληψη	4
Abstract	5
1. Εισαγωγή	8
1.1 Ο άνεμος ως ενεργειακός πόρος.....	9
1.2 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	12
1.2.1 Μορφές Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας	13
1.3 Αιολική Ενέργεια	14
1.3.1 Θετικά και αρνητικά σημεία της Αιολικής Ενέργειας	16
1.3.2 Αιολική Ενέργεια σε Ευρωπαϊκό επίπεδο	18
1.3.3 Αιολική Ενέργεια στην Ελλάδα και Κύπρο	18
2. Ανεμογεννήτριες	20
2.1 Κατηγορίες και λειτουργία ανεμογεννητριών	20
2.2 Ανεμογεννήτριες Κατακόρυφου Άξονα	20
2.3 Ανεμογεννήτριες Οριζόντιου Άξονα	20
2.3.1 Οι αιολικές μονάδες παραγωγής ενέργειας, ή αιολικά πάρκα, παράγουν ηλεκτρική ενέργεια	21
2.4 Καμπύλη ισχύος στις ανεμογεννήτριες	21
2.5 Ανεμογεννήτριες σταθερών ή μεταβλητών στροφών	22
2.5.1 Ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών	22
2.5.2 Ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών	23
2.6 Τύποι ελέγχου των πτερυγίων των ανεμογεννητριών	24
2.6.1 Έλεγχος του βήματος πτερυγίου	24
2.6.2 Έλεγχος παθητικής απώλειας στήριξης	26
2.6.3 Έλεγχος ενεργητικής απώλειας στήριξης	26
3. Βέλτιστος Σχεδιασμός	27
3.1 Βελτιστοποίηση	29
3.2 Αλγόριθμοι βελτιστοποίησης	29
3.2.1 Γενετικοί αλγόριθμοι	29
3.2.2 Ant colony optimization	30
3.2.3 Αλγόριθμος Harmony Search	31
3.3 Επαναληπτικές μέθοδοι	31
3.4 Μηχανική	34
3.5 Οικονομικά και χρηματοοικονομικά	34
3.6 Βιολογία υπολογιστικών συστημάτων	35

4. Η Διερεύνηση στο πρόβλημα	36
4.1 Αιολικά πάρκα	36
4.1.1 Χερσαία Αιολικά Πάρκα	36
4.1.2 Υπεράκτια αιολικά πάρκα	36
4.2 Κριτήρια για την κατάλληλη τοποθέτηση αιολικού πάρκου	37
4.3 Αιολικό δυναμικό	40
4.3.1 Ο άνεμος	41
4.3.2 Μέτρηση του ανέμου	42
4.3.3 Η ισχύς του ανέμου	44
4.3.4 Πυκνότητα του αέρα	45
4.3.5 Σχετική κατανομή ανέμου	45
4.3.6 Το πολικό διάγραμμα-ροζέτα (windrose)	47
4.4 Τοπογραφία περιοχής	48
4.4.1 Αύξηση της ταχύτητας σε σχέση με το ύψος	48
4.4.2 Τύρβη στον άνεμο	51
4.5 Πεδίο Ροής Ομόρου Ανεμογεννητριών	52
4.5.1 Ίχνος ανέμου πίσω από μια ιδανική ανεμογεννήτρια	54
4.5.2 Το μοντέλο του N.O. Jensen	56
5. Εφαρμογή	60
5.1 Λειτουργία Αλγορίθμου	60
5.1.1 Περιγραφή Διαδικασίας Υπολογισμού – Κύριο Πρόγραμμα	60
5.1.1.1 Λειτουργία του αλγόριθμου HS	60
5.1.1.2 Παράμετροι του HS Αλγορίθμου και Δεδομένα Αιολικού Πάρκου	61
5.1.1.3 Αρχική Μνήμη	62
5.1.1.4 Βελτιστοποίηση	63
5.1.1.5 Έλεγχος Νέας Λύσης	63
5.1.1.6 Τερματισμός Αλγορίθμου	64
Συμπεράσματα – Προτάσεις	64
Βιβλιογραφία	66

1. Εισαγωγή

Η εθνική ενεργειακή πολιτική θέτει το κύριο πλαίσιο που είναι απαραίτητο για τη διασφάλιση μιας βιώσιμης και αποδοτικής ενεργειακής βιομηχανίας. Επιπλέον, οι κυβερνήσεις και η βιομηχανία δεσμεύονται να συμμορφωθούν με τις διεθνείς περιφερειακές και υπερπεριφερειακές συμφωνίες για τη διασφάλιση ενός καθαρού περιβάλλοντος, της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού και της αποτελεσματικής χρήσης της ενέργειας. Τυπικά παραδείγματα μέτρων ενεργειακής πολιτικής που απαιτούν νέους βιομηχανικούς κανόνες και επιχειρηματικές προσεγγίσεις περιλαμβάνουν την εμπορία εκπομπών, την εγκατάσταση αιολικής ενέργειας, τη διαχείριση από την πλευρά της ζήτησης και τη διαφοροποίηση του ενεργειακού εφοδιασμού (Bryner, 2002).

Οι πολιτικές ενέργειας/κλίματος και περιβάλλοντος είναι άρρηκτα συνδεδεμένες. Όλη η παραγωγή και κατανάλωση ενέργειας έχει περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Αν και είναι συχνά δελεαστικό να παραβλέπουμε το περιβάλλον σε δύσκολες οικονομικές περιόδους, οι προκλήσεις της βιώσιμης παραγωγής και χρήσης ενεργειακών πόρων και της προστασίας του φυσικού μας περιβάλλοντος αντιπροσωπεύουν εξίσου μια ευκαιρία για επιδίωξη βιώσιμης οικονομικής ανάπτυξης, συμβάλλοντας παράλληλα στον μετριασμό και την προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή. (Anup et al., 2019)

Ωστόσο, υπό ορισμένες συνθήκες, οι αλληλεπιδράσεις ενέργειας-περιβάλλοντος μπορεί να συνεπάγονται διάφορους κινδύνους ή συμβιβασμούς, είτε σχετίζονται με το κλίμα, τον αέρα, τη γη, τη βιοποικιλότητα, τα απόβλητα, το νερό ή το θαλάσσιο περιβάλλον. Η περιβαλλοντική νομοθεσία και οι πολιτικές της ΕΕ υπάρχουν προκειμένου να διασφαλίσουν ότι οι πολιτικές της ΕΕ αξιοποιούν στο έπακρο όλες τις δυνατότητες μείωσης των κινδύνων και των επιπτώσεων της κατανάλωσης πόρων και ενέργειας. Αυτό θα επιφέρει άμεσες και έμμεσες βελτιώσεις στην υγεία, το κλίμα και το περιβάλλον, θα μειώσει τις εισαγωγές και θα επιτρέψει στην ΕΕ να ανταγωνίζεται καλύτερα διεθνώς σε έναν κόσμο περιορισμένων πόρων.

Αναφορικά με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η αιολική ενέργεια είναι σίγουρα μια από τις πιο προσιτές μορφές επιλογής σε περιοχές όπου υπάρχει φυσική αφθονία, χάρη και στο χαμηλό κόστος συντήρησης των εγκατεστημένων συστημάτων παραγωγής. Επιπλέον, τα τελευταία χρόνια η τεχνολογική ανάπτυξη των ανεμογεννητριών οδήγησε σε ισχυρή ενσωμάτωση συστημάτων μικροπαραγωγής εντός αστικών περιοχών, επιτρέποντας έτσι την τροφοδοσία πολλών ιδιωτών χρηστών και ταυτόχρονα τον περιορισμό της ακουστικής και οπτικής επίδρασης. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη των αλγορίθμων προσομοίωσης ανεμογεννητριών. (Wang et al., 2018)

Η ανάπτυξη ενός μηχανισμού κίνησης έχει σχεδιαστεί για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης ενός συστήματος αιολικής μικροπαραγωγής, δίνοντας ιδιαίτερη προσοχή σε τεχνικές μεγιστοποίησης της ισχύος που εξάγεται από τον στρόβιλο.

Συγκεκριμένα, έχουν μελετηθεί διαφορετικοί αλγόριθμοι που υπάρχουν στη βιβλιογραφία, αξιολογώντας την απόδοσή τους με βάση τις πληροφορίες που διαθέτει ο αλγόριθμος, όπως η γνώση των παραμέτρων του στροβίλου ή η ταχύτητα του ανέμου. Τέλος, έχουν προταθεί λύσεις για τη βελτίωση των ίδιων των αλγορίθμων που ανταποκρίνονται σε ορισμένα προβλήματα που παρουσιάζονται: ιδιαίτερα το έλλειμμα απόδοσης που υποβοηθάται από τις μηχανικές αδράνειες και τον έλεγχο του συστήματος μετατροπής ενέργειας για υψηλές ταχύτητες ανέμου.

Όλες οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με μοντελοποίηση του στροβίλου και της ηλεκτρικής κίνησης με τη χρήση του λογισμικού Matlab και συνοδεύονται από πολυάριθμες προσομοιώσεις.

Η χρήση συστημάτων ικανών να παράγουν «καθαρή» και βιώσιμη ενέργεια σημειώνει αξιοσημείωτη αύξηση τα τελευταία χρόνια, χάρη και στη συναισθηματική ώθηση που προκύπτει από τα κλιματικά προβλήματα και την παροχή πόρων που αντιμετωπίζει ο πλανήτης μας (Anup et al., 2019)

1.1 Ο άνεμος ως ενεργειακός πόρος

Η Γη απελευθερώνει διαρκώς τη θερμότητα λόγω της ακτινοβολίας του ήλιου στην ατμόσφαιρα αλλά όχι ομοιόμορφα, που ποικίλλει ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος και το υψόμετρο. Σε περιοχές όπου εκλύεται λιγότερη θερμότητα, ο αέρας είναι ψυχρότερος και η πίεση των ατμοσφαιρικών αερίων αυξάνεται, ενώ όπου απελευθερώνεται περισσότερη θερμότητα, ο αέρας θερμαίνεται και η πίεση κατά συνέπεια μειώνεται (Wang, et al., 2018).

Δημιουργείται λοιπόν μια μακροκυκλοφορία λόγω των συναγωγικών κινήσεων των μαζών του αέρα. τα ζεστά έχουν μικρότερη πυκνότητα και κινούνται προς τα πάνω, τραβώντας έτσι τον ψυχρότερο αέρα που έχει μεγαλύτερη πυκνότητα προς τα κάτω. Χάρη στο γεγονός ότι η ατμόσφαιρα τείνει να αποκαθιστά διαρκώς την ισορροπία της πίεσης, επομένως δημιουργείται ο άνεμος, ο οποίος είναι η κίνηση μιας περισσότερο ή λιγότερο γρήγορης μάζας αέρα μεταξύ περιοχών διαφορετικής πίεσης. (Wang et al., 2018)

Όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά πίεσης, τόσο πιο γρήγορη θα είναι η μετατόπιση του αέρα και επομένως τόσο πιο δυνατός θα είναι ο άνεμος. Ωστόσο, είναι καλό να υπογραμμίσουμε ότι ο άνεμος δεν φυσά προς την κατεύθυνση που ενώνει το κέντρο υψηλής πίεσης με αυτό της χαμηλής πίεσης, αλλά αποκλίνει προς το βόρειο ημισφαίριο που κυκλοφορεί γύρω από τα κέντρα υψηλής πίεσης κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού και

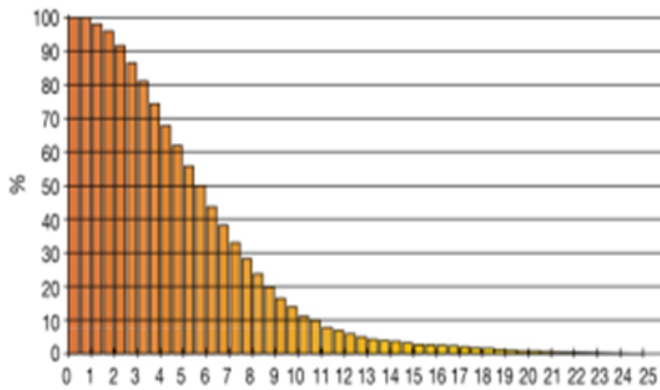
γύρω από τα κέντρα χαμηλής πίεσης στο αντίθετη κατεύθυνση. Η απόκλιση προκύπτει από την περιστροφή της Γης και την επακόλουθη φαινομενική δύναμη Coriolis (Stefanakos, et al., 2021).

Στην πραγματικότητα, στη γη ένα κινούμενο σώμα επηρεάζεται από την επίδραση της περιστροφής τόσο πιο αισθητά όσο πιο κοντά είναι στους πόλους. με αυτόν τον τρόπο, ο αέρας που κινείται βόρεια στο βόρειο ημισφαίριο υφίσταται βορειοανατολική μετατόπιση, ενώ εάν κινείται νότια υφίσταται μετατόπιση νοτιοδυτικής. Το προφίλ και οι ανωμαλίες της επιφάνειας της ξηράς ή της θάλασσας επηρεάζουν βαθιά τον άνεμο και τα τοπικά χαρακτηριστικά του. Στην πραγματικότητα ο άνεμος φυσά με μεγαλύτερη ένταση σε μεγάλες και επίπεδες επιφάνειες όπως η θάλασσα και δυναμώνει στην κορυφή των λόφων, ενώ επιβραδύνει σε ανώμαλες επιφάνειες, όπως πόλεις ή δάση και η ταχύτητά του σε σχέση με το ύψος από το έδαφος επηρεάζεται από τις συνθήκες ατμοσφαιρικής σταθερότητας. .(Anur et al., 2019)

Προκειμένου να αξιοποιηθεί η αιολική ενέργεια, είναι επομένως πολύ σημαντικό να ληφθούν υπόψη οι έντονες διακυμάνσεις της ταχύτητας μεταξύ διαφορετικών τοποθεσιών και η κατεύθυνση και η ένταση του ανέμου που κυμαίνονται γρήγορα γύρω από τη μέση τιμή: αυτό είναι το φαινόμενο των αναταράξεων που αποτελεί σημαντικό χαρακτηριστικό του ανέμου, καθώς καθορίζει τις διακυμάνσεις της δύναμης που ασκείται στα πτερύγια του στροβίλου, αυξάνοντας έτσι τη φθορά τους και μειώνοντας τη μέση διάρκεια ζωής τους. Επομένως, η μεταβλητότητα και η τυχαιότητα του ανέμου αντιπροσωπεύουν τα κυρίαρχα μειονεκτήματα της ηλεκτρικής ενέργειας που λαμβάνεται από αιολικές πηγές. Στην πραγματικότητα, εφόσον το μερίδιο της ενέργειας που παράγεται από το αιολικό εργοστάσιο είναι μικρό σε σύγκριση με το μέγεθος του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας στο οποίο είναι συνδεδεμένο, η μεταβλητότητα της αιολικής παραγωγής δεν αποσταθεροποιεί το ίδιο το δίκτυο και ως εκ τούτου αυτές οι εκτιμήσεις κάνουν χρήση αιολικής ενέργειας βέλτιστη για μικρές εγκαταστάσεις (μικροάνεμος) (Kalogeri, et al., 2019).

Από το ιστόγραμμα του σχήματος 1.1 είναι δυνατό να ληφθεί το ιστόγραμμα της στατιστικής συχνότητας της ταχύτητας του ανέμου. Ωστόσο, η χρονική κατανομή της ταχύτητας του ανέμου για μια τοποθεσία περιγράφεται συνήθως χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση στατιστικής κατανομής του Weibull καθώς είναι αυτή που προσεγγίζει καλύτερα τη συχνότητα κατανομής των μέσων ταχυτήτων ανέμου του προηγούμενου ιστογράμματος.

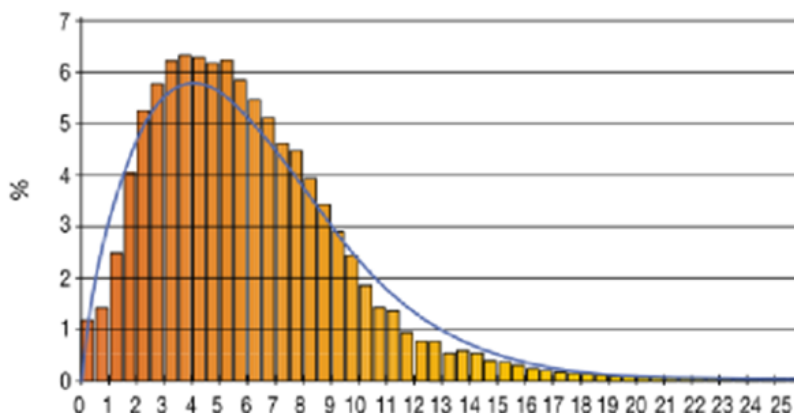
Για μια δεδομένη τιμή ταχύτητας v η πυκνότητα πιθανότητας δίνεται από το παρακάτω γράφημα:



Εικόνα 1: Ιστογράμμο ποσοστιαίας διάρκειας ταχύτητας ανέμο

Πηγή: Andualem, 2020

$$f(v) = \frac{k}{A} \frac{v^{k-1}}{A} \exp\left(\frac{-v}{A}\right) \quad [s/m]$$



Εικόνα 2: Ιστογράμμο συχνότητας ταχύτητας ανέμου

Πηγή: Andualem, 2020

Δεδομένου ότι ο σχεδιασμός ενός αιολικού σταθμού στοχεύει στη μεγιστοποίηση της ετήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [kWh], αυτό μπορεί θεωρητικά να εκφραστεί και να εκτιμηθεί χρησιμοποιώντας την κατανομή Weibull για την ταχύτητα του ανέμου στο χώρο εγκατάστασης και την καμπύλη ισχύος ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τον άνεμο στροβίλου ως συνάρτηση της στιγμιαίας ταχύτητας του ανέμου.

Επομένως, η ετήσια παραγωγικότητα είναι δυνατόν να εκφραστεί με την ακόλουθη σχέση (Fu & Wang 2018):

$$E = 8760 \int_0^{\infty} P(v) f(v) dv \quad [kWh]$$

όπου 8760' είναι ο αριθμός των ωρών σε ένα έτος, $P(v)$ είναι η ισχύς [kW] που παράγεται από την ανεμογεννήτρια με ταχύτητα ανέμου v , που προκύπτει από την καμπύλη ισχύος που παρέχεται από τον κατασκευαστή και $f(v)$ [s / m] Είναι η πυκνότητα πιθανότητας της στατιστικής κατανομής των ταχυτήτων Weibull ανέμου στο χώρο εγκατάστασης.

1.2 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, που πολλές φορές ονομάζονται καθαρή ενέργεια, προέρχονται από φυσικές πηγές ή διαδικασίες που ανανεώνονται διαρκώς . Για παράδειγμα, το φως του ήλιου ή ο άνεμος συνεχίζουν να υπάρχουν με ενέργεια, παρόλο που η παρουσία τους εξαρτάται από τον χρόνο και τον καιρό (McKenna, et al., 2022). Ενώ οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας θεωρούνται πολλές φορές ως μια νέα τεχνολογία, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας χρησιμοποιούνται από τα παλιά χρόνια για θέρμανση, μεταφορά, φωτισμό και άλλα. Ο άνεμος έχει τροφοδοτήσει βάρκες προκειμένου να πλεύσουν τις θάλασσες και ανεμόμυλους προκειμένου να αλέσουν σιτηρά. Ο ήλιος παρείχε ζεστασιά κατά τη διάρκεια της ημέρας και βοήθησε να ανάψουν φωτιές και να διαρκέσουν μέχρι το βράδυ. Όμως τα τελευταία 500 περίπου χρόνια, οι άνθρωποι στράφηκαν όλο και περισσότερο σε φθηνότερες πηγές ενέργειας, όπως ο άνθρακας και το αέριο.

Τώρα που έχουμε ολοένα και πιο καινοτόμους και λιγότερο δαπανηρούς τρόπους δέσμευσης και διατήρησης της αιολικής και ηλιακής ενέργειας, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας γίνονται πιο σημαντική πηγή ενέργειας, αντιπροσωπεύοντας περισσότερο από το ένα όγδοο της παραγωγής στις ΗΠΑ. Η επέκταση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας συμβαίνει επίσης σε μεγάλες και μικρές κλίμακες, από ηλιακά πάνελ ταράτσας σε σπίτια μέχρι γιγάντια υπεράκτια αιολικά πάρκα. Ακόμη και ορισμένες ολόκληρες αγροτικές κοινότητες βασίζονται σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για θέρμανση και φωτισμό (Best & Burke, 2018).

Καθώς η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας συνεχίζει να αυξάνεται, βασικός στόχος θα είναι ο εκσυγχρονισμός του ηλεκτρικού δικτύου, καθιστώντας το πιο έξυπνο, ασφαλέστερο και καλύτερα ενοποιημένο σε όλες τις περιοχές.

Η μη ανανεώσιμη ενέργεια περιλαμβάνει ορυκτά καύσιμα όπως το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο και τον άνθρακα. Οι μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι διαθέσιμες μόνο σε περιορισμένες ποσότητες και χρειάζονται πολύ χρόνο προκειμένου να αναπληρωθούν. Όταν αντλούμε αέριο στο σταθμό, χρησιμοποιούμε έναν πεπερασμένο πόρο εξευγενισμένο από αργό πετρέλαιο που υπάρχει από την προϊστορική εποχή. (Jiang, 2021).

Οι μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας βρίσκονται επίσης συνήθως σε συγκεκριμένα μέρη του κόσμου, γεγονός που τις καθιστά πιο άφθονες σε ορισμένα έθνη από άλλα.

Αντίθετα, κάθε χώρα έχει πρόσβαση στον ήλιο και τον άνεμο. Η ιεράρχηση της μη ανανεώσιμης ενέργειας μπορεί επίσης να βελτιώσει την εθνική ασφάλεια μειώνοντας την εξάρτηση μιας χώρας από τις εξαγωγές από έθνη πλούσια σε ορυκτά καύσιμα.

Πολλές μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο το περιβάλλον ή την ανθρώπινη υγεία. Για παράδειγμα, η γεώτρηση πετρελαίου είναι δυνατόν να απαιτεί εξόρυξη λωρίδων στο βόρειο δάσος του Καναδά, η τεχνολογία που σχετίζεται με το fracking είναι δυνατόν να προκαλέσει σεισμούς και ρύπανση των υδάτων, ενώ οι σταθμοί παραγωγής ενέργειας με άνθρακα μολύνουν τον αέρα. Συμπληρωματικά, όλες αυτές οι δραστηριότητες συμβάλλουν στην υπερθέρμανση του πλανήτη.

1.2.1 Μορφές Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Ηλιακή ενέργεια

Οι άνθρωποι έχουν χρησιμοποιήσει την ηλιακή ενέργεια για χιλιάδες χρόνια - προκειμένου να καλλιεργήσουν τα χωράφια τους, να ζεστάνουν και να στεγνώσουν τα τρόφιμά τους και πολλά ακόμα. Σύμφωνα με το Εθνικό Εργαστήριο Ενεργειακών Πόρων, «περισσότερη ενέργεια από τον ήλιο πέφτει στη γη σε μια ώρα από ό,τι καταναλώνεται από όλους στον κόσμο την ίδια στιγμή». Σήμερα, χρησιμοποιούμε την ηλιακή ενέργεια με πολλούς τρόπους όπως για τη θέρμανση κατοικιών και επιχειρήσεων, για θέρμανση νερού ή για χρήση συσκευών (Prata, et al., 2018). Τα ηλιακά κύτταρα, ή φωτοβολταϊκά (PV) είναι κατασκευασμένα από πυρίτιο ή άλλο υλικό που μετατρέπει την ηλιακή ενέργεια απευθείας σε ηλεκτρική. Τα καταμεμημένα ηλιακά συστήματα παρέχουν εσωτερική ηλεκτρική ενέργεια για κατοικίες και επιχειρήσεις, είτε μέσω στέγης είτε μέσω κοινοτικών υπηρεσιών που παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια γενικά. Οι ηλιακοί κήποι μπορούν να παράγουν ενέργεια για χιλιάδες σπίτια, χρησιμοποιώντας έναν καθρέφτη για τη συλλογή του ηλιακού φωτός σε στρέμματα ηλιακών κυψελών. Τα ηλιακά πάρκα μπορούν να είναι αποτελεσματικά με χρήσεις που δεν έχουν καμία επίδραση στο περιβάλλον.

