

Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών

Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών

Διαχείριση και Προστασία Περιβάλλοντος

Μεταπτυχιακή Διατριβή



Εκτίμηση του Αιολικού Δυναμικού σε Περιοχές με Επίπεδο και Σύνθετο Ανάγλυφο.

Παγώνα Σπίθα

**Επιβλέπων Καθηγητής
Γεώργιος Ξύδης**

Δεκέμβριος 2018

Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών

Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών

Διαχείριση και Προστασία Περιβάλλοντος

Μεταπτυχιακή Διατριβή

Εκτίμηση του Αιολικού Δυναμικού σε Περιοχές με Επίπεδο και Σύνθετο Ανάγλυφο.

Παγώνα Σπίθα

**Επιβλέπων Καθηγητής
Γεώργιος Ξύδης**

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή υποβλήθηκε προς μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων για απόκτηση μεταπτυχιακού τίτλου σπουδών στο πρόγραμμα Διαχείριση και Προστασία Περιβάλλοντος από τη Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών του Ανοικτού Πανεπιστημίου Κύπρου.

Δεκέμβριος 2018

Περίληψη

Ο κλάδος των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και κυρίως ο τομέας της αιολικής ενέργειας παρουσιάζει ραγδαία ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια. Επομένως, θεωρείται πολύ σημαντική η ακριβής εκτίμηση του αιολικού δυναμικού σε μία περιοχή ανάπτυξης αιολικών σταθμών. Βασικό ερώτημα που στοχεύει να απαντήσει αυτή η μεταπτυχιακή διατριβή είναι σε τι βαθμό τα προγράμματα προσομοίωσης της ροής του ανέμου, που χρησιμοποιούνται για την αναγωγή των ανεμολογικών συνθηκών από το σημείο μέτρησης στα σημεία εγκατάστασης των ανεμογεννητριών, προσεγγίζουν ή αποκλίνουν από τις πραγματικές τιμές της ταχύτητας του ανέμου. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις από ανεμολογικούς ιστούς σε δυο περιοχές με διαφορετικό ανάγλυφο εδάφους, σε συνδυασμό με τη χρήση του γραμμικού μοντέλου ροής του ανέμου WASP, μέσα από την εφαρμογή του προγράμματος WindPro.

Συγκεκριμένα, έγινε εκτίμηση του αιολικού δυναμικού σε θέσεις ανεμογεννητριών σε εν λειτουργία αιολικούς σταθμούς, σε περιοχές με σύνθετο και επίπεδο ανάγλυφο εδάφους. Από την σύγκριση των αποτελεσμάτων διαπιστώθηκε ότι, στην περίπτωση του σύνθετου ανάγλυφου τα σφάλματα στην πρόβλεψη της ταχύτητας του ανέμου ήταν πολύ μεγαλύτερα συγκριτικά με τα αντίστοιχα σφάλματα στην περίπτωση του επίπεδου ανάγλυφου εδάφους. Το μέσο σφάλμα στο σύνθετο ανάγλυφο βρέθηκε μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερο απ' ό,τι στο επίπεδο ανάγλυφο. Βρέθηκε ότι υπάρχει αξιοσημείωτη συσχέτιση μεταξύ του σφάλματος πρόβλεψης του μοντέλου και της χιλιομετρικής απόστασης των ανεμογεννητριών από το σημείο μέτρησης και στις 2 κατηγορίες εδάφους, ενώ για την περίπτωση του σύνθετου ανάγλυφου διαπιστώθηκε ο ιδιαίτερα σημαντικός ρόλος που παίζει η υψομετρική απόσταση στη διαμόρφωση του σφάλματος. Για την περίπτωση της περιοχής με σύνθετο ανάγλυφο εδάφους, προτείνονται ως τρόποι βελτίωσης της πρόβλεψης του ανέμου, η εκτίμηση του αιολικού δυναμικού μέσω της εφαρμογής εξειδικευμένων μοντέλων ρευστοδυναμικής (CFD) και η εγκατάσταση ανεμολογικών ιστών σε αποστάσεις μικρότερες των 2km από τις θέσεις εγκατάστασης των ανεμογεννητριών, ώστε να αποτυπώνονται με ακρίβεια οι ανεμολογικές συνθήκες σε θέσεις με έντονες κλίσεις εδάφους και ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τοπογραφίας.

Λέξεις κλειδιά: αιολικό δυναμικό, πρόβλεψη ανέμου, αξιολόγηση αιολικού δυναμικού, σύνθετο ανάγλυφο εδάφους, επίπεδο ανάγλυφο εδάφους, μοντέλο WASP.

Summary

Renewable Energy Sources and especially the wind energy have been growing rapidly in recent years. Therefore, the accurate wind potential forecasting is very important in a wind farm development area. The aim of this postgraduate dissertation intends to investigate the performance of the wind flow models, which are used to extend the wind conditions from the measurement site to the wind turbine positions and also if the prediction wind from the models approach or deviate from the actual wind speed. For this purpose, onsite measurements from meteorological masts were used in two areas with different terrain, combined with the use of the linear wind flow model WAsP, through the implementation of the WindPro program.

In particularly, the wind potential in operating wind turbines was assessed, in areas with a complex and flat terrain. From the comparison of the results it was found that, in the case of the complex terrain the prediction errors in the wind velocity were much larger compared to the corresponding errors in the case of the flat terrain. The average error in the complex terrain was found to be an order of magnitude larger than the one found in the case of flat terrain. It was noticed that there is a significant correlation between the prediction model error and the mileage of the wind turbines and measurement site in the two terrain cases, while in the case of the complex terrain the elevational distance has a particularly important role in error's configuration. For the case of the complex terrain area the proposed ways to improve the wind prediction are based on the wind resource assessment carried out through the non-linear wind flow model (CFD) and the installation of meteorological masts at distances smaller than 2km from the wind turbines locations, in order to accurately predict the wind conditions on sites with strong ground inclinations and particular features of topography.

Key words: wind potential, wind prediction, wind resource assessment, complex terrain, flat terrain, WAsP model.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επιβλέποντα Καθηγητή μου Δρ. Γιώργο Ξύδη για την καθοδήγηση και την συμβολή του στην εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να δώσω στην εταιρεία ΤΕΡΝΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΒΕΤΕ και κυρίως στη Διευθύντρια του τμήματος Εργαστηρίου Μετρήσεων Αιολικού Δυναμικού κα Στέλλα Ζαχαρία, για την χορήγηση των ανεμολογικών δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη, και για τις πολύτιμες υποδείξεις και κατευθύνσεις της. Είμαι ευγνώμων επίσης στην κα Δέσποινα Ρίζου, Διδάκτορα του Τμήματος Φυσικής του Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, για την απλόχερη επιστημονική βοήθεια που μου προσέφερε.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους για την ηθική και την υλική υποστήριξη που μου πρόσφεραν κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της μεταπτυχιακής μου διατριβής.

Περιεχόμενα

Περίληψη	iii
Summary	iv
Ευχαριστίες.....	v
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή.....	1
Κεφάλαιο 2 Α.Π.Ε - Αιολική ενέργεια	2
2.1. Εισαγωγή	2
2.2. Α.Π.Ε.....	2
2.2.1. Σπουδαιότητα των Α.Π.Ε.....	4
2.2.2. Ανάπτυξη των Α.Π.Ε. σε παγκόσμιο, ευρωπαϊκό και εθνικό επίπεδο.....	5
2.3. Αιολική ενέργεια.....	12
2.3.1. Πλεονεκτήματα αιολικής ενέργειας	15
2.3.2. Μειονεκτήματα αιολικής ενέργειας.....	16
Κεφάλαιο 3 Αιολικό Δυναμικό	18
3.2. Άνεμος	21
3.2.1. Ταχύτητα του ανέμου	26
3.2.2. Διεύθυνση του ανέμου.....	28
3.2.3. Κατανομή της ταχύτητας του ανέμου.....	30
3.2.4. Τύρβη	33
3.3. Επίδραση της τοπογραφίας στον άνεμο	33
3.3.1. Τραχύτητα εδάφους.....	34
3.3.2. Ορογραφία εδάφους	34
3.3.3. Αντικείμενα - Εμπόδια.....	34
3.4. Μορφολογία εδάφους.....	35
3.4.1. Τοποθεσία με σύνθετο ανάγλυφο εδάφους	35
3.4.2. Τοποθεσία με επίπεδο ανάγλυφο εδάφους	35
3.5. Μέτρηση αιολικού δυναμικού	36
Κεφάλαιο 4 Μεθοδολογία.....	42
4.1. Εισαγωγή	42
4.2. Ανεμολογικά δεδομένα	43
4.3. Τοπογραφία εδάφους	43
4.4. Τραχύτητα εδάφους	44
4.5. Λογισμικά προγράμματα WindPro - WAsP	44

4.5.1.	Δημιουργία αιολικού χάρτη	45
4.5.2.	Μακροχρόνιες πηγές ανεμολογικών δεδομένων	46
4.5.3.	Διαδικασία για την εκτίμηση του αιολικού δυναμικού.....	47
Κεφάλαιο 5 Εκτίμηση αιολικού δυναμικού σε σύνθετο ανάγλυφο.....		50
5.1.	Περιγραφή της θέσης μέτρησης του αιολικού δυναμικού.....	50
5.2.	Αναγωγή της ταχύτητας στο ύψος πλήμνης της ανεμογεννήτριας.....	56
5.3.	Μακροχρόνια διόρθωση της ταχύτητας στο ύψος πλήμνης της ανεμογεννήτριας	56
5.4.	Περιγραφή του αιολικού πάρκου	58
5.5.	Αποτελέσματα.....	61
Κεφάλαιο 6 Εκτίμηση αιολικού δυναμικού σε επίπεδο ανάγλυφο.....		69
6.1.	Περιγραφή της θέσης μέτρησης του αιολικού δυναμικού.....	69
6.2.	Αναγωγή της ταχύτητας στο ύψος πλήμνης της ανεμογεννήτριας.....	75
6.3.	Μακροχρόνια διόρθωση της ταχύτητας στο ύψος πλήμνης της ανεμογεννήτριας	76
6.4.	Περιγραφή του αιολικού πάρκου	77
6.5.	Αποτελέσματα.....	80
Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα-Συζήτηση-Προτάσεις.....		86
7.1.	Εισαγωγή.....	86
7.2.	Συζήτηση αποτελεσμάτων.....	86
7.3.	Προτάσεις.....	87
Βιβλιογραφία		89

Πίνακας Πινάκων

Πίνακας 1.	Η ανεμομετρική κλίμακα Beaufort που ισχύει για τους ανέμους της ξηράς...	28
Πίνακας 2.	Τυπικές τιμές του συντελεστή διάτμησης α (Ανδρίτσος, 2008).....	31
Πίνακας 3.	Ταξινόμηση των κατηγοριών της τραχύτητας του εδάφους(Ragheb, 2012)	32
Πίνακας 4.	Χαρακτηριστικά του ανεμολογικού ιστού (Mast_1) για την περίπτωση του σύνθετου ανάγλυφου.....	51
Πίνακας 5.	Συχνότητα εμφάνισης του ανέμου ανά διεύθυνση στη θέση του ανεμολογικού ιστού (Mast_1).....	54

Πίνακας 6. Αποτελέσματα της διαδικασίας MCP των δεδομένων, από τη θέση του ανεμολογικού ιστού Mast_1, για τη μακροχρόνια διόρθωση της ταχύτητας του ανέμου στο ύψος πλήμνης των ανεμογεννητριών.....	57
Πίνακας 7. Χιλιομετρική και υψομετρική απόσταση μεταξύ του ανεμολογικού ιστού (Mast_1) και της κάθε ανεμογεννήτριας.....	61
Πίνακας 8. Απόκλιση της προβλεπόμενης από την πραγματική μέση ετήσια τιμή της ταχύτητας, ανά ανεμογεννήτρια, ανά έτος, για την περίπτωση του σύνθετου ανάγλυφου εδάφους.....	63
Πίνακας 9. Συνολική απόκλιση της μέσης ετήσιας ταχύτητας του ανέμου, ανά ανεμογεννήτρια, για τη συνολική διάρκεια λειτουργίας του αιολικού σταθμού (8 έτη), για την περίπτωση του σύνθετου ανάγλυφου εδάφους.....	64
Πίνακας 10. Χαρακτηριστικά του ανεμολογικού ιστού (Mast_2) για την περίπτωση του επίπεδου ανάγλυφου.....	70
Πίνακας 11. Συχνότητα εμφάνισης του ανέμου, ανά διεύθυνση, στη θέση του ανεμολογικού ιστού (Mast_2).....	73
Πίνακας 12. Αποτελέσματα της διαδικασίας MCP των δεδομένων, από τη θέση του ανεμολογικού ιστού Mast_2, για τη μακροχρόνια διόρθωση της ταχύτητας του ανέμου στο ύψος πλήμνης των ανεμογεννητριών.....	76
Πίνακας 13. Χιλιομετρική και υψομετρική απόσταση μεταξύ του ανεμολογικού ιστού (Mast_2) και της κάθε ανεμογεννήτριας για την περίπτωση του επίπεδου ανάγλυφου εδάφους.....	80
Πίνακας 14. Απόκλιση της προβλεπόμενης από την πραγματική μέση ετήσια τιμή της ταχύτητας, ανά ανεμογεννήτρια, ανά έτος, για την περίπτωση του επίπεδου ανάγλυφου εδάφους.....	82
Πίνακας 15. Συνολική απόκλιση της μέσης ετήσιας ταχύτητας του ανέμου, ανά ανεμογεννήτρια, για τη συνολική διάρκεια λειτουργίας του αιολικού σταθμού (5 έτη), για την περίπτωση του επίπεδου ανάγλυφου εδάφους.....	83

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1.Κυλινδρική διατομή του αέρα μπροστά από τον δρομέα της ανεμογεννήτριας.....	14
--	----

Εικόνα 2. Αναπαράσταση της γενικής κυκλοφορίας των ανέμων (Πηγή : Wikimedia Commons , Earth Global Circulation)	23
Εικόνα 3. Κυκλώνες και αντικυκλώνες	24
Εικόνα 4. Θαλάσσια και απόγειος αύρα.....	25
Εικόνα 5. Αύρα κοιλάδας και ορέων.....	26
Εικόνα 6. Ροδόγραμμα του ανέμου στο οποίο απεικονίζονται οι βασικές διευθύνσεις των ανέμων και οι διάφορες ονομασίες τους.....	29
Εικόνα 7. Σκαρίφημα ενός σωληνωτού ανεμολογικού ιστού.....	38
Εικόνα 8. Σκαρίφημα ενός δικτυωτού ανεμολογικού ιστού.....	39
Εικόνα 9. Τύποι ανεμομέτρων.....	40
Εικόνα 10. Τύποι ανεμοδεικτών.....	41
Εικόνα 11. Ημερήσιο προφίλ του ανέμου στο ύψος μέτρησης του ανεμολογικού ιστού (Mast_1).....	52
Εικόνα 12. Ροδόγραμμα συχνότητας του ανέμου, ανά διεύθυνση, στη θέση του ανεμολογικού ιστού (Mast_1).....	52
Εικόνα 13. Ροδόγραμμα ενέργειας του ανέμου, ανά διεύθυνση, στη θέση του ανεμολογικού ιστού (Mast_1).....	53
Εικόνα 14. Ροδόγραμμα συχνότητας του ανέμου, ανά διεύθυνση, ανά μήνα, στη θέση του ανεμολογικού ιστού (Mast_1).....	55
Εικόνα 15. Ημερήσιο προφίλ του ανέμου στο ύψος μέτρησης του ανεμολογικού ιστού (Mast_2).....	71
Εικόνα 16. Ροδόγραμμα συχνότητας του ανέμου, ανά διεύθυνση, στη θέση του ανεμολογικού ιστού (Mast_2).....	71
Εικόνα 17. Ροδόγραμμα ενέργειας του ανέμου, ανά διεύθυνση, στη θέση του ανεμολογικού ιστού (Mast_2).....	72
Εικόνα 18. Ροδόγραμμα συχνότητας του ανέμου, ανά διεύθυνση, ανά μήνα, στη θέση του ανεμολογικού ιστού (Mast_2).....	74

Πίνακας Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1. Εξέλιξη της παγκόσμιας εγκατεστημένης ισχύος της αιολικής ενέργειας, ανά έτος (Πηγή: GWEC, 2018).....	7
--	---

Διάγραμμα 2. Εξέλιξη της παγκόσμιας συνολικής εγκατεστημένης ισχύος της αιολικής ενέργειας, ανά έτος (Πηγή: GWEC, 2018).	7
Διάγραμμα 3. Εγκατεστημένη ισχύς, ανά κατηγορία καυσίμου, στην ΕΕ για το έτος 2005 (Πηγή: WindEurope, 2018).	9
Διάγραμμα 4. Εγκατεστημένη ισχύς, ανά κατηγορία καυσίμου, στην ΕΕ για το έτος 2017 (Πηγή: WindEurope, 2018)	10
Διάγραμμα 6. Εγκατεστημένη ισχύς, ανά κατηγορία καυσίμου, για το διασυνδεδεμένο δίκτυο της Ελλάδας, για τα έτη 2012 και 2017(Πηγή: ΛΑΓΗΕ, 2018)	11
Διάγραμμα 7. Συνολική εγκατεστημένη ισχύς, ανά κατηγορία των μονάδων ΑΠΕ, στην Ελλάδα για το έτος 2017 (Πηγή: ΛΑΓΗΕ, 2018)	12
Διάγραμμα 8. Διάγραμμα ροής της διαδικασίας για την εκτίμηση του αιολικού δυναμικού μέσω των λογισμικών προγραμμάτων WindPro και WASP, και τον προσδιορισμό των σφαλμάτων στην προβλεπόμενη ταχύτητα του ανέμου στις θέσεις των ανεμογεννητριών των αιολικών σταθμών.....	49
Διάγραμμα 9. Συσχέτιση μεταξύ της χιλιομετρικής και της υψομετρικής απόστασης της κάθε ΑΓ ως προς τον ανεμολογικό ιστό (Mast_1) σε σχέση με το σφάλμα πρόβλεψης της ταχύτητας του ανέμου, για την περίπτωση του σύνθετου ανάγλυφου εδάφους.	65
Διάγραμμα 10. Γραμμική συσχέτιση μεταξύ της χιλιομετρικής απόστασης της κάθε ΑΓ ως προς τον ανεμολογικό ιστό (Mast_1) σε σχέση με το σφάλμα πρόβλεψης της ταχύτητας. Αναγράφεται και η εξίσωσης της γραμμικής παρεμβολής.	66
Διάγραμμα 11. Γραμμική συσχέτιση μεταξύ της υψομετρικής απόστασης της κάθε ΑΓ ως προς τον ανεμολογικό ιστό (Mast_1) σε σχέση με το σφάλμα πρόβλεψης της ταχύτητας. Αναγράφεται και η εξίσωσης της γραμμικής παρεμβολής.	67
Διάγραμμα 12. Συσχέτιση μεταξύ της χιλιομετρικής και της υψομετρικής απόστασης της κάθε ΑΓ ως προς τον ανεμολογικό ιστό (Mast_2) σε σχέση με το σφάλμα πρόβλεψης της ταχύτητας του ανέμου, για την περίπτωση του επίπεδου ανάγλυφου εδάφους.	83
Διάγραμμα 13. Γραμμική συσχέτιση μεταξύ της χιλιομετρικής απόστασης της κάθε ΑΓ ως προς τον ανεμολογικό ιστό (Mast_2) σε σχέση με το σφάλμα πρόβλεψης της ταχύτητας. Αναγράφεται και η εξίσωσης της γραμμικής παρεμβολής.	84
Διάγραμμα 14. Γραμμική συσχέτιση μεταξύ της υψομετρικής απόστασης της κάθε ΑΓ ως προς τον ανεμολογικό ιστό (Mast_2) σε σχέση με το σφάλμα πρόβλεψης της ταχύτητας. Αναγράφεται και η εξίσωσης της γραμμικής παρεμβολής.	85

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Σε μια εποχή όπου η αιολική ενέργεια θεωρείται η ταχύτερα εξελισσόμενη πηγή ενεργειακής εκμετάλλευσης, η ακριβής πρόβλεψη του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής, στην οποία αναμένεται να εγκατασταθεί και να λειτουργήσει μία ανεμογεννήτρια, κρίνεται απολύτως αναγκαία για τον ορθολογικό και αποτελεσματικό σχεδιασμό ενός αιολικού σταθμού. Για το σκοπό αυτό έχουν αναπτυχθεί μοντέλα προσομοίωσης της ροής του ανέμου που μεταφέρουν τις κλιματολογικές συνθήκες από μια δεδομένη θέση μέτρησης στις υποψήφιες θέσεις των ανεμογεννητριών. Σήμερα, στη βιομηχανία της αιολικής ενέργειας, ο προτιμώμενος τρόπος εκτίμησης του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής, συνίσταται στη χρήση αριθμητικών μοντέλων προσομοίωσης της ροής του ανέμου σε συνδυασμό με επιτόπιες ανεμολογικές μετρήσεις. Έχει αποδειχθεί ότι, τα προγράμματα μοντελοποίησης της ροής του ανέμου παρέχουν με σχετικά μεγάλη ακρίβεια προβλέψεις των κλιματολογικών συνθηκών πάνω από ανάγλυφα με επαρκώς ήπια κλίση, ενώ σε περιοχές με έντονες κλίσεις εδάφους ή τραχύ έδαφος παρουσιάζουν μεγαλύτερη αβεβαιότητα στην εκτίμηση του αιολικού δυναμικού.

Είναι γεγονός ότι ένα μεγάλο μέρος των αιολικών σταθμών αναπτύσσονται σε ορεινές περιοχές με πολύπλοκο ανάγλυφο εδάφους, όπου η εκτίμηση του αιολικού δυναμικού είναι περίπλοκη. Οι περιοχές με πολύπλοκο ανάγλυφο κυριαρχούνται από έντονη τοπική ροή ανέμου, με συνέπεια η προσομοίωση της ατμοσφαιρικής ροής του ανέμου

να παρουσιάζει υψηλή αβεβαιότητα. Η ανωμαλία της επιφάνειας του εδάφους και η ατμοσφαιρική αστάθεια είναι ορισμένοι από τους παράγοντες που ωθούν τα αριθμητικά μοντέλα και την μετεωρολογία της αιολικής ενέργειας στα όριά τους.

Το επικρατέστερο λογισμικό μοντελοποίησης της ροής του ανέμου για την αιολική ενέργεια είναι το πρόγραμμα WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program), το οποίο έχει αναπτυχθεί από το Riso DTU National Laboratory της Δανίας. Τα γραμμικά μοντέλα ροής του ανέμου, όπως το WAsP (Troen, 1990), χρησιμοποιούνται ευρέως για την πρόβλεψη της χωρικής μεταβολής της μέσης ταχύτητας του ανέμου, της κατανομής της συχνότητας διεύθυνσης, της διάτμησης του ανέμου και άλλων χαρακτηριστικών του οριακού στρώματος. Τα περισσότερα γραμμικά μοντέλα βασίζονται στη θεωρία των Jackson - Hunt (1975) και χρησιμοποιήθηκαν ευρύτατα στη δεκαετία του 1980, όπου η εκτίμηση του αιολικού δυναμικού περιοριζόταν λόγω της διαθέσιμης υπολογιστικής ισχύος. Επιπρόσθετα, η φήμη των γραμμικών μοντέλων είναι απaráμιλλη εξαιτίας της απλής χρήσης και των γρήγορων αποτελεσμάτων τους, και η επίδοσή τους έχει μελετηθεί σε περιοχές με επίπεδο και σύνθετο ανάγλυφο. Όμως, λόγω των γραμμικών εξισώσεων που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο WAsP, οι χρήστες πρέπει να είναι προσεκτικοί κατά την εφαρμογή του μοντέλου αυτού σε περιπτώσεις με σύνθετο ανάγλυφο εδάφους.

Αντίθετα, τα μη-γραμμικά μοντέλα προσομοίωσης της ροής του ανέμου CFD (Computational Fluid Dynamics) θεωρούνται η επόμενη γενιά των μοντέλων ροής του ανέμου για εφαρμογές της αιολικής ενέργειας. Τα περισσότερα μοντέλα CFD επιλύουν τις συνιστώσες διατήρησης της μάζας και της ορμής των μη-γραμμικών εξισώσεων των Navier-Stokes και εκτελούνται μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση, χρησιμοποιώντας ένα σταθερό προφίλ ανέμου. Για ειδικές περιπτώσεις, όπως για δισδιάστατη ή τρισδιάστατη ροή ανέμου πάνω από εμπόδια και λόφους, τα μοντέλα αυτά λειτουργούν ικανοποιητικά και δίνουν ένα λεπτομερές αποτέλεσμα σχετικά με τα χαρακτηριστικά

του στροβιλισμού της ροής (Biatsuamlak et al, 2004). Αρκετές ερευνητικές μελέτες απέδειξαν ότι τα πιο εξειδικευμένα υπολογιστικά προγράμματα, όπως το μη-γραμμικό μοντέλο CFD, παρουσιάζουν καλύτερη απόδοση σε σχέση με το πρότυπο μοντέλο WASP, σε πολλές αλλά όχι σε όλες τις περιπτώσεις μελέτης (Berge et al., 2006, VanLuvanee et al., 2009, Sumner et al., 2010, Periera et al., 2010).

Στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής είναι η αξιολόγηση της επίδοσης του γραμμικού μοντέλου WASP σε περιοχές με επίπεδο και σύνθετο ανάγλυφο εδάφους, και συγκεκριμένα ο προσδιορισμός των σφαλμάτων του μοντέλου προσομοίωσης της ροής του ανέμου αναφορικά με την εκτίμηση της ταχύτητας στις θέσεις ανεμογεννητριών των δυο αυτών κατηγοριών εδάφους. Καθώς είναι γνωστή η άμεση συσχέτιση της μέσης ταχύτητας του ανέμου με την παραγωγή ενέργειας από μία ανεμογεννήτρια, η καλύτερη αξιολόγηση του αιολικού δυναμικού και η ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων σχετικά με την προβλεπόμενη ταχύτητα παίζουν σημαντικό ρόλο στη μείωση του ρίσκου των επενδύσεων στον τομέα της αιολικής ενέργειας.

Η παρούσα μελέτη βασίστηκε στην ανάλυση των δεδομένων του ανέμου στις δυο περιοχές ενδιαφέροντος με τη χρήση του γραμμικού μοντέλου WASP, που όπως αναφέρθηκε και παραπάνω χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία της αιολικής ενέργειας. Χρησιμοποιήθηκαν κλιματολογικά δεδομένα από μετρήσεις πεδίου από ανεμολογικούς ιστούς στις περιοχές ενδιαφέροντος σε συνδυασμό με βάσεις δεδομένων reanalysis (20 έτη), εφαρμόζοντας τη μεθοδολογία που προτείνεται από τα ισχύοντα διεθνή πρότυπα. Για τον προσδιορισμό των σφαλμάτων του μοντέλου πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ της προβλεπόμενης και της πραγματικής τιμής της ταχύτητας του ανέμου στις θέσεις των ανεμογεννητριών σε δυο εν λειτουργία αιολικούς σταθμούς στις προαναφερθείσες περιοχές ενδιαφέροντος. Στο κεφάλαιο 2 γίνεται μια αναφορά στη σημασία των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας σε παγκόσμιο και εθνικό επίπεδο, και περιγράφεται συνοπτικά η θεωρία της αιολικής ενέργειας. Στη

συνέχεια, στο κεφάλαιο 3 περιγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά του ανέμου και οι παράγοντες που επηρεάζουν τη ροή του ανέμου. Αναλύονται επίσης οι μέθοδοι μέτρησης του αιολικού δυναμικού. Στο κεφάλαιο 4 αναλύεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στην παρούσα μελέτη για τη συλλογή και ανάλυση των ανεμολογικών δεδομένων και για την άντληση των πληροφοριών σχετικά με τα χαρακτηριστικά του εδάφους στις περιοχές ενδιαφέροντος. Γίνεται επίσης περιγραφή των υπολογιστικών προγραμμάτων και της διαδικασίας που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση του αιολικού δυναμικού. Τέλος, στα κεφάλαια 5 και 6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης σε σύνθετο και επίπεδο ανάγλυφο εδάφους αντίστοιχα, ενώ στο κεφάλαιο 7 γίνεται μια σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτών, συνοψίζονται τα συμπεράσματα και παρουσιάζονται οι προτάσεις.

Κεφάλαιο 2

Α.Π.Ε - Αιολική ενέργεια

2.1. Εισαγωγή

Η ραγδαία οικονομική ανάπτυξη των προηγούμενων ετών, οι συνθήκες διαβίωσης αλλά και η λανθασμένη χρήση της ενέργειας συντέλεσαν στην αύξηση της ενεργειακής ζήτησης των χωρών παγκοσμίως, με το μεγαλύτερο μέρος της να ικανοποιείται από τις συμβατικές πηγές ενέργειας (πετρέλαιο, φυσικό αέριο και προϊόντα άνθρακα) από τις οποίες εκλύονται μεγάλες ποσότητες επιβλαβών αερίων στην ατμόσφαιρα. Λόγω της εκτεταμένης χρήσης των συμβατικών καυσίμων τις προηγούμενες δεκαετίες, είναι πλέον εμφανή τα σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα που προκλήθηκαν από την χρήση τους. Το κυριότερο από αυτά τα προβλήματα είναι το φαινόμενο του θερμοκηπίου και ιδιαίτερα η όξυνση του φαινομένου, εξαιτίας της μεγάλης ποσότητας διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) που εκλύεται στην ατμόσφαιρα από την καύση των ορυκτών καυσίμων.

2.2. Α.Π.Ε.

Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) ή ήπιες μορφές ενέργειας είναι εκείνες οι πηγές ενέργειας που προέρχονται από φυσικές διαδικασίες όπως είναι ο άνεμος, ο ήλιος, η φυσική κυκλοφορία του νερού και η εσωτερική θερμότητα του φλοιού της γης. Κινητήρια δύναμη των περισσότερων πηγών ενέργειας είναι η ηλιακή ακτινοβολία. Οι

πηγές αυτές ανανεώνονται συνεχώς με φυσικό τρόπο και θεωρούνται ανεξάντλητες αφού βρίσκονται σε αφθονία στο φυσικό περιβάλλον. Χρησιμοποιούνται είτε άμεσα είτε έμμεσα, μετατρέποντας την ενέργεια σε άλλες μορφές, όπως για παράδειγμα σε ηλεκτρική ή μηχανική ενέργεια. Τα κυριότερα είδη των ΑΠΕ είναι:

- Αιολική ενέργεια
- Ηλιακή ενέργεια
- Υδραυλική ενέργεια
- Κυματική ενέργεια
- Βιομάζα

Αυτές τις πηγές ενέργειας χρησιμοποιούσε αρχικά ο άνθρωπος προτού στραφεί στην αλόγιστη καύση του άνθρακα και των παράγωγων αυτού. Όμως, οι πετρελαϊκές κρίσεις που ξέσπασαν τη δεκαετία του 1970, καθιστώντας σαφές ότι τα αποθέματα πετρελαίου παγκοσμίως είναι περιορισμένα, ήταν η αφορμή για να στρέψουν οι χώρες το ενδιαφέρον τους και πάλι προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Καθώς η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών μιας χώρας βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στις συμβατικές πηγές ενέργειας, οι οποίες στο άμεσο μέλλον θα εξαντληθούν εντελώς (Freris and Infield, 2008), οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας θα υπερτερούν ως εναλλακτικές λύσεις για την παραγωγή ενέργειας, κυρίως λόγω της απεριόριστης διαθεσιμότητάς τους αλλά και της σημαντικής συμβολής τους στη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης (Burton et al, 2011). Τα τελευταία χρόνια εξαιτίας της βελτίωσης της τεχνολογίας και της μείωσης του κόστους παραγωγής παρατηρείται ότι μονάδες ενέργειας, όπως η αιολική, η υδροηλεκτρική και η βιομάζα, ανταγωνίζονται σε υψηλό βαθμό τις παραδοσιακές μονάδες, όπως η πυρηνική ενέργεια και ο άνθρακας.

Ένας ακόμα σημαντικός παράγοντας που συνέβαλλε έμμεσα στην ανάπτυξη των ΑΠΕ είναι η κλιματική αλλαγή. Η κλιματική αλλαγή αποτελεί μια παγκόσμια απειλή, με τα αποτελέσματά της να γίνονται ολοένα και πιο ορατά με την πάροδο των χρόνων. Η

αλλαγή αποδίδεται άμεσα ή έμμεσα στην ανθρώπινη δραστηριότητα, καθώς η αιτία που επιδεινώνει την κατάσταση του κλίματος είναι οι εκπομπές θερμοκηπικών αερίων που προέρχονται από δραστηριότητες όπως η καύση ορυκτών καυσίμων, τα μέσα μεταφοράς, η διαχείριση των στερεών αποβλήτων και άλλα. Τη μεγαλύτερη όμως συνεισφορά από όλα τα θερμοκηπικά αέρια στην ατμόσφαιρα έχει το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), το οποίο εκλύεται άμεσα προς την ατμόσφαιρα μέσω της χρήσης ορυκτών καυσίμων. Το αποτέλεσμα της συσσώρευσης ανθρωπογενών εκπομπών θερμοκηπικών αερίων και αερολυμάτων είναι οι αλλαγές του κλίματος σε τοπικό, περιφερειακό και παγκόσμιο επίπεδο και συνεπώς η ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου (Μπεργελές, 2006). Λόγω της ραγδαίας αύξησης του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), το φαινόμενο του θερμοκηπίου προκαλεί αύξηση της μέσης θερμοκρασίας της Γης, η οποία υπολογίζεται ότι θα είναι 1.4° με 5.8°C μέχρι το τέλος του 21ου αι., βάση των σεναρίων της IPCC (2007). Επομένως, η εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών αποτελεί ουσιαστικό ζήτημα για τη βιώσιμη ανάπτυξη μιας χώρας, με στόχο να γίνει ενεργειακά ανεξάρτητη και ταυτόχρονα να συμβάλλει στην προστασία του κλίματος για τις επόμενες δεκαετίες.

