

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ
ΚΡΗΤΗΣ



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΧΑΝΙΩΝ



ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΤΟΜΕΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ

Ανανεώσιμων Ενεργειακών Πόρων
Ανανεώσιμων Ενεργειακών Τεχνολογιών



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

***"ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ & ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΚΤΙΜΩΜΕΝΗΣ
ΚΑΙ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΟΥ
ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ"***

ΙΩΣΗΦ ΚΩΤΑΪΔΗΣ

Επιβλέπουσα καθηγήτρια

Δρ. Κολοκοτσά Διονυσία

ΧΑΝΙΑ 2010

Στον Ερνέστο

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ την καθηγήτρια, Δρ. Κολοκοτσά Διονυσία, για την πολύτιμη βοήθεια και συμβολή της στην ολοκλήρωση της πτυχιακής μου εργασίας.

Ευχαριστώ θερμά όλο το προσωπικό του αιολικού πάρκου «ΠΑΤΡΙΑΡΧΗΣ» Κομοτηνής για την πολύτιμη βοήθεια τους και ιδιαίτερα τον διευθυντή, Κωνσταντίνο Καλαμάρα.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια μου που είναι πάντα δίπλα μου.

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

- 1.
- 2.
- 3.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία αφορά στη μελέτη και αξιολόγηση του αιολικού δυναμικού στην περιοχή του αιολικού πάρκου 'ΠΑΤΡΙΑΡΧΗΣ' Κομοτηνής και στη σύγκριση της πραγματικής του παραγωγής με την εκτιμώμενη. Ο στόχος της παρούσας εργασίας επιτυγχάνεται με την ανάλυση και την αξιολόγηση των ανεμολογικών δεδομένων, τα οποία συλλέχθηκαν στην περιοχή, με τη βοήθεια στατιστικών προγραμμάτων ηλεκτρονικού υπολογιστή. Τα συμπεράσματα, τα οποία παρατίθενται στην παρούσα μελέτη, αποτελούν σημαντικό βοήθημα στην ανάλυση και αξιολόγηση του αιολικού δυναμικού.

ABSTRACT

The present paper concerns the study and evaluation of the wind energy potential in the region of the wind farm “PATRIARCHIS” in Komotini and the comparison of its true and estimated production. The goal of the present paper is achieved through the analysis and evaluation of the wind data, which were selected in the region, with the help of statistical computer programs. The results presented in the study constitute an important tool in the analysis and evaluation of the wind energy potential.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος.....	7
Κεφάλαιο 1: Θεωρία.....	9
1.1 Άνεμος.....	9
1.2 Γενικά χαρακτηριστικά ανέμου.....	10
1.3 Διαθέσιμη ισχύς ανέμου.....	14
1.4 Χαρακτηριστικά οριακού ατμοσφαιρικού στρώματος.....	16
1.5 Στροβιλισμός και αναταράξεις.....	17
1.6 Μεταβολή ταχύτητας ανέμου σε σχέση με το ύψος.....	24
1.7 Επίδραση του εδάφους στα χαρακτηριστικά του ανέμου.....	27
1.8 Επεξεργασία ανεμολογικών δεδομένων.....	33
1.9 Ενεργειακή παραγωγή	47
Κεφάλαιο 2: Ανάλυση αιολικού δυναμικού.....	53
2.1 Υπολογισμοί.....	58
Κεφάλαιο 3: Ενεργειακή παραγωγή	67
3.1 Αναμενόμενη ενεργειακή παραγωγή	67
3.2 Πραγματική ενεργειακή παραγωγή	71
Κεφάλαιο 4: Συμπεράσματα.....	73
Επίλογος.....	75
Βιβλιογραφία.....	76
Παράρτημα.....	77

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας, είναι η ανάλυση του αιολικού δυναμικού καθώς και η σύγκριση της παραγόμενης ενέργειας ενός υφιστάμενου αιολικού πάρκου με τη θεωρητική εκτίμηση της ενεργειακής παραγωγής του. Στόχος είναι να διερευνηθεί η ακρίβεια με την οποία είναι δυνατό να προβλεφθεί η ενεργειακή παραγωγή ενός πάρκου και οι παράγοντες εκείνοι που συντελούν σ' αυτό. Επίσης στην παρούσα πτυχιακή γίνεται και η καταγραφή της διαδικασίας ανάλυσης του αιολικού δυναμικού.

Για την εκπόνηση της παρούσας πτυχιακής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από το αιολικό πάρκο «ΠΑΤΡΙΑΡΧΗΣ». Το αιολικό πάρκο «ΠΑΤΡΙΑΡΧΗΣ» βρίσκεται στο νομό Κομοτηνής, βορειοανατολικά της Κομοτηνής στη συνοριακή γραμμή Ελλάδος-Βουλγαρίας. Ανήκει στην επιχείρηση ΡΟΚΑΣ ΑΒΕΕ. Το αιολικό πάρκο αποτελείται από 31 ανεμογεννήτριες BONUS 1,3 MW. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς είναι 40,3 MW.

Τα ανεμολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα δεδομένα που καταγράφονται από το σταθμό ελέγχου του αιολικού πάρκου. Τα δεδομένα προέρχονται από ανεμόμετρα και ανεμοδείκτες εγκατεστημένους στις ανεμογεννήτριες καθώς και στον μετεωρολογικό σταθμό του πάρκου. Η καταγραφής τους γίνεται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή του σταθμού ελέγχου με την βοήθεια του προγράμματος WIND POWER SUPERVISOR της εταιρίας BONUS. Τα δεδομένα τα οποία συλλέγονται είναι η ταχύτητα ανέμου σε m/sec, η διεύθυνση ανέμου σε μοίρες, η παραγόμενη ισχύς σε KW, η θερμοκρασία αέρα σε βαθμούς κελσίου καθώς και η ατμοσφαιρική πίεση σε Atm.

Για την ανάλυση του αιολικού δυναμικού της περιοχής εγκατάστασης του αιολικού πάρκου χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις που συλλέχθηκαν από το σταθμό ελέγχου για διάστημα δύο ετών. Στην συνέχεια επεξεργάστηκαν με την βοήθεια του στατιστικού προγράμματος SPSS 17 και του προγράμματος δημιουργίας ρόδων ανέμου WINDROSE PRO.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν όπως και τα αποτελέσματα της επεξεργασίας τους παρατίθενται στα παραρτήματα 1 και 2. Τα συμπεράσματα παρατίθενται και αναλύονται στην παρούσα εργασία στα κεφάλαια 2, 3 και 4.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΘΕΩΡΙΑ

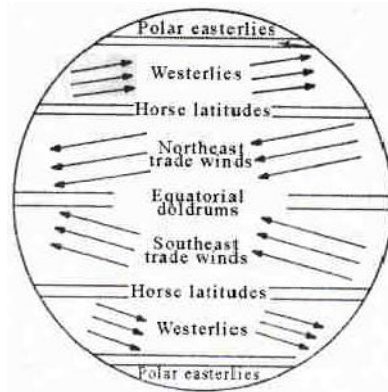
Το παρόν κεφάλαιο αποτελεί μια προσπάθεια θεωρητικής προσέγγισης στο θέμα του αιολικού δυναμικού και της ενεργειακής παραγωγής. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν πληροφορίες τόσο από έντυπα βιβλία όσο και από σημειώσεις οι οποίες συγκεντρώθηκαν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου στο τμήμα Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος του ΤΕΙ Κρήτης παράρτημα Χανίων. Τα βιβλία από τα οποία αντλήθηκαν οι πληροφορίες, αυτούσιες ή επεξεργασμένες, αναφέρονται λεπτομερώς στη βιβλιογραφία, στο τέλος της παρούσας εργασίας.

1.1 ΑΝΕΜΟΣ

Οι άνεμοι στον πλανήτη, η κίνηση δηλαδή των αέριων μαζών, προκαλούνται από τη διαφορά πίεσης στα διάφορα σημεία της επιφάνειας της Γης όπως επίσης και στην περιστροφή της. Η διαφορά στην πίεση από σημείο σε σημείο οφείλεται στη διαφορετική θερμοκρασία μεταξύ περιοχών που είναι αποτέλεσμα της διαφορετικής ακτινοβολίας που δέχονται από τον Ήλιο. Έτσι, για παράδειγμα η διαφορετική θερμοκρασία μεταξύ Ισημερινού και Πόλων δημιουργεί μία συνεχή κίνηση αέριων μαζών από τη μια περιοχή στην άλλη. Συγκεκριμένα ψυχρές αέριες μάζες κινούνται στην επιφάνεια της Γης από τους Πόλους προς τον Ισημερινό ενώ θερμές αέριες μάζες κινούνται αντιστρόφως.

Παράλληλα, η περιστροφή της Γης γύρω από τον άξονα της έχει σαν αποτέλεσμα την κίνηση ψυχρών επιφανειακών μαζών αέρα προς τα δυτικά, ενώ ο θερμός αέρας κινείται σε μεγαλύτερα ύψη προς τα ανατολικά.

Οι παραπάνω παράγοντες περιγράφουν απλοποιημένα την κίνηση των αέριων μαζών σε μεγάλη κλίμακα. Υπάρχουν και άλλοι παράγοντες όπως η βαρύτητα, το ανάγλυφο της επιφάνειας της Γης, η διαφορά στην ταχύτητα θέρμανσης-ψύξης της επιφάνειας λόγω βλάστησης, νερών κτλ., οι οποίοι επηρεάζουν και αυτοί την κίνηση αέριων μαζών σε άλλες κλίμακες.



Σχήμα 1.1 Άνεμοι στην επιφάνεια της Γης

Από το σύνολο των κινήσεων του ανέμου η σπουδαιότερη σε σχέση με τον προσδιορισμό του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής είναι η οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας του ανέμου (Manwell, McGowan, Rogers, 2002) .

1.2 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΝΕΜΟΥ

Η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου είναι τα χαρακτηριστικά εκείνα που μας ενδιαφέρουν για την ανάλυση του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής. Και τα δυο αυτά χαρακτηριστικά είναι μεγέθη ιδιαίτερα μεταβλητά στο χώρο και στο χρόνο.

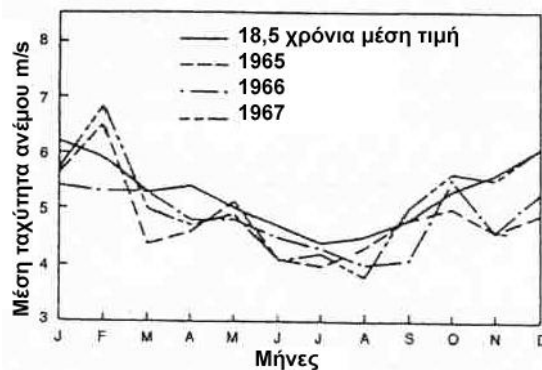
Ταχύτητα

Η διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου στο χρόνο χωρίζεται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Διαχρονική
- Ετήσια
- Ημερήσια
- Στιγμιαία

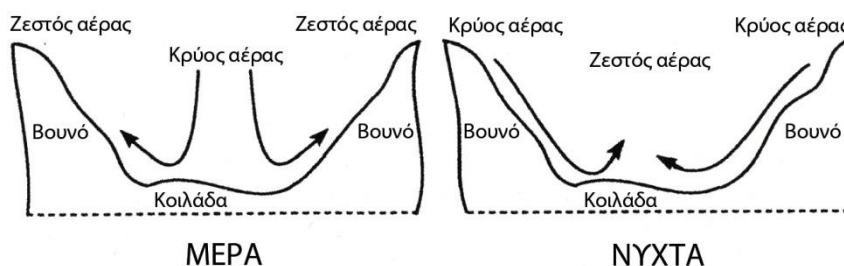
Διαχρονική είναι η διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου σε μεγάλες χρονικές περιόδους. Στη μετεωρολογία για τον υπολογισμό της διαχρονικής διακύμανσης χρειάζονται παρατηρήσεις 30 ετών. Συνήθως όμως χρησιμοποιούνται δεδομένα 5 ετών, χρονικό διάστημα που είναι αρκετό για να μας δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα. Ο υπολογισμός της διαχρονικής διακύμανσης του ανέμου είναι πολύ σημαντικός για την αξιολόγηση του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής.

Ετήσια είναι η διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου στη διάρκεια ενός έτους. Ο άνεμος σε κάθε περιοχή του πλανήτη υπόκειται σε εποχικές μεταβολές. Οι εποχικές αυτές μεταβολές δεν είναι πανομοιότυπες για κάθε ξεχωριστό έτος. Παρόλα αυτά οι καμπύλες των ετήσιων μεταβολών της ταχύτητας του ανέμου μιας περιοχής χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της αιολικής παραγωγής. Στο σχήμα 1.2 παρατηρείτε η διακύμανση του ανέμου σε μία περιοχή ανά μήνα για τρία διαφορετικά χρόνια.



Σχήμα 1.2 Εποχική διακύμανση μέσης ταχύτητας ανέμου

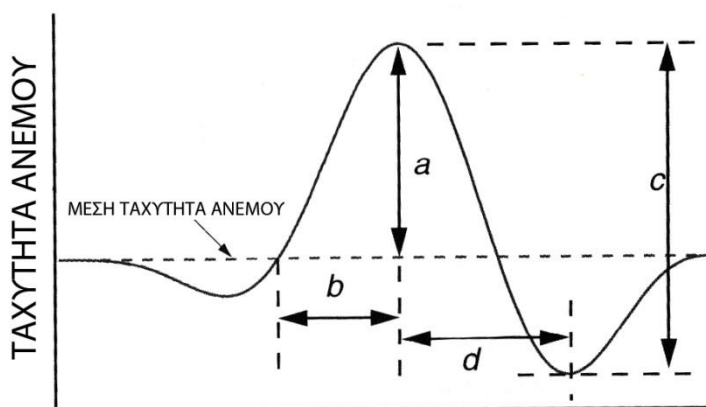
Ημερήσια είναι η διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου στην διάρκεια μίας ημέρας. Αυτού του είδους η μεταβολή οφείλεται στη διαφορά θερμοκρασίας της επιφάνειας της Γης την ημέρα με την νύχτα. Η διακύμανση αυτή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το είδος της επιφάνειας της Γης καθώς και από την κάλυψη αυτής (βλάστηση, υδάτινοι όγκοι) σχήμα 1.3. Η ημερήσιες αυτές διακυμάνσεις διαφέρουν από έτος σε έτος, παρόλα αυτά μπορούν να υπολογιστούν και με στοιχεία ενός μόνο έτους, χωρίς όμως κάποιες ιδιαίτερες λεπτομέρειες.



Σχήμα 1.3

Στιγμιαία είναι η διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου σε περιόδους μικρότερες ή ίσες των 10 λεπτών. Στις στιγμιαίες διακυμάνσεις περιλαμβάνονται οι αναταράξεις και οι ριπές. Οι αναταράξεις είναι οι τυχαίες

διακυμάνσεις του ανέμου γύρω από τη μέση τιμή της ταχύτητάς του. Οι ριπές είναι οι ευδιάκριτα ανώτερες τιμές ταχύτητας ανέμου στο διάστημα των αναταράξεων, σχήμα 1.4. Η μελέτη των αναταράξεων και των ριπών είναι πολύ σημαντική στην ανάλυση του αιολικού δυναμικού διότι παίζουν σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό των ανεμογεννητριών λόγω των μεγάλων φορτίων που τους ασκούν (Manwell, McGowan, Rogers, 2002).



Σχήμα 1.4

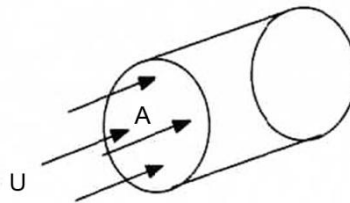
Διεύθυνση

Η διεύθυνση του ανέμου είναι και αυτή ένα εξίσου ευμετάβλητο μέγεθος. Και η διεύθυνση του ανέμου μεταβάλλεται εποχικά καθώς και ημερήσια. Οι διακυμάνσεις αυτές μπορεί να είναι μικρές ή μεγάλες από περιοχή σε περιοχή και εξαρτώνται από το ανάγλυφο. Η μελέτη της διακύμανσης της διεύθυνσης του ανέμου είναι σημαντική στο σχεδιασμό των συστημάτων των ανεμογεννητριών καθώς επίσης και στο σχεδιασμό ενός αιολικού πάρκου (Manwell, McGowan, Rogers, 2002).

1.3 ΔΙΑΘΕΣΙΜΗ ΙΣΧΥΣ ΑΝΕΜΟΥ

Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.5 μπορούμε να υπολογίσουμε τον ρυθμό ροής αέριας μάζας dm/dt από δίσκο εμβαδού A . Από την εξίσωση συνέχειας της ρευστομηχανικής ο ρυθμός αυτός ισούται με το γινόμενο της πυκνότητας του αέρα ρ , την ταχύτητα του ανέμου V και του εμβαδού της επιφάνειας A :

$$\frac{dm}{dt} = \rho A V$$



Σχήμα 1.5

Η κινητική ενέργεια του ανέμου στη μονάδα του χρόνου ή αλλιώς η ισχύς του δίνεται από την σχέση:

$$P = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} V^2 = \frac{1}{2} \rho A V^3$$

Από την ανάλυση της παραπάνω σχέσης προκύπτουν τα εξής:

- Η ισχύς του ανέμου είναι ανάλογη της πυκνότητας του ανέμου ρ . Για ιδανικές συνθήκες δηλαδή στην επιφάνεια της θάλασσας (ατμοσφαιρική πίεση 1 Atm) και θερμοκρασία 15°C η πυκνότητα του αέρα είναι 1,225 kg/m³.
- Η ισχύς που μπορεί να απορροφηθεί από μία ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα είναι ανάλογη της διαμέτρου του ρότορα καθώς αυτή εξαρτάται από την επιφάνεια A μέσα από την οποία περνά η κινούμενη μάζα ανέμου.

- Η ισχύς του ανέμου είναι ανάλογη με τον κύβο της ταχύτητας V .

Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες από την διαθέσιμη ισχύ του ανέμου είναι ικανές να δεσμεύουν περίπου το 45%.

Η ταχύτητα του ανέμου παίζει καθοριστικό ρόλο στην διαθέσιμη ισχύ. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η διαθέσιμη ισχύς σε W ανά τετραγωνικό μέτρο:

Πίνακας 1.1

Ταχύτητα ανέμου m/sec	Ισχύς/επιφάνεια W/m^2
0	0
5	80
10	610
15	2070
20	4900
25	9560
30	16550

Αν γνωρίζουμε τις μέσες ωριαίες ταχύτητες σε μία περιοχή μπορούμε να υπολογίσουμε την μέση ισχύ του ανέμου από τη σχέση:

$$\bar{P}/A = \frac{1}{2} \rho \bar{V}^3 K_e$$

Όπου \bar{V} η μέση χρονιαία ταχύτητα ανέμου και K_e ο συντελεστής ισχύος. Ο συντελεστής ισχύος μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση:

$$K_e = \frac{1}{N \bar{V}^3} \sum_{i=1}^N V_i^3$$

Όπου N οι ώρες ενός έτους, δηλαδή 8760. Ανάλογα με την ισχύ ανά τετραγωνικό μέτρο το αιολικό δυναμικό μπορεί να διαβαθμιστεί ως εξής:

- Φτωχό αν $\bar{P}/A < 100 \text{ W/m}^2$
- Καλό αν $\bar{P}/A \approx 400 \text{ W/m}^2$
- Εξαιρετικό αν $\bar{P}/A > 700 \text{ W/m}^2$

(Manwell, McGowan, Rogers, 2002)

1.4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΟΡΙΑΚΟΥ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ

Το οριακό ατμοσφαιρικό στρώμα επειδή έρχεται σε άμεση επαφή με την επιφάνεια της Γης έχει κάποια χαρακτηριστικά τα οποία εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το ανάγλυφο και τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Επίσης η οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας του ανέμου εξαρτάται από το ύψος από την επιφάνεια του εδάφους. Ο άνεμος έχει μικρή ταχύτητα στην επιφάνεια του εδάφους και αυξάνεται σε μεγαλύτερα ύψη της ατμόσφαιρας. Η αύξηση αυτή της ταχύτητας με την αύξηση του ύψους ονομάζεται κατακόρυφο προφίλ ταχύτητας ανέμου. Τα κύρια χαρακτηριστικά του οριακού ατμοσφαιρικού στρώματος είναι η κατακόρυφη θερμοβαθμίδα, η πίεση και η πυκνότητα.

Η κατακόρυφη θερμοβαθμίδα είναι η μείωση της θερμοκρασίας του αέρα με την αύξηση του ύψους. Σε συνθήκες στις οποίες δεν υπάρχει καθόλου υγρασία στην ατμόσφαιρα και καθόλου μεταφορά θερμότητας η μείωση αυτή ισούται με $1^\circ\text{C}/100\text{m}$. Στην πραγματικότητα έχει υπολογιστεί ότι η μείωση αυτή ισούται με $0,66^\circ\text{C}/100\text{m}$.

Η πίεση και η πυκνότητα είναι μεγέθη που εξαρτώνται από τη θερμοκρασία, έτσι και τα δύο αυτά χαρακτηριστικά διαφέρουν ανάλογα με το ύψος. Σύμφωνα με τα διεθνή στάνταρτ η πίεση και η θερμοκρασία στην επιφάνεια της θάλασσας είναι 1 Atm και 15°C. Τα μεγέθη αυτά μεταβάλλονται και με την αλλαγή του καιρού. Πάντως η καθημερινή αλλαγή της θερμοκρασίας παίζει σημαντικότερο ρόλο στην πυκνότητα του αέρα παρά η αλλαγή στην πίεση και στην υγρασία (Manwell, McGowan, Rogers, 2002).

1.5 ΣΤΡΟΒΙΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΤΑΡΑΞΕΙΣ

Ο στροβιλισμός του ανέμου οφείλεται είτε σε εμπόδια πάνω στα οποία προσπίπτει ο άνεμος είτε στην μετατροπή τις κινητικής ενέργειας του ανέμου σε θερμότητα λόγω της σταδιακής δημιουργίας και διάλυσης μικρών αναταράξεων του ανέμου. Ο στροβιλισμός αυτός του ανέμου έχει χαρακτηριστικά τυρβώδους ροής. Στην τυρβώδη ροή υπάρχει μια μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου γύρω από μία μέση τιμή. Η μεταβολή αυτή για περιόδους μιας ώρας και πάνω ακολουθεί σχεδόν σταθερό ρυθμό ενώ για μικρότερα χρονικά διαστήματα είναι πολύ ευμετάβλητη. Οι μεταβολές του ανέμου αν και φαίνονται τυχαίες στην πραγματικότητα έχουν κάποια ευδιάκριτα χαρακτηριστικά. Τα χαρακτηριστικά αυτά ακολουθούν κάποιες στατιστικές ιδιότητες:

- Ένταση ανατάραξης
- Συνάρτηση πιθανότητας πυκνότητας ταχύτητας ανέμου
- Αυτοσυσχέτιση
- Ολοκλήρωμα χρόνου και μήκους
- Συνάρτηση φασματικής πυκνότητας ισχύος

Η τυρβώδης ροή αέρα αποτελείται από τρεις συνιστώσες, την οριζόντια που έχει τη φορά του ανέμου, την κατακόρυφη και την πλευρική

που είναι κάθετη στη φορά του ανέμου. Αν είναι V η ταχύτητα του ανέμου και οι τρεις συνιστώσες $u(z,t)$, $v(z,t)$ και $w(z,t)$ που εξαρτώνται από την τραχύτητα z του εδάφους και το χρόνο t , τότε κάθε μέση ταχύτητα ανέμου της κάθε συνιστώσας είναι:

$$V=u-\tilde{u}, V=v-\tilde{v}, V=w-\tilde{w}$$

Όπου u , v και w είναι οι στιγμιαίες ταχύτητες ανέμου και \tilde{u} , \tilde{v} , \tilde{w} είναι η διακυμάνσεις των ταχυτήτων γύρω από την μέση τιμή ανέμου. Η μέση ταχύτητα ανέμου V είναι η μέση τιμή ανέμου για μικρό χρονικό διάστημα Δt το οποίο είναι μεγαλύτερο από τον χρόνο των αναταράξεων και των στροβιλισμών. Συνήθως είναι 10 λεπτά αλλά μπορεί να φτάσει και τη μία ώρα.

$$V = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} u dt$$

Η τυρβώδης ροή δεν παρατηρείται συνεχώς αλλά εμφανίζεται στατιστικώς σε υψηλό ρυθμό. Αν υποθέσουμε ότι έχουμε ένα διάστημα μετρήσεων τυρβώδους ροής $\Delta t = N_s \delta t$ όπου N_s είναι ο αριθμός των μετρήσεων σε μικρό χρονικό διάστημα τότε η τυρβώδης ροή μπορεί να εκφραστεί ως ακολουθία u_i . Τότε και η μέση ταχύτητα ανέμου μπορεί να εκφραστεί ως (Manwell, McGowan, Rogers, 2002):

$$V = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} u_i$$

Ένταση Ανατάραξης

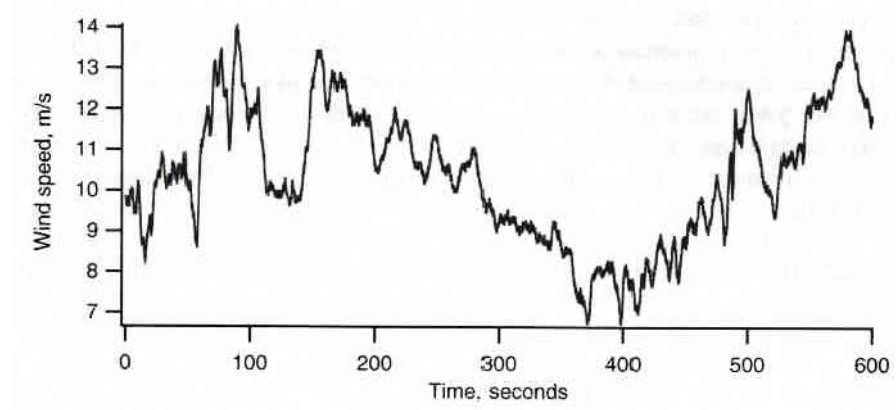
Το κυριότερο χαρακτηριστικό της ανατάραξης είναι η ένταση ανατάραξης. Το μέγεθος αυτό χαρακτηρίζεται και ως η ένταση της τύρβης του ανέμου και χαρακτηρίζει και το επίπεδο της τύρβης της ατμόσφαιρας μιας περιοχής. Η ένταση της ανατάραξης ορίζεται ως ο λόγος της διασποράς της ταχύτητας του ανέμου προς την μέση ταχύτητα ανέμου. Είναι δηλαδή:

$$I = \frac{\sigma_u}{V}$$

Όπου σ_u η διασπορά της ταχύτητας του ανέμου (τυπική απόκλιση) και V η μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου. Η διασπορά της ταχύτητας του ανέμου (τυπική απόκλιση) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{1}{N_s - 1} \sum_{i=1}^{N_s} (u_i - V)^2}$$

Η τιμή της έντασης ανατάραξης είναι συνήθως από 0,1 έως 0,4. Γενικά η υψηλότερη τιμή έντασης ανατάραξης εμφανίζεται στη χαμηλότερη τιμή ανέμου, αλλά εξαρτάται τελικά σε μεγάλο βαθμό από τα χαρακτηριστικά του εδάφους στην περιοχή. Για το παρακάτω σχήμα (σχήμα 1.6) παρατηρούμε ότι η μέση τιμή του ανέμου είναι 10,4 m/sec, η τυπική απόκλιση 1,6 m/sec και η ένταση της ανατάραξης για διάστημα 10 λεπτών είναι 0,16 (Manwell, McGowan, Rogers, 2002).



