



ΤΙΤΛΟΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ

ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ: ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ
ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ
ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ
ΑΝΕΓΕΡΣΗΣ

ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ: ΧΟΥΛΙΑΡΑΣ ΝΕΣΤΟΡΑΣ , ΤΣΙΒΡΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΔΡΟΣΟΣ ΧΡΗΣΤΟΣ

ΙΟΥΛΙΟΣ 2020

ΤΜΗΜΑ: ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ω/Η κάτωθι υπογεγραμμένη Χαλιάρια Νίκορας του Ανδρέου, φοιτητής του Τμήματος Μηχανικών Διακλαστικών Σ.Χ.Ε.Δ.Α.Π. και Πλοίων του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής πριν αναλάβω την εκπόνηση της Πτυχιακής Εργασίας μου δηλώνω ότι ενημερώθηκα για τα παρακάτω:

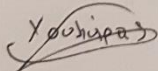
«Η Πτυχιακή Εργασία (ΠΕ) αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο του συγγραφέα, όσο και του Ιδρύματος και θα πρέπει να έχει μοναδικό χαρακτήρα και πρωτότυπο περιεχόμενο.

Απαγορεύεται αυστηρά οποιοδήποτε κομμάτι κειμένου της να εμφανίζεται αυτούσιο ή μεταφρασμένο από κάποια άλλη δημοσιευμένη πηγή. Κάθε τέτοια πράξη αποτελεί προϊόν λογοκλοπής και εγείρει θέμα Ηθικής Τάξης για τα πνευματικά δικαιώματα του άλλου συγγραφέα. Αποκλειστικός υπεύθυνος είναι ο συγγραφέας της Π.Ε. ο οποίος φέρει και την ευθύνη των συνεπειών, ποινικών και άλλων, αυτής της πράξης.

Πέραν των όποιων ποινικών ευθυνών του συγγραφέα, σε περίπτωση που το Ίδρυμα του έχει απονείμει Πτυχίο, αυτό ανακαλείται με απόφαση της Συνέλευσης του Τμήματος. Η Συνέλευση του Τμήματος με νέα απόφασή της μετά από αίτηση του ενδιαφερόμενου, του αναθέτει εκ νέου την εκπόνηση Π.Ε. με άλλο θέμα και διαφορετικό επιβλέποντα καθηγητή. Η εκπόνηση της εν λόγω Π.Ε. πρέπει να ολοκληρωθεί εντός τουλάχιστον ενός ημερολογιακού μήνου από την ημερομηνία ανάθεσής της.

Ο Δηλών

Χαλιάρια Νίκορας



Ημερομηνία

8/7/2020

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ως κάτωθι υπογεγραμμένοσ(η) Γεωργία Γιώργος του Σπύρου, φοιτητής του Τμήματος Μηχανικών Βιοπαράκτιων Σχεδίασης και Παραγωγής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, πριν αναλάβω την εκπόνηση της Πτυχιακής Εργασίας μου δηλώνω ότι ενημερώθηκα για τα παρακάτω:

«Η Πτυχιακή Εργασία (Πθ) αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο του συγγραφέα, όσο και του Ιδρύματος και θα πρέπει να έχει μοναδικό χαρακτήρα και πρωτότυπο περιεχόμενο.

Απαγορεύεται αυστηρά οποιοδήποτε κομμάτι κειμένου της να εμφανίζεται αυτούσιο ή μεταφρασμένο από κάποια άλλη δημοσιευμένη πηγή. Κάθε τέτοια πράξη αποτελεί προϊόν λογοκλοπής και εγείρει θέμα Ηθικής Τάξης για τα πνευματικά δικαιώματα του άλλου συγγραφέα. Αποκλειστικός υπεύθυνος είναι ο συγγραφέας της Π.Ε. ο οποίος φέρει και την ευθύνη των συνενπειών, ποινικών και άλλων, αυτής της πράξης.

Πέραν των όποιων ποινικών ευθυνών του συγγραφέα, σε περίπτωση που το ίδρυμα του έχει απονείμει Πτυχίο, αυτό ανακαλείται με απόφαση της Συνέλευσης του Τμήματος. Η Συνέλευση του Τμήματος με νέα απόφασή της μετά από αίτηση του ενδιαφερόμενου, του αναθέτει εκ νέου την εκπόνηση Π.Ε. με άλλο θέμα και διαφορετικό επιβλέποντα καθηγητή. Η εκπόνηση της εν λόγω Π.Ε. πρέπει να ολοκληρωθεί εντός τουλάχιστον ενός ημερολογιακού μήνου από την ημερομηνία ανάθεσής της.

Ο Δηλών

Γεωργία Γιώργος



Ημερομηνία

8/7/2020

Θέμα:

**«Αιολική ενέργεια: Μελέτη και υπολογισμός λειτουργικών
χαρακτηριστικών ανεμογεννήτριας και
κριτήρια περιοχής ανέγερσης»**

Περίληψη

Οι άνεμο αποτελούν μεγάλες μάζες αέρα, που δημιουργούνται από την άνιση θέρμανση της επιφάνειας της Γης λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας και κινούνται γρήγορα από τη μία περιοχή στην άλλη. Η εκμετάλλευση του ανέμου συντελείται από τα αρχαία χρόνια, για την κίνηση των σκαφών. Στα σύγχρονα χρόνια, μια σειρά κρίσεων στην πετρελαϊκή αγορά αλλά και η παραγωγή ενέργειας που θα είναι φιλική προς το περιβάλλον έφερε στο προσκήνιο την ανάγκη για παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, όπως ο άνεμος. Πλέον, τόσο οι πολίτες όσο και οι διοικούντες των χωρών έχουν κατανοήσει ότι ο άνεμος είναι μια καθαρή και ανεξάντλητη πηγή ενέργειας. Τα σύγχρονα συστήματα για τη χρήση της αιολικής ενέργειας είναι κυρίως ανεμογεννήτριες, δηλαδή μηχανές που μετατρέπουν την αιολική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια και ονομάζονται. Η πιο σημαντική από οικονομική άποψη εφαρμογή για ανεμογεννήτριες είναι η σύνδεσή τους με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας μιας χώρας. Σε αυτήν την περίπτωση, ένα αιολικό πάρκο, δηλαδή μια ομάδα πολλών ανεμογεννητριών, εγκαθίσταται και λειτουργεί σε μια περιοχή με υψηλό αιολικό δυναμικό, και ολόκληρη η παραγωγή μεταδίδεται στο ηλεκτρικό δίκτυο. Στην παρούσα εργασία, μελετάτε το αιολικό δυναμικό της Ελληνικής επικράτειας και προτείνονται ορισμένες τοποθεσίες που κρίνονται καταλληλότερες για την εγκατάσταση αιολικού πάρκου. Σε αυτές συγκαταλέγεται η Νότιος Εύβοια στην περιοχή της Καρύστου, η Σαμοθράκη, η Άνδρος και Κάρπαθος

Λέξεις Κλειδιά: Άνεμος, Ανεμογεννήτρια, Αιολική Ενέργεια

Abstract

The winds are large masses of air, created by the uneven heating of the Earth's surface due to solar radiation and moving rapidly from one area to another. The exploitation of the wind has been taking place since ancient times, for the movement of boats. In modern times, a series of crises in the oil market as well as the production of energy that will be environmentally friendly have brought to the fore the need for energy production from renewable sources, such as wind. Now both the citizens and the rulers of the countries have understood that the wind is a clean and inexhaustible source of energy. Modern systems for the use of wind energy are mainly wind turbines, ie machines that convert wind energy into electricity and are called. The most economically viable application for wind turbines is their connection to a country's electricity grid. In this case, a wind farm, ie a group of many wind turbines, is installed and operated in an area with high wind potential, and all production is transmitted to the electricity grid. In this paper, you study the wind potential of the Greek territory and suggest some locations that are considered more suitable for the installation of a wind farm. These include Southern Evia in the area of Karystos, Samothrace, Andros and Karpathos.

Keywords: Wind, Wind Turbine, Wind Energy

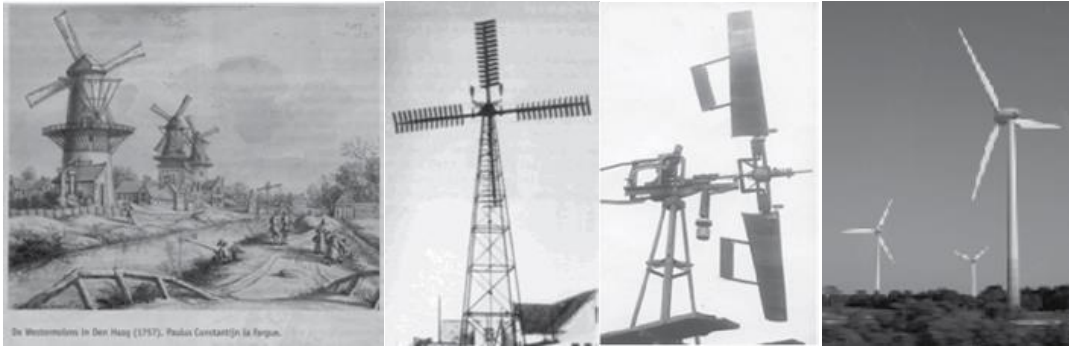
Περιεχόμενα

1.	Αιολική Ενέργεια	7
1.1.	Οι Πρώτοι Ανεμόμυλοι (600-1890)	8
1.2.	Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανεμογεννήτριες (1890-1930).....	10
1.3.	Δυναμό – Η Πρώτη Γεννήτρια Ηλεκτρικού Ρεύματος	11
1.4.	Πρώτη Φάση Καινοτομίας (1930-1960)	13
1.5.	Δεύτερη Φάση Καινοτομίας και Μαζικής Παραγωγής (1960 έως σήμερα)	17
1.6.	Ανάπτυξη Μεγάλων Ανεμογεννητριών	19
1.7.	Ανάπτυξη Μικρότερων Ανεμογεννητριών	23
1.8.	Αιολικά Πάρκα και Σύνδεση Δικτύου	24
2.	Ανεμογεννήτριες και Υπολογισμών Λειτουργικών Χαρακτηριστικών	27
2.1.	Βασικά Στοιχεία Φυσικής του Ανέμου	27
2.2.	Θεμελιώδης εξίσωση της αιολικής ενέργειας.....	29
2.3.	Ταχύτητα ανέμου	31
2.4.	Πυκνότητα ανέμου	32
2.5.	Αποτελεσματικότητα Εξαγωγής Αιολικής Ενέργειας	33
2.6.	Συντελεστής χωρητικότητας (Capacity Factor – CF).....	34
2.7.	Διάρκεια Ζωής Ανεμογεννητριών.....	37
3.	Βιβλιογραφική Ανασκόπηση Μελετών Ανέγερσης Ανεμογεννητριών & Αιολικών Πάρκων με Κριτήριο τα Χαρακτηριστικά της Τοποθεσίας.....	38
3.1.	Λήψη Αποφάσεων Πολλαπλών Κριτηρίων και Σύνθετη Αναλογική Εκτίμηση	38
3.2.	Χρήση Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών και Δείκτη Καταλληλότητας....	40
3.3.	Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία και GIS.....	43
3.4.	Τεχνικές Λήψης Αποφάσεων Πολλαπλών Κριτηρίων	48
3.5.	Μοντέλο Προγραμματισμού Στόχων Επιλογή Τοποθεσιών Υπεράκτιο Τομέα Αιολικών Πάρκων	52
4.	Προτάσεις Ανέγερσης Ανεμογεννητριών στον Ελλαδικό Χώρο	55
4.1.	Υπολογισμός Αιολικού Δυναμικού	55
4.2.	Μέση Ετήσια Ταχύτητα Ανέμου	59
4.3.	Τελική Πρόταση Χωροθέτησης Αιολικών Πάρκων.....	62
5.	Συμπεράσματα	63
	Βιβλιογραφία.....	64

1. Αιολική Ενέργεια

Ο άνεμος έχει χρησιμοποιηθεί ως πηγή ενέργειας για περισσότερα από 1500 χρόνια. Σε περιόδους όπου άλλες πηγές ενέργειας ήταν άγνωστες ή σπάνιες, η αιολική ενέργεια αποτέλεσε ένα επιτυχημένο μέσο για τη βιομηχανική και οικονομική ανάπτυξη. Η αιολική ενέργεια έγινε μια περιθωριακή πηγή που έγινε φθηνότερη, με ευκολότερη εκμετάλλευση από τις διαθέσιμες πηγές ενέργειας. Από την άποψη της συμβολής της αιολικής ενέργειας στην οικονομική ανάπτυξη, μπορεί κανείς να διαιρέσει την ιστορία της αιολικής ενέργειας σε τέσσερις αλληλοεπικαλυπτόμενες χρονικές περιόδους (Εικόνα 1). Εκτός από την πρώτη περίοδο, η έμφαση εδώ είναι η παραγωγή ισχύος από τον άνεμο (Greaves & Carpenter, 1969):

- 600-1890: Κλασική περίοδος. Κλασικοί ανεμόμυλοι για μηχανικούς οδηγούς. περισσότερους από 100.000 ανεμόμυλους στη βορειοδυτική Ευρώπη. Η περίοδος έληξε μετά την ανακάλυψη της ατμομηχανής και λόγω της άμεσης διαθεσιμότητας του ξύλου και του άνθρακα.
- 1890-1930: Ανάπτυξη ανεμογεννητριών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η ανάπτυξη της ηλεκτρικής ενέργειας ως πηγής ενέργειας διαθέσιμης σε όλους οδηγεί στη χρήση ανεμόμυλων ως πρόσθετη δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Βασικές εξελίξεις στον τομέα της αεροδυναμικής. Η περίοδος έληξε λόγω του φθηνότερου ορυκτού πετρελαίου.
- 1930-1960: Πρώτη φάση καινοτομίας. Η ανάγκη ηλεκτροδότησης των αγροτικών περιοχών και η έλλειψη ενέργειας κατά τη διάρκεια του Δευτέρου Παγκοσμίου Πολέμου προκάλεσε νέες εξελίξεις. Προβλέψεις στον τομέα της αεροδυναμικής. Η περίοδος έληξε λόγω του φθηνότερου φυσικού αερίου και των ορυκτών καυσίμων.
- Από το 1973: Δεύτερη φάση καινοτομίας και μαζική παραγωγή. Η ενεργειακή κρίση και τα περιβαλλοντικά προβλήματα σε συνδυασμό με την τεχνολογική πρόοδο εξασφαλίζουν μια εμπορική πρόοδο



Εικόνα 1: Ιστορική εξέλιξη της χρήσης του ανέμου ως πηγής ενέργειας.

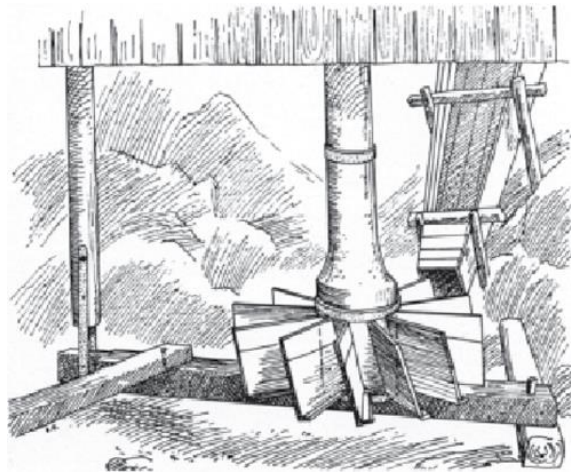
Κατά τη διάρκεια της κλασικής περιόδου, οι «ανεμογεννήτριες» (ανεμόμυλοι) μεταμόρφωσαν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανική ενέργεια. Αφού εφευρέθηκαν γεννήτριες συνεχούς ρεύματος και εναλλασσόμενου ρεύματος και χρησιμοποιήθηκαν για δημόσια παροχή ηλεκτρικού ρεύματος, οι ανεμόμυλοι χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η εξέλιξη αυτή ξεκίνησε αποτελεσματικά στα τέλη του 19ου αιώνα και, μετά την ενεργειακή κρίση το 1973, έγινε μεγάλη οικονομική επιτυχία (Greaves & Carpenter, 1969).

1.1. Οι Πρώτοι Ανεμόμυλοι (600-1890)

Οι μύλοι νερού ήταν πολύ πιθανόν οι πρόδρομοι των ανεμόμυλων. Τα υδρόμυλοι, και πάλι, αναπτύχθηκαν από συσκευές που λειτουργούσαν από ανθρώπους ή ζώα. Οι συσκευές που είναι γνωστές σε εμάς από ιστορικές πηγές διέθεταν έναν κατακόρυφο κύριο άξονα στον οποίο συνδέθηκαν διασταυρώσεις για να οδηγούν τον κύριο άξονα. Οι εγκάρσιες ράβδοι κινούνταν από αγροτικά ζώα όπως άλογα, γαϊδούρια ή αγελάδες. Φαίνεται λογικό οι κάθετοι ανεμόμυλοι να αναπτύχθηκαν υπό αυτές τις συσκευές. Ωστόσο, υπάρχουν ελάχιστες ιστορικές πηγές για να αποδειχθεί αυτό. Περισσότερες πηγές μπορούν να βρεθούν στους υδρόμυλους «σκανδιναβικούς» ή «ελληνικούς» που εξελίχθηκαν από τις συσκευές που λειτουργούν με ζώα (Εικόνα 2). Αυτοί οι τύποι υδροφορέων είχαν την καταγωγή τους γύρω στα 1000 π.Χ. στους λόφους της περιοχής της Ανατολικής Μεσογείου και χρησιμοποιήθηκαν επίσης στη Σουηδία και τη Νορβηγία (Greaves & Carpenter, 1969).

Οι πρώτοι ανεμόμυλοι με κατακόρυφους κύριους άξονες βρέθηκαν στην Περσία και την Κίνα. Στα μέσα του 7ου αιώνα μ.Χ., το κτίριο των ανεμόμυλων ήταν ένα ιδιαίτερα βραβευμένο εμπόριο στην Περσία (Golding, 1955).

Στην Κίνα, κάθετες ανεμογεννήτριες εισήχθησαν από τους εμπόρους. Ο πρώτος Ευρωπαίος που ανέφερε σχετικά με τους ανεμόμυλους στην Κίνα ήταν ο Jan Nieuhoff, ο οποίος ταξίδεψε εκεί το 1656 με έναν από τους Ολλανδούς πρεσβευτές. Παρόμοιες ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούνταν στην Κίνα μέχρι πρόσφατα. Άλλοι τύποι συσκευών ήταν διάδρομοι που λειτουργούσαν με σωματική δύναμη ανθρώπων ή ζώων. Ο οριζόντιος μύλος νερού αναπτύχθηκε από το διάδρομο με την αντικατάσταση ανθρώπων ή ζώων με ρέον νερό. Μια περαιτέρω εξέλιξη τον 1ο αιώνα μ.Χ. ήταν οι λεγόμενα μύλοι Βιτρουβίας, που εισήχθησαν από τον Ρωμαίο Βιτρουβίο. Αυτός ο μύλος νερού μπορεί να θεωρηθεί ως το πρωτότυπο για την υποκλάση νερόμυλος που μπορεί να βρεθεί σε όλη την Ευρώπη σε ποτάμια και ρέματα με μικρές διαφορές. Επίσης, θεωρείται ότι ο βιτρουβιανός τροχός είναι ο πρόδρομος του οριζόντιου ανεμόμυλου (Greaves & Carpenter, 1969).



Εικόνα 2: Τροχός νερού με κατακόρυφο άξονα περιστροφής. Πηγή: (Reynolds, 1970).

Οι ανεμόμυλοι που διανεμήθηκαν ευρέως προήλθαν από την Εγγύς Ανατολή στην Ευρώπη. Ορισμένοι συγγραφείς αμφισβητούν ακόμη την ύπαρξη οριζόντιων ανεμόμυλων στην Εγγύς Ανατολή κατά τη διάρκεια των Σταυροφοριών (Golding, 1955). Άλλοι, πάλι, μιλούν μόνο για κάθετους ανεμόμυλους εκείνη την εποχή. Η υπόθεση ότι οι ανεμόμυλοι της Δυτικής Ευρώπης εφευρέθηκαν ανεξάρτητα από αυτούς της Εγγύς Ανατολής υποστηρίζεται από έγγραφα που βρέθηκαν στα αρχεία της ολλανδικής επαρχίας Drenthe. Στα έγγραφα αυτά που προέρχονται από το έτος 1040, κατά τη διάρκεια των Σταυροφοριών, αναφέρονται δύο ανεμόμυλοι (Deurzer Diep και Uffelte). Κατά τη διάρκεια της Αναγέννησης χτίστηκαν επίσης στην

Ευρώπη μερικοί ανεμόμυλοι. Ιδιαίτερα γνωστός ήταν ο ανεμόμυλος που χτίστηκε από τον Captain Hooper στο Margate, Αγγλία (Reynolds, 1970).

Με την εφεύρεση της ατμομηχανής (Watt), ήταν δυνατή η παραγωγή ενέργειας κατά βούληση. Η παροχή ενέργειας μπορεί να προσαρμοστεί απόλυτα στη ζήτηση. Εκτός αυτού, τα καύσιμα όπως ο άνθρακας και το ξύλο ήταν σχετικά φθηνά. Αυτό είχε καταστροφικές επιπτώσεις στη χρήση ανεμόμυλων. Κατά τη διάρκεια του δέκατου ένατου αιώνα, ο συνολικός αριθμός των ανεμόμυλων στη βορειοανατολική Ευρώπη μειώθηκε από τα πρωτότυπα 100.000 σε 2000. Χάρη στην ενεργό πολιτική διατήρησης της Verening de Hollandsche Molen, 1000 από τους σχεδόν 10.000 ανεμόμυλους ήταν σε θέση να έκτακτος. Αυτοί οι κλασσικοί ανεμόμυλοι Hollnder είναι ακόμα σε θέση να λειτουργήσουν.

1.2. Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανεμογεννήτριες (1890-1930)

Όταν τέθηκαν σε λειτουργία οι πρώτες ηλεκτρικές γεννήτριες δυναμικής και εναλλασσόμενου ρεύματος, χρησιμοποιήθηκαν όλες οι πιθανές πηγές ισχύος για να οδηγηθούν οι γεννήτριες. Οι γεννήτριες λειτουργούσαν από διάδρομους, μηχανήματα ατμού από ξύλο ή άνθρακα, τροχούς νερού, υδραυλικούς στροβίλους και ανεμοστρόβιλους. Σε αυτό το πλαίσιο, ο άνεμος θεωρήθηκε ως μία από τις πολλές δυνατές πηγές για την παραγωγή ενέργειας. Το 1876, για παράδειγμα, η βελτιωμένη γεννήτρια συνεχούς ρεύματος από τον Charles Brush οδηγήθηκε από ένα διάδρομο που λειτουργούσε από άλογα. Με την ανακάλυψη του δυναμό έγινε δυνατή η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας από μακριά προς τους επιχειρηματικούς χρήστες και τα μεμονωμένα νοικοκυριά. Η ηλεκτρική ενέργεια θα μπορούσε απλώς να μεταδοθεί από μια κεντρική γεννήτρια στους χρήστες. Μετά την εισαγωγή του πρώτου κεντρικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής, η ζήτηση πρωτογενούς ενέργειας αυξήθηκε πολύ γρήγορα (Ender, 2011).

Η ανάπτυξη των ανεμόμυλων που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια (στις επονομαζόμενες ανεμογεννήτριες) δεν ήταν ανεξάρτητη αλλά επικαλύφθηκε με τη διαθεσιμότητα των πρώτων ηλεκτροπαραγωγών σταθμών και των πρώτων τοπικών ηλεκτρικών δικτύων. Το πρώτο άτομο που χρησιμοποίησε έναν ανεμόμυλο για την παραγωγή της ενέργειας ήταν ο James Blyth, καθηγητής στο κολέγιο Anderson της Γλασκώβης. Η ανεμογεννήτρια του 1887, ύψους 10 μ., των οποίων τα πτερύγια ήταν

καλυμμένα με πανί πανιών, χρησιμοποιήθηκε για να φορτίσει τις μπαταρίες για να φωτίσει το σπίτι διακοπών του.

Το 1888 ο Charles Brush, ιδιοκτήτης μιας εταιρείας εργαλειομηχανών, έκτισε ανεμογεννήτρια 12 kW με διάμετρο 17 μ. στο σπίτι του στο Κλίβελαντ του Οχάιο. Σε σύγκριση με την ισχύ του, η μονάδα παραγωγής είχε πολύ μεγάλη διάμετρο. Η περιοχή του δρομέα ήταν πλήρως καλυμμένη από 144 μικρότερες λεπίδες στροφείου, πράγμα που σημαίνει ότι η ταχύτητα περιστροφής ήταν αργή. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα μια πολύ υψηλή σχέση μεταφοράς από τον άξονα του ρότορα στη γεννήτρια. Η έξοδος ισχύος ελέγχθηκε αυτόματα από έναν λεγόμενο «εκλειπτικό ελεγκτή». Ο ρότορας περιστράφηκε από τον αυξανόμενο άνεμο έξω από τον άνεμο με μια σημαία ανέμου που τοποθετήθηκε κατακόρυφα στον κύριο τροχό πτερυγίου, ενώ ο κύριος τροχός λεπίδας στερεώθηκε σε μια κεκλιμένη άρθρωση. Μια εικόνα από την Scientific American της 20ης Δεκεμβρίου 1890 δείχνει τα χαρακτηριστικά του.