2.2.1. Σπουδαιότητα των Α.Π.Ε.

Τις τελευταίες δεκαετίες η χρήση των ΑΠΕ στον τομέα της ηλεκτρικής παραγωγής κερδίζει ολοένα και μεγαλύτερο μερίδιο στο ετήσιο ενεργειακό ισοζύγιο της χώρας. Αυτό οφείλεται στη ραγδαία ανάπτυξη νέων σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας εκμεταλλευόμενοι τις ανανεώσιμες πηγές, όπως για παράδειγμα η ανάπτυξη νέων φωτοβολταϊκών σταθμών σε περιοχές με έντονη ηλιακή ακτινοβολία ή νέων αιολικών σταθμών σε περιοχές με υψηλό αιολικό δυναμικό. Η ανάπτυξη αυτών έχει σαν στόχο η παραγόμενη ενέργεια από τους νέους σταθμούς να υποκαταστήσει την θερμική παραγωγή. Καθώς η χρήση των ΑΠΕ δεν επιβαρύνει το περιβάλλον με επικίνδυνους ρύπους (Chiras, 2006; Twidell and Wier, 2006; Nelson, 2009), η επιβάρυνση του φυσικού περιβάλλοντος από την κατασκευή των σταθμών ΑΠΕ θεωρείται αμελητέα σε σύγκριση με αυτή που παρατηρείται από τη λειτουργία λιγνιτικών και πετρελαϊκών

μονάδων. Επιπλέον, η ηλιακή και η αιολική ενέργεια έχουν την ικανότητα να ενισχύσουν την ασφάλεια μιας χώρας όσο αναφορά τον ενεργειακό εφοδιασμό της, καθώς ο ήλιος και ο άνεμος είναι δυο ανεξάντλητοι φυσικοί πόροι. Επομένως, μια χώρα μπορεί να ανεξαρτητοποιηθεί ενεργειακά, αφού διασφαλίζει την ενεργειακή της ζήτηση και μειώνει την ανάγκη της για εισαγόμενη συμβατική ενέργεια.

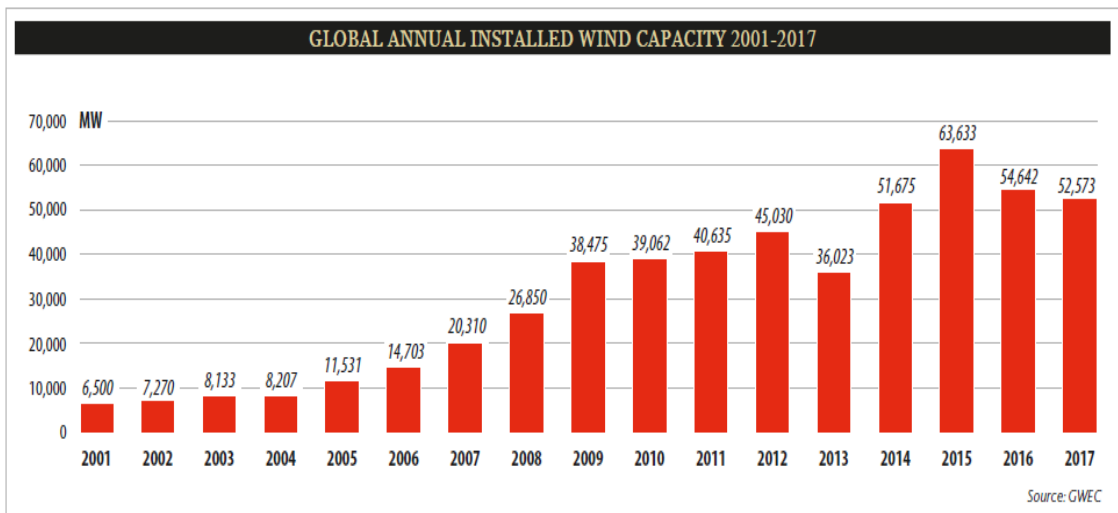
Άλλη μια σημαντική συνεισφορά των ΑΠΕ στον ενεργειακό τομέα μιας χώρας είναι η δημιουργία νέων μονάδων παραγωγής ενέργειας με καύσιμο φυσικό αέριο, αντικαθιστώντας τις παλαιές συμβατικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ο βαθμός απόδοσης των λιγνιτικών μονάδων που βρίσκονται σήμερα σε λειτουργία είναι κοντά στο 33% σε χώρες όπως η Ελλάδα, αφού διαθέτει λιγνίτη χαμηλής θερμογόνου δύναμης (κυμαίνεται μεταξύ 900-2000kcal/kg, με μέση τιμή περίπου τα 1300 kcal), το οποίο συνεπάγεται πολύ χαμηλές αποδόσεις (περίπου 28% σε ορισμένες περιπτώσεις) και υψηλές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) από αυτές τις μονάδες ηλεκτροπαραγωγής. Αντιθέτως, οι μονάδες φυσικού αερίου έχουν υψηλότερη απόδοση (κοντά στο 50%) και θεωρούνται λιγότερο ρυπογόνες παρόλο που συγκαταλέγεται στην κατηγορία των ορυκτών καυσίμων, διότι κατά τη λειτουργία τους εκπέμπονται χαμηλές τιμές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) ανά παραγόμενη ηλεκτρική kWh. Έτσι, οι μονάδες αυτές έχουν το πλεονέκτημα μόνο αν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιπτώσεις συμπαραγωγής με μονάδες ΑΠΕ.

2.2.2. Ανάπτυξη των Α.Π.Ε. σε παγκόσμιο, ευρωπαϊκό και εθνικό επίπεδο

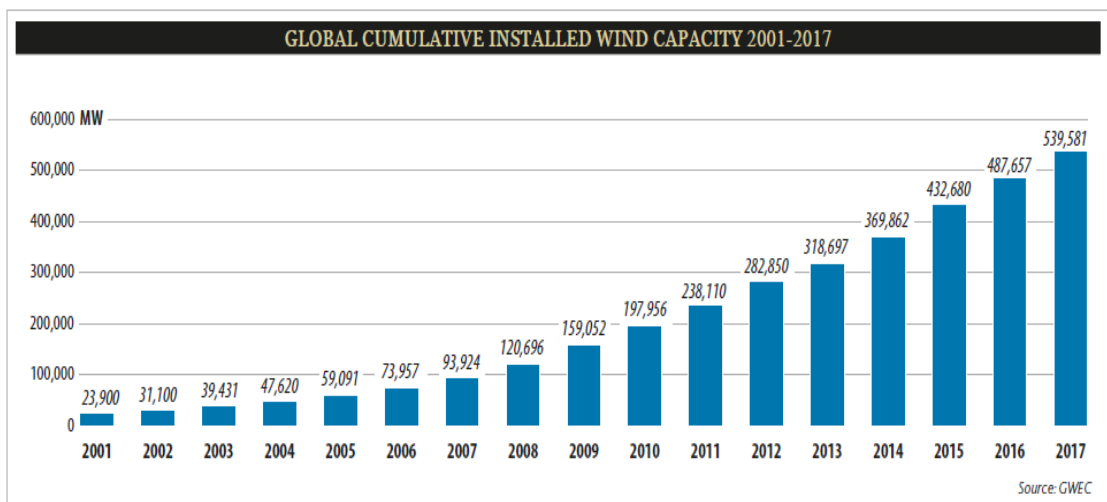
Στο Παρίσι πραγματοποιήθηκε το 2015 η 21^η Σύνοδος των Μερών (COP21) της Σύμβασης-Πλαισίου του ΟΗΕ για την κλιματική αλλαγή (UNFCCC), αποτελούμενη από 195 χώρες παγκοσμίως, όπου κατέληξαν σε μια παγκόσμια συμφωνία για την κλιματική αλλαγή θέτοντας σαν στόχο τον περιορισμό της αύξησης της παγκόσμιας θερμοκρασίας κάτω από 2°C σε σχέση με τα επίπεδα πριν από την προβιομηχανική εποχή. Στις 4 Νοεμβρίου 2016, η συμφωνία επικυρώθηκε επίσημα ύστερα από την επίτευξη του

κατώτατου ορίου για την έναρξη ισχύος της (επικύρωση από τουλάχιστον 55 χώρες, ήτοι ποσοστό 55% των εκπομπών παγκοσμίως) και θα τεθεί σε ισχύ από το 2020. Μεταξύ των χωρών που υπέγραψαν είναι και οι μεγαλύτεροι ρυπαντές στην παγκόσμια κλίμακα, όπως η Κίνα, οι ΗΠΑ, η Ινδία και η Ε.Ε., η οποία μάλιστα ήταν η πρώτη “χώρα” που επικύρωσε την συμφωνία. Βασικός στόχος της συμφωνίας είναι ο μετριασμός της υπερθέρμανσης του πλανήτη και η αποσύνδεση της οικονομίας από τα ορυκτά καύσιμα, η καύση των οποίων αποτελεί και την κύρια αιτία για την παγκόσμια υπερθέρμανση. Στο κείμενο της συμφωνίας αναφέρεται ότι οι εκπομπές αυτές θα πρέπει να κορυφωθούν στο άμεσο μέλλον, και έπειτα να μειωθούν ραγδαία έως το 2100, όπου στόχος είναι οι μηδενικές εκπομπές αερίων. Επιπλέον, ορίζει ότι όλα τα κράτη θα πρέπει να εγγραφούν σε ένα κοινό σύστημα αναφοράς, παρακολούθησης και επιβεβαίωσης των εγχώριων αερίων εκπομπών τους. Όμως οι στόχοι της συμφωνίας για τις εκπομπές δεν έχουν νομικά δεσμευτικό χαρακτήρα. Το κάθε κράτος-μέλος της Συνθήκης-Πλαισίου του ΟΗΕ για την κλιματική αλλαγή, θα πρέπει να παρουσιάζει εθνικούς στόχους για τη μείωση των εγχώριων εκπομπών διατηρώντας το δικαίωμα, από το 2018 και έπειτα, να επανεξετάζει τους στόχους αυτούς κάθε πέντε χρόνια.

Από τους βασικούς παράγοντες που θα συμβάλλουν ενεργά στη μείωση του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής τις επόμενες δεκαετίες θεωρούνται οι ΑΠΕ. Από όλες τις μορφές των ΑΠΕ, η αιολική ενέργεια παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ανάπτυξη παγκοσμίως τα τελευταία χρόνια. Αυτή η στροφή των χωρών προς τις τεχνολογίες των ΑΠΕ υποδηλώνεται από την αύξηση του μεριδίου αυτών στο παγκόσμιο ενεργειακό ισοζύγιο. Σύμφωνα με το Παγκόσμιο Συμβούλιο Αιολικής Ενέργειας (Global Wind Report), το 2017 εγκαταστάθηκαν παγκοσμίως 52.6GW αιολικής ενέργειας, αυξάνοντας το σύνολο της εγκατεστημένης αιολικής ενέργειας στα 540GW, σε αντίθεση με το 2005 όπου εγκαταστάθηκαν 11.5GW αιολικής ενέργειας με συνολική εγκατεστημένη ισχύ στα 59.1GW (GWEC, 2018).



Διάγραμμα 1. Εξέλιξη της παγκόσμιας εγκατεστημένης ισχύος της αιολικής ενέργειας, ανά έτος (Πηγή: GWEC, 2018).



Διάγραμμα 2. Εξέλιξη της παγκόσμιας συνολικής εγκατεστημένης ισχύος της αιολικής ενέργειας, ανά έτος (Πηγή: GWEC, 2018).

Είναι φανερό ότι η Ε.Ε. πρωτοστατεί στο τομέα των ΑΠΕ και κυρίως στον κλάδο της αιολικής ενέργειας, ξεπερνώντας κάθε φορά τους υψηλούς στόχους που θέτει στην διάρκεια των τελευταίων ετών. Ήδη από το έτος 2014, η Ε.Ε. έχει ορίσει πλαίσιο

ευρωπαϊκής πολιτικής σχετικά με την ενέργεια και το κλίμα. Βάσει της Οδηγίας 2009/28/EK ορίζονται οι εξής δεσμευτικοί στόχοι για το έτος 2020:

- I. Μείωση 20% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου σε σχέση με τα επίπεδα του 1990,
- II. Διείσδυση 20% των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας,
- III. Εξοικονόμηση 20% της πρωτογενούς ενέργειας συγκριτικά με τις προβλέψεις του Σεναρίου Αναφοράς.

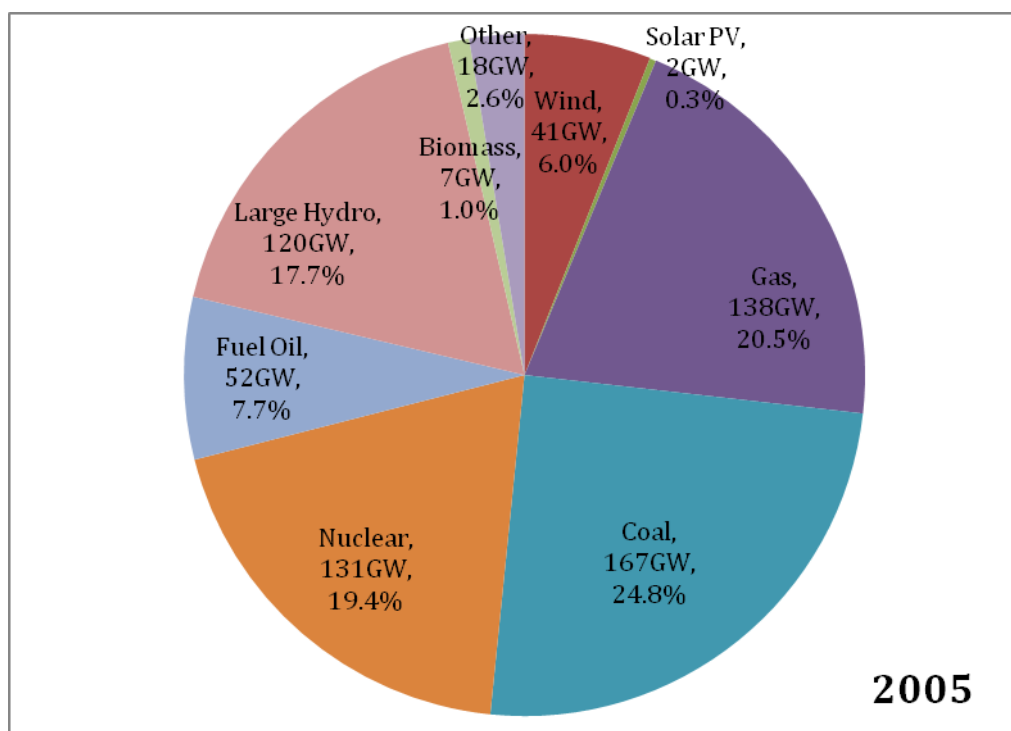
Το πλαίσιο αυτό ορίζει ακόμα πιο φιλόδοξους στόχους για το 2030, όπως:

- I. Μείωση τουλάχιστον 40% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου σε σχέση με το 1990 [Ο στόχος αυτός θεωρείται δεσμευτικός συνολικά για την Ε.Ε. αλλά και για κάθε κράτος - μέλος ξεχωριστά],
- II. Διείσδυση κατά 27% των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας,
- III. Αύξηση 27% της ενεργειακής απόδοσης σε ευρωπαϊκό αλλά και σε εθνικό επίπεδο, με επανεξέταση του ποσοστού το 2020.

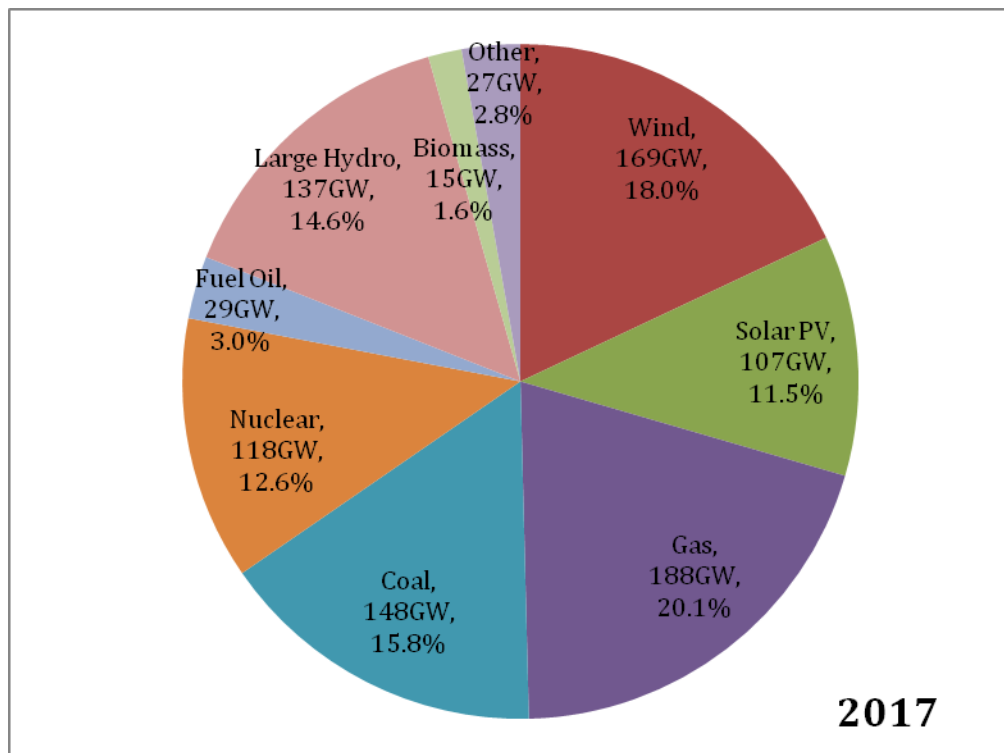
Το ενδιαφέρον αυτό της Ευρώπης να στρέψει το ενεργειακό της ενδιαφέρον προς τον τομέα των αιολικών οφείλεται και στο γεγονός ότι διαθέτει αρκετές περιοχές με υψηλό αιολικό δυναμικό, οι οποίες βρίσκονται κυρίως στο νότιο τμήμα της Σκανδιναβικής Χερσονήσου και στην ευρύτερη περιοχή του Ηνωμένου Βασιλείου. Επίσης, οι περισσότερες ευρωπαϊκές χώρες διαθέτουν υψηλό επίπεδο τεχνογνωσίας και τεχνολογίας στον κλάδο της αιολικής ενέργειας, καθώς αρκετές ευρωπαϊκές εταιρείες συγκαταλέγονται μέσα στους δέκα μεγαλύτερους κατασκευαστές ανεμογεννητριών παγκοσμίως (VESTAS, SIEMENS-GAMESA, ENERCON).

Με βάση τα ετήσια στοιχεία του οργανισμού WindEurope, το 2017 θεωρείται έτος ρεκόρ για τις εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας στην Ευρώπη, καθώς καταγράφηκε

αύξηση 25% συγκριτικά με το 2016 τόσο στις χερσαίες (αύξηση κατά 14.3%) όσο και στις υπεράκτιες εγκαταστάσεις (αύξηση κατά 101%). Συγκεκριμένα, το 2017 προστέθηκαν 15.6GW αιολικής ενέργειας στο δίκτυο της Ε.Ε. φθάνοντας συνολικά τα 168.7GW εγκατεστημένης ενέργειας και παραμένοντας η δεύτερη μεγαλύτερη μορφή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι το 85% όλων των νέων μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που εγκαταστάθηκαν στην Ευρώπη προέρχεται από ΑΠΕ (WindEurope, 2018). Αυτή η επιλογή της Ε.Ε. φανερώνεται από το γεγονός ότι το 11.6% των αναγκών της Ευρώπης σε ηλεκτρική ενέργεια για το έτος 2017 καλύφθηκε από την αιολική ενέργεια. Στα διαγράμματα 3 και 4 απεικονίζεται η ισχύς από διάφορες πηγές ενέργειας στην Ε.Ε. για το έτος 2005 και το έτος 2017 αντίστοιχα, όπου παρατηρείται μια σημαντική αύξηση του ποσοστού των ΑΠΕ (από 25,0% σε 45.7% αντίστοιχα) και μείωση του μεριδίου του άνθρακα (από το 24.8% στο 15.8%).



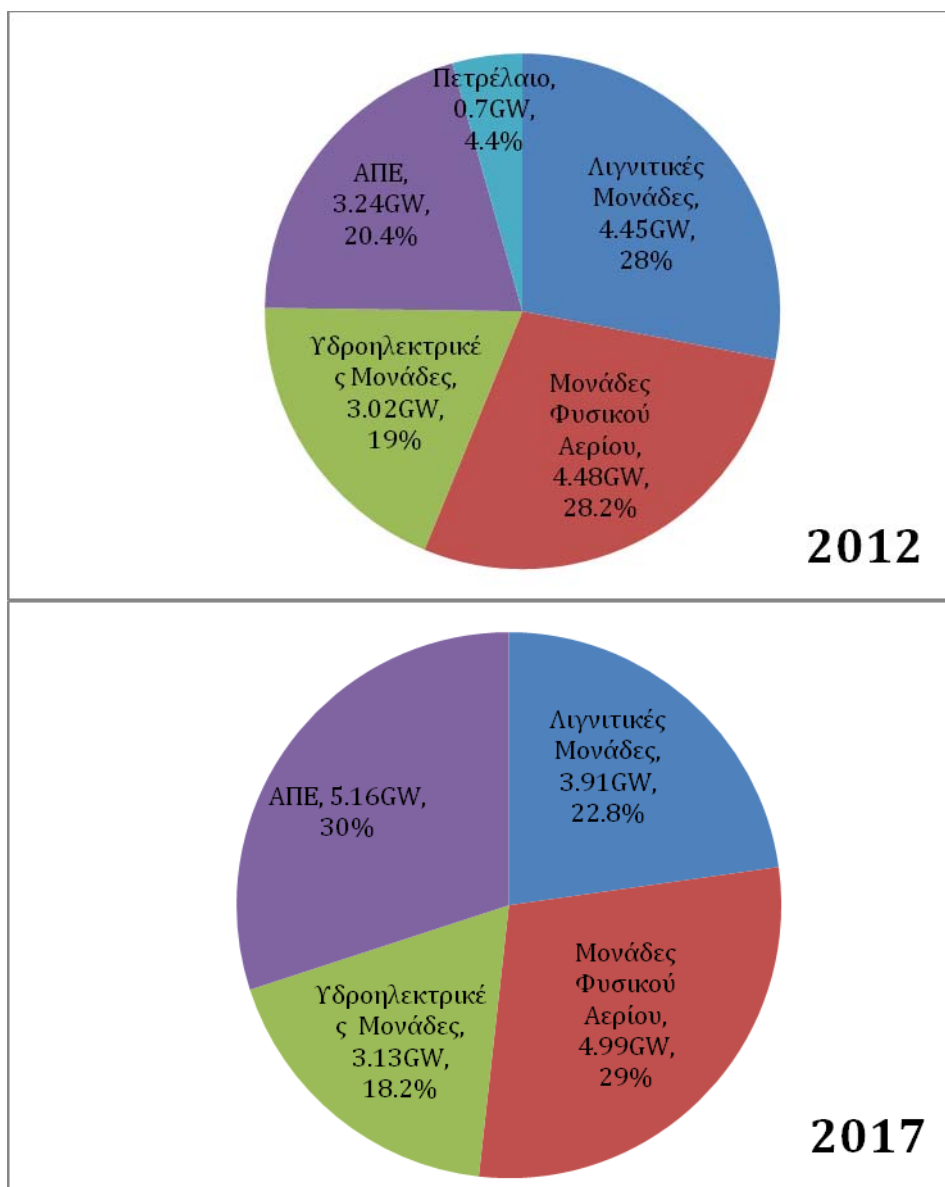
Διάγραμμα 3. Εγκατεστημένη ισχύς, ανά κατηγορία καυσίμου, στην ΕΕ για το έτος 2005 (Πηγή: WindEurope, 2018).



Διάγραμμα 4. Εγκατεστημένη ισχύς, ανά κατηγορία καυσίμου, στην ΕΕ για το έτος 2017 (Πηγή: WindEurope, 2018)

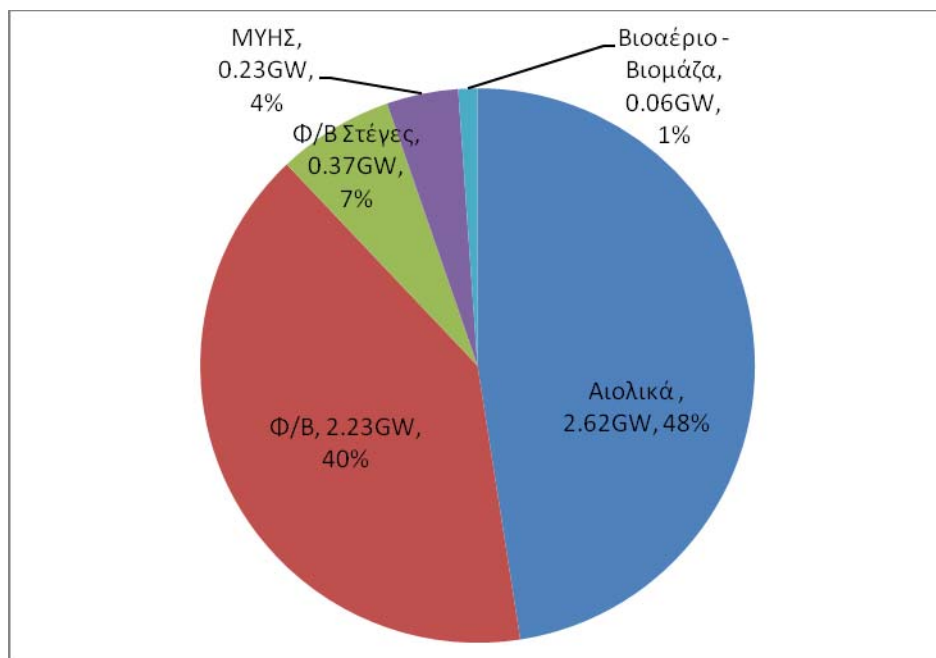
Αντίστοιχο ενεργειακό ενδιαφέρον παρουσιάζει και η Ελλάδα, η οποία κατέχει μια πολύ προνομιακή θέση στο κομμάτι των ΑΠΕ καθώς διαθέτει αρκετές περιοχές με πλούσιο αιολικό δυναμικό (τα νησιά του Αιγαίου πελάγους, οι παράκτιες περιοχές και ορισμένα οροπέδια) για εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας (Καζαντζίδης, 2009). Οι άνεμοι που πνέουν στις θαλάσσιες και παραθαλάσσιες περιοχές της χώρας, με έμφαση την περιοχή του Αιγαίου, έχουν αποδειχθεί αρκετά ανταγωνιστικοί από πλευράς παραγωγικότητας. Επομένως, η αιολική ενέργεια έχει τη δυνατότητα να συνδράμει σε μεγάλο βαθμό στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της χώρας. Συγκεκριμένα, το 2017 θεωρείται το δεύτερο καλύτερο έτος, μετά το 2011, για τον κλάδο των αιολικών επενδύσεων καθώς εγκαταστάθηκαν 282MW αιολικής ενέργειας, αυξάνοντας έτσι το ποσοστό της αιολικής ισχύος κατά 12% συγκριτικά με το έτος 2016. Οπότε, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς στην Ελλάδα μέχρι το τέλος του 2017 διαμορφώνεται στα 2.65GW (ELETAEN, 2018).

Με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία του Λειτουργού Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΛΑΓΗΕ), η εγκατεστημένη ισχύς, ανά κατηγορία καυσίμου, για το διασυνδεδεμένο δίκτυο της Ελλάδας για τα έτη 2012 και 2017, απεικονίζεται στο διάγραμμα 6. Παρατηρείται μια σημαντική αύξηση του μεριδίου των ΑΠΕ με ποσοστό 30.0% για το έτος 2017 έναντι 20.4% για το έτος 2012, και μείωση του μεριδίου του άνθρακα στο 22.8% από το 32.4% αντίστοιχα.



Διάγραμμα 5. Εγκατεστημένη ισχύς, ανά κατηγορία καυσίμου, για το διασυνδεδεμένο δίκτυο της Ελλάδας, για τα έτη 2012 και 2017(Πηγή: ΛΑΓΗΕ, 2018)

Στο διάγραμμα 7 απεικονίζεται η επιμέρους εγκατεστημένη ισχύς όλων των μονάδων ΑΠΕ στην Ελλάδα έως το τέλος του έτους 2017. Είναι σαφές ότι το μεγαλύτερο μερίδιο κατέχουν οι αιολικοί σταθμοί με ποσοστό 48%, ενώ ακολουθούν με μικρή διαφορά οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί με ποσοστό 40%.



Διάγραμμα 6. Συνολική εγκατεστημένη ισχύς, ανά κατηγορία των μονάδων ΑΠΕ, στην Ελλάδα για το έτος 2017 (Πηγή: ΛΑΓΗΕ, 2018)

2.3. Αιολική ενέργεια

Αιολική ενέργεια αποκαλείται η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από την εκμετάλλευση του ανέμου. Θεωρείται μια από τις σημαντικότερες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, καθώς δεν απελευθερώνει αέριους ρύπους στην ατμόσφαιρα, όπως οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας συμβατικών καυσίμων, και δεν προκαλεί προβλήματα στο περιβάλλον και στην υγεία του ανθρώπου.

Η αιολική ενέργεια χρησιμοποιείται από αρχαιοτάτων χρόνων για την κάλυψη των ανθρώπινων αναγκών, όπως η άντληση νερού, η κίνηση ιστιοφόρων πλοίων και αρκετές εφαρμογές μηχανικής ενέργειας. Οφείλει το όνομά της στον Αίολο, το θεό του ανέμου κατά την ελληνική μυθολογία. Η πετρελαϊκή κρίση όμως, στις αρχές της δεκαετίας του 70, φέρνει ξανά στο προσκήνιο τις ΑΠΕ και ειδικά την αιολική ενέργεια. Γίνεται πλέον συνείδηση των περισσότερων, πως ο άνεμος είναι μια καθαρή και ανεξάντλητη πηγή ενέργειας.

Με τον όρο αιολική ενέργεια εκφράζεται η κινητική ενέργεια ($E_{κιν}$) που έχουν οι αέριες μάζες στην ατμόσφαιρα. Η κινητική ενέργεια μιας αέριας μάζας m (kg) η οποία κινείται με ταχύτητα v (m/s) υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$E_{κιν} = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

Όταν μια μάζα αέρα m με πυκνότητα ρ και ταχύτητα v διέρχεται μέσω μιας διατομής A , τότε η ροή της μάζας αυτής είναι:

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt} = \rho Av^3 \quad (2)$$

Από τις εξισώσεις (1) και (2) προκύπτει το ποσό ενέργειας που διαπερνά μια διατομή A ανά μονάδα χρόνου. Η ενέργεια αυτή ισούται με την ισχύ P του ανέμου, η οποία υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$P = \frac{dE_{κιν}}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2}mv^2 \right) = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} v^2 = \frac{1}{2} \rho Av^3 \quad (3)$$

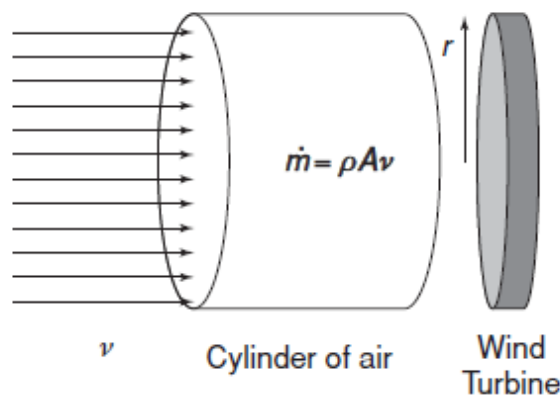
όπου ρ : η πυκνότητα του αέρα, v : η ταχύτητα του αέρα, A : η επιφάνεια ροής του αέρα.

Διαπιστώνεται, λοιπόν, ότι η διαθέσιμη ισχύς του ανέμου εξαρτάται από τον κύβο της ταχύτητας του ανέμου (Di Piazza et al, 2010). Οπότε, η μέση ταχύτητα του ανέμου που πνέει στις διάφορες περιοχές παίζει πολύ καθοριστικό ρόλο.

Για την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας χρησιμοποιούνται οι ανεμογεννήτριες, μηχανές οι οποίες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου αρχικά σε μηχανική, καθώς ο άνεμος προσπίπτει στην φτερωτή της ανεμογεννήτριας, και στη συνέχεια σε ηλεκτρική. Η παραγόμενη ισχύς από μια ανεμογεννήτρια είναι ανάλογη της ταχύτητας του ανέμου στη θέση εγκατάστασης της μηχανής. Η βασική εξίσωση υπολογισμού της ισχύος εξόδου από μια ανεμογεννήτρια είναι:

$$P = \frac{1}{2} \rho v^3 A C_p \quad (4)$$

όπου ρ : η πυκνότητα του αέρα στη θέση της ανεμογεννήτριας, v : η ταχύτητα του αέρα στη θέση της ανεμογεννήτριας, A : η επιφάνεια προβολής της ανεμογεννήτριας, η οποία ισούται με $A = \pi R^2$, R : η ακτίνα της φτερωτής της ανεμογεννήτριας και C_p : ο συντελεστής αεροδυναμικής απόδοσης του στροβίλου της μηχανής.



Εικόνα 1. Κυλινδρική διατομή του αέρα μπροστά από τον δρομέα της ανεμογεννήτριας.