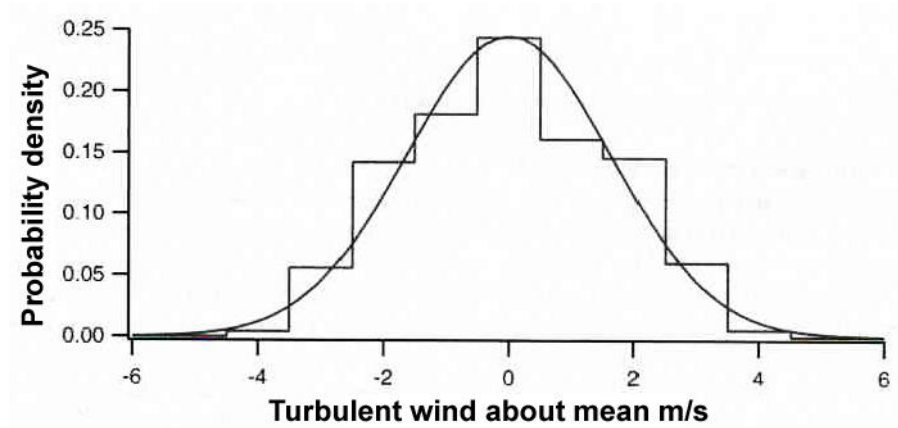
Σχήμα 1.6

Εξίσωση Πυκνότητας Πιθανότητας Άνεμου

Η πιθανότητα η ταχύτητα του ανέμου να πάρει μία συγκεκριμένη τιμή μπορεί να υπολογιστεί με την εξίσωση πυκνότητας πιθανότητας ταχύτητας ανέμου. Από παρατηρήσεις έχει αποδειχτεί ότι η τιμή της ταχύτητας του ανέμου βρίσκεται κοντύτερα στην μέση τιμή παρά σε οποιαδήποτε άλλη τιμή. Επίσης είναι πιθανότερο να βρίσκεται κάτω από την μέση τιμή παρά πάνω από αυτήν. Η εξίσωση που περιγράφει καλύτερα αυτή τη κατανομή είναι η κανονική κατανομή. Η εξίσωση κανονικής κατανομής για τις ταχύτητες ανέμου είναι της μορφής:

$$p(u) = \frac{1}{\sigma_u \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(u - V)^2}{2\sigma_u^2} \right]$$

Ένα παράδειγμα κανονικής κατανομής φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 1.7).



Σχήμα 1.7

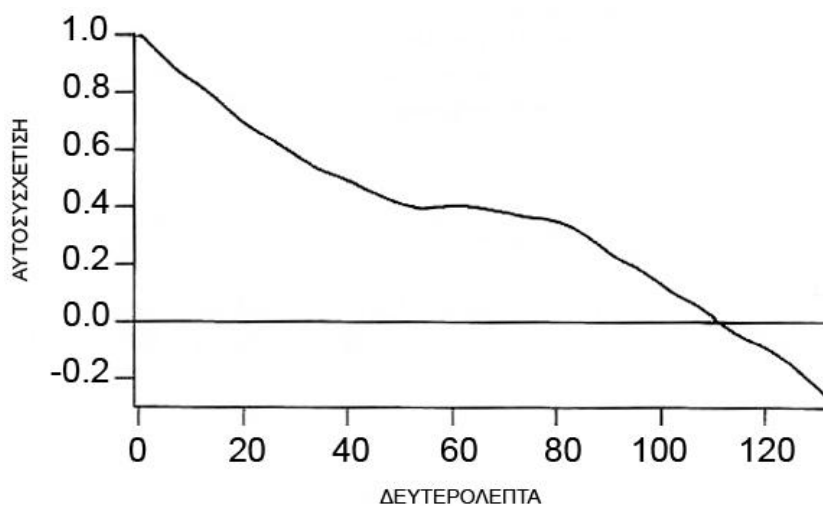
(Manwell, McGowan, Rogers, 2002)

Αυτοσυσχέτιση

Η εξίσωση της πυκνότητας πιθανότητας ανέμου δίνει ουσιαστικά την πιθανότητα που υπάρχει ο άνεμος να πάρει μια συγκεκριμένη τιμή, δεν παρέχει όμως καμία πληροφορία για τις πιθανές τιμές ταχύτητας ανέμου σε σχέση με τις προηγούμενες τιμές. Ένα μέτρο της τάσης αυτής παρέχεται με την εξίσωση αυτοσυσχέτισης. Με την εξίσωση αυτοσυσχέτισης είναι δυνατόν να υπολογιστεί η τιμή του ανέμου οποιαδήποτε χρονική στιγμή όταν είναι γνωστές διάφορες στιγμιαίες τιμές ταχύτητας ανέμου, ο μέσος όρος ταχύτητας ανέμου για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και η τυπική απόκλιση των τιμών. Η κανονικοποιημένη εξίσωση αυτοσυσχέτισης για την ταχύτητα του ανέμου είναι η εξής:

$$R(r, \delta t) = \frac{1}{\sigma_u^2 (N_s - r)} \sum_{i=1}^{N_s - r} u_i u_{i+r}$$

Όπου r ο αριθμός καθυστερήσεων, N_s ο αριθμός μετρήσεων, u η στιγμιαία τιμή ταχύτητας ανέμου και σ_u^2 η τυπική απόκλιση. Η εξίσωση αυτή δίνει τον συντελεστή αυτοσυσχέτισης ο οποίος παίρνει τιμές μικρότερες ή ίσες με την μονάδα. Ο συντελεστής αυτοσυσχέτισης χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ολοκληρώματος ανατάραξης στον χρόνο ανατάραξης. Παράδειγμα διαγράμματος συντελεστή αυτοσυσχέτισης- χρόνου φαίνεται στο σχήμα 1.8.



Σχήμα 1.8

(Manwell, McGowan, Rogers, 2002)

Ολοκλήρωμα Χρόνου και Μήκους

Ο συντελεστής αυτοσυσχέτισης μειώνεται από την τιμή 1 προς την τιμή 0 και όσο αυξάνεται η χρονική καθυστέρηση τείνει να παίρνει μικρές θετικές ή αρνητικές τιμές. Ένα μέτρο του μέσου χρόνου στον οποίο οι διακυμάνσεις της ταχύτητας του αέρα συσχετίζονται μεταξύ τους προκύπτει ολοκληρώνοντας την αυτοσυσχέτιση από τη μηδενική χρονική καθυστέρηση έως τον πρώτο μηδενισμό της αυτοσυσχέτισης. Η τιμή που προκύπτει σαν

αποτέλεσμα είναι γνωστή ως ολοκλήρωμα χρόνου της ανατάραξης. Ενώ συνήθεις τιμές των αναταράξεων είναι λιγότερες από 10 δευτερόλεπτα, το ολοκλήρωμα χρόνου, το οποίο αποτελεί μία συνάρτηση του πεδίου, της ατμοσφαιρικής σταθερότητας και άλλων παραγόντων, μπορεί να παίρνει τιμές αρκετά μεγαλύτερες των 10 δευτερολέπτων. Οι ριπές επίσης είναι αυξομειώσεις της ταχύτητας του ανέμου με σχετική συνέχεια και έχουν χαρακτηριστικούς χρόνους στον ίδιο ρυθμό με το ολοκλήρωμα χρόνου. Πολλαπλασιάζοντας το ολοκλήρωμα χρόνου με τη μέση ταχύτητα του ανέμου προκύπτει το ολοκλήρωμα μήκους. Το ολοκλήρωμα μήκους τείνει να είναι πιο συνεχές σε ένα φάσμα ταχυτήτων ανέμου από ότι το ολοκλήρωμα χρόνου και για το λόγο αυτό είναι πιο αντιπροσωπευτικό χαρακτηριστικό του πεδίου (Manwell, McGowan, Rogers, 2002).

Εξίσωση Πυκνότητας Φάσματος Ισχύος

Οι διακυμάνσεις του ανέμου μπορούν να θεωρηθούν αποτέλεσμα μιας σύνθεσης ανέμων που ποικίλουν ημιτονοειδώς, οι οποίοι διαμορφώνουν τον μέσο σταθερό άνεμο. Οι ημιτονοειδείς αυτές διακυμάνσεις έχουν διάφορες συχνότητες και πλάτη. Ο όρος φάσμα χρησιμοποιείται για να περιγράψει τις εξισώσεις συχνότητας. Έτσι η εξίσωση που χαρακτηρίζει την ανατάραξη ως μια εξίσωση συχνότητας είναι γνωστή ως εξίσωση πυκνότητας φάσματος. Από τη στιγμή που η μέση τιμή κάθε ημιτονοειδούς είναι μηδέν, τα πλάτη χαρακτηρίζονται από τις μέσες τιμές των τετραγώνων τους. Η μέθοδος αυτή ανάλυσης προέρχεται από εφαρμογές της ηλεκτρικής ενέργειας όπου το τετράγωνο της τάσης ή της έντασης είναι ανάλογο της ισχύος. Για το λόγο αυτό ο ολοκληρωμένος όρος για την εξίσωση που περιγράφει τη σχέση μεταξύ συχνότητας και των πλατών των κυμάτων είναι πυκνότητα φάσματος ισχύος.

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι η μέση ισχύς της ανατάραξης σε διάφορες συχνότητες προκύπτει από το ολοκλήρωμα της

πυκνότητας φάσματος ισχύος μεταξύ δύο συχνοτήτων. Επίσης το ολοκλήρωμα όλων των συχνοτήτων είναι ίσο με την συνολική διακύμανση.

Οι πυκνότητες φάσματος ισχύος συχνά χρησιμοποιούνται στη δυναμική ανάλυση. Ένας αριθμός εξισώσεων πυκνότητας φασμάτων ισχύος χρησιμοποιείται ως μοντέλο στην μηχανική αιολικής ενέργειας σε περιπτώσεις όπου δεν είναι διαθέσιμες για ένα συγκεκριμένο πεδίο οι αντιπροσωπευτικές πυκνότητες φάσματος ισχύος ανατάραξης.

Ένα μοντέλο παρόμοιο με αυτό του Von Karman για τις αναταράξεις σε κανάλια αέρα είναι:

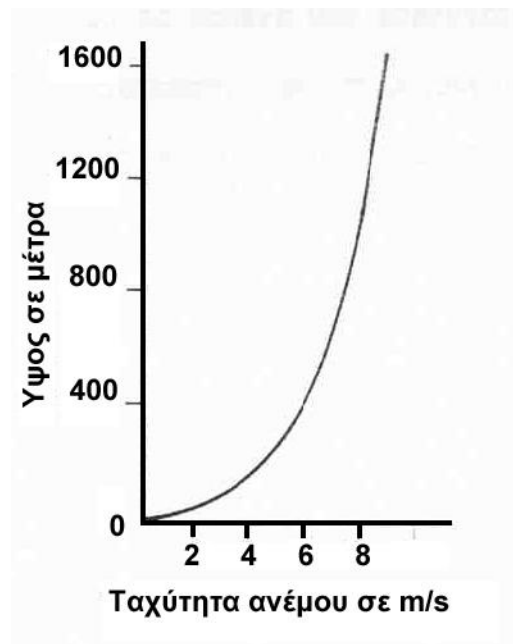
$$S(f) = \frac{\sigma_u^2 4(L/U)}{[1 + 70,8(fL/U)^2]^{5/6}}$$

Όπου f η συχνότητα, L ολοκλήρωμα μήκους και U η μέση ταχύτητα ανέμου (Manwell, McGowan, Rogers, 2002).

1.6 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΑΝΕΜΟΥ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΥΨΟΣ

Η ταχύτητα του ανέμου μεταβάλλεται με το ύψος από το έδαφος. Όσο απομακρυνόμαστε από την επιφάνεια του εδάφους τόσο η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται. Η διακύμανση αυτή της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος ακολουθεί τη συμπεριφορά τυρβώδους οριακού στρώματος στο οποίο μεγάλο ρόλο παίζει και η επίδραση της τραχύτητας του εδάφους, η οποία εξαρτάται από το ανάγλυφο και την ύπαρξη ή όχι εμποδίων (κτίρια, δέντρα κ.λπ.).

Η διακύμανση αυτή της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος ονομάζεται κατακόρυφο προφίλ ταχύτητας ανέμου, σχήμα 1.9. Για την περιγραφή του κατακόρυφου προφίλ δύο είναι τα κυριότερα μοντέλα. Η λογαριθμική διανομή και η εκθετική.



Σχήμα 1.9

(Καλδέλλης, 1999)

Λογαριθμική Διανομή

Η εξίσωση λογαριθμικής διανομής ταχύτητας ανέμου είναι:

$$V_{(z)} = \frac{U^*}{k} \ln\left(\frac{z + z_0}{z_0}\right)$$

Όπου U^* η ταχύτητα τριβής που εξαρτάται από την πυκνότητα του αέρα και την επιφανειακή τάση Reynolds. Το k είναι μία σταθερά που ονομάζεται σταθερά του von Karman (σταθερά αναλογίας) και το z_0 η τραχύτητα του εδάφους (Burton κ.α., 2001). Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι τιμές του z_0 σε σχέση με διάφορους τύπους εδάφους.

Πίνακας 1.2

Τύπος εδάφους	Z_0 (mm)
Πάγος ή λάσπη	0,0 1
Ήρεμη θάλασσα	0,2
Τρικυμιώδης θάλασσα	0,5
Επιφάνια χιονιού	3
Γρασίδι	8
Βοσκοτόπια	10
Ακαλλιέργητα χωράφια	30
Αγροί	50
Λίγα δέντρα	100
Πολλά δέντρα ή λίγα κτήρια	250
Δάση	500
Προάστια πόλεων	150 0
Κέντρα πόλεων	300 0

(Καλδέλλης, 1999)

Εκθετική Διανομή

Η εξίσωση εκθετικής διανομής ταχύτητας ανέμου με το ύψος είναι:

$$\frac{U_{(z)}}{U_{(z_r)}} = \left(\frac{z}{z_r} \right)^a$$

και δίνει την ταχύτητα του ανέμου σε ύψος z , $U_{(z)}$. Ο εκθέτης α είναι μια μεταβλητή που εξαρτάται από πολλές παραμέτρους όπως η ώρα της ημέρας, οι εποχές, η φύση του εδάφους, η ταχύτητα του ανέμου, η θερμοκρασία, και πολλά άλλα. Η τιμή που προτείνουν διάφοροι μελετητές για το α ποικίλει (Καλδέλλης, 1999). Στον παρακάτω πίνακα, για διάφορες τιμές του α σε σχέση με την διαθέσιμη ενέργεια ανά τετραγωνικό μέτρο, δίδεται η εκατοστιαία αύξηση της ταχύτητας του ανέμου.

Πίνακας 1.3

α	0,1	1/7	0,3
V_{30m} m/sec	5,58	5,58	6,95
P/A W/m ²	106,4	122,6	205,6
% αύξηση πάνω από τα 10 m	39	62,2	168,5

(Manwell, McGowan, Rogers, 2002)

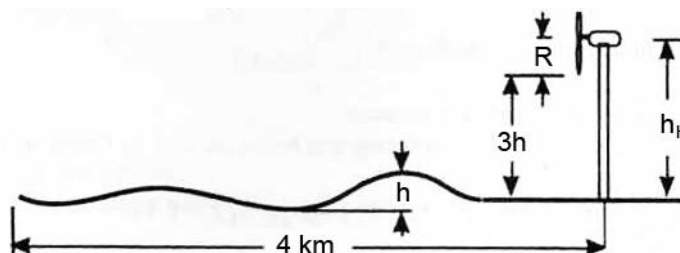
1.7 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΣΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ

Η επίδραση των χαρακτηριστικών του εδάφους στον άνεμο είναι πολύ σημαντική και πολλές φορές η εγκατάσταση ενός αιολικού πάρκου εξαρτάται από τη σωστή μελέτη αυτών των χαρακτηριστικών. Από την τραχύτητα του εδάφους εξαρτώνται πολλοί συντελεστές των πιο πάνω εξισώσεων διότι η τραχύτητα του εδάφους επηρεάζει την τυρβώδη ροή του ανέμου (Manwell, McGowan, Rogers, 2002).

Ταξινόμηση Εδαφών

Τα εδάφη χωρίζονται σε δύο γενικές κατηγορίες, στα επίπεδα και μη επίπεδα εδάφη (πεδία). Τα επίπεδα εδάφη είναι τα εδάφη τα οποία δεν παρουσιάζουν έντονο ανάγλυφο και καλύπτονται με μικρά εμπόδια όπως είναι χαμηλή βλάστηση, θάμνοι, δέντρα κλπ. Τα μη επίπεδα είναι τα εδάφη εκείνα που έχουν έντονο ανάγλυφο όπως λόφους, βουνά κοιλάδες, φαράγγια κλπ. Ένα έδαφος για να χαρακτηριστεί επίπεδο πρέπει να πληρεί τις παρακάτω προϋποθέσεις (στους παρακάτω κανόνες χρησιμοποιείται σαν παράγοντας η γεωμετρία μιας ανεμογεννήτριας):

- Η διαφορά ύψους μεταξύ του αιολικού πάρκου και του γύρω εδάφους δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη των 60 μέτρων σε ακτίνα 11,5 Km από το κέντρο του αιολικού πάρκου.
- Κανένας λόφος δεν πρέπει να έχει λόγο ύψους πλάτους μεγαλύτερο του 1/50 σε απόσταση 4 Km ανάντη και κατάντη του αιολικού πάρκου. Σχήμα 1.10.



Σχήμα 1.10

- Η διαφορά ύψους μεταξύ του ρότορα των αιολικών μηχανών με την ακτίνα τους πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση με το τριπλάσιο της

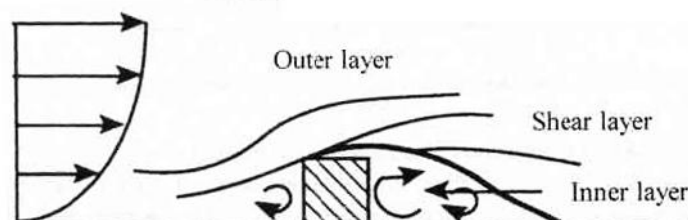
διαφοράς του υψηλότερου με το χαμηλότερο σημείο της περιοχής σε ακτίνα 4 Km. Σχήμα 1.10

Το μη επίπεδο έδαφος ή πεδίο είναι αυτό που έχει έντονο ανάγλυφο όπως κοιλάδες ή βουνά. Χωρίζεται σε δύο υποκατηγορίες, στο μη επίπεδο έδαφος μικρής κλίμακας και σε αυτό μεγάλης κλίμακας. Ο διαχωρισμός μεταξύ των δύο γίνεται σε σύγκριση με το επιφανειακό οριακό στρώμα της ατμόσφαιρας που είναι 1 Km. Έτσι αν ένας λόφος είναι μικρότερος του 10% του ύψους αυτού τότε το πεδίο κατατάσσεται σε μη επίπεδο μικρής κλίμακας, αλλιώς σε μη επίπεδο μεγάλης κλίμακας.

Υπάρχει περίπτωση ένα πεδίο να έχει έντονο ανάγλυφο και να κατατάσσεται σε επίπεδο πεδίο. Αυτό συμβαίνει αν βρίσκεται σε περιοχή γύρω από το αιολικό πάρκο και από την οποία ο άνεμος φυσά κάτω από 5% του συνολικού χρόνου και έχει μέσο όρο ταχύτητας χαμηλότερη των 2 m/sec (Manwell, McGowan, Rogers, 2002).

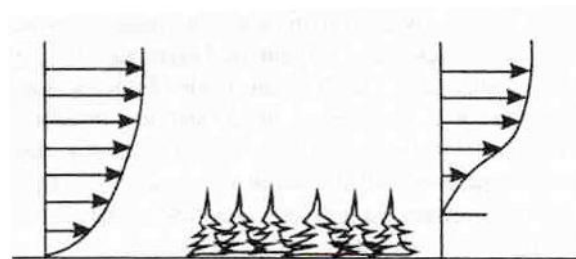
Επίδραση Εμποδίων

Στην επιφάνεια του εδάφους υπάρχουν διάφορα εμπόδια που επηρεάζουν την ροή του ανέμου. Τα εμπόδια αυτά μπορεί να είναι είτε φυσικά, δέντρα, θάμνοι είτε τεχνητά, κτίρια και διάφορες ανθρωπίνες κατασκευές. Η ροή του ανέμου πάνω από εμπόδια φαίνεται στα παρακάτω σχήματα:



Σχήμα 1.11

Τα εμπόδια, φυσικά ή τεχνητά, έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση της ταχύτητας του ανέμου, την αύξηση της τραχύτητας και τη μείωση της ενέργειας του ανέμου (σχήμα 1.12).

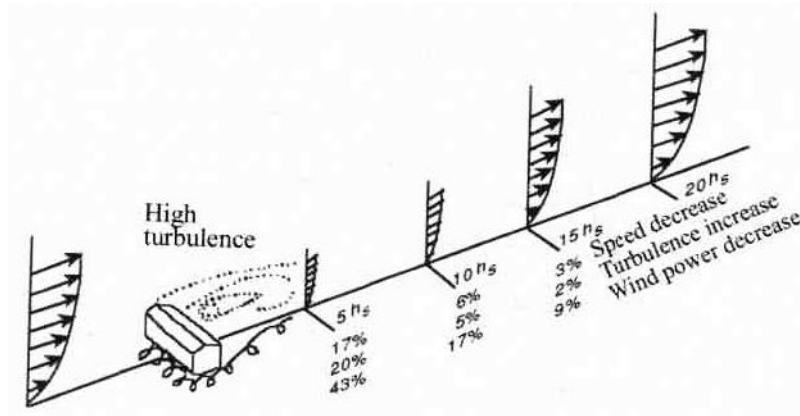


Σχήμα 1.12

Η επιρροή των εμποδίων στα χαρακτηριστικά του ανέμου μειώνεται καθώς απομακρυνόμαστε από αυτά όπως επίσης και σε ύψη πολύ μεγαλύτερα από αυτά. Έτσι αν z_H είναι το ύψος από το έδαφος του άξονα περιστροφής της πτερωτής μιας αιολικής μηχανής, R η ακτίνα της πτερωτής και h το διπλάσιο του ύψους ενός εμποδίου, τότε αν :

$$H = \frac{h}{z_H} - R > 0.75$$

Θεωρούμε ότι υπάρχει εμπόδιο και αποφεύγεται η εγκατάσταση αιολικών μηχανών. Αν το ύψος του εμποδίου είναι h_e τότε για να εγκαταστήσουμε ανεμογεννήτριες πρέπει να τις εγκαταστήσουμε σε απόσταση $15h_e$ από αυτό (σχήμα 1.13).



