

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

**ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΟΥ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΙΚΟΥ
ΑΝΕΜΟΥ ΣΤΗ ΒΟΡΕΙΑ ΕΛΛΑΔΑ
ΜΕ ΣΤΟΧΟ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ
ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

ΔΑΜΙΑΝΟΣ ΦΛΩΡΙΝ ΜΑΝΤΣΗΣ
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2006

Η ανάπτυξη και υποστήριξη της Μεταπτυχιακής Διατριβής Ειδίκευσης έγινε ενώπιον της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής, στις 19 Μαΐου 2006. Την Τριμελή Εξεταστική Επιτροπή αποτέλεσαν οι:

Καρακώστας Θεόδωρος, Καθηγητής Α.Π.Θ., Επιβλέπων

Μακρογιάννης Τιμολέων, Καθηγητής Α.Π.Θ.

Μπλούτσος Αντώνης, Αναπληρωτής Καθηγητής Α.Π.Θ.

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως τον Επιβλέποντα Καθηγητή μου, Θεόδωρο Καρακώστα, για την συμβολή του στην ολοκλήρωση αυτής της Μεταπτυχιακής Διατριβής Ειδίκευσης, καθώς και στην μελλοντική μου σταδιοδρομία ως επιστήμονας της Μετεωρολογίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τα άλλα δυο μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής, τον Καθηγητή Τιμολέοντα Μακρογιάννη και τον Αναπληρωτή Καθηγητή Αντώνη Μπλούτσο, για τις πολύτιμες τους συμβουλές και παρατηρήσεις στο τελικό στάδιο της διατριβής, καθώς και τους υπόλοιπους καθηγητές του τομέα, για τις γνώσεις που μου προσέφεραν κατά τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών.

Ιδιαιτέρως σημαντική ήταν και η οικονομική υποστήριξη του Ιδρύματος Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ), το οποίο μου χορήγησε υποτροφία για δύο χρόνια, για την εκπλήρωση των μεταπτυχιακών μου σπουδών.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, η οποία με στήριξε στο δύσκολο δρόμο της γνώσης που έχω επιλέξει.

Τέλος, δεν θα μπορούσα να ξεχάσω τη σημαντική βοήθεια που μου προσέφεραν οι υποψήφιοι διδάκτορες, Σταυρούλα Στολάκη, Χριστίνα Μιχαηλίδου, Γιάννης Τεγούλιας, καθώς και οι νέοι διδάκτορες Κωσταντία Τολίκα και Χριστίνα Αναγνωστοπούλου, οι οποίοι ανταποκρίθηκαν ευγενικά κάθε φορά που ζήτησα τη βοήθειά τους.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1^ο – Εισαγωγή

1.1 Γενικά	3
1.2 Ιστορική αναδρομή	4
1.3 Σκοπός μελέτης	6
1.4 Προηγούμενες μελέτες	7
1.5 Περιοχή μελέτης	9
1.6 Δεδομένα	11

Κεφάλαιο 2^ο – Περιγραφή των κλιματικών χαρακτηριστικών του ανέμου για τους σταθμούς της Βόρειας Ελλάδας

2.1 Εισαγωγή	13
2.2 Ανεμολογικά στοιχεία του μετεωρολογικού σταθμού της Λήμνου	13
2.3 Ανεμολογικά στοιχεία του μετεωρολογικού σταθμού της Αλεξανδρούπολης	15
2.4 Ανεμολογικά στοιχεία του σταθμού του αεροδρομίου 'Μακεδονία'	16
2.5 Ανεμολογικά στοιχεία του μετεωρολογικού σταθμού της Νέας Αγχιάλου	18
2.6 Ανεμολογικά στοιχεία του μετεωρολογικού σταθμού της Χρυσούπολης	20
2.7 Ανεμολογικά στοιχεία του μετεωρολογικού σταθμού της Λάρισας	21
2.8 Ανεμολογικά στοιχεία του μετεωρολογικού σταθμού της Κοζάνης	22

Κεφάλαιο 3^ο – Θεωρητικές κατανομές

3.1 Εισαγωγή	24
3.2 Κατανομές Weibull και Rayleigh	24
3.3 Κατανομή Gumbel	32
3.4 Λογαριθμοκανονική Κατανομή (Log-normal)	34

Κεφάλαιο 4^ο – Διαθέσιμο Αιολικό Δυναμικό

4.1 Υπολογισμός Αιολικού Δυναμικού	37
4.2 Κατανομή του Διαθέσιμου Αιολικού Δυναμικού	44
4.3 Εξαγωγή Αιολικού Δυναμικού	45

Κεφάλαιο 5^ο – Προέκταση του ανέμου με το ύψος	
5.1 Εισαγωγή	48
5.2 Προέκταση μέσου ανέμου μικρής χρονικής διάρκειας	48
5.3 Προέκταση μέσου ανέμου μεγάλης χρονικής διάρκειας	49
5.4 Προέκταση της κατανομής Weibull με το ύψος (Mikhail and Justus)	54
 Κεφάλαιο 6^ο – Μελέτη μέγιστων ριπών ανέμου	
6.1 Εισαγωγή	58
6.2 Δεδομένα και μεθοδολογία	58
 Κεφάλαιο 7^ο – Σύνοψη και συμπεράσματα	
7.1 Σύνοψη	65
7.2 Συμπεράσματα	66
 Βιβλιογραφία	70
Abstract (περίληψη στα Αγγλικά)	73
Παράρτημα Α – Τιμές των παραμέτρων της κατανομής Weibull	75
Παράρτημα Β – Εποχιακά ροδογράμματα των σταθμών της μελέτης	76

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

Εισαγωγή

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που καλείται η κοινωνία μας να αντιμετωπίσει στη σύγχρονη εποχή είναι η ακατάπαυστη αύξηση των ενεργειακών αναγκών, το οποίο παράλληλα επιδεινώνεται από τη ραγδαία εξάντληση των αποθεμάτων ορυκτού πλούτου του πλανήτη μας. Η υπερβολική και αποκλειστική χρήση των ορυκτών καυσίμων από τον άνθρωπο, οδήγησε στην εξάρτηση του ανθρώπου από την οικονομία των ορυκτών καυσίμων. Είναι χαρακτηριστικό το γεγονός, ότι πάρα πολλά κράτη, ανάμεσά τους και η Ελλάδα, δαπανούν ένα μεγάλο μέρος του προϋπολογισμού τους για την αγορά πετρελαίου και άλλων ορυκτών καυσίμων. Μια τέτοια εξάρτηση είναι δυνατόν να οδηγήσει τα διάφορα κράτη σε οικονομικές κρίσεις, ακόμα και σε συγκρούσεις.

Αυτό ήταν το κύριο φαινόμενο που ανάγκασε τον άνθρωπο να στραφεί σε διάφορες εναλλακτικές μορφές ενέργειας, ανάμεσά τους και η Αιολική Ενέργεια (ΑΕ). Τα πρώτα βήματα της αιολικής ενέργειας ήταν διστακτικά και αργά. Τα τελευταία όμως χρόνια παρατηρείται μια αναζωπύρωση του ενδιαφέροντος, τόσο των κρατικών επιχειρήσεων, όσο και των ιδιωτικών, για τη χρήση της αιολικής ενέργειας, κυρίως λόγω της ανταγωνιστικότητας και της βιωσιμότητας που παρουσιάζει, σε ορισμένες περιπτώσεις, σε σχέση με τις συμβατικές μορφές ενέργειας, αλλά και λόγω των σχετικά ελάχιστων επιπτώσεων που έχει στο περιβάλλον. Ο τελευταίος παράγοντας είναι εξίσου σημαντικός με τους προηγούμενους, αν αναλογιστεί κανείς την επιρροή που ασκεί σήμερα το καθεστώς της προστασίας του περιβάλλοντος στη χάραξη της ενεργειακής πολιτικής. Μεταξύ των κρατών που πρωτοπορούν και εξάγουν τεχνογνωσία στον τομέα της Αιολικής Ενέργειας είναι οι Η.Π.Α., η Δανία, η Γερμανία, η Ολλανδία και η Νέα Ζηλανδία.

Το μεγάλο πλεονέκτημα της αιολικής ενέργειας, έναντι των άλλων μορφών ενέργειας, αποτελεί το γεγονός ότι είναι εξαιρετικά άφθονη, ανεξάντλητη, δωρεάν και η

δυνατότητα να απαντάται σε πάρα πολλούς τρόπους της γης. Σύμφωνα με τον Αμερικανό μετεωρολόγο Willett, η ισχύς του ανέμου που μπορούμε να εξάγουμε σε παγκόσμια κλίμακα από το παρεδάφιο στρώμα της ατμόσφαιρα, ανέρχεται σε $2 \cdot 10^{10} \text{KWh}$, δηλαδή υπερπολλαπλάσια της συνολικής υδροηλεκτρικής ενέργειας σε όλη τη γη. Παράλληλα, η εγκατάσταση ανεμογεννητριών δεν στοιχειοθετεί σημαντική παρεμβολή σε βάρος του περιβάλλοντος, που απαιτείται στην περίπτωση άλλων μορφών ενέργειας, όπως π.χ. η υδροηλεκτρική. Επίσης, στην αξιοποίηση της ΑΕ, είναι δυνατόν, ανάλογα με τις απαιτούμενες ανάγκες σε ενέργεια, να υιοθετηθεί και η κατάλληλη ανεμογεννήτρια. Το τελευταίο, καθιστά την ΑΕ ελκυστική, όπως στην περίπτωση τοπικών κοινοτήτων που θέλουν να απαλλαγούν από τον έλεγχο μεγάλων εταιριών ενέργειας και να αναλάβουν μόνες τους τη διανομή της ενέργειας στο τοπικό δίκτυο.

Παράλληλα, υπάρχουν και μειονεκτήματα, τα οποία όμως θα πρέπει να επισημανθεί, ότι είναι μικρά σε σχέση με τα πλεονεκτήματα που παρέχει η ΑΕ. Στις περισσότερες περιπτώσεις τα προβλήματα αυτά είναι δυνατόν να αποφευχθούν με την σωστή χρήση και όχι κατάχρηση της ΑΕ. Η επιλογή των κατάλληλων γεννητριών και κυρίως της βέλτιστης τοποθεσίας για την εγκατάστασή τους είναι συνήθως το κλειδί, ώστε μειονεκτήματα όπως:

- η επίδραση στην ορνιθοπανίδα της περιοχής
- η ηχορύπανση
- η αλλοίωση της αισθητικής του περιβάλλοντα χώρου
- ηλεκτρομαγνητικές επιδράσεις

να έχουν το λιγότερο δυνατό αντίκτυπο στο περιβάλλον.

1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Οι αρχαίοι λαοί και ιδίως οι Έλληνες έτρεφαν έναν έντονο σεβασμό για τον άνεμο, καθώς και για τα υπόλοιπα στοιχεία της φύσης, γεγονός το οποίο υποδηλώνεται από την προσπάθειά τους να δώσουν μορφή και υπερφυσικές δυνατότητες σ' αυτόν, αλλά και στην διάθεσή τους να τον λατρέψουν στο πρόσωπο ενός θεού, του Αιόλου. Ο σεβασμός αυτός, πήγαζε κυρίως από το γεγονός ότι είχαν γρήγορα αντιληφθεί ότι η ευημερία τους εξαρτιόταν από την εκμετάλλευση του ανέμου, αλλά και από το φόβο που έτρεφαν για τη βίαιη συμπεριφορά του ανέμου σε ακραία καιρικά φαινόμενα. Οι αρχαίοι λαοί, γνώριζαν

την αξία της παρατήρησης της φύσης, μιας και αυτός ήταν ο μοναδικός τρόπος για να αποκτήσουν γνώσεις, σε αντίθεση με τις μέρες μας, όπου η εύκολη πρόσβαση στη γνώση έχει στρέψει τα μάτια μας μακριά από τα ερεθίσματα που δεχόμαστε άμεσα από το φυσικό περιβάλλον.

Η χρήση του ανέμου στο παρελθόν είχε δύο μορφές:

- την εκμετάλλευση του ανέμου μέσω των ανεμόμυλων στην άρδευση και την παραγωγή αλευριού.
- την εκμετάλλευση του ανέμου στη ναυσιπλοΐα

Οι πρώτοι ανεμόμυλοι, σύμφωνα με τα ιστορικά δεδομένα, εμφανίστηκαν στην Βαβυλωνία τον 7^ο αιώνα π.χ. με σκοπό την άρδευση της πεδιάδας της Μεσοποταμίας. Στην συνέχεια, διαδόθηκαν σε όλη τη Μέση Ανατολή και τη Μεσόγειο, όπου και έγινε συστηματική χρήση τους. Αντίθετα, στην Ευρώπη, διαδόθηκαν μόλις τον 11^ο αιώνα από τους σταυροφόρους και χρησιμοποιήθηκαν κυρίως για την άλεση των σιτηρών.

Στη δεύτερη περίπτωση οι πρώτες προσπάθειες έγιναν από λαούς της Μεσογείου πριν από 6000 χρόνια, και όπως ήταν φυσικό, υιοθετήθηκε στη συνέχεια από τους γειτονικούς λαούς. Αυτό οδήγησε στη δυνατότητα πραγματοποίησης μεγάλων ταξιδιών, με σημαντικό ωφέλιμο φορτίο κατά μήκος των θαλασσών, κάτι το οποίο ήταν πρακτικά αδύνατον να γίνει κατά μήκος των ηπειρωτικών εκτάσεων. Το αποτέλεσμα ήταν η ανάπτυξη και η ευημερία των λαών της Μεσογείου στον οικονομικό και πολιτισμικό τομέα, καθώς και η σφυρηλάτηση των σχέσεων και των δεσμών ανάμεσα στους λαούς. Χαρακτηριστική είναι η ιδιαίτερη σχέση των Αρχαίων Ελλήνων με το Αιγαίο και τη θάλασσα της Μεσογείου, καθώς αποτέλεσαν το βασικό μέσο διάδοσης του πολιτισμού τους, χάρη στην εκμετάλλευση του ανέμου από την ναυτιλία. Άλλα χαρακτηριστικά ιστορικά γεγονότα, τα οποία έλαβαν μέρος χάρη στην εκμετάλλευση αυτή, είναι, η ανακάλυψη της Αμερικής το 1493 και η αποίκηση της Γροιλανδίας από τους Βίκινγκς το Μεσαίωνα. Τέλος, μπορεί να ειπωθεί, και η ιστορία το αποδεικνύει, ότι ο τρόπος χρήσης της Αιολικής ενέργειας στη ναυσιπλοΐα από έναν λαό, καθόρισε μακροπρόθεσμα το επίπεδο και την τύχη του πολιτισμού του.

Στη σημερινή εποχή δεν γίνεται πλέον χρήση της αιολικής ενέργειας στη ναυσιπλοΐα, καθώς έχει υπερκεραστεί από την ηλεκτρική, τη μηχανική και την πυρηνική ενέργεια. Η μοναδική εκμετάλλευση των ανέμων γίνεται από τις σύγχρονες ανεμογεννήτριες, οι οποίες αποτελούν την εξέλιξη των προγενέστερων ανεμόμυλων και η χρήση τους εκτείνεται σε

ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, όπως η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η άρδευση και η αφαλάτωση του θαλασσίου νερού.

Ο πρώτος ανεμόμυλος, που συνδέθηκε με ένα δίκτυο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω μιας σύγχρονης γεννήτριας, είχε σχεδιαστεί από τους Smith-Putnam και τοποθετήθηκε στην περιοχή Grandpa's Knob, στο όρος Vermont το 1941. Παρόλο που το γεγονός αυτό αποτέλεσε την αρχή της τεχνολογίας της Αιολικής Ενέργειας, τα αμέσως επόμενα χρόνια δεν ήταν τόσο εποικοδομητικά, καθώς ακολούθησε μια περίοδος που χαρακτηρίστηκε από φτηνά ορυκτά καύσιμα όπως είναι το πετρέλαιο, ο λιγνίτης, το κάρβουνο κτλ, με αποτέλεσμα η τεχνολογία της αιολικής ενέργειας και γενικότερα όλων των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας να εγκαταλειφθεί σε επιχειρησιακό επίπεδο και να περιοριστεί σε ερευνητικό. Το έναυσμα για την επαναξιολόγηση αυτών των τεχνολογιών δόθηκε από την πετρελαϊκή κρίση της δεκαετίας του '70, η οποία ανάγκασε τις κυβερνήσεις να στραφούν σε εναλλακτικές μορφές ενέργειας, που θα περιόριζε την εξάρτησή τους από την οικονομία του πετρελαίου.

1.3 ΣΚΟΠΟΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Σε αντίθεση με άλλες μεταβλητές της ατμόσφαιρας, όπως η θερμοκρασία, η ατμοσφαιρική πίεση και η υγρασία, ο άνεμος είναι ένα διανυσματικό μέγεθος, με πολύ μεγάλη χρονική και χωρική μεταβλητότητα, το οποίο είναι αποτέλεσμα της άμεσης εξάρτησής του από μικρομεταβολές της βαροβαθμίδας και της έντονης επίδρασης που ασκεί το ανάγλυφο σ' αυτό. Αυτό συνεπάγεται, ότι η αξιοποίηση του ανέμου από ανεμογεννήτριες προϋποθέτει σωστή γνώση της δομής του ανέμου, τόσο καθ' ύψος, όσο και στον άμεσο περίγυρο των γεννητριών. Επιπρόσθετα, προϋποθέτει γνώση της μεταβλητότητας του ανέμου σε διάφορες χρονικές κλίμακες, όπως μήνα, εποχή και έτος. Τα στοιχεία αυτά είναι απαραίτητα στη βέλτιστη επιλογή της τοποθεσίας και του τύπου της γεννήτριας, ώστε η εκμετάλλευση του Αιολικού Δυναμικού να καλύψει τις τυχόν ανάγκες, αλλά και τις αναμενόμενες προσδοκίες· γεγονός απαραίτητο, ώστε η εκμετάλλευση του ανέμου να γίνει με βιώσιμο τρόπο.

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη και εφαρμογή μιας μεθοδολογίας, με κύριο σκοπό να ορίσει τα απαραίτητα βήματα, που πρέπει να

ακολουθήσει ο ερευνητής, ώστε να γίνει δυνατή η εγκατάσταση μιας, ή περισσότερων ανεμογεννητριών, με σκοπό της αξιοποίηση του διαθέσιμου Αιολικού Δυναμικού.

Η μελέτη, αρχικά θα περιλαμβάνει μια προκαταρκτική έρευνα των ανεμολογικών συνθηκών στην ευρύτερη περιοχή της Μακεδονίας με τη χρήση δεδομένων από πέντε σταθμούς του δικτύου της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (ΕΜΥ). Στην συνέχεια, θα γίνει μια σε βάθος αναλυτική μελέτη του ανέμου για τον σταθμό του ΑΠΘ, η οποία θα περιλαμβάνει περιγραφή του ανέμου από θεωρητικές κατανομές και προέκτασή του καθ' ύψος με τη χρήση τους. Το επόμενο βήμα περιλαμβάνει τη διάγνωση και εκτίμηση του Αιολικού Δυναμικού, ενώ γίνεται και μια μελέτη των ριπών του ανέμου με σκοπό να προβλεφτεί η συμπεριφορά τους και να αποφευχθούν οι καταστρεπτικές συνέπειες αυτών.

1.4 ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ

Μελέτες στον τομέα της αιολικής ενέργειας, σε επιχειρησιακό αλλά και ερευνητικό επίπεδο, έγιναν από πάρα πολλούς ξένους ερευνητές. Οι κυριότεροι από αυτούς, Justus *et al.* (1976) και Justus (1978), ήταν καθοδηγητές για σχεδόν όλους τους μεταγενέστερους ερευνητές. Μάλιστα, οι παραπάνω ερευνητές ήταν οι πρώτοι που εκτίμησαν το αιολικό δυναμικό για μια εκτεταμένη περιοχή, όπως οι Ηνωμένες Πολιτείες. Μελέτες σχετικές με την αιολική ενέργεια έγιναν επίσης από τον Corotis *et al.* (1978), όπου εκτιμήθηκε η ένταση και η εμμονή του ανέμου με τη χρήση Μοντέλου Πιθανοτήτων (Probability Model). Παράλληλα, με τον ενόργανο υπολογισμό του αιολικού δυναμικού, ξεκίνησαν και οι πρώτες προσπάθειες ανάπτυξης διαγνωστικών αριθμητικών μοντέλων (NOABL) από τον Philips (1979), για τον υπολογισμό της ροής του ανέμου. Παρόλο που ένα τέτοιο μοντέλο παραμετροποιεί τις περισσότερες εξισώσεις που διέπουν την ροή του κατώτερου τμήματος της ατμόσφαιρας, ώστε να είναι προσιτός ο υπολογιστικός χρόνος, έχει αποδειχθεί ότι παρέχει αποτελέσματα εφάμιλλα άλλων πιο σύνθετων μοντέλων. Επίσης θα πρέπει να επισημανθεί η άμεση σχέση που συνδέει τον άνεμο με την τοπογραφία, φαινόμενο που έγινε νωρίς αντιληπτό και έδωσε το έναυσμα για έρευνες, που είχαν σκοπό την εφαρμογή προγραμμάτων αιολικής ενέργειας σε περιοχές, όπου η έντονη τοπογραφία υπαγόρευε ισχυρούς ανέμους. Έτσι, η επιρροή συνοπτικών και τοπογραφικών παραγόντων στον ημερήσιο και εποχιακό κύκλο του ανέμου εξετάστηκε από τους Martner and Marwitz (1982) για τα υψίπεδα της νότιας περιοχής του Wyoming. Επίσης, στα πλαίσια παρόμοιου

προγράμματος, έγινε μελέτη των ακραίων ανέμων στα υψίπεδα της Παταγονίας από τον Labraga (1993). Ενδιαφέρον παρουσιάζουν και οι μελέτες που εξετάζουν τη σχέση των κλιματικών αλλαγών, που στην σημερινή εποχή έχουν γίνει το επίκεντρο πολλών ερευνών, με τις εφαρμογές της αιολικής ενέργειας. Σ' αυτό το πλαίσιο οι Palutikov *et al.* (1987) μελέτησαν μεγάλες χρονοσειρές ανέμου με σκοπό τη μελέτη της επίδρασης των, από έτος σε έτος, μεταβολών της ταχύτητας του ανέμου και των διάφορων κλιματικών αλλαγών, στο εξαγωγίμο (extractable wind potential) Αιολικό Δυναμικό. Τέτοιου είδους κλιματικές αλλαγές τα τελευταία έτη εξετάζονται, όχι μόνο ως αίτιο αλλά και ως το αποτέλεσμα της εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας σε πλανητική κλίμακα. Συγκεκριμένα, οι Keith *et al.* (2004), χρησιμοποιώντας Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας (General Circulation Models, GCM) έφτασαν στο συμπέρασμα ότι η πλανητικής κλίμακας αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού είναι δυνατόν να προκαλέσει μικρές αλλαγές στο κλίμα μεγάλων περιοχών, καθώς είναι ικανή να προκαλέσει μεταβολές στην ανταλλαγή ενεργειακών ροών μέσα στο κατώτερο τμήμα του οριακού στρώματος. Τέλος, δεν θα πρέπει να παραληφθεί και η σημαντική προσπάθεια που έγινε από τους Roje and Cividini (1988) στα πλαίσια της εκτίμησης του αιολικού δυναμικού στην ευρύτερη περιοχή των Βαλκανίων και συγκεκριμένα στην περιοχή της Κροατίας.

Στην Ελλάδα, οι πρώτες προκαταρκτικές μελέτες για την αξιοποίηση του ανέμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έγινε από τον Galanis (1977). Στην δεκαετία του '90 έγιναν από την ΔΕΗ, στα πλαίσια του προγράμματος ΑΙΟΛΟΣ, οι πρώτες κρατικές προσπάθειες για την εκτίμηση του αιολικού δυναμικού με στόχο την εγκατάσταση αιολικών πάρκων σε περιοχές με αξιόλογους ανέμους. Στην προσπάθεια αυτή επιστρατεύτηκε το διαγνωστικό μοντέλο "ΑΙΟΛΟΣ", το οποίο στην ουσία ήταν μια τροποποιημένη έκδοση του διαγνωστικού μοντέλου "NOABL". Η εφαρμογή του προγράμματος έγινε από τα διάφορα Πανεπιστήμια της χώρας, τα οποία ανέλαβαν την διεξαγωγή της έρευνας στις ευρύτερες περιοχές της περιφέρειάς τους. Έτσι ο Τομέας Μετεωρολογίας-Κλιματολογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης ανέλαβε τη μελέτη του αιολικού δυναμικού στην κεντρική και ανατολική Μακεδονία και Θράκη (Φλόκας, 1987), το Πανεπιστήμιο Πατρών ανέλαβε την περιοχή της Πελοποννήσου, το Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων ανέλαβε την περιοχή της Ηπείρου, ενώ το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο και το Δημόκριτο Πανεπιστήμιο Αθηνών ανέλαβαν την περιοχή του Αιγαίου, της Θεσσαλίας και της Στερεάς Ελλάδας. Χρήση διαγνωστικών

μοντέλων που αποτελούν τροποποιημένη έκδοση του μοντέλου NOABL έγινε και για την εκτίμηση του αιολικού δυναμικού μικρότερων περιοχών, όπως για την Περιοχή του Ολύμπου, από τον Μπλούτσο (1989), και για την περιοχή της Κέρκυρας από τους Katsoulis και Metaxas (1992). Μελέτες μικρής γεωγραφικής κλίμακας, πάνω στο αιολικό δυναμικό, έγιναν και με συμβατικά μέσα (ανεμόμετρα), χωρίς τη χρήση διαγνωστικού μοντέλου, όπως πχ. στην ορεινή περιοχή του Ολύμπου (Μπαλαφούτης και Αρσένη, 1992), καθώς και στην θαλάσσια περιοχή της Νάξου (Αρσένη, 1988), περιοχές, όπως αποδείχθηκε, με υψηλά αποθέματα αιολικού δυναμικού.