Ο συντελεστής αεροδυναμικής απόδοσης του στροβίλου μιας οποιασδήποτε ανεμογεννήτριας είναι πάντα μικρότερος του θεωρητικού ορίου Betz. Το όριο Betz δηλώνει ότι η μέγιστη θεωρητική ισχύς που μπορεί να αποκομίσει ένας ρότορας μιας ανεμογεννήτριας από τον άνεμο, σε ιδανικές συνθήκες, είναι 59.3%. Οι περισσότεροι ρότορες με τρία πτερύγια πετυχαίνουν συνολική απόδοση περίπου 50% (Jain, 2011).

2.3.1. Πλεονεκτήματα αιολικής ενέργειας

Ορισμένα από τα πλεονεκτήματα της αιολικής ενέργειας παρατίθενται πιο κάτω:

- Ο άνεμος είναι ένας συνεχής φυσικός πόρος.
- Η αιολική ενέργεια είναι μια ανεξάντλητη πηγή ενέργειας, αντίθετα με τα αποθέματα των συμβατικών καυσίμων που εξαντλούνται με ταχύτατους ρυθμούς. Η χρήση μιας ανεμογεννήτριας δεν απαιτεί χρήση άλλης πρώτης ύλης παρά μόνο του ανέμου.
- Η αιολική ενέργεια συμβάλλει στη μη υποβάθμιση του περιβάλλοντος, αφού οι επιπτώσεις από τη λειτουργία μίας ανεμογεννήτριας είναι μικρές συγκριτικά με τις επιπτώσεις από τις μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από συμβατικά καύσιμα (λιγνίτης, άνθρακας κ.α.).
- Η αιολική ενέργεια συνεισφέρει στη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου, καθώς από τη λειτουργία κάθε εγκατεστημένου MW αιολικής ενέργειας, σε κανονικές συνθήκες, αποφεύγεται η ετήσια εκπομπή 3000 - 35000 τόνων διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) στην ατμόσφαιρα.
- Η αιολική ενέργεια ενισχύει την ενεργειακή ανεξαρτησία του κάθε κράτους ξεχωριστά (Jackson, 2010).
- Η αιολική ενέργεια συμβάλλει στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών μιας χώρας και κυρίως τις ώρες αιχμής, εξασφαλίζοντας τη σταθερότητα του δικτύου.
- Η αιολική ενέργεια συμβάλλει στην τοπική ανάπτυξη και δημιουργεί νέες θέσεις εργασίας κυρίως σε τοπικό επίπεδο.
- Η αιολική ενέργεια αποτελεί συμφέρουσα οικονομική επένδυση χάρη στην τεχνολογική εξέλιξη των τελευταίων χρόνων στον κλάδο και συνεπώς το κόστος εγκατάστασης των αιολικών πάρκων θεωρείται συγκρίσιμο με εκείνο των συμβατικών μονάδων.

2.3.2. Μειονεκτήματα αιολικής ενέργειας

Υπάρχουν όμως και αρκετές αναφορές γύρω από τα μειονεκτήματα που μπορεί να έχει η ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας. Στη συνέχεια αναφέρονται ορισμένα από αυτά:

- Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τους αιολικούς σταθμούς είναι ασταθής και αρκετές φορές διακοπτόμενη, καθώς ο άνεμος παρουσιάζει μεταβολές στο χρόνο και στο χώρο.
- Έχει μικρό βαθμό απόδοσης ισχύος και απαιτούνται αρκετές ανεμογεννήτριες και μεγάλη έκταση γης, με αποτέλεσμα η χρήση της αιολικής ενέργειας να θεωρείται ως συμπληρωματική πηγή ενέργειας.
- Λόγω της μη σταθερής παροχής της αιολικής ενέργειας απαιτείται η κατασκευή συστημάτων αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας, η οποία κοστίζει (Chiras, 2006; Nelson, 2009), ή η εξασφάλιση άλλων μονάδων παραγωγής ενέργειας ως εφεδρικές.
- Οι κατάλληλες θέσεις για την εγκατάσταση των αιολικών σταθμών συχνά βρίσκονται σε απομακρυσμένες περιοχές και αρκετά χιλιόμετρα μακριά από πόλεις.
- Υπάρχει έντονη ανησυχία των κατοίκων σχετικά με τον θόρυβο που παράγεται από τις ανεμογεννήτριες, τις παρεμβολές στα ηλεκτρομαγνητικά συστήματα, την οπτική - αισθητική όχληση καθώς και τις επιπτώσεις στα πουλιά από τη λειτουργία των αιολικών σταθμών.

Αρκετά από τα προβλήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω έχουν επιλυθεί σε σημαντικό βαθμό μέσω της τεχνολογικής ανάπτυξης των ανεμογεννητριών τις τελευταίες δεκαετίες. Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες είναι σχεδόν αθόρυβες καθώς το επίπεδο έντασης του ήχου που παράγουν κατά τη λειτουργία τους είναι 50-60 dB σε απόσταση περίπου 40 μέτρων από την ανεμογεννήτρια. Επίσης, τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία που μπορεί να δημιουργούνται είναι σχετικά μικρά και παρατηρούνται ακριβώς στο σημείο όπου είναι εγκατεστημένη η ανεμογεννήτρια. Γενικά, πριν από την εγκατάσταση κάθε

αιολικού σταθμού είναι αναγκαία η μελέτη των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που θα προκύψουν, τόσο στη περίοδο της εγκατάστασης, όσο και στη διάρκεια της λειτουργίας ενός αιολικού σταθμού, ώστε να εξασφαλίζεται η εναρμόνιση των ανεμογεννητριών με το εγγύς περιβάλλον.

Κεφάλαιο 3

Αιολικό Δυναμικό

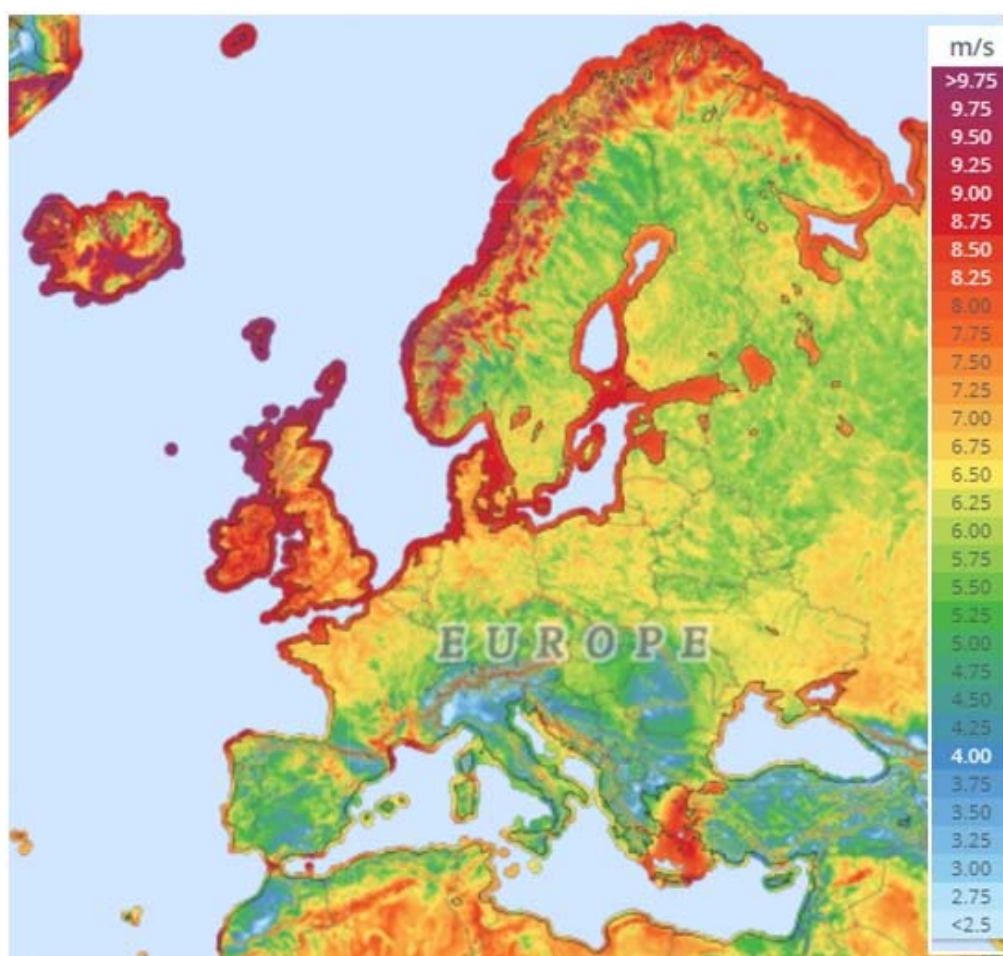
3.1. Εισαγωγή

Από όλες τις μορφές των ΑΠΕ, τη μεγαλύτερη ανάπτυξη μέχρι στιγμής παρουσιάζει ο κλάδος της αιολικής ενέργειας. Για το λόγο αυτό, η εκτίμηση του αιολικού δυναμικού είναι πολύ σημαντική και θα πρέπει να γίνεται με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια, μιας και θεωρείται βασικό εργαλείο για τον ορθολογικό σχεδιασμό ενός αιολικού σταθμού. Είναι πολύ σημαντική η κατανόηση των βασικών χαρακτηριστικών του ανέμου για τη βέλτιστη εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας σε μία περιοχή.

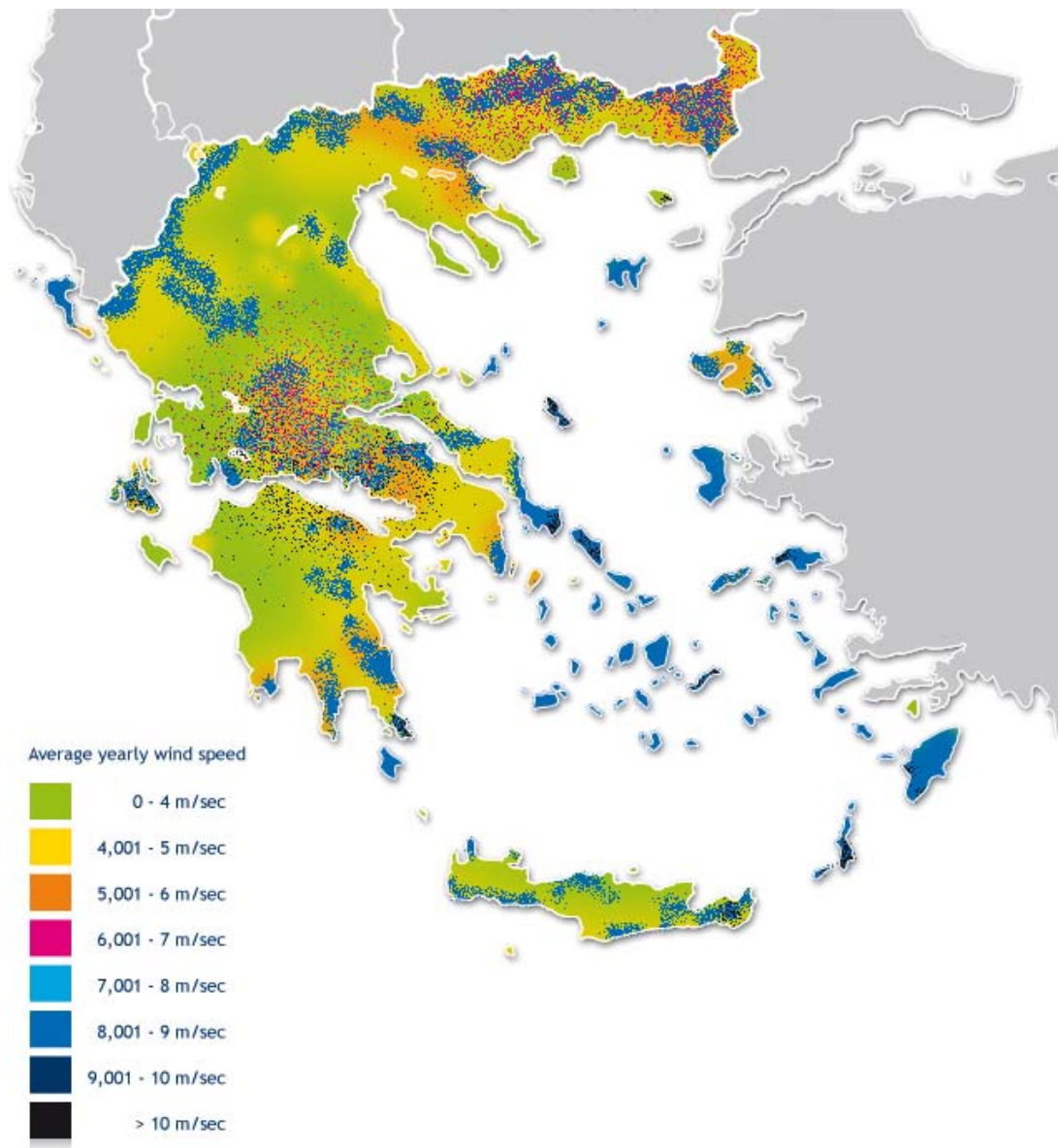
Το αιολικό δυναμικό μίας περιοχής αξιολογείται με βάση τις διαθέσιμες μετρήσεις που καταγράφονται από ανεμολογικό ιστό εγκατεστημένο στην περιοχή ενδιαφέροντος (IEC, 2007). Η εκτίμηση του αιολικού δυναμικού σε μία περιοχή γίνεται σε ετήσια βάση σύμφωνα με την κατανομή της ταχύτητας του ανέμου, η οποία καθορίζεται από τις δεκάλεπτες ή τις ωριαίες τιμές της έντασης του ανέμου και από τη συχνότητα εμφάνισης αυτών των τιμών κατά τη διάρκεια 1 έτους. Για να θεωρηθεί μία περιοχή κατάλληλη για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας θα πρέπει η μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου (μετρούμενη στα 10m από το έδαφος της γης) να είναι μεγαλύτερη της τιμής των 4m/s (Ανδρίτσος, 2008). Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του ανέμου τόσο περισσότερη είναι η διαθέσιμη ενέργεια, αφού η ισχύς είναι ανάλογη με τον κύβο της ταχύτητας του ανέμου. Επιπλέον, για να κριθεί μια περιοχή κατάλληλη

θα πρέπει τα επίπεδα της τύρβης να είναι χαμηλά και οι ριπές του ανέμου να μην είναι έντονες και συχνές, διαφορετικά προκαλούνται προβλήματα κόπωσης των υλικών των ανεμογεννητριών, μειώνοντας έτσι τη διάρκεια ζωής αυτών.

Αρχικά για την εκτίμηση του αιολικού δυναμικού σε μία περιοχή ενδιαφέροντος δίνονται σημαντικές πληροφορίες για την ένταση του ανέμου από τους διαθέσιμους χάρτες αιολικού δυναμικού, όπου απεικονίζεται η μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου σε συγκεκριμένο ύψος από την επιφάνεια του εδάφους. Στο χάρτη 1 παρουσιάζεται το αιολικό δυναμικό για την Ευρώπη και στο χάρτη 2 για την Ελλάδα.



Χάρτης 1. Απεικόνιση αιολικού δυναμικού σε ύψος 100m από την επιφάνεια του εδάφους, για την Ευρώπη (Πηγή: Global Wind Atlas)



Χάρτης 2. Απεικόνιση αιολικού δυναμικού σε ύψος 80m από την επιφάνεια του εδάφους, για την Ελλάδα (Πηγή: Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας-ΚΑΠΕ)

3.2. Άνεμος

Ο ήλιος αποτελεί το βασικό στοιχείο για τη δημιουργία των ανέμων που κυριαρχούν στην ατμόσφαιρα αφού ευθύνεται για την ανομοιόμορφη θέρμανση της επιφάνειας της γης, με αποτέλεσμα να προκαλεί τη μετακίνηση μεγάλων αέριων μαζών από μία περιοχή σε άλλη. Περίπου το 2% της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια των αερίων μαζών, όπου το 35% εξ' αυτών διαχέεται σε απόσταση 1km από την επιφάνεια της Γης (Nelson, 2009). Στην περιοχή του ισημερινού οι ακτίνες του Ήλιου προσπίπτουν κάθετα στην επιφάνεια της Γης ενώ όσο κατευθυνόμαστε προς τους πόλους οι ακτίνες προσπίπτουν υπό γωνία. Εξαιτίας της διαφορετικής ποσότητας ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται τα διάφορα σημεία του πλανήτη μας, η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του ισημερινού και των πόλων έχει σαν αποτέλεσμα τη συνεχή κίνηση των αέριων μαζών από τον Ισημερινό προς τους πόλους και αντίθετα. Όταν μία αέρια μάζα θερμαίνεται, γίνεται πιο αραιή και πιο ελαφριά από τις γειτονικές αέριες μάζες, με αποτέλεσμα την ανοδική κίνηση της μάζας αυτής μέσα στην ατμόσφαιρα. Αντίστοιχα, οι ψυχρές και πυκνές μάζες αέρα κινούνται με τρόπο τέτοιο ώστε να καταλάβουν τη θέση της ανερχόμενης αέριας μάζας. Η κυκλική αυτή κίνηση του αέρα ονομάζεται κατακόρυφη μεταφορά του ανέμου (Ασημακόπουλος, 2015). Ένας ακόμη παράγοντας στον οποίο οφείλεται η κίνηση του ατμοσφαιρικού αέρα είναι η περιστροφή της γης. Εξαιτίας της περιστροφής της Γης λόγω αδράνειας, οι ψυχρές αέριες μάζες κινούνται προς τα δυτικά και ταυτόχρονα οι θερμές αέριες μάζες κινούνται προς τα ανατολικά. Αυτή η κίνηση περιγράφει την πραγματική του κίνηση του ανέμου (Ασημακόπουλος, 2015).

Τα κύρια είδη του ανέμου μέσα στο οριακό στρώμα της ατμόσφαιρας είναι:

- *Ο γεωστροφικός άνεμος*: Είναι ο άνεμος που προκύπτει από την εξισορρόπηση της δύναμης της βαροβαθμίδας και της δύναμης Coriolis (Ζερεφός, 2009). Παρατηρείται σε απόσταση 1000m περίπου από την επιφάνεια του εδάφους και οφείλεται στις διαφορές της θερμοκρασιακής κλίμακας που παρατηρούνται

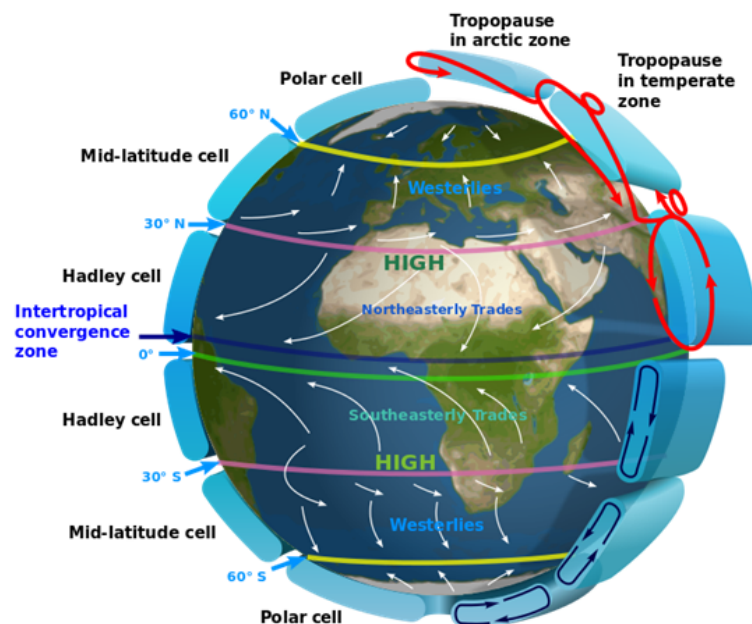
μεταξύ των στρωμάτων της ατμόσφαιρας. Στα μεγάλα ύψη παρατηρείται ότι ο άνεμος αυτός είναι παράλληλος προς τα ισοβαρή ατμοσφαιρικά επίπεδα λόγω της δύναμης Coriolis, η οποία είναι κάθετη προς την κατεύθυνση του ανέμου που προκαλείται από την περιστροφή της γης. Ο άνεμος αυτός εξηγεί τους κυριότερους ανέμους που πνέουν στην ατμόσφαιρά μας.

- *Ο επιφανειακός άνεμος:* Παρατηρείται σε απόσταση 100m περίπου από την επιφάνεια του εδάφους. Ο άνεμος αυτός επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την επιφάνεια του εδάφους και από τα συστήματα κυκλοφορίας.

Στη συνέχεια, περιγράφονται οι τρεις γενικές κατηγορίες των συστημάτων κυκλοφορίας των ανέμων:

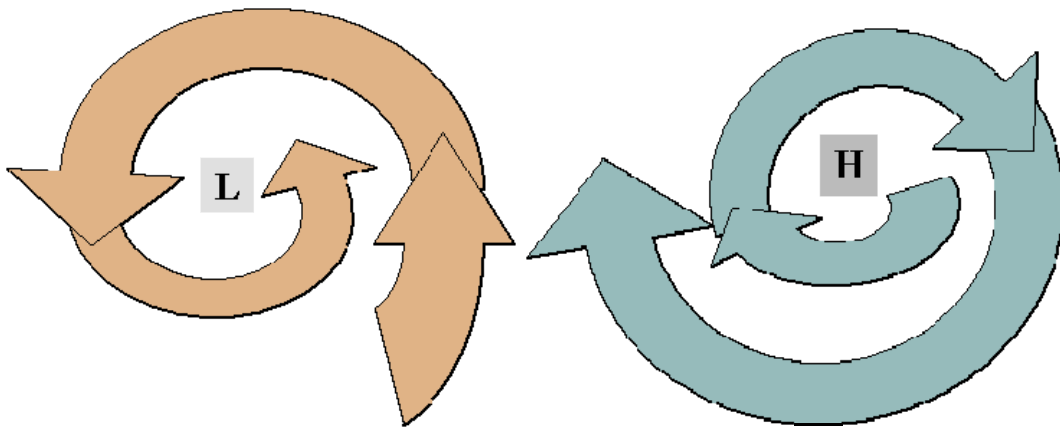
- I. *Άνεμοι γενικής κυκλοφορίας:* Οι άνεμοι της γενικής κυκλοφορίας της ατμόσφαιρας περιγράφονται από τρία βασικά κύτταρα : το κύτταρο Hadley, το κύτταρο Ferrell και το πολικό κύτταρο. Καθώς οι αέριες μάζες πάνω από την περιοχή του Ισημερινού θερμαίνονται περισσότερο, διαστέλλονται και ανέρχονται προς τα πάνω ακολουθώντας ανοδική πορεία προς τους πόλους της Γης ενώ αέριες μάζες από άλλες περιοχές τείνουν να πάρουν τη θέση τους. Κατά τη διάρκεια της κίνησης προς τους πόλους, ο ατμοσφαιρικός αέρας ψύχεται με εκπομπή ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος, με αποτέλεσμα περίπου στις 30° Βόρειου και Νότιου γεωγραφικού πλάτους ο αέρας εξαναγκάζεται σε καθοδική κίνηση κλείνοντας έτσι το κύτταρο Hadley. Το κύτταρο αυτό αποτελεί το πρώτο τμήμα της γενικής κυκλοφορίας της ατμόσφαιρας που παρατηρείται στις τροπικές και υποτροπικές περιοχές. Με βάση τα παραπάνω, στο όριο των 30° Βόρειου και Νότιου γεωγραφικού πλάτους, το μεγαλύτερο τμήμα των αέριων μαζών αποκλίνει προς τον ισημερινό ενώ το υπόλοιπο εξαναγκάζεται να κινηθεί προς τους πόλους. Καθώς ο θερμός αέρας κινείται προς τους πόλους, συναντάει ψυχρότερες αέριες μάζες οι

οποίες προέρχονται από τις πολικές και υποπολικές περιοχές. Οι αέριες μάζες αυτές δεν αναμιγνύονται άμεσα, αντίθετα διαχωρίζονται από ένα νοητό σύνορο, το πολικό μέτωπο, το οποίο κυριαρχεί στις 60° Βόρειου και Νότιου γεωγραφικού πλάτους. Μόλις ο ανερχόμενος ατμοσφαιρικός αέρας συναντήσει το πολικό μέτωπο εξαναγκάζεται σε καθοδική κίνηση αποκλίνοντας προς τον Ισημερινό. Η κάθοδός του διέρχεται και πάλι πάνω από τους υποτροπικούς, οπότε και ολοκληρώνεται η κυκλοφορία του κυττάρου Ferrel. Το κύτταρο αυτό αποτελεί το δεύτερο τμήμα της γενικής κυκλοφορίας της ατμόσφαιρας που παρατηρείται στα μέσα γεωγραφικά πλάτη και για το λόγο αυτό το τμήμα είναι γνωστό και ως κύτταρο μέσων γεωγραφικών πλατών. Όμως, πάνω από την περιοχή των 60° Βόρειου και Νότιου γεωγραφικού πλάτους επικρατούν ανοδικές κινήσεις εξαιτίας της σύγκλισης του ανέμου από τα μέσα γεωγραφικά πλάτη (κύτταρο Ferrel) και με τον ψυχρό ατμοσφαιρικό αέρα που προέρχεται από τις πολικές και υποπολικές περιοχές. Τελικά, ένα τμήμα του ανερχόμενου αυτού αέρα αποκλίνει προς τους πόλους, τροφοδοτώντας το λεγόμενο πολικό κύτταρο.



Εικόνα 2. Αναπαράσταση της γενικής κυκλοφορίας των ανέμων (Πηγή : Wikimedia Commons , Earth Global Circulation)

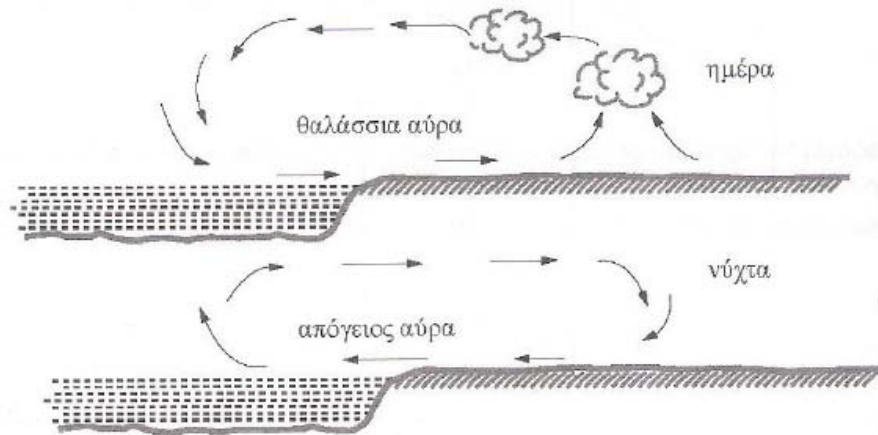
II. *Κυκλώνες και αντικυκλώνες:* Οι κυκλωνικοί άνεμοι περιστρέφονται γύρω από ένα κέντρο χαμηλής πίεσης συγκλίνοντας προς αυτό. Στο βόρειο ημισφαίριο οι άνεμοι αυτοί κινούνται αριστερόστροφα, ενώ στο νότιο ημισφαίριο κινούνται δεξιόστροφα. Στη μετεωρολογία οι άνεμοι αυτοί είναι γνωστοί ως χαμηλό βαρομετρικό και υποδηλώνουν κακοκαιρία. Οι σπουδαιότεροι κυκλώνες που επηρεάζουν την Ελλάδα είναι ο Σιβηρικός κυκλώνας και ο κυκλώνας των Αζόρων. Αντίθετα, οι αντικυκλωνικοί άνεμοι περιστρέφονται γύρω από ένα κέντρο υψηλής πίεσης αποκλίνοντας από αυτό. Στο βόρειο ημισφαίριο οι άνεμοι αυτοί κινούνται δεξιόστροφα, ενώ στο νότιο ημισφαίριο κινούνται αριστερόστροφα. Στη μετεωρολογία οι άνεμοι αυτοί είναι γνωστοί ως υψηλό βαρομετρικό και υποδηλώνουν καλοκαιρία.



Εικόνα 3. Κυκλώνες και αντικυκλώνες

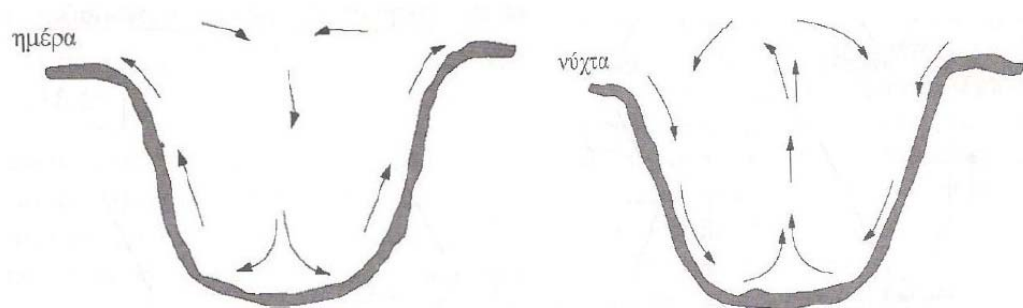
III. *Άνεμοι τοπικής κυκλοφορίας:* Πρόκειται για θερμικές κυρίως κυκλοφορίες οι οποίες επηρεάζουν, σε τοπικό επίπεδο, την ταχύτητα και τη διεύθυνση του ανέμου κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. Είναι συστήματα ανέμων που δημιουργούνται εξαιτίας της θερμοκρασιακής διαφοράς των αέριων μαζών, η οποία επιτρέπει τοπικά την ανύψωση του θερμού αέρα και τη βύθιση του ψυχρού αέρα.

- a. *Θαλάσσια - απόγειος αύρα* : Κατά τη διάρκεια της ημέρας, η ξηρά θερμαίνεται ταχύτερα από τη θάλασσα εξαιτίας της διαφορετικής θερμοχωρητικότητας που παρουσιάζουν, με αποτέλεσμα την ταχύτερη θέρμανση του αέρα πάνω από την επιφάνεια της ξηράς. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται μία κίνηση του αέρα από τη θάλασσα προς την ξηρά. Αυτή η ατμοσφαιρική κυκλοφορία ονομάζεται θαλάσσια αύρα. Αντίθετα, κατά τη διάρκεια της νύχτας, οι συνθήκες αντιστρέφονται με αποτέλεσμα να δημιουργείται μία ατμοσφαιρική κυκλοφορία από την ξηρά προς τη θάλασσα, γνωστή ως απόγειος αύρα (Ζερεφός, 2009).



Εικόνα 4. Θαλάσσια και απόγειος αύρα.

- b. *Αύρα κοιλάδας - ορέων*: Αφορά τοπικές θερμικές κυκλοφορίες του ανέμου που αναπτύσσονται στις πλαγιές των βουνών. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, ο αέρας της κοιλάδας θερμαίνεται με γρήγορους ρυθμούς και ανέρχεται κατά μήκος της πλαγιάς του βουνού σχηματίζοντας την αύρα της κοιλάδας. Όμως, κατά τη διάρκεια της νύχτας, ο αέρας ψύχεται γρήγορα κοντά στην επιφάνεια του εδάφους και ολισθαίνει στην πλαγιά του βουνού, με αποτέλεσμα να σχηματίζεται η αύρα των ορέων (Ζερεφός, 2009)



Εικόνα 5. Αύρα κοιλάδας και ορέων.

Τα κύρια χαρακτηριστικά του ανέμου που πρέπει να εξετάζονται για την εκτίμηση του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής είναι η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου, καθώς και η διακύμανση αυτών των μεγεθών στο χώρο και στο χρόνο. Εκτός από τα μεγέθη αυτά, είναι χρήσιμο να εξετάζεται η ύπαρξη ριπών του ανέμου, το επίπεδο της τύρβης και η διάτμηση του ανέμου στην συγκεκριμένη περιοχή μελέτης. Όλα αυτά τα ανεμολογικά στοιχεία παρέχονται μέσω των μετρήσεων και αναλύονται μέσω των αριθμητικών - υπολογιστικών μοντέλων. Στη συνέχεια, γίνεται μία αναλυτική περιγραφή των μεγεθών αυτών και των χαρακτηριστικών τους.

3.2.1. Ταχύτητα του ανέμου

Η απόσταση που διανύει μία αέρια μάζα στη μονάδα του χρόνου ορίζεται ως ταχύτητα του ανέμου και παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές μέσα στο χώρο και στο χρόνο. Οι διακυμάνσεις της ταχύτητας εξαρτώνται από την ώρα της ημέρας, την εποχική περίοδο, το ύψος μέτρησης και κυρίως από τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Για ένα συγκεκριμένο σημείο στο χώρο και για χρονική περίοδο T , η μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου (V_{mean}) μίας χρονοσειράς μετρήσεων υπολογίζεται από τον τύπο :

$$V_{\text{mean}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i \quad (5)$$

όπου V_i είναι η i μέτρηση της ταχύτητας και N ο αριθμός των μετρήσεων.

Για την εκτίμηση της αστάθειας του ανέμου χρησιμοποιείται το μέγεθος της τυπικής απόκλισης (σ) των μετρήσεων, η οποία δίνεται από τον τύπο:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{1-N} \sum_{i=1}^N (V_i - V_{\text{mean}})^2} \quad (6)$$

Η τυπική απόκλιση έχει τις ίδιες διαστάσεις με τη μεταβλητή και θεωρείται ένα μέτρο διασποράς των τιμών από τη μέση τιμή. Συγκεκριμένα, η τυπική απόκλιση της ταχύτητας του ανέμου μπορεί να θεωρηθεί σαν η μέση ριπή του ανέμου. Μεγάλες τιμές της τυπικής απόκλισης υποδηλώνουν έντονες τυρβώδεις κινήσεις (Μελάς, 2009).