Σχήμα 1.13

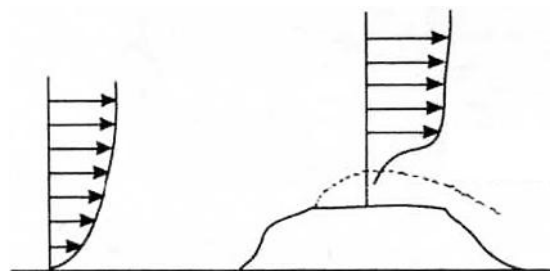
(Manwell, McGowan, Rogers, 2002)

Χαρακτηριστικά μη Επίπεδων Εδαφών

Μικρής Κλίμακας

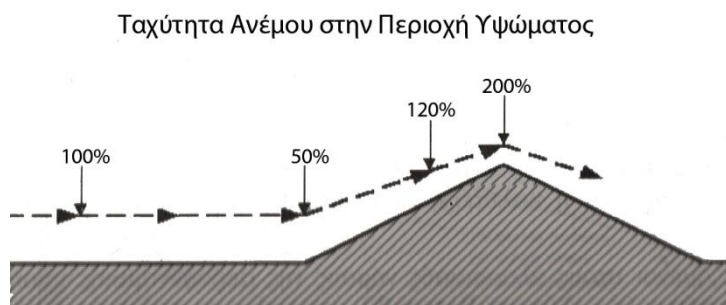
Όπως σημειώθηκε παραπάνω, μη επίπεδα πεδία μικρής κλίμακας, είναι αυτά στα οποία απαντώνται μικρού ύψους λόφοι ή μικρές κοιλάδες.

Η ροή αέρα πάνω από μικρού ύψους λόφους (έως 600 m) είναι παρόμοια με την ροή αέρα πάνω από εμπόδια. Παρόλο που παρατηρείται μείωση της διαθέσιμης αιολικής ισχύς μετά από εμπόδια τέτοιου είδους υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες παρατηρούμαι αύξηση της ταχύτητας του ανέμου. Αυτό συμβαίνει όταν ο λόφος έχει σχετικά μικρή κλίση πλαγιάς (10° με 22°) από την προσήνεμη του πλευρά και όταν η κορυφή του είναι σχετικά επίπεδη. Σ' αυτές τις περιπτώσεις παρατηρείται αύξηση της ταχύτητας του ανέμου έως και 80% (σχήμα 1.14).



Σχήμα 1.14

Έτσι η κορυφές τέτοιων λόφων αποτελούν σημαντικές τοποθεσίες για την εγκατάσταση ανεμογεννητριών. (σχήμα 1.15)



Σχήμα 1.15

Η ροή του ανέμου σε μικρές κοιλάδες ή φαράγγια επίσης επηρεάζεται αλλά οι παράγοντες που επιδρούν στις μεταβολές αυτές είναι τόσοι πολλοί που η κάθε περίπτωση πρέπει να εξετάζεται ξεχωριστά και ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες (Manwell, McGowan, Rogers, 2002).

Μεγάλης Κλίμακας

Τα μεγάλης κλίμακας μη επίπεδα πεδία είναι αυτά των οποίων τα χαρακτηριστικά του εδάφους είναι πολύ μεγάλα σε σχέση με το μέγεθος του οριακού ατμοσφαιρικού στρώματος. Σ' αυτά περιλαμβάνονται περιοχές με μεγάλα βουνά ή οροσειρές, βαθιές κοιλάδες ή φαράγγια. Η ροή του αέρα σε τέτοιες περιπτώσεις είναι πολύ πιο πολύπλοκη σε σχέση με τα προηγούμενα και η πρόβλεψη της ροής του αέρα πιο δύσκολη (Manwell, McGowan, Rogers, 2002).

1.8 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΝΕΜΟΛΟΓΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Η μελέτη του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής, δηλαδή η κατανομή των ταχυτήτων και της διεύθυνσης του ανέμου, απαιτεί τη συλλογή ενός πλήθους δεδομένων διαφόρων στοιχείων του ανέμου. Τα στοιχεία που απαιτούνται είναι οι ταχύτητες ανέμου, στιγμιαίες και μέσες, οι διευθύνσεις και οι συχνότητες εμφάνισης ανέμου συγκεκριμένης ταχύτητας κατά διεύθυνση. Από τα παραπάνω στοιχεία με κατάλληλη επεξεργασία εξάγονται πληροφορίες για τα εξής χαρακτηριστικά εκτίμησης του αιολικού δυναμικού:

- Μέση τιμή ταχύτητας ανέμου
- Τυπική απόκλιση τιμών ταχυτήτων ανέμου
- Καμπύλη διάρκειας ανέμου
- Ιστόγραμμα πιθανοτήτων ταχύτητας ανέμου
- Χαρακτηριστικά τύρβης ανέμου
- Μέγιστες τιμές ανέμου
- Μεταβολή διευθύνσεων ανέμου
- Μεταβολή ταχυτήτων ανέμου κατά διεύθυνση
- Τραχύτητα εδάφους
- Καμπύλη νηνεμίας
- Στατιστικές προβλέψεις

(Manwell, McGowan, Rogers, 2002)

Μέσες Τιμές και Τυπική Απόκλιση

Για τον υπολογισμό των μέσων (ωριαίων, ημερησίων, μηνιαίων) τιμών της ταχύτητας του ανέμου γίνονται εκτεταμένες χρονικά μετρήσεις της έντασης του ανέμου οι οποίες και καταγράφονται. Εάν έχουμε μία σειρά N από μετρήσεις μέσης έντασης ανέμου U για χρονικό διάστημα δt τότε η συνολική μέση ταχύτητα ανέμου είναι :

$$\bar{U} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i$$

Και η τυπική απόκλιση της ταχύτητας του ανέμου, δηλαδή η διασπορά των ταχυτήτων γύρω από τη μέση τιμή είναι:

$$\sigma_U = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (U_i - \bar{U})^2}$$

Ένας άλλος τρόπος για να αναλυθούν οι μετρήσεις ταχύτητας ανέμου είναι να χωριστούν σε ομάδες τα δεδομένα. Έτσι δημιουργούνται ομάδες που αναλογούν σε διαστήματα ταχυτήτων ανέμου, δηλαδή για παράδειγμα δημιουργείται μια ομάδα με διάστημα 1-2 m/sec, στην οποία καταχωρούνται όλες η τιμές ταχύτητας ανέμου από 1m/sec μέχρι και 2m/sec. Οπότε αν υποθεθεί ότι υπάρχουν N_B ομάδες δεδομένων με πλάτος w_j , μέση τιμή m_j και συχνότητα εμφάνισης f_j σε κάθε ομάδα τότε:

$$\text{Η μέση τιμή υπολογίζεται από : } \bar{V} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N_B} m_j f_j$$

Η τυπική απόκλιση από:

$$\sigma_V = \sqrt{\frac{1}{N-1} \left\{ \sum_{j=1}^{N_B} m_j^2 f_j - N \left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N_B} m_j f_j \right)^2 \right\}}$$

Επίσης με αυτήν την μέθοδο μπορεί να υπολογιστούν και τα εξής:

$$\bar{P}/A = \frac{1}{2} \rho \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N_B} m_j^3 f_j$$

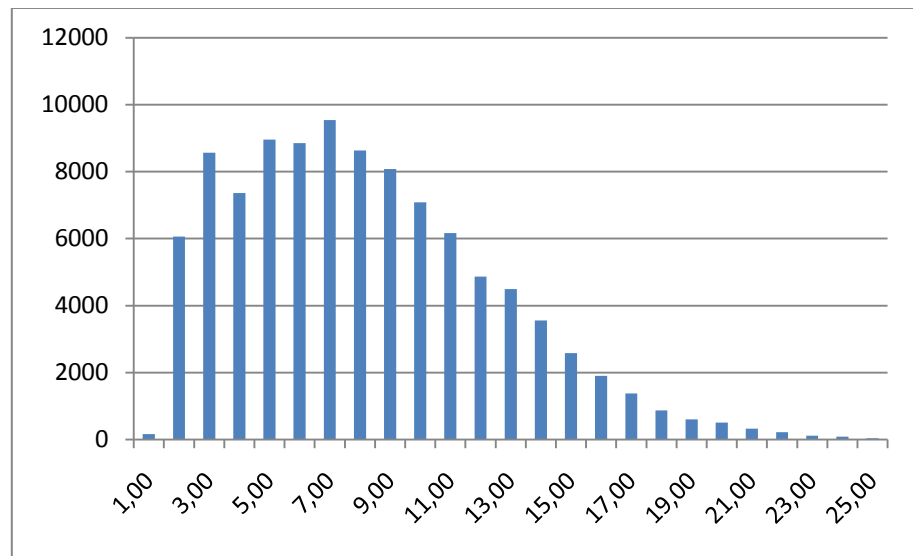
$$\bar{P}_W = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N_B} P_W m_j f_j$$

Και $E_W = \sum_{j=1}^{N_B} P_w m_j f_j \Delta t$

(Manwell, McGowan, Rogers, 2002)

Καμπύλη Διάρκειας

Καταγράφοντας της μέσες ταχύτητες ανέμου (ωριαίες, ημερήσιες, μηνιαίες) ανά ορισμένη χρονική στιγμή για μία συγκεκριμένη θέση είναι δυνατή η δημιουργία της ετήσιας καμπύλης διάρκειας του ανέμου. Η καμπύλη διάρκειας δείχνει τον αριθμό των περιόδων του χρόνου, όπου ο άνεμος έχει ένταση μεγαλύτερη από μια ορισμένη τιμή. Η καμπύλη αυτή δημιουργείται τοποθετώντας στον οριζόντιο άξονα διαγράμματος τον αριθμό των ημερών του έτους που εμφανίζεται μία τιμή ανέμου και στον κάθετο άξονα την ταχύτητα ανέμου. Έτσι σχηματίζεται ένα γράφημα της παρακάτω μορφής:

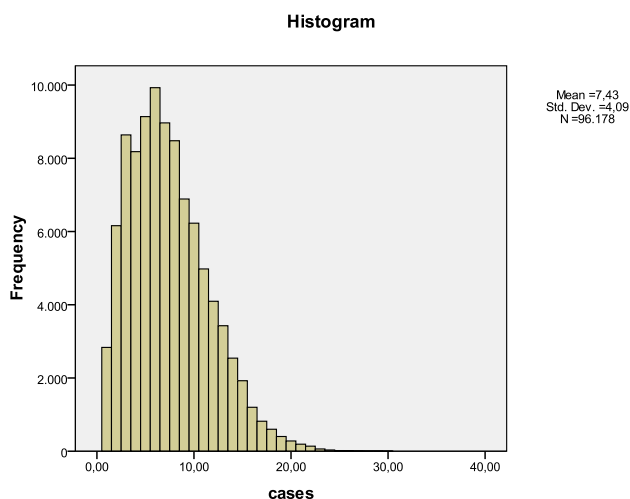


Σχήμα 1.16

Από την καμπύλη διάρκειας εξαγονται συμπεράσματα για την επικρατούσα μέση ένταση ανέμου μιας περιοχής (Καλδέλλης, 1999).

Ετήσια Καμπύλη Συχνότητας

Η καμπύλη συχνότητας ταχύτητας ανέμου προκύπτει από την καμπύλη διάρκειας ανέμου, αν αντί για αριθμό μετρήσεων ταχυτήτων καταγράφονται τα ποσοστά του χρόνου εμφάνισης μιας τιμής ανέμου στο έτος (σχήμα 1.17).



Σχήμα 1.17

(Καλδέλλης, 1999)

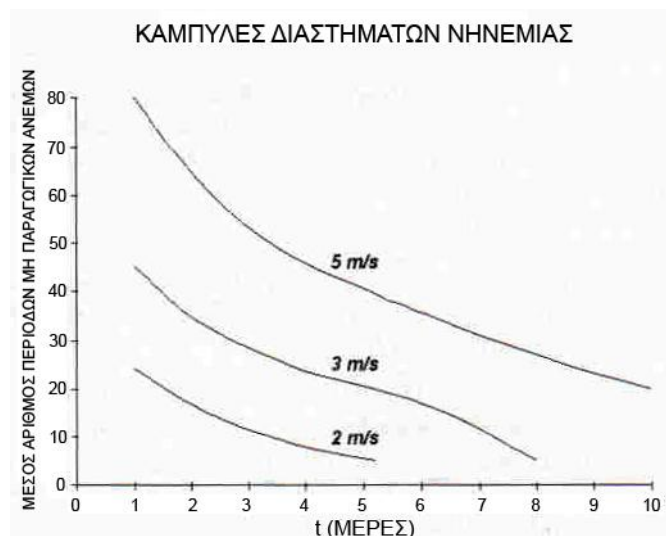
Μέγιστη Ταχύτητα Ανέμου

Στην ανάλυση του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής, η μέγιστες ταχύτητες ανέμου πρέπει να λαμβάνονται υπόψη διότι από αυτές εξαρτάται η αντοχή του όλου συστήματος των ανεμογεννητριών. Στη στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων της έντασης του ανέμου υπολογίζουμε συνήθως της μέγιστες ωριαίες τιμές έντασης ανέμου. Κάθε εγκατάσταση ανεμογεννήτριας έχει ένα μέγιστο αριθμό έντασης ανέμου στο οποίο αντέχει. Αυτό ορίζεται από τον κατασκευαστή καθώς επίσης και ο μέγιστος αριθμός μέγιστων εντάσεων που μπορεί να αντέξει η κατασκευή. Έτσι γνωρίζοντας την μέγιστη ένταση ανέμου που μπορεί να αντέξει μια ανεμογεννήτρια, τον αριθμό των φορών που επιτρέπεται να ξεπερνιέται αυτή η ένταση στον χρόνο και τον αριθμό των μέγιστων εντάσεων σε μια περιοχή εκτιμάται το αν μπορεί να εγκατασταθεί μια αιολική μηχανή στην συγκεκριμένη περιοχή (Burton κ.α., 2001).

Καμπύλες Νηνεμίας

Η μελέτη των συχνών περιόδων, ωρών ή ημερών, στις οποίες υπάρχουν μικρές ταχύτητες ανέμου ή μηδενικές παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον διότι καθορίζει το χρόνο όπου μια εγκατάσταση δεν παρέχει ενέργεια. Στις περιόδους αυτές πρέπει να προβλέπεται η τροφοδότηση της εγκατάστασης με ενέργεια από άλλες πηγές όπως είναι το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο, αυτόνομες εφεδρικές πηγές ενέργειας (γεννήτριες κλπ), αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια σε διάφορες μορφές.

Η κατασκευή των καμπύλων νηνεμίας γίνεται με τη δημιουργία γραφημάτων όπου τοποθετούμε στον άξονα Χ το πλήθος των ωρών ή ημερών στις οποίες παρατηρούμε μία συγκεκριμένη τιμή ταχύτητας ανέμου και στον άξονα Υ τη συχνότητα εμφάνισης των περιόδων αυτών (σχήμα 1.18).

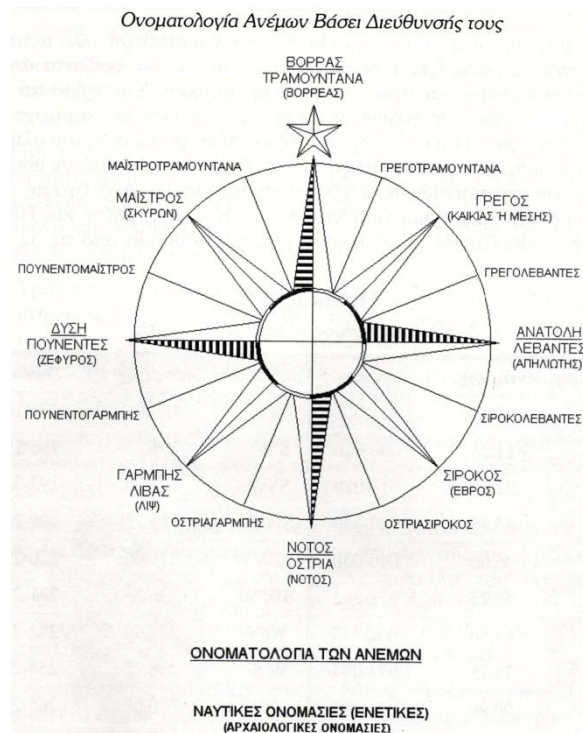


Σχήμα 1.18

(Καλδέλλης, 1999)

Διεύθυνση Ανέμου

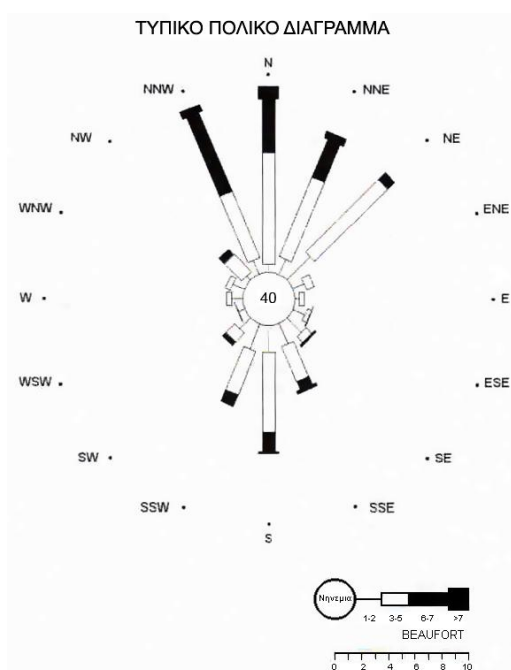
Η διεύθυνση του ανέμου, η οποία είναι μέγεθος που μεταβάλλεται συνεχώς, καθορίζεται με βάση το σημείο του ορίζοντα από το οποίο πνέει ο άνεμος σε σχέση με το σημείο μέτρησης (σχήμα 1.19).



Σχήμα 1.19

Η διεύθυνση του ανέμου είναι συνάρτηση του Βορρά και μετράται κατά την φορά των δεικτών του ρολογιού σε μοίρες. Ανάλογα με την επιθυμητή ακρίβεια χρησιμοποιούνται 8, 16 ή 32 τομείς ανέμου (σχήμα 1.19).

Με βάση τις παρατηρήσεις της διεύθυνσης του ανέμου χαράζεται το πολικό διάγραμμα ή ρόδο ανέμου. Σ' αυτό καταγράφονται η συχνότητες, το ποσοστό επί τοις εκατό των παρατηρήσεων συγκεκριμένων τιμών εντάσεως ανέμου στο σύνολο των παρατηρήσεων, κατά διεύθυνση (σχήμα 2.5). Στο ίδιο διάγραμμα είναι δυνατή και η αποτύπωση της μέσης τιμής ταχύτητας ανέμου για κάθε διεύθυνση ανέμου. Επίσης στο κέντρο του διαγράμματος είναι δυνατή η αποτύπωση του ποσοστού νηνεμίας (σχήμα 1.20).



Σχήμα 1.20

Στην εκτίμηση του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής, σαν κύρια διεύθυνση χαρακτηρίζεται η διεύθυνση εκείνη που συνεισφέρει τουλάχιστον το 10% στη συνολική διαθέσιμη αιολική ενέργεια. Επικρατούσα διεύθυνση ανέμου είναι εκείνη που έχει την μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης σε μια περιοχή. Η επικρατούσα διεύθυνση συνήθως μεταβάλλεται με την αλλαγή των εποχών.

Η περιοχή ανάμεσα στο σημείο εγκατάσταση μιας ανεμογεννήτριας και του σημείου από το οποίο πνέει συνήθως ο άνεμος ονομάζεται προσήνεμη περιοχή. Υπήνεμη περιοχή ονομάζεται αυτή η οποία είναι συνήθως προστατευμένη από ανέμους και είναι συχνά η αντίθετη της προσήνεμης (Καλδέλλης, Καββαδίας ,2001).

Στατιστικές Αναλύσεις Ανέμου

Η στατιστικές αναλύσεις του ανέμου χρησιμοποιούνται για να αναλύσουν το αιολικό δυναμικό μιας περιοχής και να εκτιμήσουν την ενεργειακή του παραγωγή. Αν για μια περιοχή υπάρχει εκτεταμένος όγκος δεδομένων για τον άνεμο δεν υπάρχει ανάγκη στατιστικής πρόβλεψης, με διάφορες μεθόδους, των χαρακτηριστικών του ανέμου. Αν όμως υπάρχουν ελάχιστα δεδομένα (μόνο μέση τιμή ανέμου) ή δεδομένα μιας περιοχής και χρειάζεται η εξαγωγή συμπερασμάτων για άλλη περιοχή, τότε η χρήση τέτοιων μεθόδων είναι αναγκαία.

Η στατιστική ανάλυση των ταχυτήτων του ανέμου, βασίζεται στην εξίσωση πυκνότητας πιθανότητας ανέμου $p(U)$. Δηλαδή η ταχύτητα του ανέμου παίρνει μια τιμή ανάμεσα στην U_a και U_b σύμφωνα με την σχέση:

$$p(U_a \leq U \leq U_b) = \int_{U_a}^{U_b} p(U) dU$$

Οπότε και η συνολική πιθανότητα δίνεται από την σχέση:

$$\int_0^{\infty} p(U) dU = 1$$

Εάν είναι γνωστή η πυκνότητα πιθανότητας ανέμου $p(U)$ τότε η μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου δίνεται από την σχέση:

$$\bar{U} = \int_0^{\infty} U p(U) dU$$

Και η τυπική απόκλιση της ταχύτητας του ανέμου δίδεται από τη σχέση:

$$\sigma_U = \sqrt{\int_0^{\infty} (U - \bar{U})^2 p(U) dU}$$

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας στη στατιστική ανάλυση των δεδομένων είναι η συνάρτηση ολικής πιθανότητας κατανομής του ανέμου. Η συνάρτηση ολικής πιθανότητας είναι η πιθανότητα η ταχύτητα του ανέμου να είναι μικρότερη ή ίση με μία προκαθορισμένη τιμή ταχύτητας. Δηλαδή αν $F(U)$ η πιθανότητα, U' η προκαθορισμένη τιμή ανέμου τότε :

$$F(U) = \int_0^{\infty} p(U') dU'$$

Στα παραπάνω στηρίζονται οι δύο συνήθεις στατιστικές αναλύσεις που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση αιολικού δυναμικού και οι οποίες είναι η κατανομή Rayleigh και η κατανομή Weibull (Manwell, McGowan, Rogers, 2002).

Κατανομή RAYLEIGH

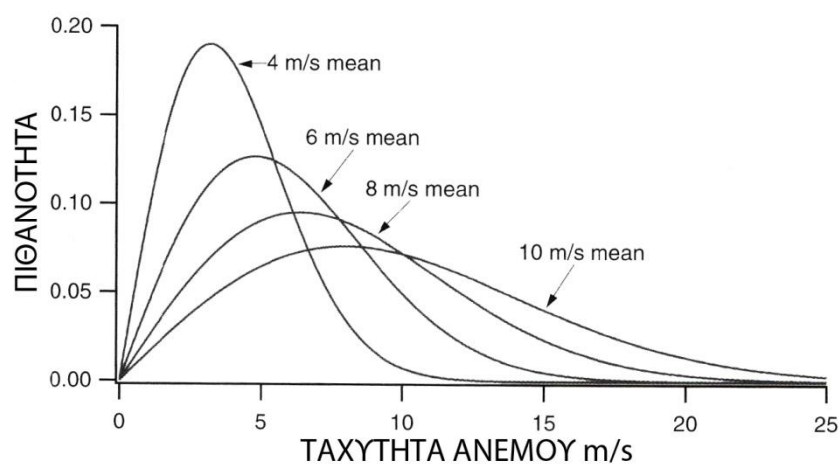
Στη κατανομή Rayleigh, για τον υπολογισμό της πυκνότητας πιθανότητας ανέμου και την ολική πιθανότητα, είναι αρκετή η γνώση μόνο της μέσης τιμής ανέμου. Έτσι τα παραπάνω δίδονται από :

$$p(U) = \frac{\pi}{2} \left(\frac{U}{\bar{U}} \right) \exp \left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{U}{\bar{U}} \right)^2 \right]$$

Και :

$$F(U) = 1 - \exp \left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{U}{\bar{U}} \right)^2 \right]$$

Στο σχήμα 1.21 φαίνεται η πυκνότητα πιθανότητας ανέμου για διάφορους μέσους όρους ταχύτητας ανέμου σύμφωνα με την κατανομή Rayleigh.



Σχήμα 1.21

(Manwell, McGowan, Rogers, 2002)

Κατανομή WEIBULL

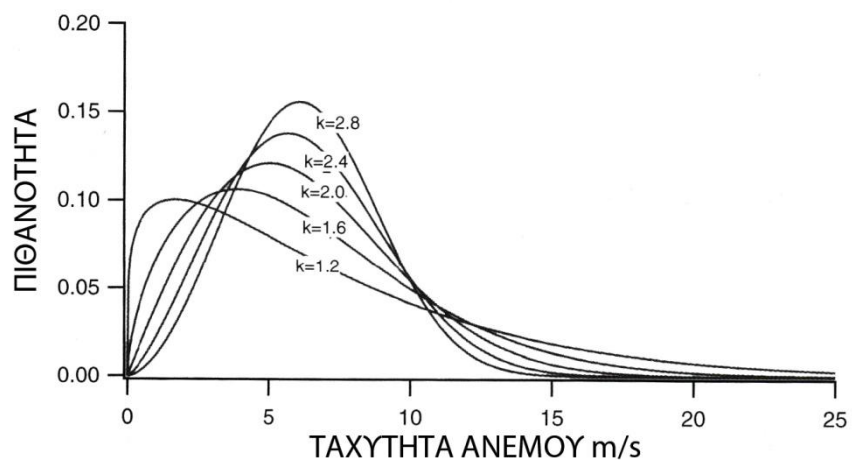
Για να χρησιμοποιηθεί η κατανομή Weibull πρέπει να είναι γνωστές δύο παράμετροι, οι k και c . Και οι δύο αυτές παράμετροι παίρνουν τιμές συναρτήσει της μέσης ταχύτητας ανέμου \bar{U} και της τυπικής απόκλισης σ . Αναλύοντας με την κατανομή Weibull έχουμε :

$$p(U) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{U}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{U}{c}\right)^k\right]$$

Και :

$$F(U) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{U}{c}\right)^k\right]$$

Στο σχήμα 1.22 παρουσιάζεται η κατανομή Weibull για διάφορες τιμές της παραμέτρου k .