Οι ανεμογεννήτριες χρησιμοποιήθηκαν επίσης στα πλοία για να παράγουν ενέργεια. Οι μονάδες παραγωγής ανεγέρθηκαν στο κατάστρωμα και λειτουργούσαν δυναμό με μεταδόσεις ιμάντων. Η ισχύς χρησιμοποιήθηκε στη συνέχεια για τη φόρτωση των μπαταριών στο σκάφος. Οι ρότορες είχαν λεπίδες καλυμμένες με ύφασμα πανιών. Δύο παραδείγματα αυτού είναι το Fram, το πλοίο με το οποίο ο Fridtjof Nansen ταξίδεψε στην Ανταρκτική το 1888 και η Chance από τη Νέα Ζηλανδία (Hau, 2000).

1.3. Δυναμό – Η Πρώτη Γεννήτρια Ηλεκτρικού Ρεύματος

Το αρχικό όνομα για τη γεννήτρια συνεχούς ρεύματος ήταν το «δυναμό». Σε αντίθεση με αυτό ήταν η γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος που δημιούργησε εναλλασσόμενο ρεύμα μέσω δακτυλίου ολίσθησης ή μαγνήτη ρότορα. Ο πρώτος λειτουργικός σταθμός ηλεκτροπαραγωγής χτίστηκε στη Νέα Υόρκη το 1880. Αποτελούνταν κυρίως από δυναμό και λειτουργούσαν λαμπτήρες τόξου σε ένα κύκλωμα μήκους 2 μιλίων. Υπήρξε έντονος ανταγωνισμός μεταξύ των υποστηρικτών των συστημάτων συνεχούς ρεύματος υπό την ηγεσία του Αμερικανού εφευρέτη Thomas Alva Edison και των υποστηρικτών των συστημάτων εναλλασσόμενου ρεύματος υπό την ηγεσία του αμερικανικού βιομήχανου George Westinghouse. Το συνεχές ρεύμα είχε το πλεονέκτημα ότι η δυναμική ενέργεια θα μπορούσε να αποθηκευτεί σε ηλεκτροχημικές μπαταρίες. Το μεγάλο πλεονέκτημα του εναλλασσόμενου ρεύματος ήταν ότι η χαμηλή τάση θα μπορούσε εύκολα να

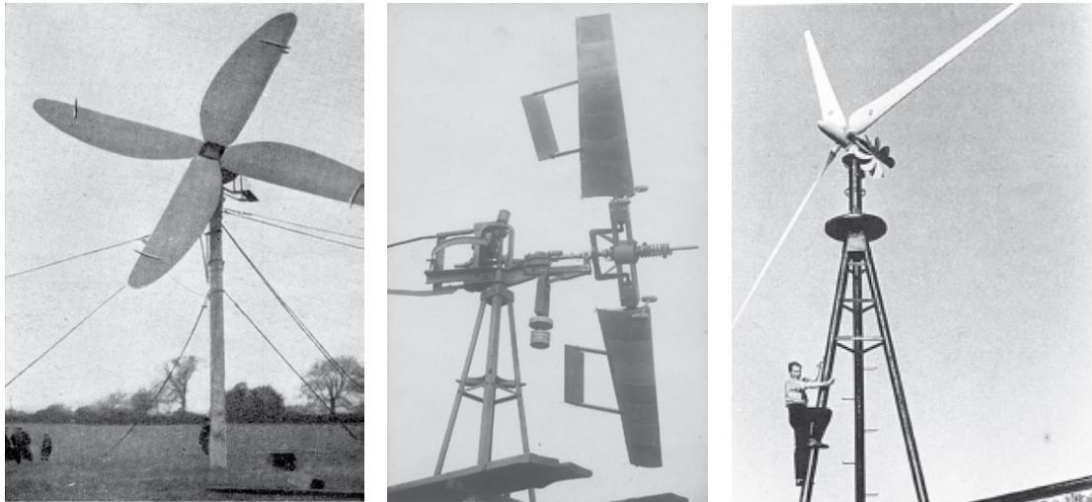
μετατραπεί σε υψηλότερη τάση προκειμένου να μειωθούν οι απώλειες μετάδοσης και στη συνέχεια θα μπορούσε να μετατραπεί σε χαμηλότερη τάση στο τέλος της χρήσης. Τελικά τα συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος κέρδισαν τη μάχη (Beurskens, Hoult, van der Varst & Smulders, 1974).

Μεταξύ των δύο παγκόσμιων πολέμων, έγιναν προσπάθειες στις Κάτω Χώρες για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας των κλασσικών ανεμόμυλων. Στην TU στο Delft, ο πρωτοπόρος ελικοπτερο καθηγητής A.G.. von Baumhauer και ο A. Havinga πραγματοποίησαν μετρήσεις σε ρόδες τεσσάρων λεπίδων των κλασσικών ανεμόμυλων (Cosslett, 1948). Η πέτρα του κλασσικού ανεμόμυλου, που προοριζόταν να στηρίζει τους βελτιωμένους δρομείς, δεν θα αντιδρούσε στις αξονικές δυνάμεις, καθώς αυτές αυξήθηκαν επίσης με τις υψηλότερες αποδόσεις των ρότορων. Στη δεκαετία του '50 και στη δεκαετία του '60 πραγματοποιήθηκαν περαιτέρω πειράματα, τα οποία απέτυχαν εξαιτίας της έλλειψης διαρθρωτικής ακεραιότητας ή για λόγους οικονομίας (Prinsenmolen, de Traanroeier, Oudeschild, Texel).

Το 1920 στη Γερμανία, ο αρχηγός του Αεροδυναμικού Πειραματικού Ινστιτούτου του Gottingen, Albert Betz, δημοσίευσε μια μαθηματική ανάλυση της θεωρητικής μέγιστης τιμής του συντελεστή απόδοσης μιας ανεμογεννήτριας με τον Zhukowsky, αλλά μετά το Lanchester (1915) ο συντελεστής Lanchester-Betz και είναι $16/27 = 59,3\%$. Βασίζεται στο μοντέλο αξονικής ροής. Επιπλέον, η Betz περιγράφει επίσης ανεμογεννήτριες με βελτιωμένες αεροδυναμικές λεπίδες (Hau, 2000). Το Σχήμα 3 παρουσιάζει μια ανεμογεννήτρια ταχείας περιστροφής τεσσάρων λεπίδων από την εταιρεία Aerodynamo στο Βερολίνο.

Η μονάδα παραγωγής είχε πτέρυγα φρένων στις πλευρές χαμηλής πίεσης των λεπίδων. Αμέσως μετά τον Πρώτο Παγκόσμιο Πόλεμο, ο Kurt Bilau ήθελε να βελτιώσει την απόδοση του Ventimotor τεσσάρων λεπίδων του, δίνοντας στο αεροδυναμικό προφίλ των λεπίδων μια εξορθολογισμένη μορφή. Ισχυρίστηκε ακόμη ότι είχε φτάσει σε υψηλότερη απόδοση από ότι η Betz. Εκτός αυτού, ο Bilau ανέστησε δοκιμαστικά μονάδες παραγωγής στην Ανατολική Πρωσία και στη νότια Αγγλία. Μετά τον Πρώτο Παγκόσμιο Πόλεμο, η διαθεσιμότητα των ορυκτών καυσίμων αυξήθηκε σημαντικά, γεγονός που σήμανε ότι το ενδιαφέρον για την αιολική ενέργεια μειώθηκε. Στον δυτικό βιομηχανικό κόσμο, η περαιτέρω ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας πραγματοποιήθηκε με πολύ χαμηλό ρυθμό μέχρι τον Δεύτερο

Παγκόσμιο Πόλεμο. Ωστόσο, αυτό δεν συνέβη στη Σοβιετική Ένωση, επειδή το καθεστώς του Στάλιν θέσπισε ένα μεγάλο πρόγραμμα ηλεκτροκίνησης απομακρυσμένων περιοχών. Οι λίγες πληροφορίες από εκείνες τις εποχές δείχνουν ότι οι σοβιετικοί μηχανικοί χρησιμοποίησαν τις τελευταίες εξελίξεις της αεροδυναμικής. Ένα παράδειγμα αυτού φαίνεται στην Εικόνα 3.



Εικόνα 3: Αριστερά ένας γωνιακός ανεμοστρόβιλος ταχείας περιστροφής (UNESCO, 1954). Στο κέντρο, τουρμπίνα ZAGI με τα βοηθητικά πετερόγια του Sabinin, με πλήρη έλεγχο της γωνίας ρύθμισης της λεπίδας. Δεξιά, ανεμογεννήτρια Allgaiier WE 10 (Meadows et al., 1972)

Οι λεπίδες του ρότορα, που αναπτύσσονται από το Κεντρικό Αεροϋδροδυναμικό Ινστιτούτο (ZAGI), μπορούν να ρυθμιστούν μέσω μιας μικρής βοηθητικής λεπίδας στο πίσω άκρο της κύριας λεπίδας. Το 1931 κατασκευάστηκε μια πειραματική ανεμογεννήτρια κοντά στην Σεβαστούπολη της Κριμαίας, η οποία λειτούργησε παράλληλα με έναν ηλεκτροπαραγωγό σταθμό ισχύος 20 MW με τύρφη. Η μονάδα WIME D-30 είχε διάμετρο ρότορα 30 m και ονομαστική απόδοση 100 kW. Έμεινε σε λειτουργία μέχρι το 1942.

1.4. Πρώτη Φάση Καινοτομίας (1930-1960)

Διάφορες χώρες επανέλαβαν την ανάπτυξη ανεμογεννητριών κατά τη διάρκεια και αμέσως μετά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο. Ο λόγος για αυτό ήταν ότι οι στρατηγικοί πόροι, όπως τα ορυκτά καύσιμα, έγιναν λιγότες. Σε αυτή την περίοδο εισήχθησαν πολλές καινοτομίες, οι οποίες πιθανώς επέτρεψαν την ευρεία εισαγωγή των ανεμογεννητριών για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας παράλληλα με το ηλεκτρικό δίκτυο. Αυτές οι καινοτομίες, κυρίως στη δομή του ρότορα, βασίζονταν στις καινοτομίες της προηγούμενης εποχής.

Οι σημαντικότερες εξελίξεις σημειώθηκαν στη Δανία, τις ΗΠΑ και τη Γερμανία. Κατά τη διάρκεια του Δευτέρου Παγκοσμίου Πολέμου η εταιρεία Smidth στην Κοπεγχάγη ανέπτυξε ανεμογεννήτριες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Δεδομένου ότι η Δανία δεν διαθέτει τα δικά της ορυκτά καύσιμα, η αιολική ενέργεια ήταν ένας από τους λίγους τρόπους παραγωγής ενέργειας. Οι μονάδες παραγωγής Smidth διαθέτουν ρότορες δύο λεπίδων. οι λεπίδες είχαν σταθερή γωνία προσβολής, δεν ρυθμίζονταν και ελέγχονταν. Με αυτές τις λεπίδες στροφείου ο συντελεστής απόδοσης ήταν συγκριτικά χαμηλός αλλά η καμπύλη απόδοσης ήταν σχετικά ευρεία. Αυτό σήμαινε ότι η αποδοτικότητα του συνολικού συστήματος, όταν διαδόθηκε σε ένα ευρύ φάσμα ταχύτητας ανέμου, ήταν σχετικά υψηλή. Οι αεροκινητήρες Smidth είχαν διάμετρο στρόφου 17,5 m (η ονομαστική ισχύς ήταν 50 kW) και ανεγέρθηκαν είτε σε χαλύβδινα πλέγματα είτε σε πύργους από σκυρόδεμα. Μετά από προβλήματα με τις δυναμικές ιδιότητες των δύο δρομολογητών, η Smidth εισήγαγε μια μεγαλύτερη μονάδα παραγωγής με διάμετρο ρότορα 24 μ. (Ονομαστική ισχύς 70 kW). Συνολικά έχουν κατασκευαστεί επτά από αυτές τις μονάδες παραγωγής. Με μία και μόνη εξαίρεση, όλα ήταν εξοπλισμένα με γεννήτριες συνεχούς ρεύματος. Αυτό το είδος μονάδων παραγωγής έγινε το υπόδειγμα για την ανάπτυξη της σύγχρονης αιολικής ενέργειας μετά την πρώτη ενεργειακή κρίση το 1973 (Beurskens, Hoult, van der Varst & Smulders, 1974). Ήταν ο J. Juul που χρησιμοποίησε την έννοια των τριών λεπίδων του Smidth γύρω στο 1957 για να κατασκευάσει μια έκδοση 200 kW σε Gedser με διάμετρο 24 μ. Το μηχάνημα είχε ασύγχρονη γεννήτρια και συνδέθηκε απευθείας με το δίκτυο. Είχε τρία πτερύγια ρότορα, ήταν σταθεροποιημένα και κατείχε κινητά άκρα πτερυγίων προκειμένου να αποφευχθεί η ανατροπή όταν χάθηκε το φορτίο. Ο ανεμογεννήτρια Gedser έγινε η αρχέτυπη «δανική ανεμογεννήτρια» μιας γενιάς πολύ επιτυχημένων ανεμογεννητριών μετά την ενεργειακή κρίση του 1973 (Ender, 2011).

Από το τέλος του πολέμου μέχρι την επανάληψη της έρευνας και ανάπτυξης της αιολικής ενέργειας κατά την πετρελαϊκή κρίση το 1973 και μετά, ο καθηγητής Ulrich Hötter ήταν ηγέτης στη Γερμανία και ηγήθηκε μιας δοκιμαστικής εξέδρας της Ventimotor GmbH στο Webicht της Βαϊμάρης . Εκεί έλαβε πολύ πρακτική εμπειρία στο σχεδιασμό μικρότερων ανεμογεννητριών. Ο Hötter έλαβε το πτυχίο του το

Δεκέμβριο του 1942 στο Πανεπιστήμιο της Βιέννης με τη διατριβή του για την Windkraft – werke (Contribution to the creation of design basics for wind turbines). Κατά τη διάρκεια της σταδιοδρομίας του εργάστηκε εναλλάξ στην τεχνολογία των αερομεταφορών και στην τεχνολογία αιολικής ενέργειας. Η πρώτη ανεμογεννήτρια που θα κατασκευαστεί μετά το τέλος του πολέμου ήταν από τον Hötter το 1947 (Notebaart, 1972).

Το 1948 ο Erwin Allgaier ήθελε να κατασκευάσει την ανεμογεννήτρια σε σειρά (τρεις λεπίδες ρότορα, διάμετρος ρότορα 8 m, ονομαστική απόδοση 13 kW). Ελαφρώς μεγαλύτερες μονάδες παραγωγής (διάμετρος ρότορα 11,28 m, ονομαστική απόδοση 7,2 kW) εξήχθησαν στη Νότιο Αφρική, την Αιθιοπία και την Αργεντινή. Λόγω μιας σχετικά μεγάλης αναλογίας ταχύτητας κορυφής 8, οι ανεμογεννήτριες ήταν πολύ ελαφρές. Επίσης, η εξοπλισμένη χωρητικότητα ανά μονάδα καλυμμένης επιφάνειας του ρότορα ήταν πολύ μικρή, ώστε η ανεμογεννήτρια να ήταν κατάλληλη για χαμηλές αιολικές συνθήκες και ταυτόχρονα να παραδίδει σχετικά υψηλές ώρες πλήρους φορτίου (συντελεστής χωρητικότητας) (Σχήμα 3).

Για να παρέχουν ενέργεια σε απομακρυσμένες περιοχές, οι αδελφοί Marcellus και Joseph Jacobs άρχισαν να αναπτύσσουν ανεμογεννήτριες για φόρτωση μπαταριών στις ΗΠΑ στις αρχές της δεκαετίας του 1920. Μετά από πειράματα με μονάδες παραγωγής δύο λεπίδων, εισήγαγαν μία ανεμογεννήτρια τριών λεπίδων με διάμετρο ρότορα 4 μ και μια γεννήτρια συνεχούς ρεύματος με άμεση ροή. Πολλές χιλιάδες από αυτές τις μονάδες παραγωγής πωλήθηκαν μεταξύ των αρχών της δεκαετίας του 1920 και των πρώτων ετών μετά την πετρελαϊκή κρίση του 1973.

Με την επέκταση του αγροτικού δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, η παροχή ενέργειας σε αγροτικές περιοχές δεν παρουσίαζε πλέον μεγάλο πρόβλημα και η ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας στράφηκε προς μεγάλες εγκαταστάσεις για τη λειτουργία του δικτύου. Κατά τη διάρκεια του Δευτέρου Παγκοσμίου Πολέμου, οι ανεμογεννήτριες φάνηκαν να είναι μια πιθανή στρατηγική τεχνολογία για την αξιοποίηση πηγών ενέργειας που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε περιόδους κρίσης (Cosslett, 1948).

Η πρώτη μονάδα παραγωγής MW που κατασκευάστηκε ποτέ ήταν η ανεμογεννήτρια Smith-Putnam που σχεδιάστηκε από τον Palmer C. Putnam και κατασκευάστηκε από την S. Morgan Smith Company (York, Πενσυλβανία) που ανεγέρθηκε στο Grandpa's Knob, ύψους 610 μ. κοντά στο Rutland, Vermont. Αυτή η μονάδα παραγωγής

αποτελείται από έναν κινητήρα με διάμετρο στροφέα 53,3 m. Ήταν εξοπλισμένο με ατομικά ρυθμιζόμενα περύγια ρότορα και η ονομαστική ισχύς της σύγχρονης γεννήτριας ήταν 1,25 MW.

Η ισχύς εξόδου ελέγχθηκε μέσω υδραυλικά προσαρμοσμένων γωνιών λεπίδας. Ο ρότορας δεν είχε περιστροφή λεπίδας και σταθερό πλάτος λεπίδας. Η μονάδα παραγωγής λειτουργούσε από το 1941 έως το 1945 και κατά τη διάρκεια των 1000 ωρών λειτουργίας του τροφοδοτούσε την ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο της δημόσιας υπηρεσίας δημόσιας υπηρεσίας του Βερμόντ. Αφού η μονάδα έχασε μια λεπίδα στροφέου στις 26 Μαρτίου 1945, αφαιρέθηκε από την υπηρεσία επειδή δεν ήταν διαθέσιμα τα οικονομικά μέσα για την επισκευή του ρότορα. Χρειάστηκε η πετρελαϊκή κρίση για την εμπειρία του Putnam να πραγματοποιήσει μια ολόκληρη σειρά μεγάλων ανεμογεννητριών που θα χρησιμοποιηθούν στις ΗΠΑ. Μεταξύ των λόγων για την ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας μετά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο ήταν (Ender, 2011):

- Η ταχέως αυξανόμενη ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια, ενώ οι περισσότερες κοινότητες δεν διέθεταν τοπικές πηγές ενέργειας.
- Οι πηγές ενέργειας κοντά στους χρήστες είχαν ήδη εξαντληθεί. και
- Η φτώχεια μετά τον πόλεμο και οι πολιτικές συνθήκες οδήγησαν στην αναζήτηση τοπικών πηγών ενέργειας, αντί να στηρίζονται σε εισαγόμενα καύσιμα.

Οι γνώσεις της αεροδυναμικής και των υλικών που κατέστησαν διαθέσιμες από τους μηχανικούς που κατέλαβαν κατά τη διάρκεια του πολέμου στη στρατιωτική βιομηχανία και τώρα δραστηριοποιούνται στον πολιτικό κλάδο, διευκόλυναν τις συνθήκες για τη συνέχιση της ανάπτυξης των ανεμογεννητριών. Λόγω των νέων τεχνολογιών, ανοίχθηκε η δυνατότητα οικοδόμησης ακόμη πιο επιτυχημένων μονάδων παραγωγής από εκείνη του Grandpa's Knob.

Από τη σημερινή οπτική, είναι εκπληκτικό το πόσες σύγχρονες ανακαλύψεις έγιναν και δοκιμάστηκαν στην περίοδο 1930-1960. Οι εξελίξεις βασίστηκαν λιγότερο στις αναλυτικές μεθόδους παρά στα πειράματα. Όλα τα πειράματα δεν ήταν επιτυχημένα και έγιναν πολλά τεχνικά λάθη. Δεν υπήρχαν διαθέσιμα οικονομικά μέσα για επισκευές ή συνέχιση της τεχνολογίας αιολικής ενέργειας. Τα περισσότερα από τα πιλοτικά έργα που πραγματοποιήθηκαν στη Γαλλία, το Ηνωμένο Βασίλειο, τη

Γερμανία, τις ΗΠΑ και τη Δανία σταμάτησαν και ο εξοπλισμός καταστράφηκε, με εξαίρεση την ανεμογεννήτρια στο Gedser της Δανίας. Η ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας σταμάτησε τελείως λόγω της έλλειψης οικονομικών μέσων. Ένας λόγος ήταν το γεγονός ότι τα ορυκτά καύσιμα έγιναν ιδιαίτερα φτηνά και η πυρηνική ενέργεια πιο δημοφιλής. Αυτό το αισιόδοξο σενάριο έσπευσε ξαφνικά να σταματήσει με τη δημοσίευση της μελέτης "Τα όρια στην ανάπτυξη" και το ξέσπασμα της πετρελαϊκής κρίσης το 1973 (Hau, 2000).

1.5. Δεύτερη Φάση Καινοτομίας και Μαζικής Παραγωγής (1960 έως σήμερα)

Σχεδόν όλες οι σημαντικές τεχνολογικές εξελίξεις στην αιολική ενέργεια τερματίστηκαν στα μέσα της δεκαετίας του 1960. Τα ορυκτά καύσιμα ήταν ελεύθερα διαθέσιμα και πολύ φτηνά, και η πυρηνική ενέργεια θεωρήθηκε ως η λύση σε όλα τα μελλοντικά ενεργειακά προβλήματα. Παρόλο που στους κύκλους των υπευθύνων για τη λήψη αποφάσεων υπήρξε ελάχιστη συζήτηση για την ασφάλεια του εφοδιασμού ή για θέματα περιβάλλοντος και ασφάλειας, η κοινωνία είχε αμφιβολίες σχετικά με την απεριόριστη ανάπτυξη της οικονομίας και τις επιρροές της στους μόνιμα διαθέσιμους πόρους. Η δημοσίευση της μελέτης «Τα όρια στην ανάπτυξη 1971/1972 που ανατέθηκε από τη λέσχη της Ρώμης» οι συζητήσεις που προέκυψαν από την κρίση πετρελαίου το 1973 ως αποτέλεσμα μιας περαιτέρω σύγκρουσης στη Μέση Ανατολή, μελλοντικά προβλήματα σε τρέχοντα και σημερινά προβλήματα (Beurskens et al., 1974) και οι πολιτικές αντιδράσεις στην κρίση οδήγησαν σε μια νέα ενεργειακή πολιτική που βασίστηκε στα ακόλουθα βασικά προβλήματα:

- Η εξάρτηση από τα ενεργειακά μονοπώλια (πετρέλαιο) έπρεπε να περιοριστεί με τη διαφοροποίηση των επιλογών ενεργειακού εφοδιασμού, μεταξύ άλλων με τη χρήση τοπικών πηγών ενέργειας με ταυτόχρονη αύξηση της ενεργειακής απόδοσης.
- Οι ορυκτές πηγές ενέργειας πρέπει να προορίζονται για την κατασκευή υλικών και δεν πρέπει να καίγονται για την παραγωγή ενέργειας πιο γρήγορα από ό, τι θα μπορούσαν να αναγεννηθούν. Περίπου μια δεκαετία αργότερα, οι περιβαλλοντικές ανησυχίες (ορυκτά καύσιμα, πυρηνικά απόβλητα) και τα ζητήματα ασφάλειας (πυρηνική ενέργεια στο Three Mile Island, Τσερνομπίλ) εισήλθαν δυνατά στην πολιτική συζήτηση.

Στο πλαίσιο της νέας ενεργειακής πολιτικής, πολλές χώρες στράφηκαν αμέσως στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Αυτό περιλάμβανε την ηλιακή ενέργεια και άλλες πηγές ενέργειας όπως η αιολική ενέργεια, η βιομάζα και η παραγωγή ενέργειας από τη θερμότητα του ωκεανού. Διεξήχθησαν επίσης έρευνες στον τομέα άλλων πηγών όπως η γεωθερμική και η παλιρροιακή ενέργεια. Τα πρώτα ερευνητικά προγράμματα σε εθνικό επίπεδο θεσπίστηκαν το 1973 και η αιολική ενέργεια διαδραμάτισε σημαντικό ρόλο σε πολλά από αυτά. Υπήρχαν πολλές ομοιότητες στα προγράμματα: διαθεσιμότητα πόρων, επιλογή τοποθεσιών, τεχνολογικές επιλογές, απαιτήσεις για έρευνα και ανάπτυξη, δυνητικές επιδράσεις στα εθνικά ενεργειακά ισοζύγια, (μακροοικονομικές) οικονομικές και κοινωνικές επιρροές και στρατηγικές εφαρμογής. Ωστόσο, οι συγκεκριμένες προσεγγίσεις και σχέδια διέφεραν σημαντικά από χώρα σε χώρα. Κοιτάζοντας πίσω, μπορούμε να πούμε ότι τα πιο επιτυχημένα έργα πραγματοποιήθηκαν όπου ο χρόνος και το χρήμα παρείχαν ισορροπία μεταξύ των τεχνολογικών εξελίξεων, της ανάπτυξης της αγοράς (τόσο από πλευράς ζήτησης όσο και από πλευράς προσφοράς) και της πολιτικής στήριξης (κονδύλια έρευνας, νόμοι και έργα υποδομής). Ωστόσο, αυτό δεν ήταν προβλέψιμο στα μέσα της δεκαετίας του '70 (Stokhuyzen, 1972).