Η ηλιακή ενέργεια για παράδειγμα προμηθεύει λίγο περισσότερο από το 1 τοις εκατό της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στις ΗΠΑ. Ωστόσο, σχεδόν το ένα τρίτο του συνόλου της νέας παραγωγικής ικανότητας προήλθε από ηλιακή ενέργεια το 2017, δεύτερο μόνο μετά το φυσικό αέριο. (Kumar et al., 2018).

Τα ηλιακά συστήματα ενέργειας δεν προξενούν ατμοσφαιρική ρύπανση ή περιττά αέρια και, όταν ενσωματώνονται υπεύθυνα, τα περισσότερα ηλιακά οφέλη έχουν μικρό αντίκτυπο στο περιβάλλον από τα βιομηχανικά συστήματα (Serban, et al., 2020).

1.3 Αιολική Ενέργεια

Παγκοσμίως, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από αιολικές πηγές έχει εξαιρετικά θετική τάση τα τελευταία χρόνια, φτάνοντας σε τιμή εγκατεστημένης ισχύος κοντά στα 200 GW στο τέλος του 2010. Οι προοπτικές ανάπτυξης για τα επόμενα χρόνια είναι ακόμη πιο ελπιδοφόρες, δεδομένου ότι ο υπερδιπλασιασμός της εγκατεστημένης ισχύος παγκοσμίως (450 GW) αναμένεται το 2015 και, σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Ένωση, η αιολική κάλυψη στην Ευρώπη το 2015. Το 2020 θα είναι περίπου 12% της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας.

Η ανάπτυξη της παραγωγής αιολικής ενέργειας συνέβαλε επίσης σημαντικά στη μείωση του κόστους της τεχνολογίας, προκαλώντας έτσι θετική ανάπτυξη, ωθούμενη και από τις επιχορηγήσεις που χορηγήθηκαν σε αυτές τις μονάδες. Για παράδειγμα στην Ιταλία υπήρξε καλή διάχυση των αιολικών σταθμών, με περίπου 5800 MW στο τέλος του 2010 (τρίτη στην Ευρώπη, έκτη στον κόσμο) και αναμένεται ότι οι δεσμεύσεις που ανέλαβε η Ιταλία στο ευρωπαϊκό πλαίσιο θα οδηγήσουν, έως το 2020, σε διπλασιασμό της εγκατεστημένης ισχύος στην ξηρά, για επιπλέον 6200 MW, και κατασκευή 680 MW υπεράκτιων σταθμών.

Ωστόσο, παρά το μεγάλο ενδιαφέρον για την αιολική ενέργεια, η συμμετοχή της εθνικής βιομηχανίας (ιδίως των μεσαίων και μεγάλων εταιρειών) ήταν σπάνια και οι δραστηριότητες έρευνας και ανάπτυξης στον τομέα ήταν επίσης μέτριες. Ειδικότερα, παράλληλα με τις μεσαίες και μεγάλες εγκαταστάσεις, υπάρχει ένας άλλος τομέας του οποίου οι δυνατότητες πολλές φορές παραβλέπονται: η μικροάνεμος. Αυτά τα πολύ μικρά αιολικά πάρκα (από λίγα kW έως 20 kW) βρίσκουν εφαρμογές διαφορετικές από τις τυπικές βιομηχανικές, όπως ιδιωτικές κατοικίες, τουριστικές υποδομές, απομονωμένες κατασκευές και επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας (Fu & Wang 2018).

Καλό είναι λοιπόν να υπογραμμίσουμε ότι λόγω της ιδιαιτερότητας των αναγκών, οι εφαρμογές της μικροαιολικής ενέργειας απαιτούν απλοποιημένες λύσεις χωρίς να χρειάζονται απαραίτητα μηχανήματα μεγάλου μεγέθους. Επιπλέον, στη μικροανεμογεννήτρια, όπως και σε όλες τις άλλες μικρής κλίμακας μονάδες ανανεώσιμων πηγών, έχει αποφασιστεί η απουσία φορολογίας για ονομαστικές ισχύς κάτω των 20 kW, γεγονός που καθιστά ακόμη πιο κίνητρο τη μελέτη νέων τεχνολογικών λύσεων στον τομέα αυτό (Onesa, & Rusu, 2019).

Ο άνεμος, ο οποίος αντιπροσωπεύει λίγο περισσότερο από το 6 τοις εκατό της παραγωγής των ΗΠΑ, έχει γίνει η φθηνότερη πηγή ενέργειας σε πολλά μέρη της χώρας. Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να τοποθετηθούν οπουδήποτε με υψηλές ταχύτητες ανέμου - όπως κορυφές λόφων και ανοιχτές πεδιάδες - ή ακόμα και σε ανοιχτά νερά. .(Kumar et al., 2018).

Άλλες Εναλλακτικές Πηγές Ενέργειας

Υδροηλεκτρική ενέργεια

Η ηλεκτρική ενέργεια είναι η μεγαλύτερη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας αν και η αιολική ενέργεια αναμένεται να πρωτοστατήσει στο εγγύς μέλλον. Η ηλεκτρική ενέργεια εξαρτάται από το νερό, συνήθως ταχέως κινούμενο νερό σε ένα μεγάλο ποτάμι ή νερό που ρέει γρήγορα από ένα υψηλό σημείο - και μετατρέπει την ισχύ αυτού του νερού σε ηλεκτρική ενέργεια περιστρέφοντας το νερό μιας γεννήτριας. Σε εθνικό και διεθνές επίπεδο, οι μεγάλοι υδροηλεκτρικοί σταθμοί - ή τα μεγάλα φράγματα - θεωρούνται πολλές φορές ως μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Τα μεγάλα φράγματα εκτρέπουν και μειώνουν τις φυσικές ροές, περιορίζοντας την πρόσβαση των πληθυσμών ζώων και ανθρώπων που στηρίζονται σε ποτάμια. Οι μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί (με εγκατεστημένη ισχύ κάτω από περίπου 40 μεγαβάτ), με προσεκτική διαχείριση, δεν τείνουν να προξενούν τόση περιβαλλοντική ζημιά, καθώς εκτρέπουν μόνο ένα κλάσμα της ροής (Onoa, & Rusu, 2019).

Ενέργεια Βιομάζας

Η βιομάζα είναι μια φυσική ουσία που προέρχεται από φυτά και ζώα και περιλαμβάνει καλλιέργειες, και απόβλητα δέντρων. Όταν τα μόρια καίγονται, η χημική ενέργεια απελευθερώνεται ως θερμότητα και είναι δυνατόν να παραχθεί από τον ατμό. Η βιομάζα πολλές φορές λανθασμένα περιγράφεται ως καθαρότερος, ανανεώσιμος και εναλλακτικός πράσινος άνθρακας και άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η πρόσφατη επιστήμη, ωστόσο, έχει δείξει ότι πολλά είδη ειδικά από τα δάση παράγουν υψηλά επίπεδα διοξειδίου του άνθρακα. Υπάρχουν επίσης αρνητικές επιπτώσεις στη βιοποικιλότητα. Ωστόσο, ορισμένοι τύποι ενέργειας από βιομάζα είναι δυνατόν να είναι μια επιλογή για χαμηλές εκπομπές άνθρακα υπό ευνοϊκές συνθήκες. Για παράδειγμα, το πριονίδι και τα τσιπ από πριονιστήρια που διαφορετικά θα αποσυντίθενται γρήγορα και θα απελευθερώνουν άνθρακα είναι δυνατόν να είναι πηγή ενέργειας χαμηλών εκπομπών άνθρακα (Garcia, et al., 2021).

Γεωθερμική ενέργεια

Η επιφάνεια της γης είναι τόσο ζεστή όσο ο ήλιος, λόγω της αργής αποσύνθεσης των ραδιενεργών σωματιδίων στα πετρώματα στο κέντρο της γης. Η γεώτρηση παράγει πολύ ζεστό υπόγειο νερό ως αέριο ζεστού νερού, το οποίο στη συνέχεια αντλείται μέσω ενός κινητήρα στροβίλου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι γεωθερμικές μονάδες έχουν

συνήθως λιγότερο καπνό όταν ενεργοποιούν τον ατμό και το νερό που χρησιμοποιούσαν προηγουμένως στη δεξαμενή. Υπάρχουν τρόποι να κατασκευαστούν γεωθερμικοί σταθμοί όπου δεν υπάρχουν υπόγειες λίμνες, αλλά υπάρχουν φόβοι ότι θα μπορούσαν να αυξήσουν τον κίνδυνο σεισμών σε περιοχές που ήδη θεωρούνται θερμές. (Ona, & Rusu, 2019).

Θαλάσσια ενέργεια

Η παλιρροιακή και η κυματική ενέργεια είναι ακόμα σε αναπτυξιακή φάση, αλλά ο ωκεανός θα κυβερνάται πάντα από τη βαρύτητα του φεγγαριού, γεγονός που καθιστά την αξιοποίηση της ισχύος του μια ελκυστική επιλογή. Ορισμένες προσεγγίσεις της παλιρροιακής ενέργειας είναι δυνατόν να βλάψουν την άγρια ζωή, όπως τα παλιρροϊκά φράγματα, τα οποία βρίσκονται σε έναν ωκεάνιο κόλπο ή λιμνοθάλασσα. Όπως η παλιρροιακή ισχύς, η κυματική ισχύς βασίζεται σε δομές που μοιάζουν με φράγματα ή συσκευές αγκυρωμένες στον πυθμένα του ωκεανού πάνω ή ακριβώς κάτω από την επιφάνεια του νερού.

1.3.1 Θετικά και αρνητικά σημεία της Αιολικής Ενέργειας

Η αιολική ενέργεια προσδίδει πλεονεκτήματα. Η ερευνητική προσπάθεια στοχεύει στην αντιμετώπιση της πρόκλησης της μεγιστοποίησης της χρήσης της αιολικής ενέργειας (Langer, et al., 2018).

Πλεονεκτήματα της αιολικής ενέργειας

- **Η αιολική ενέργεια είναι οικονομικά αποδοτική.** Η ανεμογεννήτρια είναι μια από τις πιο φθηνότερες πηγές ενέργειας που υπάρχουν σήμερα, πληρώνοντας 1-2 ευρώ την κιλοβατώρα.
- **Είναι μια καθαρή πηγή καυσίμου.** Η ατμοσφαιρική ρύπανση δεν μολύνει τον αέρα όπως μια μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που εξαρτάται από το πετρέλαιο που εκπέμπει σωματίδια. Οι αεροστρόβιλοι δεν εκπέμπουν αέρια θερμοκηπίου που προξενούν όξινη βροχή, καπνό ή αέριο.
- **Ο άνεμος είναι μια οικιακή πηγή ενέργειας.** Η ατμόσφαιρα της γης είναι απέραντη και ανεξάντλητη. Τα τελευταία 10 χρόνια, η αιολική ενέργεια των ΗΠΑ αυξήθηκε κατά 15% κάθε χρόνο και ο άνεμος είναι πλέον η κύρια πηγή ανανεώσιμης ενέργειας.
- **Είναι βιώσιμο.** Οι άνεμοι προέρχονται από την υπερθέρμανση του πλανήτη και τον ήλιο, την υπερθέρμανση του πλανήτη και την ατμοσφαιρική αστάθεια.
- **Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να κατασκευαστούν σε υπάρχοντα αγροκτήματα ή ράντσα.** Αυτό είναι πολύ ωφέλιμο για την οικονομία στις αγροτικές περιοχές, όπου

βρίσκονται τα περισσότερα από τα καλύτερα αιολικά πάρκα. Οι αγρότες και οι κτηνοτρόφοι μπορούν να συνεχίσουν τη γεωργία επειδή οι ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούν μόνο ένα μέρος της γης. Οι ανεμόμυλοι πληρώνουν ενοίκιο σε αγρότη ή αρδευτή για χρήση γης, δίνοντας στους ιδιοκτήτες γης επιπλέον εισόδημα (Zeng, et duk., 2019).

Προκλήσεις της Αιολικής Ενέργειας

- **Η αιολική ενέργεια είναι σημαντικό να εξακολουθεί να ανταγωνίζεται τις συμβατικές πηγές παραγωγής σε βάση κόστους.** Αν και η τιμή της αιολικής ενέργειας έχει μειωθεί απότομα τα τελευταία χρόνια, η βιομηχανία αιολικών πάρκων είναι σημαντικό να είναι σε θέση να ανταγωνιστεί οικονομικά προκειμένου να βρει τον φθηνότερο τρόπο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, και ορισμένες εταιρείες του Διαδικτύου είναι δυνατόν να έχουν πρόσβαση στον αέρα, ο αέρας θα είναι πιο ακριβός.
- **Οι καλές χερσαίες αιολικές τοποθεσίες είναι πολλές φορές σε μακρινά σημεία, και απέχουν από πόλεις όπου είναι απαραίτητη και απολύτως σημαντική η ηλεκτρική ενέργεια.** Είναι σημαντικό να υπάρχουν γραμμές για τη μεταφορά ηλεκτρικού ρεύματος από το αεροδρόμιο στο κέντρο της πόλης. Ωστόσο, η κατασκευή μικρών προκατασκευασμένων γραμμών μεταφοράς είναι δυνατόν να μειώσει το κόστος της επέκτασης της εναέριας ενέργειας.
- **Η ανάπτυξη αιολικών πόρων είναι δυνατόν να μην είναι η πιο κερδοφόρα χρήση της γης.** Η γη κατάλληλη για ανεμογεννήτριες είναι σημαντικό να ανταγωνίζεται εναλλακτικές πηγές, οι οποίες είναι δυνατόν να είναι πιο δαπανηρές από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Cranmer, et al., 2020).
- **Οι τουρμπίνες ενδέχεται να προκαλέσουν θόρυβο και αισθητική ρύπανση.** Αν και τα αιολικά πάρκα έχουν μικρό αντίκτυπο στο περιβάλλον αναφορικά με τους συμβατικούς ηλεκτρικούς κινητήρες, υπάρχουν ανησυχίες σχετικά με τον θόρυβο που δημιουργείται από την τουρμπίνα και τις οπτικές επιπτώσεις στις συνθήκες του εδάφους.
- **Τα αιολικά συστήματα μπορούν να επηρεάσουν την τοπική άγρια ζωή.** Τα πουλιά πολλές φορές σκοτώνονται πετώντας σε μια περιστρεφόμενη τουρμπίνα. Πολλά από αυτά τα προβλήματα έχουν αντιμετωπιστεί ή μετριαστεί με την ανάπτυξη της τεχνολογίας ή την εισαγωγή κατάλληλων μεθόδων. Οι νυχτερίδες έχουν επίσης σκοτωθεί από τουρμπίνες και διεξάγεται έρευνα για την ανάπτυξη και τη βελτίωση τρόπων μείωσης της επίδρασης του στροβίλου σε αυτά τα είδη. Όπως όλες οι πηγές ενέργειας, τα αιολικά πάρκα μπορούν να αλλάζουν το περιβάλλον στο οποίο

κατασκευάζονται, γεγονός που είναι δυνατόν να τροποποιήσει την ιδανικότητα αυτού του περιβάλλοντος για άλλα είδη (Chen, et al., 2018).

1.3.2 Αιολική Ενέργεια σε Ευρωπαϊκό επίπεδο

Το αιολικό πάρκο Fântânele-Cogealac είναι το μεγαλύτερο αιολικό πάρκο ξηράς στην Ευρώπη. Βρίσκεται στη νοτιοανατολική Ρουμανία και αποτελείται από 240 τουρμπίνες, ισχύος 600 MW.

Στο μέλλον, η αιολική ενέργεια είναι πιθανό να συνεχίσει να αυξάνεται στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Σύμφωνα με έκθεση του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος, η αιολική ενέργεια είναι δυνατόν να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην επίτευξη των ευρωπαϊκών στόχων για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η Ευρωπαϊκή Ένωση Αιολικής Ενέργειας (τώρα WindEurope) έχει υπολογίσει ότι 230 γιγαβάτ (GW) αιολικής ισχύος θα εγκατασταθούν στην Ευρώπη έως το 2023, αποτελούμενη από 190 GW στην ξηρά και 40 GW στην υπεράκτια. Αυτό θα παράγει το 14-17% της ηλεκτρικής ενέργειας της ΕΕ, αποφεύγοντας 333 εκατομμύρια τόνους CO₂ ετησίως και εξοικονομώντας την Ευρώπη 28 δισεκατομμύρια ευρώ ετησίως σε κόστος καυσίμων. Έρευνα από μια μεγάλη ποικιλία πηγών σε διάφορες ευρωπαϊκές χώρες δείχνει ότι η υποστήριξη για την αιολική ενέργεια είναι σταθερά περίπου 80 τοις εκατό στο ευρύ κοινό. Μέχρι το 2020, 56% διείσδυση αιολικής ενέργειας επιτεύχθηκε στη Δανία, 36% στη Λιθουανία, 35% στην Ιρλανδία, 23% στην Πορτογαλία, 23% στη Γερμανία, 20% στην Ισπανία, 18% στην Ελλάδα, 16% στη Σουηδία, 15% (μέσος όρος) στην ΕΕ (Onea, & Rusu, 2019).

1.3.3 Αιολική Ενέργεια στην Ελλάδα και Κύπρο

Το Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα της Ελλάδας προβλέπει 7 GW αιολικής ενέργειας στη χώρα μέχρι το 2030. Επί του παρόντος, η Ελλάδα έχει εγκατεστημένη 4 GW αιολικής ενέργειας, όλα στο έδαφος, καλύπτοντας το 12% της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Όμως οι δυνατότητες για αιολική ενέργεια στην Ελλάδα είναι πολύ μεγαλύτερες, ειδικά για την υπεράκτια αιολική ενέργεια. Οι αιολικοί πόροι είναι καλοί και ο υπεράκτιος άνεμος θα μπορούσε να βοηθήσει τα νησιά να αποκτήσουν ενεργειακή αυτονομία.

Πιο πρόσφατα, η ελληνική κυβέρνηση ανακοίνωσε ότι εξετάζει ένα νέο νομικό πλαίσιο για την ανάπτυξη υπεράκτιων αιολικής ενέργειας. Η Ελληνική Ένωση Αιολικής Ενέργειας ΕΛΕΤΑΕΝ συμβουλεύεται τώρα αυτό το νέο πλαίσιο, ανοιχτό σε όλους τους ενδιαφερόμενους έως την 1η Φεβρουαρίου 2023. Για να είναι πιο αποτελεσματικό το νέο πλαίσιο, θα είναι σημαντικό να εξεταστεί το ενδεχόμενο δημιουργίας ενός φιλόδοξου αγωγού

έργου και δημοπρασίας εξασφάλιση σταθερών εσόδων για έργα μέσω συμβάσεων, εξερεύνηση και κατανομή χώρου αποτελεσματικά και προσφορά χρηματοδότησης για νέες υποδομές (Nikolaidis, et al., 2019).

Τα βαθιά νερά της Ελλάδας σημαίνουν ότι ο πλωτός άνεμος θα μπορούσε να είναι το κλειδί για την αξιοποίηση των υπεράκτιων αιολικών πόρων εκεί. Η υπεράκτια αιολική ενέργεια αναπτύχθηκε αρχικά ως τεχνολογία σταθερής βάσης στη Βόρεια Ευρώπη, πρώτα στη Βόρεια Θάλασσα και στη συνέχεια στη Βαλτική Θάλασσα, όπου το νερό είναι ρηχό. Το κόστος για τις ανεμογεννήτριες που τοποθετούνται στο κάτω μέρος είναι υψηλότερο σε βαθύτερα νερά, όπως η Μεσόγειος, αλλά ο υπεράκτιος άνεμος προσφέρει νέες προοπτικές. Αυτή τη στιγμή υπάρχουν 62 MW υπεράκτιας αιολικής ενέργειας στην Ευρώπη, συμπεριλαμβανομένου του αιολικού πάρκου Hywind 30 MW στη Σκωτία και του αιολικού πάρκου WindFloat Atlantic 25 MW στην Πορτογαλία, το οποίο είναι πλέον πλήρως λειτουργικό. Ο ευρωπαϊκός υπεράκτιος αγωγός αξίζει πάνω από 7 GW για την επόμενη δεκαετία. Όσον αφορά τα έργα στη Μεσόγειο, η Γαλλία είναι η πρώτη χώρα: θα κατασκευάσει εκεί τα τρία πρώτα προεμπορικά πλωτά αιολικά πάρκα μέχρι το 2023. Το 2022 θα δημοπρατήσει επίσης δύο τοποθεσίες των 250 MW έκαστη, με δυνατότητα επέκτασής τους έως 500 MW έκαστος στο μέλλον. Η διαχείριση της ηλεκτρικής ενέργειας στην Κύπρο γίνεται από την Αρχή Ηλεκτρισμού Κύπρου. Η ενέργεια παράγεται κυρίως σε τρεις σταθμούς μαζούτ, αλλά η χρήση της κατανεμημένης ανανεώσιμης ενέργειας επεκτείνεται. Περίπου το 97% της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας εισήχθη το 2008. Ωστόσο, ο στόχος της Ευρωπαϊκής Ένωσης ΑΠΕ (2022) για την Cyprus είναι 13%, δίνοντας στην Κύπρο την ευκαιρία να αυξήσει την παραγωγή ενέργειας και να αυξήσει την ενεργειακή της ανεξαρτησία στις εξαγωγές στο εγγύς μέλλον. Σύμφωνα με το εθνικό σχέδιο δράσης, η Κύπρος σχεδιάζει επίσης να επιτύχει αυτόν τον στόχο. Σύμφωνα με τις βασικές στατιστικές του IEA για το 2010, οι εισαγωγές ενέργειας από την Κύπρο το 2008 ήταν 5 TWh υψηλότερες από την κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας. Αυτό αντιστοιχεί περίπου στο 18% της ετήσιας ικανότητας αποθήκευσης ενέργειας. Υπήρχε ίση ανισορροπία και το 2007. Το Αναπτυξιακό Πρόγραμμα των Ηνωμένων Εθνών (UNDP) στην Κύπρο εγκατέστησε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα 15 kW στα γραφεία του. Το πάρκο κόστισε 30.000 \$ ΗΠΑ και είναι πλέον δικτυωμένο (Akylas, et al., 2020).

2. Ανεμογεννήτριες

2.1 Κατηγορίες και λειτουργία ανεμογεννητριών

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι ανεμογεννητριών:

- οριζόντιου άξονα
- κάθετου άξονα

Το μέγεθος των ανεμογεννητριών ποικίλλει ευρέως. Το μήκος των πτερυγίων είναι ο μεγαλύτερος παράγοντας για τον προσδιορισμό της ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας που είναι δυνατόν να παράγει μια ανεμογεννήτρια. Οι μικρές ανεμογεννήτριες που μπορούν να τροφοδοτήσουν ένα μόνο σπίτι είναι δυνατόν να έχουν ισχύ παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας 10 κιλοβάτ (kW). Οι μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες που λειτουργούν έχουν δυναμικότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έως κιλοβάτ (10 μεγαβάτ) και μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες βρίσκονται υπό ανάπτυξη. Οι μεγάλες ανεμογεννήτριες πολλές φορές ομαδοποιούνται προκειμένου να δημιουργήσουν αιολικές μονάδες παραγωγής ενέργειας, ή αιολικά πάρκα, που παρέχουν ενέργεια στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας (Alsaleh, & Sattler, 2019).