Στην Ελλάδα, οι μελέτες πάνω στο αιολικό δυναμικό δεν περιορίστηκαν μόνο σε επιχειρησιακό επίπεδο, αλλά έγιναν και επιμέρους μελέτες, κυρίως σε ερευνητικό επίπεδο. Οι Lalas *et al.* (1983), μετά από εξέταση του ανέμου με βάση 3, 8 και 24 ημερήσιες τιμές της ταχύτητας ανέμου, κατέληξαν ότι τα αποτελέσματα που εξάγονται δεν είχαν σημαντικές διαφορές. Ο Katsoulis (1993), υιοθετώντας την κατανομή Weibull για την περιγραφή της ταχύτητας του ανέμου χαρτογράφησε την κατανομή των παραμέτρων κλίμακας και σχήματος της κατανομής Weibull σε ολόκληρο τον Ελλαδικό χώρο. Ένα πολύ εύχρηστο εργαλείο για τη χρήση της ίδιας κατανομής αποτελεί επίσης και η αξιολόγηση των διαφόρων μεθόδων υπολογισμού των παραμέτρων κλίμακας και σχήματος που έγινε από τους Καρακώστα κ.α. (1988). Τέλος, δεν θα πρέπει να παραληφθεί το γεγονός, ότι ο άνεμος μελετήθηκε στον Ελλαδικό χώρο και έξω από τα πλαίσια της αιολικής ενέργειας, όπως παραδείγματος χάρη έγινε από τη Ρωσσίαδου (1998), η οποία μελέτησε το μέσο ισοβαρικό πεδίο, καθώς και το πεδίο του ανέμου στην επιφάνεια της θάλασσας, στην περιοχή του Αιγαίου.

1.5 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η περιοχή που επιλέχτηκε για τη μελέτη του ανέμου και της προοπτικής εφαρμογής προγραμμάτων αιολικής ενέργειας, είναι η κεντρική και δυτική Μακεδονία, η Θράκη, το βόρειο Αιγαίο και η ανατολική Θεσσαλία (σχήμα 1). Το κύριο χαρακτηριστικό αυτής της περιοχής είναι η έντονη εναλλαγή των φυσικών χαρακτηριστικών της επιφάνειας του εδάφους, χαρακτηριστικό γενικά για τον Ελλαδικό χώρο. Τα κύρια φυσικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης είναι η θαλάσσια περιοχή του Βόρειου Αιγαίου, η οποία περιβάλλεται από το ηπειρωτικό τμήμα της Βόρειας Ελλάδας. Με εξαίρεση την

θαλάσσια περιοχή, το υπόλοιπο τμήμα δεν χαρακτηρίζεται από εκτεταμένες επίπεδες επιφάνειες, καθώς αποτελείται από μικρές και διάσπαρτες πεδιάδες, που εναλλάσσονται συνεχώς με ημιορεινές περιοχές, αλλά και ορεινούς όγκους με υψόμετρο μεγαλύτερο από 2000 μέτρα. Όπως είναι φυσικό, οι σταθμοί που θα χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση είναι τοποθετημένοι σε περιοχές με έντονο το φάσμα της γεωμορφολογίας, όπως φαίνεται στο σχήμα 1. Έτσι, οι σταθμοί της Λάρισας και της Χρυσούπολης βρίσκονται στο κέντρο ομαλών πεδιάδων, οι οποίες περιβάλλονται από υψηλούς ορεινούς όγκους. Επίσης, ο σταθμός της Κοζάνης βρίσκεται σε μια υψίπεδη ημιορεινή περιοχή, η οποία περιβάλλεται ασφυκτικά από οροσειρές με μεγάλο υψόμετρο. Αντίθετα, οι σταθμοί της Αλεξανδρούπολης, της Θεσσαλονίκης (Αεροδρομίου) και της Αγχιάλου βρίσκονται σε επίπεδες περιοχές, οι οποίες όμως γειτονεύουν από την μια με θαλάσσιες περιοχές και από την άλλη με ημιορεινές περιοχές. Σε μια παρόμοια περιοχή βρίσκεται και ο σταθμός του Τομέα Μετεωρολογίας-Κλιματολογίας του ΑΠΘ, με τη διαφορά το έντονο αστικό περιβάλλον του κέντρου της Θεσσαλονίκης. Τέλος, ο σταθμός της Λήμνου βρίσκεται σε ένα μικρό και σχετικά επίπεδο νησί, μακριά από άλλους ηπειρωτικούς όγκους.



Σχήμα 1. Γεωφυσικός χάρτης της περιοχής μελέτης και γεωγραφική κατανομή των μετεωρολογικών σταθμών.

Όπως είναι φυσικό, μια ευμετάβολη μετεωρολογική παράμετρος, όπως ο άνεμος, είναι δύσκολο να περιγραφεί αναλυτικά σε μια περιοχή με τέτοια γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά. Για αυτό το λόγο είναι απαραίτητο, να γίνει σαφές από την αρχή, το

γεγονός, ότι τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που θα προκύψουν από την ανάλυση, θα πρέπει να αξιολογηθούν με μεγάλη προσοχή.

1.6 ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν διανυσματικές τιμές ανέμου από οχτώ σταθμούς της Βόρειας Ελλάδας, των οποίων τα γεωφυσικά χαρακτηριστικά απεικονίζονται στον Πίνακα 1.1. Οι επτά ανήκουν στο δίκτυο της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας, και συγκεκριμένα είναι οι σταθμοί της Αλεξανδρούπολης, της Λήμνου, της Λάρισας, της Κοζάνης, της Χρυσούπολης και της Ν. Αγχιάλου, ενώ ο τελευταίος ανήκει στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ).

Πίνακας 1. Φυσικά χαρακτηριστικά των μετεωρολογικών σταθμών, τα στοιχεία των οποίων χρησιμοποιούνται στην μελέτη αυτή.

	Υψόμετρο (m)	Ύψος οργάνου (m)	Φυσικός περίγυρος ανεμομέτρου
Αλεξ/πολη	2,5	15	Επίπεδη και ανοιχτή περιοχή, χωρίς εμπόδια, στην κορυφή κτηρίου
Θες/νίκη ΑΠΘ	32	16,4	Έντονο αστικό περιβάλλον, κέντρο της πόλης, στην κορυφή κτηρίου
Θες/νίκη Αεροδρόμιο	6	3	Επίπεδη ανοιχτή περιοχή, με λίγα εμπόδια (γειτονικά κτήρια)
Κοζάνη	625	6	Επίπεδη περιοχή, προάστια
Λάρισα	72,7	15	Επίπεδη περιοχή, λίγα εμπόδια
Λήμνος	3	13,4	Επίπεδη περιοχή, με λίγα εμπόδια, στην κορυφή κτηρίου
Ν. Αγχιάλος	14,6	6	Επίπεδη, ανοιχτή περιοχή
Χρυσούπολη	4,6	6	Επίπεδη, ανοιχτή περιοχή

Τα δεδομένα από το δίκτυο της ΕΜΥ αποτελούνται από παρατηρήσεις ταχύτητας και διεύθυνσης του ανέμου, που λαμβάνονται κάθε τρεις ώρες, ενώ του σταθμού του ΑΠΘ αποτελούνται από παρατηρήσεις, που λαμβάνονται κάθε μία ώρα. Οι χρονοσειρές από τους σταθμούς της Αλεξανδρούπολης, της Θεσσαλονίκης, της Κοζάνης, της Αγχιάλου, της Λάρισας και της Λήμνου καλύπτουν περίοδο είκοσι ετών (1981-2001) και τα κενά που εντοπίστηκαν αποτελούν το 1,73%, 0,2%, 7,57%, 0,02%, 0% και 1,41% των πλήρων χρονοσειρών, αντίστοιχα. Τα δεδομένα του σταθμού της Χρυσούπολης καλύπτουν περίοδο δεκαέξι ετών (1985-2001) και τα κενά της ήταν της τάξης του 6,88% της πλήρους χρονοσειράς. Τέλος ο σταθμός του ΑΠΘ μας παρέχει ωριαίες παρατηρήσεις ανέμου για

έξι χρόνια (1997-2002) και δεν υπάρχουν κενά. Εδώ είναι απαραίτητο να σημειωθεί η δυσκολία που χαρακτηρίζει τη συλλογή των ανεμολογικών δεδομένων, καθώς και την δυσκολία συμπλήρωσης των κενών στις χρονοσειρές ταχύτητας και διεύθυνσης, κάτι που δεν είναι τόσο έντονο με άλλες μετεωρολογικές παραμέτρους, που είναι μονόμετρα μεγέθη, όπως πχ. η θερμοκρασία και η πίεση. Αυτός είναι ο βασικός λόγος για τον οποίο αποφασίστηκε να μην συμπληρωθούν τα κενά των επιμέρους 3-ωρων παρατηρήσεων ταχύτητας και διεύθυνσης του ανέμου που παρουσιάστηκαν στις χρονοσειρές μας, τα οποία τελικά, δεδομένο ότι σε κάθε περίπτωση αποτελούσαν πολύ λιγότερο από το 10% των παρατηρήσεων, δεν συμπεριλήφθησαν στην τελική μελέτη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

Περιγραφή των κλιματικών χαρακτηριστικών του ανέμου για τους σταθμούς της Βόρειας Ελλάδας

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

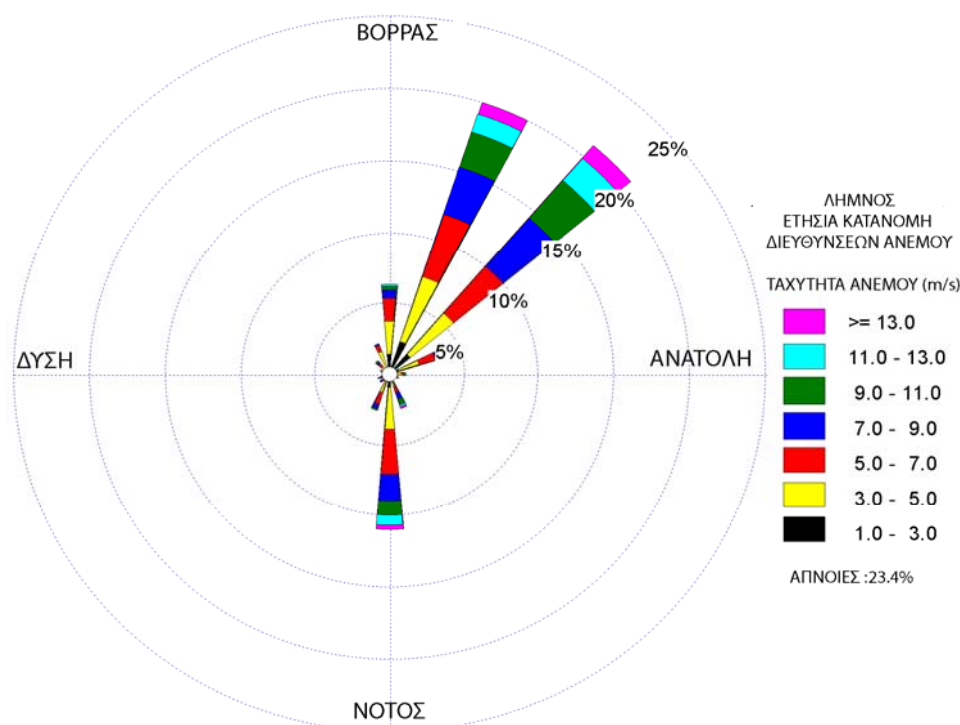
Η έρευνα και η σε βάθος μελέτη του ανέμου είναι αναγκαία και επιτακτική πριν την εφαρμογή προγραμμάτων Αιολικής Ενέργειας, ώστε να διερευνηθεί η βιωσιμότητα αυτών των προγραμμάτων, όταν υλοποιηθούν. Τα πρώτα βήματα μιας τέτοιας μελέτης πρέπει να περιλαμβάνουν τη μελέτη της κατανομής της διεύθυνσης του ανέμου, καθώς έτσι εξάγεται μια πρώτη εικόνα του πεδίου του ανέμου στον ευρύτερο περίγυρο του σταθμού. Παράλληλα, κατά αυτό τον τρόπο διευκολύνεται ο προσδιορισμός των συνοπτικών και τοπικών ανέμων, που συμβάλλουν στο αιολικό δυναμικό της περιοχής, γεγονός χρήσιμο στην διερεύνηση της καταλληλότητας της περιοχής του σταθμού για την αξιοποίηση του ανέμου.

Με βάση αυτό το σκεπτικό, παρουσιάζεται η κατανομή της διεύθυνσης του ανέμου, με τη χρήση ροδογραμμάτων, για όλους τους σταθμούς που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη. Η περιγραφή, η οποία ξεκινά από τους σταθμούς με έντονα θαλάσσια χαρακτηριστικά και καταλήγει στους σταθμούς με έντονα ηπειρωτικά χαρακτηριστικά, γίνεται κατά εποχή, με εξαίρεση τους Μετεωρολογικούς σταθμούς της Θεσσαλονίκης και της Ν. Αγχιάλου, όπου η ετήσια περίοδος χωρίστηκε σε δύο υποπεριόδους, λόγω της εμφάνισης καταστάσεων θαλάσσιας αύρας την θερμή περίοδο του έτους, η οποία διαφοροποιούσε την κατανομή της διεύθυνσης του ανέμου σε σχέση με την υπόλοιπη περίοδο. Τα εποχιακά ροδογράμματα παρουσιάζονται στο παράρτημα Β, ενώ στο κείμενο παρουσιάζονται μόνο τα ετήσια ροδογράμματα.

2.2 ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ ΤΗΣ ΛΗΜΝΟΥ

Η εποχική μελέτη του ανέμου, ξεκινώντας από το σταθμό της Λήμνου, έδειξε ότι, την άνοιξη, επικρατούν οι διευθύνσεις ΒΒΑ (Βόρειος-ΒορειοΑνατολικός), ΒΑ

(ΒορειοΑνατολικός) και Ν (Νότιος) με συχνότητες 18, 16 και 16%, αντίστοιχα (παράρτημα Β). Οι υπόλοιπες διευθύνσεις έχουν ελάχιστη συμμετοχή και μόνο η Β ξεχωρίζει με συχνότητα 5%. Το καλοκαίρι, οι ΒΒΑ άνεμοι (συχνότητα 32%) υπερτερούν, με διαφορά, έναντι των άλλων και ακολουθούν οι άνεμοι με διεύθυνση Β και ΒΑ (συχνότητα 12 και 15%, αντίστοιχα). Από τις άλλες διευθύνσεις μόνο η Ν παρουσιάζει μια αξιοσημείωτη συμμετοχή στον άνεμο με συχνότητα 6%. Το φθινόπωρο επικρατούν ΒΑ άνεμοι με συχνότητα εμφάνισης 25% και ακολουθούν ΒΒΑ και Ν άνεμοι με συχνότητες 19% και 11%, αντίστοιχα.

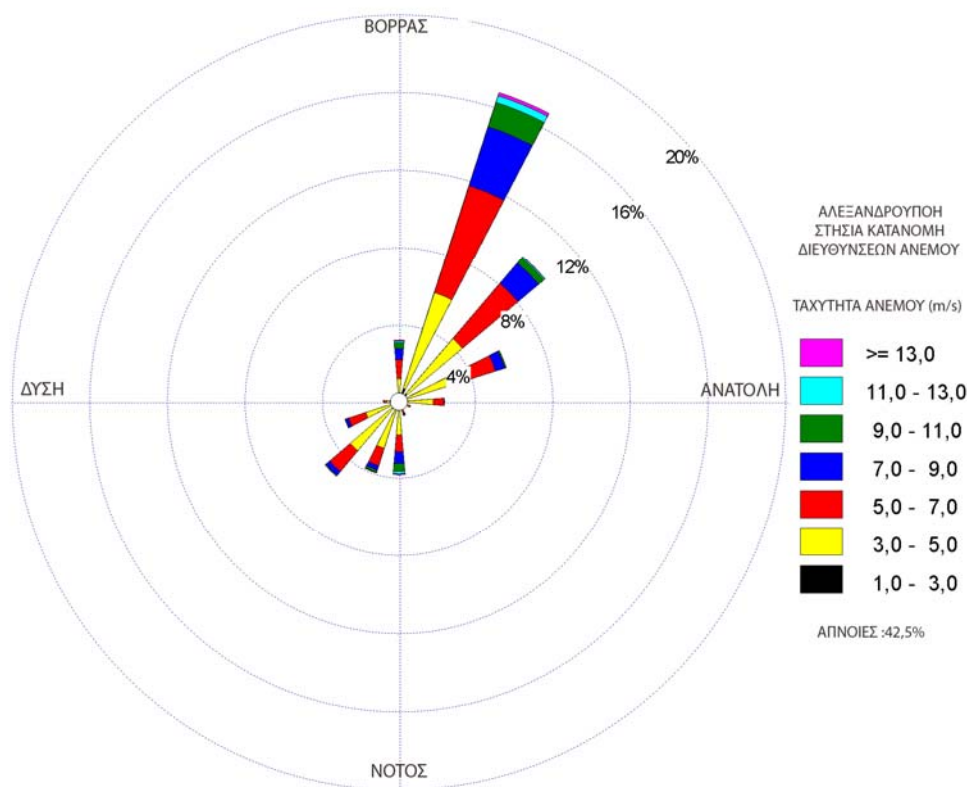


Σχήμα 2.1. Μέση ετήσια κατανομή των διευθύνσεων του σταθμού της Λήμνου, για την περίοδο 1981-2001.

Το χειμώνα παρατηρείται ελάχιστη διαφοροποίηση σε σχέση με το φθινόπωρο με τους ΒΑ ανέμους να επικρατούν, με συχνότητα 28%, έναντι των ΒΒΑ, ΑΒΑ και Ν ανέμων, οι οποίοι έχουν συχνότητες 11, 8, και 11%, αντίστοιχα. Εδώ θα πρέπει να επισημανθεί, ότι η επικράτηση ανέμων Β και ΒΑ τομέα το θερινό εξάμηνο, οφείλεται, όπως έχει αναφερθεί από την Αρσένη (1984) στους Ετησίες Ανέμους, που πνέουν στην περιοχή του Αιγαίου. Δεν θα πρέπει επίσης να παραληφθεί και το γεγονός, ότι παρουσιάστηκαν μικρές διαφορές στα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση, με

αντίστοιχα που βρέθηκαν από άλλους ερευνητές (Μαχαίρας, 1983), γεγονός, που ίσως να οφείλεται στις διαφορετικές περιόδους μελέτης.

Τέλος, οι ανεμολογικές συνθήκες του σταθμού της Λήμνου χαρακτηρίζονται σε ποσοστό 23% από άπνοιες σε ετήσια βάση, με το μέγιστο ποσοστό (25%), να λαμβάνει χώρα την άνοιξη και το ελάχιστο (19%), να λαμβάνει χώρα το καλοκαίρι. Κατά συνέπεια, η μέση ταχύτητα του σταθμού της Λήμνου, η οποία είναι από τις υψηλότερες για τη χώρα μας, έχει την ελάχιστη τιμή (4,3m/s) την άνοιξη και την υψηλότερη (5,6m/s) το χειμώνα.



Σχήμα 2.2. Μέση ετήσια κατανομή των διευθύνσεων του σταθμού της Αλεξανδρούπολης, για την περίοδο 1981-2001.

2.3 ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ ΤΗΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗΣ

Οι ανεμολογικές συνθήκες του σταθμού της Αλεξανδρούπολης εμφανίζουν ομοιότητες με αυτές του σταθμού της Λήμνου. Οι επικρατούντες άνεμοι έχουν ΒΒΑ διεύθυνση, για όλες τις εποχές του έτους, με το ποσοστό να κυμαίνεται από 13% για την εποχή της άνοιξης, μέχρι 20% για το χειμώνα (παράρτημα Β). Η κατανομή των διευθύνσεων για την εποχή της άνοιξης είναι όμοια με αυτή του καλοκαιριού, με τους

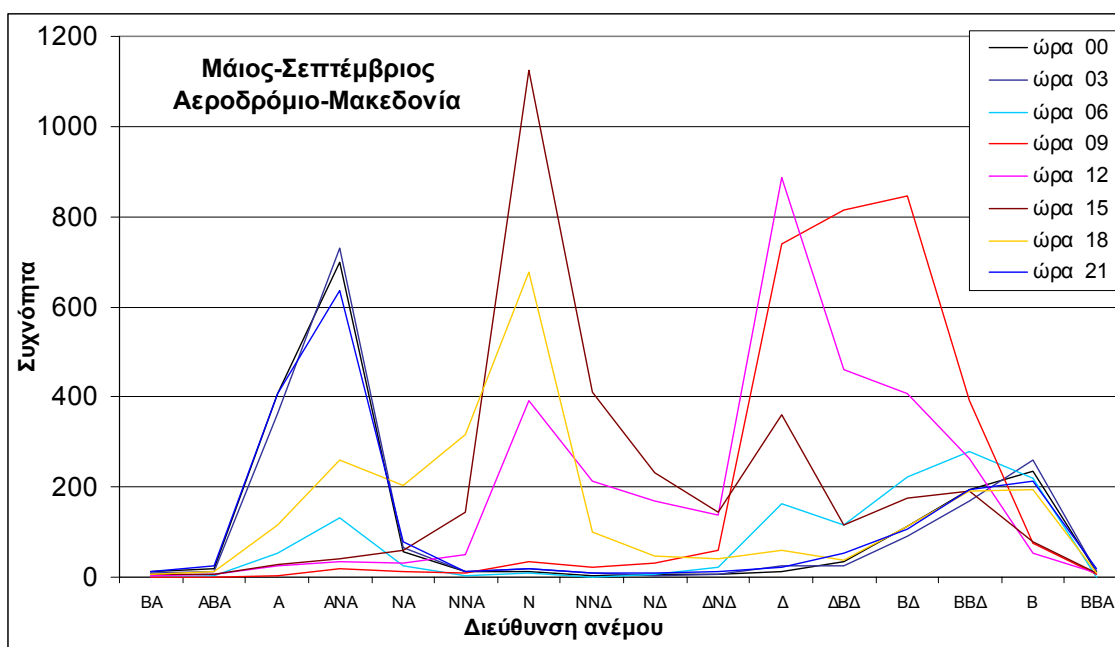
ανέμους βορειοανατολικού τομέα (BBA, BA και ABA) να επικρατούν με ποσοστό 28% και τους ανέμους νοτιοδυτικού τομέα (NND, ND και ΔND) να ακολουθούν με ποσοστό 15%. Αντίθετα, για το φθινόπωρο και το χειμώνα, οι άνεμοι βορειοανατολικού τομέα επικρατούν με ποσοστό 35%, ενώ οι υπόλοιπες διευθύνσεις έχουν πολύ μικρή συμμετοχή στο Αιολικό Δυναμικό της περιοχής. Χαρακτηριστικό επίσης είναι και η σχετική απουσία ανέμων ΒΔ και ΝΔ τομέα, για όλες τις εποχές.

Όσον αφορά την ένταση του ανέμου, αυτή χαρακτηρίζεται από υψηλό ποσοστό άπνοιας, το οποίο για το χειμώνα είναι 39% και φτάνει το 43% για τις υπόλοιπες εποχές. Το υψηλότερο Αιολικό Δυναμικό αντιστοιχεί στο χειμώνα και οφείλεται στο χαμηλότερο ποσοστό άπνοιας και στην υψηλότερη μέση ταχύτητα (3,0 m/s), ενώ το χαμηλότερο Αιολικό Δυναμικό αντιστοιχεί στο καλοκαίρι, καθώς είναι η εποχή με τη μικρότερη μέση ταχύτητα (2,6 m/s).