Ορισμένες χώρες άρχισαν να αναπτύσσουν ανεμογεννήτριες από βασικά στοιχεία και πραγματοποίησαν κάθε είδους αναλύσεις χωρίς να λάβουν υπόψη την αγορά ή την υποδομή. Παραδείγματα αυτού έγιναν στο Ηνωμένο Βασίλειο, τις Κάτω Χώρες, τη Γερμανία, τη Σουηδία, τις ΗΠΑ και τον Καναδά. Χωρίς εξαίρεση, όλοι προτιμούσαν τις μεγάλες ανεμογεννήτριες ως βάση για μακροπρόθεσμα ενεργειακά σενάρια. Λόγω των εμπειριών του παρελθόντος, ωστόσο, αυτό δεν ήταν ιδιαίτερα περίεργο. Παρόλο που δεν ήταν όλες επιτυχείς, τα πειράματα και οι αναλύσεις των Hötter, Kleinhenz, Palmer Cosslett Putnam, Juul, Vadot, Honnef, Golding και άλλων έτειναν προς την ίδια κατεύθυνση: η εισαγωγή αιολικής ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα θα ήταν μόνο οικονομικά πραγματοποιήσιμη όταν χρησιμοποιούνταν πολύ μεγάλες ανεμογεννήτριες χωρητικότητας αρκετών MW.

Η κατασκευή τέτοιων μεγάλων μονάδων θεωρήθηκε όχι μόνο ως τεχνικά εφικτή αλλά και οικονομική. Αυτό γίνεται σαφές από τα πρακτικά του Αμερικανικού Κογκρέσου από το έτος 1971 που αναφέρονται σε αντίστοιχη μελέτη. Η αιολική ενέργεια θεωρείται αξιόπιστη πηγή ενέργειας, είναι ανεξάντλητη και δεν έχει καμία αρνητική επίδραση στο περιβάλλον, καθώς δεν παράγει επιβλαβή και ανεπιθύμητα

παραπροϊόντα. Εξαιτίας αυτού, οι ανεμογεννήτριες πολλών MW έγιναν η τεχνική βάση όλων των εξελίξεων που υποστηρίζονται από το κράτος. Η μόνη χώρα που δεν ακολούθησε αυτή τη γενική τάση εστίασης στις μεγάλες ανεμογεννήτριες ήταν η Δανία. Εκεί αποφεύχθηκαν τα ριψοκίνδυνα τεχνικά πειράματα από την αρχή, η τόνωση της εισαγωγής στην αγορά και η πολιτική υποστήριξε την εισαγωγή θεσμικών πλαισίων (Notebaart, 1972). Ανεξάρτητα από τα παράλληλα προγράμματα που υποστηρίχθηκαν από το κράτος, πρωτοποριακές εταιρείες άρχισαν με την ανάπτυξη και την πώληση μικρών ανεμογεννητριών για παροχή νερού, για φόρτωση μπαταριών και για σύνδεση με το δίκτυο. Πολλές από αυτές τις εταιρείες ήταν εμπνευσμένες από το όραμα «Small is Beautiful» της E.F. Schumacher το 1973. Στις αρχές της δεκαετίας του 1980 περίπου 30 εταιρείες δραστηριοποιούνταν στην αγορά της Δανίας και περίπου 20 στις Κάτω Χώρες. Μια ειδική περίπτωση είναι η ανεμογεννήτρια Tvind στο Ulfborg της Δανίας. Από το 1975 έως το 1978, καθηγητές και φοιτητές του διεθνούς σχολικού κέντρου Tvind έχτισαν μια ανεμογεννήτρια με διάμετρο ισχύος 2 MW και 54 m με τρία χειροκίνητα αγωνιστικά πτερύγια. Η κατασκευή των λεπίδων και των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν ήταν η τάση για τη σύγχρονη τεχνολογία κατασκευής.

Επίσης, συμμετείχαν μη κυβερνητικές οργανώσεις (ΜΚΟ) με σκοπό τη χρήση αιολικής ενέργειας για την παροχή νερού σε νοικοκυριά, για αρδευτικά πεδία και για πότισμα αγροτικών ζώων στις αναπτυσσόμενες χώρες. Η αξιοποίηση των δικών τους πηγών ενέργειας για την κάλυψη των βασικών αιτημάτων ήταν σημαντική για την περαιτέρω ανάπτυξή τους και δεν απαιτούσε σχεδόν καθόλου εξωτερικό κεφάλαιο. Αυτές οι οργανώσεις είχαν συχνά σύνδεση με πανεπιστήμια. Παραδείγματα αυτού του είδους είναι το SWD / CWD στις Κάτω Χώρες, το ITDG στο Ηνωμένο Βασίλειο, το ινστιτούτο BRACE στον Καναδά, το Folkcenter στη Δανία, το IPAT στο Βερολίνο, καθώς και αρκετές ενώσεις σε διάφορες χώρες καθώς και στις ΗΠΑ, που συνδέονται με τα πανεπιστήμια.

1.6. Ανάπτυξη Μεγάλων Ανεμογεννητριών

Τα πρώτα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στη Δανία και αποτέλεσαν ένα συνεργατικό σχέδιο μεταξύ της Δανίας και των ΗΠΑ. Όπως ήδη αναφέρθηκε, παρόλο που η ανεμογεννήτρια του Gedser είχε τεθεί εκτός λειτουργίας το 1966, δεν είχε διαλυθεί. Το πρώτο βήμα για την αναζωογόνηση της ανάπτυξης της αιολικής ενέργειας ήταν η επανεκκίνηση της ανεμογεννήτριας στο Gedser το 1977. Τα

αποτελέσματα των αμοιβαίων δανο – αμερικανικών μετρήσεων και δοκιμών χρησίμευσαν ως σημείο εκκίνησης τόσο για την ανάπτυξη του ερευνητικού προγράμματος αιολικής ενέργειας της NASA, όσο και για τις δανικές ερευνητικές και οικονομικές δραστηριότητες. Οι αρχές σχεδιασμού του Ulrich Hotter ήταν επίσης ένα σημαντικό στοιχείο του αμερικανικού προγράμματος έρευνας και ανάπτυξης. Εκτός από τη Δανία και τις ΗΠΑ, τα σημαντικά ερευνητικά και αναπτυξιακά προγράμματα τέθηκαν σε εφαρμογή στα τέλη της δεκαετίας του 1970 στις Κάτω Χώρες, τη Γερμανία, τη Σουηδία, το Ηνωμένο Βασίλειο, τον Καναδά και αργότερα στην Ιταλία καθώς και στην Ισπανία. Μικρότερα προγράμματα, ή μάλλον έργα, υπήρχαν επίσης στην Αυστρία, την Ιρλανδία, την Ιαπωνία, τη Νέα Ζηλανδία και τη Νορβηγία. Η πρώτη ομάδα χωρών υιοθέτησε την ανάπτυξη μεγάλων ανεμογεννητριών (Ender, 2011).

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM), ακόμη και αν δεν έχει αναπτυχθεί όσο σήμερα, χρησιμοποιήθηκε για τη βελτίωση του σχεδιασμού των ευαίσθητων στοιχείων της ανεμογεννήτριας, ειδικά της δομής της πλήμνης. Τα βασικά στοιχεία των ολοκληρωμένων μεθόδων σχεδιασμού ήταν πολύ ελλιπή. Στην αεροδυναμική υπήρχαν στην καλύτερη περίπτωση μόνο ασαφείς προσομοιώσεις διαχωρισμού ροής, τρισδιάστατα αποτελέσματα, αεροελαστική μοντελοποίηση κ.ο.κ. Το ίδιο ισχύει για την περιγραφή του ανέμου στο επίπεδο του ρότορα, τις επιδράσεις της αναταραχής στην απόδοση και τη μηχανική φόρτιση, καθώς και τη μοντελοποίηση των ουρών ροής. Περιλαμβάνονται οι έννοιες των ανεμογεννητριών, μεταξύ άλλων:

- Περιστροφείς με 1 έως 3 πτερύγια στροφέων για ανεμογεννήτριες με οριζόντιους άξονες και δύο ή τρεις λεπίδες ρότορα για μονάδες παραγωγής με κατακόρυφους άξονες.
- Άκαμπτοι κόμβοι, πλήμνες και κινητοί κόμβοι.
- Άκαμπτα πτερύγια ρότορα, έλεγχο στάσης και πλήρη ή μερική ρύθμιση της γωνίας ρύθμισης της λεπίδας.
- (Σχεδόν) σταθερά και μεταβλητά συστήματα μετάδοσης περιστροφής.

Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε μια θεαματική σειρά τεχνικών εγκατάστασης. Οι μέθοδοι κυμαίνονταν από τη συμβατική εγκατάσταση με τη βοήθεια ενός γερανού, στη χρήση του πύργου της εγκατάστασης ως ανυψωτικής διάταξης για πλατφόρμες

που χρησιμοποιήθηκαν για την τοποθέτηση του περιβλήματος του κινητήρα και των λεπίδων ρότορα (Hau, 2000).

Μετά από μια μικρή αρχή όσον αφορά τα οικονομικά μέσα, το 1988 το ευρωπαϊκό πρόγραμμα άρχισε να ενισχύει την υποστήριξη για την ανάπτυξη μεγάλων ανεμογεννητριών. Αυτές οι αλλαγές στην πολιτική προηγήθηκαν εξαντλητικών συζητήσεων με επιστήμονες και εκπροσώπους της βιομηχανίας σχετικά με τις βέλτιστες βιομηχανικές στρατηγικές και τις δυνατότητες της αγοράς. Τα αποτελέσματα αυτών των συνομιλιών ήταν ότι οι κατασκευαστές, οι οποίοι δραστηριοποιούντο νωρίτερα στην παραγωγή μικρότερων μονάδων παραγωγής και οι οποίοι είχαν σοβαρό συμφέρον να εμπορευθούν μεγάλες ανεμογεννήτριες, αντέδρασαν στην πρωτοβουλία της Ευρωπαϊκής Επιτροπής και έκλεισαν συμβάσεις για την ανάπτυξη και κατασκευή των πρώτων εμπορικών πρωτότυπων MW ανεμογεννητριών.

Η συμμετοχή των εμπορικών εταιρειών σε αυτό το πρόγραμμα άλλαξε μόνιμα τη βιομηχανία. Το πρόγραμμα δοκιμών και αξιολόγησης, που χρηματοδοτήθηκε από μεμονωμένες κυβερνήσεις και υλοποιήθηκε από μεγάλες κατασκευαστικές και αεροπορικές ανησυχίες, τελείωσε. Το φυσικό τέλος για μερικές ανεμογεννήτριες ήταν αρκετά θεαματικό: το MOD 2, ο GROWIAN και ο Aelous II ήταν αποδυναμωμένοι. Η φιλοσοφία σχεδίασης των εμπορικών πρωτοτύπων βασίστηκε στη σταδιακή διεύρυνση των μικρότερων εγκαταστάσεων και αναπτύχθηκε και εμπορεύτηκε από μερικές από τις πρωτοπόρες εταιρείες που επιβίωσαν από μια σοβαρή κρίση στη δεκαετία του 1980. Οι πιο επιτυχημένες ανεμογεννήτριες στην αρχή δεν ήταν τα πιο εξελιγμένα μοντέλα ταχείας κυκλοφορίας, αλλά μάλλον εκείνα που είχαν πολλά χαρακτηριστικά της γνωστής «δανικής αντίληψης».

Τα προγράμματα WEGA και THERMIE εισήγαγαν τη σταθερή επέκταση των ανεμογεννητριών. Τυπική για αυτή την φάση ανάπτυξης ήταν η συνεχής επέκταση των μικρότερων, εμπορικά επιτυχημένων ανεμογεννητριών. Πολλοί από τους προχωρημένους τεχνικούς σχεδιασμούς, όπως οι πλήμνες τροφοδοσίας, οι κινητήριοι τροχοί και οι ταχύτατα μετακινούμενοι δρομείς με μία ή δύο λεπίδες στροφέα, εγκαταλείφθηκαν από τη βιομηχανία. Τα πρώτα τους πρωτότυπα ήταν αρκετά συντηρητικά, καθώς οι πελάτες αφορούσαν κυρίως την αξιοπιστία και όχι τόσο τα προηγμένα συστήματα με δυνατότητες μελλοντικής εξοικονόμησης κόστους. Οι

καινοτομίες που αναπτύχθηκαν αργότερα διαφοροποιήθηκαν από την πρώτη γενιά των μονάδων παραγωγής. Η μεγαλύτερη περαιτέρω εξέλιξη ήταν ο ηλεκτρονικός μετατροπέας απόδοσης, καθώς έδινε πολύ βελτιωμένο έλεγχο των στροβίλων. Με αυτά τα συστήματα μετατροπής, μαζί με τον έλεγχο της γωνίας ρύθμισης των λεπίδων και των προηγμένων στρατηγικών ελέγχου πολλαπλών παραμέτρων, οι σύγχρονες εγκαταστάσεις ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις του ηλεκτρικού δικτύου. Οι κρίσιμες διαδικασίες ανάπτυξης και σχεδιασμού και η χρήση νέων υλικών οδήγησαν σε μείωση του βάρους και συνεπώς στη μείωση του κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Με τη διεύρυνση των ανεμογεννητριών, σημειώθηκε επίσης τεράστια αύξηση στον όγκο της αγοράς της ανεμογεννήτριας. Η διάρκεια ζωής ενός συγκεκριμένου τύπου ανεμογεννήτριας, όταν βασίζεται στην ικανότητα του στροβίλου, είναι συνήθως έξι χρόνια και έχει επεκταθεί με την αύξηση του μεγέθους του στροβίλου από το 2002. Οι τεχνικές γνώσεις αυξήθηκαν ιδιαίτερα στους τομείς της αεροδυναμικής, της μοντελοποίησης των βρόχων ροής σε αιολικά πάρκα, της αεροελαστικότητας, της μοντελοποίησης πεπερασμένων στοιχείων, της δυναμικής των κατασκευών, των τεχνικών μέτρησης, της μοντελοποίησης συστημάτων και των τεχνικών ελέγχου (Beurskens et al., 1974).

Τα καθαρά αναλυτικά αποτελέσματα έπρεπε να πιστοποιηθούν πέραν των εργαστηριακών εγκαταστάσεων. Κατασκευάστηκαν επίσης πειραματικές ανεμογεννήτριες σε υπαίθριους χώρους. Οι εργαστηριακές εγκαταστάσεις αποτελούσαν κυρίως δοκιμαστικά τεμάχια για πτερύγια ρότορα, πειραματικές βάσεις για υλικά, καθώς και δοκιμαστικές εγκαταστάσεις για αμαξοστοιχίες και αεροδυναμικές σήραγγες. Οι περισσότερες από αυτές τις ερευνητικές ρυθμίσεις προέρχονταν από εθνικές πρωτοβουλίες και τα ευρωπαϊκά προγράμματα έλαβαν μερικές φορές υποστήριξη από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή. Οι σημαντικότερες πιλοτικές μονάδες για ανεμογεννήτριες στον ύπαιθρο ήταν:

- MOD-0 (διάμετρος 38 μ., Ρότορα ενός και δύο λεπίδων, ΗΠΑ): ρυθμιζόμενη ακαμψία της κατασκευής φορέα, Uniwecs (διάμετρος 16 m, ρότορας δύο σφαιρών, idler, Γερμανία) (μεμονωμένα περιστρεφόμενα πτερύγια ρότορα, πλήμνη ανατροπής, σταθερή πλήμνη) και παραμέτρων απόσβεσης και ακαμψίας.

- 25 m HAT (διάμετρος 25 m, ρότορας δύο λεπίδων, ανεμοστρόβιλος, Ολλανδία) Οι ιδιότητες του φορτίου της γεννήτριας είναι πλήρως ρυθμιζόμενες κατά το ότι χρησιμοποιούνται γεννήτρια συνεχούς ρεύματος και μετατροπέας DC-AC.
- Τουρμπίνες NREL, φάσης II, III, IV (Boulder, ΗΠΑ).
- Risψ, TELLUS Turbine (Δανία).
- Εγκατάσταση υπαίθριων εγκαταστάσεων TUD (διάμετρος 10 m, ρότορας δύο λεπίδων, ανεμοστρόβιλος, Ολλανδία). Η πλήρως εξοπλισμένη λεπίδα ρότορα για τη μέτρηση της κατανομής πίεσης ήταν επίσης ικανή να δοκιμαστεί σε αεροδυναμική σήραγγα προκειμένου να επιτρέψει τη σύγκριση με ακριβείς συνθήκες ροής σε αεροδυναμική σήραγγα.
- Πανεπιστήμιο Mie (Ιαπωνία).
- Το Imperial College και το εργαστήριο Rutherford-Appleton (RAL) (Ηνωμένο Βασίλειο)

1.7. Ανάπτυξη Μικρότερων Ανεμογεννητριών

Για να γίνει κατανοητή πλήρως η σύγχρονη αιολική ενέργεια και η εμπορική της επιτυχία, πρέπει να εξεταστεί και ο ρόλος των πρωτοπόρων της αιολικής ενέργειας. Αυτό αναφέρεται σε μεμονωμένα άτομα καθώς και σε μικρές επιχειρήσεις.

Ακόμη και πριν από την πετρελαϊκή κρίση, οι πρωτοπόροι κατασκεύαζαν μικρές ανεμογεννήτριες για τα σπίτια τους και για τις μικρές επιχειρήσεις, προκειμένου να παράσχουν την ενέργειά τους. Από ορισμένες απόψεις οι πρωτοπόροι ακολούθησαν ένα εμπόριο που αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια του Δευτέρου Παγκοσμίου Πολέμου. Πολλές κατασκευασμένες ανεμογεννήτριες για τροφοδοσία ρεύματος καθώς συρρικνώθηκε το ηλεκτρικό δίκτυο. Πολλές από τις προσπάθειες που έγιναν την εποχή του πολέμου εξακολουθούν να υπάρχουν. Μερικά από αυτά τα εξελιγμένα σχέδια πήγαν στη βιομηχανική κατασκευή. Παραδείγματα αυτού είναι η τουρμπίνα Lagerwey, Enercon (Alois Wobben, Γερμανία), Enertech (Bob Sherwin, Jay Carter, US). Οι Αμερικανοί ακολούθησαν την παράδοση των Jacobs, αλλά θεωρούνταν ως έννοια, ο σχεδιασμός ήταν αρκετά καινοτόμος. Στη Δανία, τα μέλη του Smedemesterforeningen έχτισαν μικρές εγκαταστάσεις συνδεδεμένες στο δίκτυο και κυρίως σύμφωνα με το γνωστό «δανικό σχέδιο». Από αυτό το πρωτοποριακό έργο αναπτύχθηκαν εταιρείες όπως οι Vestas, Bonus, NEG και Micon.

Για να υποστηρίξουν τις προσπάθειες των μικρότερων εταιρειών να βελτιώσουν τα προϊόντα τους και να αυξήσουν την εμπορική επιτυχία τους στις ΗΠΑ και τις Κάτω Χώρες, οι κυβερνήσεις διοργάνωσαν διαγωνισμούς για την ανάπτυξη μικρών, φτηνών ανεμογεννητριών. Ωστόσο, αυτές δεν ήταν επιτυχείς, καθώς η ζήτηση για αυτό τον τύπο ανεμογεννήτριας με μικρές χωρητικότητες βραδέως βυθίστηκε υπέρ των μεσαίων μονάδων που συνδέονται με το δίκτυο. Οι Δανοί κατασκευαστές άρχισαν να πωλούν τα εργοστάσιά τους σε μεγάλη κλίμακα στις τοπικές αγορές τους και σε διάφορες ευρωπαϊκές χώρες. Την ίδια στιγμή εξήγαγαν πολύ επιτυχώς στις ΗΠΑ.

Με την αυξανόμενη ζήτηση για μεγάλες ανεμογεννήτριες, οι κατασκευαστές αύξησαν τις δυνατότητες των γνωστών τους εννοιών βήμα προς βήμα. Στην αρχή της δεκαετίας του '90 πέτυχαν το ίδιο μέγεθος με τις μικρότερες μονάδες παραγωγής που στηρίχθηκαν από το κράτος τη δεκαετία του 1980. Με την υποστήριξη της Ευρωπαϊκής Επιτροπής (προγράμματα WEGA και THERMIE), ήταν δυνατόν να βελτιώσουν τα σχέδιά τους, να δοκιμάσουν τις μονάδες παραγωγής τους και να γράψουν ιστορίες επιτυχίας. Αυτό ήταν απαραίτητη προϋπόθεση για την επιτυχή εισαγωγή στην αγορά. Σε αυτό το σημείο οι δύο αρχικά διαχωρισμένες γραμμές ανάπτυξης συγχωνεύθηκαν σε μία. Λόγω της ζήτησης πολύ μεγάλων ανεμογεννητριών, η τάση διεύρυνσης συνεχίστηκε, καθώς αυτές φαινόταν να είναι δυναμικά πιο ανταγωνιστικές στην υπεράκτια περιοχή. Σχεδόν καμία από τις πρωτοπόρες εταιρείες της δεκαετίας του 1970 και της δεκαετίας του 1980 δεν εμφανίστηκε από αυτή τη φάση αμετάβλητη. Μερικοί χρεοκόπησαν και άλλοι είχαν επιτυχία. Είχαν παραμείνει εντελώς ανεξάρτητοι (ENERCON) ή, ως ανεξάρτητες εταιρείες, προσέλκυσαν την προσοχή των ξένων επενδυτών (Vestas). Άλλοι συγχωνεύθηκαν ή αναλήφθηκαν από μεγαλύτερες εταιρείες. Παραδείγματα γνωστών συγχωνεύσεων είναι η NEG και η Micon.

1.8. Αιολικά Πάρκα και Σύνδεση Δικτύου

Μαζί με την αυξανόμενη χωρητικότητα των ανεμογεννητριών, τα έργα αιολικής ενέργειας (αιολικά πάρκα) αυξήθηκαν σε τέτοιο βαθμό ώστε η συνολική τους χωρητικότητα αυξήθηκε από ένα MW σε αρκετές εκατοντάδες. Προκειμένου να σχεδιαστούν αποτελεσματικά τα αιολικά πάρκα, ήταν πρώτα απαραίτητο να έχουμε γνώση του χειρισμού των ροών και των συνθηκών ροής εντός του αιολικού πάρκου.

Η έρευνα σε αυτούς τους τομείς ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του 1980 με τη φυσική ανάλυση των ροών αφύπνισης και των πειραματικών ερευνών σε αεροδυναμικές σήραγγες. Αυτός ο τομέας έρευνας έγινε όλο και πιο σημαντικός από τις πρώτες έρευνες σχετικά με τις συνθήκες ροής σε αιολικά πάρκα. Οι εξωτερικές επιδράσεις όπως η διάτμηση του ανέμου, η ένταση των αναταράξεων και η σταθερότητα της ατμόσφαιρας διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην κατανομή των ροών. Δεδομένου ότι οι επιδράσεις αυτές είναι πολύ διαφορετικές, ο οικονομικός σχεδιασμός του υπεράκτιου αιολικού πάρκου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα αποτελέσματα της έρευνας σχετικά με τις συνθήκες ροής των αιολικών πάρκων.

Η σημασία της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας έγινε μεγαλύτερη, καθώς οι καλύτερες τοποθεσίες για την παραγωγή αιολικής ενέργειας στην ξηρά στη βορειοδυτική Ευρώπη είχαν ήδη αναπτυχθεί. Η υπεράκτια αιολική ενέργεια είναι η μόνη δυνατότητα για τις παράκτιες χώρες να αυξήσουν τη συμβολή της αιολικής ενέργειας στην παροχή ενέργειας (> 20%). Ένας άλλος λόγος για την αυξανόμενη σημασία της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας είναι η δημόσια αντίσταση στην ανέγερση ανεμογεννητριών σε προστατευόμενα και παλιά τοπία, ειδικά στο Ηνωμένο Βασίλειο και τη Σουηδία. Το δυναμικό της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας αναγνωρίστηκε στην αρχή της σύγχρονης εποχής της αιολικής ενέργειας. Η αιολική ενέργεια ανοικτής θάλασσας έχει ερευνηθεί από το 1978 στο πλαίσιο του προγράμματος αιολικής ενέργειας της ΙΕΑ. Το 1991, το πρώτο μεγάλο εμπορικό υπεράκτιο αιολικό πάρκο με συνολική ισχύ 4,95 MW ανεγέρθηκε 2,5 χλμ. Από την ακτή του Vindeby στη Δανία. Αυτό περιελάμβανε 11 ανεμογεννήτριες Bonus 450 kW το καθένα. Το δεύτερο δανικό υπεράκτιο αιολικό πάρκο ανεγέρθηκε στο Tuno Knob το 1995 (Ender, 2011).