Σχήμα 1.22

Από την εξίσωση της κατανομής Weibull είναι δυνατόν να υπολογιστεί η μέση τιμή ανέμου :

$$\bar{U} = c\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$$

Όπου Γ η συνάρτηση «γάμα» : $\Gamma(x) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{x-1} dt$

Επίσης στην κατανομή Weibull η τυπική απόκλιση υπολογίζεται από τη σχέση :

$$\sigma_U^2 = \bar{U}^2 \left[\frac{\Gamma(1 + 2/k)}{\Gamma^2(1 + 1/k)} - 1 \right]$$

Για τον υπολογισμό των παραμέτρων k και c υπάρχουν διάφορες μέθοδοι :

1) Εμπειρικά υπολογίζεται ότι : $k = \left(\frac{\sigma_U}{\bar{U}}\right)^{-1,086}$ οπότε λύνοντας την

εξίσωση για την μέση τιμή ταχύτητας ανέμου ως προς c έχουμε :

$$c = \frac{\bar{U}}{\Gamma(1 + 1/k)}$$

2) Επίσης εμπειρικά βρίσκοντας το k από την εξίσωση κατανομής Weibull υπολογίζεται η παράμετρος c από την σχέση :

$$\frac{c}{U} = (0,568 + 0,433/k)^{-1}$$

3) Τέλος ο υπολογισμός των παραμέτρων k και c γίνεται και με γράφημα σε λογαριθμικό χαρτί. Στο λογαριθμικό χαρτί κατασκευάζεται γράφημα με την ταχύτητα U του ανέμου στον άξονα X και την ολική πιθανότητα $F(U)$ στον άξονα Y και ενώνονται με ευθεία γραμμή τα σημεία. Η κλίση της γραμμής αυτής μας δίνει την τιμή της παραμέτρου k . Τραβώντας μία κάθετη γραμμή από το σημείο τομής της οριζόντιας γραμμής $F(U)=0,632$ με την γραμμή του γραφήματος, στον άξονα X υπολογίζεται η τιμή της παραμέτρου c .

Η τυπική απόκλιση, στην κατανομή Weibull, υπολογίζεται από την σχέση :

$$\sigma_U^2 = c^2 [\Gamma(1 + 2/k) - \Gamma^2(1 + 1/k)] = \bar{U}^2 \left[\frac{\Gamma(1 + 2/k)}{\Gamma^2(1 + 1/k)} - 1 \right]$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι η κατανομή Reyleigh είναι ειδική περίπτωση της κατανομής Weibull. Αν στην κατανομή Weibull η παράμετρος k είναι $k=2$ τότε η κατανομή Weibull είναι ίση με την κατανομή Reyleigh. Οπότε σε περιπτώσεις που $k=2$ χρησιμοποιείται η κατανομή Reyleigh διότι έχει πολύ λιγότερους υπολογισμούς (Manwell, McGowan, Rogers, 2002) .

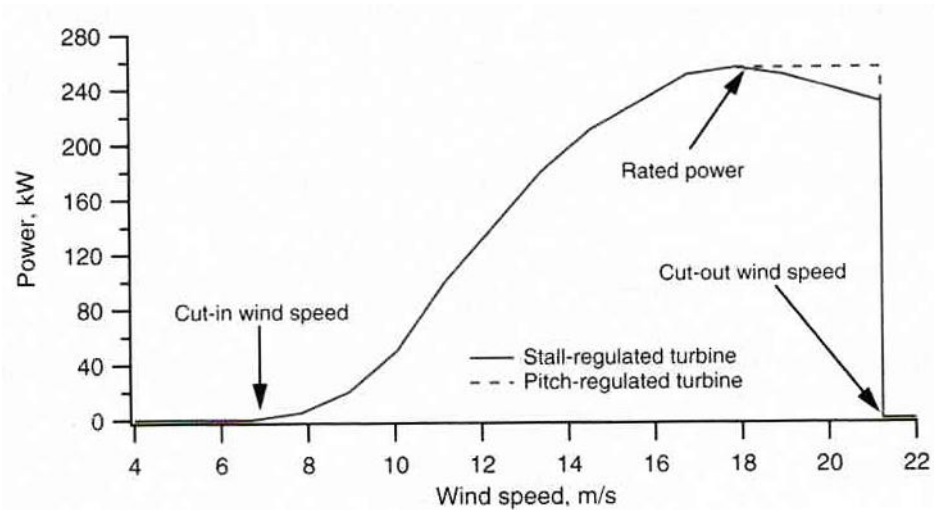
1.9 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ

Ισχύς Ανέμου-Ανεμογεννήτριας

Η ισχύς του ανέμου, όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, δίδεται από την σχέση $P=(1/2)\rho AU^3$. Η ισχύς που αποδίδει μια ανεμογεννήτρια δίδεται από την καμπύλη ισχύος της. Η καμπύλη ισχύος είναι ένα γράφημα ταχύτητας ανέμου και ισχύος στο οποίο φαίνεται :

- Η ταχύτητα έναρξης, ταχύτητα στην οποία η ανεμογεννήτρια ξεκινά να παράγει ενέργεια.
- Η ονομαστική ταχύτητα, ταχύτητα στην οποία η ανεμογεννήτρια παράγει το μέγιστο της ισχύος της.
- Η ταχύτητα παύσης ή εξόδου, ταχύτητα στην οποία η ανεμογεννήτρια σταματά να παράγει ενέργεια.

Μια τυπική καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 1.23).



Σχήμα 1.23

(Manwell, McGowan, Rogers, 2002)

Παραγωγή Ενέργειας Ανεμογεννήτριας

Για μια δεδομένη πυκνότητα πιθανότητας ανέμου $p(U)$ και με γνωστή καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας, η μέση παραγόμενη ενέργεια της μηχανής \bar{P}_w δίνεται από την σχέση:

$$\bar{P}_w = \int_0^{\infty} P_w(U) p(U) dU$$

Η ισχύς $P_w(U)$ που αποδίδει μια ανεμογεννήτρια δίδεται από την σχέση:

$$P_w(U) = \frac{1}{2} \rho A C_p \eta U^3$$

Όπου C_p η σταθερά ισχύος ή συντελεστής ισχύος και η ο βαθμός απόδοσης της ανεμογεννήτριας.

Η σταθερά ισχύος C_p δίδεται από την σχέση :

$$C_p = \frac{P_{rotor}}{\frac{1}{2} \rho A U^3}$$

Όπου P_{rotor} η θεωρητική ισχύς που αποδίδεται από μια τέλεια ανεμογεννήτρια. Ο Betz υπολόγισε τη σχέση αυτή και απέδειξε ότι ο συντελεστής ισχύος μπορεί να λάβει τη μέγιστη τιμή $C_p=16/27=0.592$. Η τιμή αυτή ονομάζεται όριο του Betz.

Η σταθερά ισχύος C_p έχει αποδειχτεί ότι εξαρτάται από τον λόγο της ταχύτητας του άκρου της έλικας ανεμογεννήτριας προς την ταχύτητα του ανέμου που συμβολίζεται με λ και δίδεται από την σχέση:

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

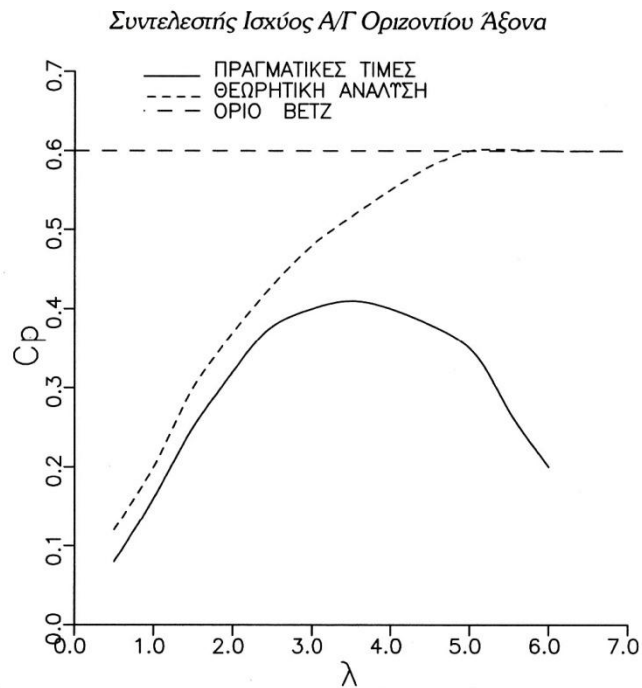
Όπου :

ω = η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα της ανεμογεννήτριας

R = η ακτίνα του δρομέα

U = η ταχύτητα του ανέμου

Για κάθε ανεμογεννήτρια υπάρχει ένα διάγραμμα C_p - λ που δίνει πολύτιμες πληροφορίες για την απόδοση της ανεμομηχανής (σχήμα 1.24).



Σχήμα 1.24

Η πραγματική ισχύς που παράγεται από μία ανεμογεννήτρια δίδεται από την σχέση:

$$P_w(U) = \frac{1}{2} C_p \eta_m \eta_e A \rho U^3$$

Όπου η_m ο μηχανικός βαθμός απόδοσης της ανεμογεννήτριας και η_e ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης. Πρακτικά και για γρήγορους υπολογισμούς θεωρείται $C_p=0.4$ και $\eta_m = \eta_e = 0.9$ (Καλδέλλης, 1999).

Ιδανική Παραγωγή Ανεμογεννήτριας

Η μέση παραγωγή ενέργειας για ένα χρόνο που εξάγεται από μία ιδανική ανεμογεννήτρια υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την κατανομή Rayleigh. Επίσης γίνονται και οι εξής παραδοχές:

- Ιδανική ανεμογεννήτρια είναι αυτή που δεν έχει απώλειες μηχανικές και ηλεκτρικές, και παράγει την μέγιστη δυνατή ενέργεια με C_p δηλαδή ίσο με 16/27.
- Η πιθανότητα ταχύτητας ανέμου δίνεται από την κατανομή Rayleigh.

Έτσι η μέση ισχύς της ανεμογεννήτριας δίδεται από:

$$\overline{P}_w = \frac{1}{2} \rho A \eta \int_0^{\infty} C_p(\lambda) U^3 \left\{ \frac{2U}{U_c^2} \exp \left[- \left(\frac{U}{U_c} \right)^2 \right] \right\} dU$$

$$\text{Όπου } U_c = 2\overline{U} / \sqrt{\pi} .$$

Για ιδανική ανεμογεννήτρια όπου $\eta=1$ και $C_p=16/27$ η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$\overline{P}_w = \frac{1}{2} \rho A U_c^3 C_{p, \text{Betz}} \int_0^{\infty} \left(\frac{U}{U_c} \right)^3 \left\{ \frac{2U}{U_c} \exp \left[- \left(\frac{U}{U_c} \right)^2 \right] \right\} dU / U_c$$

Λύνοντας την παραπάνω εξίσωση έχουμε:

$$\overline{P}_w = \frac{1}{2} \rho A U_c^3 (16/27) (3/4) \sqrt{\pi}$$

Από την οποία εξάγεται η μέση παραγόμενη ισχύς ιδανικής ανεμογεννήτριας (Manwell, McGowan, Rogers, 2002).

Υπολογισμός Παραγωγής Κανονικής Ανεμογεννήτριας

Η γενική μορφή της εξίσωσης παραγωγής ισχύος είναι:

$$\overline{P}_w = \int_0^{\infty} P_w(U) p(U) dU$$

Η οποία με την βοήθεια της :

$$F(U) = \int_0^U p(U') dU'$$

Γράφεται :

$$\overline{P}_w = \int_0^{\infty} P_w(U) dF(U)$$

Στην κατανομή Weibull η F(U) δίδεται από :

$$F(U) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{U}{c} \right)^k \right]$$

Έτσι αντικαθιστώντας το ολοκλήρωμα στην $\overline{P}_w = \int_0^{\infty} P_w(U) dF(U)$ με ένα άθροισμα N_B ομάδων η μέση παραγόμενη ισχύς υπολογίζεται από την σχέση:

$$\overline{P}_w = \sum_{j=1}^{N_B} \left\{ \exp \left[- \left(\frac{U_{j-1}}{c} \right)^k \right] - \exp \left[- \left(\frac{U_j}{c} \right)^k \right] \right\} P_w \left(\frac{U_{j-1} + U_j}{2} \right)$$

(Manwell, McGowan, Rogers, 2002)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ

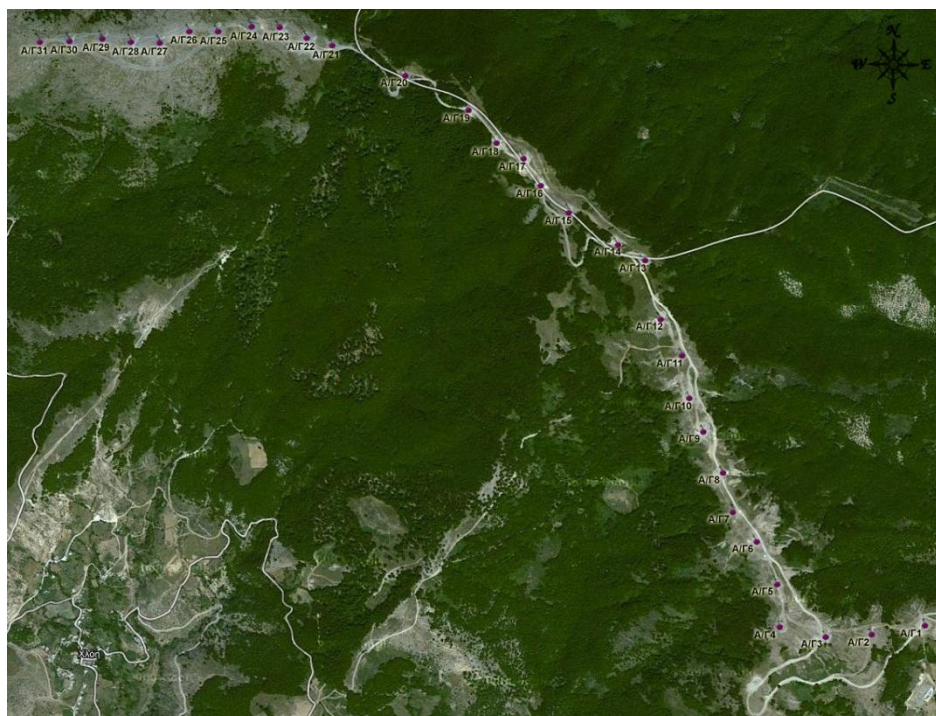
Το παρόν κεφάλαιο πραγματεύεται την ανάλυση του αιολικού δυναμικού στην περιοχή εγκατάστασης του αιολικού πάρκου «ΠΑΤΡΙΑΡΧΗΣ» της εταιρίας «ΡΟΚΑΣ ΑΙΟΛΙΚΗ ΘΡΑΚΗ Α.Β.Ε.Ε.», θυγατρική της «ΡΟΚΑΣ Α.Ε.». Καταγράφονται όλα τα στάδια επεξεργασίας των δεδομένων όπως και η μεθοδολογία που ακολουθείται.

Αιολικό Πάρκο «ΠΑΤΡΙΑΡΧΗΣ»

Το αιολικό πάρκο «ΠΑΤΡΙΑΡΧΗΣ» ανήκει στην εταιρία «ΡΟΚΑΣ ΑΙΟΛΙΚΗ ΘΡΑΚΗ Α.Β.Ε.Ε.», θυγατρική της «ΡΟΚΑΣ Α.Ε.». Βρίσκεται 67 Km από την Κομοτηνή στο ύψωμα «Πατριάρχης» σε υψόμετρο 1200 m κοντά στην Ελληνοβουλγαρική μεθόριο (χάρτης 1). Αποτελείται από 31 ανεμογεννήτριες τύπου BONUS 1,3 MW, οι οποίες είναι τοποθετημένες σε κορυφογραμμή και σε απόσταση 180 m η μία από την άλλη (χάρτης 2).



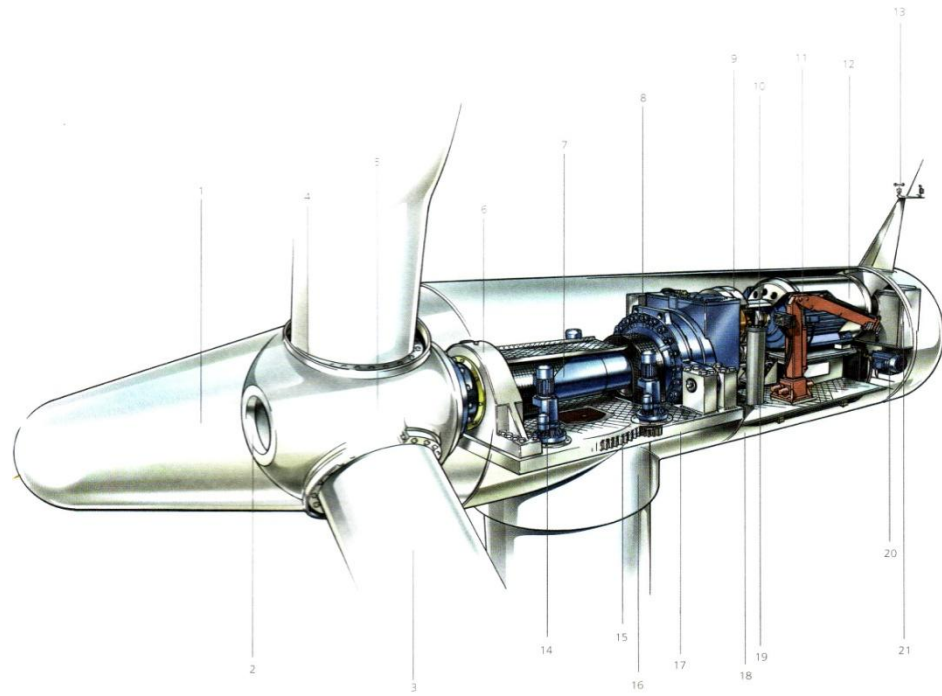
Χάρτης 1



Χάρτης 2

Ανεμογεννήτρια BONUS 1,3 MW

Οι ανεμογεννήτριες BONUS 1,3 MW (σχήμα 2.1), είναι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα, με τρία πτερύγια. Η ονομαστική τους ισχύς είναι 1,3 MW και φέρουν ασύγχρονη γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος. Το ύψος τους, από την βάση στο κέντρο του άξονα των πτερυγίων, είναι 49 m και το μήκος των πτερυγίων είναι 30 m. Η ταχύτητα έναρξης της ανεμογεννήτριας είναι 4 m/sec, η ταχύτητα ονομαστικής ισχύος είναι 13-14 m/sec και η ταχύτητα διακοπής της είναι 25 m/sec. Τα πτερύγια της είναι μεταβλητής καμπυλότητας, και ο προσανατολισμός της σε σχέση με τον άνεμο γίνεται αυτόματα. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται με δίκτυο σε υποσταθμό, από όπου παρέχεται στο δίκτυο της Δ.Ε.Η. και μέσω αυτού στους καταναλωτές. Οι λειτουργίες των ανεμογεννητριών ελέγχονται με έναν κεντρικό Υ/Η, στον οποίο αποθηκεύονται όλα τα στοιχεία που είναι απαραίτητα για τον σωστό τεχνικό έλεγχο κάθε γεννήτριας.



NACELLE ARRANGEMENT

- | | |
|--------------------|----------------------------|
| 1. Spinner | 13. Meteorological sensors |
| 2. Spinner bracket | 14. Yaw gear |
| 3. Blade | 15. Yaw ring |
| 4. Pitch bearing | 16. Tower |
| 5. Rotor hub | 17. Nacelle bedplate |
| 6. Main bearing | 18. Canopy |
| 7. Main shaft | 19. Oil filter |
| 8. Gearbox | 20. Generator fan |
| 9. Brake disc | 21. Oil cooler |
| 10. Coupling | |
| 11. Service crane | |
| 12. Generator | |

Σχήμα 2.1

Δεδομένα

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν, για την ανάλυση του αιολικού δυναμικού και της ενεργειακής παραγωγής, είναι καταγεγραμμένα σε βάση δεδομένων της Access. Η καταγραφή γίνεται αυτόματα στον κεντρικό υπολογιστή του αιολικού πάρκου με την βοήθεια του προγράμματος WIND POWER SUPERVISOR. Τα δεδομένα τα οποία καταγράφονται είναι πολλά και αφορούν στοιχεία τόσο του περιβάλλοντος της κάθε ανεμογεννήτριας όσο και στοιχεία που αφορούν στη λειτουργία του κάθε ηλεκτρικού ή μηχανικού μέρους της. Ενδεικτικά παρατίθενται τα εξής:

Ισχύς (μέγιστη, ελάχιστη, μέση)

Ταχύτητα ανέμου (μέγιστη, ελάχιστη, μέση)

Χρόνος καταγραφής (ακριβής ώρα, ημερομηνία)

Διεύθυνση ανέμου

Θερμοκρασία

Το σύνολο των δεδομένων που καταγράφονται από το πρόγραμμα παρατίθενται αναλυτικά στον πίνακα 1 του παραρτήματος 1.

Η καταγραφή όλων αυτών των δεδομένων πραγματοποιείται ανά δέκα λεπτά και για κάθε ανεμογεννήτρια ξεχωριστά. Επιπλέον πραγματοποιείται και καταγραφή του συνόλου της ενεργειακής παραγωγής του αιολικού πάρκου στον υποσταθμό μέσω του οποίου γίνεται η σύνδεση του πάρκου με το δίκτυο της Δ.Ε.Η.

Για την επεξεργασία τους, τα δεδομένα εξήχθησαν από την Access στο πρόγραμμα στατιστικής ανάλυσης SPSS. Με τη βοήθεια του προγράμματος δημιουργήθηκε βάση δεδομένων με τα στοιχεία εκείνα που είναι απαραίτητα για την ανάλυση του αιολικού δυναμικού και της ενεργειακής παραγωγής. Τα δεδομένα στο SPSS είναι χωρισμένα με δύο τρόπους.

Ο πρώτος τρόπος διαχωρισμού των δεδομένων είναι αυτός που έγινε συναρτήσει του μήνα καταγραφής (παράρτημα 2, φάκελος SPSSdata, φάκελος spssmonth, αρχεία) και ο δεύτερος είναι αυτός που έγινε συναρτήσει του αριθμού της ανεμογεννήτριας (παράρτημα 2, φάκελος SPSSdata, φάκελος spssgen, αρχεία).