2.2 Ανεμογεννήτριες Κατακόρυφου Άξονα

Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα έχουν πτερύγια που είναι προσαρτημένα στην κορυφή και στο κάτω μέρος ενός κατακόρυφου ρότορα. Ο πιο συνηθισμένος τύπος ανεμογεννήτριας κατακόρυφου άξονα - η ανεμογεννήτρια Darrieus, που πήρε το όνομά της από τον Γάλλο μηχανικό Georges Darrieus που κατοχύρωσε το σχέδιο το 1931 - μοιάζει με γιγάντιο αυγοδάρτη με δύο λεπίδες. Ορισμένες εκδόσεις του στροβίλου κάθετου άξονα έχουν ύψος 100 πόδια και πλάτος 50 πόδια. Πολύ λίγες ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα χρησιμοποιούνται σήμερα επειδή δεν έχουν την ίδια απόδοση με τις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα (Kumar, et al., 2018).

2.3 Ανεμογεννήτριες Οριζόντιου Άξονα

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα έχουν πτερύγια όπως οι έλικες του αεροπλάνου και συνήθως έχουν τρία πτερύγια. Οι μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα έχουν ύψος όσο κτίρια 20 ορόφων και έχουν λεπίδες μήκους άνω των 100 ποδιών. Οι ψηλότερες ανεμογεννήτριες με μακρύτερα πτερύγια παράγουν περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια. Σχεδόν

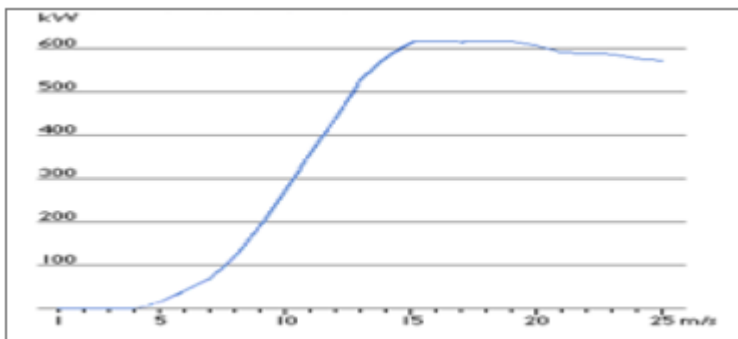
όλες οι ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα (Yang, et al., 2021).

2.3.1 Οι αιολικές μονάδες παραγωγής ενέργειας, ή αιολικά πάρκα, παράγουν ηλεκτρική ενέργεια

Τα αιολικά πάρκα είναι ομάδες ανεμογεννητριών που παράγουν μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα αιολικό πάρκο έχει συνήθως πολλές τουρμπίνες απλωμένες σε μια μεγάλη περιοχή. Ένα από τα μεγαλύτερα αιολικά πάρκα είναι το Horse Hollow Wind Energy Center στο Τέξας, το οποίο στα τέλη του 2020 διέθετε 422 ανεμογεννήτριες κατανεμημένες σε περίπου 47.000 στρέμματα. Το έργο έχει συνδυασμένη δυναμικότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας περίπου 735 μεγαβάτ (ή 735.000 κιλοβάτ). (Ona, & Rusu, 2019).

2.4 Καμπύλη ισχύος στις ανεμογεννήτριες

Η καμπύλη ισχύος μιας ανεμογεννήτριας είναι ένα γράφημα που δείχνει πόσο μεγάλη θα είναι η ηλεκτρική ισχύς εξόδου για την ανεμογεννήτρια σε διαφορετικές ταχύτητες ανέμου.



Πηγή: Shen, et al., 2018

Το γράφημα δείχνει μια καμπύλη ισχύος για μια τυπική Δανική ανεμογεννήτρια 600 kW.

Οι καμπύλες ισχύος εντοπίζονται με μετρήσεις πεδίου, όπου ένα ανεμόμετρο τοποθετείται σε έναν ιστό αρκετά κοντά στην ανεμογεννήτρια (όχι στην ίδια την ανεμογεννήτρια ή πολύ κοντά σε αυτήν, καθώς ο ρότορας της τουρμπίνας είναι δυνατόν να δημιουργήσει αναταράξεις και να κάνει τη μέτρηση της ταχύτητας ανέμου αναξιόπιστη) (Shen, et al., 2018).

Εάν η ταχύτητα του ανέμου δεν κυμαίνεται πολύ γρήγορα, τότε μπορεί κανείς να χρησιμοποιήσει τις μετρήσεις της ταχύτητας ανέμου από το ανεμόμετρο και να διαβάσει την

ηλεκτρική ισχύ εξόδου από την ανεμογεννήτρια και να σχεδιάσει τις δύο τιμές μαζί σε ένα γράφημα όπως το παραπάνω.

Στην πραγματικότητα, θα δει κανείς ένα σμήνος σημείων απλωμένο γύρω από τη μπλε γραμμή, και όχι την τακτοποιημένη καμπύλη στο γράφημα.

Ο λόγος είναι ότι στην πράξη η ταχύτητα του ανέμου κυμαίνεται πάντα και δεν μπορεί κανείς να μετρήσει ακριβώς τη στήλη του ανέμου που διέρχεται από τον ρότορα της τουρμπίνας. (Δεν είναι εφαρμόσιμη λύση μόνο η τοποθέτηση ενός ανεμόμετρου μπροστά από την τουρμπίνα, αφού και η τουρμπίνα θα ρίξει μια «σκιά του ανέμου» και θα φρενάρει τον άνεμο μπροστά του).

Στην πράξη, επομένως, είναι σημαντικό να λάβει κανείς έναν μέσο όρο των διαφορετικών μετρήσεων για κάθε ταχύτητα ανέμου και να σχεδιάσει το γράφημα μέσω αυτών των μέσων τιμών (Karamichailidou, et al., 2021).

Επιπλέον, είναι δύσκολο να γίνουν ακριβείς μετρήσεις της ίδιας της ταχύτητας του ανέμου. Αν κάποιος έχει σφάλμα 3 τοις εκατό στη μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου, τότε η ενέργεια στον άνεμο είναι δυνατόν να είναι 9 τοις εκατό υψηλότερη ή χαμηλότερη. Κατά συνέπεια, ενδέχεται να υπάρχουν σφάλματα έως συν ή πλην 10 τοις εκατό ακόμη και σε πιστοποιημένες καμπύλες ισχύος.

Οι καμπύλες ισχύος βασίζονται σε μετρήσεις σε περιοχές με χαμηλή ένταση αναταράξεων και με τον άνεμο να έρχεται κατευθείαν προς το μπροστινό μέρος της τουρμπίνας. Οι τοπικές αναταράξεις και το πολύπλοκο έδαφος (π.χ. ανεμογεννήτριες τοποθετημένες σε απόκρημνη πλαγιά) είναι δυνατόν να σημαίνουν ότι οι ριπές ανέμου χτυπούν τον ρότορα από διαφορετικές κατευθύνσεις. Ως εκ τούτου, είναι δυνατόν να είναι δύσκολο να αναπαραχθεί ακριβώς η καμπύλη ισχύος σε οποιαδήποτε δεδομένη θέση.

2.5 Ανεμογεννήτριες σταθερών ή μεταβλητών στροφών

2.5.1 Ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών

Λόγω της μη γραμμικότητας της αεροδυναμικής, ένας απλός γραμμικός αμετάβλητος χρονικά ελεγκτής είναι ανεπαρκής. Η τυπική προσέγγιση είναι να χρησιμοποιηθεί ένας ελεγκτής προγραμματισμένου κέρδους. Υπό την προϋπόθεση ότι υιοθετείται η κατάλληλη υλοποίηση του ελεγκτή, ο προγραμματισμένος έλεγχος κέρδους έχει βρεθεί ότι είναι εξαιρετικά επιτυχημένος στην πράξη (Yin, et al., 2019).

Ωστόσο, η συμβατική αιτιολόγηση για την προσέγγιση προγραμματισμού κέρδους είναι άκυρη, καθώς η ταχύτητα του ανέμου ποικίλλει γρήγορα σε ολόκληρο το λειτουργικό περίβλημα και οι παρατεταμένες ριπές οδηγούν σε διαρκή λειτουργία μακριά από την

ισορροπία. Το πλαίσιο που βασίζεται στην ταχύτητα (η εξαγωγή του οποίου αρχικά υποκινήθηκε από αυτήν την ανεπάρκεια) παρέχει μια αυστηρή αιτιολόγηση για την επιτυχία της προσέγγισης προγραμματισμού κέρδους στο πλαίσιο των ανεμογεννητριών σταθερής ταχύτητας.

Μη γραμμικός έλεγχος ανεμογεννητριών σταθερής ταχύτητας

Οι συμβατικοί ελεγκτές χρησιμοποιούν προγραμματισμό κέρδους αποκλειστικά προκειμένου να αντισταθμίσουν τη μη γραμμική αεροδυναμική. Ωστόσο, οι στόχοι ελέγχου είναι επίσης μη γραμμικοί. Με την υιοθέτηση μιας στρατηγικής μη γραμμικού ελέγχου, είναι δυνατές ουσιαστικές βελτιώσεις στην απόδοση.

Αντιμετώπιση περιορισμών ενεργοποιητή

Λόγω της μεγάλης αδράνειας των πτερυγίων του ρότορα, οι ενεργοποιητές ανεμογεννητριών έχουν γενικά χαμηλό εύρος ζώνης και υπόκεινται σε αυστηρούς περιορισμούς θέσης και ταχύτητας. Οι μεταβατικές καταστάσεις που σχετίζονται με την αντιμετώπιση των περιορισμών θέσης είναι δυνατόν να οδηγήσουν σε μεγάλη υποβάθμιση της απόδοσης. Έχει διαπιστωθεί ότι, λόγω της παρουσίας τόσο της ολοκληρωμένης δράσης όσο και ενός πόλου χαμηλής συχνότητας στον ελεγκτή, οι συμβατικές μέθοδοι αντι-περιέλιξης είναι αποτελεσματικές στη μείωση αυτών των παροδικών και είναι σημαντικό να ληφθούν νέα μέτρα. Τα μεταβατικά στοιχεία που σχετίζονται με τους περιορισμούς ρυθμού ενεργοποιητή έχουν μικρή άμεση επίδραση στην απόδοση. Ωστόσο, αυτοί οι περιορισμοί μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντική μείωση των περιθωρίων σταθερότητας με επακόλουθη απαίτηση για αποσυντονισμό του ελεγκτή (Abdelbaky, et al., 2020).

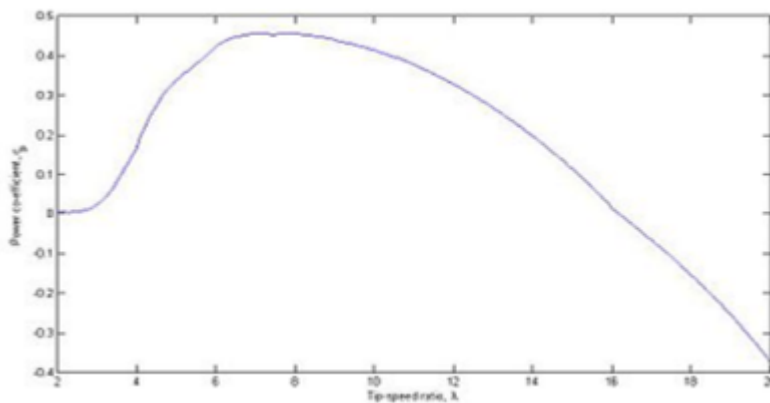
2.5.2 Ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών

Προηγούμενη έρευνα σε ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας έχει δείξει ότι μπορούν να επιτευχθούν σημαντικές βελτιώσεις στην απόδοση με την υιοθέτηση κατάλληλων υλοποιήσεων ελεγκτών και μη γραμμικών στρατηγικών ελέγχου. Η εφαρμογή παρόμοιων προσεγγίσεων σε ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας αποτελεί επί του παρόντος αντικείμενο εκτεταμένης έρευνας.

Μια ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας είναι αυτή που έχει σχεδιαστεί ειδικά προκειμένου να λειτουργεί σε ένα ευρύ φάσμα στροφών ρότορα. Είναι σε άμεση αντίθεση με την ανεμογεννήτρια σταθερής ταχύτητας όπου η ταχύτητα του ρότορα είναι περίπου

σταθερή. Ο λόγος για τη μεταβολή της ταχύτητας του ρότορα είναι να συλλάβουμε τη μέγιστη αεροδυναμική ισχύ στον άνεμο, καθώς η ταχύτητα του ανέμου ποικίλλει. Η αεροδυναμική απόδοση ή ο συντελεστής ισχύος,

C_p για μια σταθερή γωνία κλίσης πτερυγίου λαμβάνεται με τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας στη βέλτιστη αναλογία ταχύτητας κορυφής όπως φαίνεται στο παρακάτω γράφημα



Πηγή: Shen, et al., 2018

Ο λόγος κορυφής-ταχύτητας δίνεται από την ακόλουθη έκφραση:

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

όπου είναι η ταχύτητα του ρότορα (σε ακτίνια ανά δευτερόλεπτο), είναι η ακτίνα του ρότορα, και είναι η ταχύτητα του ανέμου. Καθώς η ταχύτητα του ανέμου ποικίλλει, η ταχύτητα του ρότορα είναι σημαντικό να μεταβάλλεται προκειμένου να διατηρείται η μέγιστη απόδοση.

2.6 Τύποι ελέγχου των πτερυγίων των ανεμογεννητριών

2.6.1 Έλεγχος του βήματος πτερυγίου

Ο έλεγχος του βήματος του πτερυγίου και της ταχύτητας της γεννήτριας είναι οι πιο αποτελεσματικές μέθοδοι για τη ρύθμιση της ισχύος εξόδου. Οι ακόλουθες στρατηγικές ελέγχου χρησιμοποιούν τον έλεγχο ταχύτητας βήματος και γεννήτριας για τη διαχείριση της λειτουργικότητας του στροβίλου σε όλη την καμπύλη ισχύος: σταθερής ταχύτητας σταθερού βήματος, σταθερής ταχύτητας μεταβλητού βήματος, σταθερού βήματος μεταβλητής ταχύτητας και μεταβλητού βήματος μεταβλητής ταχύτητας (Sinner, et al., 2021).

Το σταθερό βήμα σταθερής ταχύτητας (FS-FP) είναι η μόνη διαμόρφωση όπου είναι αδύνατο να βελτιωθεί η απόδοση με ενεργό έλεγχο. Σε αυτό το σχέδιο, η γεννήτρια του στροβίλου συνδέεται απευθείας με το ηλεκτρικό δίκτυο, με αποτέλεσμα η ταχύτητα της γεννήτριας να κλειδώνει στη συχνότητα της γραμμής ισχύος και να καθορίζει την ταχύτητα περιστροφής. Αυτές οι ανεμογεννήτριες ρυθμίζονται χρησιμοποιώντας μεθόδους παθητικής αναστολής σε υψηλές ταχύτητες ανέμου. Η επιλογή της σχέσης του κιβωτίου ταχυτήτων γίνεται σημαντική για αυτόν τον παθητικό έλεγχο, επειδή διασφαλίζει ότι δεν γίνεται υπέρβαση της ονομαστικής ισχύος. Η ονομαστική ισχύς της τουρμπίνας επιτυγχάνεται μόνο με μία ταχύτητα ανέμου επίσης. Αυτό συνεπάγεται κακή ρύθμιση ισχύος ως αποτέλεσμα περιορισμένων λειτουργιών.

Η διαμόρφωση σταθερής ταχύτητας μεταβλητού βήματος (FS-VP) λειτουργεί σε σταθερή γωνία βήματος κάτω από την ονομαστική ταχύτητα ανέμου και προσαρμόζει διαρκώς τη γωνία πάνω από την ονομαστική ταχύτητα ανέμου. Προκειμένου να διευκρινιστεί, η λειτουργία σταθερής ταχύτητας συνεπάγεται μέγιστη ισχύ εξόδου σε μία ταχύτητα ανέμου. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν και οι δύο μέθοδοι ελέγχου με φτερά σε αυτή τη διαμόρφωση προκειμένου να περιοριστεί η ισχύς. Το φτερωτό απαιτεί σημαντικό σχεδιασμό ελέγχου και το στάσιμο αυξάνει την ανεπιθύμητη δύναμη ώθησης καθώς αυξάνεται το στάσιμο.

Η διαμόρφωση σταθερού βήματος μεταβλητής ταχύτητας (VS-FP) προσαρμόζει διαρκώς την ταχύτητα του ρότορα σε σχέση με την ταχύτητα του ανέμου μέσω ηλεκτρονικών ισχύος που ελέγχουν τη σύγχρονη ταχύτητα της γεννήτριας. Αυτός ο τύπος ελέγχου προϋποθέτει ότι η γεννήτρια είναι από το δίκτυο, έτσι ώστε ο ρότορας και το σύστημα μετάδοσης κίνησης της γεννήτριας να είναι ελεύθερα να περιστρέφονται ανεξάρτητα από τη συχνότητα του δικτύου. Το σταθερό βήμα βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στη σχεδίαση της λεπίδας για τον περιορισμό της ισχύος μέσω παθητικού ακινητοποίησης.

Η παθητική ρύθμιση στασιμότητας παίζει σημαντικό ρόλο στη μη επίτευξη της ονομαστικής ισχύος και είναι δυνατόν να αποδοθεί σε κακή ρύθμιση ισχύος πάνω από την ονομαστική ταχύτητα ανέμου. Σε περιπτώσεις χαμηλότερης ταχύτητας ανέμου, το VS-FP είναι δυνατόν να συλλάβει περισσότερη ενέργεια και να βελτιώσει την ποιότητα ισχύος.

Η διαμόρφωση μεταβλητού βήματος μεταβλητής ταχύτητας (VS-VP) είναι μια παράγωγη των VS-FP και FS-VP. Η λειτουργία κάτω από την ονομαστική ταχύτητα ανέμου, η μεταβλητή ταχύτητα και το σταθερό βήμα χρησιμοποιούνται για τη μεγιστοποίηση της δέσμευσης ενέργειας και την αύξηση της ποιότητας ισχύος. Η λειτουργία πάνω από την ονομαστική ταχύτητα ανέμου, η σταθερή ταχύτητα και το μεταβλητό βήμα επιτρέπουν αποτελεσματική ρύθμιση ισχύος στην ονομαστική ισχύ.

2.6.2 Έλεγχος παθητικής απώλειας στήριξης

Παθητική απώλεια στήριξης σημαίνει ότι το σχήμα των ίδιων των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας και οι συμπεριφορές ολόκληρης της ατράκτου στους δυνατούς ανέμους έχουν σχεδιαστεί προκειμένου να γίνονται λιγότερο αεροδυναμικά αποδοτικές καθώς αυξάνονται οι ταχύτητες του ανέμου.

2.6.3 Έλεγχος ενεργητικής απώλειας στήριξης

Όταν οι ανεμογεννήτριες έχουν χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της παραγωγής ενός αιολικού πάρκου, είναι απαραίτητο να εκτιμηθεί ή να υπολογιστεί ένα εύρος πιθανών πηγών απώλειας ενέργειας. Θεωρούνται ότι υπάρχουν έξι κύριες πηγές απώλειας ενέργειας για τα αιολικά πάρκα, καθεμία από τις οποίες είναι δυνατόν να υποδιαιρεθεί σε πιο λεπτομερείς παράγοντες απώλειας: η εγρήγορση, η διαθεσιμότητα, η ηλεκτρική απόδοση, η απόδοση του ρυμπίνας και οι περιβαλλοντικές απώλειες και περικοπές (Luo, et al., 2018).

3. Βέλτιστος Σχεδιασμός

Η μαθηματική βελτιστοποίηση ή ο μαθηματικός προγραμματισμός είναι η επιλογή ενός καλύτερου στοιχείου, σε σχέση με κάποιο κριτήριο, από κάποιο σύνολο διαθέσιμων εναλλακτικών λύσεων. Τα είδη των προβλημάτων βελτιστοποίησης προκύπτουν σε όλους τους ποσοτικούς κλάδους από την επιστήμη των υπολογιστών και τη μηχανική έως την επιχειρησιακή έρευνα και τα οικονομικά, και η ανάπτυξη μεθόδων λύσης έχει ενδιαφέρον για τα μαθηματικά εδώ και αιώνες (Luo, et al., 2018).

Στην απλούστερη περίπτωση, ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης συνίσταται στη μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση μιας πραγματικής συνάρτησης επιλέγοντας συστηματικά τιμές εισόδου μέσα από ένα επιτρεπόμενο σύνολο και υπολογίζοντας την τιμή της συνάρτησης. Η γενίκευση της θεωρίας και των τεχνικών βελτιστοποίησης σε άλλες διατυπώσεις αποτελεί μια μεγάλη περιοχή των εφαρμοσμένων μαθηματικών. Γενικότερα, η βελτιστοποίηση περιλαμβάνει την εύρεση των "καλύτερων διαθέσιμων" τιμών κάποιας αντικειμενικής συνάρτησης δεδομένου ενός καθορισμένου τομέα (ή εισόδου), που περιλαμβάνει μια ποικιλία διαφορετικών τύπων αντικειμενικών συναρτήσεων και διαφορετικών τύπων τομέων (Luo, et al., 2018).

Ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί να αναπαρασταθεί με τον ακόλουθο τρόπο:

Δίνεται: μια συνάρτηση $f : A \rightarrow \mathbb{R}$ από κάποιο σύνολο A στους πραγματικούς αριθμούς

Ζητείται: ένα στοιχείο $x_0 \in A$ τέτοιο ώστε $f(x_0) \leq f(x)$ για όλα τα $x \in A$ ("ελαχιστοποίηση") ή τέτοιο ώστε $f(x_0) \geq f(x)$ για όλα τα $x \in A$ ("μεγιστοποίηση").

Μια τέτοια διατύπωση ονομάζεται πρόβλημα βελτιστοποίησης ή πρόβλημα μαθηματικού προγραμματισμού (ένας όρος που δεν σχετίζεται άμεσα με τον προγραμματισμό υπολογιστών, αλλά εξακολουθεί να χρησιμοποιείται για παράδειγμα στον γραμμικό προγραμματισμό).

Πολλά πραγματικά και θεωρητικά προβλήματα μπορούν να μοντελοποιηθούν σε αυτό το γενικό πλαίσιο.

Προβλήματα που διατυπώνονται χρησιμοποιώντας αυτή την τεχνική στα πεδία της φυσικής μπορεί να αναφέρονται στην τεχνική ως *ελαχιστοποίηση ενέργειας*, μιλώντας για την τιμή της συνάρτησης f που αντιπροσωπεύει την ενέργεια του συστήματος που μοντελοποιείται. Στη μηχανική μάθηση, είναι πάντα απαραίτητο να αξιολογείται συνεχώς η ποιότητα ενός μοντέλου δεδομένων χρησιμοποιώντας μια συνάρτηση κόστους όπου το

ελάχιστο συνεπάγεται ένα σύνολο από πιθανώς βέλτιστες παραμέτρους με βέλτιστο (χαμηλότερο) σφάλμα.

Τυπικά, το A είναι κάποιο υποσύνολο του Ευκλείδειου χώρου $\mathbb{R}^n$, που συχνά προσδιορίζεται από ένα σύνολο *περιορισμών*, *ισοτήτων* ή *ανισοτήτων* που πρέπει να ικανοποιήσουν τα μέλη του A . Το πεδίο A της f ονομάζεται *χώρος αναζήτησης* ή *σύνολο επιλογών*, ενώ τα στοιχεία του A ονομάζονται *υποψήφιος λύσεις* ή *εφικτές λύσεις*. Η συνάρτηση f ονομάζεται, ποικιλοτρόπως, *αντικειμενική συνάρτηση*, ή συνάρτηση *απώλειας* (Deng, & Zhao, 2019).

Στα μαθηματικά, τα συμβατικά προβλήματα βελτιστοποίησης δηλώνονται συνήθως με όρους ελαχιστοποίησης.

Ένα *τοπικό ελάχιστο* x^* ορίζεται ως ένα στοιχείο για το οποίο υπάρχει κάποιο $\delta > 0$ έτσι ώστε ισχύει η έκφραση $f(x^*) \leq f(x)$.

Δηλαδή, σε κάποια περιοχή γύρω από το x^* όλες οι τιμές της συνάρτησης είναι μεγαλύτερες ή ίσες με την τιμή σε αυτό το στοιχείο. Τα τοπικά μέγιστα ορίζονται παρόμοια.