Αυτό το αιολικό πάρκο έχει συνολική ισχύ 5 MW και αποτελείται από 10 ανεμογεννήτριες Vestas 500 kW η καθεμία. Και τα δύο αιολικά πάρκα ανεγέρθηκαν σε προστατευόμενα και πεδινά νερά. Το πρώτο υπεράκτιο αιολικό πάρκο κοντά στην Κοπεγχάγη, Middelgrunden, ανεγέρθηκε με τη βοήθεια αρχιτεκτόνων τοπίου και έχει συνολική ισχύ 40 MW. Περιλαμβάνει 20 ανεμογεννήτριες Bonus που παράγουν 2 MW το καθένα, είναι διατεταγμένες σε καμπύλη και σε βάθος νερού μεταξύ 5 και 10 μέτρων. Το πρώτο βήμα προς την κατεύθυνση της αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας στο ακατέργαστο περιβάλλον της Βόρειας Θάλασσας λήφθηκε το 2002 με την ανέγερση του αιολικού πάρκου Horns Rev Offshore Wind Farm. Η

εγκατεστημένη ισχύς ήταν 160 MW, καθιστώντας το το πρώτο αιολικό πάρκο με συνολική χωρητικότητα άνω των 100 MW. Το αγρόκτημα περιελάμβανε 80 ανεμογεννητριών 2 MW κάθε μία, που βρίσκεται μεταξύ 14 και 17 χλμ. Από την ακτή σε βάθος νερού 6-14 μ. Μία φορά, περισσότερες χώρες έχουν προσχωρήσει στην υπεράκτια κοινότητα. Στα μέσα του 2012 υπήρχαν ανεμογεννήτριες συνολικής ισχύος 4100 MW. Αυτές ήταν οι ακόλουθες χώρες: Δανία, Σουηδία, Κάτω Χώρες, Ηνωμένο Βασίλειο, Ιρλανδία, Βέλγιο, Γερμανία και Κίνα. Η ταχεία ανάπτυξη της δυναμικότητας των αιολικών πάρκων φαίνεται από τα ακόλουθα στοιχεία:

- Μέση χωρητικότητα: 43 MW / εκμετάλλευση
- Μέση χωρητικότητα των 10 μικρότερων, παλαιότερων αιολικών πάρκων 8 MW / αγρόκτημα
- Μέση χωρητικότητα των 10 μεγαλύτερων, νεώτερων αιολικών πάρκων 198 MW / αγρόκτημα

Λαμβάνοντας υπόψη τις δυνατότητες της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας, τα ευρωπαϊκά κράτη προγραμματίζουν περαιτέρω υπεράκτιες αιολικές εγκαταστάσεις, και αυτό σε έναν χώρο χωρίς υπάρχουσα ηλεκτρική υποδομή. Με τον τρόπο αυτό καθίσταται σαφής η ανάγκη μιας νέας ιδέας για τα δίκτυα. Αυτή η αναγκαιότητα καθίσταται πιο επείγουσα από την άποψη των μελλοντικών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μεταβλητής ισχύος (Ender, 2011). Αυτό επηρεάζει κυρίως τις ανεμογεννήτριες, τις συγκεντρωμένες μονάδες ηλιακής ενέργειας και τις υδροηλεκτρικές μονάδες παραγωγής. Δεδομένου ότι ο χρόνος που απαιτείται για την επέκταση των δικτύων είναι πολύ μεγάλος, συνήθως δέκα χρόνια ή περισσότερο, η επέκταση του δικτύου θα έπρεπε να έχει ήδη ξεκινήσει πριν από δέκα χρόνια, προκειμένου να ικανοποιηθούν οι σημερινές απαιτήσεις. Η επέκταση των δικτύων μπορούσε και έπρεπε να αποτελέσει μέρος της εφαρμογής, αλλά αυτό δεν συνέβη.

2. Ανεμογεννήτριες και Υπολογισμών Λειτουργικών Χαρακτηριστικών

2.1. Βασικά Στοιχεία Φυσικής του Ανέμου

Ο άνεμος είναι ατμοσφαιρικός αέρας σε κίνηση (Pielke, 2013). Είναι πανταχού παρόν και ένα από τα βασικά φυσικά στοιχεία του περιβάλλοντός μας. Ανάλογα με την ταχύτητα του κινούμενου αέρα, ο άνεμος μπορεί να γίνεται αισθητός ως ελαφρύς και αιθέριος, να είναι σιωπηλός ή / και αόρατος με γυμνό μάτι· ή, μπορεί να είναι μια ισχυρή και καταστροφική δύναμη, δυνατή και ορατή, ως αποτέλεσμα των βαριών συντριμμιών που μεταφέρει. Η ταχύτητα της κίνησης του αέρα καθορίζει την ισχύ του ανέμου και σχετίζεται άμεσα με την ποσότητα ενέργειας στον άνεμο – δηλαδή, την κινητική του ενέργεια. Η πηγή αυτής της ενέργειας, ωστόσο, είναι η ηλιακή ακτινοβολία. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία από τον ήλιο θερμαίνει άμεσα την επιφάνεια της γης, ισχυρότερα στις τροπικές περιοχές και ασθενέστερα στα υψηλά γεωγραφικά πλάτη. Επίσης, ως αποτέλεσμα της διαφορικής απορρόφησης του ηλιακού φωτός από το έδαφος, την πέτρα, το νερό και τη βλάστηση, ο αέρας σε διάφορες περιοχές θερμαίνεται με διαφορετικό ρυθμό. Αυτή η άμεση θέρμανση μετατρέπεται μέσω διαδικασιών θερμαγωγής σε κίνηση του αέρα, η οποία ρυθμίζεται από την περιστροφή της γης. Οι διαδικασίες θερμαγωγής είναι διαταραχές της υδροστατικής ισορροπίας, κατά τις οποίες οι υπό άλλες συνθήκες στάσιμες μάζες αέρα μετατοπίζονται και κινούνται σε αντίδραση με δυνάμεις που προκαλούνται από αλλαγές στην πυκνότητα αέρα και την πλευστότητα λόγω διαφορών θερμοκρασίας. Ο αέρας ωθείται από περιοχές υψηλής πίεσης προς περιοχές χαμηλής πίεσης, εξισορροπώντας την τριβή και τις αδράνεια λόγω της περιστροφής της γης.

Τα μοτίβα της διαφορικής θέρμανσης της επιφάνειας της γης, καθώς και άλλες θερμικές διεργασίες όπως η εξάτμιση, η καθίζηση, τα σύννεφα, η σκιά και οι παραλλαγές της απορρόφησης της επιφανειακής ακτινοβολίας εμφανίζονται σε διαφορετικές κλίμακες χώρου και χρόνου. Αυτές συνδυάζονται με δυναμικές δυνάμεις (dynamical forces) λόγω της περιστροφής της γης και της ανακατανομής της ορμής της ροής για να οδηγήσουν σε μια ποικιλία διαδικασιών παραγωγής αέρα, οδηγώντας στην ύπαρξη μεγάλης ποικιλίας φαινομένων ανέμου. Αυτοί οι άνεμοι μπορούν να κατηγοριοποιηθούν βάσει της χωρικής κλίμακας και των μηχανισμών φυσικής παραγωγής τους.

Η ζωτικότητα του ανέμου είναι διαφορετική σε σχέση με τον τύπο της ζωτικότητας που βασίζεται στο ηλιακό φως που δημιουργείται από τον ατομικό συνδυασμό υδρογόνου (H) σε ήλιο (He) στον πυρήνα του. Η διαδικασία διάλυσης $H \rightarrow He$ δημιουργεί ροές θερμότητας και ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από τον ήλιο στο διάστημα με κάθε τρόπο. Αν και η Γη λαμβάνει ένα μικρό τμήμα της ενέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας, αυτή παρέχει το πιο σημαντικό μέρος των ζωτικών αναγκών της Γης. Η ζωτικότητα του ανέμου είναι μια αξιοσημείωτη πηγή του δυναμικού αιχμής και ένας αξιοσημείωτος συμμετέχων στην παγκόσμια διαφήμιση. Ως μια καινοτομία καλύτερη στην κλάση της, γίνεται αντιληπτή η εξειδικευμένη ανάπτυξη και η γρήγορη οργάνωση της ζωτικότητας του ανέμου, όπως ακριβώς και η απουσία ενός πιο απομακρυσμένου σημείου περιορισμού για τη στάθμη του ανέμου που μπορεί να συντονιστεί στο ηλεκτρικό πλαίσιο (Wang et al., 2011). Έχει εκτιμηθεί ότι η συνολική ζωτικότητα που προσδίδεται στον ήλιο από τη Γη είναι περίπου $1,8 \times 10^{11}$ MW. Από αυτές τις πληροφορίες που βασίζονται στον ήλιο, μόλις το 2% ($3,6 \times 10^9$ MW) μετατρέπεται σε ζωτικότητα ανέμου και περίπου το 35% της ζωτικότητας του ανέμου διασκορπίζεται εντός 1.000 μέτρων από την επιφάνεια της Γης (Dongmei et al., 2011). Συνεπώς, η προσβάσιμη ζωτικότητα του αέρα που μπορεί να μετατραπεί σε διαφορετικούς τύπους ενέργειας είναι περίπου $1,26 \times 10^9$ MW. Δεδομένου ότι αυτή η εκτίμηση φτάνει τις 20 φορές του σημερινού ποσοστού της παγκόσμιας αξιοποίησης της ζωτικότητας, η ζωτικότητα του ανέμου θα μπορούσε σε θεμελιώδες επίπεδο να ικανοποιήσει τις καθημερινές ανάγκες ζωτικότητας όλου του κόσμου. Σε αντίθεση με τις γνωστές πηγές ζωτικότητας, η ζωτικότητα του ανέμου έχει πολλές ευνοϊκές συνθήκες και πλεονεκτήματα. Δεν είναι καθόλου σαν τα παράγωγα πετρελαίου που εκπέμπουν εκρηκτικά αέρια και ατομικό δυναμισμό που δημιουργεί ραδιενεργά απόβλητα - η ζωτικότητα του ανέμου είναι μια καθαρή και φυσικά φιλική πηγή ενέργειας. Ως ατελείωτη και ελεύθερη πηγή ζωής, είναι προσβάσιμη και άφθονη σε πολλά μέρη του κόσμου. Επιπλέον, η ευρύτερη χρήση της ζωτικότητας του ανέμου θα συμβάλει στη μείωση του ενδιαφέροντος για μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, οι οποίες θα μπορούσαν να εξαντληθούν αργά ή γρήγορα αυτόν τον αιώνα, ανάλογα με την τρέχουσα χρήση τους. Επιπλέον, το κόστος ανά kWh της ζωτικότητας του ανέμου είναι πολύ χαμηλότερο από αυτό της ηλιακής ενέργειας (Sideratos & Hatziaργyριου, 2007). Με αυτόν τον τρόπο, ως η πιο ενθαρρυντική πηγή ζωτικότητας, πιστεύεται ότι η ζωτικότητα του ανέμου αναλαμβάνει ουσιαστικό ρόλο στην παγκόσμια προσφορά ζωτικότητας τον 21ο αιώνα.

2.2. Θεμελιώδης εξίσωση της αιολικής ενέργειας

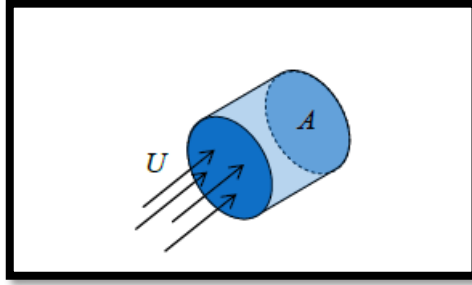
Η θεμελιώδης εξίσωση της αιολικής ενέργειας απαντά στο πιο βασικό ποσοτικό ερώτημα - πόση ενέργεια υπάρχει στον άνεμο. Πρώτα πρέπει να διαχωριστούν οι έννοιες της ισχύος και της ενέργειας. Η ισχύς είναι ο ρυθμός της ενέργειας. Για παράδειγμα, θα πρέπει να είναι γνωστό πόση ενέργεια μπορεί να παραχθεί από μια ανεμογεννήτρια ανά μονάδα χρόνου. Σε ένα πιο κοντινό οικιακό παράδειγμα, η ισχύς του ανέμου είναι ο ρυθμός ροής της αιολικής ενέργειας μέσω ενός ανοιχτού παραθύρου.

Η αιολική ενέργεια εξαρτάται από:

1. την ποσότητα του αέρα (ο όγκος του αέρα υπό εξέταση)
2. την ταχύτητα του αέρα (το μέγεθος της ταχύτητάς του)
3. τη μάζα του αέρα (σε σχέση με τον όγκο του μέσω πυκνότητας)

Η αιολική ενέργεια ποσοτικοποιεί την ποσότητα της αιολικής ενέργειας που ρέει μέσω μιας περιοχής ενδιαφέροντος ανά μονάδα χρόνου. Με άλλα λόγια, η αιολική ενέργεια είναι η ροή της αιολικής ενέργειας μέσα από μια περιοχή ενδιαφέροντος. Η ροή είναι μια θεμελιώδης έννοια στη μηχανική των ρευστών, η μέτρηση του ρυθμού ροής οποιασδήποτε ποσότητας που μεταφέρεται με το κινούμενο ρευστό, εξ ορισμού κανονικοποιημένη ανά μονάδα επιφάνειας. Για παράδειγμα, η ροή μάζας είναι ο ρυθμός ροής μάζας μέσω μιας περιοχής ενδιαφέροντος διαιρούμενης από αυτήν την περιοχή. Η ροή όγκου είναι ο όγκος που ρέει μέσω της περιοχής ενδιαφέροντος ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα περιοχής. Ας θεωρηθεί ένα στοιχείο περιοχής A (Σχήμα 1) και ροή μεγέθους U μέσω αυτής της περιοχής (Kalmikov, 2013). Ο όγκος του αέρα που ρέει μέσω αυτής της περιοχής κατά τη διάρκεια του χρόνου μονάδας dt δίνεται από τον όγκο του κυλίνδρου με περιοχή διατομής A και μήκος $U \times dt$, δηλαδή τον όγκο $A \times U \times dt$. Επομένως, ο ρυθμός ροής του όγκου είναι $A \times U$, η ροή όγκου είναι U . Ο ρυθμός ροής της μάζας προκύπτει πολλαπλασιάζοντας τον ρυθμό ροής του όγκου με την πυκνότητα της ροής ρ και ισούται με τη μάζα αυτού του κυλίνδρου διαιρούμενος με τη μονάδα χρόνου.

$$\frac{dm}{dt} = \rho * A * U \quad (1.1)$$



Σχήμα 1. Σχέδιο ροής αέρα με ταχύτητα U μέσω της περιοχής A . Ο κύλινδρος απεικονίζει τον όγκο που ρέει σε μονάδα χρόνου dt μέσω της περιοχής A (Kalmikov, 2017).

Η αιολική ενέργεια εξ ορισμού είναι το ενεργειακό περιεχόμενο της ροής του αέρα λόγω της κίνησής του. Αυτός ο τύπος ενέργειας ονομάζεται κινητική ενέργεια και είναι συνάρτηση της μάζας και της ταχύτητάς του, που δίνεται από το

$$KE = \frac{1}{2} * m * U^2 \quad (1.2)$$

Η αιολική ενέργεια είναι ο ρυθμός ροής της κινητικής ενέργειας. Σε παράγωγα παρόμοια με τις άλλες ποσότητες ρυθμού ροής που συζητήθηκαν παραπάνω, η ποσότητα κινητικής ενέργειας που ρέει ανά μονάδα χρόνου μέσω μιας δεδομένης περιοχής είναι ίση με το περιεχόμενο της κινητικής ενέργειας του κυλίνδρου στο Σχήμα 1.

$$P = \frac{1}{2} * \frac{dm}{dt} * U^2 \quad (1.3)$$

Εδώ ο ρυθμός ροής μάζας (1.1) αντικατέστησε τη μάζα αέρα στο (1.2). Η προκύπτουσα εξίσωση για την αιολική ενέργεια είναι

$$P = \frac{1}{2} * \rho * A * U^3 \quad (1.4)$$

Αυτή είναι μια θεμελιώδης εξίσωση στην ανάλυση της αιολικής ενέργειας. Δείχνει μια εξαιρετικά μη γραμμική κυβική εξάρτηση από την ταχύτητα του ανέμου. Π.χ. ο διπλασιασμός της ταχύτητας του ανέμου οδηγεί σε οκταπλάσια αύξηση της διαθέσιμης ισχύος του. Αυτό εξηγεί γιατί η ταχύτητα του περιβάλλοντος ανέμου είναι ο κύριος παράγοντας για την εξέταση της αιολικής ενέργειας. Στην εξίσωση (1.4), η ισχύς του ανέμου είναι μια γραμμική συνάρτηση της πυκνότητάς του και ως αποτέλεσμα του περιορισμένου εύρους των διακυμάνσεων της πυκνότητας του αέρα, η πυκνότητα είναι δευτερεύουσας σημασίας. Η εξάρτηση της ισχύος από την περιοχή συνεπάγεται μια μη γραμμική τετραγωνική εξάρτηση από την ακτίνα μιας περιοχής σάρωσης ανεμογεννητριών, τονίζοντας τα πλεονεκτήματα των μακρύτερων πτερυγίων ανεμογεννήτριας.

Είναι συνηθισμένο να ομαλοποιείται η περιβάλλουσα αιολική ενέργεια με τον διαχωρισμό της βάσει περιοχής ενδιαφέροντος· δηλαδή όσον αφορά την ειδική ροή ισχύος. Αυτό οδηγεί στον ορισμό της κινητικής ροής της αιολικής ενέργειας, γνωστής ως πυκνότητα ισχύος αέρα (Wind Power Density - WPD). Ομοίως με τους παραπάνω ορισμούς της ροής και του ρυθμού της ροής, η ροή της αιολικής ενέργειας είναι ο ρυθμός της ροής της αιολικής ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας, και δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$WPD = \frac{P}{A} = \frac{1}{2} * \rho * U^2 \quad (1.5)$$

2.3. Ταχύτητα ανέμου

Το μέτρο της ζωτικότητας του ανέμου αλλάζει με το σταθερό σχήμα της ταχύτητάς του· στο τέλος της ημέρας, εάν η ταχύτητα του ανέμου αυξηθεί, υπάρχει οκτώ φορές μεγαλύτερη ζωτικότητα στον άνεμο ($2^3 = 2 * 2 * 2 = 8$). Μικρές διαφορές στην ταχύτητα του ανέμου επηρεάζουν κυρίως το μέτρο της ενέργειας που είναι προσβάσιμο στον άνεμο.

Η ταχύτητα του ανέμου είναι μια από τις βασικές ιδιότητες στην εκλεκτική παραγωγή ενέργειας. Η ταχύτητα του ανέμου αλλάζει σε κάθε χρόνο και σπίτι, και ελέγχεται από μερικά στοιχεία που σχετίζονται με τις γεωγραφικές και κλιματολογικές συνθήκες. Η ταχύτητα του ανέμου θα μπορούσε να είναι μια

μεταβλητή παράμετρος· εκτιμώμενες πληροφορίες για την ταχύτητα του ανέμου φροντίζουν τακτικά να συμβουλευούνται επιστημονικές τεχνικές που συνδέονται με την εκμετάλλευση της ενέργειας. Τα λανθασμένα κύματα σκιαγραφούν συνήθως τις ημερήσιες ποικιλίες των κανονικών ταχυτήτων αέρα.

Κυρίως, πρέπει να σημειωθεί μια κρίσιμη μεταβλητή στη μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου σε 20 χρόνια (1978-1998) και το πιο σημαντικό μέρος των βασικών ιδιοτήτων ξεκινά από λιγότερο από 7,8 έως σχεδόν 9,2 m / s. Η ημι-μόνιμη εκμάθηση του ανέμου (1978-2007) προήλθε από το συνοπτικό πλαίσιο αντίληψης που ελέγχεται από τα μηχανικά μετεωρολογικά παρατηρητήρια. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η αλλαγή της μέσης ετήσιας ταχύτητας του ανέμου συμβαίνει στους ίδιους προορισμούς· τείνει να μειώνεται κάπως στο νησί Jeju, ενώ οι δύο αντικρουόμενες περιοχές έχουν ακανόνιστες τάσεις (Siddiqi et al., 2005).

2.4. Πυκνότητα ανέμου

Όσο πιο πυκνός είναι ο ουρανός, τόσο περισσότερη ζωντάνια παίρνει η τουρμπίνα. Η πυκνότητα του αέρα μεταβάλλεται ανάλογα με το ύψος και τη θερμοκρασία. Η ατμόσφαιρα είναι λιγότερο πυκνή σε μεγάλο υψόμετρο από το επίπεδο της θαλάσσης και ο ζεστός αέρας είναι λιγότερο συμπιεσμένος από τον ψυχρό αέρα. Επειδή κάθε άλλο στοιχείο είναι ισοδύναμο, οι τουρμπίνες θα αποδίδουν περισσότερη ισχύ για να μειώσουν τα ύψη και σε μέρη όπου οι μέσες θερμοκρασίες είναι πιο χαμηλές. Η πυκνότητα της αιολικής ενέργειας χρησιμοποιείται για τη σύγκριση των αιολικών πόρων ανεξάρτητα από το μέγεθος της ανεμογεννήτριας και είναι η ποσοτική βάση για την τυπική ταξινόμηση του αιολικού πόρου στο Εθνικό Εργαστήριο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (National Renewable Energy Laboratory - NREL) των ΗΠΑ. Η μέση πυκνότητα αιολικής ενέργειας έχει πλεονεκτήματα έναντι της μέσης ταχύτητας ανέμου για τη σύγκριση τοποθεσιών με διαφορετική πιθανότητα ασυμμετρίας κατανομής, λόγω της κυβικής μη γραμμικής εξάρτησης της αιολικής ισχύος από την ταχύτητα του ανέμου (Elliott et al., 1987). Περαιτέρω τεχνικές λεπτομέρειες αυτού του συστήματος ταξινόμησης εισήχθησαν αρχικά από τους Elliott και Barchet (1980). Τυπικές τιμές τάξεων αιολικής ενέργειας με τις αντίστοιχες πυκνότητες ισχύος και μέσες ταχύτητες ανέμου παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Όσο μεγαλύτερη είναι η περιοχή που σαρώνεται (το μέτρο του περιστροφικού μέρους του ρότορα), τόσο πιο αξιοσημείωτη είναι η δύναμη που μπορεί να πάρει ο στρόβιλος από τον άνεμο. Δεδομένου ότι η εκκαθαρισμένη περιοχή είναι το εύρος θέσης του ρότορα, μια μικρή αύξηση στο μήκος των άκρων επιφέρει μια πιο σημαντική αύξηση της προσβάσιμης ισχύος για την τουρμπίνα.

Πίνακας 1. Κατηγορίες αιολικής ενέργειας μετρούμενες στα 50 m πάνω από το έδαφος σύμφωνα με την ταξινόμηση με βάση την πυκνότητα αιολικής ισχύος του NREL. Η ταχύτητα ανέμου που αντιστοιχεί σε κάθε κατηγορία είναι η μέση ταχύτητα ανέμου με βάση την κατανομή πιθανότητας Rayleigh για ισοδύναμη μέση πυκνότητα αιολικής ενέργειας σε υψόμετρο 1500 μέτρων πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Δεδομένα που εγκρίθηκαν από το <https://www.nrel.gov/gis/data-wind.html>

Ταξινόμηση αιολικής ενέργειας			
<u>Κατηγορία</u> <u>αιολικής ενέργειας</u>	<u>Δυνητική</u> <u>Ποσότητα Πόρων</u>	<u>Πυκνότητα αιολικής</u> <u>ενέργειας / $W m^{-2}$</u>	<u>Ταχύτητα</u> <u>ανέμου / $m s^{-1}$</u>
1	Πτωχή	0 - 200	0.0 - 5.9
2	Οριακή	200 - 300	5.9 - 6.7
3	Μέτρια	300 - 400	6.7 - 7.4
4	Καλή	500 - 600	7.4 - 7.9
5	Πολύ Καλή	500 - 600	7.9 - 8.4
6	Εξαιρετική	600 - 800	8.4 - 9.3
7	Υπέρτατη	> 800	> 9.3

2.5. Αποτελεσματικότητα Εξαγωγής Αιολικής Ενέργειας

Στην προηγούμενη ενότητα εξετάστηκε το συνολικό περιεχόμενο αιολικής ενέργειας της ροής του περιβάλλοντος αέρα. Ωστόσο, δεν είναι όλη αυτή η δύναμη διαθέσιμη για χρήση. Η αποδοτικότητα στην συγκέντρωση αιολικής ενέργειας προσδιορίζεται από τον συντελεστή ισχύος (C_p) που είναι ο λόγος της ισχύος που εξάγεται από τον στρόβιλο προς τη συνολική ισχύ του αιολικού πόρου $C_p = PT / P_{wind}$.

Συνεπώς, η δέσμευση ισχύος του στρόβιλου δίνεται από την εξίσωση:

$$P_t = \frac{1}{2} * \rho * A * U^3 * C_p \quad (1.6)$$

που είναι πάντα μικρότερο από το P_{wind} . Στην πραγματικότητα, υπάρχει ένα θεωρητικό ανώτατο όριο για το μέγιστο κλάσμα ισχύος που μπορεί να εξαχθεί - γνωστό ως όριο Betz. Σύμφωνα με τη θεωρία του Betz (2013) ο μέγιστος δυνατός συντελεστής ισχύος είναι ο $C_p = 16/27$, δηλαδή, η απόδοση 59% είναι η καλύτερη δυνατή απόδοση που μπορεί να έχει μια συμβατική ανεμογεννήτρια για την εξαγωγή ισχύος από τον άνεμο. Ο λόγος για τον οποίο υψηλότερη απόδοση, π.χ. 100%, δεν είναι δυνατή, είναι λόγω της ρευστής μηχανικής φύσης της αιολικής ενέργειας, που εξαρτάται από τη συνεχή ροή του αέρα σε κίνηση. Εάν, υποθετικά, χρησιμοποιούταν το 100% της κινητικής ενέργειας, τότε η ροή του αέρα θα μειωνόταν σε πλήρη ακινησία και δεν θα παρέμενε ταχύτητα για τη στήριξη της ροής μέσω της συσκευής εξαγωγής ενέργειας, ανεξάρτητα από τη συγκεκριμένη τεχνολογία ανεμογεννητριών που χρησιμοποιείται. Η μέγιστη απόδοση επιτυγχάνεται με τη βέλτιστη ισορροπία της μεγαλύτερης επιβράδυνσης του ανέμου που διατηρεί ακόμη αρκετά ταχεία ροή μετά την τουρμπίνα. (Βλέπε Okulov & van Kuik (2012) για περαιτέρω τεχνικές λεπτομέρειες και έναν ιστορικό απολογισμό των ορίων παραγώγων Betz από σύγχρονους ερευνητές).