Οι κύριες κατηγορίες της χρονικής μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου είναι οι εξής (Manwell et al., 2009):

- *Σύντομες*: Περιλαμβάνουν τις μεταβολές του ανέμου σε διάρκεια από 1 δευτερόλεπτο (s) έως 10 λεπτά (min), όπως οι ριπές του ανέμου και η τύρβη.
- *Ημερήσιες*: Αφορά την ημερήσια διακύμανση της ταχύτητας και εξαρτάται από το ανάγλυφο της περιοχής, το υψόμετρο και την εποχή του έτους.
- *Ετήσιες*: Πρόκειται για τις μεταβολές της ταχύτητας κατά τη διάρκεια 1 έτους (y).
- *Μεγάλων περιόδων*: Περιγράφονται οι μεταβολές της ταχύτητας για χρονική περίοδο μεγαλύτερη του 1 έτους (y).

Η ημερήσια διακύμανση του ανέμου δηλώνει τη μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου στη διάρκεια της ημέρας. Συνήθως, κατά τη διάρκεια της ημέρας παρατηρείται αύξηση της ταχύτητας του ανέμου, ενώ αντίθετα τη νύχτα παρατηρείται μείωση της ταχύτητας. Αυτή η διακύμανση είναι εντονότερη κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, σε ύψος περίπου 10m, αλλά με την αύξηση του ύψους από την επιφάνεια, παρατηρείται εξομάλυνση αυτής της διακύμανσης και σε πολλές περιπτώσεις και μηδενισμός.

Η ένταση του ανέμου εκφράζεται σε μέτρα ανά δευτερόλεπτο (m/s), χιλιόμετρα ανά ώρα (km/h), μποφόρ (Bf) ή σε κόμβους. Η κλίμακα Μποφόρ αποτελεί έναν εμπειρικό τρόπο μέτρηση της έντασης του ανέμου σε στεριά ή θάλασσα. Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται οι τιμές της κλίμακας:

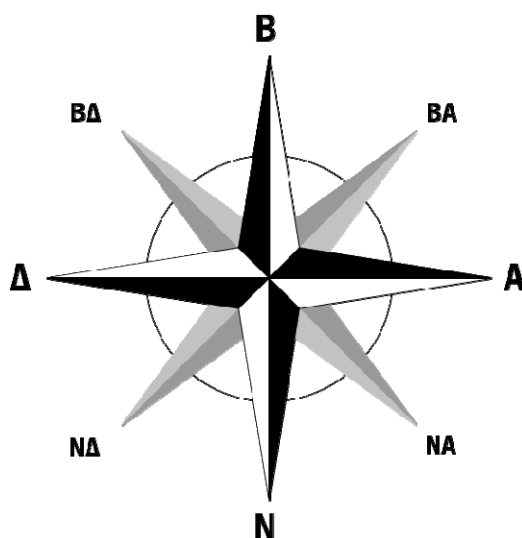
	Μποφόρ (Bf)	m/s	km/h
Νηνεμία (άπνοια)	0	0,0 - < 0,3	0
Υποπνέων	1	0,3 - < 1,6	1 - 5
Ασθενής	2	1,6 - < 3,4	6 - 11
Ασθενής	3	3,4 - < 5,5	12 - 19
Μέτριος	4	5,5 - < 8,0	20 - 28
Μέτριος	5	8,0 - < 10,8	29 - 38
Ισχυρός	6	10,8 - < 13,9	39 - 49
Σφοδρός	7	13,9 - < 17,2	50 - 61
Θυελλώδης	8	17,2 - < 20,8	62 - 74
Θυελλώδης	9	20,8 - < 24,5	75 - 88
Καταιγίζων	10	24,5 - < 28,5	89 - 102
Καταιγίζων	11	28,5 - < 32,7	103 - 117
Έντασης τυφώνα	12	> 32,7	> 118

Πίνακας 1. Η ανεμομετρική κλίμακα Beaufort που ισχύει για τους ανέμους της ξηράς.

3.2.2. Διεύθυνση του ανέμου

Η διεύθυνση του ανέμου μεταβάλλεται συνεχώς στο χώρο και στο χρόνο και χαρακτηρίζεται από το σημείο του ορίζοντα απ' όπου πνέει ο άνεμος. Εκφράζεται είτε σε μοίρες (με αφετηρία τον γήινο μαγνητικό Βορρά και με ωρολογιακή φορά), είτε ονομαστικά, είτε με σύμβολα ανεμολογίου (ανεμορρόμβοι). Οι τιμές καταγραφής της διεύθυνσης κυμαίνονται από 0° έως 360°. Ο προσανατολισμός των κοιλάδων, των βουνών, των λόφων, καθώς και των άλλων χαρακτηριστικών του εδάφους (κτίρια,

βλάστηση) είναι ορισμένοι από τους παράγοντες που επηρεάζουν την κύρια διεύθυνση του ανέμου (Manwell et al, 2009).



Εικόνα 6. Ροδόγραμμα του ανέμου στο οποίο απεικονίζονται οι βασικές διευθύνσεις των ανέμων και οι διάφορες ονομασίες τους.

Με βάση τις καταγραφές της διεύθυνσης του ανέμου κατασκευάζεται το ροδόγραμμα, δηλαδή το διάγραμμα της συχνότητας εμφάνισης του ανέμου για κάθε διεύθυνση με βάση το σύνολο των καταγραφών. Πρόκειται για ένα εποπτικό διάγραμμα, όπου σκοπός του είναι ο καθορισμός της επικρατούσας διεύθυνσης του ανέμου σε μια περιοχή κατά τη διάρκεια 1 έτους, η οποία συχνά μεταβάλλεται ανάλογα με την εποχή του έτους. Ο κυκλικός τομέας του ροδογράμματος χωρίζεται σε 8, 12, 16 ή 32 ίσα διαστήματα που ονομάζονται τομείς διευθύνσεων. Για τη δημιουργία του ροδογράμματος ανέμου μιας περιοχής είναι απαραίτητο οι ανεμολογικές μετρήσεις που θα γίνουν να έχουν μεγάλη χρονική διάρκεια, ώστε να θεωρούνται αξιόπιστες.

3.2.3. Κατανομή της ταχύτητας του ανέμου

Μέσα στο οριακό ατμοσφαιρικό στρώμα η ένταση του ανέμου αυξάνεται καθώς αυξάνεται το ύψος από την επιφάνεια του εδάφους. Η κατακόρυφη αυτή κατανομή ακολουθεί τη συμπεριφορά τυρβώδους ροής (Ανδρίτσος, 2008). Η αύξηση αυτή είναι μεγαλύτερη κοντά στο έδαφος, ενώ σε μεγαλύτερα ύψη ο ρυθμός αύξησης είναι μικρότερος.

Καθώς οι περισσότεροι ανεμολογικοί σταθμοί εγκαθίστανται και καταγράφουν την ταχύτητα του ανέμου σε χαμηλότερα ύψη από το ύψος πλήμνης των μηχανών, είναι αναγκαία η αναγωγή της ταχύτητας του ανέμου σε διαφορετικό ύψος από αυτό όπου έγινε η μέτρηση. Για το λόγο αυτό έχουν προταθεί δυο σχέσεις για την αναγωγή της ταχύτητας σε μεγαλύτερα ύψη :

- *Εκθετική σχέση*: Ο υπολογισμός της ταχύτητας του ανέμου από ένα ύψος μέτρησης $Z(r)$ σε κάποιο άλλο ύψος Z γίνεται μέσω της σχέσης:

$$V(z) = V(z_r) * \left(\frac{z}{z_r}\right)^a \quad (7)$$

όπου $V(z)$: η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος Z , $V(z_r)$: η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος αναφοράς $Z(r)$ και a : ο συντελεστής διάτμησης που εξαρτάται από την τραχύτητα του εδάφους και τη διεύθυνση του ανέμου.

Ο όρος διάτμηση (shear) περιγράφει την κλίση που έχει η καμπύλη της ταχύτητας του ανέμου συναρτήσει του ύψους από την επιφάνεια του εδάφους. Εκφράζει την καθ' ύψος μεταβολή του ανέμου μέσα στο οριακό στρώμα της ατμόσφαιρας. Η αναγωγή αυτή καθίσταται αναγκαία για τον υπολογισμό της ταχύτητας του ανέμου στο ύψος πλήμνης της ανεμογεννήτριας. Ο συντελεστής διάτμησης a εμφανίζει μια καλή ακρίβεια

για ύψη καταγραφής με διαφορά τουλάχιστον 20m, ενώ για μεγαλύτερες διαφορές η ακρίβεια μειώνεται (Jain, 2011). Οι τυπικές τιμές του συντελεστή παρουσιάζονται στον πίνακα 2.

Είδος εδάφους	α
Θάλασσα, άμμος, λεία επιφάνεια	0,10
Γρασίδι	0,16
Χαμηλές καλλιέργειες	0,18
Ψηλές καλλιέργειες ή θάμνοι	0,20
Ψηλά δέντρα, σπίτια	0,30

Πίνακας 2. Τυπικές τιμές του συντελεστή διάτμησης α (Ανδρίτσος, 2008)

- *Λογαριθμική σχέση:* Για τον υπολογισμό της ταχύτητας του ανέμου από ένα ύψος μετρήσεων $Z(r)$ σε κάποιο άλλο ύψος Z χρησιμοποιείται η σχέση:

$$\frac{V(z_r)}{V(z_0)} = \frac{\ln\left(\frac{z_r}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_p}{z_0}\right)} \quad (8)$$

όπου z_0 : το χαρακτηριστικό μήκος τραχύτητας της επιφάνειας του εδάφους.

Όμως, η αύξηση της ταχύτητας περιορίζεται είτε από εμπόδια που υπάρχουν στην επιφάνεια του εδάφους (φυσικά ή τεχνητά), είτε από τη μορφολογία του εδάφους γύρω από τη θέση εγκατάστασης (ορογραφία και τραχύτητα εδάφους), είτε από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή. Στον πίνακα 3 παρουσιάζονται οι κατηγορίες ταξινόμησης της τραχύτητας του εδάφους καθώς και οι αντιπροσωπευτικές τιμές της κάθε κατηγορίας.

Roughness class	Roughness length	Relative energy (%)	Περιγραφή εδάφους - περιοχής
0	0.0002	100	Θάλασσα.
0.5	0.0024	73	Μικτή θαλάσσια και χερσαία ζώνη ή πολύ ομαλή έκταση.
1	0.03	52	Ανοιχτές γεωργικές εκτάσεις χωρίς φράκτες διέλευσης και με διάσπαρτα κτίρια. Μόνο λείους λόφους
1.5	0.055	45	Γεωργικές εκτάσεις με μερικά κτίρια και με φράκτες διέλευσης ύψους 8m και περίπου 1250m μεταξύ τους.
2	0.10	39	Γεωργικές εκτάσεις με μερικά κτίρια και με φράκτες διέλευσης ύψους 8m και 800m μεταξύ τους.
2.5	0.20	31	Γεωργικά εδάφη με κλειστή εμφάνιση και πυκνή βλάστηση - με φράκτες διέλευσης ύψους 8m και 250m μεταξύ τους.
3	0.40	24	Χωριά, μικρές πόλεις, πολύ κλειστές γεωργικές εκτάσεις με πολλούς ή ψηλούς φράχτες, δάση, πολλές απότομες ορογραφικές αλλαγές κλπ.
3.5	0.80	18	Μεγάλη πόλη, πόλεις με εκτεταμένες κατοικημένες περιοχές.
4	1.6	13	Μεγάλες πόλεις με χώρους συγκέντρωσης και ψηλά κτίρια.

Πίνακας 3. Ταξινόμηση των κατηγοριών της τραχύτητας του εδάφους (Ragheb, 2012)

3.2.4. Τύρβη

Με τον όρο τύρβη ορίζεται η διαταραχή της ταχύτητας του ανέμου με περίοδο μικρότερη από την περίοδο ολοκλήρωσης της μέσης τιμής του ανέμου. Ο υπολογισμός του μεγέθους της τύρβης γίνεται με γνώμονα τη θεωρία ανάπτυξης τυρβώδους ροής του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος και περιγράφεται από τη σχέση:

$$I = \frac{\sigma}{V_{mean}} \quad (9)$$

Η ένταση της τύρβης εξαρτάται από τις επικρατούσες ατμοσφαιρικές συνθήκες, από την ύπαρξη εμποδίων και από την τραχύτητα του εδάφους. Ο προσδιορισμός της έντασης της τύρβης στις θέσεις εγκατάστασης των ανεμογεννητριών είναι πολύ σημαντικός, καθώς προκαλεί διαρκείς μεταβολές στο μέτρο της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου. Οι μεταβολές αυτές ευθύνονται για την καταπόνηση των υλικών κατασκευής των ανεμογεννητριών, μειώνοντας το χρόνο ζωής τους.

3.3. Επίδραση της τοπογραφίας στον άνεμο

Η τοπογραφία του εδάφους παίζει σημαντικό ρόλο στη μεταβολή του ανέμου σε μία περιοχή. Η φυσική κίνηση του αέρα πάνω από την επιφάνεια του εδάφους χωρίς εμπόδια θεωρείται ομαλή, με σημαντική επιτάχυνση στην περίπτωση που ρέει πάνω από κορυφές λόφων. Αυτό συμβαίνει διότι, το ανυψωμένο έδαφος έχει την ικανότητα να δημιουργεί δυνάμεις επιτάχυνσης στη ροή του αέρα, γεγονός που οδηγεί σε αύξηση της τοπικής ταχύτητας του ανέμου. Κυρίαρχο ρόλο έχουν οι κορυφογραμμές που παρεμβάλλονται στη φυσική πορεία του αέρα, ο οποίος συμπιέζεται και επιταχύνεται καθώς κινείται ανοδικά προκαλώντας αύξηση της ταχύτητας του ανέμου στην κορυφή της κορυφογραμμής. Έτσι, οι καταλληλότερες περιοχές για εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας είναι οι κορυφογραμμές χαμηλών επιμηκών λόφων με ομαλές κλίσεις του εδάφους και ανοιχτό ορίζοντα, οι ανυψωμένες κορυφογραμμές που είναι κάθετες (90°)

στην επικρατούσα διεύθυνση των ανέμων και σε ανοίγματα των βουνών όπου δημιουργούνται φυσικοί επιταχυντές του ανέμου. Ακόμα, περιοχές όπως οι ανοιχτές πεδιάδες, οι ακρογιαλιές και οι θαλάσσιες περιοχές ενδείκνυνται για την εγκατάσταση αιολικών σταθμών. Γενικά, οι επιδράσεις της τοπογραφίας στον άνεμο διακρίνονται σε τρεις τυπικές κατηγορίες :

3.3.1. Τραχύτητα εδάφους

Ως τραχύτητα αναφέρεται η συλλογική επίδραση της επιφάνειας του εδάφους και των στοιχείων της στη ροή του ανέμου κοντά στο έδαφος. Η αναταραχή που προκαλείται στη ροή του ανέμου από τη μεταβολή της τραχύτητας του εδάφους έχει σαν αποτέλεσμα τη μεταβολή του ύψους του οριακού στρώματος του αέρα. Επομένως, η τραχύτητα του εδάφους επηρεάζει σε πολύ μεγάλο βαθμό το προφίλ του ανέμου.

3.3.2. Ορογραφία εδάφους

Με τον όρο ορογραφία περιγράφεται η οποιαδήποτε διακύμανση στο ύψος του εδάφους, έχοντας ως κοινό σημείο αναφοράς την επιφάνεια της θάλασσας. Οι διακυμάνσεις που παρατηρούνται στο ύψος και στα χαρακτηριστικά του εδάφους, λειτουργούν ως ορογραφικά στοιχεία στη ροή του ανέμου, προκαλώντας είτε επιτάχυνση είτε επιβράδυνση στην ταχύτητά του.

3.3.3. Αντικείμενα - Εμπόδια

Η ροή του ανέμου επηρεάζεται σημαντικά από την παρουσία επιφανειακών εμποδίων όπως κτίρια, με αποτέλεσμα τη μείωση της ταχύτητας του ανέμου στα σημεία αυτά.

3.4. Μορφολογία εδάφους

Τα δυο κύρια είδη μορφολογίας του εδάφους τα οποία εξετάζονται στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή είναι τα εξής :

3.4.1. Τοποθεσία με σύνθετο ανάγλυφο εδάφους

Αφορά μία περιοχή με σημαντικές κλίσεις εδάφους και ορογραφικές διακυμάνσεις, όπως είναι οι πλαγιές των λόφων, των κορυφογραμμών, τα φαράγγια, οι κοιλάδες και τα ορεινά ανάγλυφα. Η επίδραση της σύνθετης τοπογραφίας του εδάφους είναι πολύ σημαντική στη ροή του ανέμου που πνέει σε εκείνη την περιοχή.

Σχετικά έχουν γίνει προσπάθειες να εκτιμηθεί το σφάλμα που υπεισέρχεται στους υπολογισμούς του μοντέλου σε περιοχές με σύνθετη τοπογραφία. Για την ταξινόμηση της πολυπλοκότητας του εδάφους υπάρχει ο δείκτης κλίσης εδάφους RIX (ruggedness index RIX) (Bowen and Mortensen,1996). Πρόκειται για ένα αντικειμενικό μέτρο της έκτασης των απότομων πλαγιών σε μια περιοχή. Ο δείκτης RIX δηλώνει το ποσοστό της περιοχής με κλίση εδάφους μεγαλύτερη από 18.0° σε ακτίνα 3.5km γύρω από τη θέση μίας ανεμογεννήτριας. Δεδομένου ότι οι αιολικοί σταθμοί αποτελούνται από αρκετές ανεμογεννήτριες που κατανέμονται σε μια επιμήκη περιοχή, υπολογίζεται το RIX για την περιοχή περιμετρικά των κύκλων των ανεμογεννητριών με ακτίνα 3.5km, γύρω από κάθε ανεμογεννήτρια του αιολικού σταθμού.

3.4.2. Τοποθεσία με επίπεδο ανάγλυφο εδάφους

Πρόκειται για μια επίπεδη περιοχή χωρίς σημαντικές διακυμάνσεις στο ανάγλυφο του εδάφους, όπου οι συνθήκες του ανέμου επηρεάζονται από τις συνθήκες τραχύτητας του εδάφους. Στην περίπτωση αυτή, καθίσταται αναγκαίος ο έλεγχος της ευρύτερης

περιοχής για την ύπαρξη εμποδίων, όπως είναι τα δέντρα και τα κτίρια. Η παρουσία δέντρων και υψηλών κτιρίων έχει ως αποτέλεσμα το μηδενισμό της ταχύτητας του ανέμου έως την κορυφή αυτών.

3.5. Μέτρηση αιολικού δυναμικού

Για τη μέτρηση του αιολικού δυναμικού μίας περιοχής είναι συνήθως αναγκαία η εγκατάσταση ενός ανεμολογικού ιστού. Η εύρεση και η επιλογή της κατάλληλης θέσης μέτρησης γίνεται έπειτα από επίσκεψη και επιθεώρηση της τοπογραφίας της περιοχής, αφού η μορφολογία του εδάφους φαίνεται να επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό τόσο την ένταση του ανέμου, όσο και την τύρβη. Η θέση εγκατάστασης του ανεμολογικού ιστού πρέπει να είναι κοντά στην περιοχή ενδιαφέροντος, μακριά από δέντρα ή άλλα εμπόδια και κυρίως να βρίσκεται στις υψηλότερες κορυφές, ώστε να είναι πλήρως εκτεθειμένη στους ανέμους. Το πρότυπο MEASNET ορίζει ότι, στην περίπτωση ενός επίπεδου ανάγλυφου εδάφους η μέγιστη επιτρεπόμενη απόσταση οποιαδήποτε ανεμογεννήτριας από τον πλησιέστερο ανεμολογικό ιστό είναι τα 10km, ενώ στην περίπτωση ενός σύνθετου ανάγλυφου εδάφους η μέγιστη επιτρεπόμενη απόσταση είναι τα 2km.

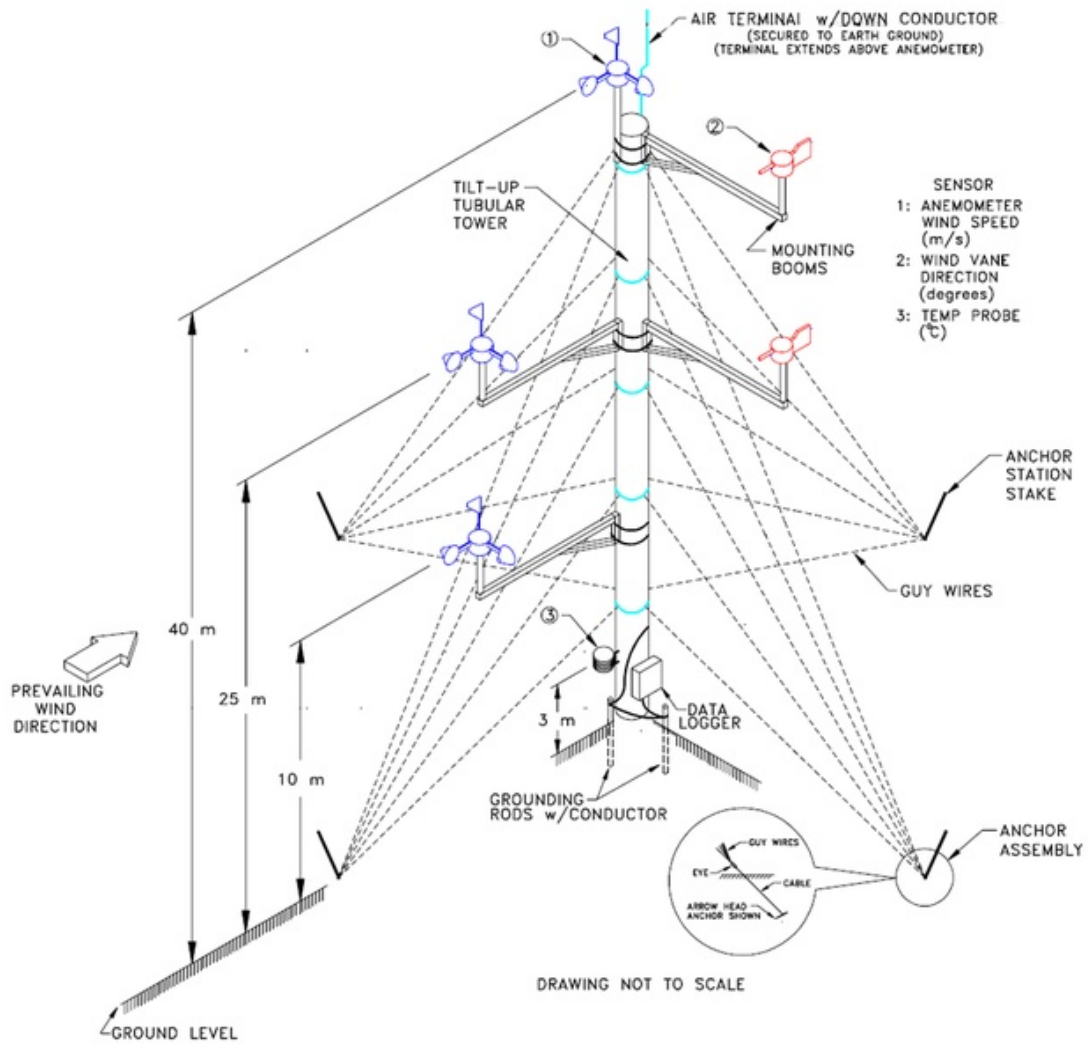
Η διαδικασία της ανάλυσης των μετρήσεων του αιολικού δυναμικού μίας περιοχής διεξάγεται από κατάλληλα εργαστήρια διαπιστευμένα από εθνικούς φορείς και σύμφωνα με τα σχετικά διεθνή πρότυπα και τη διαπιστευμένη διαδικασία. Στην Ελλάδα, αρμόδιος φορέας διαπίστευσης είναι το Εθνικό Σύστημα Διαπίστευσης (Ε.ΣΥ.Δ.) με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN ISO/IEC 17025:2005. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει την εγκατάσταση και συντήρηση ενός ανεμολογικού ιστού, την ανάλυση των μετρήσεων και τη σύνταξη των σχετικών εκθέσεων σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα IEC 61400-12-1 και MEASNET, αλλά και με βάση τη διαπιστευμένη διαδικασία ISO/IEC 17025.

Με βάση τις οδηγίες του προτύπου MEASNET, η χρονική περίοδος μέτρησης της ταχύτητας του ανέμου από έναν ανεμολογικό ιστό πρέπει να καλύπτει τουλάχιστον 12 πλήρεις και διαδοχικούς μήνες, ώστε να αξιολογούνται οι εποχιακές διακυμάνσεις του ανέμου στην περιοχή μελέτης. Στην περίπτωση που υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα από περισσότερους ανεμολογικούς ιστούς τότε ενδείκνυται να πραγματοποιηθεί συσχέτιση των δεδομένων μεταξύ των ανεμολογικών ιστών με σκοπό την πλήρωση κενών δεδομένων και την επέκταση της χρονικής περιόδου μέτρησης για κάθε έναν ανεμολογικό ιστό.

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά ενός ανεμολογικού ιστού είναι το ύψος του, το οποίο καθορίζεται από το αναμενόμενο αιολικό δυναμικό αλλά και από το ύψος πλήμνης των ανεμογεννητριών που πρόκειται να εγκατασταθούν στην περιοχή. Συγκεκριμένα, ακολουθώντας τις οδηγίες του MEASNET, το επίπεδο της κύριας μέτρησης της ταχύτητας του ανέμου σε έναν ανεμολογικό ιστό πρέπει να είναι τουλάχιστον τα 2/3 του προτεινόμενου ύψους πλήμνης των ανεμογεννητριών. Ύψη μέτρησης κοντά στο προτεινόμενο ύψος πλήμνης επιτρέπουν τον ακριβή προσδιορισμό των κλιματολογικών συνθηκών του ανέμου και ταυτόχρονα τη μείωση της αβεβαιότητας κατά τη διαδικασία της κατακόρυφης αναγωγής αυτών των συνθηκών. Επιπλέον, το πρωτεύον ανεμόμετρο πρέπει να διαθέτει έναν εφεδρικό ανεμόμετρο εγκατεστημένο σύμφωνα με τα πρότυπα του IEC 61400-12-1, ώστε να είναι εφικτή η επιτόπια σύγκριση των τιμών και η πλήρωση κενών δεδομένων. Επίσης, ο ανεμολογικός ιστός πρέπει να διαθέτει διάφορα επίπεδα λήψης μετρήσεων από το έδαφος προκειμένου να μπορεί να εκτιμηθεί η διάτμηση του ανέμου και να προσδιοριστεί το προφίλ ανέμου στην περιοχή. Σύμφωνα με τις οδηγίες του MEASNET, πρέπει να εγκαθίσταται ένα επιπλέον ανεμόμετρο με σημαντική διαφορά στο ύψος μέτρησης (τουλάχιστον 20m).

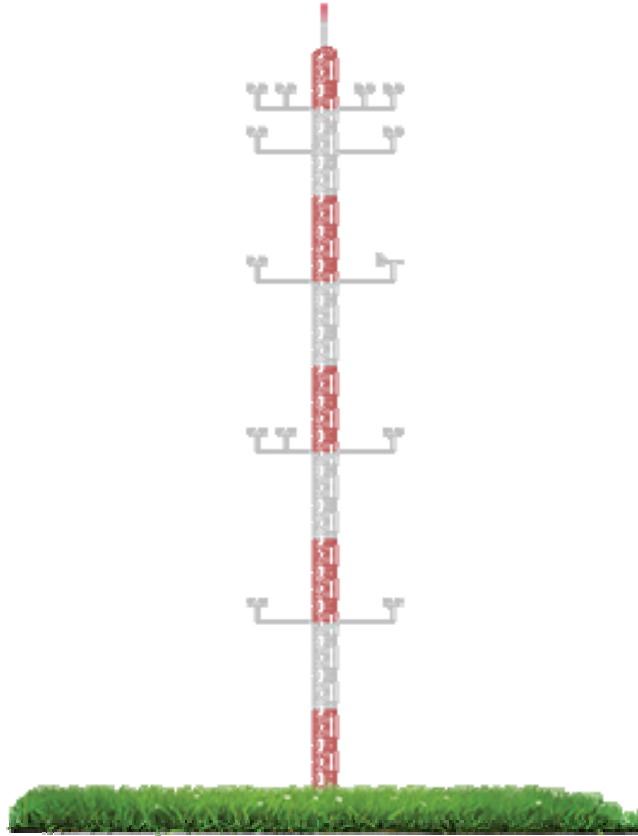
Τα δυο κύρια είδη των ανεμολογικών ιστών είναι:

- *Σωληνωτοί* : Οι ιστοί αυτοί είναι βαρέως τύπου και συνήθως μικρού ύψους (10m έως 40m) με διάμετρο σωλήνα 130 - 150mm. Ο τύπος αυτός είναι κατάλληλος για σχετικά χαμηλά υψόμετρα, αφού είναι λιγότερο ανθεκτικοί στις υψηλές ταχύτητες του ανέμου και στις αντίξοες καιρικές συνθήκες.



Εικόνα 7. Σκαρίφημα ενός σωληνωτού ανεμολογικού ιστού.

- *Δικτυωτοί:* Οι ιστοί αυτοί είναι ελαφρού τύπου και συνήθως μεγάλου ύψους (50m έως 120m). Είναι ανθεκτικοί στις υψηλές ταχύτητες του ανέμου και στις αντίξοες καιρικές συνθήκες που παρατηρούνται σε μεγάλα υψόμετρα (άνω των 1000m).



Εικόνα 8. Σκαρίφημα ενός δικτυωτού ανεμολογικού ιστού.

Και για τους δυο τύπους ανεμολογικών ιστών, οι αισθητήρες μέτρησης πρέπει να εγκαθίστανται σε ξεχωριστούς βραχίονες στήριξης, σύμφωνα με τις κατευθυντήριες οδηγίες που περιγράφονται στο διεθνές πρότυπο IEC 61400-12-1. Συγκεκριμένα, όλοι οι βραχίονες στήριξης των αισθητήρων μέτρησης της ταχύτητας που είναι εγκατεστημένοι σε έναν ανεμολογικό ιστό πρέπει να προσανατολίζονται προς την ίδια κατεύθυνση. Σε περίπτωση που είναι γνωστή η επικρατούσα διεύθυνση του ανέμου

στην περιοχή, οι βραχίονες στήριξης πρέπει να εγκατασταθούν με μετατόπιση 45 μοιρών από την επικρατούσα διεύθυνση του ανέμου, όσο αναφορά τους σωληνωτούς ιστούς, ή με μετατόπιση 90° από την επικρατούσα διεύθυνση του ανέμου, όσο αναφορά τους δικτυωτούς ιστούς.

Για τη μέτρηση της έντασης της ταχύτητας του ανέμου χρησιμοποιούνται ειδικοί αισθητήρες μέτρησης, τα ανεμόμετρα. Είναι όργανα κατάλληλα πιστοποιημένα και διακριβωμένα και καταγράφουν ηλεκτρονικά τις τιμές σε ειδικό σύστημα καταγραφής.



Εικόνα 9. Τύποι ανεμομέτρων

Για την καταγραφή της διεύθυνσης του ανέμου χρησιμοποιούνται ειδικοί αισθητήρες μέτρησης, οι ανεμοδείκτες, οι οποίοι καταγράφουν την κατεύθυνση από την οποία πνέει ο άνεμος.



Εικόνα 10. Τύποι ανεμοδεικτών

Τα κυριότερα μεγέθη που πρέπει να καταγράφονται στη διάρκεια μιας μέτρησης του αιολικού δυναμικού είναι:

- Η μέση ταχύτητα του ανέμου
- Η μέγιστη τιμή της ταχύτητας (Gust)
- Η ελάχιστη τιμή της ταχύτητας
- Η τυπική απόκλιση της ταχύτητας (Standard Deviation).
- Η επικρατούσα διεύθυνση του ανέμου
- Η διεύθυνση της μέγιστης ταχύτητας
- Η τυπική απόκλιση της διεύθυνσης

Σύμφωνα με τις κατευθυντήριες οδηγίες του MEASNET, η μέτρηση όλων των προαναφερθέντων μεγεθών πρέπει να γίνεται με συχνότητα 1 δευτερόλεπτο (s) και να καταγράφεται η τιμή αυτών με χρονικό βήμα 10 λεπτών (10-min) από ένα ειδικό σύστημα καταγραφής δεδομένων (data logger) που περιέχει κατάλληλο πρόγραμμα συλλογής και αποθήκευσης των μετρήσεων. Οι καταγραφές αυτές μεταφέρονται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή (είτε μέσω συστήματος τηλεμετρίας GSM, είτε μέσω καρτών μνήμης) και εξάγονται ως αρχεία κειμένου με σκοπό την εισαγωγή και επεξεργασία αυτών από εξειδικευμένα προγράμματα ανάλυσης δεδομένων.

Κεφάλαιο 4

Μεθοδολογία

4.1. Εισαγωγή

Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής είναι η εκτίμηση της επίδοσης του μοντέλου προσομοίωσης της ροής του ανέμου WAsP για δυο περιπτώσεις αιολικών σταθμών, εγκατεστημένων σε περιοχές με επίπεδο και με σύνθετο ανάγλυφο εδάφους αντίστοιχα. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε σύγκριση των θεωρητικών αποτελεσμάτων του μοντέλου προσομοίωσης WAsP με τις πραγματικές τιμές της ταχύτητας του ανέμου όπως καταγράφηκαν στις θέσεις των ανεμογεννητριών του εκάστοτε αιολικού σταθμού.