Τα δεδομένα που περιέχονται στα αρχεία SPSS και χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα ανάλυση είναι:

- Χρόνος καταγραφής
- Αριθμός ανεμογεννήτριας
- Ταχύτητα ανέμου (μέγιστη, ελάχιστη, μέση)
- Ισχύς (μέγιστη, ελάχιστη, μέση)
- Διεύθυνση ανέμου

2.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

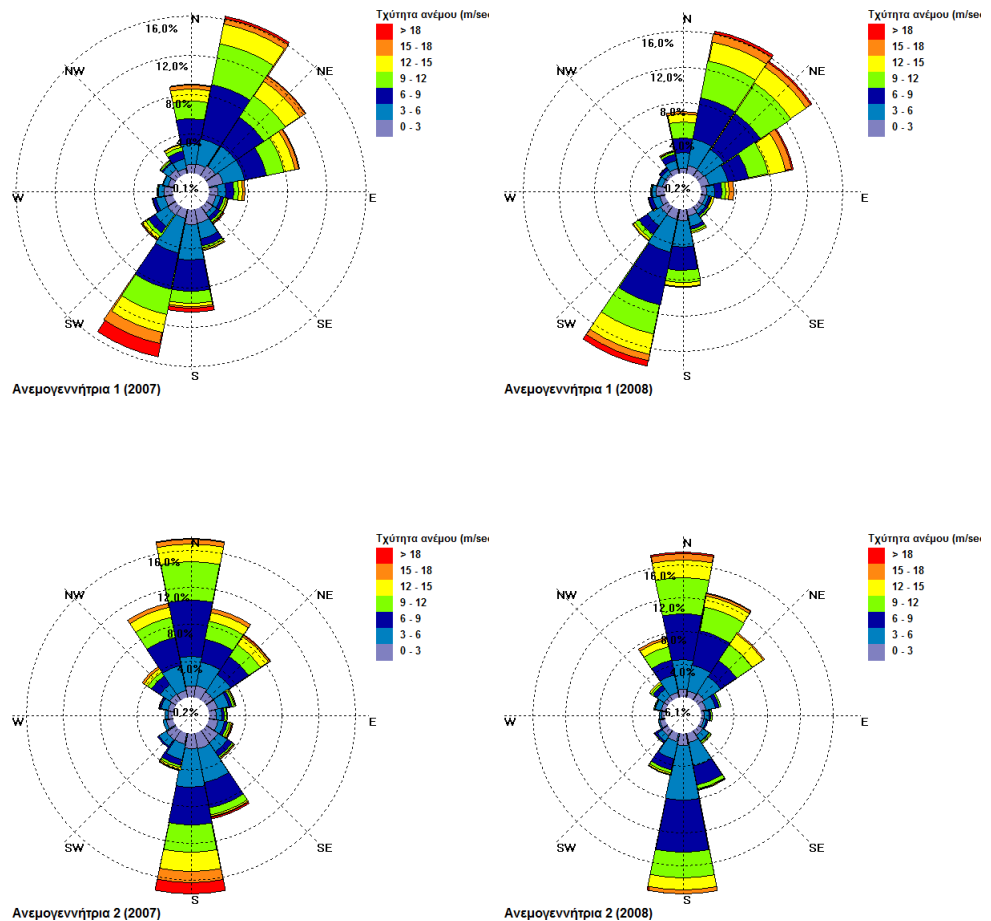
Για την ακριβή εκτίμηση του αιολικού δυναμικού της περιοχής έγινε μια σειρά από υπολογισμούς που αφορούν:

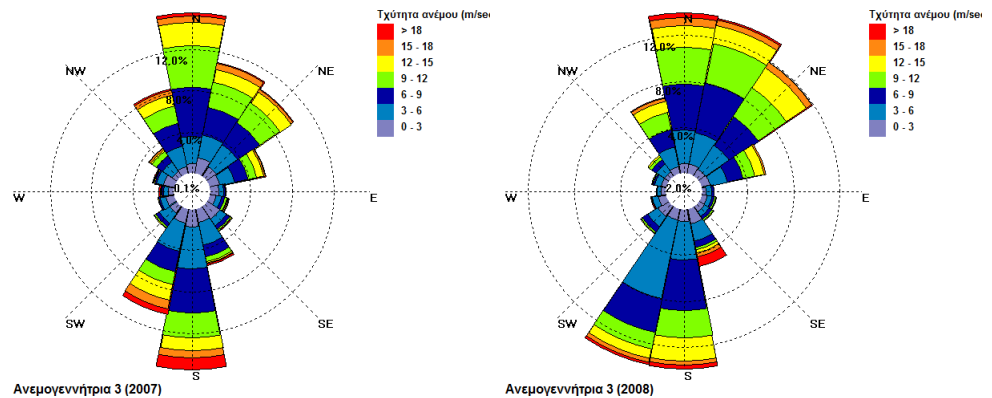
- Στη διεύθυνση του ανέμου
- Στις μέσες τιμές του ανέμου (ωριαίες, μηνιαίες)
- Στις συχνότητες εμφάνισης ανέμων

Διεύθυνση Ανέμου

Για την ανάλυση των διευθύνσεων του ανέμου, δημιουργήθηκαν ρόδα ανέμου για κάθε ανεμογεννήτρια ξεχωριστά. Τα ρόδα ανέμου δημιουργήθηκαν με την βοήθεια του ειδικού προγράμματος WindRosePRO. Το πρόγραμμα αυτό αναλύει δεδομένα τα οποία είναι αποθηκευμένα σε μορφή Excel, οπότε και δημιουργήθηκε μια βάση δεδομένων σε Excel περιέχοντας τη μέση ταχύτητα ανέμου και τη διεύθυνση (παράρτημα 2, φάκελος Exceldata, φάκελος ανεμογεννήτρια, αρχεία w1,...,w31).

Παρακάτω φαίνονται για παράδειγμα τα ρόδα ανέμου για τις ανεμογεννήτριες 1, 2 και 3 για τις χρονιές 2007 και 2008 που εξήχθησαν με την βοήθεια του WindRosePRO (σχήμα 2.2).





Σχήμα 2.2

Στα ρόδα ανέμου που εξάγονται από το WindRosePRO σημειώνονται:

- Τα διαστήματα ταχυτήτων ανέμου, τα χρωματισμένα τετραγωνίδια πάνω δεξιά του διαγράμματος
- Η νηνεμία, ο μικρός κύκλος στο κέντρο του διαγράμματος που αναγράφει και το επί τοις εκατό ποσοστό του συνολικού χρόνου νηνεμίας
- Οι διευθύνσεις ανέμου, στο εξωτερικό του μεγαλύτερου κύκλου του διαγράμματος
- Τα επί τοις εκατό ποσοστά εμφάνισης ανέμου ανά διεύθυνση, τα αναγεγραμμένα ποσοστά στο εξωτερικό κάθε κύκλου του διαγράμματος

Τα ρόδα ανέμου όλων των ανεμογεννητριών παρατίθενται στο παράρτημα 1.

Στον παρακάτω πίνακα (πίνακας 2.1) σημειώνονται τα συμπεράσματα για τις κύριες και επικρατούσες διευθύνσεις καθώς και το ποσοστό νηνεμίας που καταγράφηκε για κάθε ανεμογεννήτρια του πάρκου.

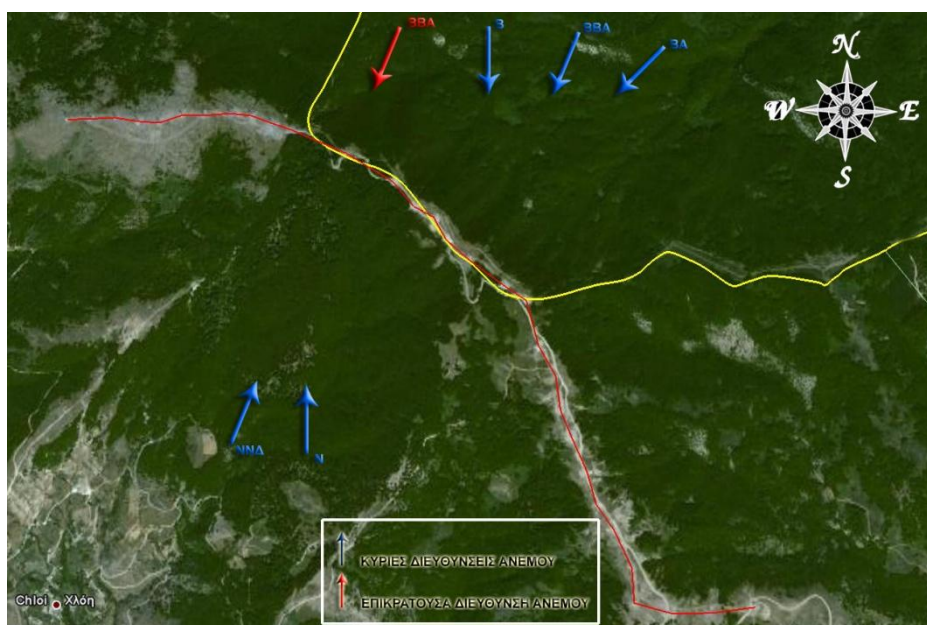
Πίνακας 2.1

Ανεμογεννήτρια 1	2007	2008
Επικρατούσα διεύθυνση	BBA	BBA
Κύριες διευθύνσεις	B/BBA/BA/ABA/N/NNΔ	BBA/BA/ABA/N/NNΔ
Νηνεμία	0,1%	0,2%
Ανεμογεννήτρια 2		
Επικρατούσα διεύθυνση	N	N
Κύριες διευθύνσεις	BBΔ/B/BBA/BA/NNA/N	B/BBA/BA/N
Νηνεμία	0,2%	6,1%
Ανεμογεννήτρια 3		
Επικρατούσα διεύθυνση	N	B
Κύριες διευθύνσεις	B/BBA/BA/N/NNΔ	B/BBA/BA/N/NNΔ
Νηνεμία	0,1%	2%
Ανεμογεννήτρια 4		
Επικρατούσα διεύθυνση	BBA	B
Κύριες διευθύνσεις	B/BBA/BA/NNΔ/ΝΔ	B/BBA/BA/N/NNΔ
Νηνεμία	0,1%	0,2%
Ανεμογεννήτρια 5		
Επικρατούσα διεύθυνση	NNΔ	NNΔ
Κύριες διευθύνσεις	B/BBA/BA/N/NNΔ	B/BBA/BA/N/NNΔ
Νηνεμία	0,1%	0,3%
Ανεμογεννήτρια 6		
Επικρατούσα διεύθυνση	NNΔ	NNA
Κύριες διευθύνσεις	BBΔ/B/BBA/NNA/N	BBΔ/B/BBA/NNA/N
Νηνεμία	0,1%	0,3%
Ανεμογεννήτρια 7		
Επικρατούσα διεύθυνση	N	NNΔ
Κύριες διευθύνσεις	BBΔ/B/BBA/BA/N/NNΔ	B/BBA/BA/N/NNΔ
Νηνεμία	0,1%	0,3%
Ανεμογεννήτρια 8		
Επικρατούσα διεύθυνση	N	N
Κύριες διευθύνσεις	BBΔ/B/BBA/BA/N/NNΔ	B/BBA/BA/N/NNΔ
Νηνεμία	0,1%	0,2%
Ανεμογεννήτρια 9		
Επικρατούσα διεύθυνση	ΔΒΔ	NNΔ
Κύριες διευθύνσεις	A/NA/ΔΒΔ	B/BBA/BA/NNΔ
Νηνεμία	0,2%	0,2%
Ανεμογεννήτρια 10	2007	2008
Επικρατούσα διεύθυνση	NNΔ	BA
Κύριες διευθύνσεις	B/BA/ABA/NNΔ/ΝΔ	BBA/BA/NNΔ
Νηνεμία	0,1%	0,8%
Ανεμογεννήτρια 11		

Επικρατούσα διεύθυνση	BA	BA
Κύριες διευθύνσεις	BA/NNΔ	BA/NNΔ
Νηνεμία	0,1%	0,6%
Ανεμογεννήτρια 12		
Επικρατούσα διεύθυνση	BA	BA
Κύριες διευθύνσεις	BA/ABA/ΝΔ	BA/NNΔ/ΝΔ
Νηνεμία	0,1%	0,2%
Ανεμογεννήτρια 13		
Επικρατούσα διεύθυνση	BA	BA
Κύριες διευθύνσεις	BBA/BA/NNΔ	BBA/BA/NNΔ/ΝΔ
Νηνεμία	1,6%	0,2%
Ανεμογεννήτρια 14		
Επικρατούσα διεύθυνση	BA	BA
Κύριες διευθύνσεις	BBA/BA/ΝΔ	BBA/BA/ΝΔ
Νηνεμία	0,1%	0,1%
Ανεμογεννήτρια 15		
Επικρατούσα διεύθυνση	NNΔ	BA
Κύριες διευθύνσεις	B/BBA/NNΔ	BBA/BA/NNΔ
Νηνεμία	4,7%	0,2%
Ανεμογεννήτρια 16		
Επικρατούσα διεύθυνση	BBA	BBA
Κύριες διευθύνσεις	BBA/BA/NNΔ/ΝΔ	BBA/BA/NNΔ/ΝΔ
Νηνεμία	0,1%	0,2%
Ανεμογεννήτρια 17		
Επικρατούσα διεύθυνση	ΝΔ	ΝΔ
Κύριες διευθύνσεις	BBA/BA/ΝΔ	BBA/BA/ΝΔ
Νηνεμία	0,6%	0,2%
Ανεμογεννήτρια 18		
Επικρατούσα διεύθυνση	BA	ΔΝΔ
Κύριες διευθύνσεις	BA/ABA/ΔΝΔ/Δ	BA/ABA/ΔΝΔ/Δ
Νηνεμία	0,1%	0,3%
Ανεμογεννήτρια 19	2007	2008
Επικρατούσα διεύθυνση	BBA	BBA
Κύριες διευθύνσεις	BBA/BA/ΝΔ	BBA/ΝΔ
Νηνεμία	0,1%	0,2%
Ανεμογεννήτρια 20		
Επικρατούσα διεύθυνση	BA	BA
Κύριες διευθύνσεις	BBA/BA	B/BA/NNΔ/ΝΔ
Νηνεμία	0,1%	3,3%
Ανεμογεννήτρια 21		
Επικρατούσα διεύθυνση	BBA	BBA
Κύριες διευθύνσεις	BBA/ΝΔ	BBA/BA/ΝΔ
Νηνεμία	0,1%	0,2%

Ανεμογεννήτρια 22		
Επικρατούσα διεύθυνση	BBA	BBA
Κύριες διευθύνσεις	B/BBA/ΝΔ	B/BBA/BA/ΝΔ
Νηνεμία	0,1%	0,2%
Ανεμογεννήτρια 23		
Επικρατούσα διεύθυνση	BBA	BBA
Κύριες διευθύνσεις	B/BBA/BA/ΝΔ/ΝΝΔ	BBA/BA/ΝΔ/ΔΝΔ
Νηνεμία	0,1%	0,5%
Ανεμογεννήτρια 24		
Επικρατούσα διεύθυνση	BBA	BBA
Κύριες διευθύνσεις	BBA/BA/ΝΔ/ΔΝΔ	BBA/BA/ΝΔ/ΔΝΔ
Νηνεμία	0,1%	2,4%
Ανεμογεννήτρια 25		
Επικρατούσα διεύθυνση	B	B
Κύριες διευθύνσεις	B/BBA/ΝΝΔ/ΝΔ	ΒΔ/Β/ΝΝΔ
Νηνεμία	0,2%	0,4%
Ανεμογεννήτρια 26		
Επικρατούσα διεύθυνση	BA	BBA
Κύριες διευθύνσεις	BBA/BA/ABA/ΔΝΔ/Δ	B/BBA/BA/Δ
Νηνεμία	0,1%	5,8%
Ανεμογεννήτρια 27		
Επικρατούσα διεύθυνση	BBA	BBA
Κύριες διευθύνσεις	B/BBA/BA/ΝΔ/ΔΝΔ	BBA/BA/ΝΔ/ΔΝΔ
Νηνεμία	0,1%	0,4%
Ανεμογεννήτρια 28	2007	2008
Επικρατούσα διεύθυνση	BA	BA
Κύριες διευθύνσεις	BA/ABA/Δ	BA/ABA/Δ
Νηνεμία	0,1%	0,3%
Ανεμογεννήτρια 29		
Επικρατούσα διεύθυνση	BBA	BBA
Κύριες διευθύνσεις	B/BBA/BA	BBA/BA/ΔΝΔ/Δ
Νηνεμία	0,1%	0,3%
Ανεμογεννήτρια 30		
Επικρατούσα διεύθυνση	BBA	BBA
Κύριες διευθύνσεις	B/BBA	B/BBA/ΔΝΔ
Νηνεμία	0,1%	0,3%
Ανεμογεννήτρια 31		
Επικρατούσα διεύθυνση	BBA	BBA
Κύριες διευθύνσεις	B/BBA	B/BBA
Νηνεμία	0,1%	0,4%

Από την επεξεργασία των ρόδων ανέμου, εξάγεται το συμπέρασμα ότι η επικρατούσα διεύθυνση ανέμου στην περιοχή του αιολικού πάρκου είναι η BBA, ενώ οι κύριες διευθύνσεις (διαθέσιμη αιολική ενέργεια $\geq 10\%$) είναι οι B, BBA, BA, N και NNA. Στον χάρτη 3 φαίνονται οι κύριες διευθύνσεις ανέμου στην περιοχή του αιολικού πάρκου όπως επίσης και η επικρατούσα διεύθυνση.



Χάρτης 3

Με την βοήθεια του WindRosePRO δημιουργήθηκαν και πίνακες σε Excel, οι οποίοι περιέχουν στοιχεία που δείχνουν των αριθμό και το ποσοστό εμφάνισης ανέμου ανά διεύθυνση καθώς και τη μέση ταχύτητα ανέμου ανά διεύθυνση.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης του WindRosePro παρατίθενται στο παράρτημα 2, φάκελος Exceldata, φάκελος ανεμογεννήτρια WINDTURBINE, αρχεία w1(2007) και w1(2008).....w31(2007) και w31(2008).

Μέση Τιμή

Οι μέσες ωριαίες και μηνιαίες τιμές ανέμου υπολογίστηκαν με βάση τα δεδομένα που καταγράφηκαν από τα ανεμόμετρα που είναι εγκατεστημένα στις ανεμογεννήτριες. Δεν χρειάστηκε να γίνει αναγωγή αυτών σε συγκεκριμένο ύψος, γιατί τα όργανα μέτρησης βρίσκονται στα 50 m ακριβώς πάνω από το έδαφος, στο ύψος δηλαδή που είναι εγκατεστημένες οι ανεμογεννήτριες.

Η επεξεργασία των δεδομένων έγινε με την βοήθεια του προγράμματος SPSS 17. Για το σκοπό αυτό τα δεδομένα που ήταν αποθηκευμένα σε αρχεία ACCESS (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2, Accessdata) μετατράπηκαν σε αρχεία SPSS (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2, spssdata, spssgen και spssmonth). Με την επεξεργασία των δεδομένων προέκυψαν οι μέσες μηνιαίες και μέσες ωριαίες ταχύτητες ανέμου. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στο παράρτημα 1 στην παράγραφο 3, πίνακας μέσων μηνιαίων ταχυτήτων.

Ποιότητα Αιολικού Δυναμικού

Χρησιμοποιώντας τις μέσες μηνιαίες τιμές εξαγάγαμε συμπεράσματα για την ποιότητα του αιολικού δυναμικού της περιοχής. Με την βοήθεια της παρακάτω εξίσωσης:

$$\bar{P}/A = \frac{1}{2} \rho \bar{V}^3 K_e$$

υπολογίζεται το \bar{P}/A .

Για την περιοχή του πάρκου σύμφωνα με τα δεδομένα υπολογίζεται (παράρτημα 1, παράγραφος 4, υπολογισμοί \bar{P}/A) ότι :

$$\rho = 1,225 \text{ Kg/m}^3$$

$$\bar{V}^3 = 7,61 \text{ m/sec}$$

$$K_e = 2,31$$

Οπότε και υπολογίζεται:

$$\bar{P}/A = 625,54$$

Σύμφωνα με τον πίνακα 2.2 το αιολικό δυναμικό της περιοχής του αιολικού πάρκου είναι από πολύ καλό έως εξαιρετικό.

Φτωχό	$\bar{P}/A < 100$ W/m ²
Καλό	$\bar{P}/A \approx 400$ W/m ²
Εξαιρετικό	$\bar{P}/A > 700$ W/m ²

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.2

Οι μέσες τιμές στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ενεργειακής παραγωγής.

(Manwell, McGowan, Rogers, 2002).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής είναι, όπως διευκρινίζεται και στην εισαγωγή, η σύγκριση της αναμενόμενης ενεργειακής παραγωγής με την πραγματική ενεργειακή παραγωγή. Η αναμενόμενη ενεργειακή παραγωγή υπολογίζεται με βάση τις μέσες καταγεγραμμένες τιμές ταχυτήτων ενώ η πραγματική ενεργειακή παραγωγή προκύπτει απευθείας από τις καταγεγραμμένες τιμές ισχύος που αποδίδει το αιολικό πάρκο στο δίκτυο της Δ.Ε.Η.

3.1 ΑΝΑΜΕΝΟΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ

Ο υπολογισμός της μέσης ενεργειακής παραγωγής πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια της παρακάτω εξίσωσης :

$$E = \delta T \Delta \omega N_0$$

όπου **E** η ενεργειακή παραγωγή σε kWh, **ω** ο μέσος συντελεστής ισχύος της εγκατάστασης, **Δ** η τεχνική διαθεσιμότητα της εγκατάστασης, **N_0** η ονομαστική ισχύς της ανεμογεννήτριας της εγκατάστασης και **δT** το χρονικό διάστημα για το οποίο υπολογίστηκε ο μέσος συντελεστής ισχύος (Καλδέλης, Καββαδίας, 2005).

Μέσος συντελεστής ισχύος

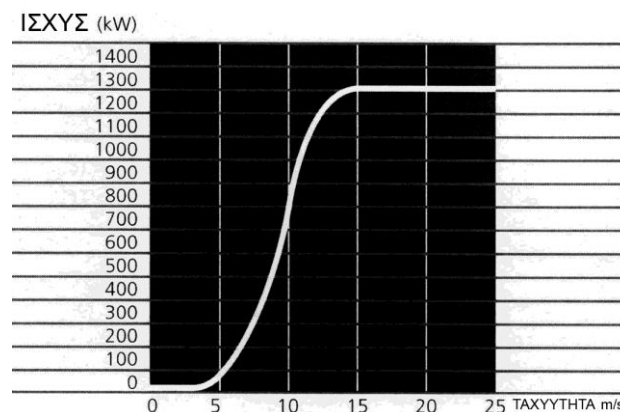
Για τον υπολογισμό του μέσου συντελεστή ισχύος υπολογίστηκε η πυκνότητα πιθανότητας εμφάνισης ταχυτήτων ανέμου $f(v)$ και στη συνέχεια με μέθοδο αριθμητικής ολοκλήρωσης υπολογίστηκε το ω για κάθε ανεμογεννήτρια ξεχωριστά.

Για κάθε ανεμογεννήτρια δημιουργήθηκε ο παρακάτω πίνακας:

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1

Ταχύτητα m/sec (Α)	Ισχύς N/N _ο (Β)	Πυκνότητα Πιθανότητας (Γ)	(Β)Χ(Γ)
,5	0	0,001662445	0
1,5	0	0,059927169	0
2,5	0	0,084725301	0
3,5	0	0,072850697	0
4,5	0,03	0,088653816	0,00266
5,5	0,05	0,087545519	0,004377
6,5	0,104	0,09443279	0,009821
7,5	0,181	0,085417986	0,015461
8,5	0,281	0,079935877	0,022462
9,5	0,412	0,070119538	0,028889
10,5	0,596	0,060966197	0,036336
11,5	0,721	0,048121833	0,034696
12,5	0,835	0,044450602	0,037116
13,5	0,943	0,035218097	0,033211
14,5	1	0,02555019	0,02555
15,5	1	0,018791561	0,018792
16,5	1	0,013596422	0,013596
17,5	1	0,008599193	0,008599
18,5	1	0,005957093	0,005957
19,5	1	0,005007125	0,005007
20,5	1	0,003225934	0,003226
21,5	1	0,00215722	0,002157
22,5	1	0,001147878	0,001148
23,5	1	0,000831222	0,000831
24,5	1	0,00039582	0,000396

Για τη δημιουργία του παραπάνω πίνακα ταξινομήθηκαν τα δεδομένα με βάση την ταχύτητα ανέμου και χωρίστηκαν σε κλάσεις για να δημιουργηθούν τα διαστήματα ταχυτήτων. Τα διαστήματα έχουν εύρος 1 m/sec έτσι ώστε να συμπίπτουν αριθμητικά το ποσοστό εμφάνισης ταχύτητας ανέμου με την πυκνότητα πιθανότητας. Στην πρώτη στήλη του πίνακα εμφανίζεται η ταχύτητα αναφοράς για το διάστημα ταχύτητας. Δηλαδή για το διάστημα ταχύτητας 0-1 m/sec η ταχύτητα αναφοράς είναι 0,5 m/sec και ούτω καθεξής. Στη δεύτερη στήλη σημειώνεται η αδιάστατη ισχύς της ανεμογεννήτριας, η ισχύς δηλαδή που αποδίδει η ανεμογεννήτρια σε συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου διαιρεμένη με την ονομαστική ισχύ της. Η αδιάστατη ισχύς προκύπτει από την καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας που συνήθως δίδεται από τον κατασκευαστή. Η καμπύλη ισχύος για την BONUS 1.3 φαίνεται στο σχήμα 3.1. Στην τρίτη στήλη του πίνακα σημειώνεται η πυκνότητα πιθανότητας εμφάνισης ανέμου. Για τον υπολογισμό της πυκνότητας πιθανότητας, υπολογίστηκε αρχικά



Σχήμα 3.1 Καμπύλη ισχύος BONUS 1.3 MW

με την βοήθεια του SPSS η συχνότητα εμφάνισης ανέμου σε συγκεκριμένα διαστήματα, όπως φαίνεται στα αρχεία του φακέλου SPSS GEN/spssarote2, του παραστήματος 2. Έτσι από τα αρχεία SPSS ανά ανεμογεννήτρια προέκυψαν τα αρχεία excel W1, W2 ...W31 στον φάκελο

exceldata, φάκελος Πυκνότητα πιθανότητας- Ωμέγα του παραρτήματος 2. Εκεί υπολογίστηκε και η πυκνότητα πιθανότητας. Στην συνέχεια υπολογίστηκε το ω με αριθμητική ολοκλήρωση όπως φαίνεται στα παραπάνω αρχεία του παραρτήματος 2. Το ω κάθε ανεμογεννήτριας παρουσιάζεται στον πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2

Ανεμογεννήτρια	ω
1	0,311974918
2	0,256115217
3	0,29867546
4	0,323739915
5	0,316705057
6	0,357839239
7	0,291726518
8	0,275775974
9	0,277998138
10	0,314811753
11	0,26500866
12	0,294345841
13	0,297315214
14	0,297315214
15	0,286785935
16	0,320473935
17	0,323299859
18	0,292336594
19	0,274745993
20	0,295142908
21	0,29447554
22	0,293148134
23	0,368268863
24	0,307896536
25	0,31559197
26	0,347488225
27	0,323335369
28	0,345329652
29	0,277491989
30	0,217486672
31	0,539761083

Αφού υπολογίστηκε ο μέσος συντελεστής ισχύος κάθε ανεμογεννήτριας, υπολογίστηκε η αναμενόμενη ενεργειακή παραγωγή του πάρκου.