2.6. Συντελεστής χωρητικότητας (Capacity Factor – CF)

α) Το μέρος του έτους που η γεννήτρια στροβίλων λειτουργεί σε ελεγχόμενο (κορυφαίο) έλεγχο:

$$\text{Συντελεστής Ορίου} = \frac{\text{Μέσο Εξαγόμενο}}{\text{Μέγιστο Εξαγόμενο}} \approx 30\%$$

β) Το CF εξαρτάται τόσο από τα χαρακτηριστικά του στροβίλου όσο και από τις ιδιότητες του χώρου (συνήθως 0,3 ή παραπάνω για έναν αξιοπρεπή χώρο)

Ένα άλλο βασικό μέτρο της αποτελεσματικότητας της αιολικής ενέργειας είναι ο Παράγοντας Χωρητικότητας (Capacity Factor - CF) που ποσοτικοποιεί το κλάσμα της εγκατεστημένης παραγωγικής ικανότητας που παράγει πραγματικά ισχύ:

$$CF = \frac{E_{actual}}{E_{ideal}} = \frac{time * \bar{P}}{time * P_N} = \frac{\bar{P}}{P_N} \quad (1.7)$$

Το CF είναι ο λόγος της πραγματικά παραγόμενης ενέργειας προς την ενέργεια που θα μπορούσε ενδεχομένως να παραχθεί από το σύστημα υπό εξέταση, υπό ιδανικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η ενέργεια είναι το προϊόν του χρονικού ρυθμού της, δηλαδή της ισχύος με το χρόνο που έχει παρέλθει, αυτή η ενεργειακή αναλογία είναι ίση με την αναλογία μέσης ισχύος \bar{P} προς την ονομαστική ισχύ του συστήματος. Για μια μεμονωμένη ανεμογεννήτρια, αυτή η ονομαστική ισχύς είναι ίση με την χωρητικότητα της πινακίδας, συνήθως τη μέγιστη ισχύ που μπορεί να παράγει υπό ευνοϊκές συνθήκες ανέμου. Λαμβάνοντας υπόψη μια τυπική καμπύλη ισχύος για έναν στρόβιλο (Σχήμα 2), αυτή είναι η επίπεδη περιοχή για ισχυρό άνεμο ακριβώς κάτω από την ταχύτητα ανέμου.

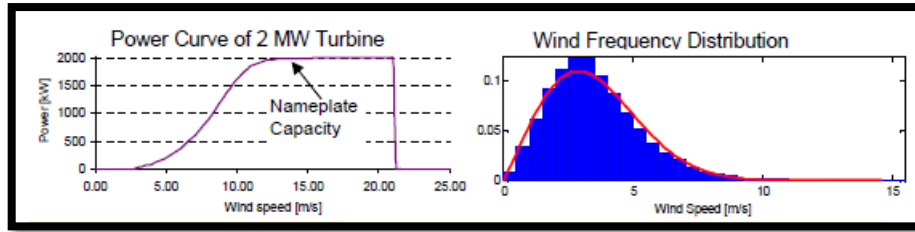
Ομοίως, το CF μπορεί να θεωρηθεί ως το κλάσμα του έτους που η γεννήτρια στροβίλων λειτουργεί με την ονομαστική της ισχύ (ονομαστική χωρητικότητα), δηλαδή το κλάσμα του πραγματικού χρόνου σε σχέση με τον συνολικό χρόνο:

$$CF = \frac{E_{actual}}{E_{ideal}} = \frac{E_{actual}}{time \times P_N} = \frac{\frac{E_{actual}}{P_N}}{time} = \frac{time_{effective}}{time} \quad (1.8)$$

Επομένως, η συνολική ετήσια παραγωγή ενέργειας μπορεί να υπολογιστεί πολλαπλασιάζοντας την ονομαστική ισχύ του στροβίλου (ή του αιολικού σταθμού) P_N με τη χρονική διάρκεια ενός έτους και με CF .

$$E_{actual} = P_N \cdot time_{effective} = P_N * time * CF \quad (1.9)$$

Μια τυπική τιμή CF για ένα οικονομικά βιώσιμο έργο είναι το 30%, φτάνοντας περίπου το 50% σε περιοχές με πολύ καλό αιολικό πόρο. Το CF βασίζεται τόσο στα χαρακτηριστικά της τουρμπίνας όσο και στην τοποθεσία - η ενσωμάτωση της καμπύλης ισχύος με τη μεταβλητότητα των αιολικών πόρων (σχήμα 1.2) παράγει την πραγματική παραγωγή ή τη μέση ισχύ. Αυτό τονίζει την εξάρτηση από την παραγωγή ισχύος της μεταβλητότητας του ανέμου και τη σημασία της μετεωρολογίας και της κλιματολογίας του ανέμου για την πρόβλεψη της αιολικής ενέργειας και την αξιολόγηση των πόρων.



Σχήμα 2. Τυπική καμπύλη ισχύος ανεμογεννητριών (αριστερό πλαίσιο) και τα στατιστικά στοιχεία της μεταβλητότητας του ανέμου (δεξί πλαίσιο) που δίδονται από ένα ιστόγραμμα και προσαρμογή πυκνότητας πιθανότητας Weibull (Kalmikov, 2017).

Η αιολική ενέργεια ασχολείται με τη χρήση της κινητικής αιολικής ενέργειας. Αυτή είναι η ενέργεια που περιέχεται στην ίδια την κίνηση του αέρα. Δεδομένου ότι αυτή είναι μια μορφή μηχανικής ενέργειας ενός κινούμενου ρευστού, ο ποσοτικός προσδιορισμός του απαιτεί στοιχεία μηχανικής ρευστού. Ελέγχθηκαν οι έννοιες της κινητικής ενεργειακής ροής και εξήχθη η θεμελιώδης εξίσωση της αιολικής ενέργειας, με ποσοτικοποίηση του ρυθμού της ροής της αιολικής ενέργειας. Εισήχθησαν τυπικές μετρήσεις πόρων αιολικής ενέργειας και αποδοτικότητας χρήσης. Η φύση του ανέμου συζητήθηκε με μια σύντομη επισκόπηση της μετεωρολογίας της αιολικής ενέργειας.

Η αιολική ενέργεια εξαρτάται από την ποσότητα του αέρα (όγκος), την ταχύτητα του αέρα (ταχύτητα), τη μάζα του αέρα (πυκνότητα), που ρέει μέσω της περιοχής ενδιαφέροντος (ροή).

Ορισμός κινητικής ενέργειας: $K_e = \frac{1}{2}mv^2$

Η ισχύς είναι η κινητική ενέργεια ανά μονάδα χρόνου: $p = \frac{1}{2}mv^2$

Η μηχανική ρευστού δίνει το ρυθμό ροής μάζας (πυκνότητα * ροή όγκου):

$$\frac{dm}{dt} = \rho * A * v$$

Συνεπώς: $P = \frac{1}{2}\rho Av^3$

και

ισχύς ~ κύβος της ταχύτητας,

ισχύς ~ πυκνότητα αέρα,

ισχύς ~ περιοχή ρότορα [$A = \pi r^2$]

2.7. Διάρκεια Ζωής Ανεμογεννητριών

Οι σημερινές ανεμογεννήτριες προορίζονται για διάρκεια ζωής 20-30 χρόνια. Οι κατασκευαστές περιστρεφόμενων κινητήρων και τα εργοστάσια επιλογής ζωτικότητας αντιμετωπίζουν την κρίσιμη δοκιμασία της γνώσης της καλύτερης προσέγγισης για την επίτευξη στόχων ωφέλιμης ζωής, ενώ περιορίζουν το κόστος υποστήριξης και επισκευής. Παρόλα αυτά, η λειτουργική αξιοπιστία και η επέκταση της διάρκειας ζωής των ανεμογεννητριών είναι δυσάρεστα καθήκοντα για ορισμένους λόγους:

- Οι ανεμογεννήτριες πρέπει να παρουσιάζονται σε μεταβαλλόμενες ανταγωνιστικές συνθήκες που θα αντέχουν ακραίες θερμοκρασίες, διακυμάνσεις ταχύτητας ανέμου, υγρασία, σκόνη, ακτινοβολία, αστραπές, αλμυρότητα και διαδοχικές καταιγίδες βροχής, χαλάζι, χιονιού και άμμου.
- Η σύγχρονη τουρμπίνα περιλαμβάνει ένα μεγάλο μέτρο εξαρτημάτων και πλαισίων, όπου τα πάντα έχουν τη δική τους διάρκεια ζωής. Σύμφωνα με τον νόμο του Cannikin, η βλάβη πρέπει να συμβεί πρώτα μέσα στο τμήμα ή τη δομή με τη συντομότερη ζωή.
- Μια τουρμπίνα υπόκειται σε ένα τεράστιο είδος μεγάλων μαζών, δεδομένου ότι οι στροφές υπόκεινται στην ταχύτητα και την πορεία, και διαφορετικά σημεία εκκίνησης και στάσης της δομής. Οι συγκεκριμένοι πραγματικοί μηχανισμοί πρέπει να αντιμετωπίζουν κρίσιμες μάζες αδυναμίας.
- Τα προηγμένα υλικά που είναι εύπλαστα και ασφαλή στην εξάντληση είναι θεμελιώδη για μερικά κρίσιμα συστατικά σημαντικών μοντέρνων τουρμπίνων, λόγω της συνεχούς αύξησης του μήκους αιχμής, του ύψους του δοχείου και του βάρους του κινητήρα.
- Ως ένα πλούσιο οικοδομικό πλαίσιο, ένας κινητήρας ανεμοστροβίλου / στρόβιλος} θα έπρεπε να περιγράφεται στο επίπεδο του πλαισίου και όχι στο επίπεδο του μέρους / τμήματος ως τυπική εφαρμογή για μερικούς κατασκευαστές στροβίλων.

3. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση Μελετών Ανέγερσης Ανεμογεννητριών & Αιολικών Πάρκων με Κριτήριο τα Χαρακτηριστικά της Τοποθεσίας

3.1. Λήψη Αποφάσεων Πολλαπλών Κριτηρίων και Σύνθετη Αναλογική Εκτίμηση

Η επιλογή της τοποθεσίας είναι ένα πολύπλοκο ζήτημα λόγω των πολλαπλών κριτηρίων τα οποία είναι μεταξύ τους αντικρουόμενα ως προς την φύση τους καθώς και αβέβαια. Η διαδικασία γίνεται πιο περίπλοκη όταν μια ομάδα που αποτελείται από ανθρώπους υπεύθυνους να λάβουν κάποιες αποφάσεις συμμετέχει στη λήψη μιας απόφασης. Στην μελέτη των Chatterjee και Bose (2013), μια μεθοδολογία “Λήψης Αποφάσεων Πολλαπλών Κριτηρίων (Multi-Criteria Decision-Making - MCDM)” η οποία βασίζεται στη “Σύνθετη Αναλογική Εκτίμηση (COmplex PRoportional ASsessment - COPRAS)” πραγματοποιείται σε ένα ασαφές περιβάλλον με τη βοήθεια πολλών υπευθύνων λήψης αποφάσεων. Πιο συγκεκριμένα, η συγκεκριμένη μελέτη έχει ως στόχο να εστιάσει στη δυνατότητα εφαρμογής του COPRAS-F ως στρατηγικό εργαλείο για την λήψη αποφάσεων με σκοπό να διαχειρίζονται τα προβλήματα που αφορούν την λήψη αποφάσεων μιας ομάδας.

Η MCDM είναι η διαδικασία επιλογής μιας βέλτιστης λύσης από ένα σύνολο διαθέσιμων εναλλακτικών λύσεων για την ικανοποίηση ενός συνόλου στόχων. Το MCDM εφαρμόζεται για την ανάλυση σύνθετων προβλημάτων της πραγματικής ζωής τα οποία είναι αντικρουόμενα ως προς την φύση των διαφορετικών εναλλακτικών λύσεων (δηλαδή, τη στρατηγική, την πολιτική κ.λπ.) στα διάφορα κριτήρια με σκοπό την επιλογή των καλύτερων και των κατάλληλων εναλλακτικών λύσεων. Τις τελευταίες δεκαετίες, το MCDM έχει σημειώσει άνοδο σε επιχειρηματικούς τομείς, στις βιομηχανίες, στη γεωργία, σε αγροτικές και αστικές περιοχές, στην αειφόρο ανάπτυξη, στη διαχείριση των δασών, στη χρηματοδότηση, στην άμυνα, καθώς και στον αθλητισμό. Τα προβλήματα MCDM μπορεί να ταξινομηθούν ως κλασικά και ασαφή, δηλαδή FMCDM προβλήματα. Στα κλασικά MCDM οι υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων αποφασίζουν με βεβαιότητα βάσει αντικειμενικών κριτηρίων. Σε περίπτωση που οι τιμές κριτηρίων δεν μπορούν να αντιστοιχιστούν με σιγουριά, υπάρχει μια θεωρία ασαφών συνόλων ώστε να μοντελοποιήσει το πρόβλημα της αβεβαιότητας στη λήψη αποφάσεων καθώς ένα

τέτοιο πρόβλημα είναι γνωστό ως ασαφή πολλαπλά κριτήρια λήψης αποφάσεων (Dey et al. 2012).

Οι ερευνητές για την επίλυση προβλημάτων MCDM έχουν αναπτύξει διάφορες τεχνικές. Στην εργασία των Chatterjee και Bose (2013), η “ασαφής σύνθετη αναλογική εκτίμηση (Fuzzy COmplex PRoportional ASsessment - COPRAS - F)” εφαρμόζεται στο πλαίσιο της λήψης αποφάσεων μιας ομάδας ώστε να επιλεγεί μια εφικτή τοποθεσία για το αιολικό πάρκο από ένα σύνολο εναλλακτικών λύσεων. Η ανάπτυξη ενός αιολικού πάρκου όχι μόνο απαιτεί μια τοποθεσία στην οποία παρουσιάζεται υψηλή ταχύτητα του ανέμου για τη μεγιστοποίηση της παραγωγής ενέργειας, αλλά πρέπει να λαμβάνονται επίσης ορισμένα άλλα κριτήρια όπως το ύψωμα της γης, η ποιότητα του αέρα, η διαθεσιμότητα και το κόστος της γης μαζί με τα διάφορα τεχνικά, εμπορικά και περιβαλλοντικά θέματα. Στόχος, λοιπόν, της εργασίας τους ήταν να επιλεγθεί η κατάλληλη τοποθεσία για το αιολικό πάρκο λαμβάνοντας υπόψη τα σημαντικά κριτήρια και χρησιμοποιώντας COPRAS-F στο πλαίσιο της λήψης αποφάσεων της ομάδας.

Ο Zadeh (1965) εισήγαγε την ασαφή λογική η οποία μπορεί να λάβει υπόψη την αβεβαιότητα και να λύσει τα προβλήματα στα οποία δεν υπάρχουν όρια και ακριβείς αξίες. Οι Zavadskas και Antucheviciene (2007) εφάρμοσαν τη μέθοδο fuzzified COPRAS για να αναλύσουν τις εναλλακτικές λύσεις αναγέννησης εγκαταλελειμμένων κτιρίων σε αγροτικές περιοχές στη Λιθουανία. Οι Antucheviciene et al. (2011) συνέκριναν την ασαφή μέθοδο COPRAS, την “Τεχνική για την Επιλογή από την Ομοιότητα με την Ιδανική Λύση (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution - TOPSIS)” και την τεχνική VIKOR σε σχέση με την κατάταξη της ανάπλασης των εγκαταλελειμμένων κτιρίων. Οι Yazdani et al. (2011) χρησιμοποίησαν το ασαφές COPRAS (COPRAS-F) για να παρέχουν ένα πλαίσιο ανάλυσης κινδύνου με στόχο να ξεπεράσουν τους περιορισμούς της κλασικής προσέγγισης για τη δημιουργία ασφαλέστερων και πιο ανθεκτικών υποδομών για την ανάπτυξη, την εφαρμογή και τον έλεγχο. Ο Chen (2000) εφάρμοσε το TOPSIS για τη λήψη αποφάσεων μιας ομάδας σε συνθήκες ασαφούς περιβάλλοντος για να επιλέξει ένα μηχανικό σύστημα ανάλυσης για μια εταιρεία λογισμικού. Οι Moradi et al. (2011) χρησιμοποίησαν το VIKOR σε συνθήκες λήψης αποφάσεων μιας ομάδας ασαφών περιστάσεων για την επιλογή ανταλλακτικών αυτοκινήτων από έναν προμηθευτή στο Ιράν. Κατά την άποψή τους, η φύση της

επιλογής του προμηθευτή είναι ένα περίπλοκο πρόβλημα MCDM το οποίο περιλαμβάνει τόσο ποσοτικούς όσο και ποιοτικούς παράγοντες, οι οποίοι μπορεί να είναι αντικρουόμενοι και αβέβαιοι στη φύση τους. Η διαδικασία γίνεται πιο περίπλοκη όταν μια ομάδα “Υπευθύνων Λήψης Αποφάσεων (Decision Makers - DMs)” λαμβάνει αποφάσεις. Οι Baležentis et al. (2012) χρησιμοποίησαν ασαφή “Βελτιστοποίηση Πολλαπλών Στόχων με Βάση την Ανάλυση Αναλογίας και την Πλήρη Πολλαπλασιαστική Φόρμα (Multi-Objective Optimization on the basis of Ratio Analysis plus full multiplicative form - MULTIMOORA)” με γλωσσική συλλογιστική και ομαδική λήψη αποφάσεων (MULTIMOORA-FG) συγκεντρώνοντας τις υποκειμενικές αξιολογήσεις των υπευθύνων λήψης αποφάσεων για να πραγματοποιήσουν μια πιο ισχυρή επιλογή προσωπικού. Οι Awasthi et al. (2011) χρησιμοποίησαν το Fuzzy TOPSIS για να δώσουν λύση στο πρόβλημα της επιλογής θέσης εγκατάστασης εφαρμόζοντας τη λήψη αποφάσεων ομάδας.

Στην εργασία των Chatterjee και Bose (2013), συζητήθηκαν κυρίως τα προβλήματα FMCDM και η προτεινόμενη μέθοδος βασίστηκε στο ασαφές μοντέλο για την επίλυση των προβλημάτων λήψης αποφάσεων με πολλούς υπεύθυνους για την λήψη αποφάσεων. Στην συγκεκριμένη μελέτη το COPRAS-F προτείνεται για τη λήψη αποφάσεων με σκοπό την επίλυση του προβλήματος. Η μέθοδος COPRAS βοηθά στην ακριβή αξιολόγηση και την επικύρωση των αποτελεσμάτων υπολογισμού με μαθηματικό τρόπο. Ωστόσο, η συνειδητοποίηση των ιδιοτήτων της επιτρέπει να φανούν τα οφέλη της εφαρμογής της μεθόδου, να προβλεφθεί η επίδραση της ελαχιστοποίησης του κόστους των κριτηρίων στο τελικό αποτέλεσμα (εκτίμηση), να ελεγχθούν οι υπολογισμοί και να ληφθεί υπόψη η πιθανή αστάθεια των εκτιμήσεων που παράγονται από την μέθοδο λόγω του συγκεκριμένου χαρακτήρα των πραγματικών δεδομένων (Podvezko, 2011).

3.2. Χρήση Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών και Δείκτη Καταλληλότητας

Στην εργασία τους οι Latinopoulos και Kechagia (2015) πρότειναν και εφάρμοσαν ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο αξιολόγησης για την επιλογή των καταλληλότερων τοποθεσιών για έργα ανάπτυξης αιολικών πάρκων. Αυτό το πλαίσιο επικεντρώθηκε στη συνδυασμένη χρήση των “Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (Geographic Information Systems - GIS)” και της χωρικής ανάλυσης αποφάσεων

πολλαπλών κριτηρίων, με στόχο την παροχή ενός εργαλείου απόφασης για τον σχεδιασμό αιολικών πάρκων σε περιφερειακό επίπεδο. Αυτή η διαδικασία αναπτύχθηκε μέσω διαφόρων τεχνολογικών, οικονομικών, κοινωνικών και περιβαλλοντικών κριτηρίων (γνωστά ως κριτήρια τοποθέτησης), τα οποία χρησιμοποιήθηκαν είτε ως περιορισμοί ή / και ως παράγοντες αξιολόγησης προκειμένου να εντοπιστούν πρώτα οι πιθανές / κατάλληλες τοποθεσίες για την εγκατάσταση του αιολικού πάρκου και στη συνέχεια για την αξιολόγηση αυτών των ιστότοπων χρησιμοποιώντας έναν σύνθετο “Δείκτη Καταλληλότητας (Suitability Index - SI)”. Το εργαλείο που προτάθηκε δύναται να επιλέξει τις βέλτιστες τοποθεσίες για μελλοντικά έργα, καθώς και να βαθμολογήσει την καταλληλότητα των ήδη αδειοδοτημένων έργων. Τα αποτελέσματα της εργασίας τους υποστήριξαν τον πιθανό ρόλο των σχεδιαστών στον καθορισμό των περιοχών που είναι κατάλληλες για την ανάπτυξη αιολικών πάρκων.

Από τις αρχές της δεκαετίας του 2000, αρκετές μελέτες έχουν διεξαχθεί σε αρκετές χώρες με στόχο την αξιολόγηση της καταλληλότητας της γης για την εγκατάσταση αιολικών πάρκων, συνδυάζοντας τα GIS με ανάλυση πολλαπλών κριτηρίων (Aydin et al., 2010; Baban, & Parry, 2001). Στην Ελλάδα, οι πιο σχετικές μελέτες εφαρμόστηκαν για τα αιολικά πάρκα που βρίσκονται στην ξηρά και τα παράκτια σε νησιωτικές περιοχές λόγω του υψηλού δυναμικού των αιολικών πόρων σε αυτές τις περιοχές (Mourmouris & Potolias, 2013; Tegou et al., 2010). Αντίθετα, η μελέτη των Latinopoulos και Kechagia (2015) επικεντρώθηκε στην εφαρμογή αιολικού πάρκου στην ηπειρωτική χώρα, όπου το κύριο πλεονέκτημα δεν είναι η δυναμική του ανέμου, το οποίο είναι στην πραγματικότητα ένας σημαντικός περιορισμός σε μεγάλο μέρος αυτής της περιοχής, αλλά η εγγύτητα με το εθνικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας της ηπειρωτικής χώρας και ιδίως με τα κέντρα μεταφοράς ηλεκτρικού δικτύου του Νομού Δυτικής Μακεδονίας. Σε αυτό το πλαίσιο, παρουσίασαν μια μεθοδολογία για τη συστηματική αξιολόγηση της καταλληλότητας της γης για την ανάπτυξη αιολικών πάρκων σε περιφερειακό επίπεδο, λαμβάνοντας υπόψη διάφορα κριτήρια σχεδιασμού και περιβάλλοντος. Αυτή η ανάλυση καταλληλότητας γης θα μπορούσε στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί με δύο τρόπους. Αφενός, θα μπορούσε να χρησιμεύσει ως εργαλείο για την εκ των προτέρων αξιολόγηση των πιθανών νέων επενδύσεων σε αιολικά πάρκα, παρέχοντας χρήσιμες προτάσεις για τον χωροταξικό σχεδιασμό σε περιφερειακό επίπεδο. Από την άλλη πλευρά, θα μπορούσε να

χρησιμοποιηθεί ως διαδικασία της εκ των υστέρων αξιολόγησης με στόχο την αξιολόγηση των ήδη αδειοδοτημένων ιστότοπων. Αυτή η διαδικασία θα μπορούσε να παρέχει χρήσιμες πληροφορίες τόσο για την σημασία των παραγόντων που επηρεάζουν τις αποφάσεις του περιφερειακού σχεδιασμού όσο και για τη συνολική καταλληλότητα των ήδη εγκεκριμένων έργων, τα οποία όμως δεν έχουν ακόμη κατασκευαστεί.

Στόχος της εργασίας τους, λοιπόν, ήταν να σχεδιάσουν, να εφαρμόσουν και να αξιολογήσουν ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο για την επιλογή, σε περιφερειακό επίπεδο, των καταλληλότερων χώρων για την ανάπτυξη έργων αιολικών πάρκων. Για το σκοπό αυτό, αναπτύχθηκε μια διαδικασία ανάλυσης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων με βάση το GIS η οποία στη συνέχεια εφαρμόστηκε στην Περιφερειακή Ενότητα Κοζάνης στην Ελλάδα. Αυτό το σύστημα μπορεί να χειριστεί τους πολλαπλούς και συνήθως αντικρουόμενους στόχους του σχεδιασμού οι οποίοι πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την επιλογή μιας τοποθεσίας για ένα νέο αιολικό πάρκο. Η ανάλυση της χωροθέτησης πραγματοποιήθηκε σε υψηλή ανάλυση (150 m x 150 m) ακολουθώντας το μέγεθος του διαθέσιμου χάρτη των πόρων ανέμου. Κατασκευάστηκε ένας συνολικός χάρτης σχετικά με τους περιορισμούς και ένας χάρτης σχετικά με την καταλληλότητα της γης.

Τα αποτελέσματα προσδιόρισαν τις βέλτιστες τοποθεσίες για τα αιολικά έργα καθώς και τον βαθμό καταλληλότητας των ήδη αδειοδοτημένων έργων, τα οποία όμως δεν έχουν ακόμη κατασκευαστεί. Σύμφωνα με αυτά τα ευρήματα, οι τοποθεσίες των ήδη αδειοδοτημένων αιολικών πάρκων χαρακτηρίστηκαν ως αποδεκτές, ενώ η πλειονότητα αυτών των έργων πέτυχε μια ικανοποιητική βαθμολογία στη συνολική αξιολόγηση της καταλληλότητας. Επιπλέον, τα αποτελέσματα της εργασίας τους έδειξαν ότι ένα ποσοστό περισσότερο από το 12% της περιοχής που μελετήθηκε είχε αποδεκτή βαθμολογία SI ($SI > 0,5$). Αυτό το αποτέλεσμα υποστήριξε τον πιθανό ρόλο των σχεδιαστών στον καθορισμό περισσότερων περιοχών που είναι κατάλληλες για την ανάπτυξη αιολικών πάρκων.