Η ανεμολογική μελέτη, που διεξήχθη για κάθε περίπτωση μελέτης, περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια:

- Συλλογή και ανάλυση των ανεμολογικών δεδομένων
- Δημιουργία ενός μοντέλου ροής του ανέμου χρησιμοποιώντας τα προγράμματα WindPRO και WAsP
- Δημιουργία ενός αιολικού χάρτη της ευρύτερης περιοχής
- Πρόβλεψη της ταχύτητας του ανέμου σε κάθε θέση ανεμογεννήτριας και σύγκριση αυτής με την πραγματική ταχύτητα του ανέμου όπως καταγράφεται από το σύστημα SCADA των ανεμογεννητριών.

4.2. Ανεμολογικά δεδομένα

Τα ανεμολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στις δυο περιοχές μελέτης, συλλέχθηκαν από 2 ανεμολογικούς ιστούς, οι οποίοι ήταν εγκατεστημένοι ο ένας σε σύνθετο ανάγλυφο εδάφους και ο άλλος σε επίπεδο. Οι μετρήσεις αυτές αποτελούνταν από χρονοσειρές δεδομένων σε 10-λεπτη μορφή και περιείχαν πληροφορίες σχετικά με την ταχύτητα και τη διεύθυνση του ανέμου για την κάθε περιοχή μελέτης. Για την επεξεργασία και την ανάλυση αυτών των ανεμολογικών δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πρόγραμμα (software) Windographer της εταιρείας AWS Truepower. Το πρόγραμμα αυτό επιτρέπει την ταυτόχρονη ανάλυση δεδομένων από διάφορα επίπεδα μέτρησης στον ίδιο ανεμολογικό ιστό και εξάγει αποτελέσματα σχετικά με τη χωρική διαμόρφωση του ανέμου στη θέση εγκατάστασης του ανεμολογικού ιστού. Βασικός στόχος ήταν ο υπολογισμός των κύριων χαρακτηριστικών του ανέμου στις θέσεις των ανεμολογικών ιστών, όπως είναι η μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου, η διαθεσιμότητα των δεδομένων για το διάστημα λειτουργίας του κάθε ανεμολογικού ιστού και το ροδόγραμμα του ανέμου. Με τον τρόπο αυτό προσδιορίστηκαν οι κύριες διευθύνσεις του ανέμου στην κάθε περιοχή μελέτης καθώς και η τιμή του συντελεστή διάτμησης, μέσα από την οποία δόθηκε η πληροφορία για το προφίλ του ανέμου στη θέση του εκάστοτε ανεμολογικού ιστού.

4.3. Τοπογραφία εδάφους

Σχετικά με την τοπογραφία της κάθε περιοχής μελέτης αντλήθηκαν πληροφορίες από τη διεθνή βάση δεδομένων DataForWind και από τη βάση δεδομένων του Οργανισμού Κτηματολογίου & Χαρτογραφίσεων Ελλάδος (ΟΚΧΕ) που διαθέτουν έτοιμα ψηφιακά μοντέλα εδάφους. Έγινε μετατροπή των ψηφιακών αυτών μοντέλων, με τη βοήθεια ειδικών Γεωπληροφοριακών Συστημάτων (π.χ. λογισμικό πρόγραμμα Global Mapper), σε συγκεκριμένη μορφή αρχείου η οποία είναι συμβατή από τα λογισμικά προγράμματα WindPRO και WASP. Τα χωρία των ψηφιακών μοντέλων εδάφους, που

χρησιμοποιηθήκαν για τη μοντελοποίηση της ροής του ανέμου και στις δυο περιπτώσεις μελέτης, έχουν ανάλυση πλέγματος 20x20km και οι ισοϋψείς καμπύλες απέχουν απόσταση 4m, με σκοπό την καλύτερη δυνατή ακρίβεια.

4.4. Τραχύτητα εδάφους

Τα δεδομένα της τραχύτητας εδάφους αντλήθηκαν και ψηφιοποιήθηκαν από τους υπάρχοντες χάρτες της Corine Land Cover (CORINE2000). Η CORINE2000 είναι ένας ψηφιακός χάρτης κάλυψης/χρήσης της γήινης επιφάνειας για τις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης και διατίθεται από την Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Περιβάλλοντος (European Environment Agency - EEA). Τα χωρία των ψηφιακών μοντέλων τραχύτητας εδάφους, που χρησιμοποιηθήκαν για τη μοντελοποίηση της ροής του ανέμου και στις δυο περιπτώσεις μελέτης, έχουν ανάλυση πλέγματος 40x40km με σκοπό την κάλυψη της ευρύτερης περιοχής μελέτης.

4.5. Λογισμικά προγράμματα WindPro - WASP

Για την εκτίμηση του αιολικού δυναμικού χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πρόγραμμα (software) WindPro Version3.1 που έχει αναπτυχθεί από την εταιρεία EMD International A/S (www.emd.dk). Το λογισμικό πρόγραμμα WindPRO είναι ένα εξειδικευμένο λογισμικό προσομοίωσης της ροής του ανέμου και αφορά το σχεδιασμό, την ανάπτυξη και τη μελέτη/εκτίμηση αιολικών έργων. Είναι συμβατό με συστήματα Windows και αποτελείται από μία σειρά ενοτήτων (modules), οι οποίες επιτρέπουν στο πρόγραμμα να δημιουργεί στατιστικές για τον άνεμο, να εκτελεί απλούς ή/και πολύπλοκους ενεργειακούς υπολογισμούς και να δημιουργεί χάρτες αιολικού και ενεργειακού δυναμικού. Οι χρήστες μπορούν να συνδυάζουν τις ενότητες ανάλογα με τις ανάγκες τους. Βασίζεται σε πολυετή εμπειρία πάνω στην ανάπτυξη φιλικών στο

χρήστη εργαλείων για ανεμολογικούς και ενεργειακούς υπολογισμούς των αιολικών σταθμών.

Στις ενότητες που διαθέτει το WindPRO συγκαταλέγεται και το λογισμικό πρόγραμμα WAsP. Είναι ένα από τα πιο ευρέως διαδεδομένα λογισμικά προγράμματα προσομοίωσης του πεδίου ροής του ανέμου και βασίζεται στη θεωρία των Jackson - Hunt (1975). Για τον υπολογισμό της ταχύτητας του ανέμου στις διάφορες θέσεις, το μοντέλο επιλύει τις γραμμικές εξισώσεις των Navier-Stokes. Το πρόγραμμα αυτό περιέχει γραμμικά μοντέλα για την οριζόντια και την κάθετη αναγωγή των δεδομένων του ανέμου σε θέσεις ανεμογεννητριών, λαμβάνοντας υπόψη την κάλυψη των εμποδίων, τις αλλαγές στην τραχύτητα του εδάφους και τις διακυμάνσεις στο ανάγλυφο του εδάφους.

Για την προσομοίωση της ροής του ανέμου χρησιμοποιούνται και τα δυο λογισμικά προγράμματα (WindPRO και WAsP) με τη διασύνδεση αυτών να γίνεται μέσω της ενότητας *WAsP INTERFACE*. Η εισαγωγή όλων των απαραίτητων δεδομένων, όπως ανεμολογικά δεδομένα, ψηφιακά δεδομένα εδάφους, εμπόδια, θέσεις ανεμογεννητριών, γίνεται αποκλειστικά από το λογισμικό πρόγραμμα WindPRO, ενώ το λογισμικό πρόγραμμα WAsP λειτουργεί ως μια υπολογιστική μηχανή, η οποία βασίζεται στα στατιστικά ανεμολογικά δεδομένα και στα ψηφιακά δεδομένα εδάφους, με στόχο την επίλυση των γραμμικών εξισώσεων για τον υπολογισμό του πεδίου ροής του ανέμου.

4.5.1. Δημιουργία αιολικού χάρτη

Η ενότητα *RESOURCE* υπολογίζει ένα αιολικό χάρτη για μία ορισμένη περιοχή που ορίζεται γραφικά με συγκεκριμένη ανάλυση. Για τον υπολογισμό απαιτείται η χρήση του λογισμικού προγράμματος WAsP λαμβάνοντας υπόψη τα ψηφιακά δεδομένα των ισοϋψών καμπυλών και της τραχύτητας του εδάφους. Τα αποτελέσματα δύναται να

παρουσιαστούν ως τιμές ταχύτητας του αέρα (m/s), πυκνότητας ενέργειας του αέρα (W/m²) για συγκεκριμένο ύψος υπολογισμού ή παραγόμενης ενέργειας (MWh/year) για συγκεκριμένο τύπο ανεμογεννήτριας.

4.5.2. Μακροχρόνιες πηγές ανεμολογικών δεδομένων

Ιδιαίτερης σημασίας θεωρείται ο υπολογισμός της μακροχρόνιας τιμής του αιολικού δυναμικού για κάθε θέση μέτρησης ενός ανεμολογικού ιστού. Η χρήση της μεθοδολογίας "Μέτρηση-Συσχέτιση-Εκτίμηση (Measure-Correlate-Predict)" σε συνδυασμό με βάσεις μακροχρόνιων ανεμολογικών δεδομένων επιτρέπει την αναγωγή των μετρήσεων σε μακροχρόνιο αντιπροσωπευτικό δείγμα. Η ενότητα *MCP*, που διαθέτει το λογισμικό πρόγραμμα WindPRO, χρησιμοποιείται για τη διόρθωση των ανεμολογικών δεδομένων μέσω της αναγωγής αυτών σε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, έχοντας ως αναφορά αντίστοιχη χρονοσειρά μεγαλύτερης χρονικής διάρκειας. Η ενότητα αυτή περιλαμβάνει τις τέσσερις πιο διαδεδομένες μεθόδους συσχέτισης δεδομένων, όπως Linear Regression, Matrix, Weibull Scale and Wind Index. Κατά τη διαδικασία της συσχέτισης των δεδομένων προτείνεται η χρήση της μεθόδου Linear Regression ή της μεθόδου Matrix για τοποθεσίες όπου τα δεδομένα, τόσο από τον ανεμολογικό ιστό αναφοράς όσο και από τις μακροχρόνιες πηγές δεδομένων, διαθέτουν λεπτομερή χρονοσειρά με υψηλή διαθεσιμότητα (Thøgersen et al. 2007)

Ακόμα, υπάρχει η δυνατότητα αυτόματης εισαγωγής δεδομένων στο λογισμικό πρόγραμμα μέσα από ένα πλήθος διαθέσιμων μοντέλων reanalysis αποτελούμενων από κόμβους που διαθέτουν χρονοσειρές ανεμολογικών δεδομένων από το 1990 ως σήμερα. Ένα εξ' αυτών είναι και το μοντέλο μέσης κλίμακας EMD ConWx, που χρησιμοποιήθηκε στη μελέτη για τη μακροχρόνια αναγωγή των μετρήσεων. Έχει ανάλυση 0.03°x0.03° γεωγραφικού πλάτους και μήκους, ή περίπου ανάλυση πλέγματος 3x3km, με ωριαία χρονική ανάλυση. Κάθε χρονοσειρά διαθέτει περισσότερα από 20 έτη ανεμολογικών

δεδομένων, τα οποία ενημερώνονται σε τακτά χρονικά διαστήματα. Δεδομένα από το Ευρωπαϊκό Κέντρο Μεσοπρόθεσμων Μετεωρολογικών Προγνώσεων (ECMWF) έχουν χρησιμοποιηθεί ως παγκόσμιο όριο βάσης δεδομένων, το οποίο καλύπτει όλη την Ευρώπη συμπεριλαμβανομένων των μεγαλύτερων τμημάτων της Τουρκίας και της Ουκρανίας, εξαιρουμένων όμως των βόρειων ακτών της Σκανδιναβίας. Το τελικό αποτέλεσμα της διαδικασίας "Μέτρηση-Συσχέτιση-Εκτίμηση" είναι μία στατιστική κατανομή της ταχύτητας του ανέμου που βασίζεται στα δεδομένα του εδάφους και στην κλιματολογία της κάθε περιοχής μελέτης.

4.5.3. Διαδικασία για την εκτίμηση του αιολικού δυναμικού

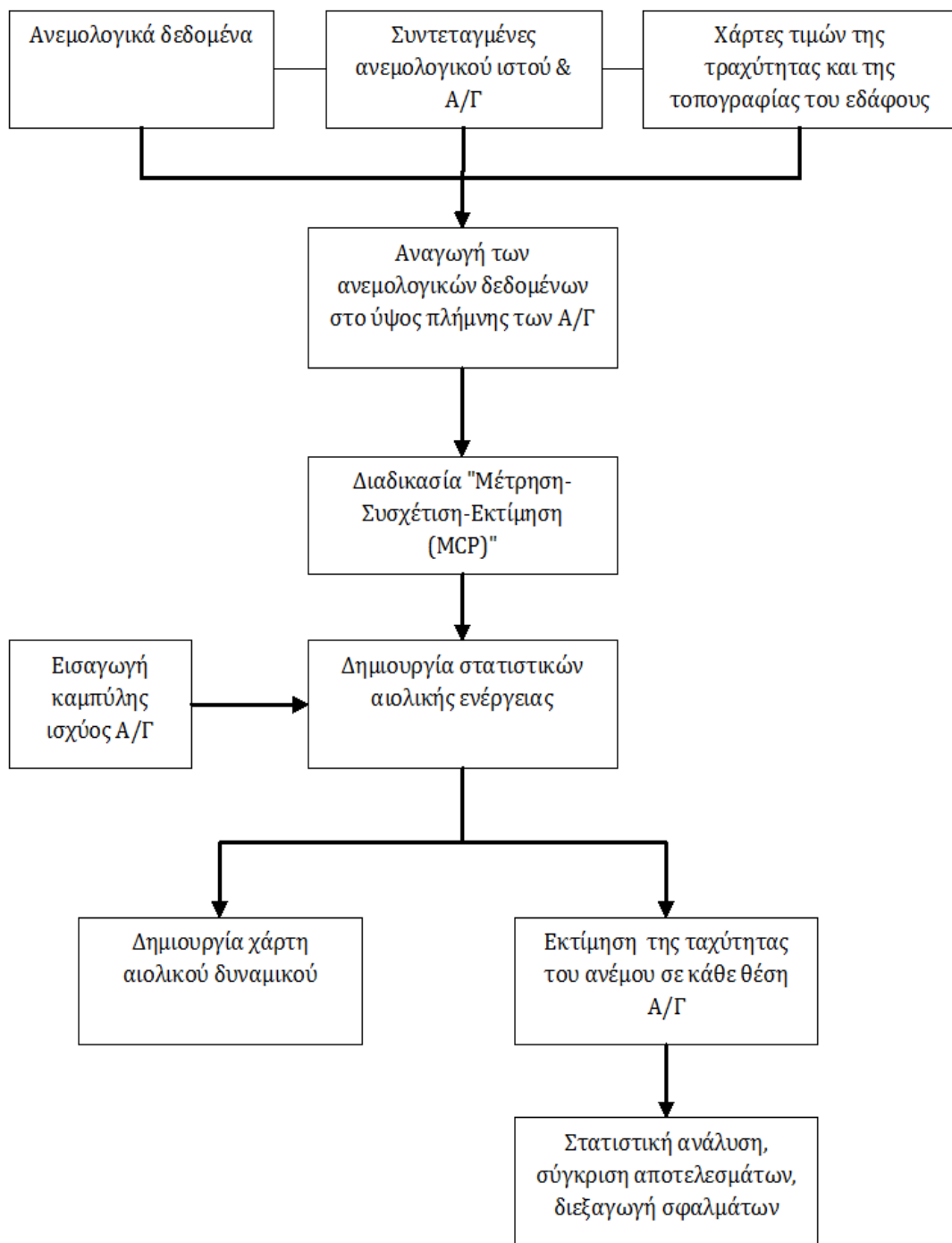
Αρχικά συλλέχθηκαν τα δεδομένα από τους δυο ανεμολογικούς ιστούς, οι οποίοι ήταν εγκατεστημένοι σε περιοχή με σύνθετο (Mast_1) και με επίπεδο ανάγλυφο εδάφους (Mast_2). Οι μετρήσεις αυτές εισήχθησαν στο λογισμικό πρόγραμμα Windographer όπου πραγματοποιήθηκε έλεγχος ποιότητας των ανεμολογικών δεδομένων με σκοπό την καταγραφή των περιστατικών (σφάλματα λόγω καταγραφής ή πάγου) που θα πρέπει να απορριφθούν και να μη ληφθούν υπόψη στην ανάλυση των μετρήσεων.

Έπειτα ακολούθησε η εισαγωγή της χρονοσειράς των δεδομένων, που εξήχθη από την προηγούμενη διαδικασία, στο λογισμικό πρόγραμμα WindPro. Εισήχθησαν ακόμα οι απαραίτητες πληροφορίες σχετικά με τις συντεταγμένες των ανεμολογικών ιστών και των ανεμογεννητριών των δυο αιολικών σταθμών, καθώς και οι ψηφιακοί χάρτες τιμών που περιείχαν τις πληροφορίες για την τραχύτητα και την τοπογραφία του εδάφους για την κάθε περιοχή μελέτης ξεχωριστά. Επόμενο βήμα ήταν η αναγωγή της ταχύτητας του ανέμου στο ύψος πλήμνης των ανεμογεννητριών του εκάστοτε αιολικού σταθμού. Ακολούθησε η διαδικασία "Μέτρηση-Συσχέτιση-Εκτίμηση (MCP)" προκειμένου να επεκταθεί η περίοδος των διαθέσιμων δεδομένων της χρονοσειράς του ανέμου στο ύψος πλήμνης των μηχανών σε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Για τη συσχέτιση των δεδομένων επιλέχθηκε η μέθοδος Matrix και στις δυο περιπτώσεις μελέτης, αν και

πραγματοποιήθηκαν όλες οι μέθοδοι MCP για λόγους σύγκρισης για να εξασφαλιστεί ότι η μέθοδος Matrix δεν έδωσε ένα μη ρεαλιστικό αποτέλεσμα.

Τελικό βήμα ήταν η δημιουργία στατιστικών του αιολικού δυναμικού με στόχο την επίλυση του μοντέλου ροής του ανέμου για τις δυο περιπτώσεις μελέτης. Συγκεκριμένα για την περιοχή μελέτης με σύνθετο ανάγλυφο εδάφους, εξετάστηκε η πιθανότητα εφαρμογής στατιστικών διορθώσεων με βάση το δείκτη κλίσεων εδάφους RIX, με σκοπό τη βελτιστοποίηση της ακρίβειας της προβλεπόμενης ταχύτητας ανέμου στις θέσεις των ανεμογεννητριών. Διαπιστώθηκε όμως ότι δεν ήταν αναγκαία η εφαρμογή μίας τέτοιας διόρθωσης στην πρόβλεψη της ταχύτητας για τη συγκεκριμένη τοποθεσία μελέτης, καθώς οι τιμές του δείκτη ΔRIX κυμαίνονταν από -3.0% έως 2.5%.

Τελικός στόχος ήταν η δημιουργία ενός χάρτη απεικόνισης του αιολικού δυναμικού στην κάθε περιοχή μελέτης. Μέσα από το χάρτη αυτό προκύπτει μία αρχική πρόβλεψη της ταχύτητας του ανέμου σε κάθε θέση ανεμογεννήτριας του αντίστοιχου αιολικού σταθμού. Έπειτα πραγματοποιήθηκε στατιστική ανάλυση και σύγκριση των προβλεπόμενων τιμών με την πραγματική τιμή της ταχύτητας του ανέμου όπως αυτή καταγράφηκε από το σύστημα SCADA των ανεμογεννητριών.



Διάγραμμα 7. Διάγραμμα ροής της διαδικασίας για την εκτίμηση του αιολικού δυναμικού μέσω των λογισμικών προγραμμάτων WindPro και WAsP, και τον προσδιορισμό των σφαλμάτων στην προβλεπόμενη ταχύτητα του ανέμου στις θέσεις των ανεμογεννητριών των αιολικών σταθμών.

Κεφάλαιο 5

Εκτίμηση αιολικού δυναμικού σε σύνθετο ανάγλυφο

5.1. Περιγραφή της θέσης μέτρησης του αιολικού δυναμικού

Βάσει του προτύπου IEC 61400-12-1, η μορφολογία του εδάφους για την πρώτη περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται ως σύνθετη. Για την εκτίμηση της ταχύτητας του ανέμου στις θέσεις των ανεμογεννητριών ενός αιολικού σταθμού που λειτουργεί στη περιοχή, θα χρησιμοποιηθούν μετρήσεις ανέμου από κοντινό ανεμολογικό ιστό ο οποίος βρίσκεται εντός της έκτασης του πολυγώνου. Ο ιστός απέχει απόσταση 380m από την πλησιέστερη ανεμογεννήτρια και 1982m από την πιο μακρινή ανεμογεννήτρια. Οι μετρήσεις αυτές έχουν διεξαχθεί από Εργαστήριο Ανεμολογικών Μετρήσεων διαπιστευμένο κατά DIN-EN ISO/IEC17025:2005.

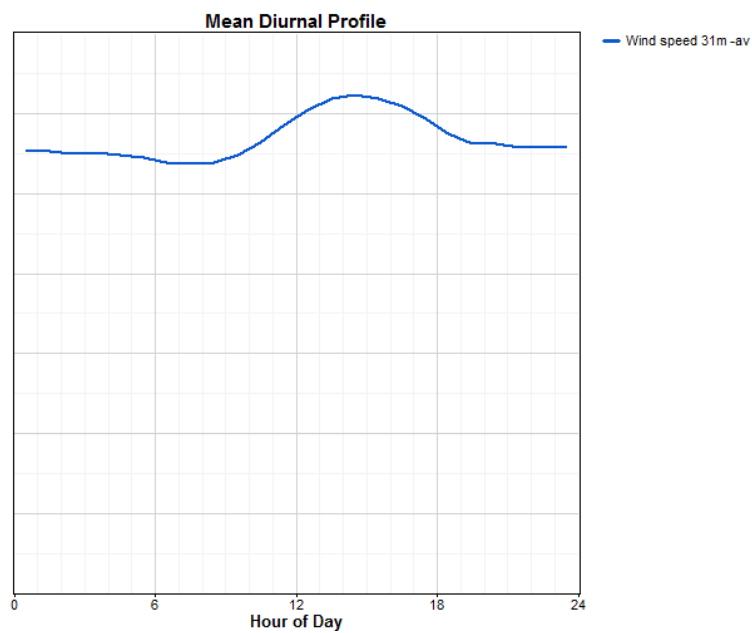
Ο ανεμολογικός ιστός εγκαταστάθηκε στις 23/12/2006 όπου ξεκίνησε η λειτουργία του και απεγκαταστάθηκε έπειτα από 1 έτος. Είναι σωληνωτός ιστός, τύπου Φ152, και το ύψος του από την επιφάνεια του εδάφους είναι 31m. Αποτελείται από τρεις αισθητήρες μέτρησης της ταχύτητας του ανέμου (ανεμόμετρα), δυο αισθητήρες μέτρησης της διεύθυνσης του ανέμου (ανεμοδείκτες) και ένα σύστημα καταγραφής των δεδομένων. Όλα τα όργανα μέτρησης και καταγραφής φέρουν πιστοποιητικά διακρίβωσης από

διακεκριμένο οίκο διακρίβωσης. Τα χαρακτηριστικά του ιστού καθώς και τα ανεμολογικά αποτελέσματα για το ύψος μέτρησης των 31m φαίνονται αναλυτικά στον πίνακα 4:

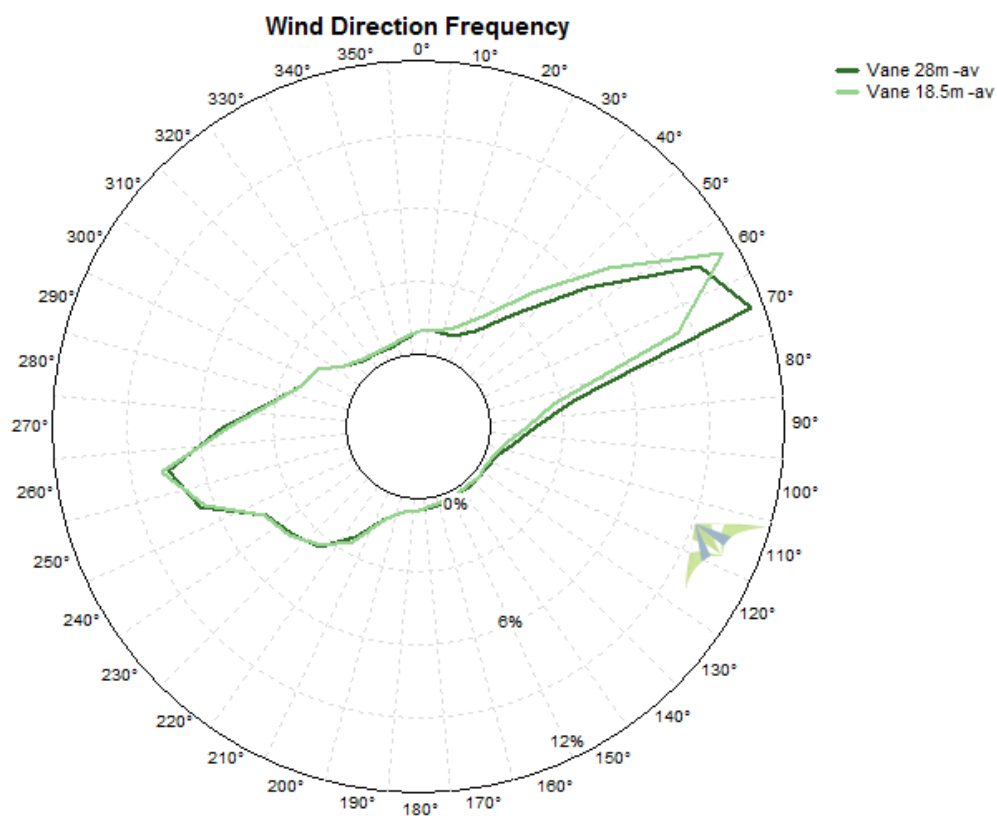
Κωδικός ανεμολογικού ιστού	Mast_1
Τύπος ανεμολογικού ιστού	Σωληνωτός
Ύψος μέτρησης	31m
Υψόμετρο	1035m
Θέση	Εντός του πολυγώνου του αιολικού σταθμού
Χρονική Περίοδος μέτρησης	23/12/2006 - 22/12/2007
Μέση ταχύτητα ανέμου (m/s)	5.8
Διαθεσιμότητα	100%

Πίνακας 4. Χαρακτηριστικά του ανεμολογικού ιστού (Mast_1) για την περίπτωση του σύνθετου ανάγλυφου.

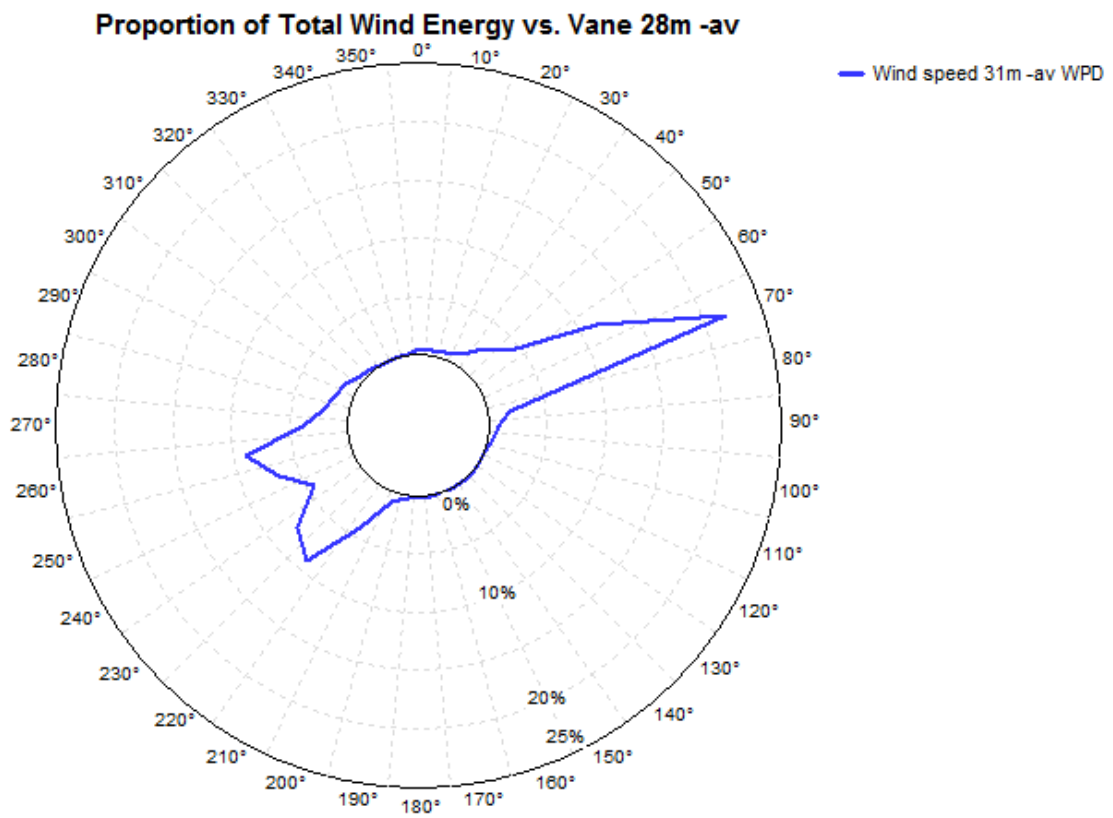
Στη συνέχεια παρουσιάζονται το ημερήσιο προφίλ του ανέμου (εικόνα 11) και οι κύριες διευθύνσεις του ανέμου τόσο χρονικά (εικόνα 12), όσο και ενεργειακά (εικόνα 13). Τα ροδογράμματα συχνότητας και ενέργειας του ανέμου χωρίζονται σε 36 τομείς, εύρους 10° έκαστος, από τα οποία προκύπτει ότι χρονικά η κύρια διεύθυνση στη θέση μέτρησης του ανεμολογικού ιστού είναι η ανατολική-βορειοανατολική (ΑΒΑ) με συχνότητα εμφάνισης 11.50% και η δευτερεύουσα είναι η δυτική-νοτιοδυτική (ΔΝΔ) με συχνότητα εμφάνισης 7.49% (πίνακας 5).



Εικόνα 11. Ημερήσιο προφίλ του ανέμου στο ύψος μέτρησης του ανεμολογικού ιστού (Mast_1).



Εικόνα 12. Ροδόγραμμα συχνότητας του ανέμου, ανά διεύθυνση, στη θέση του ανεμολογικού ιστού (Mast_1).

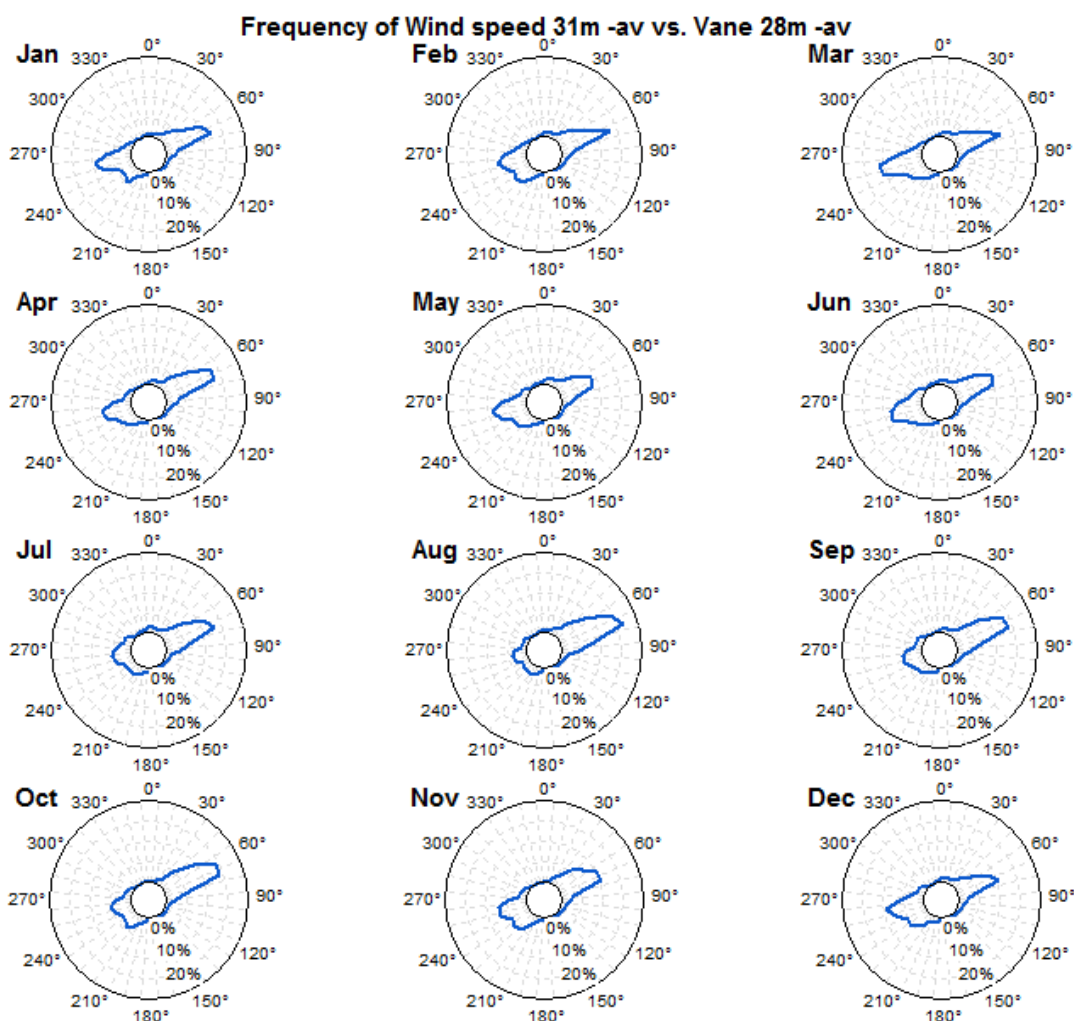


Εικόνα 13. Ροδόγραμμα ενέργειας του ανέμου, ανά διεύθυνση, στη θέση του ανεμολογικού ιστού (Mast_1).