Ενώ ένα τοπικό ελάχιστο είναι τουλάχιστον τόσο καλό όσο οποιοδήποτε κοντινό στοιχείο, ένα καθολικό ελάχιστο είναι τουλάχιστον τόσο καλό όσο κάθε εφικτό στοιχείο. Γενικά, εκτός εάν η αντικειμενική συνάρτηση είναι κυρτή σε ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης, μπορεί να υπάρχουν αρκετά τοπικά ελάχιστα. Σε ένα κυρτό πρόβλημα, εάν υπάρχει ένα τοπικό ελάχιστο που είναι εσωτερικό (όχι στην άκρη του συνόλου των εφικτών στοιχείων), είναι επίσης το καθολικό ελάχιστο, αλλά ένα μη κυρτό πρόβλημα μπορεί να έχει περισσότερα από ένα τοπικά ελάχιστα που δεν χρειάζονται όλα να είναι παγκόσμια ελάχιστα. (Deng, & Zhao, 2019).

Ένας μεγάλος αριθμός αλγορίθμων που προτείνονται για την επίλυση μη κυρτών προβλημάτων – συμπεριλαμβανομένης της πλειονότητας των εμπορικά διαθέσιμων λύσεων – δεν είναι ικανοί να κάνουν διάκριση μεταξύ τοπικά βέλτιστων λύσεων και σφαιρικά βέλτιστων λύσεων και θα αντιμετωπίζουν τις πρώτες ως πραγματικές λύσεις στο αρχικό πρόβλημα. Η σφαιρική βελτιστοποίηση είναι ο κλάδος των εφαρμοσμένων μαθηματικών και της αριθμητικής ανάλυσης που ασχολείται με την ανάπτυξη ντετερμινιστικών αλγορίθμων που είναι ικανοί να εγγυηθούν τη σύγκλιση σε πεπερασμένο χρόνο στην πραγματική βέλτιστη λύση ενός μη κυρτού προβλήματος.

3.1 Βελτιστοποίηση

Ο σχεδιασμός ενός ρότορα ανεμογεννήτριας διατυπώνεται ως πρόβλημα βελτιστοποίησης περιορισμένης χρήσης σε σχέση με γεωμετρικά καθώς και λειτουργικά χαρακτηριστικά. Απαιτείται να μεγιστοποιηθεί η παραγωγή ενέργειας για μια δεδομένη κατανομή ανέμου Weibull με περιορισμούς στα φορτία, την αναλογία κορυφής-ταχύτητας και τη γεωμετρία του πτερυγίου συμπεριλαμβανομένου του σχήματος αεροτομής. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος αναπτύχθηκε μια μέθοδος βασισμένη σε έναν γενετικό αλγόριθμο. Η ευελιξία του αποδείχθηκε σημαντική για την παροχή ακόμη υψηλότερων κερδών απόδοσης σε σύγκριση με τις κλασσικές μεθόδους. (Abdelsalam, & El-Shorbagy, 2018).

Τα προβλήματα βελτιστοποίησης είναι συχνά πολυτροπικά, έχουν δηλαδή πολλές καλές λύσεις. Θα μπορούσαν όλα να είναι καλά σε παγκόσμιο επίπεδο (ίδια τιμή συνάρτησης κόστους) ή θα μπορούσε να υπάρχει ένας συνδυασμός λύσεων παγκοσμίως καλών και τοπικά καλών. Η απόκτηση όλων (ή τουλάχιστον ορισμένων από) των πολλαπλών λύσεων είναι ο στόχος ενός multi-modal optimizer.

Οι κλασσικές τεχνικές βελτιστοποίησης λόγω της επαναληπτικής τους προσέγγισης δεν αποδίδουν ικανοποιητικά όταν χρησιμοποιούνται για τη λήψη πολλαπλών λύσεων, καθώς δεν είναι εγγυημένο ότι θα ληφθούν διαφορετικές λύσεις ακόμη και με διαφορετικά σημεία εκκίνησης σε πολλαπλές εκτελέσεις του αλγορίθμου (Abdelsalam, & El-Shorbagy, 2018).

Οι κοινές προσεγγίσεις στα παγκόσμια προβλήματα βελτιστοποίησης, όπου μπορεί να υπάρχουν πολλαπλά τοπικά άκρα περιλαμβάνουν εξελικτικούς αλγόριθμους, βελτιστοποίηση Bayes και προσομοίωση ανόπτησης (Deng, & Zhao, 2019).

3.2 Αλγόριθμοι βελτιστοποίησης

3.2.1 Γενετικοί αλγόριθμοι

Οι γενετικοί αλγόριθμοι εισήχθησαν αρχικά από επιστήμονες υπολογιστών ως τεχνική κατασκευής προγραμμάτων υπολογιστών και κατά συνέπεια χρησιμοποιήθηκαν ως εργαλεία βελτιστοποίησης. Βασίζονται στη φυσική επιλογή και στους χαρακτηριστικούς μηχανισμούς αναπαραγωγής των ζωντανών οργανισμών. Εξ ορισμού προσπαθούν να μιμηθούν τη φυσική επιλογή και τους μηχανισμούς αναπαραγωγής των ζωντανών πλασμάτων. Η διαδικασία βελτιστοποίησης έχει δύο κύρια μέρη: (Abdelsalam, & El-Shorbagy, 2018).

α) Το crossover που δημιουργεί «παιδιά» με χαρακτηριστικά που είναι συνδυασμοί των χαρακτηριστικών των «γονέων» τους, και

β) Η αξιολόγηση των «παιδιών» για την επιλογή των «καλύτερων παιδιών» που γίνονται γονείς της επόμενης γενιάς.

Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται για αρκετές γενιές, μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση. Ο τρόπος με τον οποίο δημιουργούνται οι νέες γενιές δίνει στη GA τη δυνατότητα να χειρίζεται όλους τους τύπους παραμέτρων: συναρτήσεις, βάσεις δεδομένων, λογικές μεταβλητές κ.λπ. Επίσης, η διαδικασία αξιολόγησης παρακάμπτει από μόνη της κάθε δυσκολία λόγω ασυνεχειών της συνάρτησης κόστους ή τους περιορισμούς. Αυτό οφείλεται στο ότι, σε αντίθεση με τους αλγόριθμους βελτιστοποίησης που βασίζονται στον λογισμό, τα GA δεν χρησιμοποιούν τύπους κλίσης ή τοπικά σχήματα αναζήτησης, αλλά σαρώνουν ένα ολόκληρο σύνολο πιθανών λύσεων.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι εξελίσσονται με μονοτονικό τρόπο. Στην περίπτωση του βέλτιστου σχεδιασμού των ροτόρων ανεμογεννητριών, η μέθοδος παράγει όλο και καλύτερες μηχανές. Ο ρυθμός σύγκλισης είναι αργός. Μια τυπική εκτέλεση θα απαιτούσε μερικές χιλιάδες άμεσους υπολογισμούς. Σε σύγκριση με τις μεθόδους που βασίζονται στον λογισμό υπάρχει μια σχέση 1:30 ως προς την υπολογιστική προσπάθεια. Σημειώστε ότι για την ίδια προσπάθεια, μια μέθοδος Simplex θα δώσει μια καλύτερη λύση που ωστόσο δεν είναι η καλύτερη δυνατή (Abdelsalam, & El-Shorbagy, 2018).

3.2.2 Ant colony optimization

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης Ant colony χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση των αρχικών βαρών και ορίων του δικτύου ακραίων μηχανών εκμάθησης, στη συνέχεια οι βελτιστοποιημένοι συνδυασμοί βαρών και ορίων παρέχονται στα μοντέλα ακραίων μηχανών εκμάθησης προκειμένου να ξεπεραστεί το πρόβλημα ευαισθησίας της ρύθμισης αρχικοποίησης και το μειονέκτημα της εύκολης πτώσης σε τοπικό βέλτιστο (Deng, & Zhao, 2019).

Η διαδικασία βελτιστοποίησης δείχνει επίσης ότι η ακρίβεια πρόβλεψης είναι ευαίσθητη στον αριθμό των κόμβων κρυφού επιπέδου και είναι σχετικά μη ευαίσθητη σε άλλες παραμέτρους του μοντέλου. Η διαδικασία βελτιστοποίησης δείχνει ότι η ακρίβεια πρόβλεψης είναι ευαίσθητη στον αριθμό των κόμβων κρυφού επιπέδου και είναι σχετικά μη ευαίσθητη σε άλλες παραμέτρους του μοντέλου.

3.2.3 Αλγόριθμος Harmony Search

Είναι πολύ σημαντικό να επιτευχθεί η μέγιστη παραγωγή ενέργειας, έτσι ώστε το κόστος ανά ενεργειακή μονάδα να ελαχιστοποιείται, δεδομένου ότι ο αριθμός των ανεμογεννητριών και η θέση τους έχουν σημαντική επίδραση στην αναμενόμενη παραγωγή ενέργειας. Για το λόγο αυτό, οι ανεμογεννήτριες είναι σημαντικό να είναι στρατηγικά τοποθετημένες ώστε να παίρνουν όσο το δυνατόν περισσότερη ενέργεια από τον άνεμο, λαμβάνοντας υπόψη και την αιολική ενέργεια. Ο προσδιορισμός της βέλτιστης θέσης των ανεμογεννητριών, προκειμένου να αποφευχθεί η εγκατάστασή τους σε ανεπαρκείς θέσεις, είναι δυνατόν να επιτευχθεί με την εφαρμογή πολλών τεχνικών. Προς αυτή την κατεύθυνση συχνά, εφαρμόζεται η μέθοδος HS για την εκτίμηση του βέλτιστου αριθμού ανεμογεννητριών σε ένα αιολικό πάρκο και της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος (Deng, & Zhao, 2019).

Η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού της διάταξης του αιολικού πάρκου εξοικονομεί σημαντικά κόστος και διασφαλίζει την αποδοτική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Κριτήριο της διαδικασίας βελτιστοποίησης είναι η ελαχιστοποίηση του ανά μονάδα κόστους παραγόμενης ενέργειας. Η μέθοδος HS παρέχει ακριβή αποτελέσματα, σε σύγκριση με τα αποτελέσματα άλλων μεθοδολογιών. Πράγματι, λαμβάνοντας υπόψη την τιμή καταλληλότητας ως την αναλογία μεταξύ του κόστους και της συνολικής παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος, τα αποτελέσματα HS έχουν τη μικρότερη τιμή σε σύγκριση με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις άλλες τρεις περιπτώσεις (Olaru, et al., 2019).

3.3 Επαναληπτικές μέθοδοι

Οι επαναληπτικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την επίλυση προβλημάτων μη γραμμικού προγραμματισμού διαφέρουν ανάλογα με το αν αξιολογούν τις τιμές Hessians , gradients ή μόνο συναρτήσεων. Ενώ η αξιολόγηση των Hessians (H) και των κλίσεων (G) βελτιώνει τον ρυθμό σύγκλισης, για συναρτήσεις για τις οποίες υπάρχουν αυτές οι ποσότητες και ποικίλλουν αρκετά ομαλά, τέτοιες αξιολογήσεις αυξάνουν την υπολογιστική πολυπλοκότητα (ή το υπολογιστικό κόστος) κάθε επανάληψης. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η υπολογιστική πολυπλοκότητα μπορεί να είναι υπερβολικά υψηλή.

Ένα σημαντικό κριτήριο για τους βελτιστοποιητές είναι απλώς ο αριθμός των απαιτούμενων αξιολογήσεων συναρτήσεων, καθώς αυτός συχνά είναι ήδη μια μεγάλη

υπολογιστική προσπάθεια, συνήθως πολύ μεγαλύτερη προσπάθεια από ό,τι εντός του ίδιου του βελτιστοποιητή, ο οποίος πρέπει κυρίως να λειτουργεί πάνω από τις N μεταβλητές. Οι παράγωγοι παρέχουν λεπτομερείς πληροφορίες για τέτοιους βελτιστοποιητές, αλλά είναι ακόμη πιο δύσκολο να υπολογιστούν, π.χ. η προσέγγιση της διαβάθμισης απαιτεί τουλάχιστον αξιολογήσεις συνάρτησης $N+1$. Για προσεγγίσεις των 2ων παραγώγων (που συλλέγονται στον πίνακα Hessian), ο αριθμός των αξιολογήσεων συνάρτησης είναι της τάξης του N^2 . Η μέθοδος του Newton απαιτεί τις παραγώγους 2ης τάξης, επομένως για κάθε επανάληψη, ο αριθμός των κλήσεων συνάρτησης είναι της τάξης του N^2 , αλλά για έναν απλούστερο καθαρό βελτιστοποιητή κλίσης είναι μόνο N . Ωστόσο, οι βελτιστοποιητές κλίσης χρειάζονται συνήθως περισσότερες επαναλήψεις από τον αλγόριθμο του Newton. (Deng, & Zhao, 2019).

Μέθοδοι που αξιολογούν τα Έσσια (ή προσεγγίζουν τα Έσσια, χρησιμοποιώντας πεπερασμένες διαφορές):

Η μέθοδος του Νεύτωνα

Διαδοχικός τετραγωνικός προγραμματισμός: Μια μέθοδος βασισμένη στο Newton για *περιορισμένα* προβλήματα μικρής-μεσαίας κλίμακας. Ορισμένες εκδόσεις μπορούν να χειριστούν προβλήματα μεγάλων διαστάσεων.

Μέθοδοι εσωτερικών σημείων: Πρόκειται για μια μεγάλη κατηγορία μεθόδων για περιορισμένη βελτιστοποίηση, μερικές από τις οποίες χρησιμοποιούν μόνο πληροφορίες (υπο)κλίσης και άλλες από τις οποίες απαιτούν την αξιολόγηση των Hessians.

Μέθοδοι που αξιολογούν τις διαβαθμίσεις ή προσεγγίζουν τις κλίσεις με κάποιο τρόπο (ή ακόμα και τις υποβαθμίσεις):

Μέθοδοι καθόδου συντεταγμένων : Αλγόριθμοι που ενημερώνουν μία μόνο συντεταγμένη σε κάθε επανάληψη

Μέθοδοι συζυγούς κλίσης : Επαναληπτικές μέθοδοι για μεγάλα προβλήματα. (Θεωρητικά, αυτές οι μέθοδοι τελειώνουν σε έναν πεπερασμένο αριθμό βημάτων με τετραγωνικές αντικειμενικές συναρτήσεις, αλλά αυτός ο πεπερασμένος τερματισμός δεν παρατηρείται στην πράξη σε υπολογιστές πεπερασμένης ακρίβειας.)

Gradient descent (εναλλακτικά, «πιο απότομη κάθοδος» ή «πιο απότομη ανάβαση»): Μια (αργή) μέθοδος ιστορικού και θεωρητικού ενδιαφέροντος, η οποία είχε ανανεωμένο ενδιαφέρον για την εύρεση κατά προσέγγιση λύσεων τεράστιων προβλημάτων.

Μέθοδοι υποβάθμισης :

Μια επαναληπτική μέθοδος για μεγάλες τοπικές συναρτήσεις Lipschitz χρησιμοποιώντας γενικευμένες διαβαθμίσεις . Ακολουθώντας τον Boris T. Polyak, οι μέθοδοι υποβάθμισης-προβολής είναι παρόμοιες με τις μεθόδους συζυγούς-βαθμίδωσης.

Μέθοδος καθόδου δέσμης: Μια επαναληπτική μέθοδος για προβλήματα μικρού-μεσαίου μεγέθους με τοπικές συναρτήσεις Lipschitz, ιδιαίτερα για προβλήματα ελαχιστοποίησης κυρτών (παρόμοια με μεθόδους συζυγούς κλίσης).

Ελλειψοειδής μέθοδος : Επαναληπτική μέθοδος για μικρά προβλήματα με σχεδόν κυρτές αντικειμενικές συναρτήσεις και μεγάλο θεωρητικό ενδιαφέρον, ιδιαίτερα για τον καθορισμό της πολυωνυμικής πολυπλοκότητας ορισμένων προβλημάτων συνδυαστικής βελτιστοποίησης. Έχει ομοιότητες με τις μεθόδους Quasi-Newton.

Μέθοδος κλίσης υπό όρους (Frank–Wolfe) για κατά προσέγγιση ελαχιστοποίηση ειδικά δομημένων προβλημάτων με γραμμικούς περιορισμούς , ειδικά με δίκτυα κυκλοφορίας. Για γενικά προβλήματα χωρίς περιορισμούς, αυτή η μέθοδος περιορίζεται στη μέθοδο κλίσης, η οποία θεωρείται απαρχαιωμένη (σχεδόν για όλα τα προβλήματα).

Μέθοδοι Quasi-Newton : Επαναληπτικές μέθοδοι για μεσαία-μεγάλα προβλήματα (π.χ. $N < 1000$).

Μέθοδος στοχαστικής προσέγγισης ταυτόχρονης διαταραχής (SPSA) για στοχαστική βελτιστοποίηση. χρησιμοποιεί τυχαία (αποτελεσματική) προσέγγιση κλίσης.

Μέθοδοι που αξιολογούν μόνο τιμές συναρτήσεων: Εάν ένα πρόβλημα είναι συνεχώς διαφοροποιήσιμο, τότε οι διαβαθμίσεις μπορούν να προσεγγιστούν χρησιμοποιώντας πεπερασμένες διαφορές, οπότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια μέθοδος που βασίζεται σε κλίση.

Μέθοδοι παρεμβολής έχουν καλύτερες ιδιότητες σύγκλισης από το ευρετικό Nelder–Mead (με απλές) (Olaru, et al., 2019).

3.4 Μηχανική

Τα προβλήματα στη δυναμική του άκαμπτου σώματος (ιδίως η δυναμική του αρθρωτού άκαμπτου σώματος) απαιτούν συχνά μαθηματικές τεχνικές προβληματισμού.

Επίσης, το πρόβλημα του υπολογισμού των δυνάμεων επαφής μπορεί να γίνει με την επίλυση ενός προβλήματος γραμμικής συμπληρωματικότητας, το οποίο μπορεί επίσης να θεωρηθεί ως πρόβλημα QP (τετραγωνικός προγραμματισμός). (Deng, & Zhao, 2019).

Πολλά προβλήματα σχεδιασμού μπορούν επίσης να εκφραστούν ως προγράμματα βελτιστοποίησης. Αυτή η εφαρμογή ονομάζεται βελτιστοποίηση σχεδίασης. Ένα υποσύνολο είναι η βελτιστοποίηση μηχανικής και ένα άλλο πρόσφατο και αυξανόμενο υποσύνολο αυτού του τομέα είναι η πολυεπιστημονική βελτιστοποίηση σχεδιασμού, η οποία, αν και χρήσιμη σε πολλά προβλήματα, έχει εφαρμοστεί ιδιαίτερα σε προβλήματα μηχανικής αεροδιαστημικής. (Deng, & Zhao, 2019).

3.5 Οικονομικά και χρηματοοικονομικά

Τα οικονομικά είναι αρκετά στενά συνδεδεμένα με τη βελτιστοποίηση των παραγόντων, ώστε ένας ισχυρός ορισμός περιγράφει τα οικονομικά ως επιστήμη ως «μελέτη της ανθρώπινης συμπεριφοράς ως σχέση μεταξύ σκοπών και σπάνιων μέσων» με εναλλακτικές χρήσεις. (Olaru, et al., 2019).

Η σύγχρονη θεωρία βελτιστοποίησης περιλαμβάνει την παραδοσιακή θεωρία βελτιστοποίησης αλλά επίσης επικαλύπτει τη θεωρία παιγνίων και τη μελέτη των οικονομικών ισορροπιών. Οι κώδικες του *Journal of Economic Literature* ταξινομούν τον μαθηματικό προγραμματισμό, τις τεχνικές βελτιστοποίησης και τα σχετικά θέματα στο JEL:C61-C63.

Στη μικροοικονομία, το πρόβλημα μεγιστοποίησης της χρησιμότητας και το διπλό του πρόβλημα, το πρόβλημα ελαχιστοποίησης των δαπανών, είναι προβλήματα οικονομικής βελτιστοποίησης. Στο βαθμό που συμπεριφέρονται με συνέπεια, οι καταναλωτές θεωρείται ότι μεγιστοποιούν τη χρησιμότητά τους, ενώ οι επιχειρήσεις συνήθως υποτίθεται ότι μεγιστοποιούν το κέρδος τους. Επίσης, οι πράκτορες συχνά μοντελοποιούνται ως αποτρεπτικοί κίνδυνοι, προτιμώντας έτσι να αποφεύγουν τον κίνδυνο. (Olaru, et al., 2019).

Οι τιμές των περιουσιακών στοιχείων μοντελοποιούνται επίσης χρησιμοποιώντας τη θεωρία βελτιστοποίησης, αν και τα υποκείμενα μαθηματικά βασίζονται στη βελτιστοποίηση των στοχαστικών διεργασιών και όχι στη στατική βελτιστοποίηση. Θεωρία διεθνούς εμπορίου χρησιμοποιεί επίσης τη βελτιστοποίηση για να εξηγήσει τα εμπορικά πρότυπα μεταξύ των εθνών. Η βελτιστοποίηση των χαρτοφυλακίων είναι ένα παράδειγμα βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων στα οικονομικά. Από τη δεκαετία του 1970, οι οικονομολόγοι έχουν μοντελοποιήσει δυναμικές αποφάσεις με την πάροδο του χρόνου χρησιμοποιώντας τη θεωρία ελέγχου. Για παράδειγμα, χρησιμοποιούνται μοντέλα

δυναμικής αναζήτησης για τη μελέτη της συμπεριφοράς στην αγορά εργασίας . Μια κρίσιμη διάκριση είναι μεταξύ ντετερμινιστικών και στοχαστικών μοντέλων. (Deng, & Zhao, 2019).

Οι μακροοικονομολόγοι χτίζουν μοντέλα δυναμικής στοχαστικής γενικής ισορροπίας (DSGE) που περιγράφουν τη δυναμική ολόκληρης της οικονομίας ως αποτέλεσμα των αλληλεξαρτώμενων βελτιστοποιητικών αποφάσεων των εργαζομένων, των καταναλωτών, των επενδυτών και των κυβερνήσεων. (Olaru, et al., 2019).

3.6 Βιολογία υπολογιστικών συστημάτων

Οι τεχνικές βελτιστοποίησης χρησιμοποιούνται σε πολλές πτυχές της βιολογίας των υπολογιστικών συστημάτων, όπως η κατασκευή μοντέλων, ο βέλτιστος πειραματικός σχεδιασμός, η μεταβολική μηχανική και η συνθετική βιολογία. Ο γραμμικός προγραμματισμός έχει εφαρμοστεί για τον υπολογισμό των μέγιστων δυνατών αποδόσεων των προϊόντων ζύμωσης, και για να συναχθούν ρυθμιστικά δίκτυα γονιδίων από πολλαπλά σύνολα δεδομένων μικροσυστοιχιών καθώς και μεταγραφικά ρυθμιστικά δίκτυα από δεδομένα υψηλής απόδοσης. Ο μη γραμμικός προγραμματισμός έχει χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση του ενεργειακού μεταβολισμού και έχει εφαρμοστεί στη μεταβολική μηχανική και στην εκτίμηση παραμέτρων σε βιοχημικές οδούς. (Deng, & Zhao, 2019).

4. Η Διερεύνηση στο πρόβλημα

4.1 Αιολικά πάρκα

Τα αιολικά πάρκα αποτελούνται από πολλές μεγάλες ανεμογεννήτριες που μετατρέπουν την αιολική ενέργεια σε ηλεκτρική που είναι μια ανεξάντλητη πηγή ενέργειας. Η λειτουργία των ανεμογεννητριών δεν απαιτεί πρώτες ύλες, με εξαίρεση φυσικά την αιολική ενέργεια, και το παραγόμενο προϊόν μεταφέρεται απευθείας στο δίκτυο τροφοδοσίας για κατανάλωση.