2.4 ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ ΤΗΣ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ – “ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΟ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ”

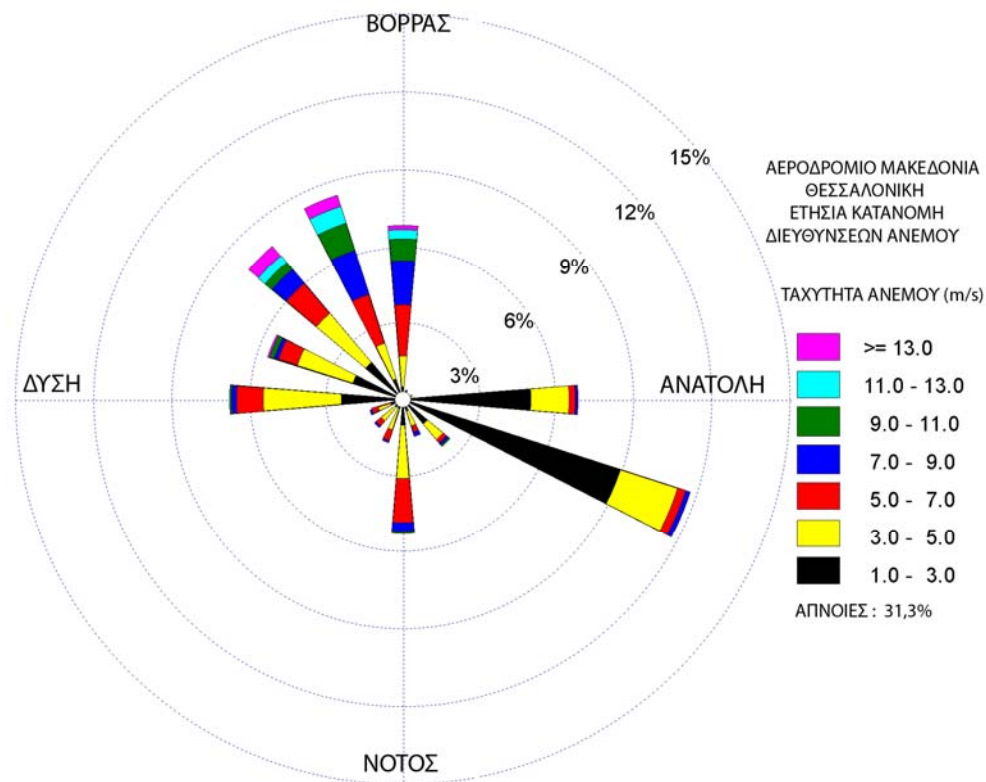
Ο σταθμός της Θεσσαλονίκης χαρακτηρίζεται από τη σχετικά υψηλή μέση ταχύτητα, την υψηλότερη μετά τον σταθμό της Λήμνου. Σ’ αυτό είναι βέβαιο ότι σημαντικό ρόλο παίζουν και οι υψηλές ταχύτητες των ΒΔ, ΒΒΔ και Β ανέμων, που χαρακτηρίζουν τις καταστάσεις Βαρδάρη, που λαμβάνουν μέρος καθ’ όλη τη διάρκεια του έτους (Ψαρή, 2005) και οι οποίες είναι βέβαιο ότι παίζουν σημαντικό ρόλο στο αιολικό δυναμικό της περιοχής. Ένα άλλο χαρακτηριστικό ανεμολογικό φαινόμενο, που συμβάλλει στο αιολικό δυναμικό της περιοχής είναι, χωρίς αμφιβολία, η επικράτηση καταστάσεων θαλάσσιας αύρας, η οποία σύμφωνα με προηγούμενες μελέτες (Σαχσαμάνογλου, 1985), πνέει όλο το έτος. Παρόλα αυτά, την περίοδο Μαΐου-Σεπτεμβρίου γίνονται περισσότερο εμφανή τα χαρακτηριστικά της θαλάσσιας αύρας και γι’ αυτό το λόγο επιλέχτηκε να μελετηθεί ο άνεμος για τις υποπεριόδους Μαΐου-Σεπτεμβρίου και Οκτωβρίου-Απριλίου. Στο Σχήμα 2.3 παρουσιάζεται η συσχέτιση της διεύθυνσης του ανέμου με την ώρα της ημέρας για την περίοδο Μαΐου-Σεπτεμβρίου. Συγκεκριμένα, τις πρωινές ώρες, η διεύθυνση του ανέμου είναι κυρίως ΔΒΔ, ΒΔ και Δ, με συνολική συχνότητα που φτάνει το 55-75%. Στη συνέχεια, τις μεσημεριανές και απογευματινές ώρες, οι Ν, NND και NNA άνεμοι επικρατούν συντριπτικά έναντι όλων των υπόλοιπων διευθύνσεων, με συνολική συχνότητα

43%. Τελικά, αυτός ο ημερήσιος κύκλος συμπληρώνεται με την επικράτηση των Α, ΑΝΑ και ΝΑ ανέμων κατά την διάρκεια της νύχτας, οι οποίοι όμως, ενώ έχουν αρκετά σημαντική συχνότητα εμφάνισης (36%), δεν έχουν σημαντική συνεισφορά στο αιολικό δυναμικό της περιοχής, καθώς είναι μικρής έντασης. Επίσης, κατά το ίδιο χρονικό διάστημα της ημέρας, εμφανίζεται και το μεγαλύτερο ποσοστό άπνοιας, με συχνότητα από 43 μέχρι 61% . Αξιοσημείωτο είναι επίσης και η απουσία καταστάσεων άπνοιας κατά την διάρκεια των μεσημεριανών ωρών, γεγονός σημαντικό για τον τομέα της αιολικής ενέργειας. Επιπρόσθετα, θα πρέπει να παρατηρηθεί το γεγονός της απουσίας ανέμων ΒΑ τομέα.



Σχήμα 2.3. Ημερήσιος κύκλος της διεύθυνσης του ανέμου, της περιόδου Μάιος-Σεπτέμβριος, για τον σταθμό της Θεσσαλονίκης (ώρες UTC). Διάγραμμα θαλάσσιας και απόγειας αύρας.

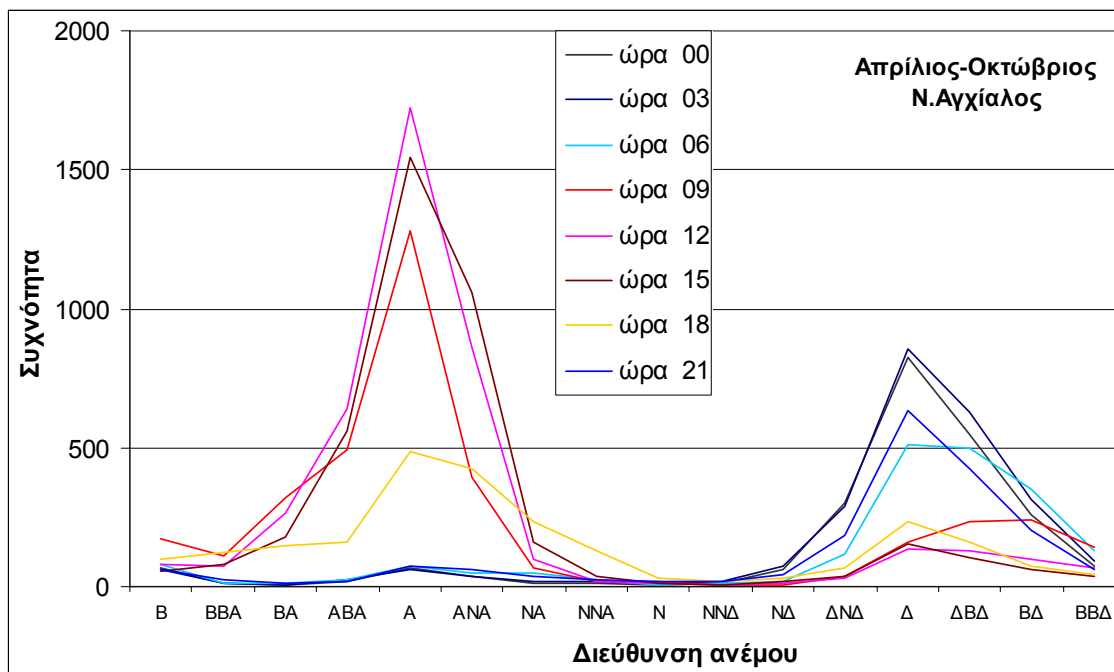
Αντίθετα, κατά τη διάρκεια της περιόδου Οκτωβρίου-Απριλίου, παρόλο το γεγονός, ότι ο ημερήσιος ανεμολογικός κύκλος της θαλάσσιας και απόγειας αύρας διατηρείται σε γενικές γραμμές, δεν είναι τόσο ξεκάθαρος. Το αποτέλεσμα είναι η συνολική εικόνα να παρουσιάζεται διαφορετική σε σύγκριση με την προηγούμενη περίοδο. Έτσι, οι Α, ΑΝΑ και ΝΑ άνεμοι εμφανίζουν αυξημένη συχνότητα, ενώ αντίθετα οι Ν, ΝΝΔ και ΝΝΑ εμφανίζονται μειωμένοι. Επίσης οι Β, ΒΒΔ και ΒΔ άνεμοι είναι ελαφρά αυξημένοι, ενώ οι ΔΒΔ και Δ είναι ελαφρά μειωμένοι.



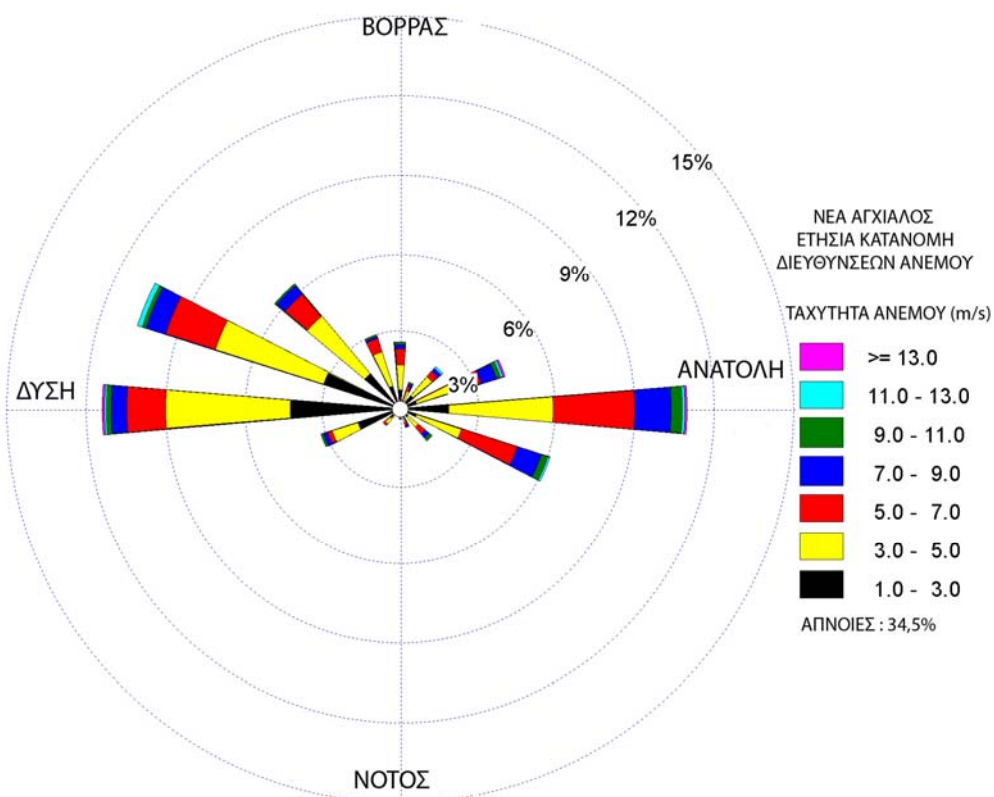
Σχήμα 2.4 Μέση ετήσια κατανομή των διευθύνσεων του σταθμού της Θεσσαλονίκης, για την περίοδο 1981-2001.

2.5 ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ ΤΗΣ ΝΕΑΣ ΑΓΧΙΑΛΟΥ

Όπως και στην περίπτωση του σταθμού της Θεσσαλονίκης, ο άνεμος στον σταθμό της Ν. Αγχιάλου εμφανίζει δύο ετήσιες υποπεριόδους, κατά τις οποίες η κατανομή της διεύθυνσής του εμφανίζει ξεχωριστά χαρακτηριστικά. Συγκεκριμένα, η περίοδος Απριλίου-Οκτωβρίου, η οποία είναι παρατεταμένη κατά δύο μήνες σε σχέση με την αντίστοιχη του σταθμού της Θεσσαλονίκης, εμφανίζει μια αντιστροφή της διεύθυνσης του ανέμου από τις ημερήσιες στις νυχτερινές ώρες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5. Ο άνεμος, κατά τη διάρκεια της ημέρας, σύμφωνα με τις παρατηρήσεις των 09, 12, 15, 16 ωρών (ώρες UTC), πνέει σχεδόν αποκλειστικά από διευθύνσεις με ανατολική συνιστώσα. Το φαινόμενο αυτό ίσως να οφείλεται σε καταστάσεις θαλάσσιας αύρας που δημιουργούνται ανάμεσα στην θάλασσα του κόλπου της Μαγνησίας και της παρακείμενης ξηράς, που βρίσκεται στη δυτικά της. Η επιχειρηματολογία αυτή ενισχύεται από το γεγονός, ότι κατά την διάρκεια της νύχτας, σύμφωνα με τις παρατηρήσεις των 21, 00, 03, 06 ωρών (ώρες



Σχήμα 2.5 Ημερήσιος κύκλος της διεύθυνσης του ανέμου, της περιόδου Μάιος-Σεπτέμβριος, για τον σταθμό της Ν. Αγχιάλου (ώρες UTC). Διάγραμμα θαλάσσιας και απόγειας αύρας.



Σχήμα 2.6 Μέση ετήσια κατανομή των διευθύνσεων του σταθμού της Νέας Αγχιάλου, για την περίοδο 1981-2001.

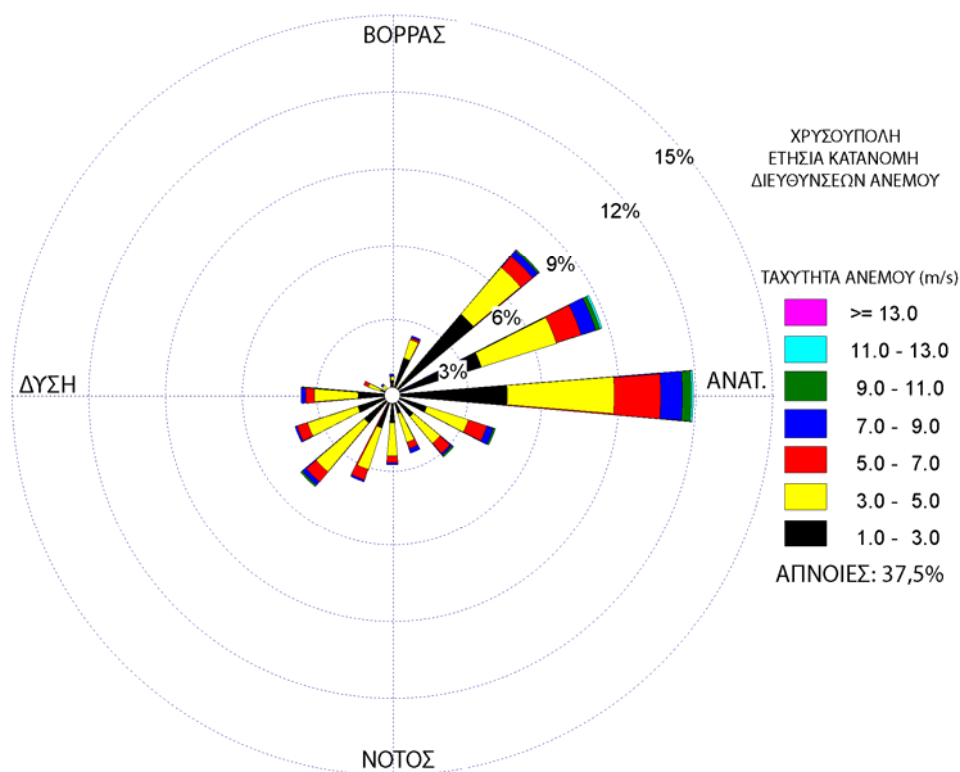
UTC), ο άνεμος στρέφεται σε διευθύνσεις με δυτική συνιστώσα, χαρακτηριστικό φαινόμενο της νυχτερινής αύρας. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ένταση των ανέμων κατά τη διάρκεια της ημέρας χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλότερες ταχύτητες και πολύ λιγότερες καταστάσεις άπνοιας σε σχέση με τη νύχτα. Έτσι, τη νύχτα, η μέση ταχύτητα και οι άπνοιες είναι της τάξης των 1,7m/s και 52%, αντίστοιχα, ενώ για την ημέρα τα μεγέθη είναι 4,0m/s και 19%, αντιστοίχως.

Την περίοδο Νοεμβρίου-Μαρτίου, ανεξάρτητα από την ώρα της ημέρας, οι βασικές διευθύνσεις του ανέμου είναι περισσότερες. Έτσι οι κύριες διευθύνσεις είναι Δ και ΝΔ με συχνότητες 14 και 15% αντίστοιχα, ενώ ακολουθούν οι ΒΔ, ΔΒΔ και Α με συχνότητες 9, 6 και 6%, αντίστοιχα. Τέλος οι άπνοιες αποτελούν το 33% των παρατηρήσεων, ενώ η μέση ταχύτητα του ανέμου είναι 3m/s.

2.6 ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ ΤΗΣ ΧΡΥΣΟΥΠΟΛΗΣ

Μια πρώτη εικόνα που αποκτά κανείς μελετώντας τα εποχιακά ροδογράμματα (παράρτημα Β) για το σταθμό της Χρυσούπολης είναι ότι η κατανομή των διευθύνσεων δεν αλλάζει σημαντικά κατά τη διάρκεια του έτους. Για όλες τις εποχές, οι ανατολικοί άνεμοι επικρατούν έναντι των άλλων και η συχνότητά τους κυμαίνεται στο 10 με 13%. Αμέσως ακολουθούν οι ΑΝΑ άνεμοι με συχνότητα 7 με 10%, ενώ οι ΝΑ άνεμοι έρχονται τρίτοι σε συχνότητα εμφάνισης, και πνέουν σταθερά κατά τη διάρκεια όλων των εποχών για το 8% των ημερών. Αξιοσημείωτο είναι και το γεγονός ότι οι διευθύνσεις του νότιου τομέα, αν και με μικρή συχνότητα, γύρω στο 3% για την κάθε μια, συμμετέχουν όλες στο Αιολικό Δυναμικό της περιοχής του σταθμού, σε αντίθεση με τις διευθύνσεις του βορειοανατολικού τομέα, οι οποίες απουσιάζουν. Όσον αφορά τις άπνοιες, ο σταθμός της Χρυσούπολης εμφανίζει σχετικά μεγάλη εποχιακή μεταβλητότητα, με το φθινόπωρο να παρουσιάζει τις λιγότερες άπνοιες, 31%, και την άνοιξη να παρουσιάζει τις περισσότερες, 41%.

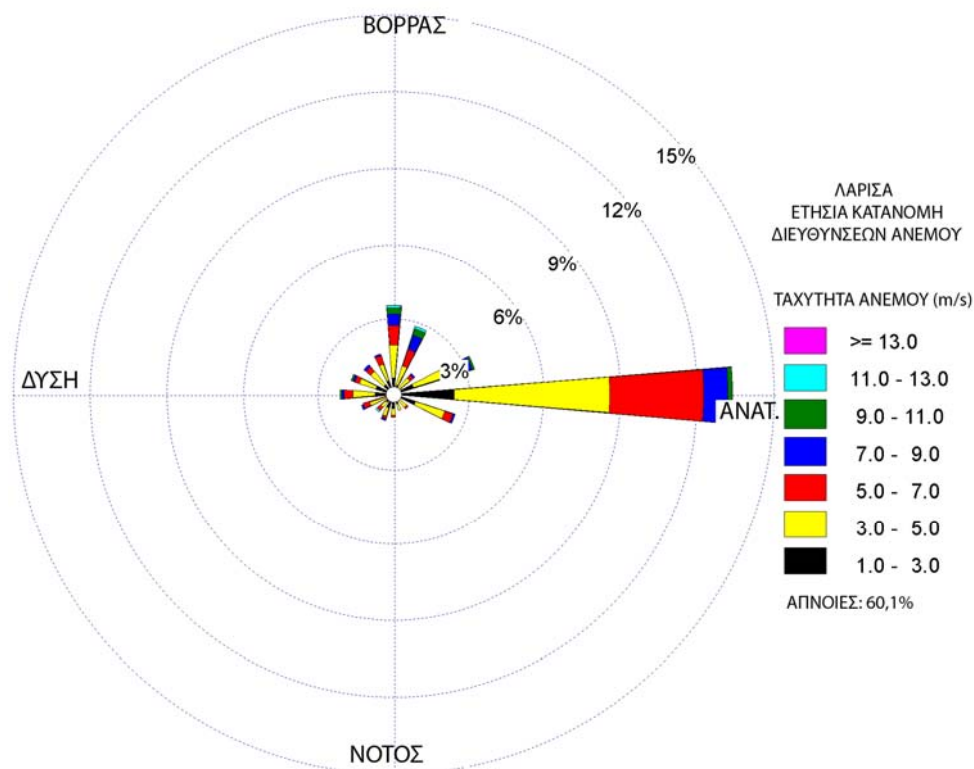
Την ίδια εποχιακή σταθερότητα, που παρουσιάζει η κατανομή των διευθύνσεων, εμφανίζει και η κατανομή των ταχυτήτων και η μέση ταχύτητα. Έτσι, η μέση ταχύτητα κυμαίνεται από 2m/s για την άνοιξη και το καλοκαίρι, μέχρι 2,5m/s για το φθινόπωρο και το χειμώνα.



Σχήμα 2.7 Μέση ετήσια κατανομή των διευθύνσεων του Μετεωρολογικού Σταθμού της Χρυσούπολης, για την περίοδο 1985-2001.

2.7 ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ ΤΗΣ ΛΑΡΙΣΑΣ

Ο σταθμός της Λάρισας, όπως και ο σταθμός της Κοζάνης, χαρακτηρίζεται από το πολύ μεγάλο ποσοστό άπνοιας, το μεγαλύτερο από το αντίστοιχο ποσοστό των άλλων σταθμών, καθώς και από τη πολύ μεγάλη μεταβλητότητα, όσο αφορά το ποσοστό άπνοιας. Έτσι, οι άπνοιες αποτελούν το 61% των μετρήσεων σε ετήσια βάση, με τις ελάχιστες, 49%, να εμφανίζονται το καλοκαίρι, ενώ οι περισσότερες, 71%, το χειμώνα (παράρτημα Β). Το δεύτερο βασικό χαρακτηριστικό του ανέμου αποτελεί η έντονη επικράτηση των ανατολικών ανέμων, σε βάρος όλων των υπολοίπων διευθύνσεων, για όλο το έτος, με εξαίρεση την εποχή του χειμώνα. Συγκεκριμένα, οι ανατολικοί άνεμοι έχουν συχνότητα 15%, 22% και 13% για την άνοιξη, το καλοκαίρι και το φθινόπωρο, αντίστοιχα, με το χειμώνα να διαφοροποιείται ελαφρά η κατάσταση. Έτσι, το χειμώνα, οι βασικές διευθύνσεις είναι οι Β, ΒΒΑ και Α με συχνότητες 5%, 3% και 5%, αντίστοιχα. Τέλος, η μέση ταχύτητα του ανέμου εμφανίζεται μειωμένη το χειμώνα και το φθινόπωρο, με τιμή 1,3m/s, ενώ την άνοιξη και το καλοκαίρι εμφανίζεται αυξημένη, με τιμή 2,0m/s.

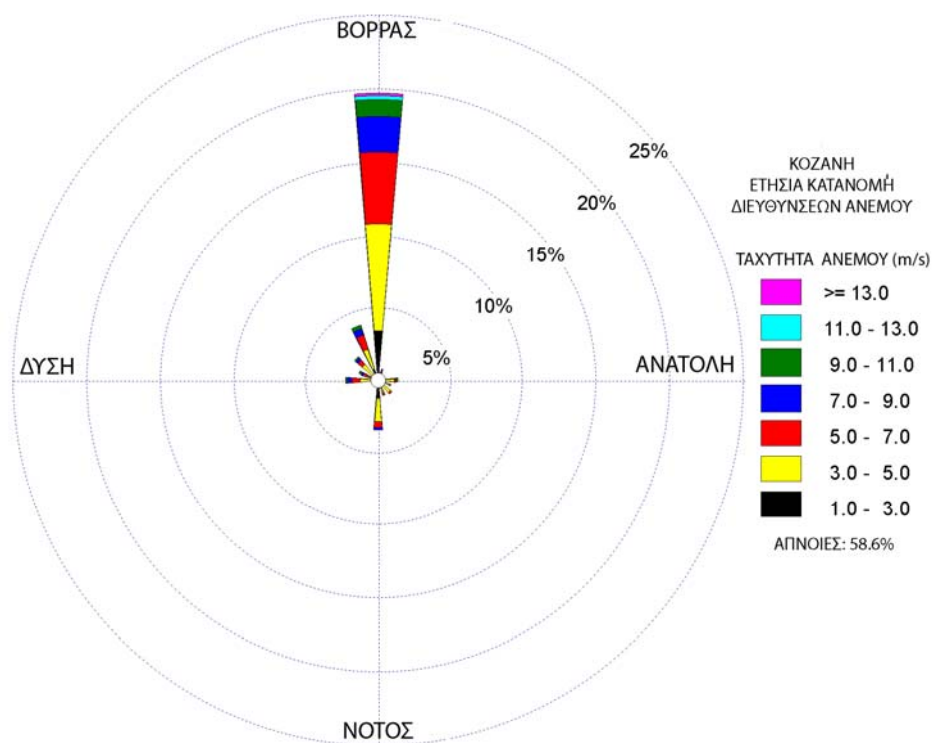


Σχήμα 2.8 Μέση ετήσια κατανομή των διευθύνσεων του σταθμού της Λάρισα, για την περίοδο 1981-2001.