Στην έρευνα αυτή θα μπορούσε να εξεταστεί ένας αριθμός επεκτάσεων, συμπεριλαμβανομένης της ενσωμάτωσης πολλαπλών προοπτικών στην “αναλυτική ιεραρχική διαδικασία (analytic hierarchy process - AHP)”, μέσω μιας έρευνας ενδιαφερόμενων μερών και / ή εμπειρογνομώνων. Παρόλο που στην εργασία τους

εφάρμοσαν το εργαλείο αποφάσεων σε περιφερειακό επίπεδο, θα μπορούσε επίσης να εφαρμοστεί σε εθνικό επίπεδο ή να μειωθεί στο τοπικό επίπεδο λήψης αποφάσεων, όπως για παράδειγμα σε επίπεδο δήμων, ανάλογα με τη διαθεσιμότητα των δεδομένων και τις ανάγκες πολιτικής. Το εργαλείο θα μπορούσε να εφαρμοστεί επίσης σε άλλες περιοχές μελέτης και ιδιαίτερα στην ηπειρωτική Ελλάδα όπου τα περισσότερα από τα επιλεγμένα κριτήρια είναι σχεδόν παρόμοια.

3.3. Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία και GIS

Στόχος της μελέτης των Al-Shabeeb et al. (2016) ήταν να εντοπίσει πιθανές τοποθεσίες ανεμογεννητριών στη βορειοδυτική Ιορδανία. Η “Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (Analytic Hierarchy Process - AHP)” χρησιμοποιήθηκε σε μια νέα προσέγγιση για τον εντοπισμό των πιθανών τοποθεσιών εγκατάστασης ανεμογεννήτριας στην περιοχή που μελετήθηκε βάσει πέντε φυσικών κριτηρίων, δηλαδή της ταχύτητας του ανέμου, της βροχόπτωσης, της κλίσης, του υψομέτρου και της χρήσης γης, τα οποία επηρεάζουν τις τοποθεσίες για τις ανεμογεννήτριες. Η σημασία κάθε κριτηρίου βασίστηκε στις γνώμες των εμπειρογνομώνων.

Οι αξιολογήσεις για κάθε κριτήριο βασίστηκαν στη διαθέσιμη βιβλιογραφική ανασκόπηση. Η συνέπεια μεταξύ των απόψεων των εμπειρογνομώνων αξιολογήθηκε χρησιμοποιώντας τη μέθοδο σύγκρισης ανά ζεύγη και υπολογίστηκε ένα τελικό βάρος για κάθε κριτήριο. Δημιουργήθηκε ένας χάρτης καταλληλότητας ανεμογεννητριών χρησιμοποιώντας τη μέθοδο “Σταθμισμένου Γραμμικού Συνδυασμού (Weighted Linear Combination - WLC)” στο περιβάλλον GIS. Διαπιστώθηκε ότι το 45% της περιοχής μελέτης είχε από υψηλή έως και πολύ υψηλή καταλληλότητα για ανεμογεννήτριες. Συμπερασματικά, αυτή η έρευνα θα μπορούσε να συμβάλει στην ενίσχυση των διαθέσιμων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην Ιορδανία, εάν οι επιλεγμένες τοποθεσίες χρησιμοποιούνταν για τις ανεμογεννήτριες.

Η Ιορδανία δεν διαθέτει σημαντικούς ενεργειακούς πόρους ορυκτών καυσίμων και για αυτό τον λόγο πρέπει να βασίζεται σε γειτονικές αραβικές χώρες που παράγουν πετρέλαιο. Εισάγει, λοιπόν, σχεδόν το 95% - 97% των ενεργειακών αναγκών της τόσο με τη μορφή πετρελαίου όσο και με τη μορφή προϊόντων πετρελαίου (Hrayshat, 2005; Kablan, 2004).

Σύμφωνα με την WECSP (2009), οι εισαγωγές ενέργειας έφθασαν περίπου το 13% του “ακαθάριστου εγχώριου προϊόντος της Ιορδανίας (ΑΕΠ, Jordan Gross Domestic

Product - GDP)” το 2009. Στην έρευνα εκτιμήθηκε ότι τα επίπεδα κατανάλωσης ενέργειας και ηλεκτρικής ενέργειας στην Ιορδανία θα διπλασιαζόταν σε 15 χρόνια. Επίσης, η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας προβλέφθηκε ότι θα αυξανόταν με ετήσιο ρυθμό 6%. Η Ιορδανία είχε θέσει στόχους σχετικά με την πολιτική της για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, οι οποίοι καθορίζονταν στη στρατηγική του ενεργειακού τομέα. Σε αυτήν την πολιτική, το 10% της χωρητικότητας παραγωγής ενέργειας θα έπρεπε να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έως το 2020. Έως το 2020, η κυβέρνηση θα έπρεπε να έχει επενδύσεις 300 - 600 MW ηλιακής χωρητικότητας και 530 - 660 MW αιολικής χωρητικότητας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας προσδοκία για να ανταποκριθεί στις προσδοκίες του μεριδίου ανανεώσιμης ενέργειας στη συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στη χώρα.

Η εξαιρετικά απαιτητική ενεργειακή εποχή απαιτεί την αποτελεσματική αξιοποίηση των μη συμβατικών ενεργειακών πόρων. Η αιολική ενέργεια είναι μία από τις πιο ελπιδοφόρες εναλλακτικές λύσεις.

Το “Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών (Geographic Information System - GIS)” θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την τοποθέτηση έργων ανανεώσιμης ενέργειας. Μπορούν να αναπτυχθούν κριτήρια επιλογής της τοποθεσίας για τον καθορισμό των βέλτιστων θέσεων για αιολικά πάρκα όπως και θέσεις μεμονωμένων στροβίλων για τη μεγιστοποίηση του δυναμικού των πόρων. Στην έρευνα των Al-Shabeeb et al. (2016), η AHP σε συνδυασμό με το GIS χρησιμοποιήθηκε για μια προκαταρκτική επιλογή της τοποθεσίας για τις ανεμογεννήτριες στη βορειοδυτική Ιορδανία. Η “τεχνική ανάλυσης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων (Multiple-criteria decision-making analysis - MCDA)” είναι σημαντική για τη διαχείριση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η οποία περιλαμβάνει την επιλογή κριτηρίων και αποφάσεων (Abu-Taha, 2011). Στη βιβλιογραφία, αρκετές μέθοδοι του MCDA έχουν υιοθετηθεί στο περιβάλλον GIS (π.χ. Giurponi et al., 2004; Baud et al., 2008).

Ο “σταθμισμένος γραμμικός συνδυασμός (Weighted linear combination - WLC)” είναι μια σημαντική τεχνική που χρησιμοποιείται για την επιλογή των τοποθεσιών στο περιβάλλον GIS. Η χρήση του WLC σε περιβάλλον GIS για την επιλογή πιθανών τοποθεσιών για ανεμογεννήτριες έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως τα τελευταία χρόνια (π.χ. Baban & Parry, 2001; Tegou et al., 2010).

Η μέθοδος AHP βασίζεται στην κατασκευή μιας σειράς από “πίνακες σύγκρισης κατά ζεύγη (Pairwise Comparison Matrices - PCMs)”, οι οποίοι συγκρίνουν όλα τα κριτήρια μεταξύ τους. Στους υπολογιστές γίνεται σύγκριση μεταξύ όλων των πιθανών ζευγών κριτηρίων για να καθοριστεί ποιο είναι υψηλότερης προτεραιότητας. Προτείνεται μια κλίμακα από το 1 έως το 9 για τα στοιχεία PCM (Πίνακας 1) (Saaty, 1980). Η τιμή 1 δείχνει ότι τα κριτήρια είναι εξίσου σημαντικά και η τιμή 9 δείχνει ότι το υπό εξέταση κριτήριο είναι εξαιρετικά σημαντικό σε σύγκριση με τα άλλα κριτήρια. Τα PCM περιλαμβάνουν έλεγχο συνέπειας για τον εντοπισμό σφαλμάτων κρίσης και τον υπολογισμό ενός λόγου συνέπειας.

Με βάση τους Malczewski (1999) και Saaty (1988) υπάρχουν τρία κύρια στάδια για τη λήψη αποφάσεων με βάση PCM στις λειτουργίες της μεθόδου AHP. Πρώτο στάδιο είναι ο προσδιορισμός των σημαντικών κριτηρίων του προβλήματος (τοποθεσίες ανεμογεννητριών), ενώ το δεύτερο στάδιο είναι η εκτίμηση της σχετικής σημασίας κάθε κριτηρίου μεταξύ τους. Αυτό γίνεται συνήθως από ειδικούς χρησιμοποιώντας την κλίμακα από 1 έως 9.

Πίνακας 2. Κλίμακες για τη μέθοδο σύγκρισης κατά ζεύγη.

Ένταση Σπουδαιότητας	Ορισμός	Εξήγηση
1	Ίση σημασία σε ένα ζευγάρι	Δύο κριτήρια συμβάλλουν εξίσου στον στόχο
3	Μέτρια σημασία	Η κρίση και η εμπειρία ευνοούν ελαφρώς το ένα κριτήριο έναντι του άλλου
5	Ισχυρή σημασία	Η κρίση και η εμπειρία ευνοούν έντονα το ένα κριτήριο έναντι του άλλου
7	Πολύ ισχυρή σημασία	Η κρίση και η εμπειρία ευνοούν πολύ έντονα το ένα κριτήριο έναντι του άλλου
9	Ακραία σημασία	Τα αποδεικτικά στοιχεία που ευνοούν το ένα κριτήριο έναντι του άλλου έχουν μέγιστη δυνατή ισχύ

2,4,6,8	Ενδιάμεσες τιμές	Όταν απαιτείται συμβιβασμός
Αμοιβαία	Τιμές για αντίστροφη σύγκριση	Αν το κριτήριο “i” είχε έναν από τους παραπάνω αριθμούς που του αποδόθηκε σε σύγκριση με το κριτήριο “j”, τότε το “j” έχει αμοιβαία τιμή σε σύγκριση με το “i”

Το τρίτο στάδιο είναι η εκτίμηση της συνέπειας μέσω των ζευγών συγκρίσεων για να εκχωρηθεί η “αναλογία συνέπειας (Consistency Ratio - CR)”. Αυτό το στάδιο περιλαμβάνει τις ακόλουθες λειτουργίες: τον υπολογισμό του διανύσματος προτεραιότητας για ένα κριτήριο, τον υπολογισμό λ_{max} (η κύρια τιμή του ιδιοκτήτη), τον υπολογισμό του “δείκτη συνέπειας (Consistency index - CI)”, τον προσδιορισμό της κατάλληλης τιμής για την τυχαία αναλογία συνέπειας και τον υπολογισμό CR.

Υπάρχουν πολλές μελέτες που σχετίζονται με την επιλογή της τοποθεσίας εγκατάστασης ανεμογεννητριών χρησιμοποιώντας GIS. Στην έρευνα των Al-Shabeeb et al. (2016), αυτές οι μελέτες χρησιμοποιήθηκαν για τον καθορισμό των κριτηρίων επιλογής των τοποθεσιών εγκατάστασης ανεμογεννητριών σε συνδυασμό με τις απόψεις των τοπικών εμπειρογνομόνων. Με βάση τους Baban και Parry (2001) χρησιμοποιήθηκαν πέντε φυσικά κριτήρια αυτής της έρευνας, τα οποία περιλάμβαναν την “ταχύτητα του ανέμου (Wind - W)”, την “βροχοπτώση (Rain - R)”, την “κλίση (Slope - S)”, το υψόμετρο (Altitude - A)” και την “χρήση γης (Land - L)”. Ο Πίνακας 3 παρέχει μια αιτιολόγηση για τη σημασία κάθε κριτηρίου.

Πίνακας 3. Αιτιολόγηση κριτηρίων επιλογής.

Κριτήρια	Αιτιολόγηση
Ταχύτητα του ανέμου (W)	Οι ανεμογεννήτριες εξαρτώνται από το ότι χρειάζονται αρκετή ταχύτητα ανέμου για να περιστρέψουν τα πτερύγια τους για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Βροχόπτωση (R)	Περιοχές με περισσότερες βροχοπτώσεις θα δημιουργήσουν περισσότερη απορροή που θα επηρεάσει τις περιοχές των ανεμογεννητριών
Υψόμετρο (A)	Οι περιοχές με υψηλότερο υψόμετρο έχουν τη δυνατότητα να έχουν περισσότερους ανέμους από τις γύρω περιοχές
Κλίση (S)	Οι περιοχές με υψηλή κλίση θα δημιουργήσουν περισσότερη απορροή. Επίσης, οι υψηλές πλαγιές προκαλούν τεχνικές δυσκολίες κατά την εγκατάσταση των ανεμογεννητριών.
Χρήση γης (L)	Οι χρήσεις γης είναι σημαντικές για περιβαλλοντικούς και κοινωνικοοικονομικούς λόγους. Είναι επιτακτική ανάγκη να μην υποβαθμιστεί η οικονομική αξία της γης που έχει θεμελιώδη χρήση. Επίσης, είναι σημαντικό να μην βλάψουν το περιβάλλον και κυρίως την άγρια ζωή (Χλωρίδα και Πανίδα),

Οι τοποθεσίες που επιλέχθηκαν για τις ανεμογεννήτριες απαιτούν την ταυτόχρονη χρήση πολλών εργαλείων υποστήριξης αποφάσεων, όπως το GIS, τα δεδομένα που εντοπίζονται από απόσταση και η MCDA. Στην έρευνα τους, προσπάθησαν να κάνουν μια προκαταρκτική επιλογή της τοποθεσίας για τις ανεμογεννήτριες στη βορειοδυτική Ιορδανία βάσει των διαθέσιμων φυσικών δεδομένων για την περιοχή μελέτης χρησιμοποιώντας την AHP εντός του περιβάλλοντος των GIS.

Τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας έδειξαν ότι με βάση μόνο τα φυσικά κριτήρια, οι περιοχές που έχουν υψηλή και πολύ υψηλή καταλληλότητα αντιπροσωπεύουν το 45% της συνολικής περιοχής μελέτης. Τα ευρήματα αυτής της έρευνας θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να βοηθήσουν στον αποτελεσματικό σχεδιασμό της διαχείρισης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ανεμογεννήτριες) με σκοπό να εξασφαλιστεί μια βιώσιμη ανάπτυξη της ανανεώσιμης ενέργειας στην Ιορδανία και σε άλλες περιοχές που πάσχουν από έλλειψη ενέργειας. Συμπερασματικά, αυτή η έρευνα θα μπορούσε να συμβάλει στην ενίσχυση των διαθέσιμων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην Ιορδανία, εάν οι επιλεγμένες τοποθεσίες χρησιμοποιηθούν για

τις ανεμογεννήτριες. Αυτό θα μπορούσε να συμβάλει στη βιώσιμη κοινωνικοοικονομική ανάπτυξη της Ιορδανίας. Με βάση αυτό, προτάθηκε να αξιοποιηθούν τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης έρευνας και η υιοθετημένη μεθοδολογία από άλλους ερευνητές ώστε να βελτιωθεί ο χάρτης καταλληλότητας της τοποθεσίας μετά την προσθήκη περισσότερων κριτηρίων επιλογής αυτής της τοποθεσίας.

3.4. Τεχνικές Λήψης Αποφάσεων Πολλαπλών Κριτηρίων

Στόχος της μελέτης των Rezaian και Jozi (2016) ήταν να προσδιορίσει τις κατάλληλες περιοχές για την κατασκευή αιολικού πάρκου στο Takestan Plain ως μία από τις κύριες περιοχές με αιολική ενέργεια στην επαρχία Qazvin. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε μία από τις ευρέως χρησιμοποιούμενες “τεχνικές λήψης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων (Analytical Hierarchy Process - AHP)”. Τα κριτήρια επιλογής της τοποθεσίας χωρίστηκαν σε τρεις κύριες ομάδες: περιβαλλοντικά, τεχνικά και γεωγραφικά. Περαιτέρω, οι ουδέτερες ζώνες γύρω από τα αιολικά πάρκα θεωρήθηκαν ως περιορισμοί και εξαιρέθηκαν από την ανάλυση επιλογής της τοποθεσίας. Μετά τη στάθμιση των κριτηρίων, η ταχύτητα του ανέμου αναγνωρίστηκε ως το κριτήριο κορυφαίας προτεραιότητας, ενώ η κλίση και η απόσταση από τα κέντρα πληθυσμού κατατάχθηκαν δεύτερη και τρίτη αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν έδειξαν ότι οι δυτικές περιοχές της χώρας του Takistan, σε έκταση 433 εκταρίων, έχουν μεγάλες δυνατότητες δημιουργίας αιολικού πάρκου.

Η επιλογή της τοποθεσίας παίζει σημαντικό ρόλο σε ολόκληρο το έργο της αιολικής ενέργειας και χρειάζεται να μελετηθεί περαιτέρω (Yunna & Geng, 2014). Οι Van Haaren και Fthenakis (2011), παρουσίασαν μια νέα μέθοδο επιλογής τοποθεσίας για τα αιολικά πάρκα στη Νέα Υόρκη, με βάση τη βελτιστοποίηση του κόστους-εσόδων. Το προτεινόμενο χωρικό μοντέλο πολλαπλών κριτηρίων έγινε στη Πολιτεία της Νέας Υόρκης και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τις τοποθεσίες των υφιστάμενων ανεμογεννητριών. Οι Gorsevski et al. (2013) παρουσίασαν ένα σύστημα υποστήριξης χωρικών αποφάσεων που βασίζεται στην ομάδα για την επιλογή των τοποθεσιών για τα αιολικά πάρκα στο Northwest Ohio. Το προτεινόμενο μοντέλο επέτρεψε στους πολλαπλούς συμμετέχοντες να αλληλεπιδράσουν και να κατανοήσουν τα χωρικά δεδομένα για την εκχώρηση τιμών σημασίας σε κάθε παράγοντα. Οι Kim et al.

(2013) διεξήγαγαν μια μελέτη για την ανάπτυξη υπεράκτιων αιολικών πάρκων γύρω από την Κορεατική Χερσόνησο ως μέρος του εθνικού σχεδίου με το οποίο θα μπορούσαν να επιλέξουν μια κορυφαία τοποθεσία μεταξύ των υποψηφίων τοποθεσιών στην οποία θα εφαρμοζόταν το πρώτο εθνικό έργο ανάπτυξης υπεράκτιων αιολικών πάρκων. Οι Yun-na et al. (2013) διεξήγαγαν μια μελέτη για την εύρεση κατάλληλων τοποθεσιών για έναν αιολικό / ηλιακό υβριδικό σταθμό παραγωγής ενέργειας στην Κίνα βάσει του Ideal Matter-Element Model. Ο Uyan (2013) επέλεξε μια τοποθεσία ηλιακών αγροκτημάτων με βάση το GIS χρησιμοποιώντας την AHP στην περιοχή Karapinar της Τουρκίας. Σύμφωνα με τα ευρήματά του, όταν η καταλληλότητα της περιοχής μελέτης ήταν 15,38% ήταν χαμηλή, όταν ήταν 14,38% ήταν μέτρια, 15,98% ήταν κατάλληλη και όταν ήταν 13,92% είχε την καλύτερη καταλληλότητα για τις ηλιακές εκμεταλλεύσεις.

Λόγω της ειδικής γεωγραφικής κατάστασης του Ιράν, υπάρχουν πολλά εδάφη με σημαντικές δυνατότητες αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ιδίως αιολικής και ηλιακής ενέργειας. Το μερίδιο αυτών των τύπων ενέργειας στη χώρα είναι μικρότερο από το 1% της συνολικής παραγωγής πρωτογενούς ενέργειας. Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί, με ποσοστό παραγωγής 84% της συνολικής ανανεώσιμης ενέργειας κατατάσσονται πρώτοι στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στην δεύτερη θέση της κατάταξης βρίσκονται τα αιολικά πάρκα με ποσοστό παραγωγής 8% της συνολικής τροφοδοσίας. Επιπλέον, η βιομάζα, τα αστικά απόβλητα και οι γεωθερμικοί τύποι ενέργειας κατατάσσονται στην τρίτη, τέταρτη και πέμπτη θέση αντίστοιχα (Hydrocarbon Balance Sheet of Iran, 2005).

Πίνακας 4. Ιεραρχική δομή κριτηρίων και υποκριτηρίων επιλογής τοποθεσίας αιολικών πάρκων.

Επιλογή Τοποθεσίας Αιολικών Πάρκων		
Περιβαλλοντικά Κριτήρια	Τεχνικά Κριτήρια	Γεωγραφικά Κριτήρια
Είδη άγριας ζωής Ποτάμι Σφάλμα Αστικές περιοχές	Ταχύτητα Ανέμου Δρόμος Γραμμή μετάδοσης ισχύος	Κλίση Ανύψωση

Χωριό		
-------	--	--

Σύμφωνα με τις δορυφορικές εικόνες, ο ρυθμός αστικής ανάπτυξης στην περιοχή μελέτης ήταν 3,6% κατά την περίοδο 1992–2002 και 4,7% την περίοδο 2002–2012. Οι χάρτες κλίσης και διαστάσεων εκπονήθηκαν από τον “Χάρτη Ψηφιακής Ανύψωσης (Digital Elevation Map - DEM)” με μέγεθος εικονοστοιχείων 30m. Ο χάρτης των ποταμών ετοιμάστηκε από το Υπουργείο Ενέργειας του Ιράν. Οι χάρτες των αγροτικών περιοχών και των δρόμων ετοιμάστηκαν από δορυφορικές εικόνες Landsat του 2010. Επιπλέον, ο χάρτης των γραμμών μεταφοράς ενέργειας εκπονήθηκε από την Περιφερειακή Διοίκηση Ενέργειας Mazandaran. Στον Πίνακα 4 απεικονίζει τα κριτήρια και τα επιμέρους κριτήρια που συμβάλλουν στην επιλογή τοποθεσιών αιολικών πάρκων.

Τα σταθμισμένα κριτήρια είναι τα κύρια δεδομένα για την αξιολόγηση πολλαπλών κριτηρίων. Για να εξασφαλιστεί η στάθμιση, χρησιμοποιείται η “Αναλογία Συνέπειας (Consistency Ratio - CR)”. Η διαδικασία στάθμισης είναι σωστή αν το $CR \leq 0,1$, διαφορετικά η σημασία των κριτηρίων πρέπει να επανεκτιμηθεί (Rezaei-Moghaddam & Karami, 2004).

Στην μελέτη των Rezaian και Jozi (2016), η τιμή CR όλων των τιμών σύγκρισης ζευγών ήταν κάτω από 0,1 και το συνολικό CR ήταν 0,02, πράγμα που δείχνει την αποδεκτή αξιοπιστία των βαρών. Ως τελικό βήμα, οι χάρτες κριτηρίων καλύφθηκαν χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση:

$$WF = \sum (FI \times LW) \times CM$$

Όπου:

WF(wind farm): Επιλογή τοποθεσίας αιολικών πάρκων

FL(fuzzified criterion): ασαφές κριτήριο χάρτη

LW(weight of criterion): το βάρος του χάρτη κριτηρίου

CM (constraint map): Χάρτης περιορισμού

Ο τελικός χάρτης καταλληλότητας για τη δημιουργία αιολικού πάρκου καταρτίστηκε αποκλείοντας τις προστατευόμενες περιοχές ως περιορισμό.

Στην έρευνα τους, προκειμένου να αποφευχθεί η μεροληψία στη διαδικασία στάθμισης, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Delphi έτσι ώστε να σχηματιστεί μια ομάδα 10 ειδικευμένων περιβαλλοντικών εμπειρογνομόνων με πάνω από 15 χρόνια σχετικής εργασιακής εμπειρίας και περισσότερα από 10 χρόνια παρουσίας στην περιοχή μελέτης. Ζητήθηκε από τους πάντες να σταθμίσουν τα κριτήρια χρησιμοποιώντας τη βαθμολογία εννέα πόντων του Saaty. Η διαδικασία βαθμολόγησης συνεχίστηκε μέχρι να επιτευχθεί συναίνεση για τα τελικά βάρη στον τρίτο γύρο των Delphi.