Τεχνική διαθεσιμότητα

Συνήθως στα σύγχρονα αιολικά πάρκα η τεχνική διαθεσιμότητα βρίσκεται κοντά στο 0,95. Στους υπολογισμούς μας για το αιολικό πάρκο ΠΑΤΡΙΑΡΧΗΣ εκλάβαμε το Δ με 0,94.

Τα N_0 και δT για τον υπολογισμό της αναμενόμενης ενεργειακής παραγωγής είναι 1300 και 17520 (στοιχεία δύο ετών) αντίστοιχα. Έτσι, όπως φαίνεται και στο παράρτημα1/παράγραφος 5, η αναμενόμενη ενεργειακή παράγωγη για το αιολικό πάρκο ΠΑΤΡΙΑΡΧΗΣ είναι :

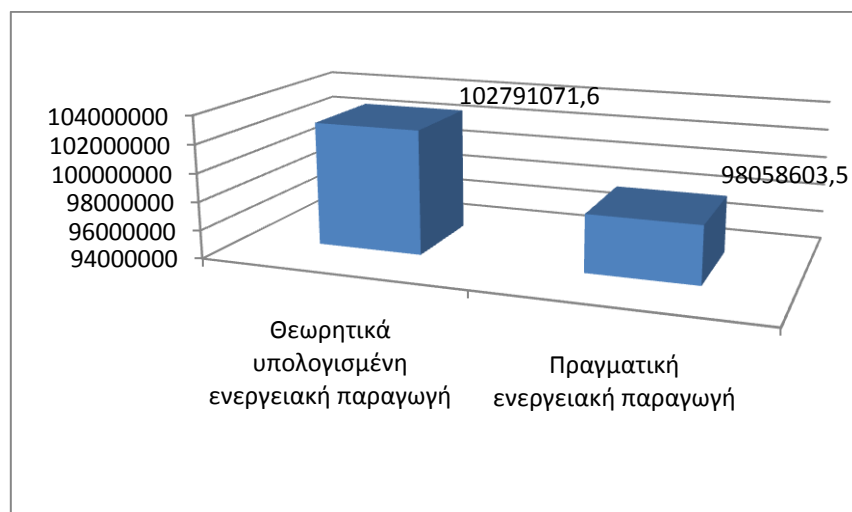
102791071,55 kWh ανά έτος

3.2 ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ

Η πραγματική ενεργειακή παραγωγή του πάρκου είναι καταγεγραμμένη από το πρόγραμμα WIND POWER SUPERVISOR. Από τα αρχεία της ACCESS των δεδομένων στο παράρτημα 2 (accessdata) εξήχθησαν τα στοιχεία για την ενεργειακή παραγωγή (tbl scientific, energy) σε μορφή Excel (παράρτημα 2,exceldata, φάκελος ενεργειακή παραγωγή, πραγματική, αρχεία 2007 και 2008).Με τον τρόπο αυτό υπολογίστηκε η πραγματική ενεργειακή παραγωγή του αιολικού πάρκου και είναι ίση με:

98058603,5 kWh ανά έτος

Στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 3.1) παρουσιάζονται η πραγματική και η θεωρητικά υπολογισμένη ενεργειακή παραγωγή για ένα έτος.



Σχήμα 3.1

Από τα αποτελέσματα παρατηρείται ότι υπάρχει μια απόκλιση της τάξεως του 4,6% μεταξύ της πραγματικής ενεργειακής παραγωγής και της θεωρητικά υπολογισμένης ενεργειακής παραγωγής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ποιότητα αιολικού δυναμικού

Η ποιότητα του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής υπολογίζεται με βάση την αιολική ενέργεια ανα επιφάνεια σύμφωνα με την σχέση :

$$\bar{P}/A = \frac{1}{2} \rho \bar{V}^3 K_e$$

(Manwell, McGowan, Rogers, 2002).

Στο αιολικό πάρκο «ΠΑΤΡΙΑΡΧΗΣ» υπολογίστηκε ότι το \bar{P}/A είναι ίσο με 625,24 W/m² οπότε και το αιολικό δυναμικό της περιοχής είναι εξαιρετικό αν λάβουμε υπ όψιν τον παρακάτω πίνακα :

Φτωχό	$\bar{P}/A < 100$ W/m ²
Καλό	$\bar{P}/A \approx 400$ W/m ²
Εξαιρετικό	$\bar{P}/A > 700$ W/m ²

(Manwell, McGowan, Rogers, 2002)

Σύγκριση εκτιμώμενης και πραγματικής παραγόμενης ενέργειας

Η εκτιμώμενη ενεργειακή παραγωγή υπολογίστηκε με την μέθοδο της στατιστικής ανάλυσης. Από πλήθος καταγεγραμμένων μετρήσεων ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου με την βοήθεια της σχέσης :

$$E = \delta T \Delta \omega N_0$$

υπολογίστηκε ότι η ανά χρόνο παραγόμενη ενέργεια του αιολικού πάρκου θα ανέρχεται στις περίπου 102.000 MWh.

Η καταγεγραμμένη, για την περίοδο που συλλέχθηκαν τα δεδομένα, ενεργειακή παραγωγή του αιολικού πάρκου ήταν περίπου 98.000 MWh.

Η εκτίμηση της παραγόμενης ενέργειας που επιτεύχθηκε, σύμφωνα με την βιβλιογραφία (+/- 20%), είναι πολύ ακριβής.

Η ακριβής αυτή πρόβλεψη οφείλεται:

- Στο εξαιρετικά μεγάλο πλήθος δεδομένων
- Στο ότι δεν χρειάστηκε να γίνει αναγωγή των μετρήσεων στο ύψος τοποθέτησης της ανεμογεννήτριας, διότι τα δεδομένα συλλέχθηκαν από ύψος ίσο με αυτό των ανεμογεννητριών.
- Στο ότι δεν χρησιμοποιήθηκε κανένα μοντέλο πρόβλεψης ανέμου, οπότε και δεν εμπεριέχεται σφάλμα πρόβλεψης.

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε με σκοπό την ανάλυση του αιολικού δυναμικού και της ενεργειακής παραγωγής του αιολικού πάρκου ΠΑΤΡΙΑΡΧΗΣ που βρίσκεται στην περιοχή της Κομοτηνής. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία, τα οποία συγκεντρώθηκαν κατά την λειτουργία του αιολικού πάρκου τα έτη 2007 και 2008. Τα δεδομένα επεξεργάστηκαν με τη βοήθεια στατιστικού προγράμματος και άλλων βοηθητικών προγραμμάτων.

Πέρα από τη στατιστική ανάλυση των δεδομένων, έγινε μια προσπάθεια θεωρητικής προσέγγισης του θέματος στην οποία εξετάστηκαν θέματα όπως τα χαρακτηριστικά του ανέμου, η διαθέσιμη ισχύς του ανέμου, η ποιότητα του αιολικού δυναμικού και η επεξεργασία του αιολικού δυναμικού. Η θεωρητική αυτή προσέγγιση του θέματος βασίστηκε σε βιβλία τα οποία αναφέρονται στην βιβλιογραφία και σε σημειώσεις οι οποίες συγκεντρώθηκαν κατά την διάρκεια των σπουδών μου στο τμήμα Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος του ΤΕΙ Κρήτης παράρτημα Χανίων.

Μέσα από τη θεωρητική προσέγγισή και τη στατιστική ανάλυση που πραγματοποιήθηκαν προέκυψαν σημαντικά συμπεράσματα για τη συλλογή και επεξεργασία ανεμολογικών δεδομένων όπως επίσης και για την ηλεκτρονική παρακολούθηση της λειτουργίας ενός αιολικού πάρκου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins, Ervin Bossanyi, 2001, Wind Energy Handbook, John Wiley & Sons Ltd, Chippenham Wiltshire
2. J.F. Manwell, J.G. McGowan, A.L. Rogers, 2002, Wind Energy Explained Theory, Design and Application, John Wiley & Sons Ltd, Chippenham Wiltshire
3. Ιωάννης Κλεάνθη Καλδέλλης, 1999, Διαχείριση της αιολικής ενέργειας, Εκδόσεις Αθάν. Σταμούλης, Αθήνα
4. Ιωάννης Κλεάνθη Καλδέλλης, Κοσμάς Α. Καββαδίας, 2005, Υπολογιστικές εφαρμογές ήπιων μορφών ενέργειας, Εκδόσεις Σταμούλη Α.Ε., Αθήνα
5. Ιωάννης Κλεάνθη Καλδέλλης, Κοσμάς Α. Καββαδίας, 2001, Εργαστηριακές εφαρμογές ήπιων μορφών ενέργειας, Εκδόσεις Σταμούλη Α.Ε., Αθήνα

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

Στο παρόν παράρτημα παρατίθενται τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των δεδομένων του παραρτήματος 2. Στην πτυχιακή εργασία αναφέρεται η θέση των αποτελεσμάτων της επεξεργασίας με την μορφή παραπομπής για το παρόν παράρτημα.

ΠΑΡΑΓΡΑΦΟΣ 1

Στον παρακάτω πίνακα (πίνακας 1) αναφέρονται τα δεδομένα που καταχωρούνται στην βάση δεδομένων του αιολικού πάρκου και αποθηκεύονται σε αρχεία Access. Τα αρχεία με όλα τα δεδομένα βρίσκονται στο παράστημα 2 στον φάκελο Accessdata. Κάθε αρχείο του φακέλου περιέχει τα παρακάτω δεδομένα στον πίνακα tbl Turbine Scientific.

Πίνακας 1

Ονομασία δεδομένων		Μονάδες
ActivePowerMax	Μέγιστη Ισχύς	kW
ActivePowerMean	Μέση Ισχύς	kW
NacelleWindSpeedMax	Μέγιστη Ταχύτητα Ανέμου	m/sec
NacelleWindSpeedMean	Μέση Ταχύτητα Ανέμου	m/sec
NacelleWindSpeedMin	Ελάχιστη Ταχύτητα Ανέμου	m/sec
NacelleWindSpeedSD	Τυπική απόκλιση ταχύτητας	m/sec
OutageTimeCommanded	Εκτός Λειτουργίας Λόγω Εντολής	min
OutageTimeEnvironmental	Εκτός Λειτουργίας Λόγω περιβάλλοντος	min
OutageTimeGridErr	Εκτός Λειτουργίας Λόγω Δικτύου	min
OutageTimeTurbineErr	Εκτός Λειτουργίας Λόγω Γεννήτριας	min
PilotStatus	Πιλοτική κατάσταση	
PitchPosAmax	Μέγιστη Θέση φτερού Α	μοίρες
PitchPosAMean	Μέση Θέση φτερού Α	μοίρες
PitchPosAMin	Ελάχιστη Θέση φτερού Α	μοίρες
PitchPosASD	Τυπική απόκλιση θέσεως φτερού Α	μοίρες
PitchPosBMax	Μέγιστη θέση φτερού Β	μοίρες
PitchPosBMean	Μέση θέση φτερού Β	μοίρες
PitchPosBMin	Ελάχιστη θέση φτερού Β	μοίρες
PitchPosBSD	Τυπική απόκλιση θέσεως φτερού Β	μοίρες
PitchPosCMax	Μέγιστη θέση φτερού Γ	μοίρες
PitchPosCMean	Μέση θέση φτερού Γ	μοίρες
PitchPosCMin	Ελάχιστη θέση φτερού Γ	μοίρες
PitchPosCSD	Τυπική απόκλιση θέσεως φτερού Γ	μοίρες

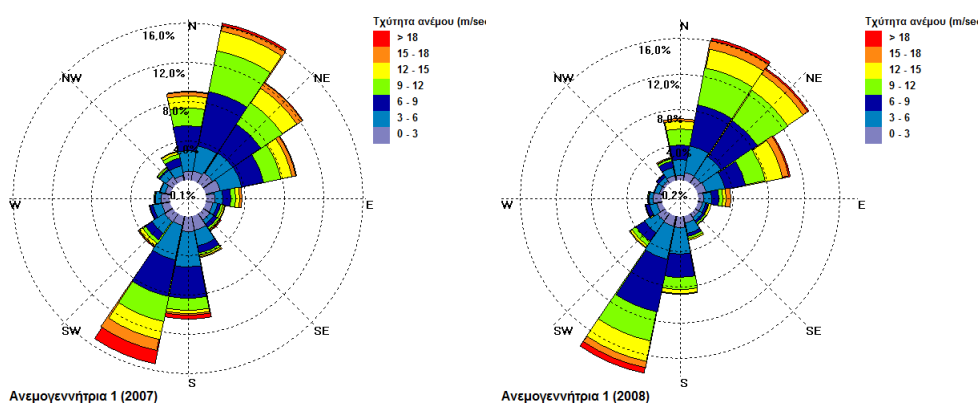
PitchPreMax	Μέγιστη πίεση λαδιού κίνησης φτερού	
PitchPresMean	Μέση πίεση λαδιού κίνησης φτερού	
PitchPresMin	Ελάχιστη πίεση λαδιού κίνησης φτερού	
PitchPresSD	Τυπική απόκλιση πιέσεως	
PitchRefMax	Μέγιστη περιστροφή αναφοράς	
PitchRefMean	Μέση περιστροφή αναφοράς	
PitchRefMin	Ελάχιστη περιστροφή αναφοράς	
PitchRefSD	Τυπική απόκλιση περιστροφής	
ReActivePowerMax	Μέγιστη άεργος ισχύς	kW
ReActivePowerMean	Μέση άεργος ισχύς	kW
ReActivePowerMin	Ελάχιστη άεργος ισχύς	kW
ReActivePowerSD	Τυπική απόκλιση άεργου ισχύος	kW
ReActivePowerSetpoint	Ρύθμιση άεργου ισχύος	
ShaftSpeedMax	Μέγιστη ταχύτητα άξονα	rpm
ShaftSpeedMean	Μέση ταχύτητα άξονα	rpm
ShaftSpeedMin	Ελάχιστη ταχύτητα άξονα	rpm
ShaftSpeedSD	Τυπική απόκλιση ταχύτητας άξονα	rpm
SpeedStatus	Κατάσταση ταχύτητας	Κωδικός
StartsAttempted	Ενάρξεις	
StartsCompleted	Ολοκληρωμένες ενάρξεις	
StartsGenerator	Ενάρξεις γεννήτριας	
StartStatus	Κατάσταση έναρξης	
StopErrorCode	Κωδικός λάθους σταματήματος	Κωδικός
StopsComanded	Σταμάτημα με εντολή	
StopsEnvironpental	Σταμάτημα από περιβάλλον	
StopsGriddError	Σταμάτημα λόγω λάθους δικτύου	Κωδικός
StopsNoise		
StopsTurbineErr	Σταμάτημα λόγω λάθους ανεμογεννήτριας	Κωδικός
TimeNotRealOperate	Μη πραγματικός χρόνος λειτουργίας	min
TimeOperateWindLlimit	Χρόνος λειτουργίας στα όρια ανέμου	min
TimeRealOperate	Πραγματικός χρόνος λειτουργίας	min
TimeStamp	Χρόνος	
TopTemp1	Θερμοκρασία	C°
TopTemp2	Θερμοκρασία	C°
TopTemp3	Θερμοκρασία	C°
TopTemp4	Θερμοκρασία	C°
TopTemp5	Θερμοκρασία	C°
TopTemp6	Θερμοκρασία	C°
TopTemp7	Θερμοκρασία	C°
TopTemp8	Θερμοκρασία	C°
TopTemp9	Θερμοκρασία	C°
TopTemp10	Θερμοκρασία	C°
TopTemp11	Θερμοκρασία	C°
TopTemp12	Θερμοκρασία	C°
TopTemp 13	Θερμοκρασία	C°
TopTemp14	Θερμοκρασία	C°
TopTemp15	Θερμοκρασία	C°
TopTemp16	Θερμοκρασία	C°
TransitionHighToLow	Μετάβαση υψηλή προς χαμηλή	
TransitionLowToHigh	Μετάβαση χαμηλή προς υψηλή	
Turbine	Ανεμογεννήτρια	Αριθμός
UnwindOperations	Λειτουργία χωρίς άνεμο	
UnwindStatus	Κατάσταση χωρίς άνεμο	
VoltageMax	Μέγιστη τάση	Volt
VoltageMean	Μέση τάση	Volt
VoltageMin	Ελάχιστη τάση	Volt
VoltageSD	Τυπική απόκλιση τάσεως	Volt
WPSStatus		
YawOperations	Λειτουργία Yaw	Κωδικός
YawStatus	Κατάσταση Yaw	Κωδικός
ActivePowerMin	Ελάχιστη ισχύς	kW
ActivePowerSD	Τυπική απόκλιση ισχύος	kW
ActivePowerSetpoint	Ρύθμιση ισχύος	kW
BottomTemp1	Θερμοκρασία	C°
BottomTemp2	Θερμοκρασία	C°
BottomTemp3	Θερμοκρασία	C°
BottomTemp4	Θερμοκρασία	C°
BrakeOperations	Λειτουργία φρένων	Κωδικός
BrakeStatus	Κατάσταση φρένων	Κωδικός
CurrentMax	Μέγιστη ένταση	A

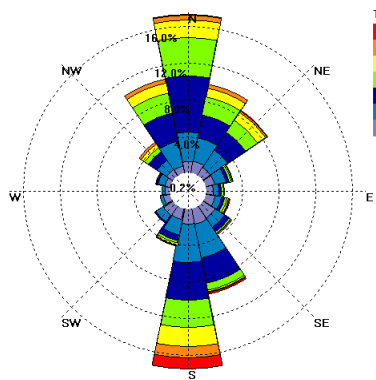
CurrentMean	Μέση ένταση	A
CurrentMin	Ελάχιστη ένταση	A
CurrentSD	Τυπική απόκλιση έντασης	A
CurtailedPower		
DataOK		Κωδικός
Energy	Ενέργεια	kWh
GearTemp	Θερμοκρασία	C°
GenTemp	Θερμοκρασία	C°
HSB1Temp	Θερμοκρασία	C°
HSB2Temp	Θερμοκρασία	C°
NacelleOrientationMax	Μέγιστη θέση προσανατολισμού	Μοίρες
NacelleOrientationMean	Μέση θέση προσανατολισμού	Μοίρες
NacelleOrientationMin	Ελάχιστη θέση προσανατολισμού	Μοίρες
NacelleOrientationSD	Τυπική απόκλιση θέσεως προσανατολισμού	Μοίρες

Στον παραπάνω πίνακα (πίνακας 1) στη στήλη μονάδες, αναφέρονται οι μονάδες μέτρησης των στοιχείων που συλλέγονται από το πρόγραμμα ή ο κωδικός κατάστασης ο οποίος δείχνει την κατάσταση λειτουργίας συγκεκριμένου τμήματος της ανεμογεννήτριας.

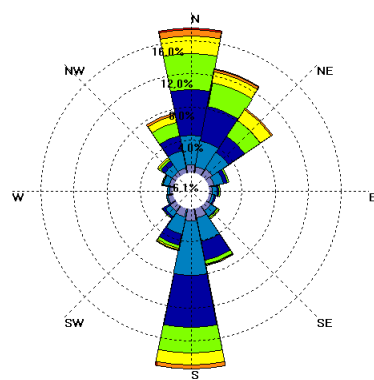
ΠΑΡΑΓΡΑΦΟΣ 2

Στη συνέχεια παρατίθενται τα ρόδα ανέμου για κάθε ανεμογεννήτρια ανά έτος μελέτης (2007, 2008), τα οποία δημιουργήθηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος WindRosePro.

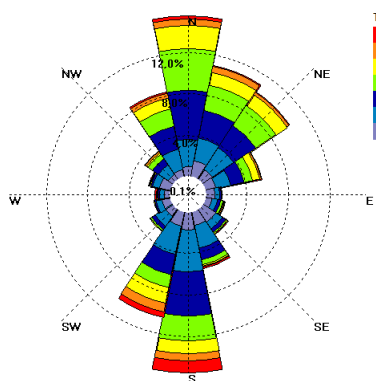




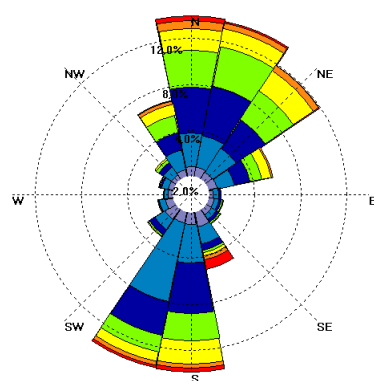
Ανεμογεννήτρια 2 (2007)



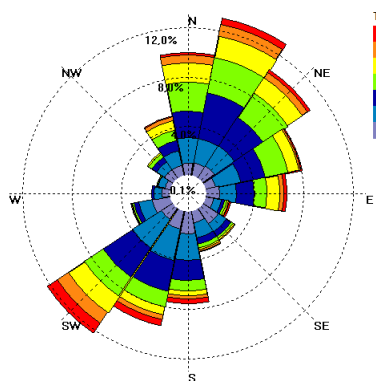
Ανεμογεννήτρια 2 (2008)



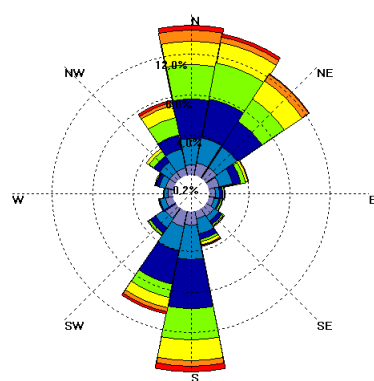
Ανεμογεννήτρια 3 (2007)



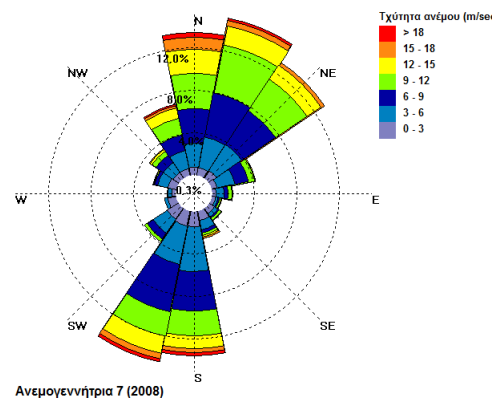
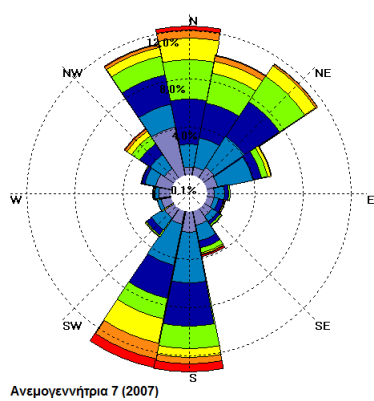
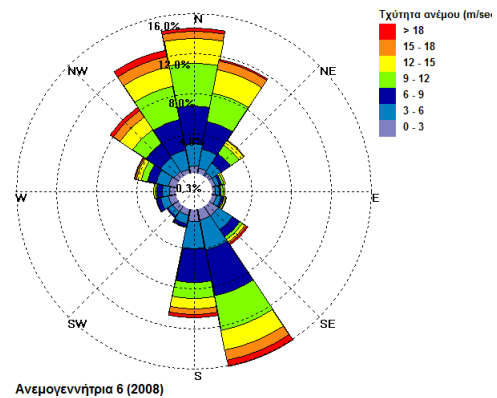
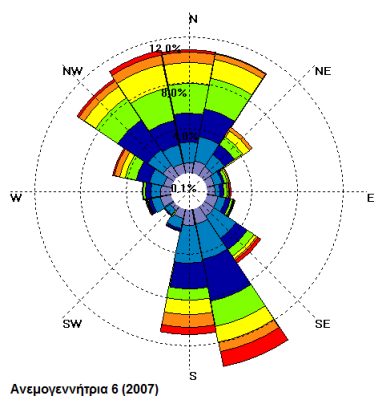
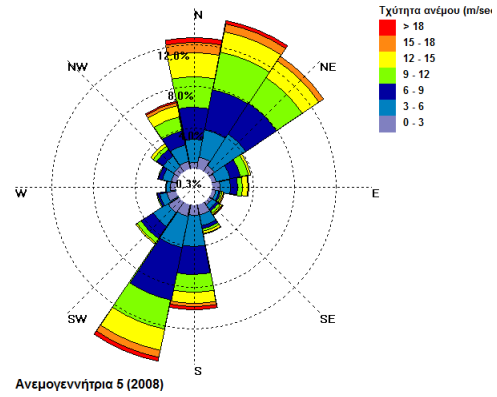
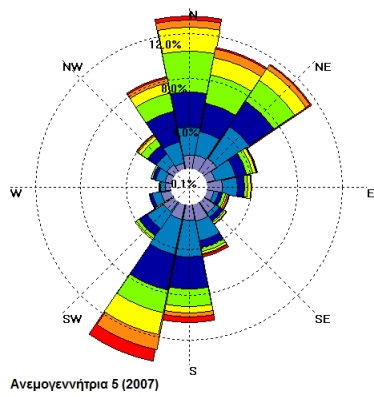
Ανεμογεννήτρια 3 (2008)

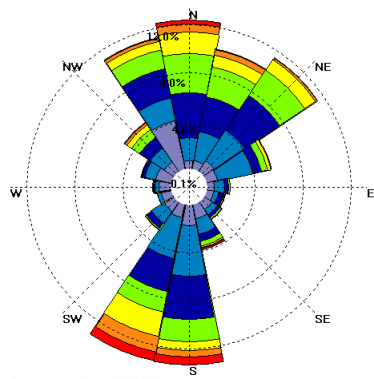


Ανεμογεννήτρια 4 (2007)