2.8 ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ ΤΗΣ ΚΟΖΑΝΗΣ

Οι ανεμολογικές συνθήκες στο σταθμό της Κοζάνης παρουσιάζουν σταθερότητα κατά τη διάρκεια του έτους, με ελάχιστες διαφορές από εποχή, σε εποχή. Το κύριο χαρακτηριστικό είναι το μεγάλο ποσοστό άπνοιας, το οποίο κυμαίνεται γύρω στο 59% και για τις τέσσερις εποχές (παράρτημα Β). Το δεύτερο κύριο χαρακτηριστικό είναι η σαφής επικράτηση Β ανέμων, με το ποσοστό να κυμαίνεται πολύ κοντά στο 20%, και για τις τέσσερις εποχές. Πέρα από τους βόρειους ανέμους, αξίζει να αναφερθεί η παρουσία των ΒΒΔ και των Ν ανέμων, οι οποίοι εμφανίζουν μέσες σχετικές συχνότητες 4 και 3.5%, αντίστοιχα, ενώ οι υπόλοιπες διευθύνσεις συμβάλλουν ελάχιστα στο αιολικό δυναμικό του σταθμού.

Αξίζει επίσης να αναφερθεί, ότι η κατανομή της ταχύτητας του ανέμου μεταβάλλεται ελάχιστα από εποχή σε εποχή, με τη μέση ταχύτητα να λαμβάνει την ελάχιστη τιμή (1,6m/s) το φθινόπωρο και τη μέγιστη (2,0m/s) το χειμώνα.



Σχήμα 2.9 Μέση ετήσια κατανομή των διευθύνσεων του σταθμού της Κοζάνης, για την περίοδο 1981-2001.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

Θεωρητικές κατανομές

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Πολύ συχνά στην επιστήμη της μετεωρολογίας, κατά την μελέτη διάφορων φυσικών μεταβλητών, χρησιμοποιούνται θεωρητικές κατανομές για την περιγραφή αυτών. Η αναγκαιότητα αυτού οφείλεται στο γεγονός, ότι τα πραγματικά δεδομένα δεν είναι και τόσο εύχρηστα όταν επιχειρείται προέκταση της μεταβλητής στο χώρο ή στο χρόνο, σε αντίθεση με τις θεωρητικές κατανομές, οι οποίες λόγω της αναλυτικής τους έκφρασης επιδέχονται εύκολα διάφορους μετασχηματισμούς. Έτσι και ο άνεμος, ίσως περισσότερο από κάθε άλλη φυσική μεταβλητή, όταν μελετάται στα πλαίσια της Αιολικής Ενέργειας, μελετάται πάντα με την χρήση θεωρητικών κατανομών, οι οποίες διευκολύνουν την προέκτασή του σε διαφορετικά επίπεδα του κατώτερου οριακού στρώματος και επιπρόσθετα επιτρέπουν το φιλτράρισμα των επιπτώσεων του άμεσου φυσικού περιγύρου στον πραγματικό άνεμο.

Οι συνηθέστερη θεωρητική κατανομή, που χρησιμοποιείται για την περιγραφή του ανέμου είναι η κατανομή Weibull και ακολουθούν οι κατανομές Rayleigh, Gumbel, και Λογαριθμοκανονική (Log-normal), οι οποίες περιγράφονται παρακάτω, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις έχουν χρησιμοποιηθεί και οι κατανομές Γάμα, Εκθετική και Pareto.

3.2 ΚΑΤΑΝΟΜΗ WEIBULL ΚΑΙ RAYLEIGH

Η κατανομή με τη μεγαλύτερη χρήση σε εφαρμογές Αιολικής Ενέργειας είναι η κατανομή Weibull, η οποία γενικά εμφανίζεται με τρεις μορφές, ανάλογα με το πλήθος των παραμέτρων, που περιέχονται στην αναλυτική της έκφρασης. Εισήχθη το 1939 από το Σουηδό φυσικό Waloddi Weibull με σκοπό τη χρήση της στον ποιοτικό έλεγχο της αντοχής διάφορων υλικών που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία. Εκτός από την Αιολική

Ο υπολογισμός των παραμέτρων κλίμακας και σχήματος περιλαμβάνει διάφορες μεθόδους, οι οποίες εξαρτώνται πάντα από το σύνολο των διαθέσιμων δεδομένων. Πέντε μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί και περιγραφεί μέχρι τώρα (Justus et al, 1977), οι οποίες έχουν εφαρμοστεί και ελεγχθεί και στον Ελλαδικό χώρο (Καρακώστας, 1996) και αναφέρονται αναλυτικά παρακάτω. Μια έκτη μέθοδος, με ισχυρό μαθηματικό υπόβαθρο, η μέθοδος της Μέγιστης Πιθανοφάνειας (Maximum Likelihood Technique), η οποία δεν περιλαμβάνεται στην παρούσα εργασία, περιγράφηκε από τους Takle and Brown (1977), καθώς και από τον Wong (1977), αφού χρησιμοποιήθηκε σε ανεμολογικά και υδρομετεωρολογικά δεδομένα, αντίστοιχα.

Η πρώτη μέθοδος (μέθοδος Α), είναι η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων, και βασίζεται στην υπόθεση ότι η κατανομή των συχνοτήτων του ανέμου ακολουθεί σε γενικές γραμμές την κατανομή Weibull. Για την εφαρμογή της απαιτείται ο διαχωρισμός των ωριαίων ταχυτήτων του ανέμου σε κλάσεις $[0, V_1], (V_1, V_2], \dots, (V_{n-1}, V_n]$, καθώς και ο υπολογισμός των αθροιστικών σχετικών συχνοτήτων F_i , που αντιστοιχούν σε κάθε κλάση. Στη συνέχεια, με διπλή λογαρίθμηση, η σχέση αθροιστικής κατανομής ανάγεται από εκθετική σε γραμμική, σύμφωνα με τη διαδικασία:

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

$$-\left(\frac{u}{c}\right)^k = \ln(1 - F(u))$$

$$k \ln u - k \ln c = \ln(-\ln(1 - F(u)))$$

Η τελευταία εξίσωση αποτελεί μια σχέση που συνδέει γραμμικά τις παραμέτρους $Y = \ln(-\ln(1 - F(u)))$, $X = \ln u$ και μπορεί να γραφεί με τη γενική γραμμική μορφή:

$$Y = aX + b$$

όπου

$$a = k$$

$$b = -k \ln c$$

Στην περίπτωση που η αρχική υπόθεση αληθεύει (δηλ. η κατανομή των πραγματικών συχνοτήτων να ακολουθεί την κατανομή Weibull), οι μεταβλητές X , Y θα πρέπει να συνδέονται γραμμικά, με αποτέλεσμα να είναι απλή (μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων) η εκτίμηση των παραμέτρων a και b και στη συνέχεια οι παράμετροι κλίμακας και σχήματος (k και c) της κατανομής Weibull, μέσω των σχέσεων:

$$k = a \quad (3.7)$$

$$c = \exp\left(-\frac{b}{k}\right) \quad (3.8)$$

Οι επόμενες μέθοδοι υπολογισμού των παραμέτρων κλίμακας και σχήματος δεν βασίζονται στις πραγματικές μετρήσεις της ταχύτητας, αλλά σε στατιστικά μεγέθη που σχετίζονται με τα πραγματικά δεδομένα, όπως η μέση τιμή, η διασπορά, η διάμεσος και η ταχύτητα του 1^{ου} και 3^{ου} τεταρτημορίου. Τέτοιες μεθοδολογίες είναι απαραίτητες σε εκείνες τις περιπτώσεις που οι πραγματικές μετρήσεις είναι άγνωστες, αλλά παρόλα αυτά είναι αναγκαίος ο υπολογισμός των παραμέτρων της κατανομής Weibull.

Έτσι, η δεύτερη μέθοδος (μέθοδος Β), βασίζεται στη διάμεσο ταχύτητα V_m και στην ταχύτητα του πρώτου και τρίτου τεταρτημορίου, $V_{0.25}$ και $V_{0.75}$. Σ' αυτή την περίπτωση οι παράμετροι σχήματος και κλίμακας δίνονται από τις σχέσεις:

$$k = 1.573 \ln\left(\frac{V_{0.75}}{V_{0.25}}\right) \quad (3.9)$$

$$c = \frac{V_m}{(\ln 2)^{1/k}} \quad (3.10)$$

Λόγω του υπερβολικού ποσοστού άπνοιας σε ορισμένους από τους σταθμούς που μελετήθηκαν, αυτή η μέθοδος δεν χρησιμοποιήθηκε, καθώς η ταχύτητα του 1^{ου} και 2^{ου} τεταρτημορίου (διάμεσος ταχύτητα) ήταν μηδέν.

Η τρίτη μέθοδος (μέθοδος Γ), βασίζεται στη γνώση της μέσης ταχύτητας και της τυπικής απόκλισης του συνόλου των παρατηρήσεων. Έτσι οι παράμετροι της κατανομής Weibull, μετά από χρήση της Γάμα συνάρτησης ($\Gamma(x)$), δίνονται από τις σχέσεις:

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{V}}\right)^{-1.086} \quad (3.11)$$

$$c = \frac{\bar{V}}{\Gamma(1+1/k)} \quad (3.12)$$

Η τέταρτη μέθοδος (μέθοδος Δ), η οποία δεν αξιοποιήθηκε, χρησιμοποιήθηκε στις περιπτώσεις που είναι γνωστές οι μέση και η μέγιστη ταχύτητα του ανέμου. Μια παραλλαγή αυτής της μεθόδου εξετάστηκε από τον Καρακώστα (1988), όπου η παράμετρος σχήματος υπολογίζεται από τη σχέση 3.13, με τη μέθοδο των διαδοχικών προσεγγίσεων, ενώ η παράμετρος κλίμακας υπολογίζεται από τη σχέση 3.12.

$$V_{\max} = \frac{\bar{V}(\ln(24V_{\max}d))^{1/k}}{\Gamma(1+1/k)} \quad (3.13)$$

Η πέμπτη μέθοδος (μέθοδος Ε) υπολογισμού των παραμέτρων κλίμακας και σχήματος βασίζεται σε εμπειρικές σχέσεις, οι οποίες έχουν προκύψει μετά από τη μελέτη της κατανομής της ταχύτητας του ανέμου σε διάφορες τοποθεσίες των ΗΠΑ, και γι' αυτό θα πρέπει τα αποτελέσματα να ερμηνεύονται με προσοχή και επιφύλαξη. Η μελέτη του ανέμου στα 10 μέτρα έχει δείξει ότι υπάρχει μια στενή σχέση ανάμεσα στη διασπορά του ανέμου και την παράμετρο σχήματος, η οποία εκφράζεται από τη σχέση:

$$k = \begin{cases} 1.05\sqrt{\bar{V}} & \sigma/\bar{V} < 0.3 \\ 0.94\sqrt{\bar{V}}, & \text{για } 0.3 < \sigma/\bar{V} < 0.7 \\ 0.73\sqrt{\bar{V}} & \sigma/\bar{V} > 0.7 \end{cases} \quad \text{αντίστοιχα} \quad (3.13)$$

Η κατανομή Weibull εμφανίζεται και ως μονοπαραμετρική κατανομή, η οποία προκύπτει από την τριπαραμετρική αν υποθέσουμε ότι η παράμετρος θέσης είναι μηδέν, και η παράμετρος σχήματος είναι ένας προκαθορισμένος αριθμός. Μια περίπτωση της μονοπαραμετρικής κατανομής Weibull αποτελεί και η κατανομή **Rayleigh**, για την οποία η παράμετρος σχήματος είναι $k=2$. Έτσι, οι σχέσεις (3.3) και (3.4) λαμβάνουν τη μορφή:

$$f(x) = \frac{ku}{c^2} \exp\left[-\left(\frac{u}{c}\right)^2\right] \quad (3.14)$$

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{u}{c}\right)^2\right] \quad (3.15)$$

Υιοθετώντας τις μεθόδους Α, Γ και Ε, υπολογίστηκαν οι παράμετροι κλίμακας και σχήματος της κατανομής Weibull. Οι μέθοδοι Β και Δ δεν χρησιμοποιήθηκαν, καθώς το σύνολο των δεδομένων του ανέμου που υπήρχαν στη διάθεση αυτής της μελέτης δεν το επέτρεψαν. Επιπρόσθετα, οι ίδιες παράμετροι εκτιμήθηκαν και για την κατανομή Rayleigh και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1, αφού πρώτα έγινε αναγωγή αυτών στο ύψος των 10 μέτρων, για λόγους συγκρισιμότητας. Επίσης, για πρακτικούς λόγους, τα αποτελέσματα των παραμέτρων της κατανομής Weibull παρουσιάζονται με τη μορφή ιστογράμματος (Σχήμα 3.1). Για την κατανομή Weibull παρουσιάζονται τα αποτελέσματα, όπως υπολογίστηκαν με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων, ενώ τα αποτελέσματα των μεθόδων Γ και Ε παρουσιάζονται στο παράρτημα Α. Για λόγους πρακτικούς, αναφέρεται ξανά ότι η περίοδος μελέτης για όλους τους σταθμούς ήταν η περίοδος 1981-2001, με εξαίρεση τους σταθμούς της Χρυσούπολης και του ΑΠΘ, για τους οποίους η περίοδος μελέτης ήταν οι περίοδοι 1985-2001 και 1997-2002, αντίστοιχα.

Πίνακας 3.1 Παράμετροι κλίμακας και σχήματος των κατανομών Rayleigh και Weibull, για όλους τους σταθμούς της μελέτης και για όλες τις εποχές του έτους.

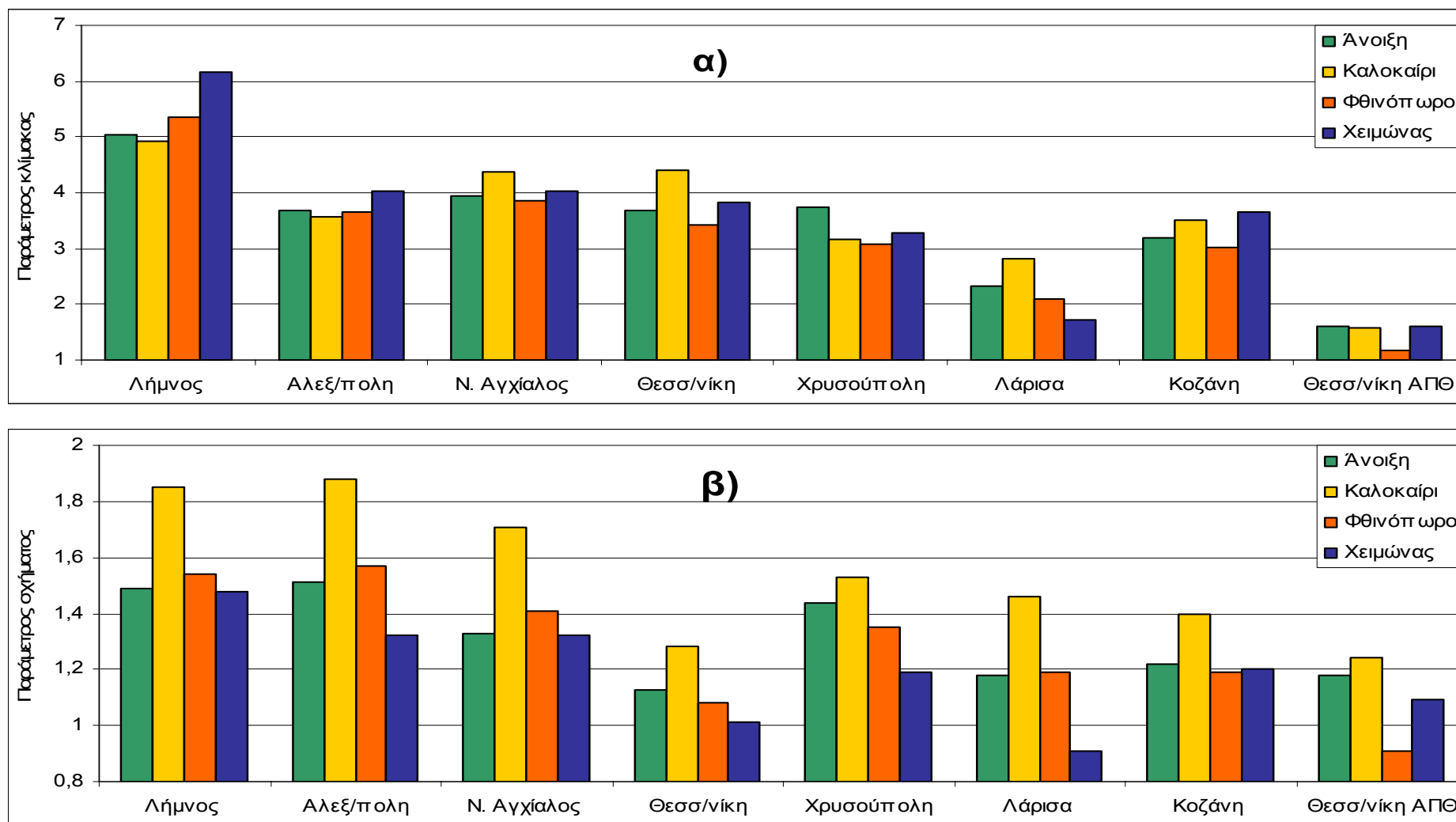
Σταθμός	Εποχή	Weibull		Rayleigh	
		c	K	c	K
Αλεξανδρούπολη	Άνοιξη	3,69	1,51	4,93	1,93
	Καλοκαίρι	3,58	1,88	3,30	1,93
	Φθινόπωρο	3,64	1,57	3,66	1,93
	Χειμώνας	4,02	1,32	4,86	1,93
Θεσσαλονίκη ΑΠΘ	Άνοιξη	1,60	1,18	2,24	1,91
	Καλοκαίρι	1,59	1,24	1,99	1,91
	Φθινόπωρο	1,17	0,91	2,30	1,91
	Χειμώνας	1,62	1,09	2,33	1,91
Θεσσαλονίκη Αεροδρόμιο Μακεδονία	Άνοιξη	3,69	1,13	6,08	2,09
	Καλοκαίρι	4,39	1,28	6,39	2,09
	Φθινόπωρο	3,43	1,08	6,00	2,09
	Χειμώνας	3,82	1,01	7,17	2,09
Κοζάνη	Άνοιξη	3,18	1,22	4,41	2,09
	Καλοκαίρι	3,50	1,40	4,32	2,09
	Φθινόπωρο	3,03	1,19	4,33	2,09
	Χειμώνας	3,64	1,20	5,21	2,09
Λάρισα	Άνοιξη	2,33	1,18	3,19	1,93
	Καλοκαίρι	2,81	1,46	3,24	1,93
	Φθινόπωρο	2,11	1,19	2,75	1,93
	Χειμώνας	1,73	0,91	3,15	1,93
Λήμνος	Άνοιξη	5,03	1,49	5,14	1,95
	Καλοκαίρι	4,92	1,85	4,68	1,95
	Φθινόπωρο	5,37	1,54	5,61	1,95
	Χειμώνας	6,15	1,48	6,56	1,95
Ν. Αγχίαλος	Άνοιξη	3,93	1,33	5,11	2,08
	Καλοκαίρι	4,38	1,71	4,55	2,08
	Φθινόπωρο	3,87	1,41	4,82	2,08
	Χειμώνας	4,04	1,32	5,24	2,08
Χρυσούπολη	Άνοιξη	3,75	1,44	4,93	2,09
	Καλοκαίρι	3,16	1,53	3,72	2,09
	Φθινόπωρο	3,07	1,35	3,92	2,09
	Χειμώνας	3,29	1,19	5,02	2,09

Εδώ θα πρέπει να αναφέρουμε ορισμένα χαρακτηριστικά των παραμέτρων της κατανομής Weibull, ώστε να γίνει πιο κατανοητή η φυσική ερμηνεία της μεταβλητότητάς τους. Σε γενικές γραμμές, αύξηση της παραμέτρου κλίμακας, συνοδεύεται από μετατόπιση μέρους των μετρήσεων της ταχύτητας του ανέμου σε μεγαλύτερες τιμές, με αποτέλεσμα να αυξάνει η μέση τιμή της. Με άλλα λόγια, όσο μεγαλύτερη είναι η παράμετρος κλίμακας, τόσο περισσότερο εκτείνεται η κατανομή της τυχαίας μεταβλητής προς μεγαλύτερες τιμές. Από την άλλη, η αύξηση της παραμέτρου σχήματος μειώνει το φάσμα τιμών της ταχύτητας του ανέμου, περιορίζοντας τη μεταβλητότητά της.

Με βάση τα παραπάνω, όπως ήταν αναμενόμενο, η παράμετρος κλίμακας έχει τη μεγαλύτερη τιμή στο σταθμό της Λήμνου, λόγω της υψηλής μέσης ταχύτητας του ανέμου, ενώ έχει τη μικρότερη στο σταθμό του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, όπου η ταχύτητα είναι μειωμένη λόγω εγκλωβισμού του σταθμού από το αστικό περιβάλλον της πόλης. Παράλληλα, παρατηρείται μια σταδιακή μείωσή της από θαλάσσιες ή παραθαλάσσιες περιοχές προς ηπειρωτικές περιοχές, υποδηλώνοντας κατά κάποιο τρόπο, μείωση της μέσης ταχύτητας από τη θάλασσα προς την ενδοχώρα, γεγονός το οποίο έρχεται σε συμφωνία με προηγούμενες μελέτες (Katsoulis, 1993; Lalas, 1983). Παρόλα αυτά, λόγω του μικρού αριθμού σταθμών, δεν ήταν δυνατό να ερμηνευτεί περαιτέρω και να γενικευτούν, τόσο σε γεωγραφική, όσο και σε εποχιακή κλίμακα, η μεταβλητότητα της παραμέτρου κλίμακας, όπως έγινε σε προηγούμενη μελέτη (Katsoulis, 1993).

Παρόμοια, η παράμετρος σχήματος, η οποία έχει σαφώς μικρότερη διακύμανση, και η τιμή της κυμαίνεται από 0.91 μέχρι 1.88, έχει σε γενικές γραμμές τις υψηλότερες τιμές στο σταθμό της Λήμνου και της Αλεξανδρούπολης, ενώ τις μικρότερες στο σταθμό του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ). Επιπρόσθετα, παρατηρείται μια μείωσή της από παραθαλάσσιους προς ηπειρωτικούς σταθμούς. Επίσης, αξιοσημείωτο είναι το γεγονός, ότι σε όλους τους σταθμούς η υψηλότερη τιμή απαντάται το καλοκαίρι ενώ η χαμηλότερη τιμή το χειμώνα.

Σε αντίθεση με την κατανομή Weibull, η κατανομή Rayleigh προσδιορίζεται μόνο από μια παράμετρο. Αυτό έχει ως συνέπεια τη μείωση της ευελιξίας της κατανομής, με αποτέλεσμα τη δυσκολία στην αναπαραγωγή των πραγματικών μετρήσεων. Η χρήση της τιμής 2 στη θέση της παραμέτρου σχήματος, η οποία αποτελεί υπερεκτίμηση της πραγματικής της τιμής, οδηγεί, όπως φαίνεται στον πίνακα 3.1, σε υπερεκτίμηση και της παραμέτρου κλίμακας, σε σχέση με τις τιμές που βρέθηκαν από τη χρήση της κατανομής Weibull (μέθοδος Α), για σχεδόν όλες τις εποχές και για όλους τους σταθμούς. Το τελικό αποτέλεσμα είναι η μετατόπιση των μετρήσεων σε μεγαλύτερες ταχύτητες, λόγω των υψηλών τιμών της παραμέτρου κλίμακας, και η μείωση του φάσματος των μετρήσεων, λόγω των υψηλών τιμών της παραμέτρου σχήματος, γεγονός που οδηγεί την κατανομή Rayleigh στην υπερεκτίμηση της συχνότητας του ανέμου για τις μικρές ταχύτητες και την υποεκτίμησή της για τις μεγάλες (σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1 Ιστογράμματα α) της παραμέτρου κλίμακας και β) της παραμέτρου σχήματος, της κατανομής Weibull, για όλες τις εποχές και όλους τους σταθμούς της μελέτης. Οι παράμετροι έχουν αναχθεί στα 10 μέτρα για λόγους συγκρισιμότητας.

3.3 ΚΑΤΑΝΟΜΗ GUMBEL

Η κατανομή Gumbel, η οποία αποτελεί ειδική περίπτωση της Fisher-Tippett κατανομής, είναι μια κατανομή, η οποία χρησιμοποιείται συνήθως στην αναλυτική περιγραφή ακραίων τιμών για διάφορες μετεωρολογικές παραμέτρους, όπως μέγιστες ταχύτητες ανέμου, και ακραίες τιμές θερμοκρασίας (Unkasevic *et al.*, 1998). Αυτό έχει σαν συνέπεια η συγκεκριμένη κατανομή να αναφέρεται πολύ συχνά, ως κατανομή ακραίων τιμών (extreme value distribution). Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας και η συνάρτηση αθροιστικής κατανομής της κατανομής Gumbel, η οποία είναι μια συνεχής κατανομή, δίνονται αντίστοιχα από τις σχέσεις:

$$f(x) = \frac{1}{b} \exp \left[\frac{1}{b}(a-x) - \exp \left(\frac{1}{b}(a-x) \right) \right] \quad (3.16)$$

$$F(x) = \exp \left[- \exp \left(\frac{1}{b}(a-x) \right) \right] \quad (3.17)$$

Όπου a και b οι παράμετροι θέσης και κλίμακας, αντίστοιχα. Άλλα χρήσιμα χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης κατανομής είναι η θετική της λοξότητα και το μέγιστό της, το οποίο λαμβάνει χώρα για $x=a$.