4.1.1 Χερσαία Αιολικά Πάρκα

Τα χερσαία αιολικά πάρκα εγκαθίστανται και λειτουργούν σε περιοχές με υψηλό αιολικό δυναμικό και όλη η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται στο δίκτυο. Απαιτούνται μεγάλες εκτάσεις γης για την εγκατάσταση ενός αιολικού πάρκου, καθώς κάθε ανεμογεννήτρια είναι σημαντικό να βρίσκεται σε απόσταση μεγαλύτερη από 50 μέτρα (ή μεγαλύτερη από 4 διαμέτρους ρότορα) και το κτίριο ελέγχου του αιολικού πάρκου θα είναι σημαντικό σε απόσταση τουλάχιστον 6 μέτρων από τα όρια του ακινήτου που θα αναπτυχθεί. Θα είναι επίσης σημαντικό να τηρούνται οι χωρικοί περιορισμοί, όπως η αποφυγή εγκατάστασης αιολικού πάρκου σε αρχαιολογικό χώρο. Στη συνέχεια θα αναπτυχθούν και άλλα για χερσαία αιολικά πάρκα.

4.1.2 Υπεράκτια αιολικά πάρκα

Πριν από 20 χρόνια γεννήθηκε η ιδέα για την εγκατάσταση αιολικών πάρκων στη θάλασσα. Η πρώτη κατασκευή ενός θαλάσσιου αιολικού πάρκου ξεκίνησε το 1991. Από την αρχή πιστευόταν ότι τα θαλάσσια αιολικά πάρκα ήταν μια πολλά υποσχόμενη νέα τεχνολογία λόγω της σημαντικής ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται, καθώς η ένταση του θαλάσσιου ανέμου είναι συνήθως μεγαλύτερη. επηρεάζονται από εμπόδια. Η διάρκεια ζωής των υπεράκτιων αιολικών πάρκων είναι επίσης 25 χρόνια μεγαλύτερη. Ωστόσο, υπάρχουν πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν την εγκατάσταση αυτών των πάρκων, όπως οι σύλλογοι αλιέων, οι ομάδες προστασίας πτηνών, τα περιβαλλοντικά συμβούλια και οι τουριστικοί παράγοντες. Ένα σημαντικό μειονέκτημα αυτών των πάρκων είναι το υψηλό κόστος κατασκευής τους. Στη θάλασσα, η κατασκευή του έργου κοστίζει 50% περισσότερο από ένα αιολικό πάρκο αντίστοιχης ισχύος στην ξηρά, καθώς απαιτούνται τεράστια κεφάλαια τόσο για την εγκατάστασή του (εγκατάσταση στον βυθό) όσο και για τη σύνδεσή του μέσω υποθαλάσσιου καλωδίου με το ηπειρωτικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτές οι ανεμογεννήτριες είναι επίσης σημαντικές για την αντοχή σε καταιγίδες, υψηλά κύματα και αλμυρό νερό. Ως εκ τούτου, λόγω του υψηλού κόστους κατασκευής τους, η τιμή πώλησης

της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από υπεράκτια αιολικά πάρκα είναι πολύ υψηλότερη από την τιμή πώλησης των χερσαίων αιολικών πάρκων.

4.2 Κριτήρια για την κατάλληλη τοποθέτηση αιολικού πάρκου

Για την κατάλληλη τοποθέτηση εγκατάστασης ενός αιολικού πάρκου είναι σημαντικό να τηρούνται κάποια κριτήρια όπως, Το Αιολικό δυναμικό της περιοχής:

- Το αιολικό δυναμικό μιας περιοχής είναι ο κυρίως παράγοντας που λαμβάνεται υπόψη για την τοποθέτηση ενός αιολικού πάρκου [Κεφ. 4.3)
- Η τοπογραφία της περιοχής: Ο σχηματισμός της τοπογραφίας του εδάφους επηρεάζει το αιολικό δυναμικό μιας περιοχής αφού η ύπαρξη μιας μη επίπεδης επιφάνειας, όπως η παρουσία λόφων και περασμάτων, αυξάνει ή μειώνει την ταχύτητα του ανέμου, μειώνοντας έτσι την παραγόμενη ενέργεια. Η μελέτη της τοπογραφικής αποτύπωσης απαιτεί ανάλυση με αριθμητικές μεθόδους πλήρους ανάλυσης του πεδίου ροής [Κεφ.4.4]
- Οι Περιβαλλοντικοί περιορισμοί : Υπάρχουν σημαντικές περιοχές προστασίας της φύσης (Ζώνες Ειδικής Προστασίας (ΖΕΠ), σημεία σημασίας (SIC), ενδιαίτηματα προτεραιότητας, κοντά σε μεταναστευτικές οδούς πτηνών, καταφύγια άγριας ζωής, αποκατάσταση του φυσικού περιβάλλοντος) στις οποίες δεν μπορούν να εγκατασταθούν πάρκα, ανεμογεννήτριες.
- Το ιστορικό και πολιτιστικό περιβάλλον: Αποφεύγεται η τοποθέτηση ανεμογεννητριών στην περίμετρο περιοχών με αξιοσημείωτη θέα, περιοχών ιστορικού και πολιτιστικού ενδιαφέροντος (αρχαιολογικοί χώροι και ιστορικοί χώροι, μνημεία, μοναστήρια και παραδοσιακοί οικισμοί). Το αιολικό πάρκο βρίσκεται σε απόσταση από αυτές τις περιοχές ανάλογα με τη σημασία της περιοχής
- Τα συνοδά έργα: Πρόκειται για έργα διάνοιξης νέας οδοποιίας ή βελτίωσης της υπάρχουσας και έργα ηλεκτρικής διασύνδεσης με κατασκευή υποσταθμού και κατασκευή ΓΤ στην περιοχή του έργου.
- Τα οικονομικά στοιχεία του έργου: Συνήθως ο προϋπολογισμός ενός έργου δίνεται από τον πιο κάτω πίνακα (σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Αιολικής Ενέργειας) :

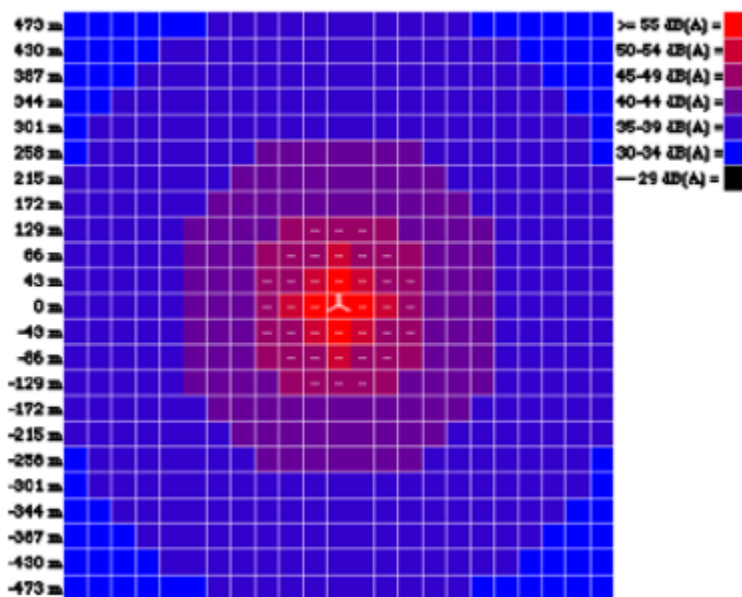
ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΔΑΠΑΝΗΣ	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ (%)
-------------------	---------------------

Αγορά ανεμογεννητριών	75.6
Σύνδεση στο δίκτυο	8.9
Θεμελίωση ανεμογεννητριών	6.5
Ενοικίαση Γης	3.9
Ηλεκτρική εγκατάσταση	1.5
Μελέτες, επίβλεψη	1.2
Κατασκευή έργων οδοποιίας	0.9
Συστήματα ελέγχου	0.3
Σύνολο	100

- Οι γεωλογικές συνθήκες για την θεμελίωση των ανεμογεννητριών: Για την κατασκευή των θεμελίων απαιτούνται γεωλογικές μελέτες προκειμένου να καθοριστεί ο τελικός σχεδιασμός της θεμελίωσης κατά την εκπόνηση των στατικών μελετών ανάλογα με τη φέρουσα ικανότητα του εδάφους θεμελίωσης.
- Ο χωροταξικός σχεδιασμός και οι χρήσεις γης: Οι επιπτώσεις σχετίζονται με το πώς το αιολικό πάρκο επηρεάζει το χωρικό, αστικό και οικιστικό περιβάλλον της περιοχής. Οι αλλαγές βαθμολογούνται ως θετικές ή αρνητικές όταν έρχονται σε αντίθεση με υπάρχουσες ή προγραμματισμένες χρήσεις γης ή χρήσεις που έχουν αναπτύξει έναν διαστημικό προορισμό. Η συνολική αποτελεσματική κάλυψη / παρέμβαση είναι ελάχιστη. Αν και οι περιοχές που καταλαμβάνονται από αιολικά πάρκα είναι ως επί το

πλείστον περιοχές χαμηλής βλάστησης που χρησιμοποιούνται ως βοσκοτόπια ή δασικές περιοχές, η εγκατάσταση ενός αιολικού πάρκου μπορεί να έχει αρνητικές επιπτώσεις μόνο εάν ορισμένες μεμονωμένες ανεμογεννήτριες καταστρέψουν ορισμένους τοπικούς οικοτόπους ιδιαίτερης αξίας.

- Και τέλος, το ακουστικό περιβάλλον, η ακτινοβολίες και η οπτική όχληση:
 1. Οπτική Όχληση : Η οπτική διαταραχή επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου χώρου εγκατάστασης και εξαρτάται από μια σειρά παραγόντων, τόσο υποκειμενικούς όσο και αντικειμενικούς. Ο στόχος μπορεί να θεωρηθεί: το φυσικό μέγεθος και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών ως τεράστιες κατασκευές που εκτείνονται σε ύψος, ο αριθμός και η διάταξη των ανεμογεννητριών, ο χαρακτήρας και η αξία του τοπίου, η πυκνότητα του τοπικού πληθυσμού εντός της οπτικής του περιοχής επιρροή το αιολικό πάρκο, την απόσταση των ανεμογεννητριών από τα παρατηρητήρια και τον αριθμό των επισκεπτών στη γύρω περιοχή. Υποκειμενική μπορεί να θεωρηθεί η στάση των ατόμων προς το τοπίο και τη φυσική ομορφιά, καθώς και προς την αιολική ενέργεια και, φυσικά, το βάρος των τοπικών επιπτώσεων σε σχέση με το υπερτοπικό ενδιαφέρον.
 2. Ακουστικό περιβάλλον: Ο θόρυβος παράγεται κατά τη μεταφορά και εγκατάσταση των ανεμογεννητριών, κατά τη λειτουργία των ανεμογεννητριών και κατά τη διαδικασία αποσυναρμολόγησης-αποσυναρμολόγησης και μεταφοράς-απόρριψης των ανεμογεννητριών στο τέλος του έτους. Ο θόρυβος που σχετίζεται με τον άνεμο έχει αντιμετωπιστεί με τη σύγχρονη τεχνολογία και μπορεί εύκολα να αγνοηθεί, να αξιολογηθεί και να ελεγχθεί με επαρκή προληπτικά ή διορθωτικά μέτρα.



Εικόνα 4.1 : Η μεταβολή του θορύβου μιας ανεμογεννήτριας συναρτήσει της απόστασης από αυτήν

Πηγή: Shen, et al., 2018

Η συμπεριφορά του ανέμου σε ένα σημείο είναι αυτή που καθορίζει τη λειτουργική συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας. Επομένως, η οικονομική σκοπιμότητα μιας συγκεκριμένης ανεμογεννήτριας που βρίσκεται σε ένα συγκεκριμένο σημείο δεν μπορεί να προβλεφθεί χωρίς ακριβή γνώση της συμπεριφοράς του ανέμου σε αυτή τη θέση. Επομένως, το αιολικό δυναμικό της περιοχής, δηλαδή η ένταση και η διακύμανση του ανέμου, είναι οι κύριες παράμετροι για την επιλογή της θέσης μιας ανεμογεννήτριας.

4.3 Αιολικό δυναμικό

Το αιολικό δυναμικό μιας περιοχής προσδιορίζεται με βάση μετρήσεις που γίνονται στην υπό εξέταση περιοχή για περισσότερο από ένα χρόνο. Μελετάμε κυρίως την ένταση του ανέμου, τη διεύθυνσή του (κύρια και δευτερή κύρια), την ένταση των αναταράξεων κ.λπ. Γενικά, η μορφολογία του εδάφους θα είναι σημαντική για να μην επηρεάζεται ο άνεμος ως προς την ένταση και τις αναταράξεις στις θέσεις των ανεμογεννητριών, ενώ θα είναι σημαντικό να μην σκιάζει η μία την άλλη κατά μήκος των κύριων κατευθύνσεων του ανέμου (φαινόμενο αφύπνισης).

4.3.1 Ο άνεμος

Αρχικά ο άνεμος είναι μια πηγή ενέργειας που προέρχεται κυρίως από τις διαφορές στην ατμοσφαιρική πίεση, που με τη σειρά τους οφείλονται στην ανομοιόμορφη θέρμανση της γης και της θάλασσας από τον ήλιο. Επομένως, η αιολική ενέργεια είναι μια έμμεση μορφή ηλιακής ενέργειας και περίπου το 1-2% της ηλιακής ακτινοβολίας που χτυπά την επιφάνεια της γης μετατρέπεται σε άνεμο.

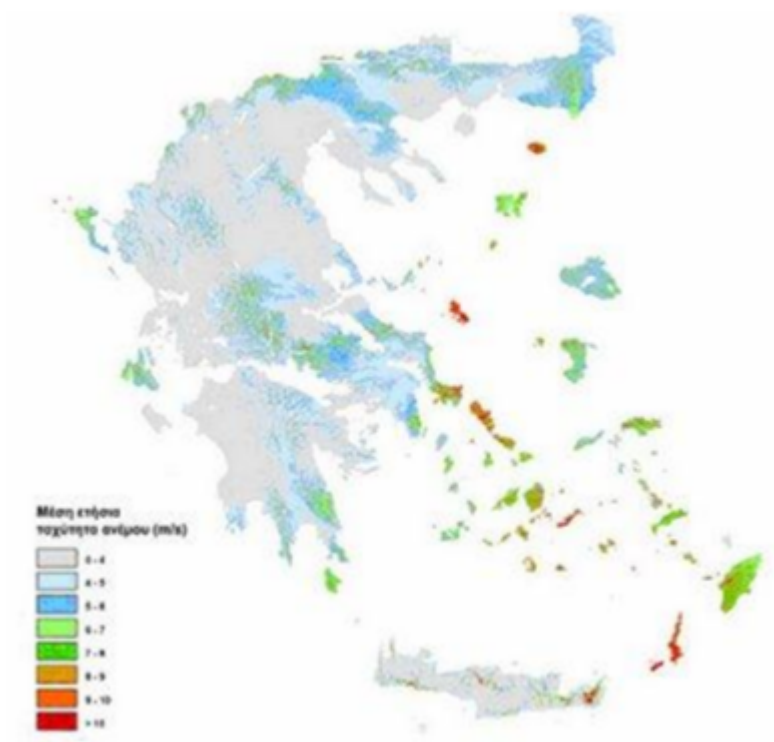
Ο άνεμος προκαλείται από την κίνηση των αερίων μαζών που παρατηρούνται στα στρώματα της ατμόσφαιρας. Πιο συγκεκριμένα, όταν μια μάζα αέρα θερμαίνεται γίνεται πιο λεπτή και ελαφρύτερη από τις άλλες μάζες που την περιβάλλουν, τείνει να ανεβαίνει ψηλότερα από αυτές. Επομένως, άλλες ψυχρότερες και βαρύτερες αέριες μάζες θα κινηθούν και θα πάρουν τη θέση τους. Αντίθετα, όταν μια μάζα αέρα ψύχεται γίνεται πιο πυκνή και βαρύτερη και τείνει να κατεβαίνει. Για να το πετύχει αυτό «σπρώχνει» τις άλλες θερμότερες, αραιές αέριες μάζες και παίρνει τη θέση τους. Η θέρμανση και η ψύξη προκαλούνται από την ηλιακή ακτινοβολία, η οποία απορροφάται από την επιφάνεια της γης. Δεδομένου ότι η επιφάνεια της γης δεν είναι ομοιογενής, καθώς έχει διαφορετικά τοπικά χαρακτηριστικά (ωκεανοί, έρημοι, δάση, έδαφος, βουνά), η απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας ποικίλλει σε σχέση με τη γεωγραφική κατανομή, την ώρα της ημέρας και την ετήσια κατανομή του ανέμου. Έτσι, η ταχύτητα του ανέμου ποικίλλει από σημείο σε σημείο και η τοπογραφία είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό ενός αιολικού πάρκου.

Η διακύμανση του ανέμου είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για την εκτίμηση της παραγόμενης ισχύος. Οι χάρτες του Wind Atlas, οι οποίοι δείχνουν τις εντολές μέσης ταχύτητας ανέμου και αναφέρονται στην ετήσια κατανομή της ταχύτητας ανέμου κάθε περιοχής, χρησιμοποιούνται συνήθως για την εκτίμηση της πυκνότητας ανέμου μιας περιοχής. Οι χάρτες αυτοί βασίζονται σε μετεωρολογικά δεδομένα εδώ και αρκετά χρόνια, συνήθως σε ύψος 10 μέτρων, όπως θα δούμε παρακάτω. Η ανάγκη για αυτούς τους χάρτες εξηγείται από το πιο χαρακτηριστικό γνώρισμα της αιολικής ενέργειας, τη μεταβλητότητά της. Η διαθεσιμότητα του ανέμου ποικίλλει γεωγραφικά και εποχιακά. Έχει βρεθεί ότι η ετήσια πυκνότητα αιολικής ενέργειας μπορεί να αποκλίνει έως και 13% από έτος σε έτος. Αυτό οφείλεται στην κυβική αναλογία της ταχύτητας του ανέμου προς τη διαθέσιμη αιολική ενέργεια. Ακόμη και στην ίδια κλιματική περιοχή είναι δυνατό να υπάρχει μεγάλη ποικιλία συμπεριφοράς ανέμου, αλλά σε μικρότερη κλίμακα σε σχέση με την παγκόσμια ποικιλότητα, η οποία επηρεάζεται από τη γεωγραφία της περιοχής, την τοπογραφία, το μέγεθος του νερού και της επιφάνειας του εδάφους, και η βλάστησή του. Ως γνωστόν, οι ταχύτητες του ανέμου είναι υψηλότερες πάνω από τις θάλασσες και τις υδάτινες επιφάνειες γενικότερα, ενώ

μειώνονται σημαντικά στις χερσαίες επιφάνειες (γι' αυτό έχει ξεκινήσει η εγκατάσταση υπεράκτιων αιολικών πάρκων τα τελευταία χρόνια).

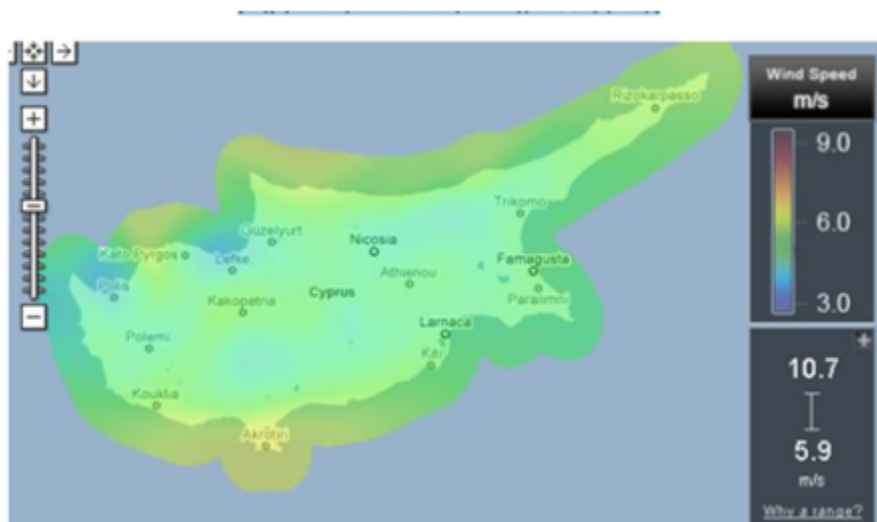
4.3.2 Μέτρηση του ανέμου

Η ταχύτητα του ανέμου παίζει πιο σημαντικό ρόλο στην παραγωγή ενέργειας, επομένως είναι σημαντικό να μετράται. Υπάρχουν χάρτες ανέμου που έχουν προκύψει από μετεωρολογικά δεδομένα εδώ και χρόνια (Εικόνα 4.2-4.3), αλλά αυτό δείχνει το μέγεθος της ταχύτητας του ανέμου που επικρατεί σε μεγαλύτερη περιοχή και αυτό δεν είναι επαρκές κριτήριο για την επιλογή μιας περιοχής για το αιολικό πάρκο. Σε κάθε υποψήφια τοποθεσία θα είναι σημαντικό να πραγματοποιούνται επιτόπιες μετρήσεις και με τη σωστή επεξεργασία αυτών των δεδομένων, που αναφέρονται στα επόμενα κεφάλαια, μπορούν να παραχθούν αξιόπιστα αποτελέσματα βάσει των οποίων θα πραγματοποιηθεί η σωστή τοποθέτηση των ανεμογεννητριών. Από τον υπολογισμό της ταχύτητας του ανέμου και από την εκτίμηση της κατανομής του, είναι δυνατό να εξαχθεί η αναμενόμενη παραγωγή ενέργειας, για αυτό χρειάζονται αρκετά χρόνια μετρήσεων για να εξαχθούν ακριβή δεδομένα που μπορούν να υπολογιστούν στατιστικά για τον υπολογισμό του μέλλοντος με επαρκή ακρίβεια. παραγωγή ενός φυτού. Επίσης, ένα σημαντικό στοιχείο όταν πρόκειται για την εγκατάσταση πολλών ανεμογεννητριών είναι η κατεύθυνση του ανέμου. Από τα στοιχεία των μετεωρολογικών ινστιτούτων και οργανισμών, εκτός από τις μετρήσεις που αφορούν την ταχύτητα του ανέμου, μπορούν να ληφθούν στοιχεία για την κύρια διεύθυνση του ανέμου, την κατεύθυνση από την οποία προέρχεται η μεγαλύτερη συχνότητα των ανέμων αλλά και από την οποία προέρχονται οι ισχυρότεροι άνεμοι.



Εικόνα 4.2 : Χάρτης του αιολικού δυναμικού της Ελλάδας

Πηγή : Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας



Εικόνα 4.3 : Χάρτης αιολικού δυναμικού της Κύπρου στα 80 μέτρα από την επιφάνεια της θάλασσας

Πηγή: Μετεωρολογική Υπηρεσία Κύπρου

Αυτή η κατεύθυνση ονομάζεται κυρίαρχη και χαρακτηρίζει τον άνεμο σε μια περιοχή. Επομένως, οι γνώσεις του παίζουν σημαντικό ρόλο στον σωστό προσανατολισμό των

ανεμογεννητριών ώστε να μπορούν να παράγουν τη μέγιστη ενέργεια. Οι μετρήσεις της ταχύτητας του ανέμου μπορούν να προσαρμοστούν στις ανάγκες του ενδιαφερόμενου ατόμου. Συνήθως οι μετρήσεις περιλαμβάνουν την τοποθέτηση ενός μεταλλικού στύλου ύψους από 10 έως 60 m (Εικόνα 4.4) στον οποίο τοποθετούνται ένα ή περισσότερα ανεμόμετρα και ανεμόμετρα. Οι χαμηλοί πυλώνες (δηλαδή μέχρι 10 m), λόγω του χαμηλού κόστους τους αλλά και της ευκολίας μεταφοράς και τοποθέτησής τους, χρησιμοποιούνται συνήθως για τον προσδιορισμό της καταλληλότερης θέσης μέτρησης. Αφού εντοπιστεί η θέση μέτρησης, ο χαμηλός άξονας μπορεί να αντικατασταθεί με έναν υψηλότερο, έτσι ώστε το ύψος μέτρησης να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στο ύψος των ανεμογεννητριών που πρόκειται να εγκατασταθούν. Οι μετρήσεις συνήθως διαρκούν ένα χρόνο για να καλύψουν όλες τις εποχιακές διακυμάνσεις που μπορεί να συμβούν σε μια δεδομένη περιοχή. Τα ανεμόμετρα είναι σημαντικό να τοποθετούνται μακριά από αντικείμενα (φυσικά ή τεχνητά) που μπορούν να επηρεάσουν την αναπνοή του ανέμου, δημιουργώντας τουρμπίνες. Πολύ σημαντικό είναι και το ύψος στο οποίο θα τοποθετηθεί το ανεμόμετρο. Στην ιδανική περίπτωση, θα πρέπει να εγκατασταθεί στο ίδιο ύψος με την ανεμογεννήτρια. Ωστόσο, αυτό δεν είναι απολύτως απαραίτητο καθώς υπάρχουν μαθηματικές μέθοδοι με τις οποίες είναι δυνατός ο υπολογισμός της ταχύτητας του ανέμου σε υψόμετρα μεγαλύτερα από αυτό του ανεμόμετρου, όταν προφανώς τα δεδομένα που λαμβάνονται είναι σωστά. Απαιτείται προσοχή σε περίπτωση που το ύψος του ανεμομετρικού άξονα είναι μικρότερο από 10 μέτρα γιατί είναι πιθανό, σε ορισμένες περιπτώσεις, λόγω της ιδιαιτερότητας της περιοχής, οι τουρμπίνες να αλλοιώσουν σοβαρά τα δεδομένα και κατά συνέπεια οι υπολογισμοί να οδηγήσουν σε λάθη στα συμπεράσματα .