Τομέας	Διάμεσος Τομέα	Συχνότητα (%)	
		Ανεμόμετρο_28m	Ανεμόμετρο_18.5m
1	0°	0.98	1.00
2	10°	1.05	1.05
3	20°	1.07	1.36
4	30°	1.64	2.31
5	40°	3.09	4.24
6	50°	6.03	7.23
7	60°	10.37	11.41
8	70°	11.50	8.35
9	80°	3.51	2.71
10	90°	1.83	1.44
11	100°	0.97	0.71
12	110°	0.51	0.38
13	120°	0.31	0.24
14	130°	0.29	0.24
15	140°	0.23	0.20
16	150°	0.24	0.21
17	160°	0.29	0.25
18	170°	0.34	0.32
19	180°	0.43	0.42
20	190°	0.59	0.56
21	200°	1.03	1.05
22	210°	2.30	2.46
23	220°	3.45	3.37
24	230°	3.90	4.00
25	240°	4.32	4.34
26	250°	6.61	6.39
27	260°	7.49	7.79
28	270°	5.06	4.85
29	280°	3.21	3.18
30	290°	2.21	2.18
31	300°	1.83	1.83
32	310°	1.08	1.06
33	320°	0.68	0.68
34	330°	0.57	0.62
35	340°	0.60	0.66
36	350°	0.71	0.79
	Νηνεμία	9.69	10.10
	Σύνολο	100.00	100.00

Πίνακας 5. Συχνότητα εμφάνισης του ανέμου ανά διεύθυνση στη θέση του ανεμολογικού ιστού (Mast_1).

Στην εικόνα 14 απεικονίζονται οι μηνιαίες καταγραφές της συχνότητας του ανέμου, ανά διεύθυνση, στο ύψος μέτρησης του ανεμολογικού ιστού.



Εικόνα 14. Ροδόγραμμα συχνότητας του ανέμου, ανά διεύθυνση, ανά μήνα, στη θέση του ανεμολογικού ιστού (Mast_1).

Η συνολική διάρκεια λειτουργίας του ανεμολογικού ιστού είναι 1 έτος με πολύ καλή διαθεσιμότητα σε όλα τα ύψη μέτρησης. Με σκοπό την αναγωγή των μετρήσεων και τη μακροχρόνια διόρθωση της ταχύτητας, ώστε να υπολογιστεί τελικά η μέση ετήσια

ταχύτητα του ανέμου στο ύψος πλήμνης των ανεμογεννητριών, χρησιμοποιούνται οι μετρήσεις του ανεμολογικού ιστού για όλη τη διάρκεια λειτουργίας του.

5.2. Αναγωγή της ταχύτητας στο ύψος πλήμνης της ανεμογεννήτριας

Για τον υπολογισμό της ταχύτητας του ανέμου στο ύψος πλήμνης των ανεμογεννητριών, ήτοι στα 67m, πραγματοποιήθηκε η διερεύνηση της καθ' ύψος μεταβολής του ανέμου στη θέση μέτρησης του ανεμολογικού ιστού. Καθώς ο ανεμολογικός ιστός διαθέτει μετρήσεις σε τρία διαφορετικά επίπεδα (20m-29.5m-31m), είναι εφικτός ο υπολογισμός της καθ' ύψος μεταβολής του ανέμου και επομένως ο υπολογισμός της τιμής του εκθέτη α . Το κατακόρυφο προφίλ του ανέμου υπολογίζεται βάση του εκθετικού νόμου :

$$u(z) = u(z_{ref}) * (z/z_{ref})^\alpha$$

όπου :

- z : το ύψος στο οποίο θα υπολογιστεί η ταχύτητα $u(z)$, δηλαδή το ύψος πλήμνης των ανεμογεννητριών (67m)
- z_{ref} : το ύψος μέτρησης της ταχύτητας στον ανεμολογικό ιστό (31m)
- α : η τιμή της κατακόρυφης διάτμησης του ανέμου, η οποία έχει προκύψει από τις μετρήσεις.

5.3. Μακροχρόνια διόρθωση της ταχύτητας στο ύψος πλήμνης της ανεμογεννήτριας

Προκειμένου να επεκταθεί η ιστορική περίοδος των διαθέσιμων ανεμολογικών δεδομένων και συνεπώς να μειωθούν οι αβεβαιότητες στην ανάλυση, τα δεδομένα της

ταχύτητας του ανέμου στη θέση του ανεμολογικού ιστού για την πλήρη χρονοσειρά του 1 έτους στο ύψος πλήμνης των ανεμογεννητριών συσχετίστηκαν με δεδομένα ταχύτητας του ανέμου όπως καταγράφηκαν στη μακροχρόνια πηγή του κόμβου EMD-ConWx. Ο κόμβος αυτός απέχει απόσταση 2.7km από τον ανεμολογικό ιστό και διαθέτει δεδομένα ταχύτητας του ανέμου σε αρκετά επίπεδα από την επιφάνεια του εδάφους. Τα δεδομένα του κόμβου που χρησιμοποιήθηκαν για τη μακροχρόνια αναγωγή της ταχύτητας του ανέμου έχουν διάρκεια 20 ετών (1/1/1998 – 31/12/2017). Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε μέσω της ενότητας "Μέτρηση-Συσχέτιση-Πρόβλεψη" (Measure-Correlate-Predict-MCP) του προγράμματος WindPro, όπου οι μετρήσεις του ανεμολογικού ιστού και τα δεδομένα reanalysis του κόμβου EMD-ConWx παρουσίασαν έναν καλό συντελεστή συσχέτισης. Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η δημιουργία μίας ενιαίας χρονοσειράς ταχύτητας του ανέμου στη θέση του ανεμολογικού ιστού στο ύψος πλήμνης των ανεμογεννητριών (67m). Στον πίνακα 6 παρουσιάζονται τα κυριότερα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας :

	<i>Mast_1</i>	<i>EMD-ConWx</i>
Τύπος δεδομένων	10-λεπτα	60-λεπτα
Χρονική διάρκεια μετρήσεων	1 έτος	20 έτη
Συντελεστής συσχέτισης (r)		0.9196
Ετήσια μεταβλητότητα		3.8 %
Τυπική απόκλιση (s)		0.20m/s

Πίνακας 6. Αποτελέσματα της διαδικασίας MCP των δεδομένων, από τη θέση του ανεμολογικού ιστού Mast_1, για τη μακροχρόνια διόρθωση της ταχύτητας του ανέμου στο ύψος πλήμνης των ανεμογεννητριών.

Επεξήγηση των όρων του πίνακα :

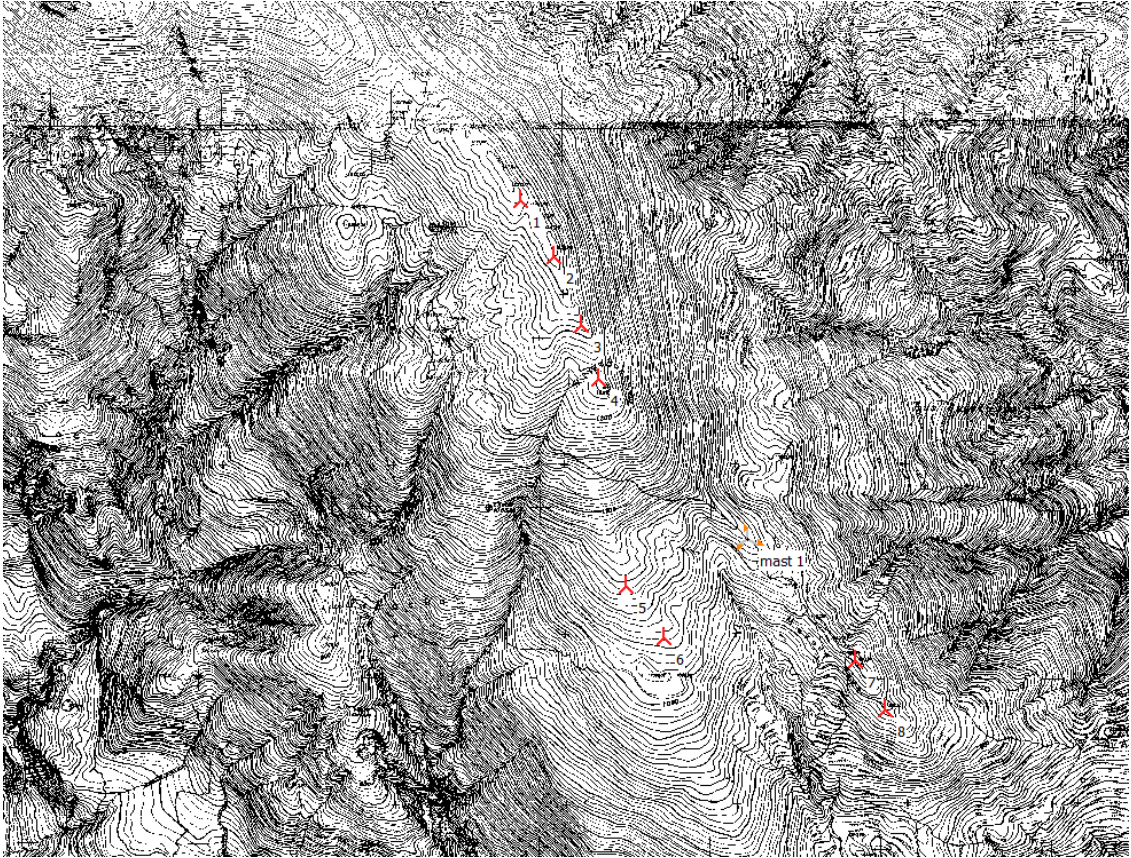
Συντελεστής συσχέτισης (r): η τιμή αυτή δηλώνει το βαθμό συσχέτισης των δεδομένων της ταχύτητας μεταξύ του ανεμολογικού ιστού και του κόμβου. Η μέγιστη τιμή ισούται με 1 που υποδηλώνει απόλυτη συσχέτιση των δεδομένων.

Ετήσια μεταβλητότητα (%): το ποσοστό αυτό εκφράζει την τυπική απόκλιση των ετήσιων τιμών από τη μακροχρόνια τιμή της χρονοσειράς των δεδομένων. Υπολογίζεται μόνο όταν η χρονική περίοδος των συσχετιζόμενων δεδομένων είναι πάνω από 5 χρόνια.

Τελικό αποτέλεσμα από τη διαδικασία της αναγωγής και της μακροχρόνιας διόρθωσης των μετρήσεων του ανεμολογικού ιστού στο ύψος πλήμνης των ανεμογεννητριών είναι η δημιουργία του κλίματος αναφοράς, δηλαδή της ανηγμένης μέσης ετήσιας ταχύτητας του ανέμου στη θέση μέτρησης για χρονικό διάστημα 20 ετών. Το κλίμα αυτό χρησιμοποιήθηκε στη συνέχεια για τους ενεργειακούς υπολογισμούς του υπό λειτουργία αιολικού σταθμού.

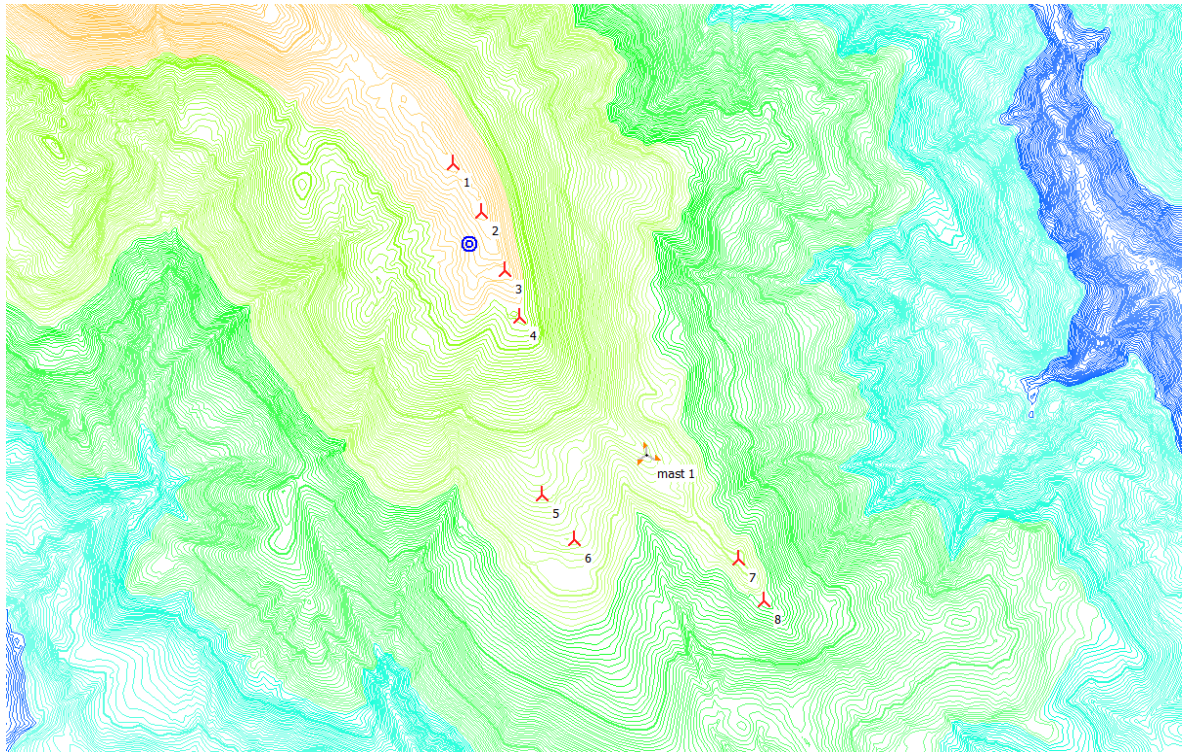
5.4. Περιγραφή του αιολικού πάρκου

Ο αιολικός σταθμός αποτελείται από 8 ανεμογεννήτριες με ύψος πυλώνα 67m, εκτείνεται σε μια οροσειρά και λειτουργεί από το έτος 2010. Πρόκειται για μία περιοχή με υψόμετρα που κυμαίνονται από 979m – 1273m, η οποία βρίσκεται εκτεθειμένη στους ανέμους που επικρατούν στην περιοχή. Η περιοχή κυριαρχείται από έντονους ορεινούς όγκους και χαμηλή βλάστηση. Ο ανεμολογικός ιστός (Mast_1) ήταν εγκατεστημένος στη περιοχή πριν την έναρξη κατασκευής του αιολικού σταθμού. Στο χάρτη 3 απεικονίζονται οι θέσεις των ανεμογεννητριών και του ανεμολογικού ιστού :

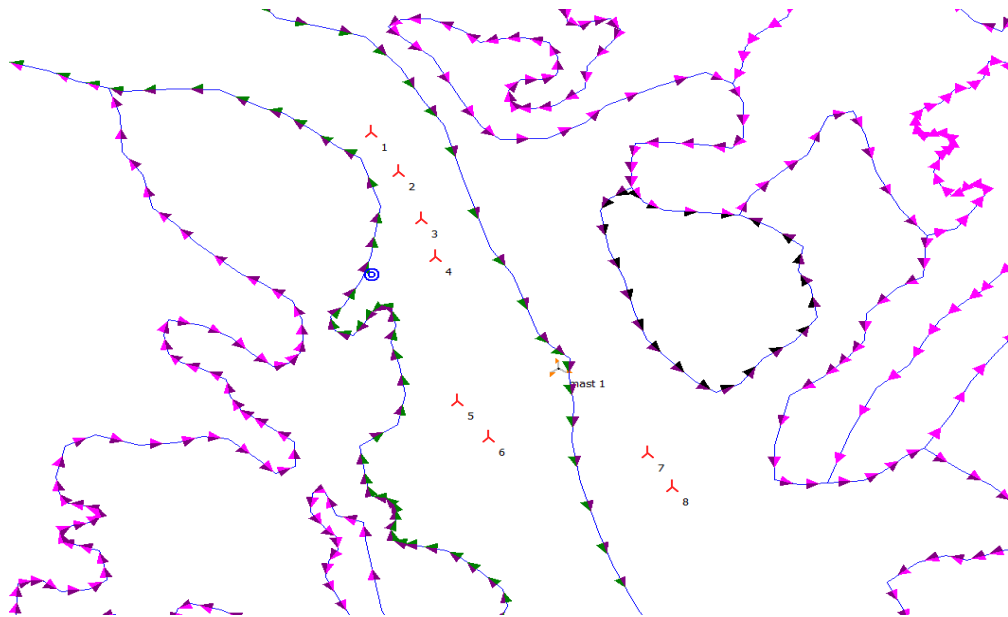


Χάρτης 3. Απόσπασμα χάρτη 1/50.000 της περιοχής του αιολικού σταθμού για την περίπτωση του σύνθετου ανάγλυφου εδάφους.

Στους χάρτες 4 και 5 απεικονίζονται μέρη από το χωρίο των ισοϋψών καμπυλών και της τραχύτητας του εδάφους αντίστοιχα, που χρησιμοποιήθηκαν για τη μοντελοποίηση της ροής του ανέμου στην περιοχή.



Χάρτης 4. Χάρτης απεικόνισης των ισοϋψών καμπυλών στην περιοχή του αιολικού σταθμού από ψηφιακό μοντέλο εδάφους για την περίπτωση του σύνθετου ανάγλυφου εδάφους.



Χάρτης 5. Χάρτης απεικόνισης της τραχύτητας του εδάφους στην περιοχή του αιολικού σταθμού για την περίπτωση του σύνθετου ανάγλυφου εδάφους (roughness lines)

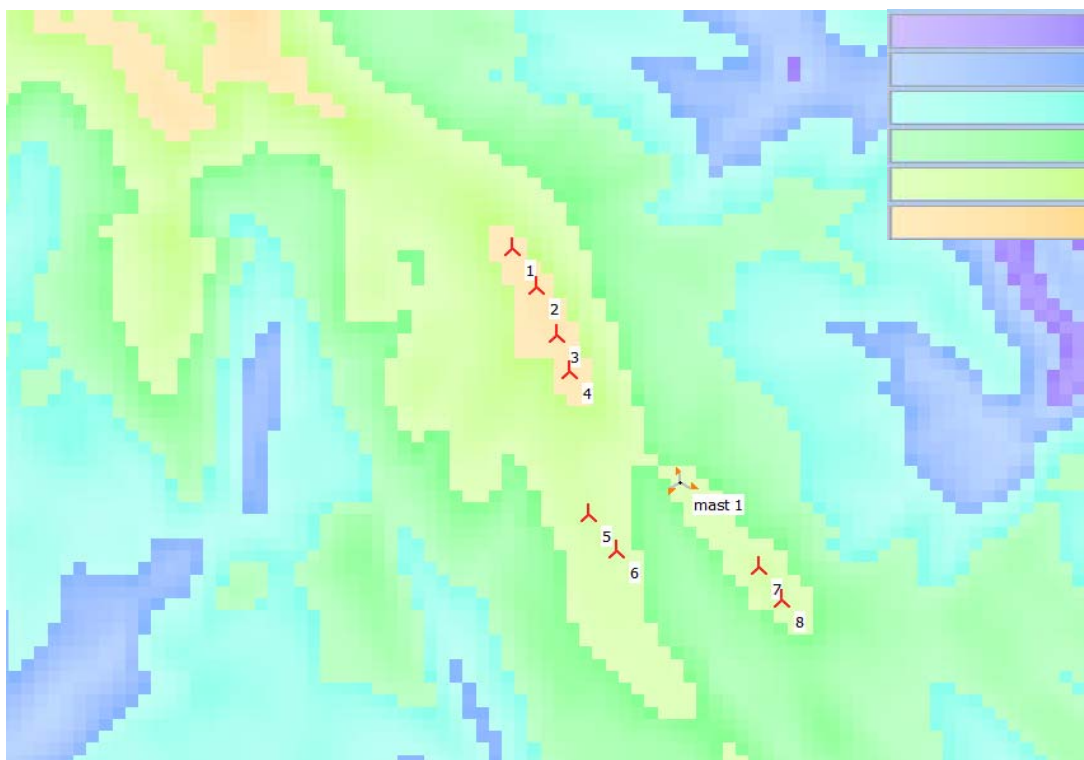
Στον πίνακα 7 παρουσιάζεται η χιλιομετρική και η υψομετρική διαφορά του ανεμολογικού ιστού από κάθε θέση ανεμογεννήτριας του αιολικού σταθμού :

<i>Mast_1</i>		
	Χιλιομετρική απόσταση (m)	Υψομετρική απόσταση (m)
ΑΓ 1	1199	238
ΑΓ 2	1005	231
ΑΓ 3	797	209
ΑΓ 4	643	185
ΑΓ 5	384	22
ΑΓ 6	380	-11
ΑΓ 7	476	-34
ΑΓ 8	641	-56

Πίνακας 7. Χιλιομετρική και υψομετρική απόσταση μεταξύ του ανεμολογικού ιστού (Mast_1) και της κάθε ανεμογεννήτριας.

5.5. Αποτελέσματα

Η επίλυση των εξισώσεων του μοντέλου προσομοίωσης για τον υπολογισμό του πεδίου ροής του ανέμου στο ύψος πλήμνης των ανεμογεννητριών (67m από το έδαφος) βασίστηκε σε όλες τις πληροφορίες που προαναφέρθηκαν και υλοποιείται μέσω των μοντέλων WAsP και WindPro. Αποτέλεσμα είναι η δημιουργία ενός αιολικού χάρτη της ευρύτερης περιοχής με σκοπό την αρχική εκτίμηση της ταχύτητας του ανέμου στις θέσεις των ανεμογεννητριών του αιολικού σταθμού. Η διαβάθμιση των χρωμάτων του χάρτη 6 απεικονίζει τη μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου, με το μωβ χρώμα να δηλώνει τη χαμηλότερη τιμή της ταχύτητας ενώ το πορτοκαλί να δηλώνει τη μεγαλύτερη τιμή.



Χάρτης 6. Χάρτης απεικόνισης του αιολικού δυναμικού της ευρύτερης περιοχής του αιολικού σταθμού για την περίπτωση του σύνθετου ανάγλυφου εδάφους.

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία πραγματοποιήθηκε επίλυση του μοντέλου προσομοίωσης της ροής του ανέμου για τις δεδομένες κλιματολογικές και εδαφολογικές συνθήκες, προβλέποντας τη μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου σε κάθε θέση μηχανής του αιολικού σταθμού. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης που διενεργήθηκε με σκοπό τον υπολογισμό της απόκλισης της προβλεπόμενης ταχύτητας του ανέμου από την πραγματική τιμή, για κάθε ανεμογεννήτρια, για τα 8 έτη λειτουργίας του αιολικού σταθμού. Η πραγματική τιμή της ταχύτητας του ανέμου σε κάθε ανεμογεννήτρια καταγράφεται στο σύστημα SCADA που διαθέτει ο αιολικός σταθμός, μέσω ανεμομέτρων τα οποία είναι εγκατεστημένα στη νασέλα της κάθε ανεμογεννήτριας. Η απόκλιση της προβλεπόμενης μέσης ετήσιας ταχύτητας από την πραγματική μέση ετήσια τιμή, ανά ανεμογεννήτρια και ανά έτος, υπολογίζεται μέσω του στατιστικού τύπου :

$$\sigma = \frac{\text{ταχύτητα(προβλεπόμενη)} - \text{ταχύτητα(πραγματική)}}{\text{ταχύτητα(πραγματική)}} * 100\%$$

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
ΑΓ 1	-8.4%	-6.6%	-8.3%	-6.6%	-5.1%	-6.2%	-5.0%	-8.1%
ΑΓ 2	-4.7%	-8.1%	-8.7%	-6.8%	-5.1%	-7.5%	-6.2%	-9.8%
ΑΓ 3	-4.2%	-8.8%	-8.9%	-6.3%	-3.9%	-7.5%	-5.6%	-9.4%
ΑΓ 4	-3.4%	-6.1%	-7.2%	-4.7%	-2.5%	-4.6%	-3.1%	-6.9%
ΑΓ 5	-10.1%	-14.4%	-11.8%	-10.7%	-9.3%	-10.6%	-11.1%	-12.4%
ΑΓ 6	-6.8%	-10.1%	-7.8%	-7.8%	-6.9%	-8.3%	-7.0%	-9.9%
ΑΓ 7	1.5%	-2.6%	-6.3%	1.0%	1.7%	0.6%	0.6%	-1.6%
ΑΓ 8	1.0%	-3.1%	-2.3%	-1.1%	-0.7%	-1.6%	0.0%	-3.3%

Πίνακας 8. Απόκλιση της προβλεπόμενης από την πραγματική μέση ετήσια τιμή της ταχύτητας, ανά ανεμογεννήτρια, ανά έτος, για την περίπτωση του σύνθετου ανάγλυφου εδάφους.

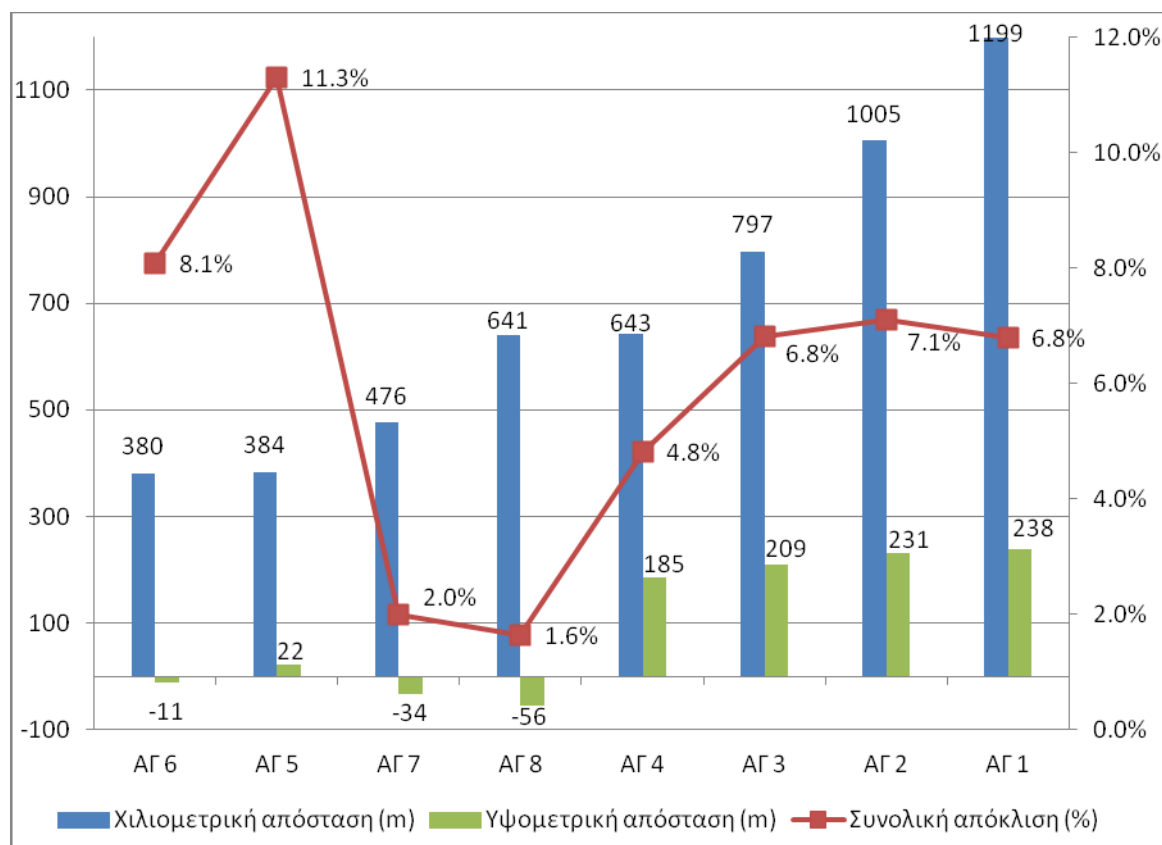
Δεν πραγματοποιήθηκε όμως αξιολόγηση των αποκλίσεων των ταχυτήτων κατά έτος, καθώς στο ετήσιο σφάλμα υπεισέρχεται η αβεβαιότητα λόγω της υπερετήσιας διακύμανσης του ανέμου. Αντ' αυτού, για να ελαχιστοποιηθεί αυτή η αβεβαιότητα, υπολογίστηκε η μέση απόκλιση της προβλεπόμενης ταχύτητας του ανέμου από την πραγματική, για κάθε ανεμογεννήτρια, για όλη τη διάρκεια λειτουργίας, βάσει των απόλυτων μεγεθών των σφαλμάτων του πίνακα 8. Οπότε, στον πίνακα 9 παρουσιάζονται οι τιμές των αποκλίσεων ανά ανεμογεννήτρια και για τη συνολική διάρκεια λειτουργίας του αιολικού σταθμού.

	Χιλιομετρική απόσταση ΑΓ - ιστού (m)	Υψομετρική απόσταση ΑΓ - ιστού (m)	Delta RIX (θέση ΑΓ - ιστού)	Συνολική απόκλιση (%)
ΑΓ 1	1199	238	2.5	6.8%
ΑΓ 2	1005	231	2.3	7.1%
ΑΓ 3	797	209	1.3	6.8%
ΑΓ 4	643	185	1.8	4.8%
ΑΓ 5	384	22	-1.8	11.3%
ΑΓ 6	380	-11	-3	8.1%
ΑΓ 7	476	-34	-0.7	2.0%
ΑΓ 8	641	-56	-2.3	1.6%

Πίνακας 9. Συνολική απόκλιση της μέσης ετήσιας ταχύτητας του ανέμου, ανά ανεμογεννήτρια, για τη συνολική διάρκεια λειτουργίας του αιολικού σταθμού (8 έτη), για την περίπτωση του σύνθετου ανάγλυφου εδάφους.

Παρατηρείται ότι, για τη συνολική διάρκεια λειτουργίας του αιολικού σταθμού, η απόκλιση της προβλεπόμενης τιμής της ταχύτητας του ανέμου από την πραγματική ανά ανεμογεννήτρια κυμαίνεται από 1.6% έως 11.3%. Είναι αξιοσημείωτο ότι οι ΑΓ5 και ΑΓ6 παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη απόκλιση (11.3% και 8.1% αντίστοιχα), παρόλο που έχουν τη μικρότερη χιλιομετρική και υψομετρική διαφορά από τη θέση του ανεμολογικού ιστού. Συμπεραίνουμε, λοιπόν, ότι οι μετρήσεις του ανεμολογικού ιστού, που βρίσκεται σε διπλανό λόφο, δε μπορούν να αποτυπώσουν τις ανεμολογικές συνθήκες στο σημείο που βρίσκονται οι δύο αυτές ανεμογεννήτριες. Σε αυτό παίζει σημαντικό ρόλο το γεγονός ότι μεταξύ των δύο λόφων παρεμβάλλεται ένα διάσελο, το οποίο διαφοροποιεί σημαντικά τη ροή του ανέμου σε σχέση με το σημείο που βρίσκεται ο ιστός, με αποτέλεσμα το μοντέλο προσομοίωσης να υποεκτιμά την ταχύτητα του ανέμου στις θέσεις αυτές.

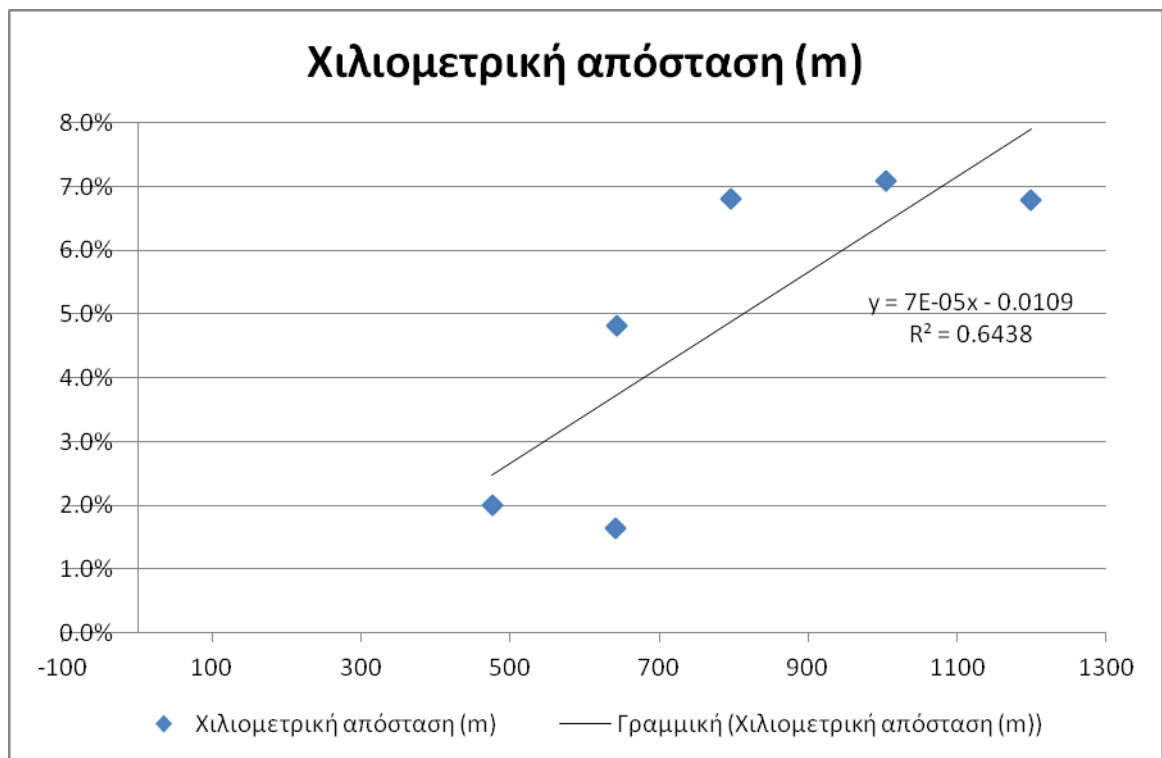
Αντίθετα, οι ΑΓ7 και ΑΓ8 εμφανίζουν τις μικρότερες αποκλίσεις σε όλο τον αιολικό σταθμό. Φαίνεται, δηλαδή, ότι το μοντέλο προσομοίωσης προβλέπει καλύτερα την ταχύτητα του ανέμου στις θέσεις αυτές, οι οποίες βρίσκονται στον ίδιο λόφο με τον ανεμολογικό ιστό. Ως προς τις υπόλοιπες θέσεις (ΑΓ1 έως ΑΓ4) φαίνεται ότι η εκτίμηση του μοντέλου προσομοίωσης επηρεάζεται σημαντικά από τις χιλιομετρικές και τις υψομετρικές διαφορές σε σχέση με τον ανεμολογικό ιστό.