Ο υπολογισμός των παραμέτρων θέσης και κλίμακας, όπως και για την κατανομή Weibull, μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους. Ο πιο συνηθισμένος τρόπος εκτίμησης των παραμέτρων, ο οποίος μάλιστα χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, είναι η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων. Έτσι, όπως και στην περίπτωση της κατανομής Weibull, με διπλή λογαρίθμηση η συνάρτηση αθροιστικής κατανομής ανάγεται από εκθετική σε γραμμική.

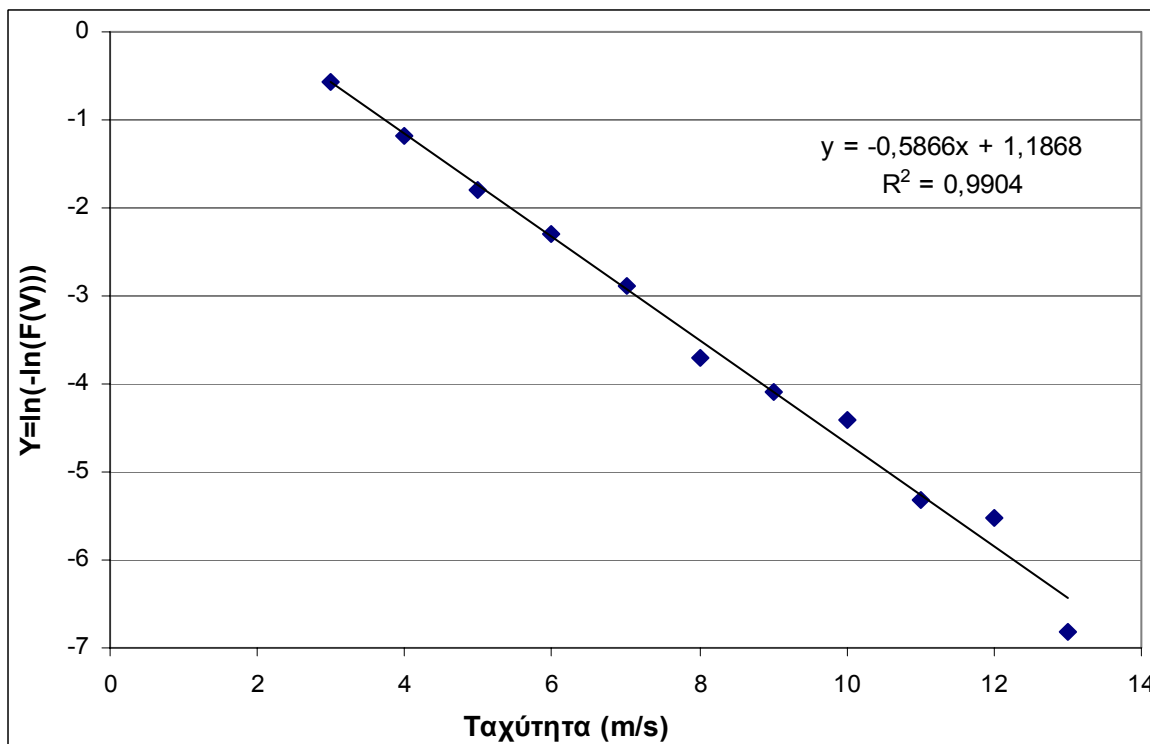
$$\ln(-\ln F(u)) = \frac{a}{b} - \frac{1}{b}u \quad (3.18)$$

Στην τελευταία σχέση οι μεταβλητές $Y = \ln(-\ln F(u))$ και u συνδέονται γραμμικά (Σχήμα 3.1), εφόσον οι πραγματικές μετρήσεις ακολουθούν την κατανομή Gumbel. Εφαρμόζοντας τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, είναι δυνατόν να βρεθούν οι παράμετροι a και b . Κατά την εκτίμηση των παραμέτρων, όπως και στην περίπτωση της κατανομής Weibull, δεν ελήφθησαν υπόψη ταχύτητες μικρότερες από 2m/s. Ένας

δεύτερος τρόπος είναι η μέθοδος των ροπών (method of moments), σύμφωνα με τον οποίο ισχύει:

$$b = \frac{\sigma\sqrt{6}}{\pi} \quad \text{και} \quad a = \bar{u} - \gamma b \quad (3.19)$$

Όπου σ και μ η τυπική απόκλιση και μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου, ενώ $\gamma=0.57721$ η σταθερά του Euler.



Σχήμα 3.2 Γραμμική συσχέτιση της ταχύτητας του ανέμου με τη μετασχηματισμένη μεταβλητή Y , για τον εντοπισμό των παραμέτρων θέσης και κλίμακας της κατανομής Gumbel, για τον σταθμό της Χρυσούπολη (1985-2001, άνοιξη).

Από τη μελέτη των παραμέτρων της κατανομής Gumbel (πίνακας 3.2), παρατηρείται η εξάρτηση της παραμέτρου κλίμακας b από τη διασπορά των ταχυτήτων του ανέμου (πίνακας 2.1) όπως ακριβώς υπαγορεύουν οι σχέσεις, 3.18, της μεθόδου των ροπών. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο παρατηρείται ομοιότητα στην εποχιακή και γεωγραφική κατανομή τους. Δεν ισχύει το ίδιο και για την παράμετρο θέσης, της οποίας η εποχιακή και γεωγραφική κατανομή είναι πιο πολύπλοκη, καθώς εξαρτάται, τόσο από την μέση τιμή, όσο και από την διασπορά του ανέμου, ενώ το γεγονός του διαφορετικού ύψους στο οποίο υπολογίστηκαν οι παράμετροι του κάθε σταθμού, είναι σίγουρο ότι έπαιξαν κάποιο ρόλο.

Αξιοσημείωτη επίσης είναι η ομοιότητα της κατανομής Gumbel με την κατανομή Weibull, γεγονός το οποίο αποτυπώνεται και στο αιολικό δυναμικό.

Πίνακας 3.2 Παράμετροι κλίμακας και θέσης της κατανομής Gumbel, που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, καθώς και μέση τιμή και τυπική απόκλιση της μετασχηματισμένης μεταβλητής $Y=\ln X$ της κατανομής Log-normal.

		Gumbel		Log-normal	
		a	b	μ	s
Αλεξανδρούπολη	Άνοιξη	3,00	1,72	0,58	0,95
	Καλοκαίρι	3,48	1,09	0,43	1,01
	Φθινόπωρο	3,06	1,59	0,67	0,85
	Χειμώνας	2,74	2,38	0,31	1,25
Θεσσαλονίκη ΑΠΘ	Άνοιξη	1,66	0,99	0,30	0,75
	Καλοκαίρι	1,09	1,08	0,32	0,69
	Φθινόπωρο	0,01	1,51	0,01	0,86
	Χειμώνας	1,24	1,27	0,17	0,86
Θεσσαλονίκη Αεροδρόμιο Μακεδονία	Άνοιξη	0,85	2,72	0,72	0,84
	Καλοκαίρι	1,63	2,54	0,90	0,77
	Φθινόπωρο	0,91	2,63	0,62	0,88
	Χειμώνας	0,38	3,44	0,69	0,94
Κοζάνη	Άνοιξη	1,58	1,80	-0,04	1,08
	Καλοκαίρι	2,00	1,57	0,22	0,96
	Φθινόπωρο	1,55	1,75	-0,17	1,12
	Χειμώνας	1,79	2,13	0,16	1,07
Λάρισα	Άνοιξη	1,97	1,53	0,09	1,00
	Καλοκαίρι	2,60	1,27	0,31	0,91
	Φθινόπωρο	1,60	1,44	-0,27	1,10
	Χειμώνας	0,40	2,08	-0,52	1,23
Λήμνος	Άνοιξη	4,01	2,22	1,22	0,74
	Καλοκαίρι	1,21	1,55	1,25	0,64
	Φθινόπωρο	4,37	2,22	1,30	0,72
	Χειμώνας	3,51	3,58	1,45	0,73
Ν. Αγχίαλος	Άνοιξη	1,85	2,09	0,68	0,84
	Καλοκαίρι	3,15	1,39	0,81	0,76
	Φθινόπωρο	2,25	1,79	0,68	0,81
	Χειμώνας	1,96	2,16	0,77	0,80
Χρυσούπολη	Άνοιξη	2,02	1,71	0,64	0,79
	Καλοκαίρι	1,95	1,23	0,36	0,82
	Φθινόπωρο	1,65	1,51	0,32	0,87
	Χειμώνας	1,06	2,14	0,50	0,87

3.4 ΛΟΓΑΡΙΘΜΟΚΑΝΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ (LOGNORMAL)

Η λογαριθμοκανονική κατανομή είναι μια κατανομή, η οποία χρησιμοποιείται στην υδρολογία, στη φυσική των νεφών, στην προσομοίωση της μέγιστης έντασης της βροχής,

αλλά και της μέγιστης έντασης του ανέμου. Είναι μια κατανομή με θετικό συντελεστή λοξότητας και περιγράφει μια φυσική μεταβλητή εφόσον ο φυσικός λογάριθμος της αρχικής μεταβλητής ακολουθεί κανονική κατανομή. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας και η συνάρτηση αθροιστικής κατανομής δίνονται από τις σχέσεις (Unkasevic *et al.*, 1998):

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y x} \exp\left[-\frac{(\ln x - \mu_Y)^2}{2\sigma_Y^2}\right] \quad (3.20)$$

$$F(x) = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{\ln x - \mu_Y}{\sqrt{2}\sigma_Y}\right) \right] \quad (3.21)$$

Όπου erf είναι μια νέα συνάρτηση, $\operatorname{erf}(x)$ (*error function*), η οποία συναντάται κατά την ολοκλήρωση της λογαριθμοκανονικής συνάρτησης και ορίζεται από την σχέση:

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt = \sum_0^n (-1)^n \frac{x^{2n+1}}{n!(2n+1)}, \quad x \in \mathbb{R} \quad (3.22)$$

Επιπρόσθετα, οι μεταβλητές σ_Y και μ_Y αποτελούν τη διασπορά και τη μέση τιμή της μετασχηματισμένης μεταβλητής $Y = \ln X$, οι οποίες συνδέονται με τις αντίστοιχες παραμέτρους της αρχικής μεταβλητής X , με τις σχέσεις:

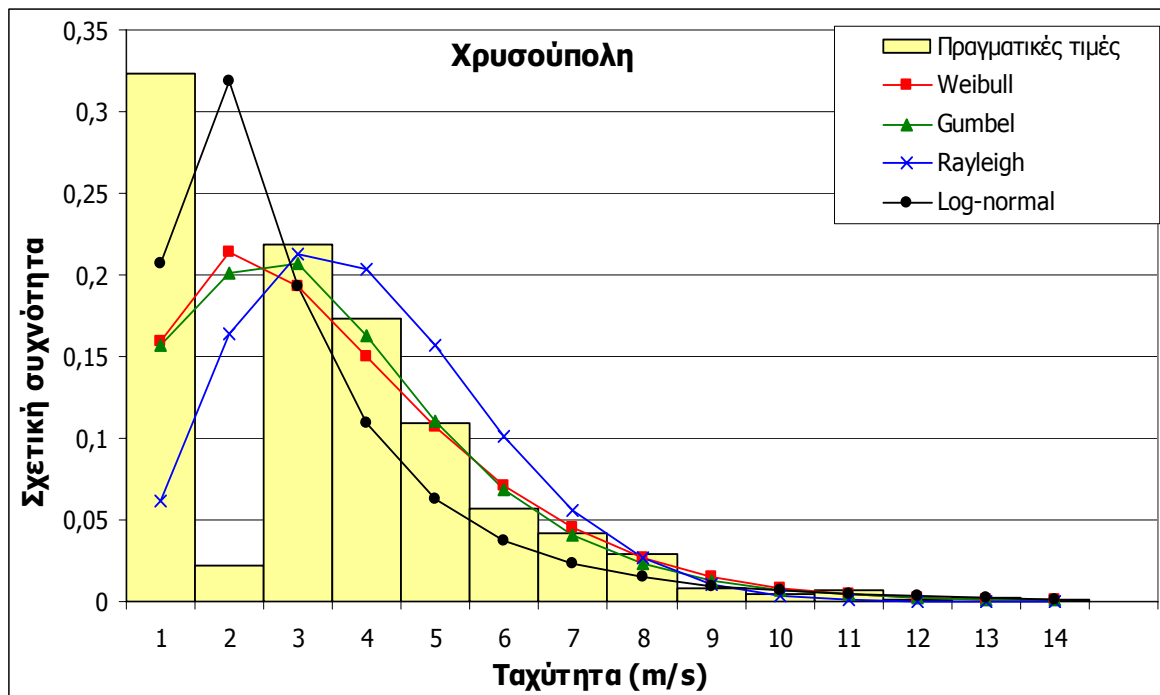
$$\mu_X = \exp\left[\frac{\sigma_Y^2}{2} + \mu_Y\right] \quad (3.23)$$

$$\sigma_X^2 = (\exp[\sigma_Y^2] - 1) \exp[2\mu_Y + \sigma_Y^2] \quad (3.24)$$

Σε γενικές γραμμές η Λογαριθμοκανονική κατανομή υποεκτιμά αρκετά τον πραγματικό άνεμο, για το μεγαλύτερο φάσμα των ταχυτήτων.

Κατά τη διάρκεια της ανάλυσης παρατηρήθηκε μια ιδιομορφία, η οποία χαρακτήριζε τις πραγματικές μετρήσεις όλων των σταθμών, με εξαίρεση το σταθμό του ΑΠΘ, και για όλες τις εποχές του έτους. Συγκεκριμένα, το υψηλό ποσοστό άπνοιας συνοδευόταν από ένα υπερβολικά χαμηλό ποσοστό ταχυτήτων μέσα στο διάστημα (1m/s, 2m/s], ενώ στη συνέχεια οι μετρήσεις είχαν και πάλι μεγάλο ποσοστό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2. Αυτή η ανωμαλία ενδέχεται να οφείλεται στη διαδικασία επεξεργασίας της ταινίας του μηχανικού ανεμομέτρου, ή στην αδράνεια έναρξης, που ενδέχεται να έχει το όργανο, με αποτέλεσμα να υπερεκτιμούνται οι καταστάσεις άπνοιας. Ένας άλλος λόγος, που ενίσχυσε αυτή την ανωμαλία είναι και η μετατροπή των μετρήσεων από knots, όπως ήταν αρχικά, σε m/s. Λόγω αυτής της ιδιορρυθμίας στην ποιότητα των δεδομένων, οι θεωρητικές

κατανομές που εξετάστηκαν αδυνατούσαν να προσαρμοστούν στα πραγματικά δεδομένα για μικρές ταχύτητες ανέμου. Όμως, παρόλο τη φαινόμενη αδυναμία των θεωρητικών κατανομών να προσομοιώνουν τα πραγματικά δεδομένα για τις μικρές ταχύτητες, στο υπόλοιπο φάσμα των ταχυτήτων η προσαρμογή ήταν καλύτερη, ιδίως για τις κατανομές Weibull και Gumbel, κάτι πολύ χρήσιμο, όπως θα αποδειχθεί στη συνέχεια. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο αποφασίστηκε η εγκυρότητα και η σύγκριση των κατανομών να εξεταστούν στη συνέχεια, κατά τον υπολογισμό του αιολικού δυναμικού.



Σχήμα 3.3 Προσαρμογή των θεωρητικών κατανομών, Weibull, Gumbel, Rayleigh, Lognormal, στα πραγματικά δεδομένα, για το σταθμό της Χρυσούπολης, για την άνοιξη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

Διαθέσιμο Αιολικό Δυναμικό

4.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ

Στις εφαρμογές αιολικής ενέργειας, η παράμετρος που καθορίζει την τύχη προγραμμάτων αξιοποίησής της, είναι το διαθέσιμο αιολικό δυναμικό (wind power density ή wind power potential). Από τη φυσική, το αιολικό δυναμικό ορίζεται ως, το πηλίκο της ροής της κινητικής ενέργειας E_k του ανέμου που διέρχεται δια μέσω επιφάνειας S , κάθετη στην διεύθυνση του ανέμου, ως προς την επιφάνεια αυτή και το χρόνο, σύμφωνα με τη σχέση (Justus, 1985):

$$P = \frac{E_k}{tS} = \frac{1}{2} \frac{mu^2}{tS} = \frac{1}{2} \rho u^3 \quad (4.1)$$

Όπου ρ η πυκνότητα του αέρα και u η ταχύτητά του. Η πυκνότητα του αέρα, σε εφαρμογές αιολικής ενέργειας, δεν θα πρέπει να θεωρηθεί σταθερή σε εποχιακή κλίμακα, καθώς εξαρτάται, τόσο από την ατμοσφαιρική πίεση P , όσο και από τη θερμοκρασία T , σύμφωνα με την καταστατική εξίσωση του ατμοσφαιρικού αέρα

$$\rho = \frac{0.3484P}{T} \quad (4.2)$$

Πίνακας 4.1 Εποχιακή μεταβολή της πυκνότητας του αέρα, για τους σταθμούς της ανάλυσης έτσι όπως υπολογίστηκε από τη σχέση (4.2).

	Άνοιξη	Καλοκαίρι	Φθινόπωρο	Χειμώνας
Αλεξανδρούπολη	1,235	1,184	1,229	1,274
Θεσσαλονίκη ΑΠΘ	1,229	1,182	1,223	1,268
Θεσσαλονίκη Αεροδρ.	1,230	1,181	1,225	1,271
Κοζάνη	1,241	1,190	1,238	1,288
Λάρισα	1,230	1,179	1,225	1,273
Λήμνος	1,232	1,184	1,223	1,263
Ν. Αγχιάλος	1,229	1,180	1,222	1,266
Χρυσούπολη	1,233	1,184	1,228	1,272

Στον πίνακα 4.1 παρατίθενται οι μέσες τιμές της πυκνότητας του ξηρού αέρα, ανά εποχή, για όλους τους σταθμούς που περιλαμβάνονται στην παρούσα ανάλυση, έτσι όπως υπολογίστηκαν με βάση την καταστατική εξίσωση του ξηρού αέρα. Από τον πίνακα αυτό φαίνεται, ότι η πυκνότητα του αέρα παρουσιάζει μια ετήσια διακύμανση, με ελάχιστη τιμή το καλοκαίρι και μέγιστη τιμή το χειμώνα. Τους θερινούς μήνες οι τιμές κυμαίνονται γύρω στο $1,18 \text{ gr/m}^3$, ενώ τους χειμερινούς μήνες αγγίζουν τα $1,29 \text{ gr/m}^3$. Η διαφορά αυτή, αν και δεν είναι σημαντική, αναφέρεται στην παρούσα μελέτη για λόγους αντικειμενικότητας.

Πρακτικά, υπάρχουν διάφοροι τρόποι υπολογισμού του μέσου αιολικού δυναμικού, ανάλογα με τα διαθέσιμα δεδομένα. Στην περίπτωση που είναι διαθέσιμες μετρήσεις ταχύτητας ανέμου χωρισμένες σε κλάσεις, το μέσο αιολικό δυναμικό δίνεται από τη σχέση:

$$P = \frac{1}{2} \rho \sum_i f_i u_i^3 \quad (4.3)$$

Όπου f_i η συχνότητα και u_i η διάμεσος ή η μέση ταχύτητα του ανέμου στην κάθε κλάση. Επιπρόσθετα, σε περίπτωση που η κατανομή Weibull, περιγράφει ικανοποιητικά τις πραγματικές μετρήσεις, το μέσο αιολικό δυναμικό μπορεί να υπολογιστεί και από τη σχέση:

$$P = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma(1 + 3/k) \quad (4.4)$$

Όπου c η παράμετρος κλίμακας, k η παράμετρος σχήματος της κατανομής Weibull και Γ η κατανομή Γάμα. Σε διαφορετική περίπτωση, που η κατανομή Gumbel επιλεγεί για την αναπαράσταση των πραγματικών μετρήσεων, το αιολικό δυναμικό μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$P = 2\zeta(3)b^3 + 0.5(a + b\gamma)\pi^2 b^2 + (a + b\gamma)^3 \quad (4.5)$$

Όπου $\zeta(3)=1.2020$ η σταθερά Apery, γ η σταθερά Euler, και a, b οι παράμετροι κλίμακας και θέσης της κατανομής Gumbel. Η εκτίμηση του μέσου αιολικού δυναμικού, επίσης μπορεί να εκτιμηθεί με βάση τις θεωρητικές κατανομές και από την σχέση 4.3, αν αντικατασταθεί το f_i με τη συχνότητα που προβλέπει η θεωρητική κατανομή για την κάθε κλάση, και το u_i με τη διάμεσο ταχύτητα της κάθε κλάσης. Παρόλα αυτά, λόγω του γεγονότος ότι τα δεδομένα προέρχονται από μηχανικό ανεμόμετρο, το οποίο καταγράφει την ταχύτητα του ανέμου σε ταινία, ενώ επίσης έγινε παράλληλα μετατροπή των αρχικών

μονάδων (κόμβοι) σε μέτρα ανά δευτερόλεπτο, εκτιμήθηκε ότι θα ήταν καλύτερο να χρησιμοποιηθεί στη σχέση 4.3 το κέντρο των κλάσεων, έναντι της διάμεσης ταχύτητας. Κάτι τέτοιο, θα ευνοούσε την περαιτέρω ποιοτική σύγκριση της προσαρμογής των θεωρητικών κατανομών στα πραγματικά δεδομένα, και θα μπορούσε να συμβάλλει στο να διερευνηθεί κατά πόσο αυτό επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα, το οποίο είναι, στην ουσία, η εκτίμηση του μέσου αιολικού δυναμικού.

Πίνακας 4.2 Μέσα εποχιακά σχετικά σφάλματα (επί της εκατό) του αιολικού δυναμικού, για όλες τις θεωρητικές κατανομές, σε σχέση με τα πραγματικά δεδομένα.

	Weibull A	Weibull Γ	Weibull E	Rayleigh	Gumbel	Log-normal
Άνοιξη	2,6	10,5	33,0	11,1	3,2	32,6
Καλοκαίρι	3,0	10,7	23,0	14,6	4,1	48,4
Φθινόπωρο	3,7	15,6	34,6	12,8	3,2	32,0
Χειμώνας	6,1	13,7	44,1	12,7	4,6	33,3

Μετά τον υπολογισμό του αιολικού δυναμικού, κατά εποχή, για όλους τους σταθμούς, με βάση τη σχέση 4.3, τόσο για τα πραγματικά δεδομένα, όσο και για τις θεωρητικές κατανομές, υπολογίστηκαν τα εποχιακά σχετικά σφάλματα επί της εκατό, σύμφωνα με τη σχέση:

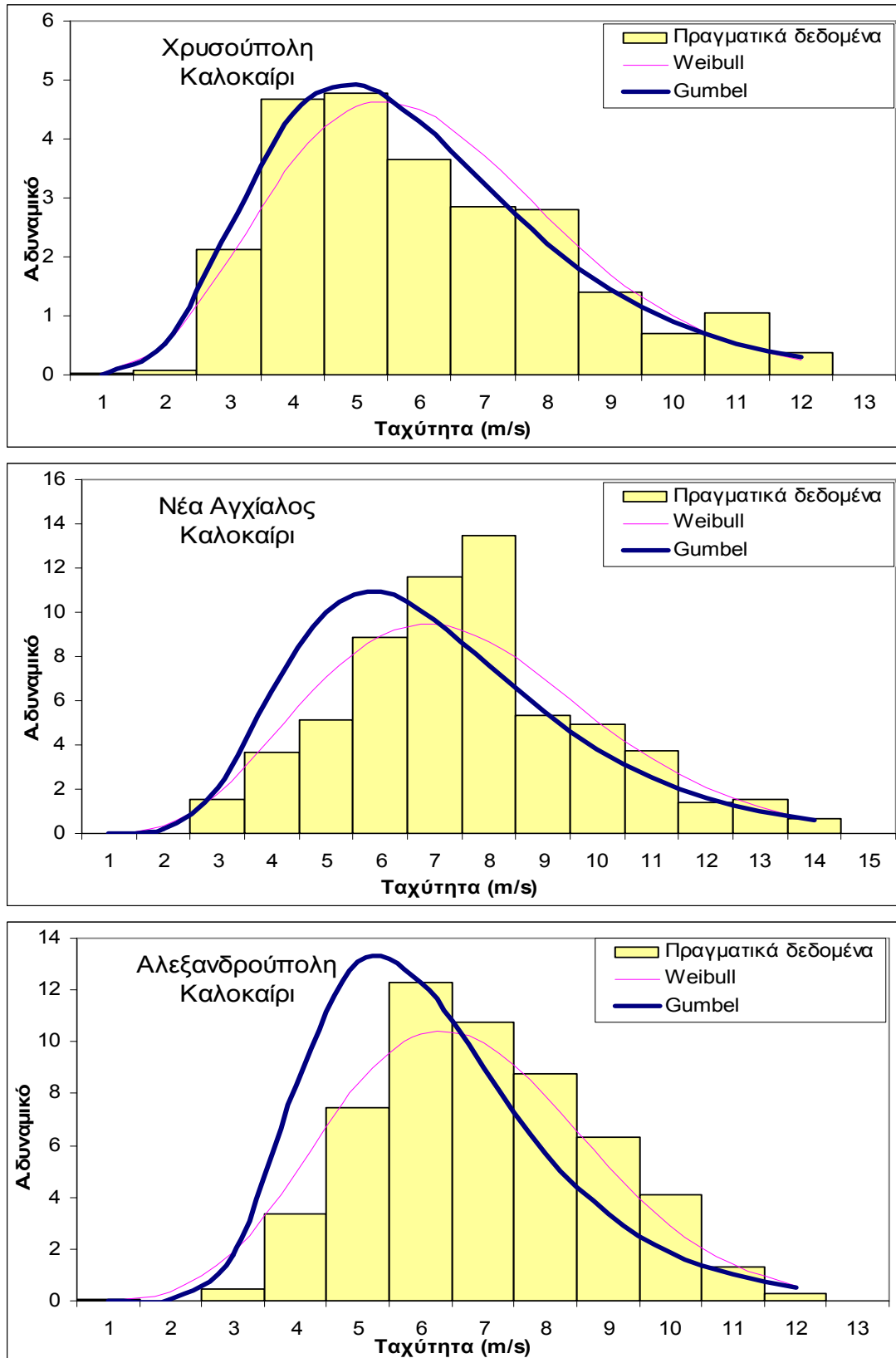
$$\sigma.σ.=|P_{\text{πραγματικό}}-P_{\text{θεωρητικό}}|/P_{\text{πραγματικό}} \quad (4.6)$$

Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι μέσοι όροι για κάθε μια από τις κατανομές, που έχουν περιγραφεί και τα αποτελέσματα παρατίθενται στον πίνακα (4.2). Από τη μελέτη των τιμών του πίνακα είναι σαφές ότι το αιολικό δυναμικό προσομοιώνεται καλύτερα από τις κατανομές Weibull και Gumbel, όταν οι παράμετροι που τις χαρακτηρίζουν υπολογίζονται εφαρμόζοντας τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Αντίθετα, αν οι παράμετροι κλίμακας και σχήματος της κατανομής Weibull υπολογιστούν με τις εμπειρικές μεθόδους Γ και E, το αιολικό δυναμικό που προκύπτει με τη χρήση αυτών των κατανομών, διαφέρει πολύ από το αντίστοιχο των πραγματικών δεδομένων, για όλες τις εποχές και για όλους τους σταθμούς, κυρίως για την μέθοδο E. Συγκεκριμένα, το αποτέλεσμα αποτελεί υποεκτίμηση του πραγματικού αιολικού δυναμικού. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι οι κατανομές που προκύπτουν έτσι, υπερεκτιμούν το ποσοστό των μικρών ταχυτήτων του ανέμου, οι οποίες συμβάλουν λίγο στο συνολικό αιολικό δυναμικό, σε βάρος του ποσοστού των υψηλότερων ταχυτήτων, οι οποίες έχουν μεγαλύτερη συμβολή.