4.3.3 Η ισχύς του ανέμου

Η ισχύς που βρίσκεται διαθέσιμη στον άνεμο εξαρτάται από τον κύβο της ταχύτητας του ανέμου. Η ισχύς ανά μονάδα επιφανείας δίνεται από τη σχέση :

$$P_w = \frac{1}{2} \rho U_w^3 \quad \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad (1.1)$$

Όπου, ρ = πυκνότητα ανέμου (kg/m³)

U_w = ταχύτητα ανέμου (m/s)

Έτσι η τελική τιμή της ισχύος θα είναι :

$$P = \frac{1}{2} \rho U_w^3 A \quad (W) \quad (1.2)$$

Όπου, A = επιφάνεια που διέρχεται ο άνεμος (m²)

4.3.4 Πυκνότητα του αέρα

Η πυκνότητα του αέρα είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για τον υπολογισμό της παραγόμενης ενέργειας. Η πυκνότητα του αέρα στην επιφάνεια της θάλασσας και για κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας (20°) και ατμοσφαιρικής πίεσης (101,6 kPa) είναι :

$$\rho_0 = 1,225 \frac{kg}{m^3}$$

Η πυκνότητα του αέρα μεταβάλλεται τόσο με τον χρόνο όσο και με το ύψος, την θερμοκρασία και την ατμοσφαιρική πίεση. Σε μεγαλύτερα ύψη μειώνεται με συνέπεια την μείωση της παραγόμενης ισχύος, το ίδιο ισχύει αν η θερμοκρασία είναι υψηλή, αφού η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει την πυκνότητα του αέρα. Η μεταβολή της πυκνότητας του αέρα μεταξύ χειμώνα και καλοκαιριού είναι της τάξης του 10%.

Η σχέση που εκφράζει τα πιο πάνω μεγέθη είναι :

$$p = 101325 * (1 - 2,2557 * 10^{-5} * h)^{5,25588}$$

Όπου, p = ατμοσφαιρική πίεση (Pa)

h = ύψος από την στάθμη της θάλασσας (m)

$$\rho = 1,225 * \frac{288,15}{T} * \frac{p}{1013,3}$$

Όπου, ρ = πυκνότητα αέρα (kg/m³)

T = θερμοκρασία (K)

p = ατμοσφαιρική πίεση (mb)

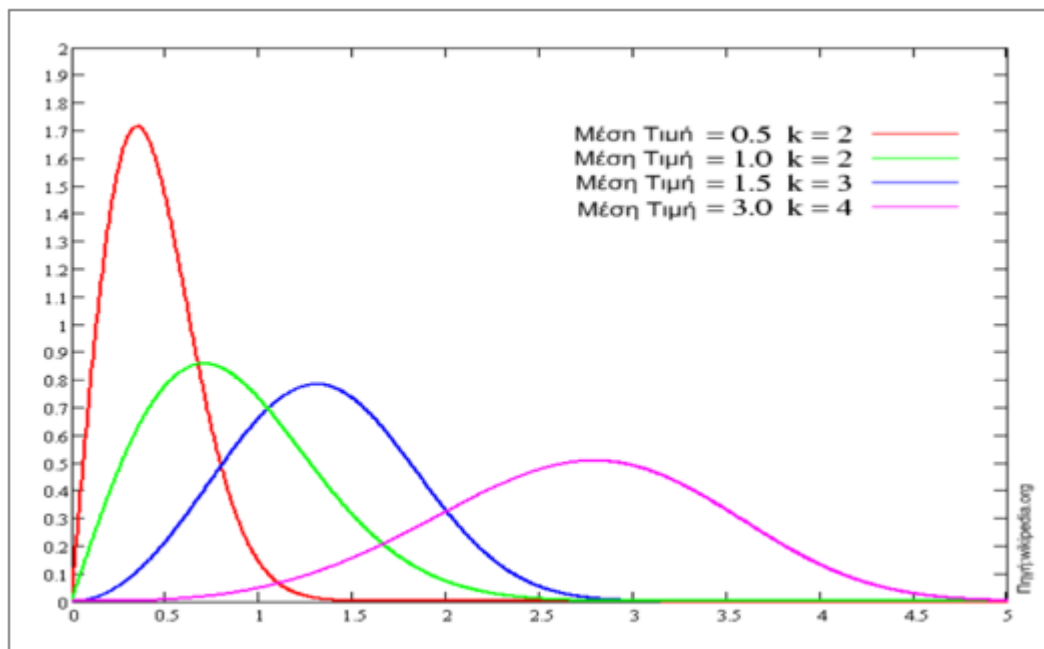
*Σημείωση: Pa = 0.01 mb

$$K = ^\circ C + 273$$

4.3.5 Σχετική κατανομή ανέμου

Όπως αναφέρθηκε, σημαντικό χαρακτηριστικό μιας περιοχής, που πρόκειται να εγκατασταθεί ένα αιολικό πάρκο, είναι το αιολικό δυναμικό και η διακύμανση του ανέμου. Η γνώση μόνο της μέσης ταχύτητας ανέμου δεν αποτελεί από μόνη της κριτήριο για την εκτίμηση της παραγόμενης αιολικής ενέργειας. Απαιτούνται επιπλέον πληροφορίες για την

συχνότητα της κάθε ταχύτητας ανέμου, όπως επίσης και την διεύθυνση της κατανομής του ανέμου. Η στατιστική κατανομή της ετήσιας ταχύτητας ανέμου είναι δυνατόν να προκύψει από ανεμολογικά δεδομένα μετρούμενα σε ένα καθορισμένο ύψος (όπως προαναφέρθηκε) . Κατά τη διαδικασία αυτή συνηθίζεται η χρήση μέσων τιμών δεκαλέπτων, τα οποία αξιολογούνται σε διάστημα ενός έτους, ώστε να προκύψει η ετήσια μέση ταχύτητα ανέμου και η ετήσια σχετική κατανομή του. Προκειμένου να προκύψουν αξιόπιστα στατιστικά αποτελέσματα, χρειάζονται δεδομένα τουλάχιστον μερικών ετών, μέχρι δέκα σύμφωνα με τη μετεωρολογική επιστήμη. Η στατιστική κατανομή της συχνότητας της ταχύτητας του ανέμου συνηθίζεται να μετράται ως συνάρτηση της πυκνότητας πιθανότητας (συνεχής κατανομή) ή της αθροιστικής πυκνότητας πιθανότητας. Γραφικά, η πρώτη δείχνει απευθείας τις ταχύτητες ανέμου που εμφανίζονται περισσότερο σε μία περιοχή, ενώ η δεύτερη δείχνει ως ποσοστό την περίοδο μέσα στο διάστημα ενός χρόνου.



Εικόνα 4.7 : Η συνάρτηση κατανομής Weibull

Πηγή : <http://www.wind-energy-the-facts.org>

Εξαιτίας των ελλιπών δεδομένων για την ταχύτητα ανέμου στις περισσότερες περιοχές, χρησιμοποιούνται διάφορες κατανομές προκειμένου να χαρακτηριστεί το αιολικό δυναμικό μιας περιοχής. Οι πλέον χρησιμοποιούμενες συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας για το αιολικό δυναμικό είναι η συνάρτηση Weibull και η συνάρτηση Rayleigh (Εικόνα 4.7). Η συνάρτηση Weibull εξαρτάται από την παράμετρο κλίμακας λ , η οποία καθορίζει την μέση

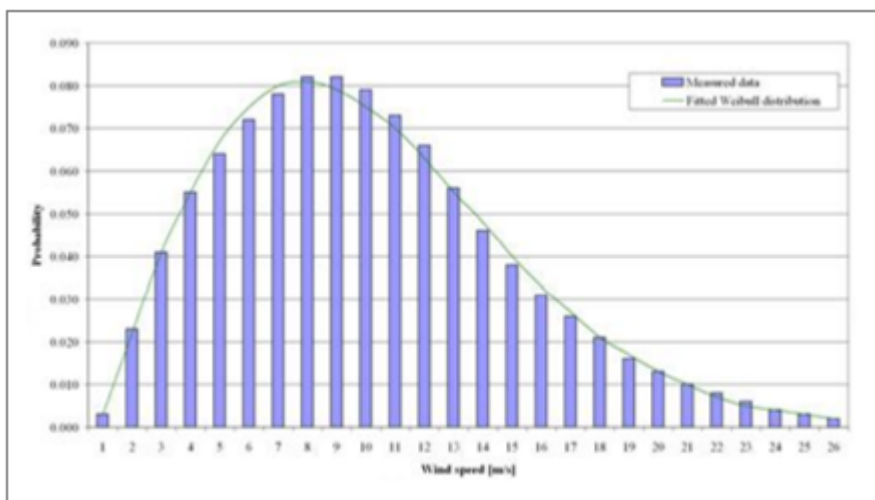
ταχύτητα ανέμου και μετράται σε m/s, και την παράμετρο μορφής k που συνήθως παίρνει τιμές 1,5 - 2,5.

Η συνάρτηση Weibull γράφεται ως εξής:

$$f(v) = \left(\frac{k}{\lambda}\right) * \left(\frac{v}{\lambda}\right)^{k-1} * e^{-\left(\frac{v}{\lambda}\right)^k} \quad 0 < v < \infty$$

Μια ειδική μορφή της συνάρτησης είναι όταν k=2. Σε αυτή την περίπτωση οδηγούμαστε στην κατανομή Rayleigh που δίνεται ως εξής:

$$f(v) = \frac{\pi v}{2 \bar{v}^2} * e^{-\frac{\pi}{4} \left(\frac{v}{\bar{v}}\right)^2}$$



Εικόνα 1.4: Παράδειγμα συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας Weibull για δεδομένες τιμές ταχύτητας ανέμου

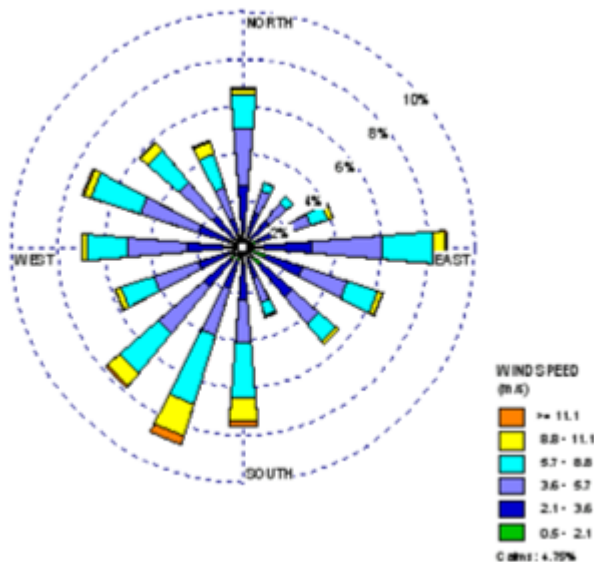
Πηγή : <http://www.wind-energy-the-facts.org>

4.3.6 Το πολικό διάγραμμα-ροζέτα (windrose)

Το πολικό διάγραμμα (windrose) είναι ένα γραφικό εργαλείο που χρησιμοποιείται από μετεωρολόγους, προκειμένου να δώσουν μια συνοπτική άποψη του πώς η ταχύτητα και κατεύθυνση ανέμου συνήθως κατανέμεται σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία.

Παρουσιάζεται σε μια κυκλική μορφή και δείχνει τη συχνότητα των ανέμων που πνέουν από συγκεκριμένες κατευθύνσεις για μια χρονική περίοδο. Το μήκος του κάθε 'ρόδου' γύρω από τον κύκλο σχετίζεται με τη συχνότητα που φυσάει ο άνεμος από μια συγκεκριμένη κατεύθυνση ανά μονάδα χρόνου. Κάθε ομόκεντρος κύκλος αντιπροσωπεύει μια διαφορετική

συχνότητα, που προέρχονται από το μηδέν στο κέντρο και καθώς η ακτίνα των κύκλων αυξάνεται, αυξάνεται και η συχνότητα. Το πολικό διάγραμμα ανέμου συνήθως χρησιμοποιεί 16 βασικές κατευθύνσεις, όπως η βόρεια (N), BBA, BA, κ.λπ. . Είναι δυνατόν να υποδιαιρεθεί μέχρι 32 κατευθύνσεις. Όσον αφορά την μέτρηση γωνίας σε μοίρες, στα Βόρεια αντιστοιχεί σε 0 ° / 360 °, η Ανατολή έως 90 °, τα Νότια έως 180 ° και η Δύση έως 270°.



Εικόνα 4.8 : Παράδειγμα windrose

Πηγή : <http://www.calvin.edu>

Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για την σωστή λειτουργία ενός αιολικού πάρκου είναι η επιρροή της μιας ανεμογεννήτριας ως προς την άλλη, αφού κατά την επιρροή αυτή η ταχύτητα του ανέμου για κάθε θέση ανεμογεννήτριας αλλάζει. Το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται πιο κάτω.

4.4 Τοπογραφία περιοχής

4.4.1 Αύξηση της ταχύτητας σε σχέση με το ύψος

Η αύξηση της ταχύτητας σε σχέση με το υψόμετρο είναι ένα πολύ σημαντικό φαινόμενο και δεν είναι σημαντικό να μείνει ανεκμετάλλευτο. Η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται με το ύψος από την επιφάνεια του εδάφους. Το φαινόμενο είναι αποτέλεσμα την επιβράδυνσης που ασκεί το έδαφος μέσω της τριβής στον άνεμο. Ανωμαλίες στη μορφολογία του εδάφους, δάση και πόλεις επηρεάζουν την ταχύτητα του ανέμου. Κύρια παράμετρος για τον υπολογισμό της ταχύτητας σε σχέση με το ύψος είναι η τραχύτητα του εδάφους.

Όσο πιο έντονες είναι οι ανωμαλίες που παρουσιάζει η μορφολογία του εδάφους, τόσο ισχυρότερη είναι η επιβράδυνση που ασκείται στον άνεμο. Αντίθετα εκτάσεις όπως τα αεροδρόμια, η θάλασσα ή ο πάγος ασκούν μικρή επίδραση στην ταχύτητα του ανέμου. Η επίδραση αυτή που ασκεί το έδαφος στην ταχύτητα του ανέμου εκφράζεται μαθηματικά με τη σχέση:

$$V_h = V_{ref} * \left(\frac{h}{h_{ref}} \right)^\alpha$$

Όπου,

V_h = ταχύτητα ανέμου (m/s) σε ύψος H

V_{ref} = η μέση ταχύτητα ανέμου (m/s) στο ύψος αναφοράς (συνήθως 10 m)

α = συντελεστής ο οποίος εξαρτάται από τη μορφολογία του εδάφους και παίρνει τιμές από 0.08 έως 0.4

Πίνακας 1.1 : Ενδεικτικές τιμές του συντελεστή α για διάφορους τύπους επιφάνειας εδάφους

	Τύπος Επιφάνειας	Συντελεστής α
Ομαλή	Πάγος	0,08
	Χιόνι	0,11
	Θάλασσα	0,12
Μέτριας τραχύτητας	Κοντό γρασίδι	0,13
	Καλλιέργειες φυτών	0,14
Κανονικής τραχύτητας	Επαρχιακή περιοχή	0,20
	Δασική περιοχή	0,23
Ισχυρής τραχύτητας	Αστική περιοχή	0,25-0,40

Μία άλλη μαθηματική έκφραση για τον υπολογισμό της ταχύτητας συναρτήσει του υψομέτρου δίνεται από τη ακόλουθη σχέση :

$$V_h \overline{V_{ref}} * \frac{\frac{\ln h}{z_o}}{\frac{\ln h_{ref}}{z_o}}$$

Όπου,

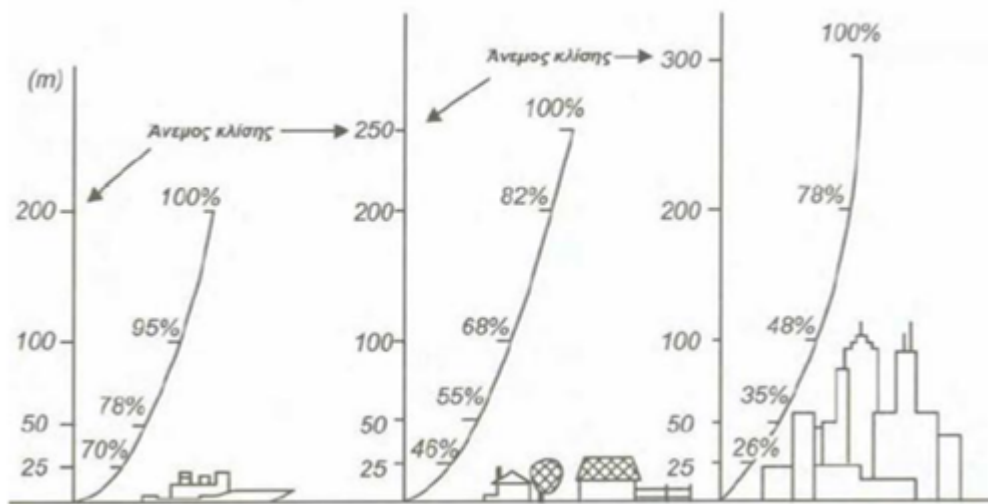
V_h = ταχύτητα ανέμου (m/s) σε ύψος H

V_{ref} = η μέση ταχύτητα ανέμου (m/s) στο ύψος αναφοράς (συνήθως 10 m)

Z_0 = το μήκος τραχύτητας της περιοχής (m)

Πίνακας 1.2 : Ενδεικτικές τιμές τραχύτητας εδάφους για διάφορους τύπους εδάφους

Τύπος Εδάφους	Μήκος τραχύτητας z_0 (m)
Θάλασσα στα ανοικτά	0,0001
Παράκτια περιοχή	0,001
Ύπαιθρος χωρίς ψηλά κτίρια και πυκνή βλάστηση	0,01
Αραιοκατοικημένες περιοχές	0,05
Δάση και προάστια πόλεων	0,3
Κέντρα μεγάλων πόλεων	1-10



Εικόνα 4.5 : Επίδραση τραχύτητας στην ταχύτητα του ανέμου σε διαφορετικό τύπο εδάφους

Πηγή : <http://www.calvin.edu>

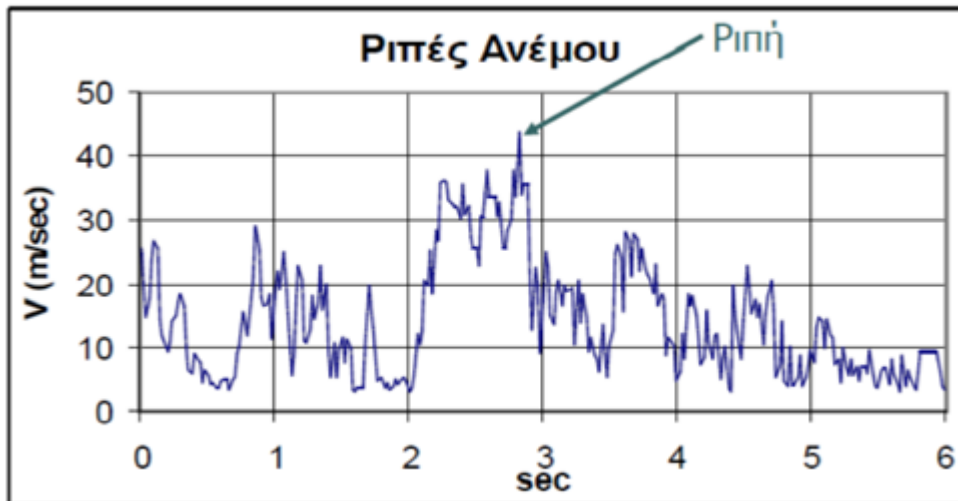
4.4.2 Τύρβη στον άνεμο

Η τύρβη προκαλείται από οποιοδήποτε στοιχείο είναι δυνατόν να εισάγει ανωμαλίες στη ροή του ανέμου, ιδιαίτερα δε λόγω ύπαρξης στοιχείων τραχύτητας της επιφάνειας του εδάφους, όπως δέντρα και πυκνοί θάμνοι στην ύπαιθρο και οικίες και ψηλοί φράχτες σε κατοικημένες περιοχές. Δηλαδή η τύρβη δημιουργεί τυχαίους στροβιλισμούς του αέρα, οι οποίοι στροβιλισμοί επηρεάζουν τόσο την παρεχόμενη ισχύ από τον άνεμο όσο και την αντοχή της αιολικής εγκατάστασης.

Η τύρβη αποτελεί τη διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου γύρω από τη μέση τιμή της. Είναι έντονη σε περιπτώσεις ξαφνικών ριπών ανέμου* κι ακραίων καιρικών φαινομένων. Εξαρτάται από τη μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου κατά κύριο λόγο, από το μήκος τραχύτητας μιας περιοχής, την ατμοσφαιρική σταθερότητα αλλά και τα επιμέρους τοπογραφικά χαρακτηριστικά. Η τύρβη αποτελεί έναν πολύ σημαντικό παράγοντα, που είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη κατά την επιλογή της τοποθεσίας εγκατάστασης μιας ανεμογεννήτριας, αφού επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το μηχανικό και το ηλεκτρικό σύστημα ελέγχου. Λόγω της έντονης και ξαφνικής διακύμανσης της ταχύτητας του ανέμου, υπάρχει καταπόνηση κυρίως των πτερυγίων μιας ανεμογεννήτριας, για το χρονικό διάστημα μερικών δευτερολέπτων μέχρι να ενεργοποιηθεί ο κατάλληλος μηχανισμός, που διαθέτει η κάθε ανεμογεννήτρια για την προφύλαξη των μηχανικών της υποσυστημάτων. Όσον αφορά στο ηλεκτρικό σύστημα ελέγχου, θα είναι σημαντικό να υπάρχει απορριπτικό φορτίο (dump load), τέτοιο ώστε να απορροφήσει την πλεονάζουσα ισχύ που θα παράγει η γεννήτρια για το προαναφερθέν χρονικό διάστημα των λίγων δευτερολέπτων, ώστε να μην κινδυνεύσει η ανεμογεννήτρια.