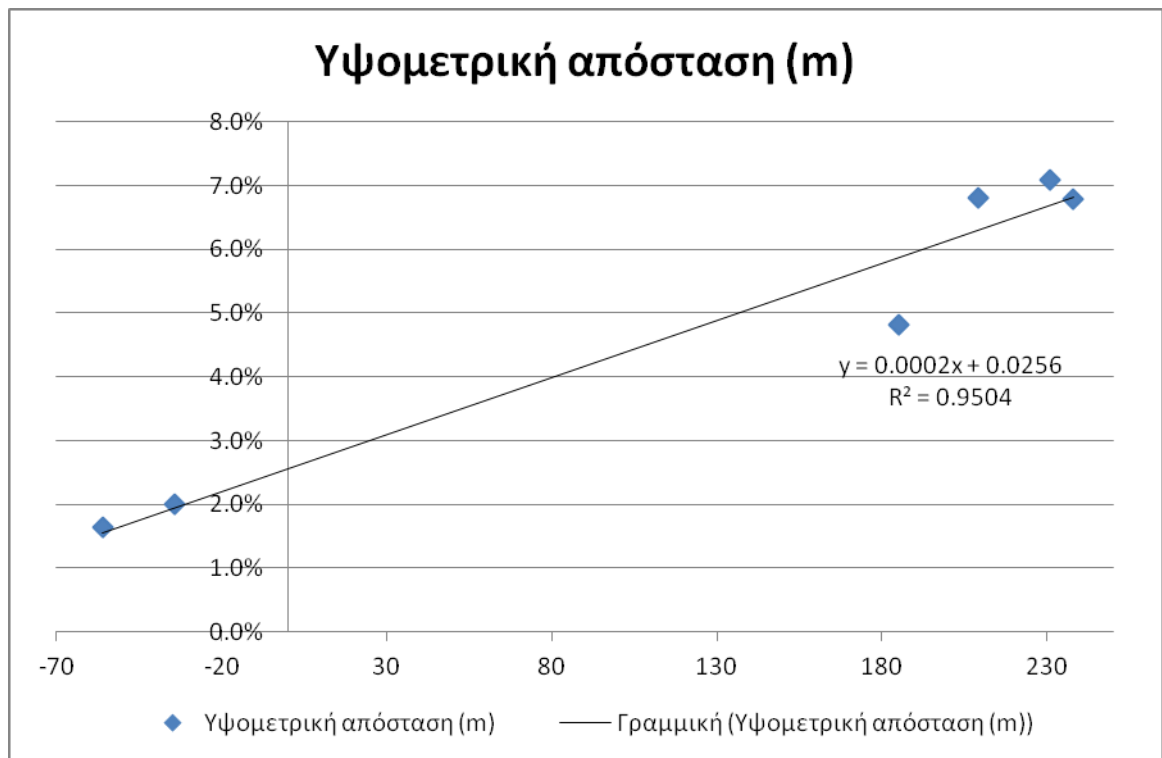
Διάγραμμα 8. Συσχέτιση μεταξύ της χιλιομετρικής και της υψομετρικής απόστασης της κάθε ΑΓ ως προς τον ανεμολογικό ιστό (Mast_1) σε σχέση με το σφάλμα πρόβλεψης της ταχύτητας του ανέμου, για την περίπτωση του σύνθετου ανάγλυφου εδάφους.

Στα διαγράμματα 10 και 11 έχουν εξαιρεθεί οι ΑΓ5 και ΑΓ6 για τις οποίες φαίνεται ότι οι κλιματολογικές συνθήκες δεν αντιπροσωπεύονται από τις μετρήσεις του ιστού. Λαμβάνοντας υπόψη τις υπόλοιπες ανεμογεννήτριες, κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα διασποράς του σφάλματος ως προς τις παραμέτρους της χιλιομετρικής και υψομετρικής απόστασης (διάγραμμα 10 και 11 αντίστοιχα). Διακρίνεται ότι το

σφάλμα της πρόβλεψης εξαρτάται σημαντικά και από τις δυο αυτές παραμέτρους. Όπως φαίνεται και από τους συντελεστές συσχέτισης της γραμμικής παρεμβολής (R^2), που υπολογίστηκαν ξεχωριστά για την κάθε περίπτωση, η συσχέτιση του σφάλματος είναι πιο ισχυρή με την υψομετρική απόσταση. Όσο πιο μεγάλη είναι η διαφορά των υψομέτρων μεταξύ του ανεμολογικού ιστού και της εκάστοτε ανεμογεννήτριας, τόσο πιο αυξημένο παρατηρείται το σφάλμα της προβλεπόμενης ταχύτητας. Επιπλέον, όσο πιο απομακρυσμένη είναι η μηχανή από τον ανεμολογικό ιστό, τόσο πιο μεγάλο είναι το σφάλμα που παρατηρείται στην πρόβλεψη της ταχύτητας του ανέμου στη θέση της ανεμογεννήτριας.



Διάγραμμα 9. Γραμμική συσχέτιση μεταξύ της χιλιομετρικής απόστασης της κάθε ΑΓ ως προς τον ανεμολογικό ιστό (Mast_1) σε σχέση με το σφάλμα πρόβλεψης της ταχύτητας. Αναγράφεται και η εξίσωση της γραμμικής παρεμβολής.



Διάγραμμα 10. Γραμμική συσχέτιση μεταξύ της υψομετρικής απόστασης της κάθε ΑΓ ως προς τον ανεμολογικό ιστό (Mast_1) σε σχέση με το σφάλμα πρόβλεψης της ταχύτητας. Αναγράφεται και η εξίσωση της γραμμικής παρεμβολής.

Το διεθνές πρότυπο MEASNET προτείνει ότι η ακτίνα αντιπροσωπευτικότητας ενός ιστού, δηλαδή η μέγιστη απόσταση οποιασδήποτε ανεμογεννήτριας από τον επόμενο ιστό, είναι τα 2km. Από τη συγκεκριμένη μελέτη όμως προκύπτει το συμπέρασμα ότι σε περιοχές με σύνθετη τοπογραφία εδάφους θα πρέπει τελικά να εγκαθίστανται περισσότεροι ανεμολογικοί ιστοί σε μικρότερη χιλιομετρική απόσταση των 2km, ώστε να εξετάζονται με μεγαλύτερη ακρίβεια οι τοπικές κλιματολογικές συνθήκες.

Εν τέλει, διαπιστώνεται ότι το γραμμικό μοντέλο προσομοίωσης της ροής του ανέμου αδυνατεί να πετύχει με ακρίβεια τόσο την οριζόντια όσο και την κάθετη παρεμβολή των ανεμολογικών στοιχείων για τις περιπτώσεις μελέτης με σύνθετη τοπογραφία του

εδάφους. Με σκοπό τη μείωση του σφάλματος στην εκτίμηση της ταχύτητας του ανέμου σε αυτές τις περιπτώσεις, αρκετές μελέτες έρευνας προχώρησαν στην περαιτέρω ανάλυση της περιοχής χρησιμοποιώντας πιο εξειδικευμένα υπολογιστικά προγράμματα, όπως το μη γραμμικό μοντέλο Υπολογιστικής Δυναμικής των Ρευστών (Computational Fluid Dynamics), τα οποία παρουσιάζουν καλύτερη απόδοση σε σχέση με το πρότυπο μοντέλο WAsP.

Κεφάλαιο 6

Εκτίμηση αιολικού δυναμικού σε επίπεδο ανάγλυφο

6.1. Περιγραφή της θέσης μέτρησης του αιολικού δυναμικού

Βάσει του προτύπου IEC 61400-12-1, η μορφολογία του εδάφους για τη δεύτερη περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται ως επίπεδη. Για την εκτίμηση της ταχύτητας του ανέμου στις θέσεις των ανεμογεννητριών ενός αιολικού σταθμού που λειτουργεί στη περιοχή, θα χρησιμοποιηθούν μετρήσεις ανέμου από κοντινό ανεμολογικό ιστό ο οποίος βρίσκεται εντός της έκτασης του πολυγώνου. Ο ιστός απέχει απόσταση 2m από την πλησιέστερη ανεμογεννήτρια και 1863m από την πιο μακρινή ανεμογεννήτρια. Οι μετρήσεις αυτές έχουν διεξαχθεί από Εργαστήριο Ανεμολογικών Μετρήσεων διαπιστευμένο κατά DIN-EN ISO/IEC17025:2005.

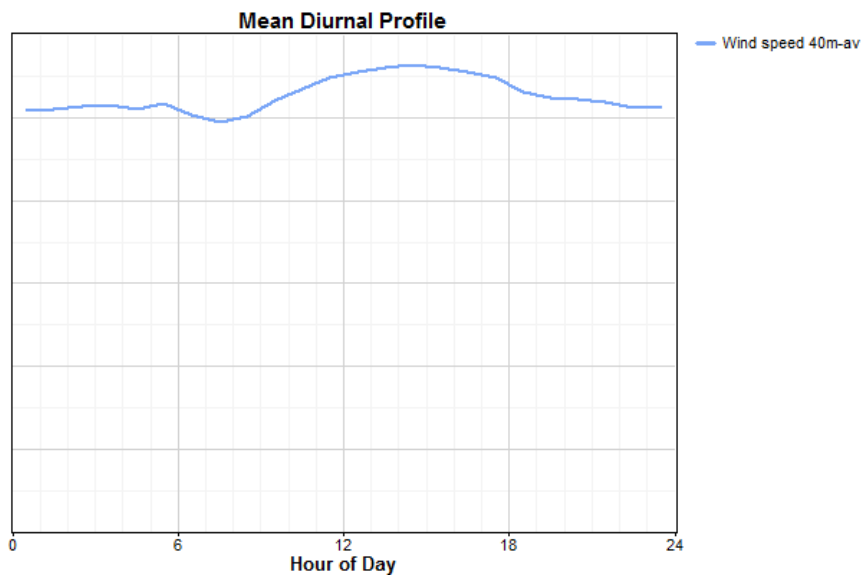
Ο ανεμολογικός ιστός εγκαταστάθηκε στις 29/11/2009 όπου ξεκίνησε η λειτουργία του και απεγκαταστάθηκε μετά από 2 έτη. Είναι δικτυωτός με προφίλ 600mm και το ύψος του από την επιφάνεια του εδάφους είναι 83.5m. Αποτελείται από τέσσερις αισθητήρες μέτρησης της ταχύτητας του ανέμου (ανεμόμετρα), δυο αισθητήρες μέτρησης της διεύθυνσης του ανέμου (ανεμοδείκτες), ένα θερμόμετρο, ένα βαρόμετρο και ένα

σύστημα καταγραφής των δεδομένων. Όλα τα όργανα μέτρησης και καταγραφής φέρουν πιστοποιητικά διακρίβωσης από διακεκριμένο οίκο διακρίβωσης. Στον πίνακα 10 παρουσιάζονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά του ανεμολογικού ιστού και τα ανεμολογικά αποτελέσματα για το ύψος μέτρησης των 40m :

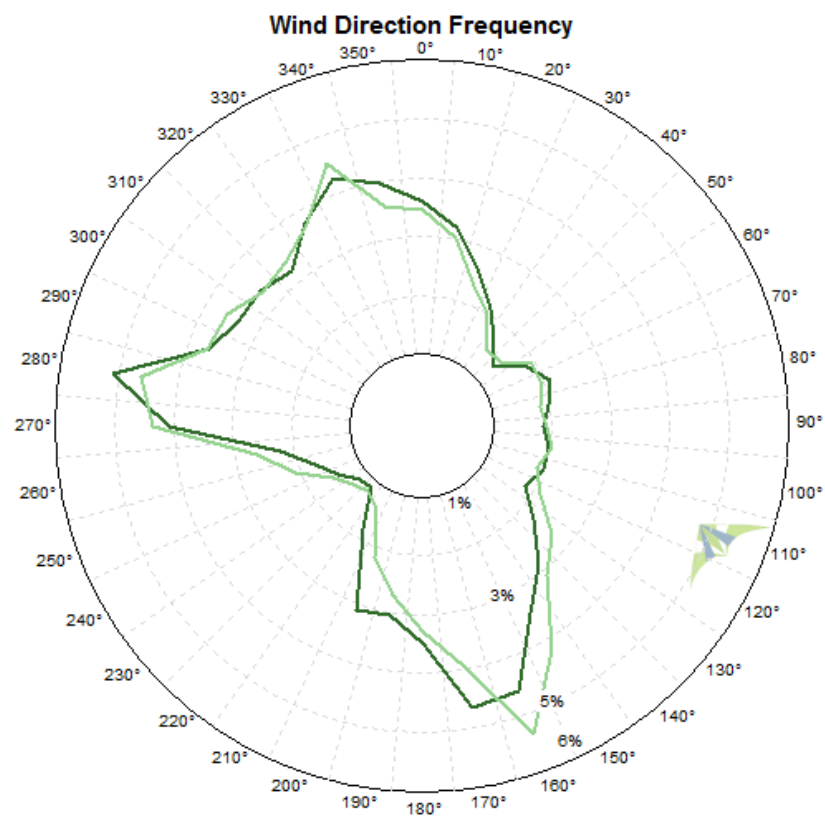
Κωδικός ανεμολογικού ιστού	<i>Mast_2</i>
Τύπος ανεμολογικού ιστού	Δικτυωτός
Ύψος μέτρησης	40m
Υψόμετρο	259m
Θέση	Εντός του πολυγώνου του αιολικού σταθμού – πλησίον θέσης ανεμογεννήτριας
Χρονική Περίοδος μέτρησης	29/11/2009 - 28/11/2010
Μέση ταχύτητα ανέμου (m/s)	5.3
Διαθεσιμότητα	98%

Πίνακας 10. Χαρακτηριστικά του ανεμολογικού ιστού (*Mast_2*) για την περίπτωση του επίπεδου ανάγλυφου.

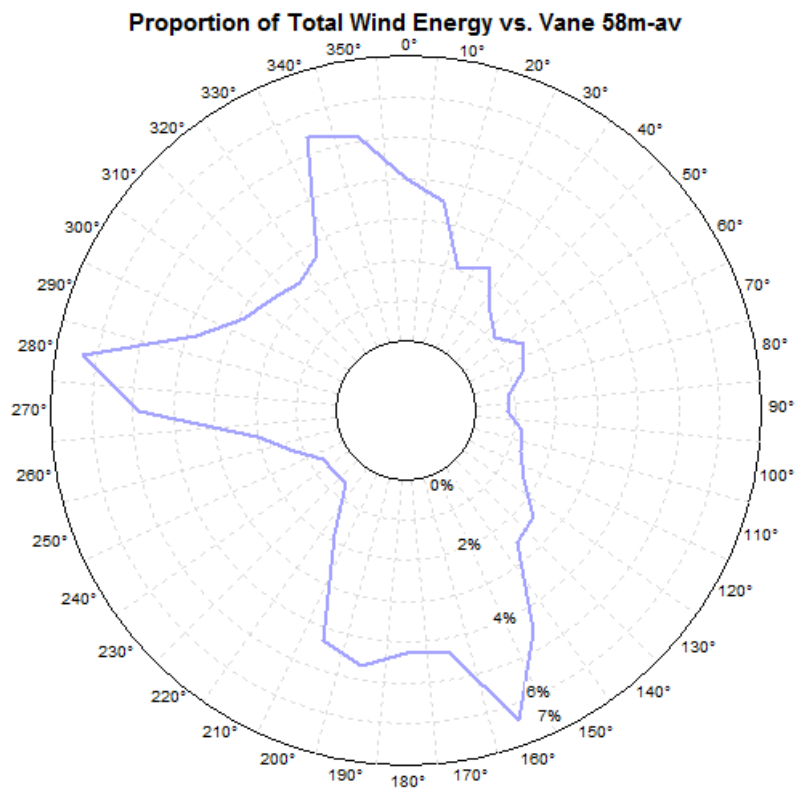
Στις εικόνες που ακολουθούν απεικονίζονται το ημερήσιο προφίλ του ανέμου (εικόνα 15) και οι κύριες διευθύνσεις του ανέμου τόσο χρονικά (εικόνα 16), όσο και ενεργειακά (εικόνα 17). Τα ροδογράμματα συχνότητας και ενέργειας του ανέμου χωρίζονται σε 36 τομείς, εύρους 10° έκαστος, από τα οποία προκύπτει ότι χρονικά η κύρια διεύθυνση στη θέση μέτρησης του ανεμολογικού ιστού είναι η δυτική (Δ) με συχνότητα εμφάνισης 5.11% και η νότια (Ν) με συχνότητα εμφάνισης 4.64% (πίνακας 11).



Εικόνα 15. Ημερήσιο προφίλ του ανέμου στο ύψος μέτρησης του ανεμολογικού ιστού (Mast_2).



Εικόνα 16. Ροδόγραμμα συχνότητας του ανέμου, ανά διεύθυνση, στη θέση του ανεμολογικού ιστού (Mast_2).

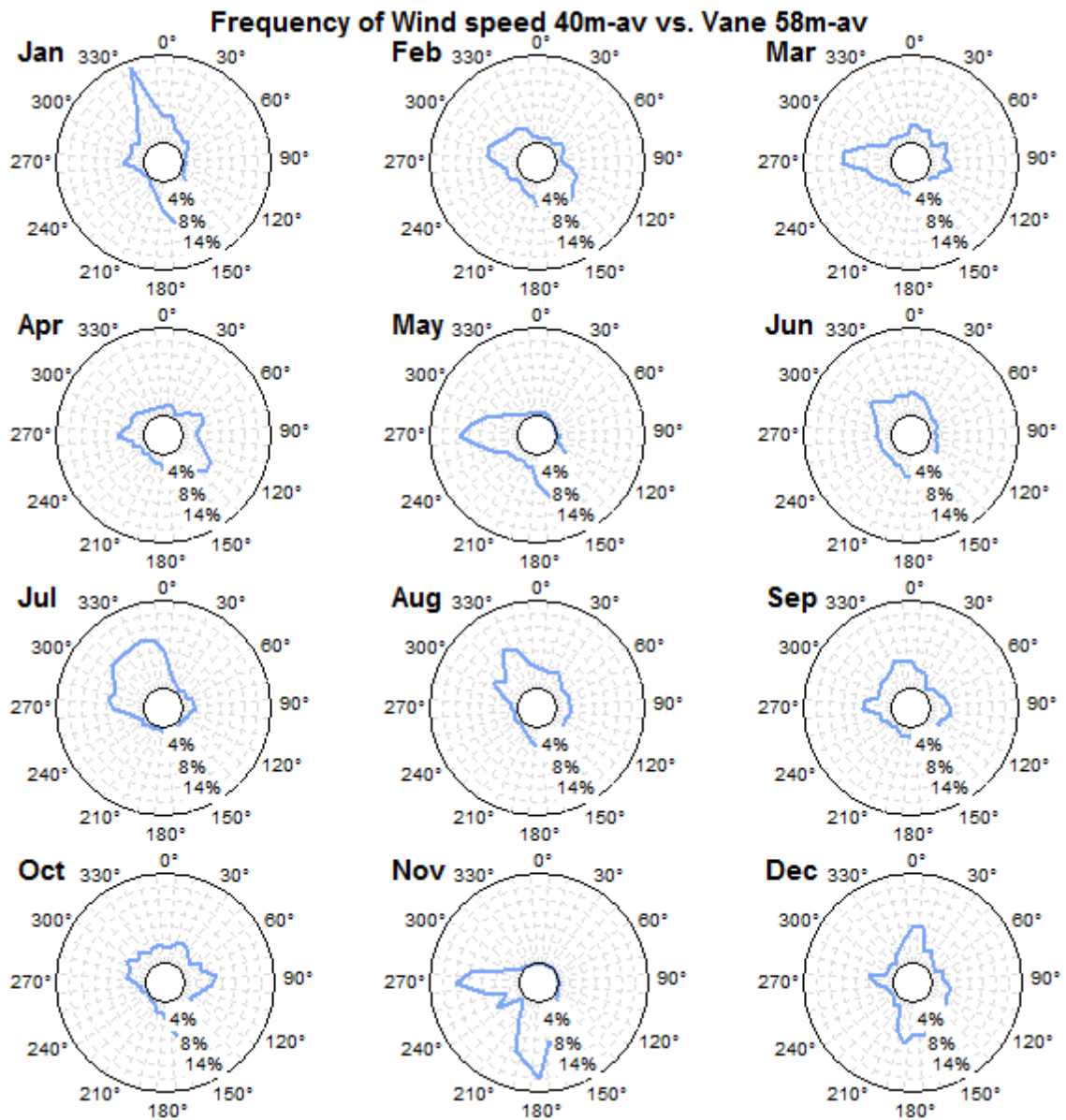


Εικόνα 17. Ροδόγραμμα ενέργειας του ανέμου, ανά διεύθυνση, στη θέση του ανεμολογικού ιστού (Mast_2).

Τομέας	Διάμεσος Τομέα	Συχνότητα (%)	
		Ανεμόμετρο_78m	Ανεμόμετρο_58m
1	0°	3.6	3.45
2	10°	3.21	3.04
3	20°	2.6	2.34
4	30°	2.1	1.99
5	40°	1.7	1.5
6	50°	1.38	1.52
7	60°	1.82	1.95
8	70°	2.07	1.95
9	80°	1.96	1.84
10	90°	1.84	1.89
11	100°	1.96	2.03
12	110°	1.96	1.86
13	120°	1.79	2.09
14	130°	2.26	2.64
15	140°	2.87	3.1
16	150°	3.46	4.2
17	160°	4.59	5.34
18	170°	4.64	3.93
19	180°	3.46	3.27
20	190°	3.04	2.7
21	200°	3.12	2.17
22	210°	1.81	1.38
23	220°	1.16	1.25
24	230°	1.19	1.32
25	240°	1.42	1.55
26	250°	1.75	2.09
27	260°	2.26	2.64
28	270°	4.08	4.36
29	280°	5.11	4.63
30	290°	3.66	3.69
31	300°	3.41	3.62
32	310°	3.4	3.34
33	320°	3.24	3.44
34	330°	3.81	3.74
35	340°	4.29	4.55
36	350°	3.98	3.59
	Νηνεμία	0	0
	Σύνολο	100	100

Πίνακας 11. Συχνότητα εμφάνισης του ανέμου, ανά διεύθυνση, στη θέση του ανεμολογικού ιστού (Mast_2).

Στην εικόνα 18 παρουσιάζονται οι μηνιαίες καταγραφές της συχνότητας ανέμου, ανά διεύθυνση, στη θέση μέτρησης του ανεμολογικού ιστού.



Εικόνα 18. Ροδόγραμμα συχνότητας του ανέμου, ανά διεύθυνση, ανά μήνα, στη θέση του ανεμολογικού ιστού (Mast_2).

Η συνολική διάρκεια λειτουργίας του ανεμολογικού ιστού ανέρχεται σε 2 έτη έχοντας πολύ καλή διαθεσιμότητα σε όλα τα ύψη μέτρησης και δίνοντας μία καλή εικόνα της μακροχρόνιας διακύμανσης του ανέμου. Με σκοπό την αναγωγή των μετρήσεων και τη μακροχρόνια διόρθωση της ταχύτητας, ώστε να υπολογιστεί τελικά η μέση ετήσιας ταχύτητα του ανέμου στο ύψος πλήμνης των ανεμογεννητριών, χρησιμοποιούνται οι μετρήσεις του ανεμολογικού ιστού για όλη τη διάρκεια λειτουργίας του.

6.2. Αναγωγή της ταχύτητας στο ύψος πλήμνης της ανεμογεννήτριας

Για τον υπολογισμό της ταχύτητας του ανέμου στο ύψος πλήμνης των ανεμογεννητριών, ήτοι στα 100m, πραγματοποιήθηκε η διερεύνηση της καθ' ύψος μεταβολής του ανέμου στη θέση μέτρησης του ανεμολογικού ιστού. Καθώς ο ανεμολογικός ιστός διαθέτει μετρήσεις σε διαφορετικά επίπεδα (40m-60m-80m-83.5m), είναι εφικτός ο υπολογισμός της καθ' ύψος μεταβολής του ανέμου και συνεπώς ο υπολογισμός της τιμής του εκθέτη α . Το κατακόρυφο προφίλ του ανέμου υπολογίζεται βάση του εκθετικού νόμου :

$$u(z) = u(z_{ref}) * (z/z_{ref})^\alpha$$

όπου :

- z : το ύψος στο οποίο θα υπολογιστεί η ταχύτητα $u(z)$, δηλαδή το ύψος πλήμνης των ανεμογεννητριών (100m)
- z_{ref} : το μέγιστο ύψος μέτρησης της ταχύτητας στον ανεμολογικό ιστό (83.50m)
- α : η τιμή της κατακόρυφης διάτμησης του ανέμου, η οποία έχει προκύψει από τις μετρήσεις.

6.3. Μακροχρόνια διόρθωση της ταχύτητας στο ύψος πλήμνης της ανεμογεννήτριας

Προκειμένου να επεκταθεί η ιστορική περίοδος των διαθέσιμων δεδομένων και συνεπώς να μειωθούν οι αβεβαιότητες στην ανάλυση, τα δεδομένα ταχύτητας του ανέμου στη θέση του ανεμολογικού ιστού για την πλήρη χρονοσειρά των 2 ετών στο ύψος πλήμνης των ανεμογεννητριών συσχετίστηκαν με δεδομένα ταχύτητας του ανέμου όπως καταγράφηκαν στη μακροχρόνια πηγή του κόμβου EMD-ConWx. Ο κόμβος αυτός απέχει απόσταση 860 m από τον ανεμολογικό ιστό και διαθέτει δεδομένα ταχύτητας σε αρκετά επίπεδα από την επιφάνεια του εδάφους. Τα δεδομένα του κόμβου που χρησιμοποιήθηκαν για τη μακροχρόνια αναγωγή της ταχύτητας έχουν διάρκεια 20 ετών (1/1/1998 – 31/12/2017). Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε μέσω της ενότητας "Μέτρηση-Συσχέτιση-Πρόβλεψη" (Measure-Correlate-Predict-MCP)" του προγράμματος WindPro, όπου οι μετρήσεις του ανεμολογικού ιστού και τα δεδομένα reanalysis του κόμβου EMD-ConWx παρουσίασαν έναν καλό συντελεστή συσχέτισης. Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η δημιουργία μίας ενιαίας χρονοσειράς της ταχύτητας του ανεμολογικού ιστού στο ύψος πλήμνης των ανεμογεννητριών. Στον πίνακα 12 παρουσιάζονται τα κυριότερα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας :

	<i>Mast_2</i>	<i>EMD-ConWx</i>
Τύπος δεδομένων	10-λεπτα	60-λεπτα
Χρονική διάρκεια μετρήσεων	2 έτη	20 έτη
Συντελεστής συσχέτισης (r)		0.9108
Ετήσια μεταβλητότητα		2.8 %
Τυπική απόκλιση (s)		0.22 m/s

Πίνακας 12. Αποτελέσματα της διαδικασίας MCP των δεδομένων, από τη θέση του ανεμολογικού ιστού Mast_2, για τη μακροχρόνια διόρθωση της ταχύτητας του ανέμου στο ύψος πλήμνης των ανεμογεννητριών.

Επεξήγηση των όρων του πίνακα :

Συντελεστής συσχέτισης (r): η τιμή αυτή δηλώνει το βαθμό συσχέτισης των δεδομένων της ταχύτητας μεταξύ του ανεμολογικού ιστού και του κόμβου. Η μέγιστη τιμή ισούται με 1 που υποδηλώνει απόλυτη συσχέτιση των δεδομένων.

Ετήσια μεταβλητότητα (%): το ποσοστό αυτό εκφράζει την τυπική απόκλιση των ετήσιων τιμών της μακροχρόνιας χρονοσειράς των δεδομένων. Υπολογίζεται μόνο όταν η χρονική περίοδος των δεδομένων είναι πάνω από 5 χρόνια.

Τελικό αποτέλεσμα από τη διαδικασία της αναγωγής και της μακροχρόνιας διόρθωσης των μετρήσεων του ανεμολογικού ιστού στο ύψος πλήμνης των ανεμογεννητριών είναι η δημιουργία του κλίματος αναφοράς, δηλαδή της ανηγμένης μέσης ετήσιας ταχύτητας του ανέμου στη θέση μέτρησης για χρονικό διάστημα 20 ετών. Το κλίμα αυτό χρησιμοποιήθηκε στη συνέχεια για τους ενεργειακούς υπολογισμούς του υπό λειτουργία αιολικού σταθμού.

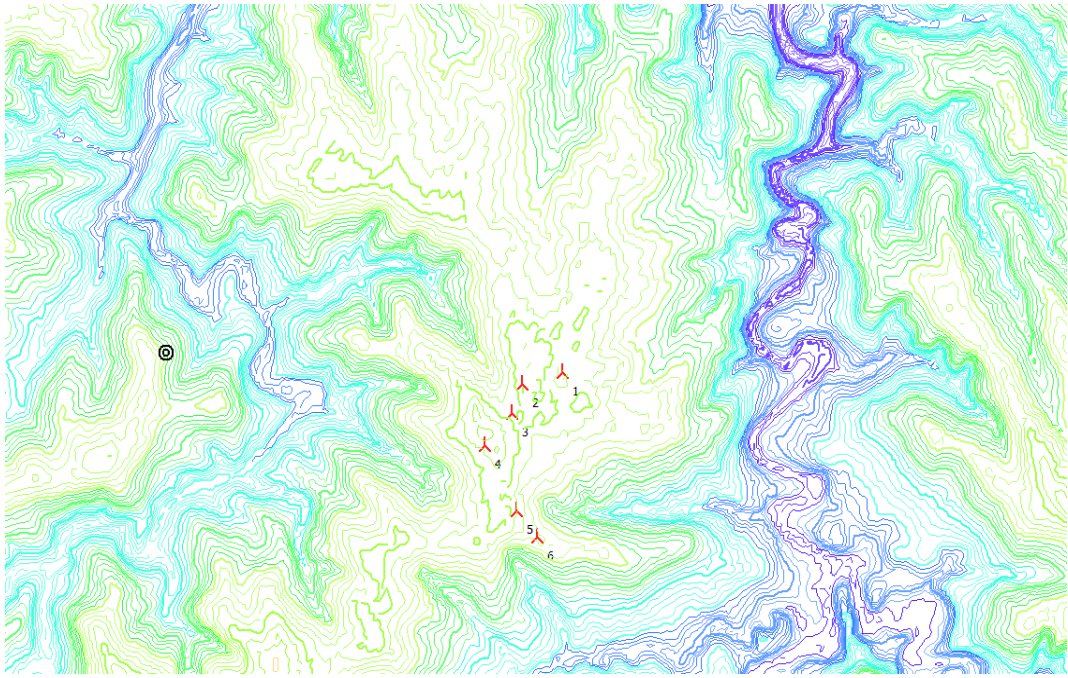
6.4. Περιγραφή του αιολικού πάρκου

Ο αιολικός σταθμός λειτουργεί από το 2013 και αποτελείται από 6 ανεμογεννήτριες με ύψος πυλώνα 100m. Εκτείνεται σε μία επίπεδη επιφάνεια με υψόμετρα που κυμαίνονται από 248m – 266m, η οποία βρίσκεται εκτεθειμένη στους ανέμους που επικρατούν στην περιοχή. Ο ανεμολογικός ιστός ήταν εγκατεστημένος πλησίον της ανεμογεννήτριας 3 (απόσταση 2m) πριν από την έναρξη κατασκευής του αιολικού σταθμού. Στο χάρτη 7 απεικονίζονται οι θέσεις των ανεμογεννητριών και του ανεμολογικού ιστού.

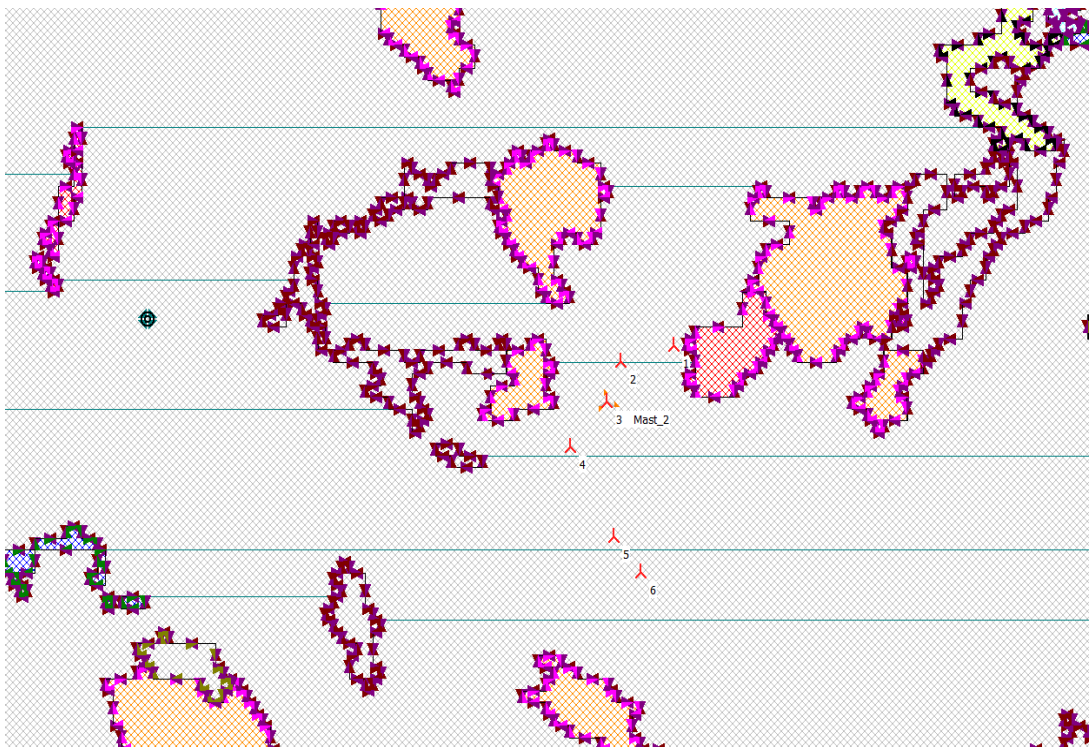


Χάρτης 7. Χάρτης απεικόνισης του αιολικού σταθμού για την περίπτωση του επίπεδου ανάγλυφου εδάφους.