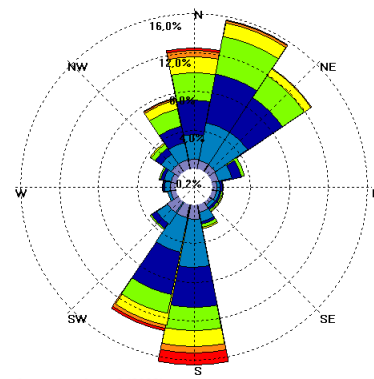


Ανεμογεννήτρια 4 (2008)

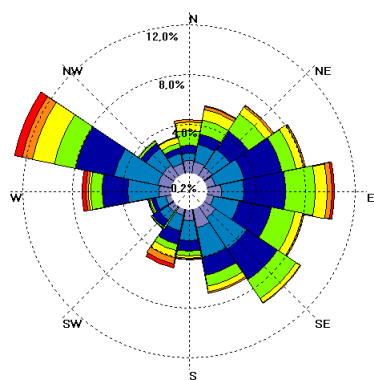




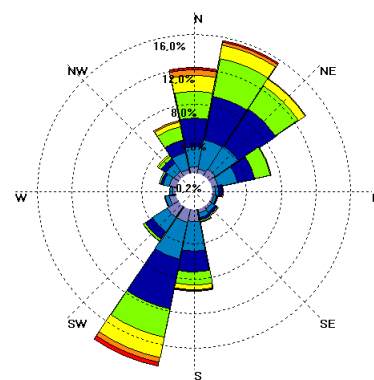
Ανεμογεννήτρια 8 (2007)



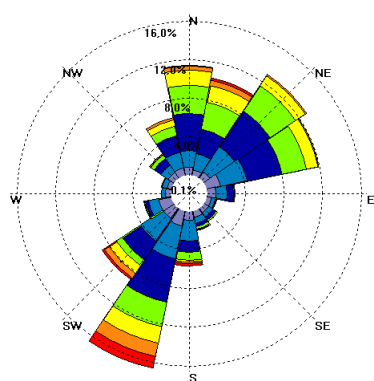
Ανεμογεννήτρια 8 (2008)



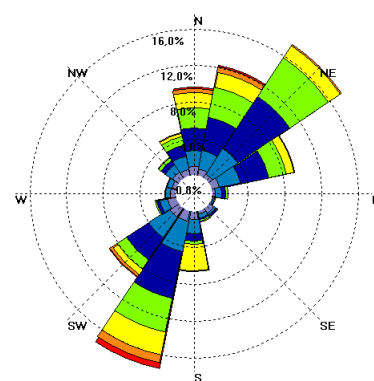
Ανεμογεννήτρια 9 (2007)



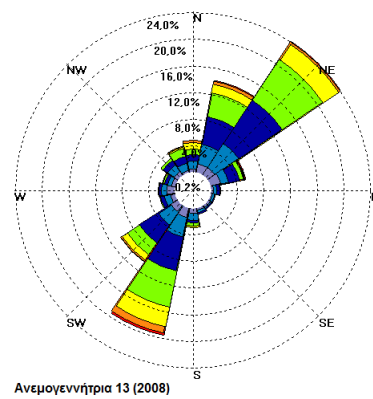
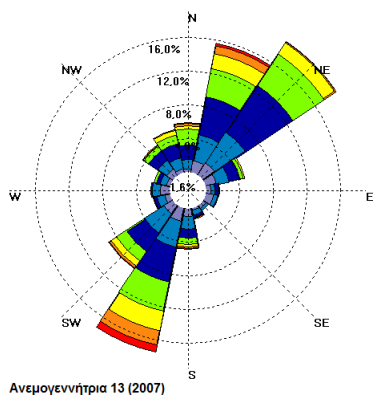
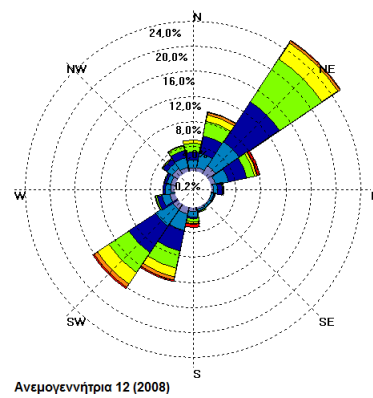
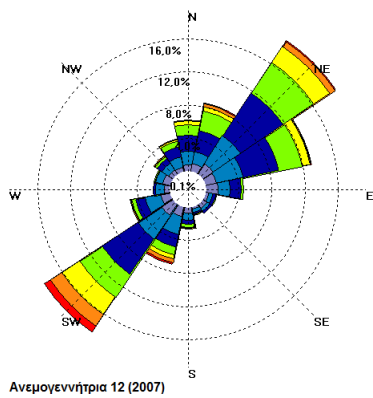
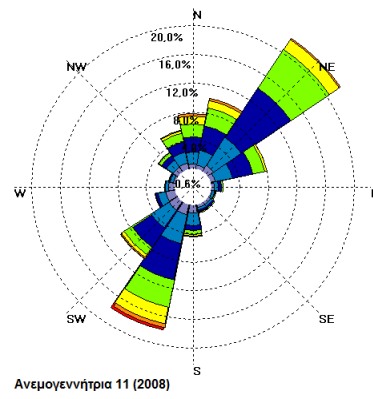
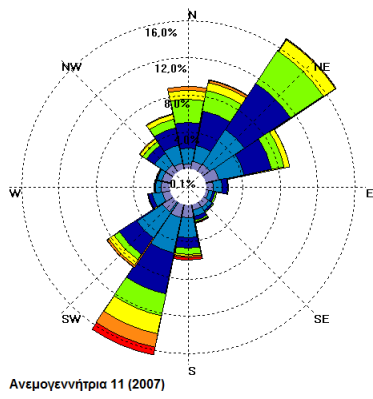
Ανεμογεννήτρια 9 (2008)

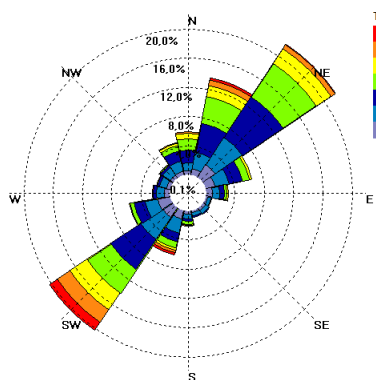


Ανεμογεννήτρια 10 (2007)

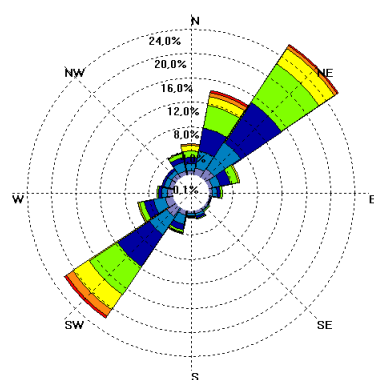


Ανεμογεννήτρια 10 (2008)

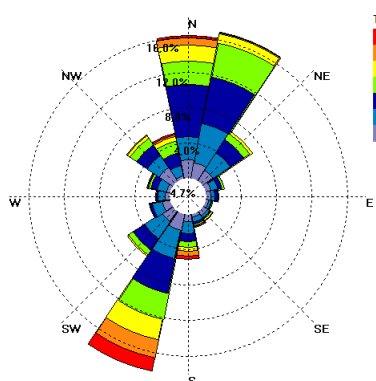




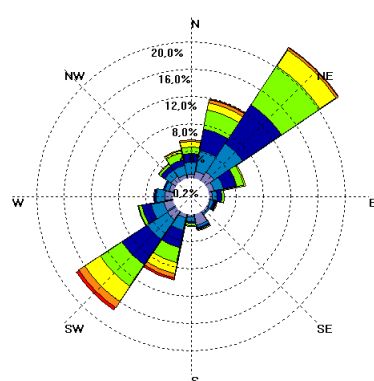
Ανεμογεννήτρια 14 (2007)



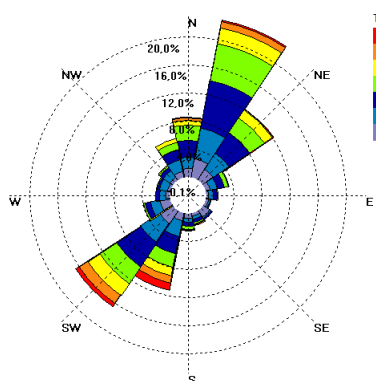
Ανεμογεννήτρια 14 (2008)



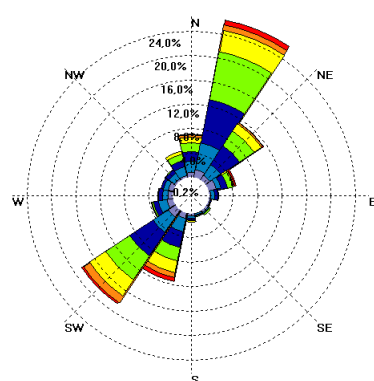
Ανεμογεννήτρια 15 (2007)



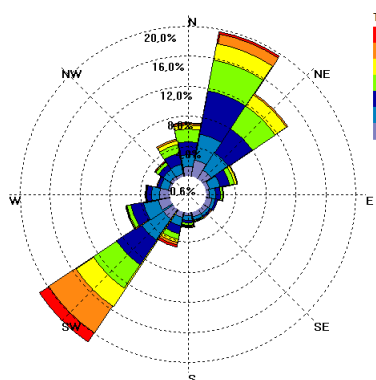
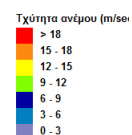
Ανεμογεννήτρια 15 (2008)



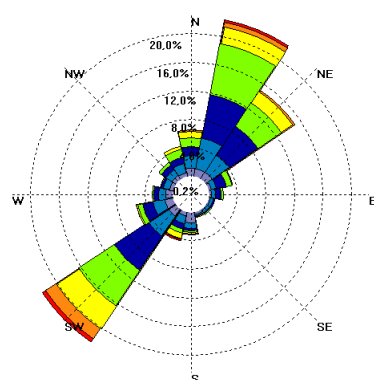
Ανεμογεννήτρια 16 (2007)



Ανεμογεννήτρια 16 (2008)

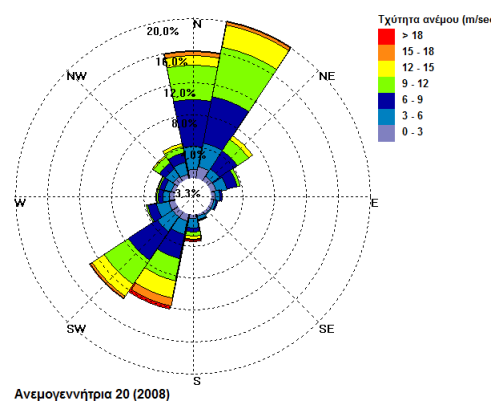
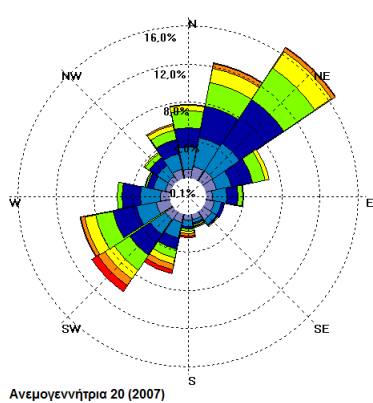
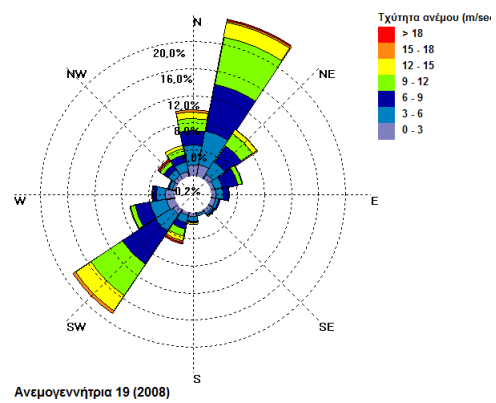
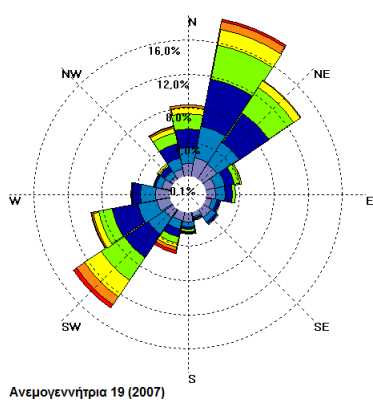
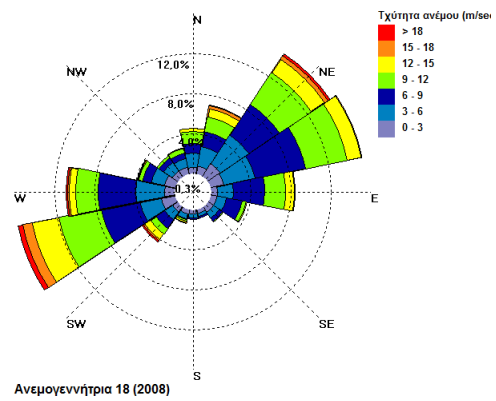
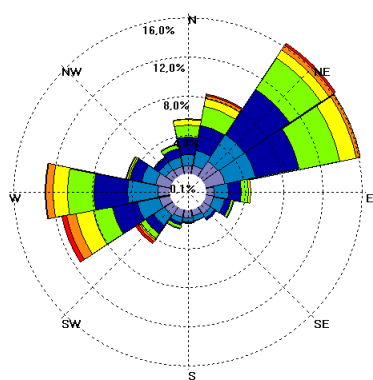


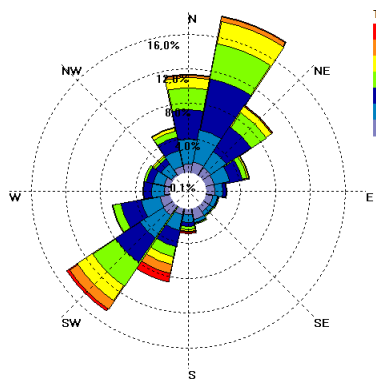
Ανεμογεννήτρια 17 (2007)



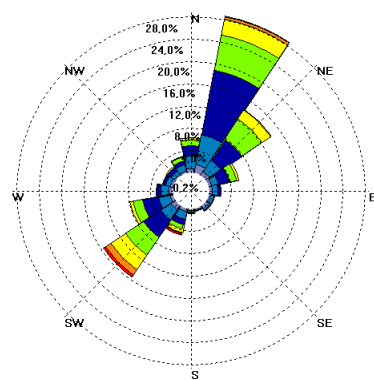
Ανεμογεννήτρια 17 (2008)



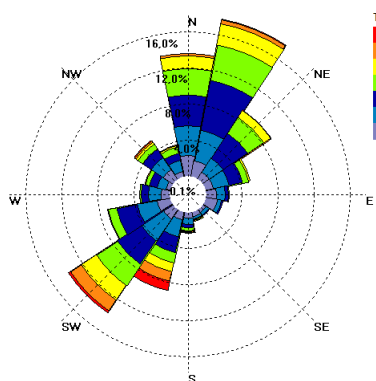




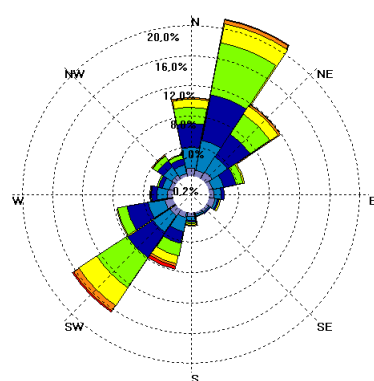
Ανεμογεννήτρια 21 (2007)



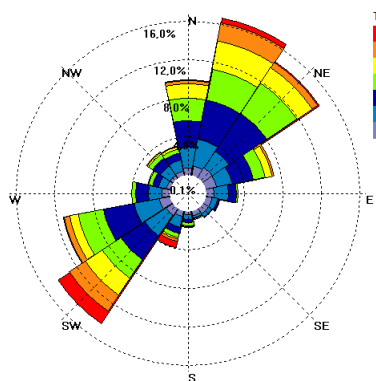
Ανεμογεννήτρια 21 (2008)



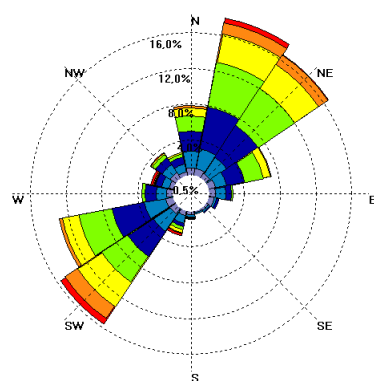
Ανεμογεννήτρια 22 (2007)



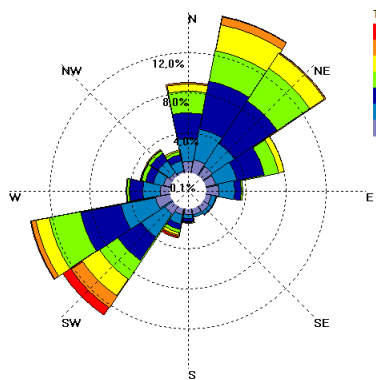
Ανεμογεννήτρια 22 (2008)



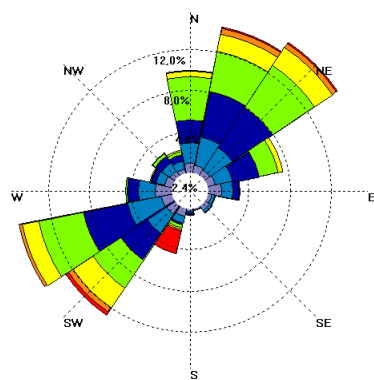
Ανεμογεννήτρια 23 (2007)



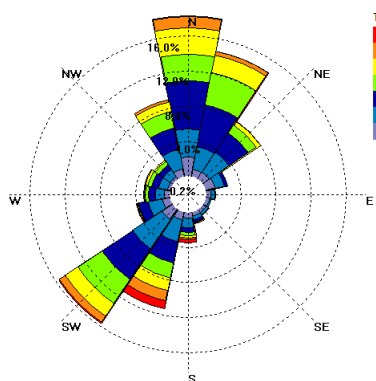
Ανεμογεννήτρια 23 (2008)



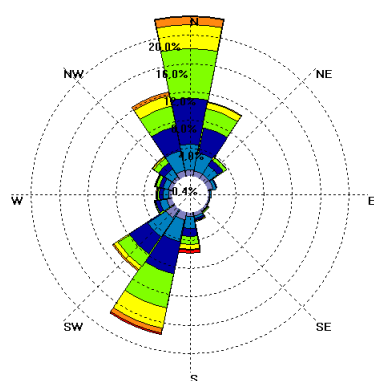
Ανεμογεννήτρια 24 (2007)



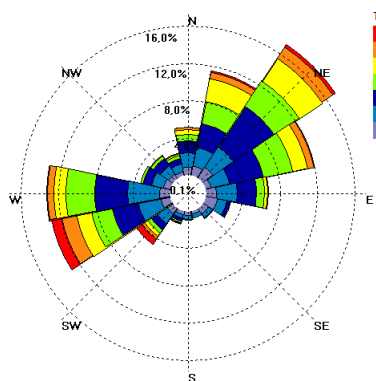
Ανεμογεννήτρια 24 (2008)



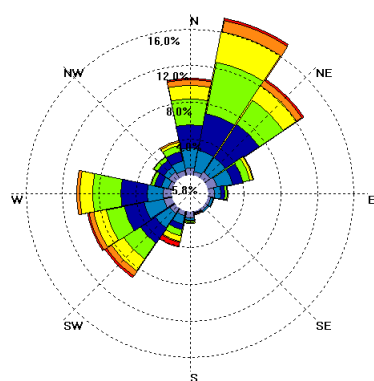
Ανεμογεννήτρια 25 (2007)



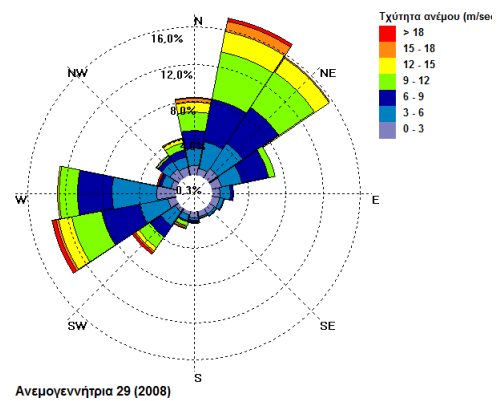
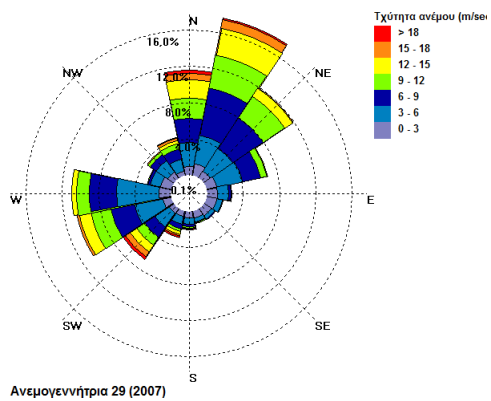
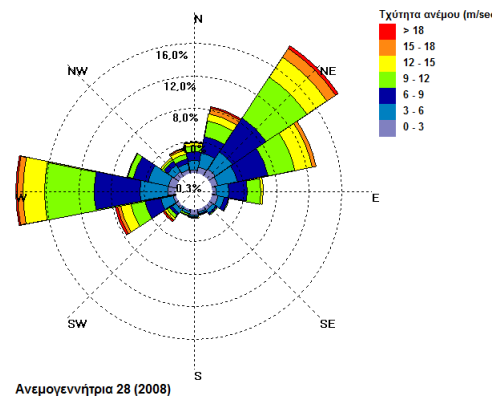
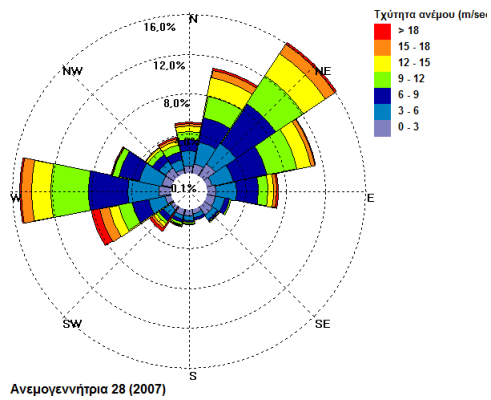
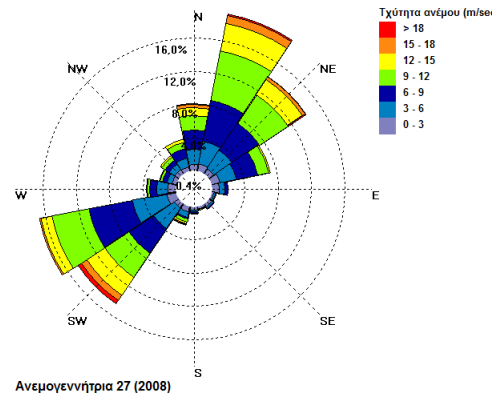
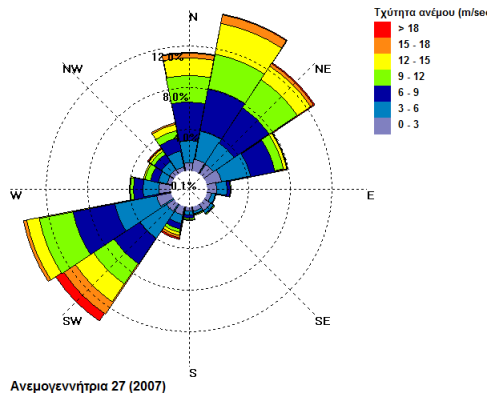
Ανεμογεννήτρια 25 (2008)

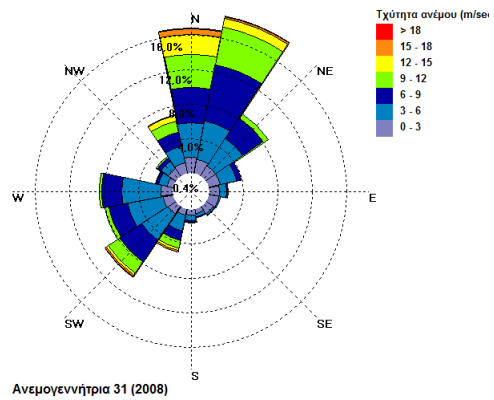
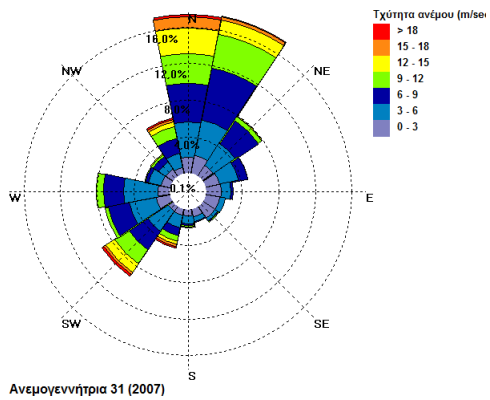
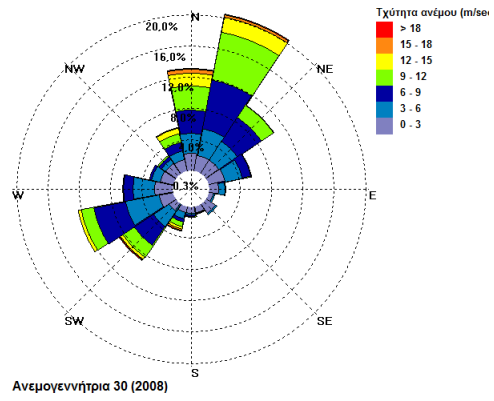
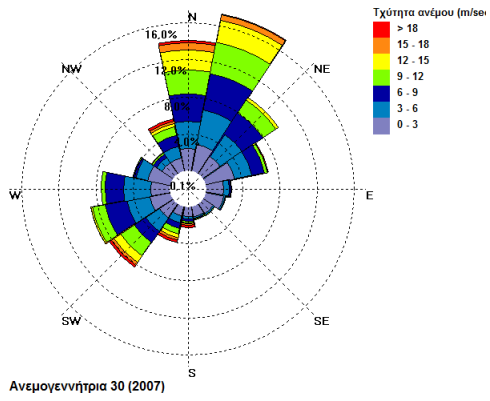


Ανεμογεννήτρια 26 (2007)



Ανεμογεννήτρια 26 (2008)





ΠΑΡΑΓΡΑΦΟΣ 3

Στους πίνακες που ακολουθούν, καταγράφεται η μέση μηνιαία ταχύτητα του ανέμου στο αιολικό πάρκο ΠΑΤΡΙΑΡΧΗΣ ανά ανεμογεννήτρια και χρονιά.