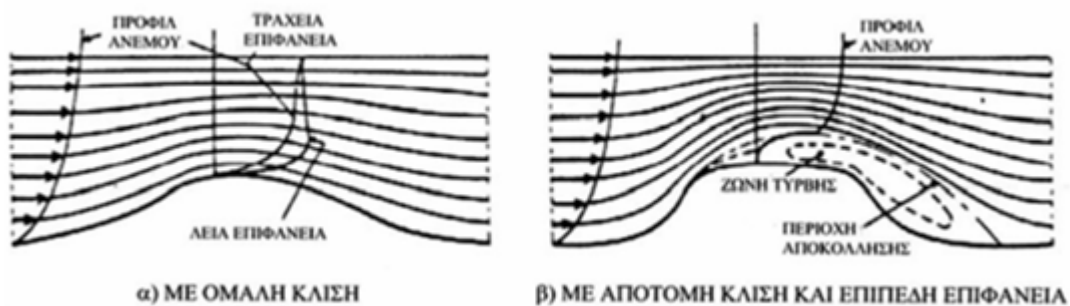
Το ίχνος του ανέμου που δημιουργείται όταν ο άνεμος διαπερνάει αυτά τα εμπόδια, παρουσιάζεται εξασθενημένο και αναταραγμένο, προκαλώντας ένα ρεύμα ανέμου που μόνο αρνητικές συνέπειες έχει για την παραγωγή μιας ανεμογεννήτριας αλλά και για την αντοχή της. Έτσι θα είναι σημαντικό να αποφεύγεται η εγκατάσταση ανεμογεννητριών σε απόσταση μικρότερη των 20 μέτρων από ένα σημαντικό ύψους εμπόδιο, αλλά θα είναι σημαντικό να τοποθετούνται σε μεγαλύτερη απόσταση και μάλιστα σε ύψος όπου το χαμηλότερο σημείο της φτερωτής να απέχει από το έδαφος 3 φορές.

- ★ Ριπή ανέμου ορίζεται ως η ξαφνική και μικρής διάρκειας (μικρότερη των 20 δευτερολέπτων) αύξηση της ταχύτητας του ανέμου. Η ταχύτητα του ανέμου μετά το πέρας της ριπής επανέρχεται στα προηγούμενα επίπεδα. Αν οι ριπές διαρκέσουν περισσότερο από 30 δευτερόλεπτα θα είναι σημαντικό να υπάρχει πρόβλεψη η αιολική μηχανή να τεθεί εκτός λειτουργίας .



Εικόνα 4.6 : Διακυμάνσεις του ανέμου – ριπή στον άνεμο

Πηγή: Ebrahim et al., 2022



Εικόνα 4.7 : Κατανομή ταχύτητας σε σχέση με το ύψος και πιθανή ζώνη δημιουργίας τύρβης

Πηγή: Ebrahim et al., 2022

4.5 Πεδίο Ροής Ομόρρου Ανεμογεννητριών

Εξαιτίας της αλληλεπίδρασης της ροής του ανέμου με τα περιστρεφόμενα πτερύγια της ανεμογεννήτριας παρατηρείται η ανάπτυξη και εξάπλωση φαινομένων ανάμειξης της τύρβης κατάντη της μηχανής. Οπότε, κατάντη των μηχανών προκαλείται αλλαγή στην αέρια μάζα, που ονομάζεται ομόρρους. Λόγω του ομόρρου, ωστόσο εμφανίζεται αύξηση της τύρβης από την αλληλεπίδραση των αερίων μαζών με την ανεμογεννήτρια, καθώς και μείωση της ταχύτητας ανέμου σε σύγκριση με την προσπίπτουσα στην μηχανή, σχετιζόμενο άμεσα με την κινητική ενέργεια που απορροφήθηκε. (Ebrahim et al., 2022)

Η μελέτη του ομόρρου αποτελεί κλασσικό πρόβλημα ρευστομηχανικής, αλλά η ακριβής πρόβλεψη των χαρακτηριστικών του ακόμη και στις απλές ροές είναι δύσκολη, λόγω της εξάρτησης του από πολλούς και πολύπλοκους παράγοντες. Η φύση της ροής του ομόρρου εξαρτάται κυρίως από την ώση, μια δύναμη από το δρομέα στο ρευστό, ενεργούσα στην διεύθυνση της ταχύτητας του αδιατάρακτου ρεύματος, λόγω της εξαγωγής ισχύος από την ροή. Τα φορτία άνωσης και οπισθέλκουσας αναπτύσσονται πάντα στην επιφάνεια των πτερυγίων, ενώ η προκύπτουσα δύναμη παράγει την ροπή, που προκαλεί τη περιστροφή του ρότορα, ώστε να επιτευχθεί ο τελικός στόχος, που δεν είναι άλλος από την ηλεκτροπαραγωγή. Η παρουσία και η επίδραση στο πεδίο ροής του πύργου στήριξης, εξάλλου, είναι ο λόγος που ο ομόρρος ανεμογεννήτριας δεν είναι αξονοσυμμετρικός. Άρα, σε αυτή την περίπτωση, μελετάται η επίδραση της τρισδιάστατης τυρβώδους ανάμειξης. Αναφορικά με το έλλειμμα της ταχύτητας σε τρισδιάστατο ομόρρο, η επανάκτηση γίνεται πανομοιότυπα με αυτήν αξονοσυμμετρικού ομόρρου, με διαφορετική όμως ανάπτυξη ορίων του ομόρρου στις δύο γεωμετρίες. (Yang, et al., 2020).

Η αξονική δύναμη από την οποία καταπονείται ο ρότορας προκαλεί πτώση πίεσης που καθορίζεται από τον τοπικό συντελεστή ώσης στο αντίστοιχο τμήμα του πτερυγίου, σε ακτινικές θέσεις πάνω στα πτερύγια. Η μέση τιμή της συνιστώσας της αξονικής δύναμης ελαττώνεται εξαιτίας της ώσης. Ο αριθμός των πτερυγίων, όπως είναι προφανές είναι πεπερασμένος, οπότε η ταχύτητα στον ομόρρο θα περιγράφεται σαν μια περιοδική συνάρτηση του χρόνου.

Η ροπή που καταπονεί τον ρότορα, προκαλεί την δημιουργία περιφερειακής συνιστώσας της ταχύτητας, η οποία οδηγεί σε τοπικά ελικοειδή ροή λόγω συστροφής. Η παραπάνω διαδικασία ισοδυναμεί με την διαδικασία ανάπτυξης συστροφής γύρω από τα πτερύγια και αυτό περιορίζει την τύρβη στις ακμές φυγής. Οι δίνες αυτές σχηματίζουν ελικοειδείς τροχιές, ξετυλιγόμενες αξονοσυμμετρικά σε σύντομο χρονικό διάστημα, έτσι ώστε στα ακροπτερύγια προκειμένου να δημιουργούνται νέες μικρότερες δίνες. Οι διακυμάνσεις της ταχύτητας είναι έντονες και αυτές με την σειρά τους οδηγούν σε έντονα φαινόμενα συνεκτικότητας και ανάμειξης τύρβης. (Sheriff, et al., 2020)

Τα συνεκτικά φαινόμενα είναι πολύ έντονα στην περιοχή κοντινού ομόρρου, δηλαδή κατάντι της ανεμογεννήτριας. Ο ομόρρος τείνει καθώς εξαπλώνεται να κινείται ακτινικά προς τα έξω και για μικρές αποστάσεις κατάντη και αξονικά του ομόρρου παρατηρείται σημαντική απόκλιση στην ταχύτητα. Τα δακτυλιοειδή διατμητικά στρώματα που βρίσκονται στα όρια του ομόρρου διογκώνονται τόσο προς τον εσωτερικό πυρήνα του, όσο και προς την περιβάλλουσα ροή, ώστε να δημιουργείται δυναμικός πυρήνας σε σχήμα κώνου. Η περιοχή, λοιπόν, αυτή χαρακτηρίζεται από την ακτινική κατανομή της τύρβης, εμφανίζοντας τις μέγιστες τιμές στην περιφέρεια του ομόρρου. Η καμπυλότητα των γραμμών ροής που δημιουργούνται προξενούν την εμφάνιση κεντρομόλου δύναμης, η οποία με την σειρά της

ευθύνεται για την διατήρηση της διαφοράς πίεσης κατά μήκος του κωνικού σχήματος του ομόρρου. Η εξέλιξη του κοντινού όμορου υπακούει σε ένα συνδυασμό επιδράσεων ατμοσφαιρικής τύρβης, τύρβης λόγω διάτμησης και μηχανικής τύρβης. (Andualet, 2020).

Σε απόσταση περίπου δύο με πέντε διαμέτρους κατάντη, δηλαδή περίπου στο τέλος του κοντινού όμορου τα δακτυλιοειδή διατμητικά στρώματα έχουν πια διεισδύσει πλήρως στην περιοχή του όμορου, οπότε σημειώνεται η έναρξη του πλήρους ανεπτυγμένου όμορου. Θα είναι σημαντικό να τονιστεί ότι, δεν έχει ληφθεί υπόψη η επίδραση του εδάφους, άρα αυτό συνεπάγεται ότι η κατανομή του ελλείμματος της ταχύτητας θα εμφανίσει γεωμετρική ομοιότητα με την αξονική τιμή, που εξαρτάται μόνο από τον συντελεστή ώσης. Εφόσον, η επίδραση των κλίσεων πίεσης έχει περιοριστεί στο ελάχιστο δυνατό, η ανάπτυξη του όμορου επηρεάζεται μόνο από την ατμοσφαιρική τύρβη και την τύρβη λόγω διάτμησης. Κατάντη, παρατηρείται επιπλέον, μείωση στις κλίσεις της ακτινικής ταχύτητας, άρα η εξάπλωση του όμορου εξαρτάται από την μέση τιμή της τύρβης αποκλειστικά. Όταν η τιμή της πίεσης στον όμορο εξισωθεί με την μέση τιμή της, τότε οι συνθήκες είναι πλήρως ανεπτυγμένες. Σε κάθε επόμενο βήμα, η εξάλειψη του όμορου αποτελεί ένα πρόβλημα διάχυσης (Wu et al., 2019)

Όσο αναφορά το προφίλ της ταχύτητας του όμορου, είτε στον μακρινό είτε στον πλήρως ανεπτυγμένο, εκφράζεται από την καμπύλη ώσης της μηχανής, αλλά και την ολική κινητική ενέργεια της τύρβης, που προκαλείται από την περιστροφή του ρότορα. Σε μεγαλύτερες αποστάσεις κατάντη, δηλαδή απόσταση είκοσι με τριάντα διαμέτρους, η κατανομή και η παρουσία του όμορου επηρεάζεται από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες και την μορφολογία του εδάφους.

Ένας μεγάλος αριθμός των αριθμητικών μοντέλων, διαφορετικής πολυπλοκότητας, έχουν αναπτυχθεί προκειμένου να περιγράψει το παραγόμενο ομόρρο ανεμογεννητριών (wake effect). Βασίζονται σε προσεγγίσεις είτε του Navier-Stokes ή τις εξισώσεις μεταφοράς στροβιλισμού. Η ανάπτυξη των μοντέλων αυτών για την περιγραφή του wake effect ξεκίνησε το 1980. Μερικά μοντέλα είναι το μοντέλο Ainslie, μοντέλο Frandsen, μοντέλο Mosaic tile και το μοντέλο Jensen (Jiang, 2021).

4.5.1 Ίχνος ανέμου πίσω από μια ιδανική ανεμογεννήτρια

Υποθέτοντας ότι έχουμε μια ιδανική ανεμογεννήτρια, όπου η ροή του ανέμου γύρω και πίσω από την ανεμογεννήτρια είναι χωρίς εναλλαγή και τριβή, είναι δυνατόν να παραχθούν γενικές σημαντικές εξισώσεις περιγράφοντας τη ταχύτητα ανέμου πίσω από την ανεμογεννήτρια. Η απλή εξίσωση του Bernoulli μελετά ότι η μηχανική ενέργεια, ανά μονάδα μάζας διατηρείται σταθερή σε κάθε γραμμή ροή του αέρα :

$$\frac{\rho V^2}{2} + p = H$$

Όπου,

ρ = η πυκνότητα του αέρα

V = ταχύτητα του ανέμου

p = η πίεση

H = η συνολική ενέργεια (σταθερή σε κάθε αεροδυναμική επιφάνεια (streamline))

Εφαρμόζοντας την εξίσωση του Bernoulli για τον άνεμο, ακριβώς μπροστά και πίσω από την ανεμογεννήτρια, η πτώση της πίεσης του αέρα δίνεται από την παρακάτω σχέση :

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho (v_0^2 - v_1^2)$$

Η αξονική δύναμη ώσης (η δύναμη που ενεργεί στην διεύθυνση του ανέμου) καθορίζεται ως T , υπολογίζεται από την εξίσωση :

$$T = \Delta p A_o$$

Όπου,

Δp = διαφορά πίεσης

A_o = η επιφάνεια της ανεμογεννήτριας

Ο συντελεστής α χρησιμοποιείται προκειμένου να καθορίσει τη σχέση μεταξύ της μείωσης της ταχύτητας στο επίπεδο του δίσκου της λεπίδας της ανεμογεννήτριας και την αδιατάραχη ταχύτητα μπροστά από την ανεμογεννήτρια (v_o):

$$u = (1 - \alpha)v_o$$

$$thus v_1 = (1 - 2\alpha)v_o$$

από τις πιο πάνω εξισώσεις και από την εξίσωση (3) έχουμε την πιο κάτω σχέση :

$$T = 2\rho\alpha(1 - \alpha)v_o^2 A_o$$

Τώρα , ορίζοντας το συντελεστή ώθησης, η αξονική δύναμη ώσης είναι δυνατόν να εκφράζεται ως:

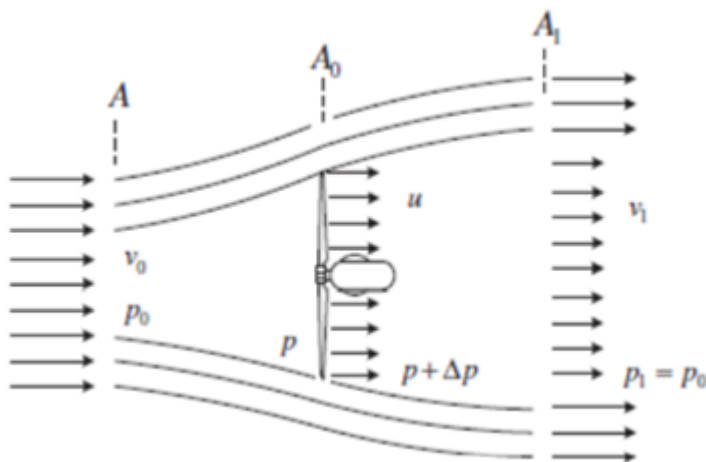
$$T = \frac{1}{2} \rho A_o C_T v_o^2$$

Τελικώς, είναι σκόπιμο να καθοριστεί η σχέση της ταχύτητας του ανέμου πίσω από την ανεμογεννήτρια (v_1) και της ταχύτητας ανέμου μπροστά από την ανεμογεννήτρια (v_o) σε σχέση με τον συντελεστή ώθησης :

$$\frac{v_1}{v_o} = (1 - 2\alpha) = \sqrt{1 - C_T}$$

Ο συντελεστής δίνεται από τις κατασκευάστριες εταιρείες ανεμογεννητριών και εξαρτάται από τον αεροδυναμικό σχεδιασμό τους.

Η παραπάνω σχέση αυτή βασίζεται στην υπόθεση της ιδεατής ταχύτητας ανέμου πίσω από την ανεμογεννήτρια : αυτό είναι το πιο απλό μοντέλο υπολογισμού της κατάντη ταχύτητας ανέμου και υπολογιστικά είναι πολύ αποτελεσματικό.



Εικόνα : το πεδίο ροής γύρω από μια ιδεατή ανεμογεννήτρια

Πηγή: Ti, Z., Deng, X. W., & Yang, H. (2020).

4.5.2 Το μοντέλο του N.O. Jensen

Το μοντέλο του πεδίου ροής όμορου (wake effect) που έχει αναπτύξει ο N.O Jensen είναι το πιο διαδεδομένο μοντέλο, και χαρακτηρίζει το πεδίο ροής του ανέμου πίσω από την ανεμογεννήτρια πιο κοντά στην πραγματικότητα.

Αν το κοντινό πεδίο πίσω από μια ανεμογεννήτρια παραμελείται η ταχύτητα που προκύπτει πίσω από την ανεμογεννήτρια είναι δυνατόν να αντιμετωπίζεται ως ένα ταραχώδη πεδίο ροής ανέμου. Η εξάπλωση μιας μεγάλου μήκους γραμμική διάσταση (ακτίνα r) είναι ανάλογο με το άνεμος πίσω από την ανεμογεννήτρια σε απόσταση x . Μια δυναμική ισορροπία δίνει (βλ. Σχήμα 2.):

$$\pi r_0^2 u + \pi(r^2 - r_0^2)v_0 = \pi r^2 v_1$$

Υποθέτοντας μια γραμμική επέκταση του ταραχώδη πεδίου ροής, η πορεία του ανέμου που έχει περάσει μέσα από τα πτερύγια αντιπροσωπεύεται από ένα κώνο. Η ακτίνα του (σκιά) κώνου r , είναι δυνατόν να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την έκφραση:

$$r = r_0 + \alpha x$$

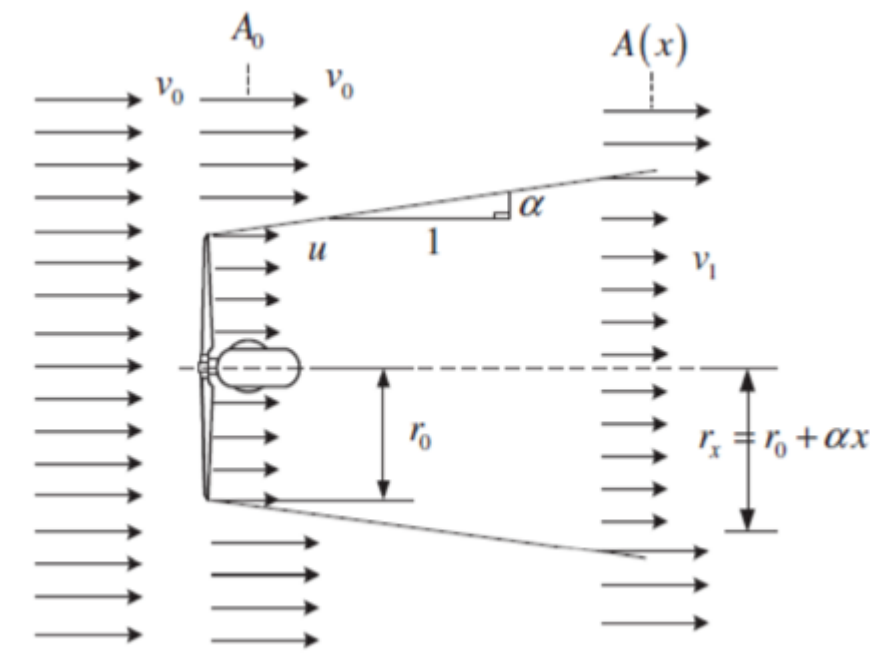
Η αδιάστατη παράμετρος καθορίζει πόσο γρήγορα επεκτείνεται το διαταραγμένο πεδίο ροής πίσω από την ανεμογεννήτρια με την απόσταση x και ορίζεται ως εξής:

$$\alpha = \frac{1}{2 \ln \left(\frac{z}{z_0} \right)}$$

Όπου,

z = ύψος του κόμβου της ανεμογεννήτριας

z_0 = συντελεστής τραχύτητας εδάφους



Εικόνα : Αναπαράσταση του μοντέλου N.O Jensen υποθέτοντας ότι το πεδίο ροής της ταχύτητας πίσω από την ανεμογεννήτρια είναι μια επέκταση ενός κώνου

Πηγή: Helbing, G., & Ritter, M. (2018).

Τελικώς, η ταχύτητα του ανέμου πίσω από την ανεμογεννήτρια υπολογίζεται από την πιο κάτω σχέση :

$$u = u_o \left[1 - \frac{2\alpha}{\left(1 + \alpha \left(\frac{x}{r_1}\right)\right)^2} \right]$$

Όπου,

r_1 = ακτίνα ανεμογεννήτριας

α = αξονικός συντελεστής παρεμβολής $C_T = 4\alpha(1 - \alpha)$

α = κλίση κώνου

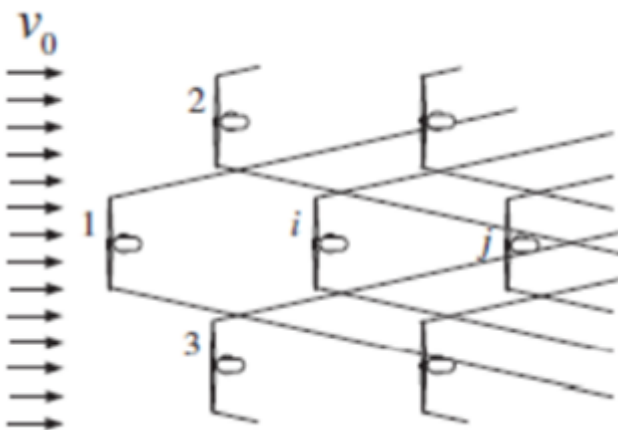
Όταν μια ανεμογεννήτρια επηρεάζεται από περισσότερες από μια ανεμογεννήτρια, τότε η ταχύτητα του ανέμου που δέχεται είναι :

$$u = u_o \left[1 - \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(1 - \frac{u}{u_o}\right)^2} \right]$$

Όπου ,

u_o = η ταχύτητα που θα είχε εάν δεν υπήρχε το διαταραγμένο πεδίο ταχυτήτων

N = ο αριθμός των ανεμογεννητριών που επηρεάζεται



Εικόνα: Ένα παράδειγμα επιρροής πολλών ανεμογεννητριών σχηματίζοντας ένα κώνο πίσω από κάθε ανεμογεννήτρια

Πηγή: Helbing, G., & Ritter, M. (2018).

Στην βιβλιογραφία αναφέρονται περισσότερα μοντέλα για τον υπολογισμό του ίχνους του ανέμου πίσω από τις ανεμογεννήτριες.

5. Εφαρμογή

5.1 Λειτουργία Αλγορίθμου

Με ολοκληρωμένη πλέον όλη την πιο πάνω διαδικασία, όλα αυτά τα δεδομένα που χρειάζονται για την είσοδο στον υπολογισμό με τη βοήθεια του προτύπου συλλέγονται σε λειτουργία Excel. Ακολουθεί μια περιγραφή της λειτουργίας του προγράμματος που περιλαμβάνεται στη λειτουργία Matlab σε αυτό το έργο.

5.1.1 Περιγραφή Διαδικασίας Υπολογισμού – Κύριο Πρόγραμμα

Η μέθοδος υπολογισμού που ακολουθείται με βάση το μαθηματικό μοντέλο έχει ως εξής: Τα υπολογιστικά φύλλα Excel που έχουν υπολογιστεί προηγουμένως περιλαμβάνονται στο πρόγραμμα. Παρουσιάζονται επίσης εκδόσεις γενετικών αλγορίθμων HS. Το πρόγραμμα υλοποιεί αναβαθμίσεις με τη βοήθεια βρόχου για συγκεκριμένο αριθμό ανεμογεννητριών που αποτελούνται από $P = n$ ανεμογεννήτριες (αυτές που είναι εγκατεστημένες επί του παρόντος στο αιολικό πάρκο). Αφού δοθεί τιμή στο $P=P(i)$, γίνεται κλήση στο υποπρόγραμμα που εκτελεί τον αλγόριθμο LH. Μέσα στο υποπρόγραμμα αυτό υπολογίζεται για κάθε διεύθυνση ανέμου, εάν η κάθε μια ανεμογεννήτρια επηρεάζεται από μια ή περισσότερες ανεμογεννήτριες και υπολογίζει την ταχύτητα της στο ύψος του κόμβου. Αφού υπολόγισε τη συνολική ταχύτητα του ανέμου σε κάθε κινητήρα, υπολόγισε την ισχύ εξόδου για κάθε κατεύθυνση ανέμου στην ανεμογεννήτρια σε εκείνο το σημείο και τελικά αύξησε την ισχύ εξόδου κάθε εξαρτήματος. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι τον μέγιστο αριθμό επαναλήψεων που ορίσαμε. Τα αποτελέσματα στη συνέχεια πληκτρολογούνται σε ένα αρχείο txt. (Kumar et al., 2018).