Στους χάρτες 7 και 8 απεικονίζονται μέρη από το χωρίο των ισοϋψών καμπυλών και της τραχύτητας του εδάφους αντίστοιχα, που χρησιμοποιήθηκαν για τη μοντελοποίηση της ροής του ανέμου στην περιοχή.



Χάρτης 8. Χάρτης απεικόνισης των ισοϋψών καμπυλών για την περιοχή του αιολικού σταθμού από ψηφιακό μοντέλο εδάφους για την περίπτωση του επίπεδου ανάγλυφου εδάφους.



Χάρτης 9. Χάρτης απεικόνισης της τραχύτητας του εδάφους για την περιοχή του αιολικού σταθμού (roughness lines) για την περίπτωση του επίπεδου ανάγλυφου εδάφους.

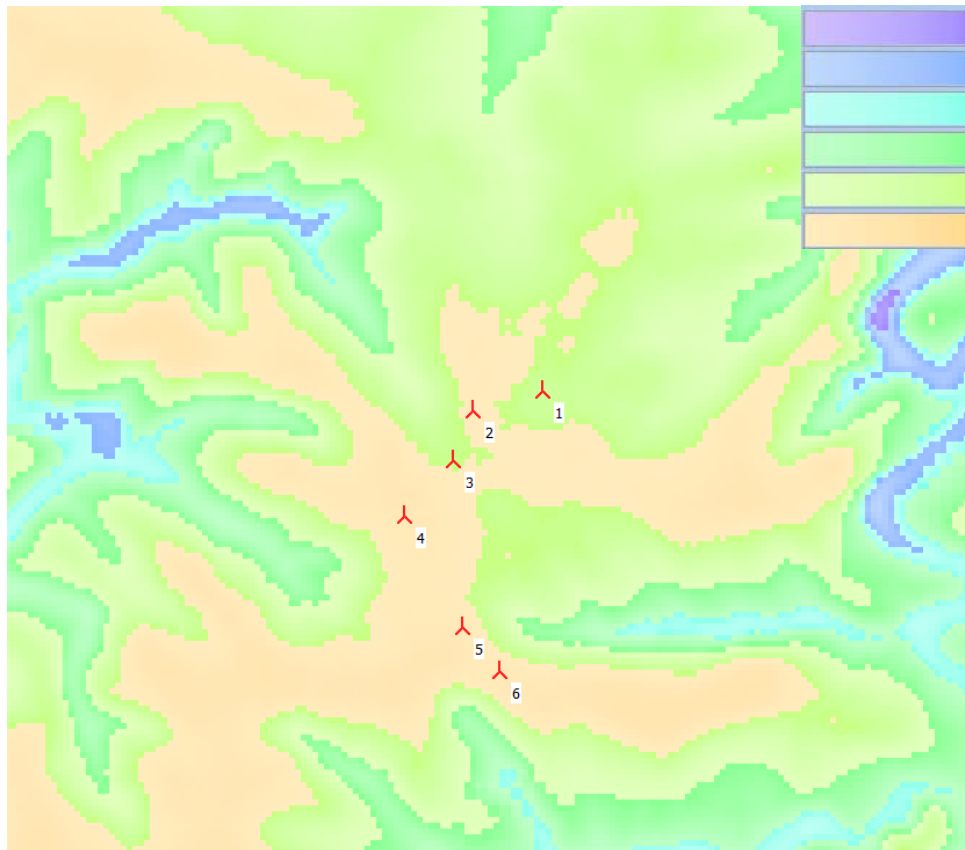
Στον πίνακα 13 παρουσιάζεται η χιλιομετρική και η υψομετρική διαφορά του ανεμολογικού ιστού από κάθε ανεμογεννήτρια του αιολικού σταθμού :

<i>Mast_2</i>		
	Χιλιομετρική απόσταση (m)	Υψομετρική απόσταση (m)
ΑΓ_1	981	4
ΑΓ_2	460	0
ΑΓ_3	2	0
ΑΓ_4	634	-6
ΑΓ_5	1437	4
ΑΓ_6	1863	12

Πίνακας 13. Χιλιομετρική και υψομετρική απόσταση μεταξύ του ανεμολογικού ιστού (Mast_2) και της κάθε ανεμογεννήτριας για την περίπτωση του επίπεδου ανάγλυφου εδάφους.

6.5. Αποτελέσματα

Η επίλυση των εξισώσεων του μοντέλου προσομοίωσης για τον υπολογισμό του πεδίου ροής του ανέμου στο ύψος πλήμνης των ανεμογεννητριών (100m από το έδαφος) βασίστηκε σε όλες τις πληροφορίες που προαναφέρθηκαν και υλοποιείται μέσω των μοντέλων WASP και WindPro. Αποτέλεσμα είναι η δημιουργία ενός αιολικού χάρτη της ευρύτερης περιοχής με σκοπό την αρχική εκτίμηση της ταχύτητας του ανέμου στις θέσεις των ανεμογεννητριών του αιολικού σταθμού. Η διαβάθμιση των χρωμάτων του χάρτη 10 απεικονίζει τη μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου, με το μωβ χρώμα να δηλώνει τη χαμηλότερη τιμή της ταχύτητας ενώ το πορτοκαλί να δηλώνει τη μεγαλύτερη τιμή.



Χάρτης 10. Χάρτης απεικόνισης του αιολικού δυναμικού της ευρύτερης περιοχής του αιολικού σταθμού για την περίπτωση του επίπεδου ανάγλυφου εδάφους.

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία πραγματοποιήθηκε επίλυση του μοντέλου προσομοίωσης της ροής του ανέμου για τις δεδομένες κλιματολογικές και εδαφολογικές συνθήκες, προβλέποντας τη μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου σε κάθε θέση ανεμογεννήτριας του αιολικού σταθμού. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης που διενεργήθηκε με σκοπό τον υπολογισμό της απόκλισης της προβλεπόμενης ταχύτητας του ανέμου από την πραγματική τιμή, για κάθε ανεμογεννήτρια, για τα 5 έτη λειτουργίας του αιολικού σταθμού. Η πραγματική τιμή της ταχύτητας του ανέμου σε κάθε ανεμογεννήτρια καταγράφεται στο σύστημα SCADA που διαθέτει ο αιολικός σταθμός, μέσω ανεμομέτρων τα οποία είναι εγκατεστημένα στη νασέλα της κάθε ανεμογεννήτριας. Η απόκλιση της προβλεπόμενης μέσης ετήσιας

ταχύτητας από την πραγματική μέση ετήσια τιμή, ανά ανεμογεννήτρια και ανά έτος, υπολογίζεται μέσω του στατιστικού τύπου :

$$\sigma = \frac{\text{ταχύτητα}_{(\text{προβλεπόμενη})} - \text{ταχύτητα}_{(\text{πραγματική})}}{\text{ταχύτητα}_{(\text{πραγματική})}} * 100\%$$

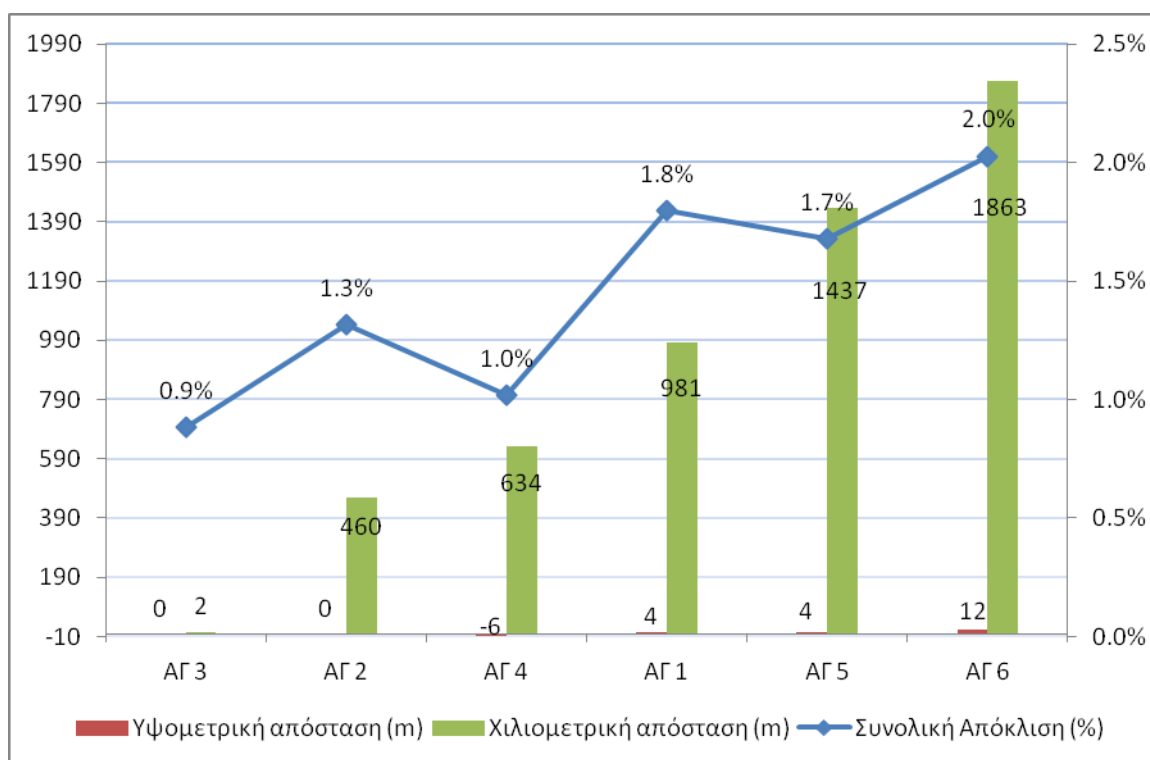
	2013	2014	2015	2016	2017
ΑΓ 1	1.5%	1.5%	1.9%	3.8%	0.3%
ΑΓ 2	-2.5%	-0.4%	-0.4%	0.2%	-3.0%
ΑΓ 3	0.1%	0.1%	1.0%	1.0%	-2.2%
ΑΓ 4	0.9%	-0.3%	-0.3%	0.4%	-3.1%
ΑΓ 5	2.3%	2.2%	0.1%	1.4%	-2.4%
ΑΓ 6	-0.5%	1.1%	1.1%	1.9%	-5.6%

Πίνακας 14. Απόκλιση της προβλεπόμενης από την πραγματική μέση ετήσια τιμή της ταχύτητας, ανά ανεμογεννήτρια, ανά έτος, για την περίπτωση του επίπεδου ανάγλυφου εδάφους.

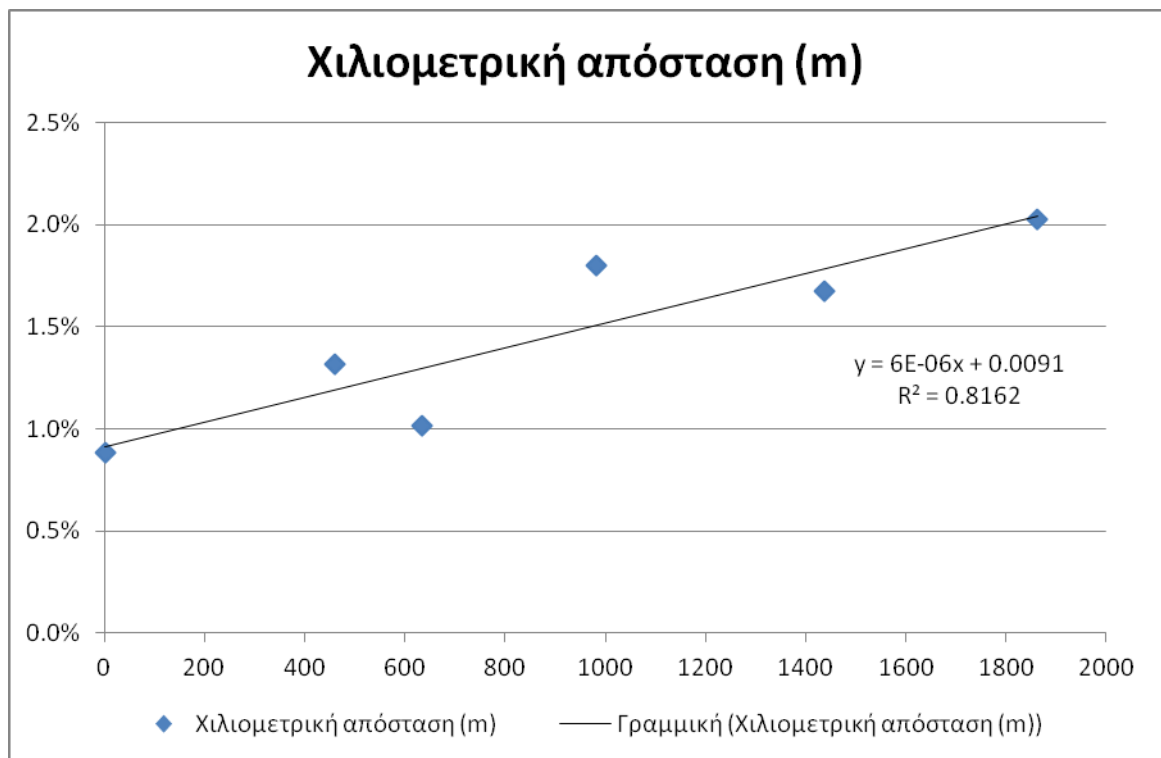
Δεν έγινε αξιολόγηση των αποκλίσεων των ταχυτήτων κατά έτος καθώς στο ετήσιο σφάλμα υπεισέρχεται η αβεβαιότητα λόγω της υπερετήσιας διακύμανσης του ανέμου. Αντ' αυτού, για να ελαχιστοποιηθεί αυτή η αβεβαιότητα, υπολογίστηκε η μέση απόκλιση της προβλεπόμενης ταχύτητας του ανέμου από την πραγματική για κάθε ανεμογεννήτρια για όλη τη διάρκεια λειτουργίας, βάσει των απόλυτων μεγεθών των σφαλμάτων του πίνακα 14. Οπότε, στον πίνακα 15 παρουσιάζονται οι τιμές των αποκλίσεων, ανά ανεμογεννήτρια, και για τη συνολική διάρκεια λειτουργίας του αιολικού σταθμού.

	Χιλιμετρική απόσταση ΑΓ -ιστού (m)	Υψομετρική απόσταση ΑΓ -ιστού (m)	Συνολική απόκλιση (%)
ΑΓ 1	981	4	1.8
ΑΓ 2	460	0	1.3
ΑΓ 3	2	0	0.9
ΑΓ 4	634	-6	1.0
ΑΓ 5	1437	4	1.7
ΑΓ 6	1863	12	2.1

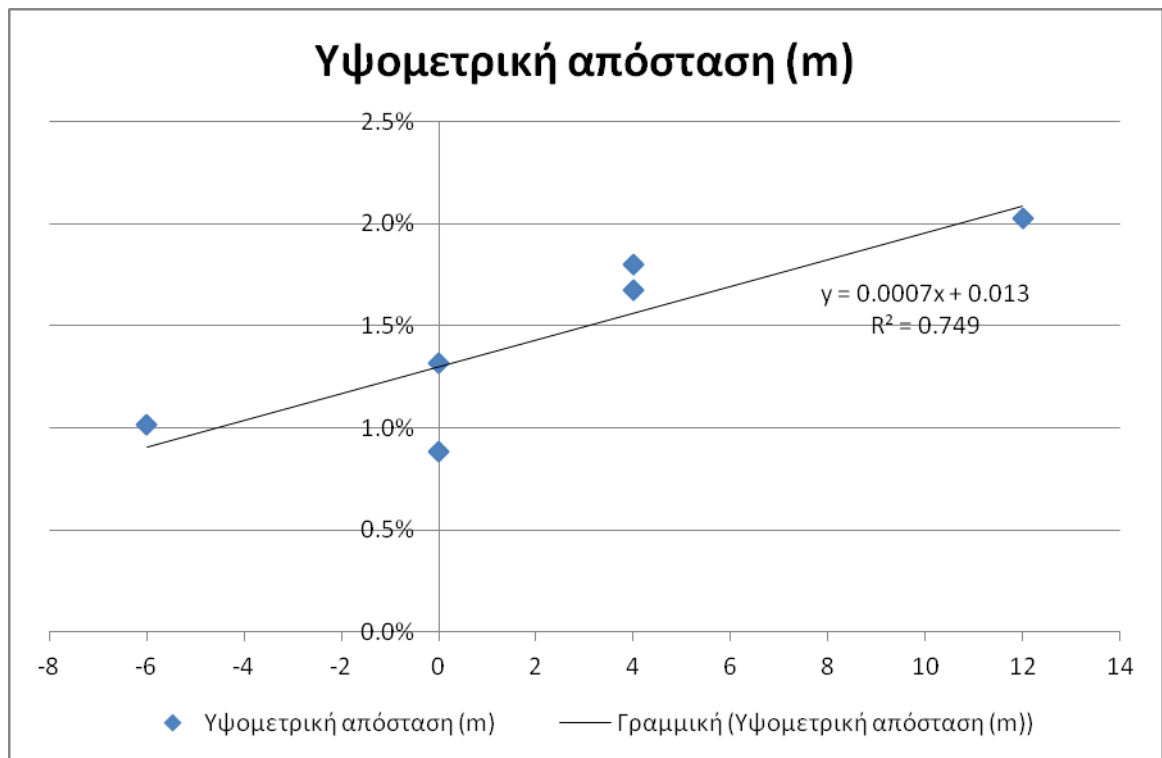
Πίνακας 15. Συνολική απόκλιση της μέσης ετήσιας ταχύτητας του ανέμου, ανά ανεμογεννήτρια, για τη συνολική διάρκεια λειτουργίας του αιολικού σταθμού (5 έτη), για την περίπτωση του επίπεδου ανάγλυφου εδάφους.



Διάγραμμα 11. Συσχέτιση μεταξύ της χιλιμετρικής και της υψομετρικής απόστασης της κάθε ΑΓ ως προς τον ανεμολογικό ιστό (Mast_2) σε σχέση με το σφάλμα πρόβλεψης της ταχύτητας του ανέμου, για την περίπτωση του επίπεδου ανάγλυφου εδάφους.



Διάγραμμα 12. Γραμμική συσχέτιση μεταξύ της χιλιομετρικής απόστασης της κάθε ΑΓ ως προς τον ανεμολογικό ιστό (Mast_2) σε σχέση με το σφάλμα πρόβλεψης της ταχύτητας. Αναγράφεται και η εξίσωση της γραμμικής παρεμβολής.



Διάγραμμα 13. Γραμμική συσχέτιση μεταξύ της υψομετρικής απόστασης της κάθε ΑΓ ως προς τον ανεμολογικό ιστό (Mast_2) σε σχέση με το σφάλμα πρόβλεψης της ταχύτητας. Αναγράφεται και η εξίσωση της γραμμικής παρεμβολής.

Το διεθνές πρότυπο MEASNET προτείνει ότι η ακτίνα αντιπροσωπευτικότητας ενός ιστού, δηλαδή η μέγιστη απόσταση οποιασδήποτε ανεμογεννήτριας από τον επόμενο ιστό, είναι τα 10km, το οποίο επιβεβαιώνεται από τη συγκεκριμένη μελέτη. Εν τέλει, διαπιστώνεται ότι το γραμμικό μοντέλο προσομοίωσης της ροής του ανέμου καταφέρνει να αναγάγει με αρκετά καλή ακρίβεια τα ανεμολογικά στοιχεία τόσο σε οριζόντια όσο και σε κατακόρυφη κλίμακα.

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα-Συζήτηση- Προτάσεις

7.1. Εισαγωγή

Στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής υλοποιήθηκε η εκτίμηση του αιολικού δυναμικού για περιοχές με επίπεδη και σύνθετη τοπογραφία και μελετήθηκε η επίδοση του μοντέλου προσομοίωσης της ροής του ανέμου WASP. Χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις από ανεμολογικούς ιστούς σε δυο περιοχές, αντιπροσωπευτικές για επίπεδη και σύνθετη τοπογραφία εδάφους, οι οποίες ελέγχθηκαν ποιοτικά και απομακρύνθηκαν τυχόν σφάλματα. Κατόπιν πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση της ροής του ανέμου σε κάθε μία περιοχή με τη χρήση του γραμμικού μοντέλου WASP, μέσω του προγράμματος WindPro, και υπολογίστηκε σε κάθε θέση ανεμογεννήτριας η προβλεπόμενη τιμή της ταχύτητας του ανέμου. Τα αποτελέσματα αυτά συγκρίθηκαν με τις πραγματικές μέσες ετήσιες τιμές της ταχύτητας του ανέμου, όπως αυτή καταγράφηκε από το σύστημα SCADA των ανεμογεννητριών κατά τη διάρκεια λειτουργίας των αιολικών σταθμών.

7.2. Συζήτηση αποτελεσμάτων

Από τη μελέτη προέκυψαν τα παρακάτω σημαντικά συμπεράσματα:

- Βρέθηκε ότι οι υπολογισμοί του γραμμικού μοντέλου ροής του ανέμου WASP εμφανίζουν μεγάλη ακρίβεια για την περίπτωση της πρόβλεψης του ανέμου σε περιοχές με επίπεδο ανάγλυφο εδάφους.

- Αντίθετα, το σφάλμα των προβλέψεων του μοντέλου παρουσιάζεται αυξημένο για περιοχές με σύνθετο ανάγλυφο εδάφους και συγκεκριμένα βρέθηκε να είναι μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερο απ' ό τι για την περίπτωση του επίπεδου εδάφους.
- Διαπιστώθηκε ότι το γραμμικό μοντέλο της ροής του ανέμου αδυνατεί να προβλέψει με ακρίβεια την ταχύτητα του ανέμου καθώς αυξάνεται η χιλιομετρική απόσταση από το σημείο μέτρησης. Αυτό ισχύει στην περίπτωση του επίπεδου αλλά και στην περίπτωση του σύνθετου ανάγλυφου.
- Επίσης, το μοντέλο δεν καταφέρνει να αναγάγει σωστά την ταχύτητα του ανέμου καθ' ύψος. Αυτό είναι πιο ευκρινές στην περίπτωση του σύνθετου ανάγλυφου όπου υπάρχουν μεγάλες υψομετρικές διαφορές μεταξύ της θέσης μέτρησης και των θέσεων των ανεμογεννητριών.
- Τέλος, φαίνεται ότι το σφάλμα πρόβλεψης του γραμμικού μοντέλου ροής του ανέμου αυξάνεται σημαντικά στην περίπτωση που οι θέσεις πρόβλεψης βρίσκονται σε ξεχωριστή κορυφογραμμή σε σχέση με το σημείο μέτρησης των ανεμολογικών δεδομένων, δηλαδή σε περιπτώσεις που υπάρχει σημαντικός διαχωρισμός της ροής του ανέμου.

7.3. Προτάσεις

Διαπιστώνεται ότι το γραμμικό μοντέλο προσομοίωσης της ροής του ανέμου WASP είναι ένα αξιόπιστο μοντέλο πρόβλεψης του ανέμου στις περιπτώσεις με ομαλή τοπογραφία. Σε περιοχές με σύνθετη τοπογραφία, όπου το γραμμικό μοντέλο WASP παρουσιάζει αυξημένα σφάλματα, προτείνεται να γίνεται περαιτέρω ανάλυση του αιολικού δυναμικού και προσομοίωση του πεδίου ροής του ανέμου με χρήση των μοντέλων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) (Brower, 2012). Τα μοντέλα CFD λαμβάνουν υπόψη τους και τα μη-γραμμικά φαινόμενα της ατμόσφαιρας, σε αντίθεση με τα γραμμικά μοντέλα τύπου WASP, και έτσι αποτυπώνουν μία πιο ρεαλιστική εικόνα της φυσικής της ροής του ανέμου.

Μελέτες που έχουν γίνει στο παρελθόν (Lombart et al, 2006) για την εκτίμηση του αιολικού δυναμικού τόσο με τη βοήθεια του μοντέλου WASP όσο και του μοντέλου CFD, καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι για την περίπτωση του επίπεδου εδάφους τα αποτελέσματα των δυο μοντέλων είναι παρόμοια, αλλά για την περίπτωση του σύνθετου εδάφους το μοντέλο CFD είναι ακριβέστερο από το WASP.

Επιπλέον για την περίπτωση της περιοχής με σύνθετο ανάγλυφο, προτείνεται ως τρόπος βελτίωσης της πρόβλεψης του ανέμου, η εγκατάσταση ανεμολογικών ιστών σε αποστάσεις μικρότερες των 2km από τις θέσεις εγκατάστασης των ανεμογεννητριών, με σκοπό την ακριβέστερη αποτύπωση των ανεμολογικών συνθηκών σε θέσεις με έντονες κλίσεις εδάφους και με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τοπογραφίας. Σε περίπτωση που ο αιολικός σταθμός εκτείνεται σε παραπάνω από μία κορυφογραμμή, θα ήταν σκόπιμο να εγκαθίσταται ένας τουλάχιστον αντιπροσωπευτικός ανεμολογικός ιστός σε κάθε κορυφογραμμή.

Βιβλιογραφία

Berge, E., Gravdahl, A.R., Schelling, J., Tallhaug, L. & Undheim, O. (2006) Wind in complex terrain. A comparison of WASP and two CFD-models. Proceedings from EWEC 2006. Athens, Greece.

Biatsuamlak, G.T., Stathopoulos, T. & Bedard, C. (2004). Numerical Evaluation of Wind Flow over Complex Terrain: Review. G.Aerosp. Engrg. vol.17, Issue 4, pp.135-145.

Bowen, A. J., & Mortensen, N. G., (1996). Exploring the Limits of WASP the Wind Atlas Analysis and Application Program. Proceedings of the European Union Wind Energy Conference, Goteborg, 584-587.

Brower, M. C. (2012). Wind Resource Assessment. A Practical Guide to Developing a Wind Project. Hoboken: John Wiley and Sons Inc.

Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D., & Bossanyi, E. (2011). Wind energy handbook. John Wiley & Sons.

Chiras D.D. (2006). The homeowner's guide to Renewable Energy. New Society publishers, Canada.

Di Piazza, A., Di Piazza, M.C., Ragusa, A., & Vitale G. (2010) Statistical Processing of the wind speed data for energy forecast and planning. International Conference on Renewable Energies and Power quality, 23-25 March 2010, Grenada, Spain.

European Commission_Climate strategies & targets. (2015). 2030 climate and energy framework. https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en#tab-0-0. [online: 24.11.2017].

The European Wind Association (EWEA). (2015). Wind energy scenarios for 2030. <http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/reports/EWEA-Wind-energy-scenarios-2030.pdf>. [online: 24.11.2017].

Freris, L. & Infield, D. (2008) Renewable Energy in Power Systems. Wiley, pp 302.

Global Wind Energy Council (GWEC). (2017) Global Wind Statistics 2017. http://gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC_PRstats2017_EN-003_FINAL.pdf [online:01.03.2018]

IPCC. (2007). Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K. and A. Reisinger (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104p.

International Electrotechnical Commission (IEC). Power performance measurements of electricity producing wind turbines, 1st ed. Geneva (Switzerland): IEC; 2007 [61400-12-1, Part12-1].

Jackson J.J. (2010) Advantages and Disadvantages involving Renewable Energy Sources. ezone articles.

Jackson P.S. & Hunt J.C.R. (1975) Turbulence Wind Flow over Low Hill. Quart. J. R. Met. Soc., vol. 101, pp. 929-955

Jain P. (2011). Wind Energy Engineering, The McGraw-Hill Companies

Llombart, A., Talayero, A., Mallet, A. & Telmo, E. (2006) Performance analysis of wind resource assessment programs in complex terrain. Proceedings of the 2006 International Conference on Renewable Energy and Power Quality. Palma de Mallorca, Spain. 5-7April.

Manwell, McGowan, & Rogers. (2009). Wind Energy Explained - Theory, Design and Application. Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd.

MEASNET Procedure: Evaluation of Site-Specific Wind Conditions. Version 2, April 2016.

Nelson V. (2009) Wind Energy, Renewable Energy and the Environment, CRC Press, USA.

Periera, R., Guedes, R. & Santos, C.S. (2010) Comparing WAsP and CFD wind resource estimates for the "regular" user. Proceedings from EWEC 2010. Warsaw, Poland.

Ragheb, M. (2012). Wind Shear, Roughness Classes and Turbine Energy Production.

Sumner, J., Sibuet Watters, C., & Masson, C. (2010) CFD in wind energy: the virtual, multiscale wind tunnel. *Energies*, vo. 3, pp. 989-1013.

Thøgersen, M.L., Motta, M., Sørensen, T., & Nielsen, P. (2007, May). Measure-correlate-predict methods: case studies and software implementation. In European Wind Energy Conference & Exhibition (p. 10).

Troen, I. (1990). A High Resolution Spectral Model for Flow in Complex Terrain. Ninth Symposium Turbulence Diffusion 1990, Roskilde, 417-420.

Twidell, J. & Weir, T. (2006). Renewable Energy Resources, Second Edition, Taylor and Francis publishers, New York.

United Nations-Framework Convention of Climate Change. (2015). The Paris Agreement. http://unfccc.int/paris_agreement/items/9485.php [online: 20.11.2017].

United Nations-Framework Convention of Climate Change. (2015). Adoption of the Paris Agreement. http://unfccc.int/paris_agreement/items/9485.php [online: 20.11.2017].

Us, M. A. (2005). ISO/IEC 17025: 2005, General requirements for the competence of testing and calibration laboratories.

VanLuvanee, D., Rogers, T., Randall, G., Williamson, A. & Miller, T. (2009) Comparison of WAsP, MS-Micro/3, CFD, NWP, and Analytical Methods for Estimating Site-Wide Wind Speeds. Presentation from AWEA Wind Resource Assessment Workshop. Minneapolis, MN.

WindEurope Business Intelligence. (2017) WindEurope-Annual-Statistics-2017. <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/statistics/WindEurope-Annual-Statistics-2017.pdf> [online:01.03.2018].

Ανδρίτσος Ν. (2008) Ενέργεια και Περιβάλλον. Βόλος.

Ασημακόπουλος, Δ., Αραμπατζής, Γ., Αγγελής-Δημάκης, Α., Καρταλίδης, Α. & Τσιλιγκιρίδης Γ. (2015) Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας: Δυναμικό και τεχνολογίες. Θεσσαλονίκη, σοφία Α.Ε.

ΕΛΕΤΑΕΝ (2018) HWEA-Wind Energy Statistics. <http://eletaen.gr/wp-content/uploads/2018/07/2017-hwea-wind-statistics-greece.pdf> [online:01.05.2018].

Καζαντζίδης Α. (2009). Σημειώσεις για Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Περιβαλλοντική Φυσική, Πανεπιστήμιο Πατρών.

Καλδέλλης Ι.Κ. (2005) Διαχείριση της Αιολικής Ενέργειας, Έκδοση 2η. Αθήνα, Εκδόσεις Σταμούλης.

Λειτουργός Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΛΑΓΗΕ). (2017). Μηνιαία Δελτία ΗΕΠ. http://www.lagie.gr/fileadmin/groups/EDRETH/DAS_Monthly_Reports/201801_DAS_Monthly_Report.pdf [online:01.03.2018].

Λειτουργός Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΛΑΓΗΕ). (2017). Μηνιαία Δελτία ΗΕΠ. http://www.lagie.gr/fileadmin/groups/EDSHE/MiniaiaDeltiaEL/12_2017_Miniaio_Deltio_Dekembrioy_2017_APE_SITHYA_v1.0_05.02.2018.pdf [online:01.03.2018].

Μελάς Δ. (2009), Φυσική Ατμοσφαιρικού Περιβάλλοντος, Κατεύθυνση: Φυσικής Περιβάλλοντος, τμήμα Φυσικής ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη.

Μπεργελές Γ., 2006, "Πηγές Διασποράς και Έλεγχος Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης", Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π.

ΥΠΕΚΑ. (2009). Οδηγία 2009/28/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23ης Απριλίου 2009 σχετικά με την προώθηση της χρήσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και την τροποποίηση και τη συνακόλουθη κατάργηση των οδηγιών 2001/77/ΕΚ και 2003/30/ΕΚ. <http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=446&language=el-GR/> [online: 20.11.2017].

Ζερεφός Χ. (2009) Εισαγωγικά μαθήματα στη Φυσική της ατμόσφαιρας. Αθήνα, Παπασωτηρίου.

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ

EMD International A/S. [online]. <https://www.emd.dk>

Global Wind Atlas. [online]. <https://globalwindatlas.info>

Wind Atlas Analysis and Application Programm - WASP. [online]. <https://www.wasp.dk>

Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας- ΚΑΠΕ. [online].
<http://www.cres.gr/kape/datainfo/maps.htm>