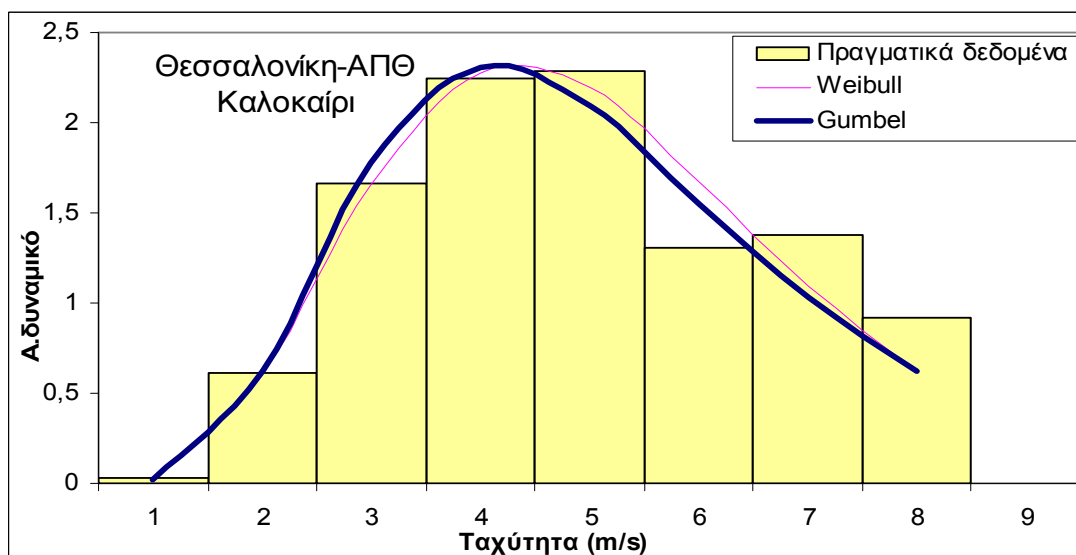
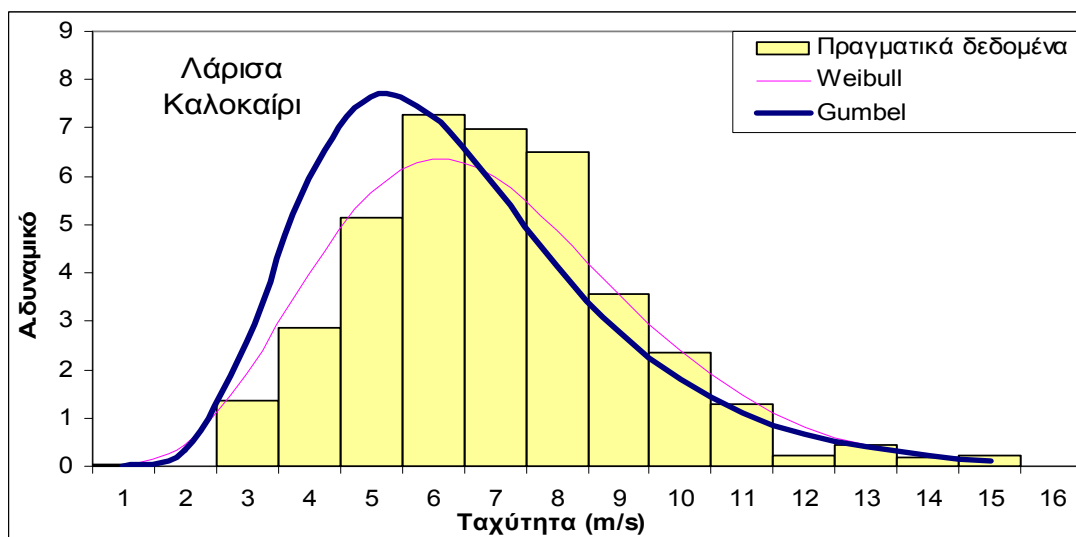
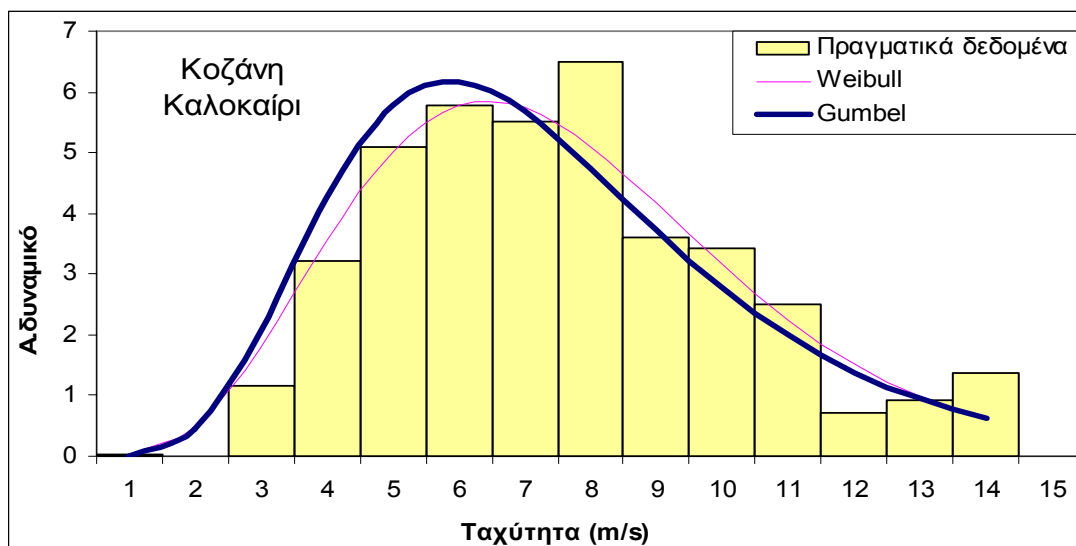
Παρόμοια αποτελέσματα δίνει και η Λογαριθμοκανονική κατανομή, η οποία μάλιστα έχει τη χειρότερη απόδοση. Από την άλλη, η κατανομή Rayleigh, η οποία είναι μια ειδική περίπτωση της κατανομής Weibull, σε άλλες περιπτώσεις υποεκτιμά και σε άλλες υπερεκτιμά το αιολικό δυναμικό, διατηρώντας, παρόλα αυτά, μια καλύτερη απόδοση από τις προηγούμενες κατανομές.

Πίνακας 4.3 Πίνακας με το αιολικό δυναμικό για α) τα πραγματικά δεδομένα, (σχέση 3.3) β) την κατανομή Weibull, (σχέση 3.4) γ) την κατανομή Gumbel, (σχέση 3.5), και τα σχετικά σφάλματα επί της εκατό (σ.σ.%), για όλες τις εποχές και όλους τους σταθμούς.

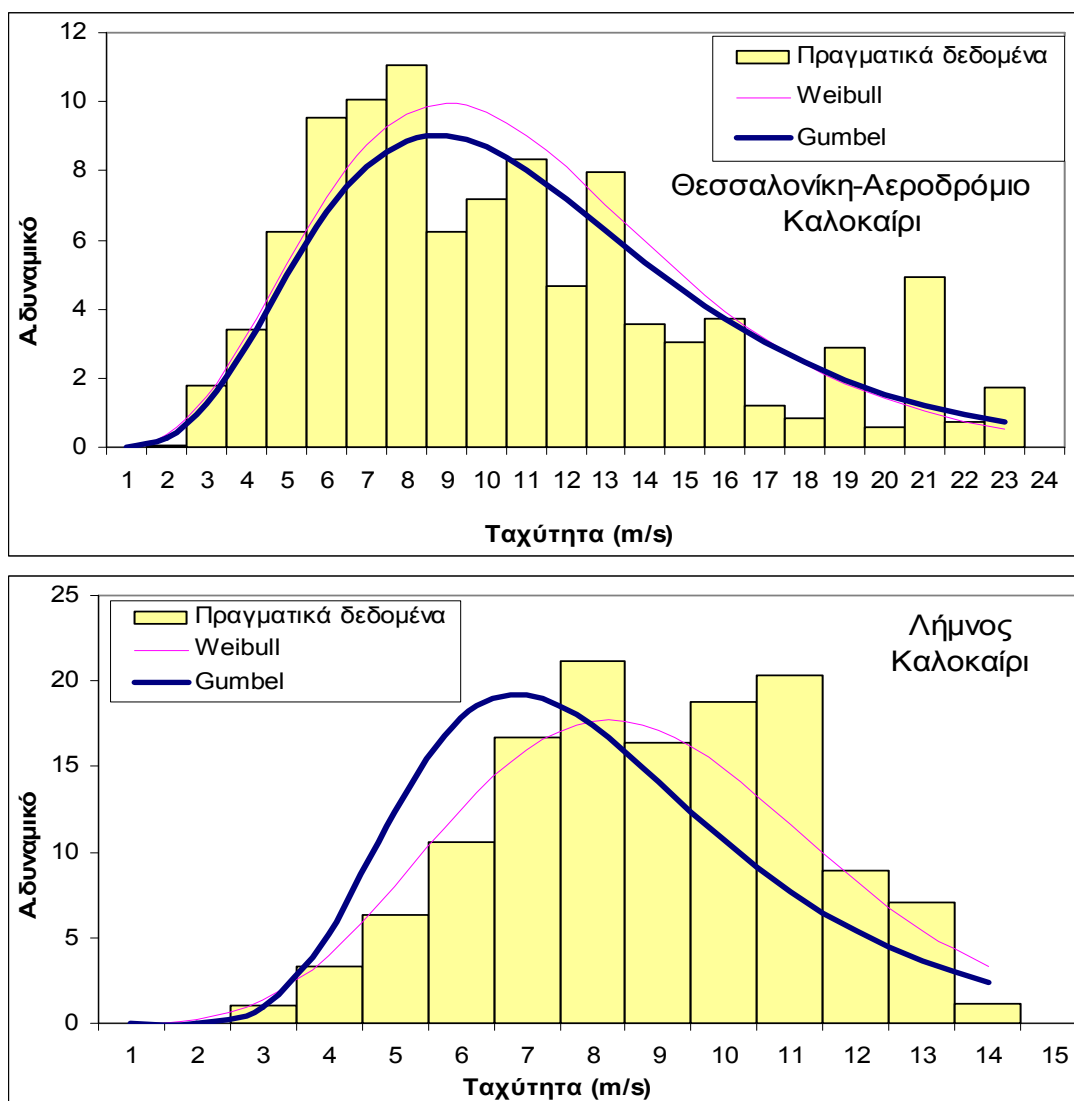
		Πραγματικά Δεδομένα	Gumbel		Weibull	
Σταθμοί	Εποχές	Αιολικό Δυναμικό	Αιολικό Δυναμικό	σ.σ.%	Αιολικό Δυναμικό	σ.σ.%
Αλεξ/πολη	A	81,2	82,5	1,6	82,0	1,0
	K	55,1	56,9	3,3	53,6	2,7
	Φ	73,3	74,8	2,0	73,6	0,4
	X	137,7	138,8	0,8	141,6	2,9
Θεσ/νίκη ΑΠΘ	A	14,4	14,9	3,5	15,1	4,9
	K	10,5	10,6	1,4	10,5	0,5
	Φ	10,7	11,4	6,1	11,8	10,3
	X	18,4	17,8	3,0	17,3	5,9
Θεσ/νίκη Αεροδρόμιο Μακεδονία	A	92,9	92,7	0,2	45,1	2,4
	K	99,7	99,5	0,2	106,5	6,8
	Φ	87,0	85,9	1,3	85,9	1,3
	X	160,1	159,0	0,7	162,9	1,7
Κοζάνη	A	44,2	46,0	4,1	44,7	1,1
	K	39,8	41,2	3,5	40,5	1,8
	Φ	40,4	42,1	4,2	40,4	0,0
	X	76,2	76,6	0,5	74,8	1,8
Λάρισα	A	38,2	40,1	5,0	38,4	4,0
	K	38,4	40,4	5,2	38,1	6,7
	Φ	26,6	28,6	7,2	27,2	6,0
	X	37,3	35,3	5,4	39,4	6,1
Λήμνος	A	196,0	188,1	4,0	188,1	0,5
	K	131,9	120,4	8,7	123,0	0,8
	Φ	225,9	210,0	7,0	212,4	2,3
	X	373,6	402,4	7,7	350,8	5,6
Ν. Αγχίαλος	A	71,1	71,4	0,4	73,3	3,1
	K	62,0	62,3	0,5	59,9	3,4
	Φ	61,0	61,7	1,1	61,3	0,5
	X	81,6	83,3	2,1	84,2	3,2
Χρυσούπολη	A	50,0	50,7	1,4	51,1	2,2
	K	24,5	25,4	3,7	25,0	2,0
	Φ	31,5	32,1	1,9	31,4	0,3
	X	56,0	55,6	0,7	57,0	1,8



Σχήμα 4.1 Προσομοίωση του πραγματικού αιολικού δυναμικού (W/m^2) από τις κατανομές Weibull και Gumbel, για την εποχή του καλοκαιριού, για τους σταθμούς της Νέας Αγχιάλου, της Χρυσούπολης και της Αλεξανδρούπολης.



Σχήμα 4.2 Προσομοίωση του πραγματικού αιολικού δυναμικού (W/m^2) από τις κατανομές Weibull και Gumbel, για την εποχή του καλοκαιριού, για τους σταθμούς της Κοζάνης, της Λάρισας και της Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ).



Σχήμα 4.3 Προσομοίωση του πραγματικού αιολικού δυναμικού (W/m^2) από τις κατανομές Weibull και Gumbel, για την εποχή του καλοκαιριού, για τους σταθμούς της Θεσσαλονίκης (Αεροδρόμιο Μακεδονία) και της Λήμνου.

Το διαθέσιμο αιολικό δυναμικό, έτσι όπως υπολογίστηκε, από τα πραγματικά ανεμομετρικά δεδομένα, την κατανομή Gumbel και την κατανομή Weibull με τις σχέσεις 4.3, 4.4 και 4.5, αντίστοιχα, παρουσιάζονται συγκεντρωμένα στον πίνακα 4.3. Από τη σύγκριση των τιμών του αιολικού δυναμικού προκύπτει, ότι η κατανομή Weibull και η κατανομή Gumbel προσομοιώνουν με μεγάλη αξιοπιστία, το μέσο εποχιακό διαθέσιμο αιολικό δυναμικό για το σύνολο των σταθμών, καθώς το μέσο σχετικό σφάλμα για την κατανομή Weibull είναι 2.9, ενώ για την κατανομή Gumbel είναι 3.1. Παρόμοια ομοιότητα παρατηρείται και στις τιμές της τυπικής απόκλισης του σχετικού σφάλματος για τις δύο κατανομές, καθώς για την κατανομή Weibull έχει τιμή 2.44, ενώ για την Gumbel η

τιμή είναι 2,47. Παρατηρείται επίσης, ότι η κατανομή Gumbel προσομοιώνει ικανοποιητικά το αιολικό δυναμικό για τους περισσότερους σταθμούς, αλλά για τους σταθμούς της Λάρισας και της Λήμνου αυτό δεν επιτυγχάνεται τόσο καλά. Από την άλλη, η κατανομή Weibull αποτυγχάνει μόνο στον σταθμό της Λάρισας, ενώ στους άλλους σταθμούς τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά. Τέλος, παρατηρείται ότι με εξαίρεση το χειμώνα για τον σταθμό Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ), ο συντελεστής μεταβλητότητας, δεν ξεπερνά το 9% και για τις δύο κατανομές.

Χαρακτηριστικά, παρουσιάζεται (Σχήμα 4.1, 4.2 και 4.3) η περιγραφή του πραγματικού διαθέσιμου αιολικού δυναμικού από το αιολικό δυναμικό που απεικονίζουν οι κατανομές Gumbel και Weibull, για τους καλοκαιρινούς μήνες για όλους τους σταθμούς της μελέτης.

4.2 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΟΥ ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΥ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ

Τα επόμενο βήμα είναι η περιγραφή της γεωγραφικής και εποχιακής κατανομής του μέσου αιολικού δυναμικού. Για την καλύτερη περιγραφή των αποτελεσμάτων θεωρήθηκε σκόπιμο να ληφθεί σταθερή η πυκνότητα, $\rho=1.2\text{Kgr/m}^3$, ώστε να απαλειφτεί η επιρροή της γεωγραφικής και εποχιακής κατανομής της. Επίσης, έγινε αναγωγή των παραμέτρων κλίμακας και σχήματος της κατανομής Weibull στα 10 μέτρα, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων ανάμεσα στους σταθμούς.

Πίνακας 4.4. Μέσο εποχιακό αιολικό δυναμικό (W/m^2) για όλους τους σταθμούς.

	Άνοιξη	Καλοκαίρι	Φθινόπωρο	Χειμώνας
Αλεξ/πολη	52,0	36,2	51,7	99,1
Θεσσαλονίκη ΑΠΘ	8,5	7,3	8,5	11,4
Θεσσαλονίκη Αεροδρ.	130,4	148,1	117,1	197,6
Κοζάνη	58,9	56,2	52,8	91,1
Λάρισα	26,4	26,5	17,9	27,6
Λήμνος	149,5	102,8	177,7	294,1
Ν. Αγχιάλος	94,2	78,6	81,6	106,6
Χρυσούπολη	72,4	38,6	45,1	78,7

Το πρώτο συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί από τη μελέτη του πίνακα 4.4, είναι ότι ο χειμώνας είναι η εποχή με το μεγαλύτερο αιολικό δυναμικό, για όλους τους σταθμούς. Η

διαφορά, μάλιστα, με τις άλλες εποχές είναι πολύ μεγάλη. Αντίθετα, το χαμηλότερο αιολικό δυναμικό εμφανίζεται την εποχή του καλοκαιριού, για τους παράκτιους σταθμούς και το φθινόπωρο, για τους ηπειρωτικούς σταθμούς. Επιπρόσθετα, το μεγαλύτερο αιολικό δυναμικό, όπως εξάλλου αναμενόταν, παρουσιάζεται στη θαλάσσια περιοχή της Λήμνου, η οποία όπως αποδείχθηκε και σε άλλες έρευνες (Katsoulis, 1993; Lalas, 1983), μαζί με όλο το Κεντρικό Αιγαίο, είναι η πλέον ιδανική περιοχή για την εφαρμογή προγραμμάτων αιολικής ενέργειας. Σε αντίθεση, σταθμοί οι οποίοι βρίσκονται στο εσωτερικό της Ελληνικής χερσονήσου, μακριά από θάλασσα, διαθέτουν μικρές τιμές αιολικού δυναμικού. Επίσης, δεν θα πρέπει να παραληφθεί το γεγονός, ότι ο σταθμός της Θεσσαλονίκης (Αεροδρόμιο), διαθέτει τις υψηλότερες τιμές αιολικού δυναμικού, μετά τον σταθμό της Λήμνου. Ο συγκεκριμένος σταθμός, ενώ θεωρείται παραθαλάσσιος, συχνά επηρεάζεται από ηπειρωτικές αέριες μάζες βόρειας προέλευσης, οι οποίες συμβάλλουν στην υψηλή τιμή του αιολικού δυναμικού της περιοχής. Τέλος, ο σταθμός της Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ) διαθέτει μικρές τιμές αιολικού δυναμικού, καθώς περιβάλλεται από υψηλά κτήρια, που αποτελούν ένα είδος εμποδισμού στην ροή του ανέμου, με αποτέλεσμα να μην θεωρείται αντιπροσωπευτικός της περιοχής του. Παρόλα αυτά, συμπεριλήφθηκε στην ανάλυση, λόγω της αντικειμενικής μέτρησης και αξιόπιστης καταγραφής των δεδομένων.

4.3 ΕΞΑΓΩΓΙΜΟ ΑΙΟΛΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ

Θα πρέπει να σημειωθεί, ότι είναι αδύνατον να εξαχθεί όλο το διαθέσιμο αιολικό δυναμικό, P_a , που διέρχεται κάθετα από τη μονάδα επιφανείας, που δημιουργεί ο έλικας μιας ανεμογεννήτριας. Επίσης, σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία, ακόμα και μια ιδανική ανεμογεννήτρια μπορεί να αξιοποιήσει θεωρητικά, έως και το 59% της διαθέσιμης ενέργειας. Αυτό το ανώτερο θεωρητικό όριο, ονομάζεται όριο του Betz, και εξηγείται ως εξής: Η ανεμογεννήτρια παράγει ηλεκτρική ενέργεια μετατρέποντας την κινητική ενέργεια του αέρα σε μηχανική και στη συνέχεια σε ηλεκτρική. Κατά την διαδικασία αυτή, η ταχύτητα του ανέμου μειώνεται, καθώς διέρχεται από την επιφάνεια που καλύπτει ο έλικας. Όσο αυξάνει η απόδοση της ανεμογεννήτριας, τόσο μειώνεται η ταχύτητα του ανέμου. Όταν η επιβράδυνση του ανέμου μεγαλώσει αρκετά, η ροή του αέρα προσπαθεί να αποφύγει την επιφάνεια του έλικα, η οποία λειτουργεί ως “φράγμα”, και παρεκκλίνει, με αποτέλεσμα να μειώνεται τελικά η ροή του αέρα που διέρχεται δια μέσω της επιφάνειας

του έλικα, δημιουργώντας ένα ανώτερο όριο στην απόδοση της μηχανής. Το όριο αυτό, όπως αποδείχτηκε από τον Albert Betz το 1920, είναι $16/27=0.59$.

$$P_{e,\max} = 0,59P_a \quad (4.7)$$

Στην πραγματικότητα, η απόδοση των σημερινών ανεμογεννητριών κυμαίνεται γύρω στο 25-43% του διαθέσιμου αιολικού δυναμικού, γεγονός που εκφράζεται μέσω του συντελεστή απόδοσης C_p . Έτσι, το εξαγόμενο αιολικό δυναμικό ανά μονάδα επιφάνειας, δίνεται τελικά από την σχέση (Justus, 1978):

$$P_e = \frac{1}{2} \rho \int_0^{\infty} C_p(V) V^3 f(V) dV \quad (4.8)$$

Όπου ο συντελεστής απόδοσης C_p δεν είναι σταθερός, αλλά εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου. Πρέπει επίσης να παρατηρηθεί ότι, το αιολικό δυναμικό που τελικά αξιοποιείται από μια γεννήτρια, και υπολογίζεται από την σχέση 4.8, είναι αυτό που αντιστοιχεί σε ταχύτητα ανέμου μεγαλύτερη από την ταχύτητα έναρξης (cut-in speed), και μικρότερο από την ταχύτητα αποκοπής (cut-off speed).