Τα ευρήματα της έρευνας έδειξαν ότι η μέθοδος AHP θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ευνοϊκά σε μελέτες επιλογής τοποθεσιών για τη βέλτιστη εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών. Αυτή η μέθοδος είναι πιο ευέλικτη από τη λογική Boolean και επιτρέπει την τυποποίηση των κριτηρίων με τη μορφή μιας ολοκληρωμένης δομής. Το εύρημα επιβεβαιώθηκαν με τα αποτελέσματα των Kheirkhah Zarkesh et al. (2010), Jozi et al. (2010), και Rezaei-Moghaddam και Karami (2008). Οι Zaredar και Kheirkhah (2010) αναφέροντας τη χρησιμότητα της μεθόδου AHP στο να είναι φιλική προς τον χρήστη επέκριναν την υψηλή ευαισθησία της μεθόδου στην ιδέα εκείνου που παίρνει αποφάσεις. Παρά τις αδυναμίες σε πολλές μελέτες επιλογής τοποθεσιών που χρησιμοποιούν τη λογική Boolean, αυτή η μέθοδος βρισκόταν πάντα στο επίκεντρο της προσοχής λόγω της απλής λειτουργίας και της ευκολίας χρήσης της. Η μέθοδος Boolean δεν έχει αρκετή ευελιξία στη διαδικασία επιλογής τοποθεσιών με την οποία επιλέγονται κατάλληλες περιοχές βάσει συγκεκριμένων και απόλυτων κριτηρίων. Ωστόσο, η υψηλότερη δύναμη λήψης αποφάσεων στη μέθοδο AHP λαμβάνοντας υπόψη το ευρύ φάσμα κατηγοριών (0-255 ή 0-1) και η ασαφής λογική θα παρέχει στους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων περισσότερες επιλογές στη λήψη αποφάσεων. Η μελέτη των Rezaian και Jozi (2016) κατέστησε δυνατή τη στάθμιση και την τυποποίηση κριτηρίων επιλογής τοποθεσιών από περιβαλλοντική, οικολογική και γεωγραφική άποψη. Η προτεινόμενη μέθοδος μπορεί να παρουσιαστεί ως μοντέλο, έτσι ώστε ένα ευρύ φάσμα υπευθύνων λήψης αποφάσεων και διαχειριστών να μπορούν να τρέχουν το δικό τους μοντέλο επιλογής

περιοχών αλλάζοντας τα τελικά βάρη και τα αποδεκτά ασαφή όρια ανάλογα με την κατάσταση. Ένα άλλο πλεονέκτημα αυτής της μελέτης ήταν η χρήση των επακόλουθων βαρών που καθορίζονταν από ειδικούς για την επίλυση των συγκρούσεων και των διαφωνιών. Αυτή η προσέγγιση ήταν ένα εργαλείο για την επίτευξη συναίνεσης μεταξύ εμπειρογνομόνων, ατόμων, ενδιαφερομένων, διαχειριστών και υπευθύνων λήψης αποφάσεων. Σύμφωνα με το μεγάλο δυναμικό της αιολικής ενέργειας στο Ιράν, την προσιτή χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, την αύξηση της απώλειας των πόρων ορυκτών καυσίμων και τη σημαντική έλλειψη νομικών απαιτήσεων, προτείνεται στους αρμόδιους φορείς, συμπεριλαμβανομένου του Οργανισμού Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας του Ιράν και του Υπουργείου Ενέργειας, να έχουν περισσότερη αλληλεπίδραση με πανεπιστήμια για να εντοπίσουν περιοχές που είναι επιρρεπείς σε ανέμους ώστε να δημιουργηθούν νέα αιολικά πάρκα. Τέλος, προτάθηκε η κωδικοποίηση των προτύπων για τη διαχείριση των αιολικών πάρκων και των ζωνών ασφαλείας

3.5. Μοντέλο Προγραμματισμού Στόχων Επιλογή Τοποθεσιών Υπεράκτιο

Τομέα Αιολικών Πάρκων

Το άρθρο των Jones και Wall (2016) παρουσιάζει μια εφαρμογή εκτεταμένου προγραμματισμού στόχων στον τομέα της επιλογής τοποθεσιών υπεράκτιων αιολικών πάρκων. Στο άρθρο αυτό περιγράφηκε η στρατηγική σημασία των υπεράκτιων αιολικών πάρκων, με βάση την περίπτωση που πρότεινε το Ηνωμένο Βασίλειο γύρω από τρεις τοποθεσίες ως παράδειγμα. Ακόμα, αναθεωρήθηκε η χρήση μεθοδολογιών πολλαπλών αντικειμενικών μοντέλων για τον υπεράκτιο αιολικό τομέα και περιγράφηκε η τεχνική του εκτεταμένου προγραμματισμού στόχων όπως και η ευελιξία της στο συνδυασμό διαφορετικών φιλοσοφιών για την λήψη αποφάσεων. Στη συνέχεια, αναπτύχθηκε ένα εκτεταμένο μοντέλο προγραμματισμού στόχου για την επιλογή τοποθεσιών το οποίο βασίστηκε σε μελλοντικές τοποθεσίες του Ηνωμένου Βασιλείου και πραγματοποιήθηκε μια παραμετρική ανάλυση σε επίπεδο μετα-αντικειμενικού σκοπού.

Το ζήτημα για το πού να τοποθετηθούν και να σχεδιαστούν τα αιολικά πάρκα είναι ένα άλλο πρόβλημα απόφασης που περιλαμβάνει πολλούς ενδιαφερόμενους και πολλαπλούς στόχους. Το ζήτημα είτε της επιλογής ενός συνόλου τοποθεσιών για ανάπτυξη αιολικών πάρκων ή της κατάταξης ορισμένων πιθανών τοποθεσιών αφορά

τις πτυχές λήψης αποφάσεων στρατηγικού επιπέδου μεγάλης κλίμακας αυτού του ζητήματος. Οι Manrotas et al. (2003) συνδύασαν μια ξεχωριστή και συνεχή τεχνική πολλαπλών κριτηρίων (ELECTRE III) (ακέραιος προγραμματισμός) για να παράγουν ένα σύστημα υποστήριξης αποφάσεων για την επιλογή τοποθεσιών αιολικών πάρκων μεταξύ των υποψηφίων αιτήσεων στην Ελλάδα. Οι Kang et al. (2013) χρησιμοποίησαν το ασαφές AHP για να ταξινομήσουν την απόδοση των υπαρχόντων αιολικών πάρκων στην Ταϊβάν και ως εκ τούτου να παράσχουν μελλοντικές προτάσεις για τον σχεδιασμό πολιτικής.

Υπάρχουν πολλά σημαντικά ζητήματα μοντελοποίησης πολλαπλών αντικειμένων που προκύπτουν στις πτυχές της μηχανικής και του σχεδιασμού των αιολικών πάρκων και των συστατικών τους. Η χρήση μεθόδων βελτιστοποίησης για πολλές από τις μηχανικές πτυχές της λειτουργίας του αιολικού πάρκου περιγράφεται λεπτομερώς στην έρευνα των Banos et al. (2011). Ένας συγκεκριμένος τομέας που έχει λάβει ιδιαίτερη προσοχή είναι αυτός του σχεδιασμού αέργου ισχύος, δηλαδή το πρόβλημα του πώς τροφοδοτείται ενέργεια από τα αιολικά πάρκα στα ευρύτερα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό περιλαμβάνει τεχνικά ζητήματα, όπως τον έλεγχο της τάσης, καθώς και θέματα τιμολόγησης και ρύθμισης. Οι Zare και Niknam (2013) χρησιμοποιούν έναν αλγόριθμο βακτηριακής τροφής για παρόμοιο σκοπό. Οι Qiao et al. (2006) χρησιμοποίησαν τον προγραμματισμό στόχου για να βελτιστοποιήσουν την άεργη ροή ισχύος σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα παραγωγής αιολικής ενέργειας. Οι Bevrani και Daneshmand (2012) παρουσίασαν ένα ασαφές μοντέλο βασισμένο στη λογική για τη βελτιστοποίηση του προβλήματος ελέγχου συχνότητας φόρτωσης. Οι Alonso et al. (2012) ανέπτυξαν έναν γενετικό αλγόριθμο για τον σχεδιασμό άεργης ισχύος που λαμβάνει υπόψη τη σταθερότητα και την απώλεια της τάσης όπως και της ισχύος και του κόστους. Οι Zhang και Wirth (2010) κατασκεύασαν ένα ευρετικό σχέδιο για την αντιμετώπιση της διακύμανσης της ισχύος από μια ανεμογεννήτρια βελτιστοποιώντας τη χρήση μιας μπαταρίας.

Αρκετοί συγγραφείς ασχολούνται με θέματα σχεδιασμού ενός αιολικού πάρκου σε στρατηγικό επίπεδο. Οι Sareni et al. (2009) χρησιμοποίησαν έναν γενετικό αλγόριθμο πολλαπλών στόχων για να εξετάσουν τα αποτελέσματα μιας ανεμογεννήτριας με δομή χαμηλού κόστους, ενώ οι Ortegon et al. (2013) συζήτησαν τα θέματα που σχετίζονται με την αντιμετώπιση του τέλους του κύκλου ζωής των

ανεμογεννητριών, συμπεριλαμβανομένων των ζητημάτων αποσυναρμολόγησης, ανακύκλωσης και της αντίστροφης αλυσίδας εφοδιασμού.

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε στην μελέτη των Jones και Wall (2016) χρησιμεύει για να καταδείξει τη φύση των πολλαπλών κριτηρίων και των πολλών ενδιαφερομένων στη λήψη αποφάσεων στον υπεράκτιο τομέα αιολικών πάρκων. Οικονομικά, τεχνικά, κοινωνιολογικά και περιβαλλοντικά ζητήματα συμβάλλουν στον καθορισμό της βέλτιστης πορείας της δράσης. Ο εκτεταμένος προγραμματισμός των στόχων έχει αποδειχθεί ότι είναι μια κατάλληλη τεχνική για χρήση λόγω της ευελιξίας του στο συνδυασμό διαφορετικών υποκείμενων φιλοσοφιών και ως εκ τούτου έχει την ικανότητά να παράγει λύσεις που αντικατοπτρίζουν το πλήρες φάσμα των βασικών κριτηρίων.

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση καταδεικνύει την ανάγκη ανάπτυξης πολλαπλών αντικειμενικών μοντέλων ειδικά για τον υπεράκτιο αιολικό τομέα, τα οποία είναι σε θέση να μειώσουν το ενεργειακό κόστος προσδιορίζοντας την αποδοτικότητα και τις τεχνικές βελτιώσεις, εξετάζοντας και βελτιστοποιώντας παράλληλα κοινωνικοοικονομικούς και περιβαλλοντικούς στόχους. Συγκεκριμένα, η εφαρμογή πολλαπλών αντικειμενικών τεχνικών στο γενικό πεδίο εφοδιασμού της μοντελοποίησης αιολικών πάρκων στην ξηρά ή υπεράκτιων εξακολουθεί να βρίσκεται σε πρώιμα στάδια όσον αφορά τις επιστημονικές δημοσιεύσεις.

4. Προτάσεις Ανέγερσης Ανεμογεννητριών στον Ελλαδικό Χώρο

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν προτάσεις για την ανέγερση ανεμογεννητριών σε πόλεις της Ελλάδας, οι οποίες παρουσιάζουν τις βέλτιστες συνθήκες εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας. Για την εκτίμηση των βέλτιστων συνθηκών εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας χρησιμοποιήθηκε ο διαδικτυακός Γεωπληροφοριακός Χάρτης της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας (<http://www.rae.gr/geo/>) καθώς και οι διαθέσιμοι χάρτες μέσης ετήσιας ταχύτητας του ανέμου του Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ) (<http://www.cres.gr/kape/datainfo/maps.htm>)

4.1. Υπολογισμός Αιολικού Δυναμικού

Το αιολικό δυναμικό σε μία περιοχή άπτεται της έννοιας τριών μεγεθών: 1) του φυσικού διαθέσιμου αιολικού δυναμικού, της κινητικής ενέργειας δηλαδή των αέριων μαζών που κινούνται ετησίως πάνω από την περιοχή, με την αξία του εν λόγω δυναμικού να είναι μονάχα θεωρητική, 2) του τεχνικώς αξιοποιήσιμου αιολικού δυναμικού, την περιοχή δηλαδή στο φυσικώς διαθέσιμο αιολικό δυναμικό, που δε δύνανται τεχνικά οι αιολικές μηχανές να δεσμεύσουν, δίχως οικονομικούς περιορισμούς, πράγμα που συνεπάγεται πως τα κόστη των συστημάτων συλλογής δε λαμβάνονται υπόψη, ενώ υπογραμμίζεται πως το δυναμικό που μπορεί να αξιοποιηθεί τεχνικά αλλάζει χρονικά, διότι βρίσκεται σε συνάρτηση με τις εκάστοτε διαθέσιμες τεχνολογίες και 3) του οικονομικά αξιοποιήσιμου αιολικού δυναμικού, του μέρους δηλαδή του δυναμικού που μπορεί να αξιοποιηθεί τεχνικά, το κόστος για την αξιοποίηση του οποίου συμφέρει οικονομικά, ενώ επίσης αλλάζει, καθώς βρίσκεται σε συνάρτηση με τις εκάστοτε τεχνολογίες και την οικονομική συγκυρία.

Οι αιολικές μηχανές δύνανται να εγκατασταθούν σε πρακτικό επίπεδο σε όλους τους ανοικτούς χώρους, ωστόσο λαμβάνοντας υπόψη πως το σύνολο των σύγχρονων αιολικών πάρκων είναι εφαρμογές εμπορικού τύπου, οι εγκαταστάσεις των αιολικών μηχανών οφείλουν να μη γίνονται αυθαιρέτως, αλλά να αποτελούν αντικείμενα μελέτης για τη βελτιστοποίηση. Υπάρχει πλήθος μεθοδολογιών για να επιλεγούν οι θέσεις για τα αιολικά πάρκα, ωστόσο υπάρχουν και κάποιες παράμετροι που πρέπει να τηρούνται, με την ταχύτητα του ανέμου να σκιαγραφείται ως μία παράμετρο εκ των πιο θεμελιωδών. Ωστόσο, πέραν της ταχύτητας του ανέμου, υπάρχει και πλήθος άλλων παραμέτρων που συμβάλλουν στο να επιλεγθεί η εγκατάσταση του αιολικού

μηχανισμού, όπως για παράδειγμα η δυνατότητα πρόσβασης στο δίκτυο διανομής ηλεκτρισμού, οι επιδράσεις του τοπικού περιβάλλοντος, η οδική πρόσβαση, οι αποστάσεις από περιοχές που κατοικούνται, οι επιδράσεις του θορύβου και το εύρος των παρασίτων σε ηλεκτρομαγνητικά κύματα (ραδιοφωνικών - τηλεοπτικών σταθμών κ.ο.κ.).

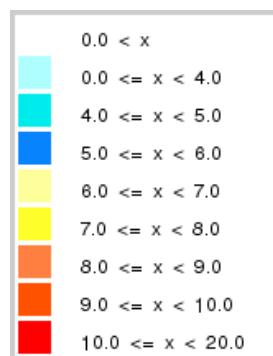
Ο Γεωπληροφοριακός Χάρτης της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας (<http://www.rae.gr/geo/>), χρησιμοποιήθηκε με σκοπό να εκτιμηθεί το Αιολικό Δυναμικό στον Ελλαδικό Χώρο. Οι πληροφορίες που παρέχει ο Γεωπληροφοριακός Χάρτης της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας προέρχονται από τα δεδομένα που συλλέγουν οι ανεμολογικοί ιστοί, οι οποίοι έχουν εγκατασταθεί σε όλη την επικράτεια του Ελλαδικού χώρου (Εικόνα 4).



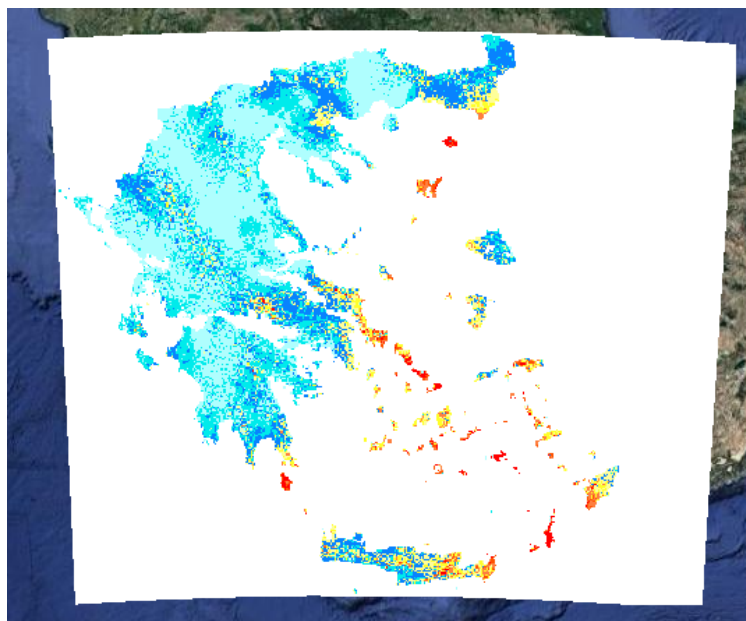
Εικόνα 4. Ανεμολογικοί ιστοί σε όλη την Ελληνική επικράτεια.

Οι διαθέσιμες επιλογές αποτύπωσης του Αιολικού Δυναμικού μέσω του Γεωπληροφοριακού Χάρτη της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας τόσο για την ηπειρωτική όσο και για τη νησιωτική Ελλάδα είναι διαθέσιμες για τρία διαφορετικά ύψη (80, 100 και 120 m). Η πληροφορία που δίνεται γραφικά είναι διαβαθμισμένη

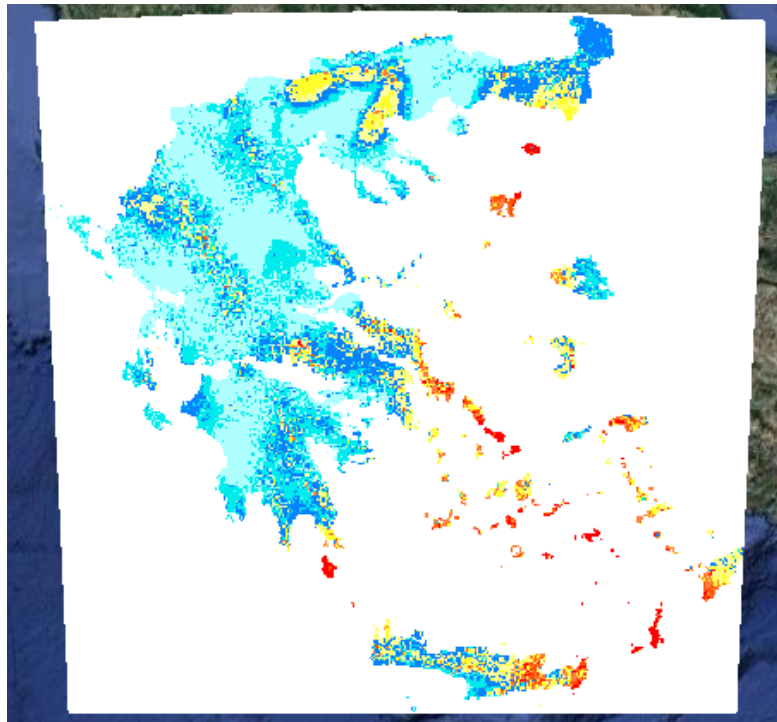
χρωματικά σύμφωνα με την Εικόνα 5 . Έτσι οι λευκές περιοχές παρουσιάζουν μηδενικό αιολικό δυναμικό, οι περιοχές με αποχρώσεις του γαλάζιου χρώματος παρουσιάζουν ασθενές αιολικό δυναμικό με τιμές από 0 έως 6, οι περιοχές με αποχρώσεις του κίτρινου χρώματος μέτριο αιολικό δυναμικό με τιμές από 6 έως 8, ενώ οι περιοχές με αποχρώσεις του κόκκινου χρώματος παρουσιάζουν έντονο αιολικό δυναμικό με τιμές από 8 έως 20. Γενικότερα, όσο περισσότερο ανοιχτή παρουσιάζεται η απόχρωση των παραπάνω χρωμάτων τόσο χαμηλότερη είναι η τιμή του αντίστοιχου αιολικού δυναμικού. Τέλος, οι περιοχές με το εντονότερο αιολικό δυναμικό είναι εκείνες που παρουσιάζονται με έντονο κόκκινο χρώμα. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το αιολικό δυναμικό της Ελλαδικής επικράτειας για τα ύψη των 80, 100 και 120m.



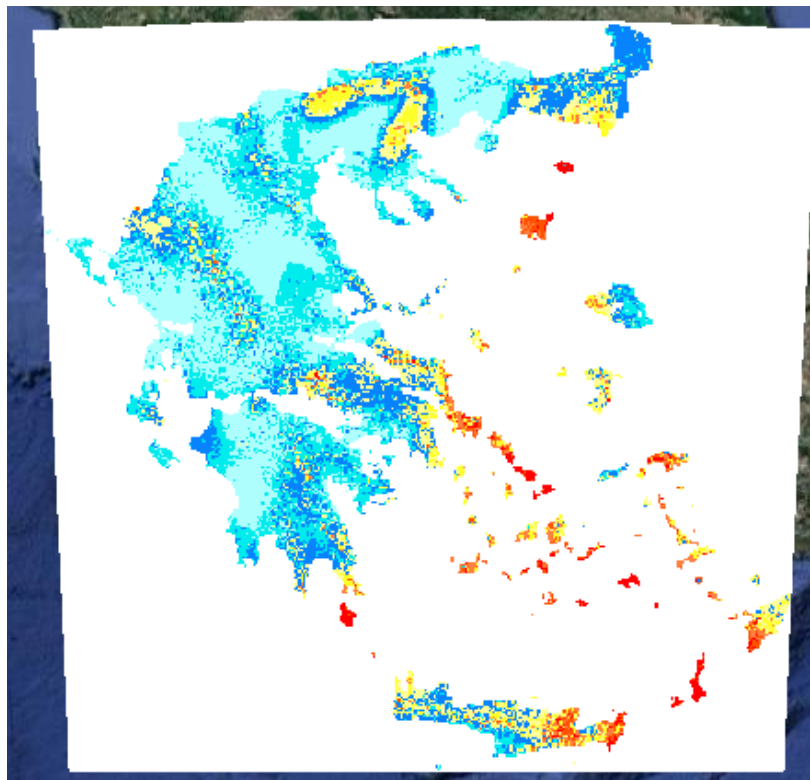
Εικόνα 5. Χρωματική διαβάθμιση του αιολικού δυναμικού στο Γεωπληροφοριακό Χάρτη της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας.



Εικόνα 6. Δεδομένα Αιολικού Δυναμικού για ύψος 80m, σύμφωνα με το Γεωπληροφοριακό Χάρτη της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας.



Εικόνα 7. Δεδομένα Αιολικού Δυναμικού για ύψος 100m, σύμφωνα με το Γεωπληροφοριακό Χάρτη της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας.



Εικόνα 8. Δεδομένα Αιολικού Δυναμικού για ύψος 120m, σύμφωνα με το Γεωπληροφοριακό Χάρτη της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας.

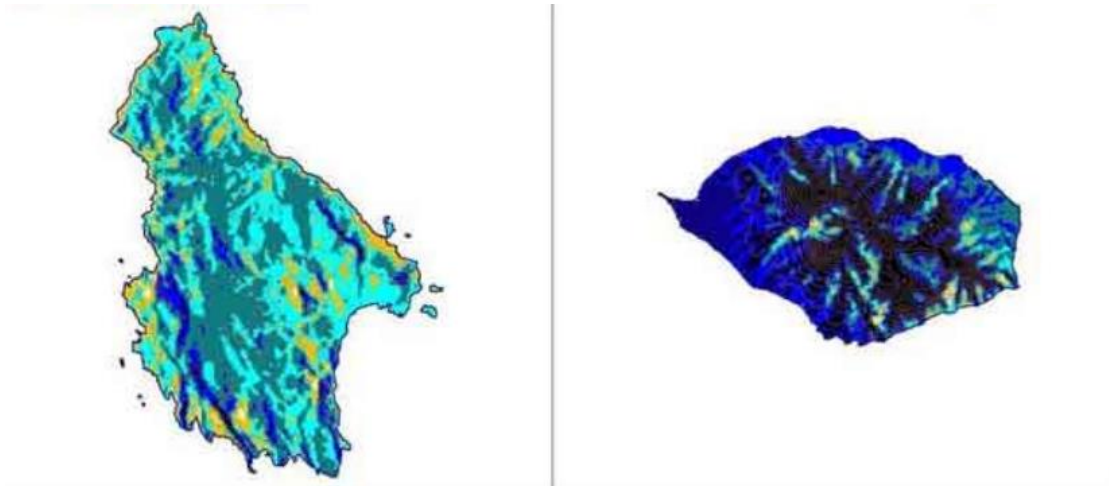
Όπως φαίνεται από τις εικόνες 6, 7 και 8, οι περιοχές με το βέλτιστο αιολικό δυναμικό είναι αυτές που παρουσιάζονται με κόκκινο χρώμα, δηλαδή στο Βόρειο Αιγαίο η Σαμοθράκη και η Λήμνος, η Νότιος Εύβοια, στις Κυκλάδες η Τήνος και η Μύκονος, η Ίος, η Αμοργός και η Σαντορίνη, στα Δωδεκάνησα η Αστυπάλαια, η Κάρπαθος η Κάσος και η Νότια Ρόδος, στην Κρήτη η Ανατολική της πλευρά και τέλος τα Κύθηρα Νότια της Πελοποννήσου. Από αυτές τις περιοχές, αυτές που παρουσιάζουν έντονο κόκκινο χρώμα σε όλη τους την επικράτεια, κάτι που παραπέμπει στο υψηλότερο αιολικό δυναμικό, με τιμές μεταξύ 10 και 20, είναι η Σαμοθράκη, η Μύκονος, η Τήνος, τα Κύθηρα και η Κάρπαθος.