Ανεμογεννήτρια	1,00		2,00		3,00	
	2007,00	2008,00	2007,00	2008,00	2007,00	2008,00
Χρονιά						
Μήνας	m/sec	m/sec	m/sec	m/sec	m/sec	m/sec
ΙΑΝ	9,22	7,63	8,77	7,24	9,18	7,62
ΦΕΒ	8,51	7,95	7,97	7,76	7,78	9,87
ΜΑΡ	9,14	9,45	8,78	8,99	9,28	9,93
ΑΠΡ	6,68	8,53	6,25	8,12	6,72	5,09
ΜΑΪ	6,41	6,25	6,01	5,94	6,36	6,27
ΙΟΥΝ	6,50	6,68	5,97	6,24	6,40	6,73
ΙΟΥΛ	7,22	7,01	6,69	6,52	7,23	6,93
ΑΥΓ	6,90	8,68	6,40	7,90	6,87	8,52
ΣΕΠ	7,32	7,11	6,82	6,54	7,33	6,93
ΟΚΤ	7,06	7,98	6,65	7,39	7,19	7,78
ΝΟΕ	8,69	7,61	8,29	1,72	9,03	7,31
ΔΕΚ	7,86	10,22	7,61	3,30	8,52	10,03

Μέσος όρος	7,63	7,93	7,18	6,47	7,66	7,75
-------------------	------	------	------	------	------	------

ΑΘΡΟΙΣΜΑ ΚΥΒΩΝ ΜΕΣΩΝ ΩΡΙΑΙΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ			
Ανεμογεννήτρια	1,00	2,00	3,00
2007,00	8203142,35	6992740,90	8567211,84
2008,00	7598856,45	4708549,47	8352576,37
Αριθμός μετρήσεων			
2007,00	8523,00	8523,00	8523,00
2008,00	8329,00	7519,00	8329,00
Ke			
2007,00	2,17	2,21	2,24
2008,00	1,83	2,31	2,15

Ανεμογεννήτρια	4,00		5,00		6,00	
Χρονιά	2007,00	2008,00	2007,00	2008,00	2007,00	2008,00
Μήνας	m/sec	m/sec	m/sec	m/sec	m/sec	m/sec
ΙΑΝ	9,62	7,48	9,34	7,53	9,44	8,08
ΦΕΒ	8,03	8,53	7,63	8,65	8,24	8,30
ΜΑΡ	9,77	9,49	9,30	9,88	10,37	10,48
ΑΠΡ	6,86	8,65	6,58	8,82	7,28	9,36
ΜΑΪ	6,55	6,04	6,28	6,20	6,89	6,86
ΙΟΥΝ	6,59	5,81	6,46	6,41	6,99	7,14
ΙΟΥΛ	7,51	6,42	7,08	6,94	7,94	7,72
ΑΥΓ	7,13	8,64	6,75	8,41	7,45	9,40
ΣΕΠ	7,60	7,02	7,30	7,05	7,83	7,51
ΟΚΤ	7,53	8,01	7,24	8,02	8,03	8,65
ΝΟΕ	8,58	7,46	8,84	7,53	9,43	8,09
ΔΕΚ	8,53	10,47	8,27	10,73	8,09	11,05

Μέσος όρος	7,86	7,84	7,59	8,01	8,17	8,55
-------------------	------	------	------	------	------	------

ΑΘΡΟΙΣΜΑ ΚΥΒΩΝ ΜΕΣΩΝ ΩΡΙΑΙΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ			
Ανεμογεννήτρια	4,00	5,00	6,00
2007,00	9413872,69	8422188,53	62620003,20
2008,00	7917072,83	8021481,40	55139370,90
Αριθμός μετρήσεων			
2007,00	8523,00	8523,00	8523,00
2008,00	8329,00	8329,00	8329,00
Ke			
2007,00	2,28	2,26	13,50
2008,00	1,98	1,87	10,58

Ανεμογεννήτρια	7,00		8,00		9,00	
Χρονιά	2007,00	2008,00	2007,00	2008,00	2007,00	2008,00
Μήνας	m/sec	m/sec	m/sec	m/sec	m/sec	m/sec
ΙΑΝ	9,00	7,33	9,30	6,99	8,90	7,21
ΦΕΒ	7,70	8,28	7,61	9,72	7,89	7,95
ΜΑΡ	8,94	9,50	9,65	9,12	9,33	9,14
ΑΠΡ	6,53	8,39	6,61	8,11	6,23	8,05
ΜΑΪ	6,18	6,45	6,53	6,01	5,23	6,06
ΙΟΥΝ	6,19	6,46	5,61	6,09	6,07	6,07
ΙΟΥΛ	7,00	6,84	6,56	6,50	6,77	6,51
ΑΥΓ	6,68	8,26	6,32	7,55	6,36	7,78
ΣΕΠ	7,11	6,82	6,85	6,24	6,99	6,55
ΟΚΤ	4,88	7,94	6,84	7,41	6,95	7,71
ΝΟΕ	8,49	8,55	8,32	6,92	8,16	7,09
ΔΕΚ	7,94	10,17	9,37	9,46	8,42	9,73

Μέσος όρος	7,22	7,92	7,46	7,51	7,28	7,49
-------------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

ΑΓΡΟΙΣΜΑ ΚΥΒΩΝ ΜΕΣΩΝ ΩΡΙΑΙΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ			
Ανεμογεννήτρια	7,00	8,00	9,00
2007,00	7204661,18	7111774,60	6629828,72
2008,00	7739212,66	7005759,09	5858069,88
Αριθμός μετρήσεων			
2007,00	8523,00	8523,00	8523,00
2008,00	8329,00	8329,00	8329,00
Ke			
2007,00	2,25	2,01	2,02
2008,00	1,87	1,99	1,68

Ανεμογεννήτρια	10,00		11,00		12,00	
Χρονιά	2007,00	2008,00	2007,00	2008,00	2007,00	2008,00
Μήνας	m/sec	m/sec	m/sec	m/sec	m/sec	m/sec
ΙΑΝ	9,34	7,16	8,68	7,34	8,99	7,35
ΦΕΒ	8,27	8,05	7,26	7,38	7,46	8,13
ΜΑΡ	9,70	9,90	9,14	9,34	9,04	9,87
ΑΠΡ	6,50	8,67	6,21	8,22	6,57	8,94
ΜΑΪ	6,53	6,28	6,23	6,96	6,35	6,48
ΙΟΥΝ	6,48	6,49	6,10	6,16	6,42	6,54
ΙΟΥΛ	7,12	6,94	6,78	6,56	7,16	6,74
ΑΥΓ	6,61	8,29	6,27	8,13	6,70	8,89
ΣΕΠ	7,22	6,84	6,68	6,23	6,99	6,84
ΟΚΤ	7,30	7,95	6,89	6,94	7,11	8,37
ΝΟΕ	8,66	7,54	8,13	7,07	8,43	7,52
ΔΕΚ	8,27	10,66	8,00	9,23	7,78	9,17

Μέσος όρος	7,67	7,90	7,20	7,46	7,42	7,90
-------------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

ΑΘΡΟΙΣΜΑ ΚΥΒΩΝ ΜΕΣΩΝ ΩΡΙΑΙΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ			
Ανεμογεννήτρια	10,00	11,00	12,00
2007,00	7475099,17	6101367,88	6650678,57
2008,00	6784784,71	5434369,95	7013074,93
Αριθμός μετρήσεων			
2007,00	8523,00	8523,00	8523,00
2008,00	8329,00	8329,00	8329,00
Ke			
2007,00	1,95	1,92	1,91
2008,00	1,65	1,57	1,71

Ανεμογεννήτρια	13,00		14,00		15,00	
Χρονιά	2007,00	2008,00	2007,00	2008,00	2007,00	2008,00
Μήνας	m/sec	m/sec	m/sec	m/sec	m/sec	m/sec
ΙΑΝ	9,03	7,12	9,32	7,25	8,96	7,20
ΦΕΒ	7,49	6,96	7,86	7,79	7,98	5,42
ΜΑΡ	8,92	9,81	9,34	10,14	9,75	9,86
ΑΠΡ	5,84	9,10	6,74	9,40	6,56	9,15
ΜΑΪ	6,45	6,32	6,35	6,52	6,32	6,45
ΙΟΥΝ	6,55	6,62	6,72	6,70	6,34	6,36
ΙΟΥΛ	7,25	6,84	7,48	6,83	7,19	6,72
ΑΥΓ	6,81	8,97	6,94	9,09	6,59	8,89
ΣΕΠ	7,10	6,87	7,30	6,95	7,41	6,64
ΟΚΤ	7,11	8,39	7,32	10,06	1,35	8,20
ΝΟΕ	8,30	7,35	8,56	7,55	8,44	7,60
ΔΕΚ	7,75	9,36	7,99	8,26	7,23	9,89

Μέσος όρος	7,38	7,81	7,66	8,05	7,01	7,70
-------------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

ΑΘΡΟΙΣΜΑ ΚΥΒΩΝ ΜΕΣΩΝ ΩΡΙΑΙΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ			
Ανεμογεννήτρια	13,00	14,00	15,00
2007,00	6637542,40	7423973,41	7405785,63
2008,00	6568768,66	5523501,95	6627690,58
Αριθμός μετρήσεων			
2007,00	8523,00	8523,00	8523,00
2008,00	8329,00	8329,00	8329,00
Ke			
2007,00	1,93	1,94	2,52
2008,00	1,66	1,27	1,74

Ανεμογεννήτρια	16,00		17,00		18,00	
	2007,00	2008,00	2007,00	2008,00	2007,00	2008,00
Χρονιά						
Μήνας	m/sec	m/sec	m/sec	m/sec	m/sec	m/sec
ΙΑΝ	9,01	7,42	9,65	7,64	8,72	7,51
ΦΕΒ	8,23	7,78	8,09	6,44	8,01	7,41
ΜΑΡ	8,94	10,49	9,28	10,36	8,85	9,46
ΑΠΡ	6,65	9,66	7,05	9,47	6,61	8,89
ΜΑΪ	6,25	6,31	6,58	6,42	6,23	6,51
ΙΟΥΝ	6,40	6,91	6,92	6,64	6,19	6,39
ΙΟΥΛ	7,32	7,11	7,84	7,00	7,25	6,80
ΑΥΓ	6,68	9,50	7,19	9,18	6,70	8,63
ΣΕΠ	6,95	7,17	7,50	6,93	7,04	6,46
ΟΚΤ	6,87	8,89	7,39	8,54	6,85	8,14
ΝΟΕ	8,30	8,17	11,56	7,86	8,20	7,30
ΔΕΚ	7,27	9,96	7,39	9,85	7,48	9,25

Μέσος όρος	7,41	8,28	8,04	8,03	7,34	7,73
-------------------	------	------	------	------	------	------

ΑΘΡΟΙΣΜΑ ΚΥΒΩΝ ΜΕΣΩΝ ΩΡΙΑΙΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ			
Ανεμογεννήτρια	16,00	17,00	18,00
2007,00	7185551,34	8232815,94	6616445,27
2008,00	8145049,83	7234904,49	6474161,23
Αριθμός μετρήσεων			
2007,00	8523,00	8523,00	8523,00
2008,00	8329,00	8329,00	8329,00
Κε			
2007,00	2,08	1,86	1,96
2008,00	1,72	1,68	1,68

Ανεμογεννήτρια	19,00		20,00		21,00	
	2007,00	2008,00	2007,00	2008,00	2007,00	2008,00
Χρονιά						
Μήνας	m/sec	m/sec	m/sec	m/sec	m/sec	m/sec
ΙΑΝ	9,13	6,95	9,02	6,87	8,82	7,23
ΦΕΒ	7,58	7,63	7,45	5,03	7,38	7,37
ΜΑΡ	8,28	8,84	9,39	9,57	9,63	9,81
ΑΠΡ	6,18	8,44	6,43	9,00	6,49	8,78
ΜΑΪ	5,98	6,01	6,18	6,21	6,82	6,78
ΙΟΥΝ	6,07	5,99	6,30	6,56	6,40	6,37
ΙΟΥΛ	7,05	6,45	7,21	6,78	7,21	6,53
ΑΥΓ	6,50	8,46	6,67	9,15	6,72	8,89
ΣΕΠ	6,84	6,26	7,01	6,89	7,02	6,67
ΟΚΤ	6,52	7,78	6,93	8,59	6,91	8,32
ΝΟΕ	7,80	6,95	8,39	7,79	7,58	7,76
ΔΕΚ	7,31	8,92	7,41	9,62	8,36	9,55

Μέσος όρος	7,10	7,39	7,37	7,67	7,45	7,84
-------------------	------	------	------	------	------	------

ΑΘΡΟΙΣΜΑ ΚΥΒΩΝ ΜΕΣΩΝ ΩΡΙΑΙΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ			
Ανεμογεννήτρια	19,00	20,00	21,00
2007,00	6338471,23	6725448,57	7131665,53
2008,00	6101483,08	6484119,27	6378274,52
Αριθμός μετρήσεων			
2007,00	8523,00	7777,00	7776,00
2008,00	8329,00	7584,00	7584,00
Κε			
2007,00	2,07	2,16	2,22
2008,00	1,82	1,89	1,75

Ανεμογεννήτρια	22,00		23,00		24,00	
Χρονιά	2007,00	2008,00	2007,00	2008,00	2007,00	2008,00
Μήνας	m/sec	m/sec	m/sec	m/sec	m/sec	m/sec
ΙΑΝ	9,16	7,55	9,77	8,16	8,90	7,30
ΦΕΒ	7,51	7,03	8,17	8,61	7,80	7,22
ΜΑΡ	9,03	9,80	10,44	10,90	9,35	9,89
ΑΠΡ	6,41	8,89	7,18	9,79	6,49	8,91
ΜΑΪ	6,02	6,18	6,78	6,81	6,10	6,20
ΙΟΥΝ	6,43	6,41	7,07	7,25	6,50	6,57
ΙΟΥΛ	6,84	6,50	8,00	7,31	7,29	6,68
ΑΥΓ	6,52	8,94	7,50	10,12	6,85	9,76
ΣΕΠ	6,83	6,75	7,78	7,59	7,08	6,77
ΟΚΤ	6,83	8,33	7,74	9,35	6,99	9,46
ΝΟΕ	8,58	7,66	9,50	8,72	8,43	7,62
ΔΕΚ	7,17	9,61	9,37	10,06	8,31	9,10

Μέσος όρος	7,28	7,80	8,28	8,72	7,51	7,96
-------------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

ΑΘΡΟΙΣΜΑ ΚΥΒΩΝ ΜΕΣΩΝ ΩΡΙΑΙΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ			
Ανεμογεννήτρια	22,00	23,00	24,00
2007,00	6729988,65	9209081,57	6758956,03
2008,00	6453821,62	9039462,30	7811280,88
Αριθμός μετρήσεων			
2007,00	7776,00	7776,00	7776,00
2008,00	7584,00	7584,00	7584,00
Ke			
2007,00	2,25	2,09	2,05
2008,00	1,79	1,80	2,04

Ανεμογεννήτρια	25,00		26,00		27,00	
	2007,00	2008,00	2007,00	2008,00	2007,00	2008,00
Χρονιά						
Μήνας	m/sec	m/sec	m/sec	m/sec	m/sec	m/sec
ΙΑΝ	8,99	7,48	9,83	7,81	9,32	7,57
ΦΕΒ	8,79	7,36	9,01	7,37	8,06	8,07
ΜΑΡ	9,76	10,17	10,02	10,42	9,46	10,02
ΑΠΡ	6,28	6,15	6,20	6,38	6,67	8,98
ΜΑΪ	6,60	9,07	7,05	9,37	6,20	6,30
ΙΟΥΝ	6,67	6,68	7,13	6,52	6,70	6,61
ΙΟΥΛ	7,45	6,78	8,00	6,95	7,44	7,00
ΑΥΓ	7,04	9,13	7,15	9,57	7,06	9,23
ΣΕΠ	7,31	6,99	7,47	7,20	7,25	6,78
ΟΚΤ	7,23	8,36	7,43	8,78	7,28	8,52
ΝΟΕ	8,39	7,87	8,96	8,25	8,65	7,90
ΔΕΚ	8,58	9,38	9,09	9,83	8,63	9,48

Μέσος όρος	7,76	7,95	8,11	8,20	7,73	8,04
-------------------	------	------	------	------	------	------

ΑΘΡΟΙΣΜΑ ΚΥΒΩΝ ΜΕΣΩΝ ΩΡΙΑΙΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ			
Ανεμογεννήτρια	25,00	26,00	27,00
2007,00	7887452,13	9021720,93	7300816,44
2008,00	6847749,05	7419360,22	6714628,66
Αριθμός μετρήσεων			
2007,00	7776,00	7776,00	7776,00
2008,00	7584,00	6879,00	7233,00
Κε			
2007,00	2,17	2,17	2,04
2008,00	1,80	1,95	1,79

Ανεμογεννήτρια	28,00		29,00		30,00	
Χρονιά	2007,00	2008,00	2007,00	2008,00	2007,00	2008,00
Μήνας	m/sec	m/sec	m/sec	m/sec	m/sec	m/sec
ΙΑΝ	9,79	7,81	8,31	6,89	7,38	6,05
ΦΕΒ	8,29	8,19	7,68	7,85	7,72	6,62
ΜΑΡ	10,08	10,61	8,92	8,45	7,82	6,33
ΑΠΡ	6,77	9,40	6,18	7,91	5,06	6,00
ΜΑΪ	6,50	6,40	5,90	6,20	5,60	5,74
ΙΟΥΝ	6,94	6,89	6,23	6,28	5,02	4,88
ΙΟΥΛ	7,70	7,24	6,94	6,64	5,59	5,44
ΑΥΓ	7,36	9,36	6,68	8,65	5,42	7,46
ΣΕΠ	7,63	6,92	6,95	6,22	5,89	5,48
ΟΚΤ	7,70	8,61	6,94	7,89	5,78	6,89
ΝΟΕ	9,20	7,91	7,96	6,97	6,66	6,51
ΔΕΚ	9,25	9,87	8,32	8,74	7,12	8,07

Μέσος όρος	8,10	8,27	7,25	7,39	6,26	6,29
-------------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

ΑΘΡΟΙΣΜΑ ΚΥΒΩΝ ΜΕΣΩΝ ΩΡΙΑΙΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ			
Ανεμογεννήτρια	28,00	29,00	30,00
2007,00	8691217,45	6434605,55	5450662,48
2008,00	7412990,02	6089524,26	4083538,38
Αριθμός μετρήσεων			
2007,00	7776,00	7777,00	7776,00
2008,00	7233,00	7233,00	7233,00
Κε			
2007,00	2,10	2,17	2,86
2008,00	1,81	2,09	2,27

Ανεμογεννήτρια	31,00	
Χρονιά	2007,00	2008,00
Μήνας	m/sec	m/sec
ΙΑΝ	7,56	6,13
ΦΕΒ	7,14	7,01
ΜΑΡ	7,93	6,30
ΑΠΡ	5,78	5,89
ΜΑΪ	5,69	5,73
ΙΟΥΝ	5,76	4,76
ΙΟΥΛ	6,23	5,81
ΑΥΓ	6,07	7,17
ΣΕΠ	6,56	5,24
ΟΚΤ	6,01	6,68
ΝΟΕ	6,97	6,20
ΔΕΚ	7,53	7,82

Μέσος όρος	6,60	6,23
-------------------	-------------	-------------

ΑΘΡΟΙΣΜΑ ΚΥΒΩΝ ΜΕΣΩΝ ΩΡΙΑΙΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ	
Ανεμογεννήτρια	31,00
2007,00	5154301,49
2008,00	3659452,70
Αριθμός μετρήσεων	
2007,00	7777,00
2008,00	7233,00

Κε	
2007,00	2,30
2008,00	2,09

ΣΥΝΟΛΙΚΑ	
Μέση ταχύτητα	7,61
Κε	2,31
P/A	625,54

ΠΑΡΑΓΡΑΦΟΣ 4

Για να υπολογιστεί η ποιότητα του αιολικού δυναμικού της περιοχής του αιολικού πάρκου, χρησιμοποιήθηκε η σχέση :

$$\bar{P}/A = \frac{1}{2} \rho \bar{V}^3 K_e$$

Στους πίνακες της παραγράφου 3 του παρόντος φαίνεται ο υπολογισμός του κύβου της μέσης ταχύτητας ανέμου, όπως και ο υπολογισμός του K_e . Θεωρώντας και την πυκνότητα του ανέμου ίση με $1,225 \text{ Kg/m}^3$ υπολογίστηκε το \bar{P}/A .

ΠΑΡΑΓΡΑΦΟΣ 5

Στον παρακάτω πίνακα καταγράφονται το υπολογισμένο Ω από τα αρχεία w1....W31 στον φάκελο exceldata (παράρτημα 2) για κάθε ανεμογεννήτρια, η ονομαστική ισχύς τους N_0 , η τεχνική διαθεσιμότητα Δ , η περίοδος λειτουργίας δT και τέλος η παραγωγή ενέργειας κάθε ανεμογεννήτριας σύμφωνα με τον τύπο:

$$E = \Omega N_0 \Delta \delta T \text{ kWh}$$

A/A	Ω	N_0	Δ	δT	kWh
1	0,311974918	1300	0,94	17520	6679208,288
2	0,256115217	1300	0,94	17520	5483283,371
3	0,29867546	1300	0,94	17520	6394474,34
4	0,323739915	1300	0,94	17520	6931090,286
5	0,316705057	1300	0,94	17520	6780477,916
6	0,357839239	1300	0,94	17520	7661137,717
7	0,291726518	1300	0,94	17520	6245701,384
8	0,275775974	1300	0,94	17520	5904209,169
9	0,277998138	1300	0,94	17520	5951784,456
10	0,314811753	1300	0,94	17520	6739943,337
11	0,26500866	1300	0,94	17520	5673687,006
12	0,294345841	1300	0,94	17520	6301779,622
13	0,297315214	1300	0,94	17520	6365352,235
14	0,297315214	1300	0,94	17520	6365352,235
15	0,286785935	1300	0,94	17520	6139926,268
16	0,320473935	1300	0,94	17520	6861167,483
17	0,323299859	1300	0,94	17520	6921668,933
18	0,292336594	1300	0,94	17520	6258762,769
19	0,274745993	1300	0,94	17520	5882157,852
20	0,295142908	1300	0,94	17520	6318844,38
21	0,29447554	1300	0,94	17520	6304556,405
22	0,293148134	1300	0,94	17520	6276137,386
23	0,368268863	1300	0,94	17520	7884430,126
24	0,307896536	1300	0,94	17520	6591892,414
25	0,31559197	1300	0,94	17520	6756647,346
26	0,347488225	1300	0,94	17520	7439528,304
27	0,323335369	1300	0,94	17520	6922429,182
28	0,345329652	1300	0,94	17520	7393314,465
29	0,277491989	1300	0,94	17520	5940948,089
30	0,217486672	1300	0,94	17520	4656267,855
31	0,539761083	1300	0,94	17520	11555982,52
	Σύνολο				205582143,1

Το σύνολο της αναμενόμενης ενεργειακής παραγωγής του αιολικού πάρκου ΠΑΤΡΙΑΡΧΗΣ ανέρχεται σε 205582173,1 kWh για δύο έτη, δηλαδή:

102.791.071,55 kWh ανά έτος

Η πραγματική ενεργειακή παραγωγή του πάρκου είναι καταγεγραμμένη από τον κεντρικό υπολογιστή του αιολικού πάρκου και ανέρχεται, σύμφωνα με τα δεδομένα των αρχείων excel στον φάκελο πραγματική ενεργειακή παραγωγή του παραρτήματος 2, στις:

98.058.603 kWh ανά έτος