Οι παραπάνω δύο όροι αναφέρονται στα όρια επιχειρησιακής λειτουργίας μιας πραγματικής ανεμογεννήτριας. Έτσι, ταχύτητα έναρξης είναι το κατώτατο όριο της ταχύτητας που πρέπει να έχει ο άνεμος, ώστε να τεθεί σε λειτουργία μια ανεμογεννήτρια. Αυτός ο περιορισμός είναι απαραίτητος για τη βιωσιμότητα προγραμμάτων αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας, καθώς, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1, οι μικρές ταχύτητες ανέμου συμβάλουν ελάχιστα στο αιολικό δυναμικό μιας περιοχής, ακόμα και στην περίπτωση που η συχνότητα εμφάνισής τους είναι πολύ μεγάλη έναντι των αντίστοιχων συχνοτήτων μεγαλύτερων ταχυτήτων. Αυτό τελικά έχει ως συνέπεια, το κόστος λειτουργίας μιας ανεμογεννήτριας να είναι μεγαλύτερο από την απόδοσή της, για τις μικρές ταχύτητες, με αποτέλεσμα να είναι ασύμφορη η λειτουργία της. Η ταχύτητα αποκοπής εξαρτάται από τον τύπο της ανεμογεννήτριας και το υφιστάμενο αιολικό δυναμικό και γενικά, όσο πιο μεγάλη και αποδοτική είναι μια ανεμογεννήτρια, τόσο μεγαλύτερη είναι και η ταχύτητα έναρξής της. Έτσι, οι τιμές της κυμαίνονται από 3m/s μέχρι 6m/s. Αντίθετα, ταχύτητα αποκοπής, είναι το ανώτερο όριο λειτουργίας μιας ανεμογεννήτριας. Όπως είναι λογικό, οι πολύ μεγάλες ταχύτητες ανέμου είναι δυνατόν να προκαλέσουν φθορά στα δομικά στοιχεία μιας ανεμογεννήτριας, με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητη η διακοπή λειτουργίας της πέρα από κάποιο όριο. Και αυτό το όριο, όπως και το προηγούμενο, εξαρτάται από τον τύπο κατασκευής της ανεμογεννήτριας. Έτσι μεγάλες ανεμογεννήτριες, με μεγάλη αντοχή

στο αιολικό φορτίο, διαθέτουν υψηλά όρια αποκοπής, ενώ μικρές ανεμογεννήτριες διαθέτουν χαμηλότερα όρια αποκοπής. Αυτά τα όρια κυμαίνονται γενικά μεταξύ 18 και 29m/s.

Ένας άλλος παράγοντας που θα πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη, κατά την εφαρμογή προγραμμάτων αιολικής ενέργειας, είναι η μεταβλητότητα της ταχύτητας του ανέμου σε κλιματική βάση, δηλαδή από δεκαετία σε δεκαετία. Αυτό προκύπτει από το γεγονός, ότι το αιολικό δυναμικό είναι ανάλογο του κύβου της ταχύτητας, με αποτέλεσμα, μια μικρή μεταβολή στην ταχύτητα του ανέμου να έχει τριπλάσια μεταβολή στο διαθέσιμο, και κατ' επέκταση στο εξαγώγιμο αιολικό δυναμικό, όπως προκύπτει από τη σχέση:

$$\frac{dP}{P} = 3 \frac{du}{u} \quad (4.9)$$

Μελέτες στη Μεγάλη Βρετανία έδειξαν ότι χρονικές περίοδοι που χαρακτηρίζονται από υψηλή ή χαμηλή μέση ταχύτητα, και οι οποίες ενδέχεται να παρατείνονται ακόμα και για μια δεκαετία, οφείλονται σε ένα βαθμό στην επικράτηση συνθηκών δυτικού ή αντικυκλωνικού τύπου κυκλοφορίας, αντίστοιχα (Palutikof *et al*, 1987). Τέτοιες καταστάσεις, θα πρέπει να αντιμετωπίζονται με προσοχή, καθώς μια εκτίμηση του αιολικού δυναμικού, βασισμένη σε μια περίοδο με υψηλή ταχύτητα ανέμου, είναι δυνατό να προκαλέσει υπερεκτίμηση του αιολικού δυναμικού μεταγενέστερων περιόδων, και η οποία μπορεί να ξεπεράσει το ακόμα και το 50% της πραγματικής τιμής. Οι επιπτώσεις της φυσικής μεταβλητότητας του ανέμου μπορούν να ελαχιστοποιηθούν με την επιλογή της κατάλληλης ανεμογεννήτριας, για την επιλογή της οποίας, βασική προϋπόθεση παραμένει η γνώση και η μελέτη αυτής της μεταβλητότητας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

Προέκταση του ανέμου με το ύψος

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως είναι γνωστό από την καθημερινή μετεωρολογική πρακτική, οι διάφοροι μετεωρολογικοί σταθμοί καταγράφουν τον άνεμο του παρεδάφιου τμήματος του οριακού στρώματος, και συνήθως στα πρώτα 20 m. Αυτό από μόνο του δεν εξυπηρετεί τόσο πολύ τις εφαρμογές της Αιολικής Ενέργειας, η οποία απαιτεί τη γνώση της κατανομής του ανέμου μέχρι και τα 100 m, όσο περίπου είναι και το ύψος των μεγαλύτερων ανεμογεννητριών. Έτσι, καθίσταται επιτακτική η ανάγκη της θεμελίωσης ενός θεωρητικού υπόβαθρου, που να εξετάζει τη συμπεριφορά του ανέμου με το ύψος, με τη βοήθεια του οποίου θα είναι δυνατή η εκτίμηση του ανέμου από το σημείο μετρήσεως του οριακού στρώματος στο ύψος εγκατάστασης των ανεμογεννητριών. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι να εκτιμηθεί ο άνεμος σε μεγαλύτερο ύψος, μερικοί από τους οποίους περιγράφονται περιληπτικά στις παρακάτω ενότητες.

5.2 ΠΡΟΕΚΤΑΣΗ ΜΕΣΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΜΙΚΡΗΣ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ

Ο πρώτος τρόπος, ο οποίος προτείνεται από τον Justus (1978), διαπραγματεύεται την προέκταση του μέσου ανέμου μικρής χρονικής κλίμακας, και συγκεκριμένα από λίγα δευτερόλεπτα μέχρι 1 ώρα. Η διαδικασία αυτή βασίζεται στη Θεωρία Ομοιότητας Οριακού Στρώματος του Monin-Obukhov (*Monin-Obukhov Boundary Layer Similarity Theory*) (Monin and Obukhov, 1954). Η μεταβολή του ανέμου με το ύψος, σύμφωνα με αυτή τη θεωρία, ακολουθεί ένα λογαριθμικό νόμο και δίνεται από τη σχέση:

$$u = \frac{u_*}{k} \left(\ln \left(\frac{z}{z_o} \right) - \Psi \left(\frac{z}{L} \right) \right) \quad 5.1$$

Όπου Ψ διεθνής συνάρτηση (universal function), ενώ L είναι το μήκος Monin-Obukhov, το οποίο συνδέεται με την ευστάθεια της ατμόσφαιρας και το ύψος ανάμιξης (mixing length)

του οριακού στρώματος και εξαρτάται από την ταχύτητα τριβής u_* και τη ροή θερμότητας H και ορίζεται από την σχέση:

$$L = \frac{-Tu_*^3}{gk(w'T')} = \frac{-\rho c_p Tu_*^3}{kgH} \quad 5.2$$

Όπου k είναι η σταθερά vonKarman ($\sim 0,4$), z_0 είναι το μήκος τραχύτητας του εδάφους και u_* η ταχύτητα τριβής. Στη συγκεκριμένη μεθοδολογία η ταχύτητα τριβής u_* υπολογίζεται χρησιμοποιώντας το διάνυσμα της ταχύτητας σε ένα ορισμένο επίπεδο (π.χ. 10 μέτρα) και η ροή θερμότητας υπολογίζεται με βάση την ολική ροή ακτινοβολίας (*net radiation*), δηλαδή τη διαφορά της εισερχόμενης και της εξερχόμενης μικρού και μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας. Επίσης, θα πρέπει να επισημανθεί ότι ο λογαριθμικός νόμος ισχύει και επαληθεύεται όταν ο γύρω χώρος των μετρήσεων είναι ομοιογενής, με ελάχιστα δυνατόν φυσικά εμπόδια και ομαλή μορφολογία.

Μια άλλη μέθοδος, που αποτελεί παραλλαγή της προηγούμενης και προτάθηκε από τον Sedefian (1980), βασίζεται στον εκθετικό νόμο (σχέση 5.3), που περιγράφει την καθ' ύψος δομή και κατανομή της ταχύτητας του ανέμου. Χαρακτηριστικό στοιχείο της μεθόδου αυτής είναι η εξάρτηση της εκθετικής παραμέτρου αποκλειστικά από το μήκος τραχύτητας z_0 και την ευστάθεια της ατμόσφαιρας (*stability conditions-αριθμός Richardson*), σύμφωνα με την σχέση 5.4:

$$u(z) = u_a (z/z_a)^a \quad 5.3$$

$$a = \frac{\Phi(z/L)}{\left[\ln(z_\gamma/z_0) - \Psi(z_\gamma/L) \right]} \quad 5.4$$

όπου Φ διεθνής συνάρτηση της ευστάθειας, όπως και η Ψ , ενώ z_γ το γεωμετρικό ύψος του ατμοσφαιρικού στρώματος που εξετάζεται. Το μήκος τραχύτητας L υπολογίζεται και πάλι από τη σχέση 5.2.

5.3 ΠΡΟΕΚΤΑΣΗ ΜΕΣΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΜΕΓΑΛΗΣ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ

Αντίθετα με τον μέσο άνεμο μικρής χρονικής διάρκειας, η επέκταση ανέμου μεγαλύτερης χρονικής κλίμακας, όπως μηνιαία, εποχιακή ή ετήσια, δεν υπακούει τον λογαριθμικό νόμο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά την διάρκεια μιας μεγαλύτερης χρονικής περιόδου λαμβάνουν χώρα διάφορες ατμοσφαιρικές καταστάσεις, κάτω από διαφορετικές συνθήκες ατμοσφαιρικής ευστάθειας, οι οποίες είναι ικανές να αλλάζουν

συνεχώς την παράμετρο L , και κατά συνέπεια το προφίλ του ανέμου. Συνεπώς, για το σκοπό της εκτίμησης του ετήσιου, ή εποχιακού αιολικού δυναμικού, η γνώση των συνθηκών ευστάθειας δεν έχουν τόσο μεγάλη σημασία, καθώς διερευνάται το μέσο ετήσιο ή εποχιακό προφίλ του ανέμου. Επίσης ενδέχεται, τα χαρακτηριστικά του εδάφους στο γύρω χώρο του ανεμομέτρου, να μεταβάλλονται με την διεύθυνση, με αποτέλεσμα η παράμετρος τραχύτητας, η οποία παίζει σημαντικό ρόλο στην κατακόρυφη δομή του ανέμου, να αλλάζει σημαντικά με τη διεύθυνση του ανέμου (Justus, 1978). Η εξάρτηση της τραχύτητας του εδάφους από τον τύπο του εδάφους φαίνεται στον Πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1. Τιμές της τραχύτητας του εδάφους z_0 , για διάφορους τύπους εδάφους (Justus, 1978; Stull, 1992).

Τύπος Εδάφους	Τραχύτητα εδάφους z_0 (m)
Παγωμένη επιφάνεια	0,00001-0,00003
Ομαλή θαλάσσια επιφάνεια	0,0002-0,0003
Αμμώδης περιοχή	0,0001-0,001
Επίπεδη χιονισμένη επιφάνεια	0,005
Ομαλές αγροτικές περιοχές	0,01-0,07
Δασώδη περιοχή (χαμηλά δέντρα)	0,05-0,1
Δασώδη περιοχή (ψηλά δέντρα)	0,2-0,9
Πόλη με χαμηλά κτήρια	1 – 2
Πόλη με υψηλά κτήρια	1 – 4
Ορεινή περιοχή	2 – 80

Στον πίνακα 5.1 παρατηρείται ότι όσο πιο ομαλή είναι η υποκείμενη επιφάνεια του εδάφους, τόσο μικρότερη είναι η παράμετρος τραχύτητας. Οι παραπάνω λόγοι παρέχουν την δυνατότητα επιχειρηματολογίας για τη χρησιμοποίηση του εκθετικού νόμου για την επέκταση του μέσου (μηνιαίου, εποχιακού, ή ετήσιου) ανέμου, ο οποίος λαμβάνει υπόψη τη μέση τραχύτητα του εδάφους, καθώς και τη μέση τιμή της ευστάθειας (μήκος L) για την τοποθεσία του ανεμομέτρου. Αυτός ο νόμος εκφράζεται με την σχέση:

$$u(z) = u_a (z / z_a)^a \quad 5.5$$

Όπου u_a και z_a η ταχύτητα και το ύψος στο επίπεδο του ανεμομέτρου, αντίστοιχα. Στη παραπάνω σχέση, ο εκθέτης a είναι μια παράμετρος που εξαρτάται τόσο από τη μέση τραχύτητα του εδάφους και την ταχύτητα του αέρα, όσο και από τη μέση ευστάθεια της ατμόσφαιρας για την κάθε τοποθεσία.

Μετά από μελέτες της ταχύτητας του ανέμου σε πολλαπλά επίπεδα, από τέσσερις διαφορετικές τοποθεσίες, οι Justus and Mikhail (1976), ανέπτυξαν την εξής αναλυτική έκφραση για την εκθετική παράμετρο της προηγούμενης σχέσης:

$$a = [0.37 - 0.088 \ln(u_a)] / [1 - 0.088 \ln(z_a/10)] \quad 5.6$$

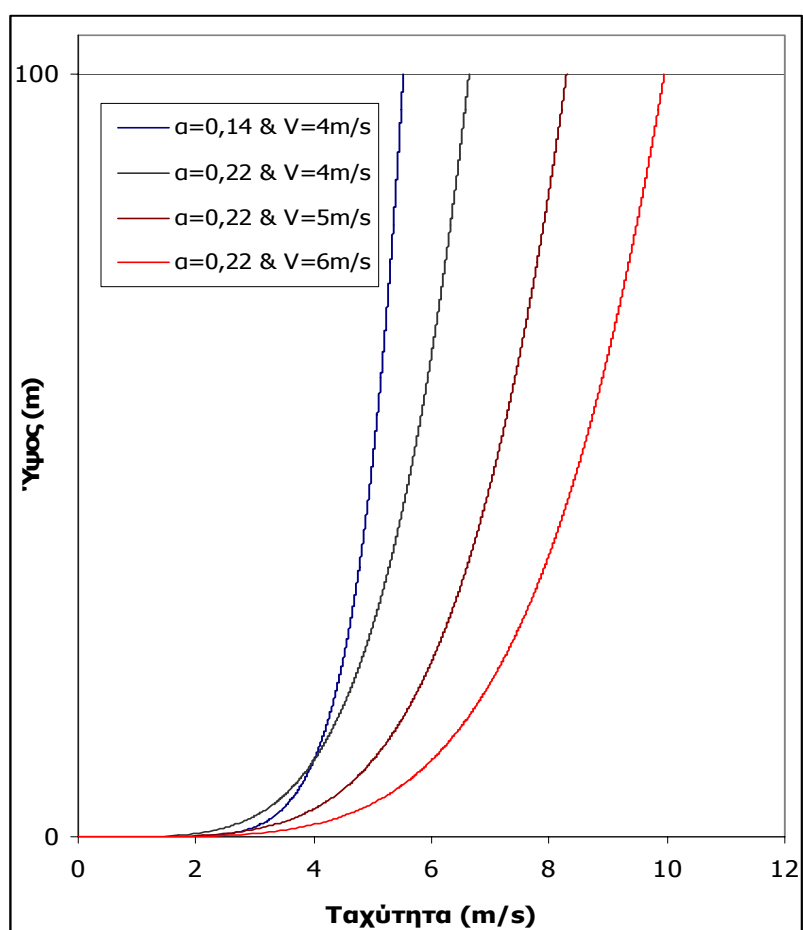
Στη σχέση αυτή, η εκθετική παράμετρος εξαρτάται, κατά πρώτο λόγο από την ταχύτητα του ανέμου και κατά δεύτερο λόγο από το ύψος του ανεμομέτρου. Η μέση ταχύτητα και η μέση ευστάθεια της ατμόσφαιρας έχουν ληφθεί υπόψη έμμεσα και εμπεριέχονται στους συντελεστές της σχέσης 5.6. Εδώ θα πρέπει να παρατηρηθεί ότι η σχέση αυτή προέκυψε μετά από ανάλυση ταχυτήτων ανέμου με στάθμη αναφοράς τα 10 μέτρα και από τοποθεσίες, όπου η παράμετρος ταχύτητας z_0 είχε τιμές μέσα στο διάστημα [0.05, 0.5] (Justus, 1978).

Πίνακας 5.2 Μεταβολή της παραμέτρου a με το ύψος (στήλες) και την ταχύτητα του ανέμου (γραμμές) με βάση την σχέση 5.6.

		Ταχύτητα (m/s)									
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Ύψος (m)	1	0,324	0,342	0,354	0,363	0,370	0,376	0,381	0,386	0,390	0,394
	2	0,271	0,286	0,296	0,303	0,309	0,314	0,318	0,322	0,326	0,329
	4	0,217	0,230	0,237	0,243	0,248	0,252	0,256	0,259	0,262	0,264
	6	0,186	0,196	0,203	0,208	0,212	0,216	0,219	0,221	0,224	0,226
	8	0,164	0,173	0,179	0,183	0,187	0,190	0,193	0,195	0,197	0,199
	10	0,147	0,155	0,160	0,164	0,167	0,170	0,172	0,175	0,177	0,178
	12	0,133	0,140	0,145	0,148	0,151	0,154	0,156	0,158	0,160	0,161

Μελετώντας τον πίνακα 5.2 όπου φαίνεται η μεταβολή της εκθετικής παραμέτρου a με το ύψος μέτρησης και τη μέση ταχύτητα του ανέμου, αφού ληφθεί πρώτα υπόψη το γεγονός ότι οι περισσότερες μετρήσεις ανέμου γίνονται σε ύψος 2-20 μέτρα και η μέση ταχύτητα του ανέμου είναι της τάξης του 1-12 m/s, προκύπτει ότι η παράμετρος a λαμβάνει τιμές στο διάστημα [0.14, 0.4]. Εδώ θα πρέπει να αναφερθεί επίσης ότι μεγάλες τιμές της ταχύτητας του εδάφους συνεπάγονται μεγάλες τιμές της εκθετικής παραμέτρου a , ενώ αντίθετα, όταν η ταχύτητα του εδάφους είναι μικρή, η εκθετική παράμετρος a είναι επίσης μικρή. Η επίδραση που ασκεί η παράμετρος a και η μέση ταχύτητα στο κατακόρυφο προφίλ του ανέμου στα πρώτα 100 μέτρα γίνεται πιο κατανοητή, αν

εξετάσουμε το παρακάτω κριτήριο ευαισθησίας (sensitivity test). Επιλέγονται τέσσερις περιπτώσεις, όπου η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος του ανεμομέτρου (10 m) είναι της τάξης των 4m/s, 4m/s, 5m/s και 6m/s, ενώ οι τιμές της εκθετικής παραμέτρου είναι $\alpha=0.14$, $\alpha=0.22$, $\alpha=0.22$ και $\alpha=0.22$ αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στο σχήμα 5.1. Από τη σύγκριση των καμπυλών α, β, γ και δ, προκύπτει, ότι η ταχύτητα στο ύψος του ανεμομέτρου είναι ο κύριος παράγοντας που καθορίζει την αύξηση της έντασης του ανέμου με το ύψος. Κατά δεύτερο λόγο, η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος καθορίζεται από την εκθετική παράμετρο. Μάλιστα, συγκρίνοντας δύο καμπύλες με την ίδια μέση ταχύτητα ανεμομέτρου, αλλά διαφορετική τιμή του α , προκύπτει ότι μεγάλες τιμές της εκθετικής παραμέτρου υποεκτιμούν τον άνεμο στα πρώτα μέτρα, αλλά υπερεκτιμούν αυτόν σε μεγαλύτερο ύψος. Ένα τέτοιο κατακόρυφο προφίλ ανέμου είναι



Σχήμα 5.1. Προσομοίωση της καθ' ύψος μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου, με βάση την εξίσωση Mikhail-Justus, για τέσσερις ξεχωριστές περιπτώσεις. Ύψος ανεμομέτρου 10 μέτρα.

χαρακτηριστικό τύπων εδαφών με έντονα φυσικά εμπόδια, τα οποία ενισχύουν την τυρβώδη ροή (mechanical turbulence), με αποτέλεσμα η ταχύτητα του ανέμου να είναι μειωμένη κοντά στο έδαφος. Όσο απομακρύνεται κανείς από την επιφάνεια του εδάφους η επίδραση της τυρβώδους ροής μειώνεται γρήγορα και η ταχύτητα του ανέμου αυξάνει απότομα. Αντίθετα, μικρές τιμές του a χαρακτηρίζουν άνεμο με μεγαλύτερες ταχύτητες στα πρώτα μέτρα πάνω από το έδαφος και μικρή αύξηση στα επόμενα μέτρα, χαρακτηριστικό ομαλού τύπου εδάφους με λίγα φυσικά εμπόδια, όπου η ένταση και η επίδραση της τυρβώδους ροής είναι μειωμένη.

Αξιοσημείωτη είναι επίσης και η μεθοδολογία των Peterson and Hennessey (1978), οι οποίοι μετά από έρευνες σε πυλώνα εφοδιασμένο με ανεμόμετρα σε διάφορα ύψη, πρότειναν την τιμή $1/7$ για την περιγραφή της μέσης ετήσιας τιμής της εκθετικής παραμέτρου της σχέσης 5.3. Σύμφωνα με τους εν λόγω ερευνητές, μια τέτοια παραδοχή είναι ικανή να δώσει μια ελαφρά υποεκτιμημένη, αλλά λογική, πρόβλεψη του μέσου ετήσιου αιολικού δυναμικού σε μεγαλύτερα ύψη, αρκεί ο φυσικός περίγυρος του ανεμομέτρου να είναι ομαλός και το μήκος τραχύτητας, τουλάχιστο μιας τάξης μεγέθους μικρότερο από το ύψος των μετρήσεων.

Πίνακας 5.3 Μέσες εποχιακές τιμές της εκθετικής παραμέτρου της σχέσης 5.5

	Άνοιξη	Καλοκαίρι	Φθινόπωρο	Χειμώνας
Αλεξανδρούπολη	0,289	0,298	0,290	0,284
Θεσ/νίκη ΑΠΘ	0,333	0,336	0,353	0,337
Θεσ/νίκη Αεροδρόμιο	0,264	0,253	0,269	0,259
Κοζάνη	0,308	0,296	0,315	0,292
Λάρισα	0,329	0,317	0,353	0,362
Λήμνος	0,245	0,248	0,239	0,225
Ν. Αγχίαλος	0,269	0,265	0,270	0,264
Χρυσούπολη	0,274	0,296	0,295	0,251

Μετά τον υπολογισμό της εκθετικής παραμέτρου a για κάθε εποχή και για όλους τους σταθμούς της ανάλυσης, με βάση την σχέση 5.6, προέκυψε ο Πίνακας 5.3. Όπως ήταν αναμενόμενο, σταθμοί με μικρή μέση εποχιακή ταχύτητα, χαρακτηρίζονται από μεγάλες τιμές της εκθετικής παραμέτρου, όπως ο σταθμός της Λάρισας και ο σταθμός της Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ). Αντίθετα σταθμοί με μεγαλύτερη μέση ταχύτητα, όπως ο σταθμός της Λήμνου, εμφανίζουν τις μικρότερες εκθετικές παραμέτρους.

5.4 ΠΡΟΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ WEIBULL ΜΕ ΤΟ ΥΨΟΣ (MIKHAIL-JUSTUS)

Η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος, που προτάθηκε από τους Mikhail and Justus και αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, μας αναγκάζει να επανεκτιμήσουμε την κατανομή Weibull, που έχει επιλεγεί για την αναλυτική περιγραφή του ανέμου, από το ύψος του ανεμομέτρου στο επιθυμητό ύψος της ανεμογεννήτριας. Η μεθοδολογία είναι ανάλογη, όπως και στην περίπτωση της προέκτασης της μέσης ταχύτητας του ανέμου και περιλαμβάνει την προέκταση των παραμέτρων κλίμακας και σχήματος σε διαφορετικό ύψος χρησιμοποιώντας τις σχέσεις:

$$k(z) = k_a [1 - 0.088 \ln(z_a/10)] / [1 - 0.088 \ln(z/10)] \quad 5.7$$

$$\text{και} \quad c(z) = c_a (z/z_a)^a \quad 5.8$$

Όπου η εκθετική παράμετρος a δίνεται από την σχέση 5.6. Σ' αυτό το σημείο επιβάλλεται να αναφερθεί ότι εκφράστηκαν ενστάσεις από διάφορους ερευνητές, όπως οι Peterson *et al.* (1978) και Sedefian (1980), για την επαλήθευση αυτών των σχέσεων και εξέφρασαν την άποψη ότι οι σχέσεις αυτές δεν μπορούν να θεωρηθούν παγκόσμιες, όπως ισχυρίστηκαν αρχικά οι Mikhail and Justus (1976). Επιπρόσθετα, οι Doran *et al.* (1978), απέδειξαν ότι οι εξισώσεις 5.6, 5.7 και 5.8 είναι δυνατόν να οδηγήσουν σε σημαντικά σφάλματα, εφόσον χρησιμοποιηθούν σε μεμονωμένες τοποθεσίες, αλλά επιβεβαίωσαν ότι μπορούν να οδηγήσουν σε αξιόπιστη εκτίμηση του μέσου ετήσιου αιολικού δυναμικού εκτεταμένων περιοχών και μεγάλων συγκεντρώσεων ανεμογεννητριών.