4.2. Μέση Ετήσια Ταχύτητα Ανέμου

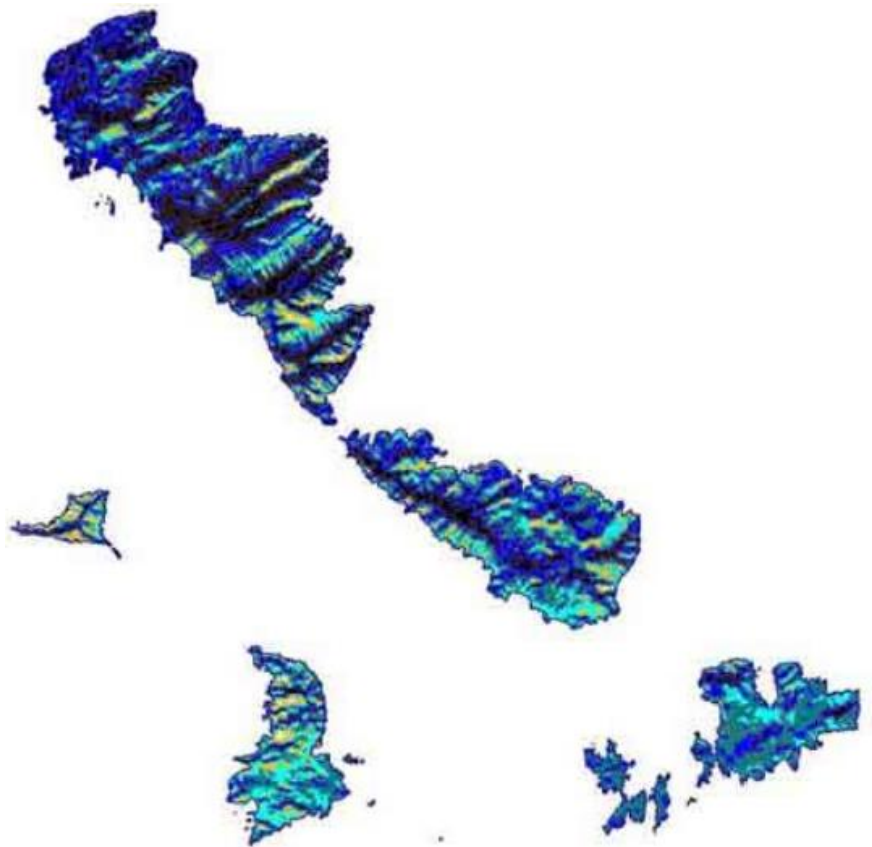
Άλλος ένας Γεωπληροφοριακός Χάρτης που παρέχει δεδομένα σχετικά με τη μέση ετήσια τιμή ταχύτητας ανέμου είναι αυτός του Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ) (<http://www.cres.gr/kape/datainfo/maps.htm>). Έχοντας ως βάση τα στοιχεία του Γεωπληροφοριακού Χάρτη της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας και λαμβάνοντας υπόψη, ότι ο συγκεκριμένος χάρτης δεν μπορεί να παρέχει αναλυτικότερες πληροφορίες, παρουσιάζονται τα γραφικά δεδομένα του Γεωπληροφοριακού Χάρτη του ΚΑΠΕ, για τις περιοχές με έντονο αιολικό δυναμικό. Στους παραγόμενους χάρτες απεικονίζεται η μέση ετήσια τιμή ταχύτητας ανέμου σύμφωνα με τη χρωματική διαβάθμιση της Εικόνας 9.



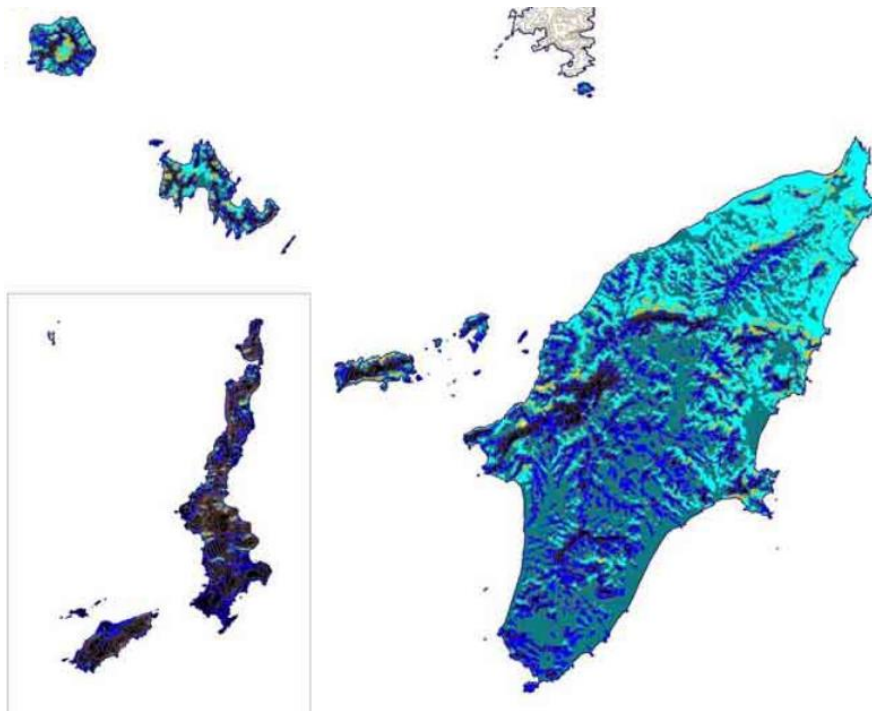
Εικόνα 9. Χρωματική διαβάθμιση της μέσης ετήσιας τιμής ταχύτητας ανέμου στους χάρτες της ΚΑΠΕ.



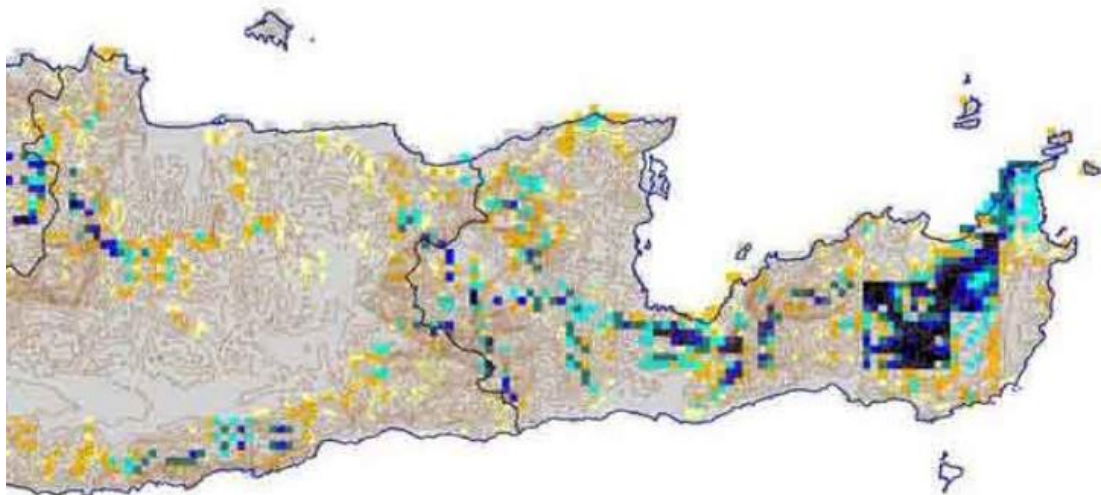
Εικόνα 10. Η μέση ετήσια τιμή ταχύτητας ανέμου στην Κάρπαθο (αριστερά) και στην Σαμοθράκη (δεξιά)



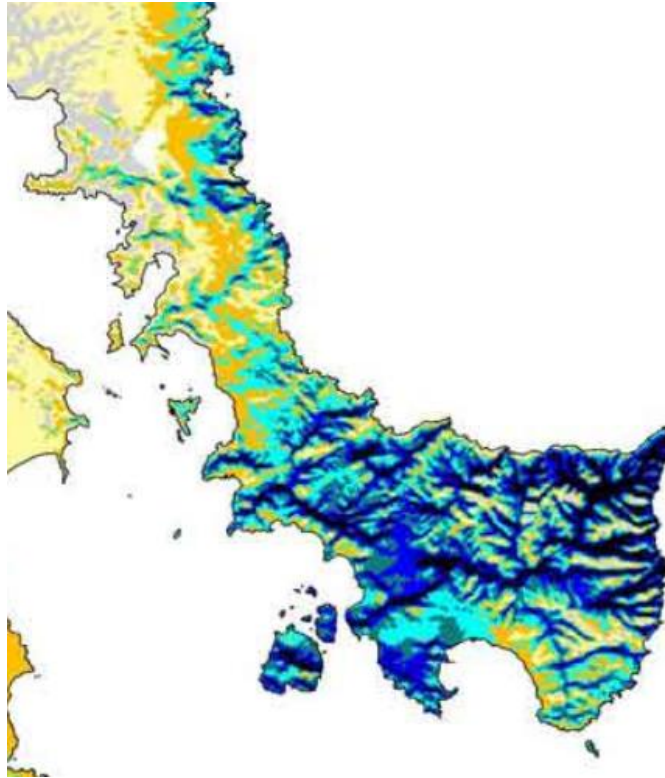
Εικόνα 1. Η μέση ετήσια τιμή ταχύτητας ανέμου στην Άνδρο, Τήνο, Μύκονο και Σύρο



Εικόνα 2. Η μέση ετήσια τιμή ταχύτητας ανέμου στην Ρόδο, την Κάρπαθο, την Κάσο, τη Νίσυρο και την Τήλο.



Εικόνα 3. Η μέση ετήσια τιμή ταχύτητας ανέμου στη Δυτική Κρήτη.



Εικόνα 4. Η μέση ετήσια τιμή ταχύτητας ανέμου στη Νότιο Εύβοια.

Όπως φαίνεται από τις εικόνες 10, 11, 12, 13 και 14, οι περιοχές με τη μεγαλύτερη μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου στην Ελληνική επικράτεια είναι η Σαμοθράκη, η Κάρπαθος και η Κάσος, η Άνδρος, η Νότιος Εύβοια στην περιοχή της Καρύστου, καθώς και το ηπειρωτικό τμήμα της Κρήτης, στην περιοχή του Νομού Αγίου Νικολάου, Νότια της Σητείας.

4.3. Τελική Πρόταση Χωροθέτησης Αιολικών Πάρκων

Συνδυάζοντας τα αποτελέσματα των πληροφοριών που λαμβάνονται από τους Γεωπληροφοριακούς Χάρτες της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας (Εικόνες 6, 7 και 8) καθώς και από τους χάρτες της ΚΑΠΕ (Εικόνες 10, 11, 12, 13 και 14), συμπεραίνουμε ότι για την εγκατάσταση αιολικών πάρκων, οι καταλληλότερες περιοχές στην Ελληνική επικράτεια, ως προς το αιολικό τους δυναμικό και τη μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου, είναι η Σαμοθράκη, η Κάρπαθος, η Άνδρος και η περιοχή της Καρύστου. Αυτές οι περιοχές παρουσιάζουν το εντονότερο αιολικό δυναμικό και ταυτόχρονα, τη μέγιστη μέση ετήσια ταχύτητα ανέμων.

5. Συμπεράσματα

Ο άνεμος αποτελεί μια από τις αρχαιότερες πηγές ενέργειας, καθώς έχει χρησιμοποιηθεί ως βασική πηγή για περισσότερα από 1500 χρόνια. Σε περιόδους όπου άλλες πηγές ενέργειας ήταν άγνωστες ή σπάνιες, η αιολική ενέργεια αποτέλεσε ένα επιτυχημένο μέσο ανανεώσιμης ενέργειας, φιλικής προς το περιβάλλον. Στο πλαίσιο της νέας ενεργειακής πολιτικής, πολλές χώρες έχουν στραφεί στην παραγωγή ενέργειας μέσω του ανέμου. Τα προγράμματα που υλοποιούνται σχετίζονται με τη διαθεσιμότητα πόρων, την επιλογή της καταλληλότερης τοποθεσίας, τις τεχνολογικές επιλογές, τις απαιτήσεις για έρευνα και ανάπτυξη, τις δυνητικές επιδράσεις στα εθνικά ενεργειακά ισοζύγια, τις οικονομικές και κοινωνικές επιρροές και τις στρατηγικές εφαρμογής. Ωστόσο, οι συγκεκριμένες προσεγγίσεις και σχέδια διέφεραν σημαντικά από χώρα σε χώρα.

Η αιολική ενέργεια σχετίζεται άμεσα με την εκμετάλλευση της κινητικής αιολικής ενέργειας. Αυτή είναι η ενέργεια που περιέχεται στην ίδια την κίνηση του αέρα. Δεδομένου ότι πρόκειται για μια μορφή μηχανικής ενέργειας ενός κινούμενου ρευστού, ο ποσοτικός προσδιορισμός του απαιτεί στοιχεία μηχανικής ρευστού. Στην παρούσα εργασία εξετάστηκαν οι έννοιες της κινητικής ενεργειακής ροής και περιγράφηκε η θεμελιώδης εξίσωση της αιολικής ενέργειας, ποσοτικοποιώντας τον ρυθμό της ροής της αιολικής ενέργειας. Εισήχθησαν τυπικές μετρήσεις πόρων αιολικής ενέργειας και αποδοτικότητας χρήσης. Η φύση του ανέμου συζητήθηκε με μια σύντομη επισκόπηση της μετεωρολογίας της αιολικής ενέργειας.

Τέλος, συνδυάζοντας τα αποτελέσματα των πληροφοριών που λαμβάνονται από τους Γεωπληροφοριακούς Χάρτες της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας καθώς και από τους χάρτες της ΚΑΠΕ, προτάθηκαν ορισμένες περιοχές της Ελληνικής επικράτειας, που παρουσιάζουν τις βέλτιστες συνθήκες για την εγκατάσταση αιολικών πάρκων. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της εργασίας, για την εγκατάσταση αιολικών πάρκων, οι καταλληλότερες περιοχές στην Ελληνική επικράτεια, ως προς το αιολικό τους δυναμικό και τη μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου, είναι η Σαμοθράκη, η Κάρπαθος, η Άνδρος και η περιοχή της Καρύστου. Αυτές οι περιοχές παρουσιάζουν το εντονότερο αιολικό δυναμικό και ταυτόχρονα, τη μέγιστη μέση ετήσια ταχύτητα ανέμων.

Βιβλιογραφία

- Abu-Taha, R. (2011, July). Multi-criteria applications in renewable energy analysis: A literature review. In *2011 Proceedings of PICMET'11: Technology Management in the Energy Smart World (PICMET)* (pp. 1-8). IEEE.
- Alonso, M., Amaris, H., & Alvarez-Ortega, C. (2012). A multiobjective approach for reactive power planning in networks with wind power generation. *Renewable Energy*, *37*(1), 180-191.
- Al-Shabeeb, A. R., Al-Adamat, R., & Mashagbah, A. (2016). AHP with GIS for a preliminary site selection of wind turbines in the North West of Jordan. *International Journal of Geosciences*, *7*(10), 1208.
- Antucheviciene, J., Zakarevicius, A., & Zavadskas, E. K. (2011). Measuring congruence of ranking results applying particular MCDM methods. *Informatica*, *22*(3), 319-338.
- Awasthi, A., Chauhan, S. S., & Goyal, S. K. (2011). A multi-criteria decision making approach for location planning for urban distribution centers under uncertainty. *Mathematical and Computer Modelling*, *53*(1-2), 98-109.
- Aydin, N. Y., Kentel, E., & Duzgun, S. (2010). GIS-based environmental assessment of wind energy systems for spatial planning: A case study from Western Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *14*(1), 364-373.
- Baban, S. M., & Parry, T. (2001). Developing and applying a GIS-assisted approach to locating wind farms in the UK. *Renewable energy*, *24*(1), 59-71.
- Baban, S. M., & Parry, T. (2001). Developing and applying a GIS-assisted approach to locating wind farms in the UK. *Renewable energy*, *24*(1), 59-71.
- Banos, R., Manzano-Agugliaro, F., Montoya, F. G., Gil, C., Alcayde, A., & Gómez, J. (2011). Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, *15*(4), 1753-1766.
- Baud, I. S. A., Sridharan, N., & Pfeffer, K. (2008). Mapping urban poverty for local governance in an Indian mega-city: the case of Delhi. *Urban Studies*, *45*(7), 1385-1412.

- Betz, A. (2013). The maximum of the theoretically possible exploitation of wind by means of a wind motor. *Wind Engineering*, 37(4), 441-446.
- Betz, A. 1926. *Windenergie und ihre Ausnótzung durch Windmóhlen*. Vandenhoe & Ruprecht, Göttingen.
- Beurskens, J., Hoult, M., van der Varst, P. and Smulders, P. 1974. *Windenergie*. Technical College Eindhoven, Department of Nature Studies, Working group Transport Physics, Eindhoven.
- Bevrani, H., & Daneshmand, P. R. (2011). Fuzzy logic-based load-frequency control concerning high penetration of wind turbines. *IEEE systems journal*, 6(1), 173-180.
- Chatterjee, N., & Bose, G. (2013). A COPRAS-F base multi-criteria group decision making approach for site selection of wind farm. *Decision Science Letters*, 2(1), 1-10.
- Chen, C. T. (2000). Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment. *Fuzzy sets and systems*, 114(1), 1-9
- Dey, B., Bairagi, B., Sarkar, B. and Sanyal, S. (2012) A MOORA based fuzzy multi-criteria decision
- Dongmei, Z., Yuchen, Z., & Xu, Z. (2011, September). Research on wind power forecasting in wind farms. In *2011 IEEE Power Engineering and Automation Conference* (Vol. 1, pp. 175-178). IEEE.
- Elliott, D. L., & Barchet, W. R. (1980). *Wind energy resources atlas. Volume 1. Northwest region* (No. PNL-3195-WERA-1). Battelle Pacific Northwest Labs., Richland, WA (USA).
- Elliott, D. L., Aspliden, C. I., Gower, G. L., & CG Holladay, M. N. (1987). *Wind Energy Resource Assessment of The Caribbean and Central America* (No. PNL-6234). Pacific Northwest National Lab.(PNNL), Richland, WA (United States).
- Ender, C. 2011. Windenergienutzung in Deutschland; Stand 31-12-2010. *DEWI Magazine*, February 2011.
- Engineering Computations, 3, 649–662.

- Giupponi, C., Mysiak, J., Fassio, A., & Cogan, V. (2004). MULINO-DSS: a computer tool for sustainable use of water resources at the catchment scale. *Mathematics and Computers in Simulation*, 64(1), 13-24.
- Golding, E.W. 1955. *The Generation of Electricity by Wind Power*. E. and F.N. Spon, London.
- Gorsevski, P. V., Cathcart, S. C., Mirzaei, G., Jamali, M. M., Ye, X., & Gomezdelcampo, E. (2013). A group-based spatial decision support system for wind farm site selection in Northwest Ohio. *Energy Policy*, 55, 374-385.
- Greaves, W.F. and Carpenter, J.H. 1969. *A Short History of Mechanical Engineering*. Longmans Green and Co., London.
- Hau, E. 2000. *Wind Turbines. Fundamentals, Technologies, Application, Economics*. Springer Verlag, Berlin.
- Hrayshat, E. S. (2005). Wind availability and its potentials for electricity generation in Tafila, Jordan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 9(1), 111-117.
- Hydrocarbon Balance Sheet of Iran. (2005). International Institute of Energy, Ministry of Petroleum Republic of Iran, p. 400. (In Persian)
- International Bulletin of Business Administration, 10, 62-75.
- Jones, D. F., & Wall, G. (2016). An extended goal programming model for site selection in the offshore wind farm sector. *Annals of Operations Research*, 245(1-2), 121-135.
- Jozi, S. A., & Rezaian, S. (2010, August). Presentation of strategic management plan in ecotourism development through SWOT (Case study: Qeshm Island). In *2010 International Conference on Chemistry and Chemical Engineering* (pp. 358-362). IEEE.
- Kablan, M. M. (2004). Decision support for energy conservation promotion:: an analytic hierarchy process approach. *Energy policy*, 32(10), 1151-1158.
- Kalmikov, A. (2013). Uncovering MIT wind myths through micro-climatological CFD analysis. *arXiv preprint arXiv:1310.3538*.

- Kalmikov, A. (2017). Wind power fundamentals. In *Wind Energy Engineering* (pp. 17-24). Academic Press.
- Kang, M. S., Chen, C. S., Ke, Y. L., Lee, A. H., Ku, T. T., & Kang, H. Y. (2013). Applications of FANP and BOCR in Renewable Energy—Study on the Choice of the Sites for Wind Farms. *IEEE transactions on industry applications*, 49(2), 982-989.
- Kim, J. Y., Oh, K. Y., Kang, K. S., & Lee, J. S. (2013). Site selection of offshore wind farms around the Korean Peninsula through economic evaluation. *Renewable Energy*, 54, 189-195.
- Latinopoulos, D., & Kechagia, K. (2015). A GIS-based multi-criteria evaluation for wind farm site selection. A regional scale application in Greece. *Renewable Energy*, 78, 550-560.
- making approach for supply chain strategy selection. *International Journal of Industrial*
- Malczewski, J. (1999). *GIS and multicriteria decision analysis*. John Wiley & Sons.
- Mavrotas, G., Diakoulaki, D., & Capros, P. (2003). Combined MCDA–IP approach for project selection in the electricity market. *Annals of Operations Research*, 120(1-4), 159-170.
- Meadows, D.H. Meadows, D.L., Randers, J. and Behrens III, W.W. 1972. *The Limits to Growth. A report for the Club of Rome's project on the Predicament of Mankind*. Universe Books New York.
- Moradi, J.S., Olfat, L., Ayazi, S.A. & Amiri, M. (2011). Group Decision Making Process for Supplier
- Mourmouris, J. C., & Potolias, C. (2013). A multi-criteria methodology for energy planning and developing renewable energy sources at a regional level: A case study Thassos, Greece. *Energy Policy*, 52, 522-530.
- Musial, W., Butterfield, S., & McNiff, B. (2007). *Improving wind turbine gearbox reliability* (No. NREL/CP-500-41548). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).

- Needham, J. 1965. *Science and Civilization in China*, Vol. IV, Section 27. Cambridge University Press, Cambridge.
- Notebaart, J. 1972 *Windmóhlen*. Mouton Verlag, Den Haag, Paris.
- Okulov, V. L., & van Kuik, G. A. (2012). The Betz–Joukowsky limit: on the contribution to rotor aerodynamics by the British, German and Russian scientific schools. *Wind Energy*, 15(2), 335-344.
- Organisation for European Economic Co-operation. *Technical papers presented to the Wind Power Working Party*.
- Ortegon, K., Nies, L. F., & Sutherland, J. W. (2013). Preparing for end of service life of wind turbines. *Journal of Cleaner Production*, 39, 191-199.
- Palmer Cosslett, P. 1948. *Power from the Wind*. Van Nostrand Reinhold Company, New York.
- PIELKE SR, Roger A. *Mesoscale meteorological modeling*. Academic press, 2013.
- Podvezko, V. (2011). Comparative analysis of MCDA methods SAW and COPRAS. *Inžinerinè ekonomika*, 134-146.
- Qiao, J., Min, Y., & Lu, Z. (2006, October). Optimal reactive power flow in wind generation integrated power system. In *2006 International Conference on Power System Technology* (pp. 1-5). IEEE.
- regeneration alternatives. *Building and Environment*, 42(1), 436–451
- Reynolds, J. 1970. *Windmills and Watermills*. Hugh Evelyn, London.
- Rezaei-Moghaddam, K., & Karami, E. (2008). A multiple criteria evaluation of sustainable agricultural development models using AHP. *Environment, Development and Sustainability*, 10(4), 407-426.
- Rezaian, S., & Jozi, S. A. (2016). Application of multi criteria decision-making technique in site selection of wind farm-a case study of Northwestern Iran. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 44(5), 803-809.
- Saaty, T. (1980). *The analytic process: planning, priority setting, resources allocation*. McGraw, New York.

- Saaty, T. L. (1988). What is the analytic hierarchy process?. In *Mathematical models for decision support* (pp. 109-121). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Sareni, B., Abdelli, A., Roboam, X., & Tran, D. H. (2009). Model simplification and optimization of a passive wind turbine generator. *Renewable Energy*, 34(12), 2640-2650.
- Selection with VIKOR under Fuzzy Circumstance Case Study: An Iranian Car Parts Supplier.
- Siddiqi, A. H., Khan, S., & Rehman, S. (2005). Wind speed simulation using wavelets. *American Journal of Applied Sciences*, 2(2), 557-564.
- Sideratos, G., & Hatziargyriou, N. D. (2007). An advanced statistical method for wind power forecasting. *IEEE Transactions on power systems*, 22(1), 258-265.
- Stokhuyzen, F. 1972. *Molens*. Unieboek, Bussum.
- Tegou, L. I., Polatidis, H., & Haralambopoulos, D. A. (2010). Environmental management framework for wind farm siting: Methodology and case study. *Journal of environmental management*, 91(11), 2134-2147.
- Tegou, L. I., Polatidis, H., & Haralambopoulos, D. A. (2010). Environmental management framework for wind farm siting: Methodology and case study. *Journal of environmental management*, 91(11), 2134-2147.
- UNESCO. 1954. *Wind and Solar Energy*. Proceedings of the New Delhi Symposium. Volume I, Wind Energy.
- Uyan, M. (2013). GIS-based solar farms site selection using analytic hierarchy process (AHP) in Karapinar region, Konya/Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 11-17.
- Van Haaren, R., & Fthenakis, V. (2011). GIS-based wind farm site selection using spatial multi-criteria analysis (SMCA): Evaluating the case for New York State. *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(7), 3332-3340.
- Wang, X., Guo, P., & Huang, X. (2011). A review of wind power forecasting models. *Energy procedia*, 12, 770-778.

- WECSP (2009). Capacity Building in Wind Energy and Concentrating Solar Power in Jordan. <http://www.wecsp.org.jo/content/energy-jordan>
- Yazdani, M., Alidoosti, A., & Zavadskas, E. K. (2011). Risk analysis of critical infrastructures using fuzzy COPRAS. *Economic research-Ekonomska istraživanja*, 24(4), 27-40.
- Yunna, W., & Geng, S. (2014). Multi-criteria decision making on selection of solar-wind hybrid power station location: a case of China. *Energy Conversion and Management*, 81, 527-533.
- Yun-na, W., Yi-sheng, Y., Tian-tian, F., Li-na, K., Wei, L., & Luo-jie, F. (2013). Macro-site selection of wind/solar hybrid power station based on Ideal Matter-Element Model. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 50, 76-84.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and control*, 8(3), 338-353.
- Zare, M., & Niknam, T. (2013). A new multi-objective for environmental and economic management of Volt/Var Control considering renewable energy resources. *Energy*, 55, 236-252.
- Zarkesh, M. M. K., Ghoddusi, J., Zaredar, N., Soltani, M. J., Jafari, S., & Ghadirpour, A. (2010). Application of spatial analytical hierarchy process model in land use planning. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 8(2 part 2), 970-975.
- Zavadskas, E.K., & Antuchevičienė, J. (2007). Multiple criteria evaluation of rural building's