5.1.1.1 Λειτουργία του αλγόριθμου HS

Προκειμένου να εφαρμοστεί ο αλγόριθμος HS, το προς επίλυση πρόβλημα θα είναι σημαντικό να διατυπωθεί στη μορφή βελτιστοποίησης μιας αντικειμενική συνάρτησης που υπόκειται σε περιορισμούς. Θα χρησιμοποιηθεί μια αντικειμενική συνάρτηση η οποία θα υπολογίζει το κέρδος της επένδυσης για το αιολικό πάρκο.

Βελτιστοποίησε (μεγιστοποίησε) την $f(x)$

$$f(x) = \left[\sum_{i=1}^n P_{el}(v_w(x)) H(v_w(x)) \right] c_m t t_h - 1.25 n c_{gen}$$

όπου,

t : είναι τα χρόνια ζωής του έργου,

th : είναι η δυναμικότητα του πάρκου,

cm : το κόστος μονάδος ανά kWh,

n : ο αριθμός των ανεμογεννητριών,

c_{gen} : το κόστος κάθε ανεμογεννήτριας.

Με τους εξής περιορισμούς :

$$\sum_i x_i = P,$$
$$x_i \in \{0,1\} \forall i$$

Ο στόχος (1) επιδιώκει να αποκτήσει την καλύτερη θέση της ανεμογεννήτριας, άρα έχουμε μέτριο κέρδος. Οι περιορισμοί (2) καθορίζουν τον αριθμό των επιλεγμένων τετραγώνων και τους περιορισμούς (3) εάν υπάρχει κινητήρας αέρα στα τετράγωνα.

Ο αλγόριθμος HS ψάχνει ολόκληρες περιοχές λύσεων, ώστε να βρει το διάνυσμα βέλτιστης λύσης $x = (x_1, \dots, x_n)$, το οποίο βελτιστοποιεί (μεγιστοποιεί ή ελαχιστοποιεί) την αντικειμενική συνάρτηση $f(x)$ όπως στην (1). Αν το πρόβλημα έχει ισοτικούς ή ανισοτικούς περιορισμούς αυτοί περιγράφονται σαν σύνδεσμοι όπως στις (2) και (3) αντίστοιχα. Αν η μεταβλητή απόφασης έχει διακριτές τιμές το σύνολο των αποδεκτών τιμών γίνεται :

$$x_k \in X_k = \{x_k(1), \dots, x_k(n), \dots, x_k(Kk)\}$$

και αν η μεταβλητή απόφασης έχει συνεχείς τιμές το σύνολο των αποδεκτών τιμών γίνεται

$$x_k^L \leq x_k \leq x_k^U$$

. Στην περίπτωση μας έχουμε διακριτές λύσεις.

Ο αλγόριθμος HS χρησιμοποιεί μόνο αντικειμενική συνάρτηση. Αλλά εάν το διάνυσμα της λύσης παραβιάζει την κοινή διαδρομή, τότε είτε απορρίψτε το διάνυσμα είτε προσθέστε κρίση στην τιμή της αντικειμενικής ενέργειας.

5.1.1.2 Παράμετροι του HS Αλγορίθμου και Δεδομένα Αιολικού Πάρκου

- HMS: Είναι το μέγεθος της μνήμης του αλγορίθμου. Δηλαδή ορίζει τον αριθμό των διανυσμάτων - λύσεων που κρατά – αξιοποιεί ο αλγόριθμος
- HMCR: Είναι η πιθανότητα ($0 \leq HMCR \leq 1$) ο αλγόριθμος να επιλέξει μια τυχαία λύση από τη μνήμη του. Άρα για πιθανότητα $1 - HMCR$ ο αλγόριθμος θα διαλέξει μια νέα τυχαία λύση, μη αποθηκευμένη στη μνήμη.

- PAR: Είναι η πιθανότητα ($0 \leq PAR \leq 1$) για την οποία ο αλγόριθμος βελτιστοποιεί μια από τις αποθηκευμένες στη μνήμη λύσεις. Άρα για πιθανότητα $1 - PAR$ ο αλγόριθμος επιλέγει μία λύση από τις αποθηκευμένες στη μνήμη και την βελτιστοποιεί.
- MI: Είναι ο αριθμός επαναλήψεων που θα κάνει ο αλγόριθμος.
- FW: Είναι ένα τυχαίο (αυθαίρετα επιλεγμένο μήκος) που χρησιμοποιείται για συνεχείς μεταβλητές. Εμείς ψάχνουμε διακριτές λύσεις οπότε δεν θα το εφαρμόσουμε.

Στην παρούσα πτυχιακή οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν είναι :

HMS= 10 (μέγεθος μνήμης αλγόριθμου)

HMCR= 0.173 (η πιθανότητα ο αλγόριθμος να επιλέξει τυχαία μια λύση από την μνήμη του)

PAR= 0.658 (η πιθανότητα για την οποία ο αλγόριθμος βελτιστοποιεί μια από τις αποθηκευμένες στη μνήμη του λύσεις)

MI = 50000 (ο αριθμός των επαναλήψεων)

Οι τιμές των παραμέτρων επελέγησαν με την μέθοδο Latin Hypercube Sampling (LHS), η οποία προτάθηκε σε μια προσπάθεια να μειωθεί ο υπολογιστικός φόρτος της μεθοδολογίας τυχαίας επιλογής. Στο πλαίσιο της στατιστικής δειγματοληψίας, ο Latin υπέρκυβος είναι ένα τετραγωνικό πλέγμα που αποτελείται από θέσεις- δείγματα αν και μόνο αν υπάρχει μόνο ένα δείγμα σε κάθε γραμμή και στήλη στο δισδιάστατο χώρο. Γενικεύοντας σε έναν χώρο M-διάστασης, ο Latin υπέρκυβος M διαστάσεων ορίζεται ως ο υπέρκυβος όπου κάθε του δείγμα είναι μοναδικό σε κάθε άξονα- ευθυγραμμισμένο υπερεπίπεδο που το περιέχει. Συγκεκριμένα, το δείγμα δημιουργεί επίσης μεταβλητές M διαιρώντας σε N τμήματα χωρίς ίση πιθανότητα. Βελτιώστε τον διαστατικό χώρο M των παραμέτρων χωρίζεται σε δείγματα. Για τυχαίες μεταβλητές, γίνεται επιλογή σε μια μεμονωμένη τιμή από το δείγμα για να δημιουργηθεί ένα σύστημα τιμών N. Οι τιμές της μεταβλητής δημιουργούνται τυχαία για τη δημιουργία N δειγμάτων. Ο αριθμός N είναι σημαντικός για να αφήσετε όλες τις μεταβλητές.

5.1.1.3 Αρχική Μνήμη

Πριν ο αλγόριθμος να μπει στο τμήμα της βελτιστοποίησης, είναι σημαντικό να δημιουργήσουμε την αρχική μνήμη. Ο αριθμός των λύσεων αυτών καθορίζεται από το HMS. Αυτή η μνήμη μπορεί στο σύνολο να παραστεί από ένα πίνακα της μορφής :

$$F(X) = \begin{bmatrix} x_1^1 & \dots & x_n^1 & | & f(x^1) \\ \dots & \dots & \dots & | & \dots \\ x_1^{hms} & \dots & x_n^{hms} & | & f(x^{hms}) \end{bmatrix}$$

Επιλέγει τυχαία P αρχικές θέσεις ανεμογεννητριών από τις 289 πιθανές. Κάθε τετράγωνο αντιστοιχεί σε μια ανεμογεννήτρια. Υπολογίζει και αποθηκεύεται στην μνήμη η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης κάθε τέτοιας λύσης. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται HMS φορές για την συμπλήρωση της μνήμης.

5.1.1.4 Βελτιστοποίηση

Ο αλγόριθμος HS, είτε διαλέγει μια νέα τυχαία λύση, είτε τυχαία μία από τις αποθηκευμένες λύσεις, είτε βελτιστοποιεί μία από τις αποθηκευμένες λύσεις. Αρχικά ξεκινά ένας βρόχος από 1 έως MI . Οπότε παράγεται ένας τυχαίος αριθμός r στο διάστημα $(0,1)$. Ανάλογα με την τιμή του r και των παραμέτρων $HMCR$, PAR εκτελείται μία από τις ακόλουθες λειτουργίες Πιο συγκεκριμένα, οι τρεις λειτουργίες του αλγορίθμου είναι: (Li et al., 2020)

A) Τυχαία Επιλογή όταν $r < 1 - HMCR$

Επιλέγονται τυχαία P αρχικές θέσεις συνεργείων από τις 289 πιθανές. Κάθε τετράγωνο αντιστοιχίζεται σε μια ανεμογεννήτρια.

B) Αξιοποίηση Μνήμης (1) όταν $r < 1 - HMCR * PAR$

Στην περίπτωση αυτή αντί όσων είδαμε προηγουμένως, ο αλγόριθμος κάνει τα εξής: Από την HM μνήμη επιλέγονται P λύσεις. Από κάθε μία από αυτές επιλέγεται μία από τις θέσεις ανεμογεννητριών που ορίζεται σε αυτήν (με την προϋπόθεση να είναι διαφορετικές μεταξύ τους). υπολογίζει την παραγόμενη ισχύ έχοντας τις ταχύτητες του ανέμου για κάθε διεύθυνση ανέμου και την πυκνότητα για κάθε θέση. Έτσι επιτυγχάνεται συνδυασμός των 'καλών' λύσεων και επιτάχυνση της βελτιστοποίησης.

Γ) Αξιοποίηση Μνήμης (2) όταν δεν εκτελείται μία από τις παραπάνω λειτουργίες

Στην περίπτωση αυτή αντί όσων είδαμε προηγουμένως, ο αλγόριθμος κάνει τα εξής:

Από την HM μνήμη επιλέγεται μία λύση. Για κάθε περιοχή υπολογίζει την παραγόμενη ισχύ έχοντας τις ταχύτητες του ανέμου για κάθε διεύθυνση ανέμου και την πυκνότητα για κάθε θέση. (Kaynia, 2019).

5.1.1.5 Έλεγχος Νέας Λύσης

Με τη λήξη κάθε μιας από τις τρεις περιπτώσεις, προκύπτει ένα νέο διάνυσμα – λύση x_{New} . Ο αλγόριθμος ελέγχει αν η νέα λύση ικανοποιεί τους περιορισμούς του προβλήματος. Αν ικανοποιεί τους περιορισμούς τότε ο αλγόριθμος αρχίζει τη σύγκριση της με τις λύσεις που είναι αποθηκευμένες στη μνήμη του. Η σύγκριση αυτή γίνεται με βάση την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης της κάθε λύσης. Αν η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι

καλύτερη (μεγαλύτερη) από αυτήν της χειρότερης αποθηκευμένης λύσης, τότε η νέα λύση παίρνει τη θέση της. Αλλιώς η νέα λύση εγκαταλείπεται. (Rezaeiha, et al., 2020).

5.1.1.6 Τερματισμός Αλγορίθμου

Η εκτέλεση του αλγορίθμου συνεχίζεται μέχρι να ικανοποιηθεί το κριτήριο τερματισμού του. Αυτό είναι η συμπλήρωση του μέγιστου αριθμού επαναλήψεων.

Συμπεράσματα – Προτάσεις

Η αιολική ενέργεια μπορεί να είναι μια καθαρή και οικονομικά βιώσιμη πηγή ενέργειας, σε χώρες με μέτριο έως υψηλό αιολικό δυναμικό, και μπορεί να αποτελέσει τη λύση στο ενεργειακό πρόβλημα που έχει εμφανιστεί τα τελευταία χρόνια σε όλο τον κόσμο. Είναι επίσης φιλική προς το περιβάλλον, γεγονός που την καθιστά ακόμη πιο ελκυστική ως πηγή ενέργειας.

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο εξαρτάται, εκτός από το αιολικό δυναμικό της περιοχής και την τοπογραφία, από την επίδραση της κάθε ανεμογεννήτριας στην άλλη, καθώς λόγω αυτής της επίδρασης μειώνεται η ταχύτητα του ανέμου, με αποτέλεσμα να μειώνεται η παραγόμενη ισχύς από τον κύβο ταχύτητας.

Στην παρούσα εργασία έχει εξεταστεί το θέμα της βελτιστοποίησης στην εγκατάσταση ανεμογεννητριών σε ένα αιολικό πάρκο, ώστε να υπάρχει η μέγιστη παραγόμενη ενέργεια, χωρίς η κάθε ανεμογεννήτρια να επηρεάζει σημαντικά τις άλλες. Αναπτύσσεται η μεθοδολογία και ο αλγόριθμος, όπου καθορίζονται οι βέλτιστες θέσεις των ανεμογεννητριών, η μέγιστη παραγόμενη ενέργεια και το μέγιστο επενδυτικό κέρδος του αιολικού πάρκου.

Το πρόβλημα χωρίζεται σε 2 μικρά προβλήματα. Αρχικά το πρώτο πρόβλημα ήταν η μεγιστοποίηση του κέρδους, εξ ου και η μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος, για συγκεκριμένο αριθμό ανεμογεννητριών (για συνολικά 41 ανεμογεννήτριες). Ο χρησιμοποιούμενος γενετικός αλγόριθμος Harmony Search Optimization (HS) και το εφαρμοζόμενο πρότυπο παρέχουν μια εποπτευόμενη ομοιόμορφη κατανομή των ανεμογεννητριών στο διάστημα, η οποία καταδεικνύει την αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου.

Στη συνέχεια, το δεύτερο πρόβλημα ήταν η μεγιστοποίηση του κέρδους, εξ ου και της παραγόμενης ισχύος, για απροσδιόριστο αριθμό ανεμογεννητριών με σταθερή απόδοση 5 MW ετησίως. Και πάλι, ο αλγόριθμος HS παρέχει μια ομοιόμορφη κατανομή των ανεμογεννητριών στην περιοχή εφαρμογής του προτύπου, η οποία δείχνει τη σωστή εφαρμογή αυτού του αλγορίθμου. Ωστόσο, το παρόν παράδειγμα παρουσιάζεται με

πρόχειρες μετρήσεις ανέμου. Για την περαιτέρω μελέτη του, όπως προαναφέρθηκε, θα απαιτηθούν λεπτομερέστερες μετρήσεις στο χώρο εγκατάστασης του πάρκου και βελτιωμένο τρισδιάστατο πεδίο ροής, λαμβάνοντας υπόψη τη μορφολογία του εδάφους κ.λπ. Επίσης η εφαρμογή της μεθόδου και η εφαρμογή με γενετικούς αλγόριθμους, καλό είναι να εξετάζεται σε μεγαλύτερο ή μικρότερο χώρο, ή ακόμα και σε πιο ακανόνιστο έδαφος, με πυκνότερο δίκτυο χωρισμάτων ή ακόμα και χωρίς δίκτυο, για καλύτερη αξιολόγηση της εκτέλεσης της μεθόδου. Συνολικά, η προτεινόμενη προσέγγιση πιστεύεται ότι παρέχει τη βάση για την ανάπτυξη εξελιγμένων εργαλείων για τον εντοπισμό ενός πάρκου ανεμογεννητριών.

Βιβλιογραφία

- Abdelbaky, M. A., Liu, X., & Jiang, D. (2020). Design and implementation of partial offline fuzzy model-predictive pitch controller for large-scale wind-turbines. *Renewable Energy*, 145, 981-996.
- Abdelsalam, A. M., & El-Shorbagy, M. A. (2018). Optimization of wind turbines siting in a wind farm using genetic algorithm based local search. *Renewable energy*, 123, 748-755.
- Akylas, E., Gravanis, E., Nikolaidis, A., Panagiotou, C., Mettas, C., Kyriakidis, P., & Hadjimitsis, D. G. (2020). Off-shore wind potential in Cyprus: Towards an integrated representative geospatial database.
- Alsaleh, A., & Sattler, M. (2019). Comprehensive life cycle assessment of large wind turbines in the US. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 21(4), 887-903.
- Andualem, D. S. (2020). Indigenous Communication System of the Oromo Society: The Case of the Oromo Community of Haramaya District. *East African Journal of Social Sciences and Humanities*, 5(1), 37-54.
- Anup, K. C., Whale, J., & Urmee, T. (2019). Urban wind conditions and small wind turbines in the built environment: A review. *Renewable energy*, 131, 268-283.
- Best, R., & Burke, P. J. (2018). Adoption of solar and wind energy: The roles of carbon pricing and aggregate policy support. *Energy Policy*, 118, 404-417.
- Bryner, G. C. (2002). *The National Energy Policy: Assessing Energy Policy Choices*. U. Colo. L. Rev., 73, 341.
- Chen, B., Yang, Y., & Wang, Z. L. (2018). Scavenging wind energy by triboelectric nanogenerators. *Advanced Energy Materials*, 8(10), 1702649.
- Chudy-Laskowska, K., Pisula, T., Liana, M., & Vasa, L. (2020). Taxonomic Analysis of the Diversity in the Level of Wind Energy Development in European Union Countries. *Energies*, 13(17), 4371.
- Cranmer, A., Ericson, J. D., Broughel, A. E., Bernard, B., Robicheaux, E., & Podolski, M. (2020). Worth a thousand words: Presenting wind turbines in virtual reality reveals new opportunities for social acceptance and visualization research. *Energy Research & Social Science*, 67, 101507.
- Deng, W., Xu, J., & Zhao, H. (2019). An improved ant colony optimization algorithm based on hybrid strategies for scheduling problem. *IEEE access*, 7, 20281-20292.
- Ebrahim, A. A., Miheretu, B. A., & Alemayehu, A. (2022). Vulnerability of smallholder farmers to climate variability and change across different agro-ecological Zones in Oromo Nationality Administration (ONA), North east Ethiopia. *PloS one*, 17(6), e0268094.

- Fu, T., & Wang, C. (2018). A hybrid wind speed forecasting method and wind energy resource analysis based on a swarm intelligence optimization algorithm and an artificial intelligence model. *Sustainability*, 10(11), 3913.
- Garcia, D. A., Groppi, D., & Tavakoli, S. (2021). Developing and testing a new tool to foster wind energy sector industrial skills. *Journal of Cleaner Production*, 282, 124549.
- Helbing, G., & Ritter, M. (2018). Deep Learning for fault detection in wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 98, 189-198.
- Jiang, Z. (2021). Installation of offshore wind turbines: A technical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 139, 110576.
- Ju, X., Liu, F., Wang, L., & Lee, W. J. (2019). Wind farm layout optimization based on support vector regression guided genetic algorithm with consideration of participation among landowners. *Energy Conversion and Management*, 196, 1267-1281.
- Kalogeri, C., Rizou, D., & Kallos, G. (2019, January). Identifying the different spatio-temporal characteristics of offshore wind and wave energy resource for delivering a more stable power output onto the electric grid. In *Geophysical Research Abstracts* (Vol. 21).
- Karamichailidou, D., Kaloutsas, V., & Alexandridis, A. (2021). Wind turbine power curve modeling using radial basis function neural networks and tabu search. *Renewable Energy*, 163, 2137-2152.
- Kaynia, A. M. (2019). Seismic considerations in design of offshore wind turbines. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 124, 399-407.
- Kumar, R., Raahemifar, K., & Fung, A. S. (2018). A critical review of vertical axis wind turbines for urban applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89, 281-291.
- Langer, K., Decker, T., Roosen, J., & Menrad, K. (2018). Factors influencing citizens' acceptance and non-acceptance of wind energy in Germany. *Journal of Cleaner Production*, 175, 133-144.
- Li, H., Teixeira, A. P., & Soares, C. G. (2020). A two-stage Failure Mode and Effect Analysis of offshore wind turbines. *Renewable Energy*, 162, 1438-1461.
- Luo, H., Hu, Z., Zhang, H., & Chen, H. (2018). Coordinated active power control strategy for deloaded wind turbines to improve regulation performance in AGC. *IEEE Transactions on Power Systems*, 34(1), 98-108.
- McKenna, R., Pfenninger, S., Heinrichs, H., Schmidt, J., Staffell, I., Bauer, C., ... & Wohland, J. (2022). High-resolution large-scale onshore wind energy assessments: A review of potential definitions, methodologies and future research needs. *Renewable Energy*, 182, 659-684.

- Nikolaidis, G., Karaolia, A., Matsikaris, A., Nikolaidis, A., Nicolaides, M., & Georgiou, G. C. (2019). Blue energy potential analysis in the Mediterranean. *Frontiers in Energy Research*, 7, 62.
- Olaru, G., Schroeders, U., Hartung, J., & Wilhelm, O. (2019). Ant colony optimization and local weighted structural equation modeling. A tutorial on novel item and person sampling procedures for personality research. *European Journal of Personality*, 33(3), 400-419.
- Onea, F., & Rusu, L. (2019). A study on the wind energy potential in the romanian coastal environment. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(5), 142.
- Onea, F., & Rusu, L. (2019). Assessment of the Romanian onshore and offshore wind energy potential. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 122, p. 01003). EDP Sciences.
- Prata, R., Carvalho, P. M., & Azevedo, I. L. (2018). Distributional costs of wind energy production in Portugal under the liberalized Iberian market regime. *Energy Policy*, 113, 500-512.
- Rezaeiha, A., Montazeri, H., & Blocken, B. (2020). A framework for preliminary large-scale urban wind energy potential assessment: Roof-mounted wind turbines. *Energy Conversion and Management*, 214, 112770.
- Serban, A., Paraschiv, L. S., & Paraschiv, S. (2020). Assessment of wind energy potential based on Weibull and Rayleigh distribution models. *Energy Reports*, 6, 250-267.
- Shen, X., Fu, X., & Zhou, C. (2018). A combined algorithm for cleaning abnormal data of wind turbine power curve based on change point grouping algorithm and quartile algorithm. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 10(1), 46-54.
- Sheriff, O., Alemayehu, K., & Haile, A. (2020). Production systems and breeding practices of Arab and Oromo goat keepers in northwestern Ethiopia: implications for community-based breeding programs. *Tropical Animal Health and Production*, 52(3), 1467-1478.
- Sinner, M., Petrović, V., Langidis, A., Neuhaus, L., Hölling, M., Kühn, M., & Pao, L. Y. (2021). Experimental testing of a preview-enabled model predictive controller for blade pitch control of wind turbines. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*.
- Stefanakos, C., Tedeschi, E., & Brönnner, U. (2021, June). Offshore wind and wave energy resource assessment in the Norwegian waters based on ERA5 reanalysis. In *The 31st International Ocean and Polar Engineering Conference*. OnePetro.
- Ti, Z., Deng, X. W., & Yang, H. (2020). Wake modeling of wind turbines using machine learning. *Applied Energy*, 257, 114025.
- Wang, X., Zeng, X., Li, J., Yang, X., & Wang, H. (2018). A review on recent advancements of substructures for offshore wind turbines. *Energy conversion and management*, 158, 103-119.

- Wang, Z., Duan, C., & Dong, S. (2018). Long-term wind and wave energy resource assessment in the South China sea based on 30-year hindcast data. *Ocean Engineering*, 163, 58-75.
- Wu, X., Hu, Y., Li, Y., Yang, J., Duan, L., Wang, T., ... & Liao, S. (2019). Foundations of offshore wind turbines: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 104, 379-393.
- Yang, J., Fang, L., Song, D., Su, M., Yang, X., Huang, L., & Joo, Y. H. (2021). Review of control strategy of large horizontal-axis wind turbines yaw system. *Wind Energy*, 24(2), 97-115.
- Yang, L., Li, G., Zhang, Z., Ma, X., & Zhao, Y. (2020). Operations & maintenance optimization of wind turbines integrating wind and aging information. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 12(1), 211-221.
- Yin, X., Zhang, W., & Zhao, X. (2019). Current status and future prospects of continuously variable speed wind turbines: a systematic review. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 120, 326-340.
- Zeng, Z., Ziegler, A. D., Searchinger, T., Yang, L., Chen, A., Ju, K., ... & Wood, E. F. (2019). A reversal in global terrestrial stilling and its implications for wind energy production. *Nature Climate Change*, 9(12), 979-985.