Βάση της ίδιας μεθοδολογίας, και με τη χρήση των σχέσεων 5.7 και 5.8, υπολογίστηκαν οι παράμετροι κλίμακας και σχήματος στο ύψος των 100 μέτρων, οι οποίες παρατίθενται στους πίνακες 5.4 και 5.5. Το ύψος των 100 μέτρων επιλέχτηκε, ως ενδεικτικό του ύψους των περισσότερων σύγχρονων ανεμογεννητριών.

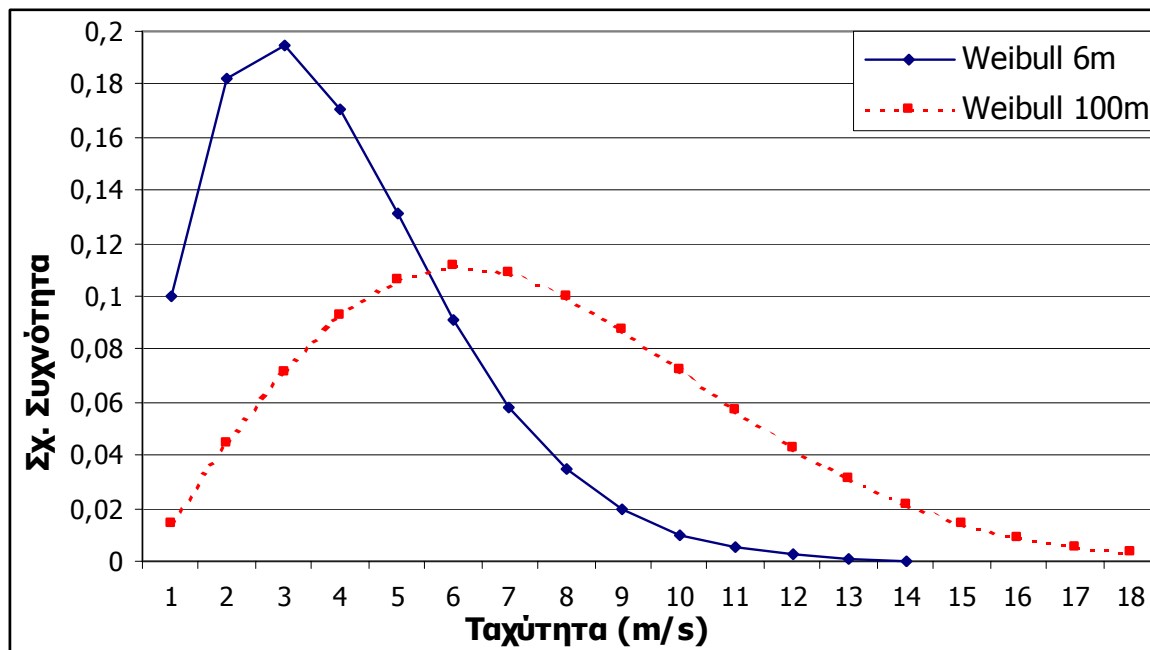
Πίνακας 5.4 Παράμετρος κλίμακας της κατανομής Weibull, μετά την προέκτασή της στα 100m.

	Άνοιξη	Καλοκαίρι	Φθινόπωρο	Χειμώνας
Αλεξανδρούπολη	7,19	7,12	7,10	7,74
Θεσ/νίκη ΑΠΘ	3,46	3,45	2,63	3,53
Θεσ/νίκη Αεροδρόμιο	6,78	7,87	6,38	6,94
Κοζάνη	6,46	6,92	6,26	7,13
Λάρισα	5,34	5,82	4,76	3,98
Λήμνος	8,85	8,70	9,31	10,3
Ν. Αγχιάλος	7,30	8,06	7,21	7,43
Χρυσούπολη	7,05	6,23	6,06	6,28

Πίνακας 5.5 Παράμετρος σχήματος της κατανομής Weibull, μετά την προέκτασή της στα 100m.

	Άνοιξη	Καλοκαίρι	Φθινόπωρο	Χειμώνας
Αλεξανδρούπολη	1,89	2,35	1,97	1,65
Θεσ/νίκη ΑΠΘ	1,48	1,56	1,14	1,37
Θεσ/νίκη Αεροδρόμιο	1,41	1,61	1,36	1,27
Κοζάνη	1,53	1,76	1,50	1,50
Λάρισα	1,58	1,83	1,50	1,14
Λήμνος	1,87	2,32	1,93	1,85
Ν. Αγχιάλος	1,67	2,15	1,76	1,66
Χρυσούπολη	1,80	1,91	1,69	1,49

Όπως φαίνεται στους πίνακες 5.4 και 5.5, οι παράμετροι Weibull, είναι αυξημένοι στο νέο ύψος, σε σχέση με τις τιμές τους στο ύψος του ανεμομέτρου, με συνέπεια να αλλάζει και η καμπύλη Weibull, που περιγράφει την κατανομή των συχνοτήτων του ανέμου. Η αλλαγή αυτή γίνεται πιο κατανοητή στο Σχήμα 5.2, όπου απεικονίζεται η καμπύλη στο ύψος του ανεμομέτρου και στο νέο ύψος των 100 μέτρων, για την εποχή του καλοκαιριού στον σταθμό της Αλεξανδρούπολης. Η μεθοδολογία αυτή, προσομοιώνει στην ουσία την αύξηση του μέσου ανέμου με το ύψος, μεταφέροντας και ανακατανέμοντας μέρος των αρχικών συχνοτήτων προς μεγαλύτερες ταχύτητες στο νέο ύψος των 100 μέτρων, με τελικό αποτέλεσμα την αύξηση της μέσης ταχύτητας. Επιπρόσθετα, η νέα καμπύλη, όπως φαίνεται από το σχήμα 5.2, καλύπτει μεγαλύτερο φάσμα ταχυτήτων, λόγω της αύξησης



Σχήμα 5.2. Σύγκριση της κατανομής Weibull στο έδαφος (6m) με την αντίστοιχη κατανομή στα (100m), για τον σταθμό της Νέας Αγχιάλου.

της ταχύτητας με το ύψος. Για την αντικειμενική προσομοίωση της κατανομής του ανέμου στο ύψος των 100 μέτρων, επιλέχθηκε το φάσμα των ταχυτήτων, να επεκτείνεται μέχρι ταχύτητες 2m/s μεγαλύτερες από τη μέγιστη ταχύτητα που περιείχε η κάθε χρονοσειρά.

Μετά τον υπολογισμό των παραμέτρων κλίμακας και σχήματος στο νέο ύψος, υπολογίστηκε ο όρος $(1/2)c^3\Gamma(1+3/\kappa)$ (Πίνακας 5.6), ο οποίος θεωρείται αντιπροσωπευτικός του αιολικού δυναμικού, έτσι όπως εκτιμάται από την κατανομή Weibull.

Πίνακας 5.6 Τιμές του όρου $(1/2)c^3\Gamma(1+3/\kappa)$ στο ύψος των 100 μέτρων.

	Άνοιξη	Καλοκαίρι	Φθινόπωρο	Χειμώνας
Αλεξανδρούπολη	262.1	207.3	242.6	394.5
Θεσ/νίκη ΑΠΘ	88.4	45.3	32.7	67.4
Θεσ/νίκη Αεροδρόμιο	350.0	432.0	315.8	479.9
Κοζάνη	260.5	320.5	245.8	360.5
Λάρισα	139.1	145.8	108.4	122.8
Λήμνος	497.6	382.4	556.1	795.8
Ν. Αγχίαλος	325.7	324.0	290.2	345.1
Χρυσούπολη	263.4	169.1	183.5	249.3

Συνδυάζοντας τις τιμές των πινάκων 4.4 και 5.6, υπολογίστηκε η της εκατό αύξηση του αιολικού δυναμικού (Πίνακας 5.7), κατά την προέκτασή του από το ύψος των 10m στο ύψος των 100m. Από την μελέτη του πίνακα 5.7 προκύπτει, ότι τη μικρότερη αύξηση, για όλες τις εποχές, την έχει ο σταθμός του Αεροδρομίου ‘Μακεδονία’ και ακολουθεί ο σταθμός της Λήμνου. Αντίθετα, η μεγαλύτερη αύξηση αντιστοιχεί στο σταθμό του ΑΠΘ και ακολουθούν ο σταθμός της Λάρισας και στη συνέχεια ο σταθμός της Κοζάνης. Με λίγα λόγια, ηπειρωτικοί σταθμοί, με σχετικά μικρό αιολικό δυναμικό στο ύψος του ανεμομέτρου, παρουσιάζουν μεγαλύτερη αύξηση του αιολικού δυναμικού με το ύψος, σε σχέση με τους παραθαλάσσιους σταθμούς, οι οποίοι στο ύψος του ανεμομέτρου διαθέτουν σχετικά αυξημένο αιολικό δυναμικό. Αυτό ενδέχεται να οφείλεται στην φαινόμενη ανύψωση του εδάφους, η οποία είναι περισσότερη έντονη στην περίπτωση που τα φυσικά εμπόδια είναι αυξημένα, και τα οποία έχουν σαν αποτέλεσμα τον περιορισμό της ταχύτητας κοντά στο έδαφος. Έτσι, σε αυτές τις περιπτώσεις, όσο αυξάνει το ύψος, το πεδίο της ταχύτητας αποκαθίσταται ταχύτερα, προσδίδοντας μεγαλύτερη αύξηση στο αιολικό δυναμικό. Επιπρόσθετα, σε εποχιακή βάση, η μεγαλύτερη αύξηση παρατηρείται την εποχή του καλοκαιριού, ενώ η μικρότερη την εποχή του χειμώνα, όπου η μέση

ταχύτητα ήταν αυξημένη για τους περισσότερους σταθμούς. Όλα αυτά έχουν σαν αποτέλεσμα μια μικρή αλλαγή, τόσο στην γεωγραφική, όσο και στην εποχιακή κατανομή του αιολικού δυναμικού στα 100m, σε σχέση με τις αντίστοιχες των 10m.

Πίνακας 5.7 Τιμές της αύξησης (επί της εκατό) του αιολικού δυναμικού, από το ύψος των 10 m στο ύψος των 100m.

	Άνοιξη	Καλοκαίρι	Φθινόπωρο	Χειμώνας
Αλεξανδρούπολη	505	590	461	378
Θεσ/νίκη ΑΠΘ	1142	640	366	605
Θεσ/νίκη Αεροδρόμιο	223	250	224	191
Κοζάνη	429	586	457	375
Λάρισα	532	574	620	427
Λήμνος	301	345	275	225
Ν. Αγχίαλος	316	392	324	287
Χρυσούπολη	338	420	388	278

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

Μελέτη μέγιστων ριπών ανέμου

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού από ανεμογεννήτριες αποτελεί μια πολύ σημαντική οικονομική επένδυση και γι' αυτό το λόγο θα πρέπει να προστατεύεται από κάθε είδους παράγοντες που θέτουν σε κίνδυνο την ακεραιότητα και τη λειτουργία της. Ο πιο σημαντικός κίνδυνος προέρχεται από τα διάφορα έντονα μετεωρολογικά φαινόμενα και κυρίως από τον ίδιο τον άνεμο, τον οποίο καλείται να αξιοποιήσει. Κατά συνέπεια, προκύπτει, ότι οι μέγιστες ριπές ανέμου θα πρέπει να μελετούνται πριν την οριστική εγκατάσταση μιας ανεμογεννήτριας, όπως και στην περίπτωση άλλων τεχνικών κατασκευών, όπως γέφυρες, υψηλά κτήρια, πυλώνες μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας κτλ.

Έτσι, εφαρμόζεται μια μεθοδολογία για την εκτίμηση των μέγιστων ριπών ανέμου με βάση τη γνώση της μέσης ωριαίας ταχύτητας του ανέμου, και η οποία αποτελεί παραλλαγή της μεθοδολογίας που προτάθηκε από την Lidija Cvitan, (2003). Η τελευταία εργασία είναι βασισμένη σε οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης, η οποία προτείνει τη χρήση μέσων 10-λεπτων ταχυτήτων ανέμου για τον υπολογισμό διαφόρων παραμέτρων, ανάμεσά τους και οι μέγιστες ριπές του ανέμου.

6.2 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η συγκεκριμένη μεθοδολογία, η οποία αναπτύχθηκε με στόχο την προστασία των πυλώνων υψηλής τάσης από τους ισχυρούς ανέμους, βασίζεται στην εκτίμηση των στιγμιαίων μέγιστων ριπών V_g του ανέμου, με συχνότητα δειγματοληψίας 2 δευτερόλεπτα, σύμφωνα με τη σχέση:

$$V_g = k_g V_{mean} \quad (6.1)$$

όπου V_{mean} η μέση 10-λεπτη ταχύτητα του ανέμου και k_g ο παράγοντας ριπής (gust factor), ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$k_g = 1 + \frac{2.28}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (6.2)$$

όπου z_0 η παράμετρος τραχύτητας, η οποία εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Στην προκειμένη περίπτωση η παράμετρος τραχύτητας παρουσιάζει μεγάλες τιμές, αλλά και έντονη μεταβλητότητα, από διεύθυνση σε διεύθυνση. Αυτό οφείλεται, πρώτον, στα έντονα φυσικά εμπόδια που περιβάλλουν το σημείο που έγιναν οι μετρήσεις, όπως ψηλά κτήρια από δυτικές ανατολικές και βόρειες διευθύνσεις, αλλά και ψηλά δέντρα στον συνολικό περίγυρο του ανεμομέτρου, το οποίο είναι τοποθετημένο στην κορυφή κτηρίου, στο ύψος των 17 μέτρων. Αντίθετα από νότιες διευθύνσεις τα φυσικά εμπόδια είναι λιγότερα, με αποτέλεσμα η παράμετρος τραχύτητας να μειώνεται. Έτσι εκτιμάται ότι το z_0 παίρνει τιμές σε ένα διάστημα από 0,8 μέχρι 1,0.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση των μέγιστων ριπών του ανέμου, καλύπτουν την περίοδο από 8 Σεπτεμβρίου 2004 μέχρι 28 Φεβρουαρίου 2005 και προέρχονται από τον αυτόματο σταθμό του Τομέα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, ο οποίος λαμβάνει μετρήσεις στιγμιαίας ταχύτητας ανέμου κάθε 5 δευτερόλεπτα. Από αυτές τις μετρήσεις αποθηκεύονται οι μέγιστες τιμές για κάθε 5-λεπτο, και οι οποίες αποτελούν τις μέγιστες ριπές του ανέμου. Ταυτόχρονα, γίνεται μια δειγματοληψία στην έναρξη κάθε 5-λέπτου, κατά την οποία ο σταθμός λαμβάνει μια στιγμιαία τιμή ταχύτητας ανέμου.

Λόγω της έλλειψης μέσων 10-λεπτων ταχυτήτων, καθώς και λόγω του ότι οι καταστάσεις ισχυρών ανέμων επηρεάζουν όχι μόνο τη μέση 10-λεπτη ταχύτητα του ανέμου αλλά γενικότερα τις μέσες ωριαίες ταχύτητες καθ' όλη σχεδόν τη διάρκεια της ημέρας, η μεθοδολογία επεκτάθηκε και εφαρμόστηκε σε μέσες ωριαίες ταχύτητες, οι οποίες υπολογίστηκαν από τη μεσοποίηση των 12 τιμών που αντιστοιχούσαν σε κάθε ώρα (μία για κάθε πεντάλεπτο). Έτσι αντί της σχέσης 6.1 χρησιμοποιήθηκε η σχέση:

$$V_g = k_g \bar{V}_{\max} \quad (6.3)$$

Όπου V_g η μέγιστη ριπή του ανέμου σε μια μέρα και $\bar{V}_{\max}$ η μέγιστη ωριαία ταχύτητα του ανέμου την ίδια μέρα. Κατά την ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν μόνο εκείνες οι μέρες κατά τη διάρκεια των οποίων η μέση ταχύτητα του ανέμου διατηρήθηκε πάνω από 4m/s για

τουλάχιστο τρεις συνεχόμενες ώρες. Η επιλογή ενός τόσο χαμηλού ορίου έγινε, πρώτον, επειδή η τοποθεσία του σταθμού δεν ευνοούσε την δημιουργία ισχυρών ανέμων, και δεύτερον, επειδή η χρονοσειρά των δεδομένων ήταν σύντομη, με αποτέλεσμα να μην καλύπτει αρκετές καταστάσεις ισχυρών ανέμων. Επίσης, κατά τη διάρκεια αυτών των ημερών είναι το πιο πιθανό να προκληθούν ζημιές σε μηχανικές κατασκευές, όπως οι ανεμογεννήτριες.

Επιπρόσθετα, θεωρήθηκε ότι ο διαχωρισμός των μετρήσεων και η μελέτη των ριπών σε ξεχωριστές κατηγορίες, ανάλογα με τη διεύθυνση του μέσου ανέμου, θα βελτιστοποιούσε τα αποτελέσματα της ανάλυσης, λόγω των έντονων εμποδίων στον περίγυρο του σταθμού, τα οποία, όπως είναι φυσικό παραμορφώνουν πολύ σημαντικά το πεδίο του ανέμου. Τα ζεύγη των μέγιστων ημερήσιων ριπών και των ημερήσιων μέγιστων ωριαίων ταχυτήτων αρχικά ήταν διαχωρισμένες σε τρεις κατηγορίες: αυτά που είχαν βορειοδυτική διεύθυνση (ΒΔ), αυτά που είχαν νότια-νοτιοανατολική προέλευση (N-NA) και τέλος αυτά που είχαν ανατολική διεύθυνση (Α). Από αυτές, η πρώτη κατηγορία ήταν η πολυπληθέστερη, καθώς αποτελούσε το 70% του συνόλου των περιπτώσεων, η δεύτερη περιείχε το 20% των περιπτώσεων, ενώ η τρίτη κατηγορία περιείχε το 10%. Λόγω του μικρού όμως αριθμού ισχυρών ανέμων με ανατολική προέλευση, η τελευταία κατηγορία συγχωνεύτηκε και μελετήθηκε μαζί με τους ανέμους νότιας-νοτιοανατολικής προέλευσης.

Αρχικά, τα ζεύγη των μέγιστων ημερήσιων ριπών και των μέγιστων μέσων ωριαίων ταχυτήτων, ταξινομήθηκαν σε κλάσεις οι οποίες έχουν εύρος 1,5 m/s. Στην συνέχεια υπολογίστηκαν οι μέσες τιμές των μέγιστων ημερήσιων ριπών (AG) και των ημερήσιων μέγιστων ωριαίων ταχυτήτων (AV), που αντιστοιχούν σε κάθε κλάση και για κάθε διεύθυνση ξεχωριστά. Τα συμπεράσματα της ανάλυσης (Πίνακας 6.1, 6.2) φανερώνουν ότι ο λόγος AG/AV παρουσιάζει μια τάση μείωσης από τις μικρές ταχύτητες προς τις μεγάλες και για τους βορειοδυτικούς (ΒΔ), αλλά και για τους ανατολικούς (Α) και νότια-νοτιοανατολικούς ανέμους (NNA). Στην περίπτωση, μάλιστα των NNA και Α ανέμων, ο ρυθμός μείωσης του λόγου AG/AV είναι μικρότερος από ότι στους ΒΔ ανέμους, με αποτέλεσμα να αποκτά μεγαλύτερες τιμές για τις μεγάλες ταχύτητες. Αντίθετα, η διαφορά $AG-AV$, εμφανίζει αύξηση και για τις δύο περιπτώσεις ανέμων, όμως παρατηρούνται υψηλότερες τιμές για τους Α και NNA ανέμους. Αυτό σημαίνει ότι για την ίδια μέση ωριαία ταχύτητα, οι ριπές των Α και NNA είναι υψηλότερες από τις αντίστοιχες των ΒΔ ανέμων, γεγονός το οποίο μπορεί να αποδειχθεί πολύ χρήσιμο στην πρόγνωση των ριπών.

Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι τελευταίες κλάσεις, τόσο για τους ΒΔ ανέμους, όσο και για τους Α-ΝΝΑ ανέμους, περιλαμβάνουν λίγες παρατηρήσεις, και αυτό θα πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων σε αυτές τις περιπτώσεις. Αξιοσημείωτη είναι και η μικρή υπεροχή των μέσων ριπών των καταστάσεων ανέμου με Α-ΝΝΑ διεύθυνση, σε βάρος των αντίστοιχων με διεύθυνση ΒΔ, κάτι που δεν ισχύει και για την περίπτωση των μέσων ωριαίων ταχυτήτων, καθώς επικρατεί γενικά μια ισοδυναμία.

Πίνακας 6.1 Χαρακτηριστικά περιπτώσεων με ΒΔ διεύθυνση.

Εύρος κλάσης (m/s)	N	AV	AG	AG/AV	AG-AV	C	n
[4, 5.5)	27	5,0	10,1	2,04	5,2	1,18	1
[5.5, 7)	41	6,2	11,4	1,86	5,3	0,32	1
[7, 8.5)	19	7,4	13,8	1,87	6,4	0,50	-
[8.5, 10)	8	9,2	15,5	1,71	6,4	-0,99	-
[10, 11.5)	1	11,0	19,8	1,66	7,3	0	-

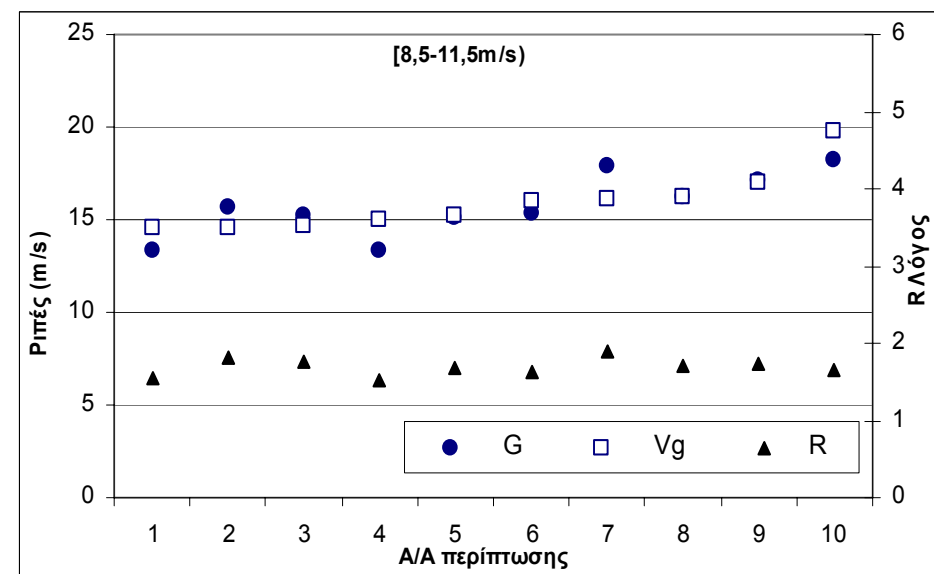
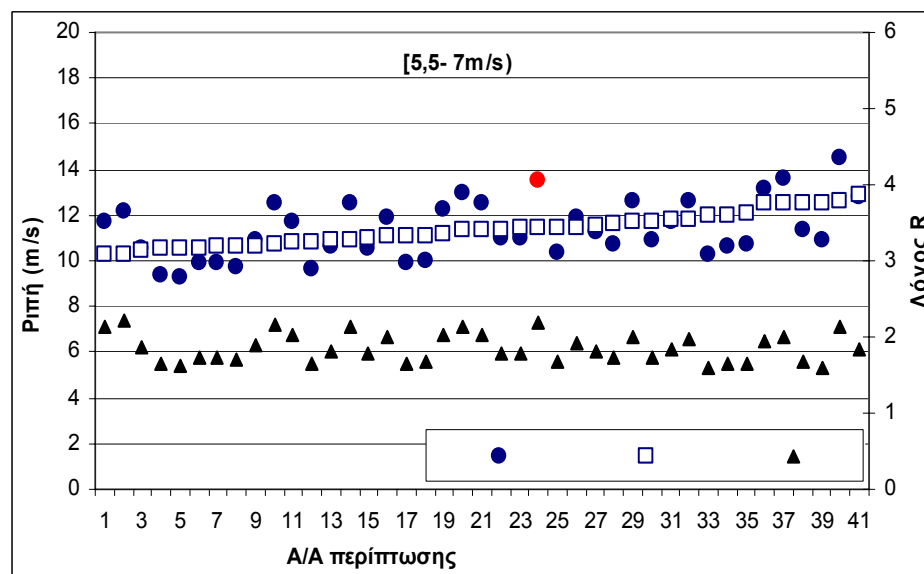
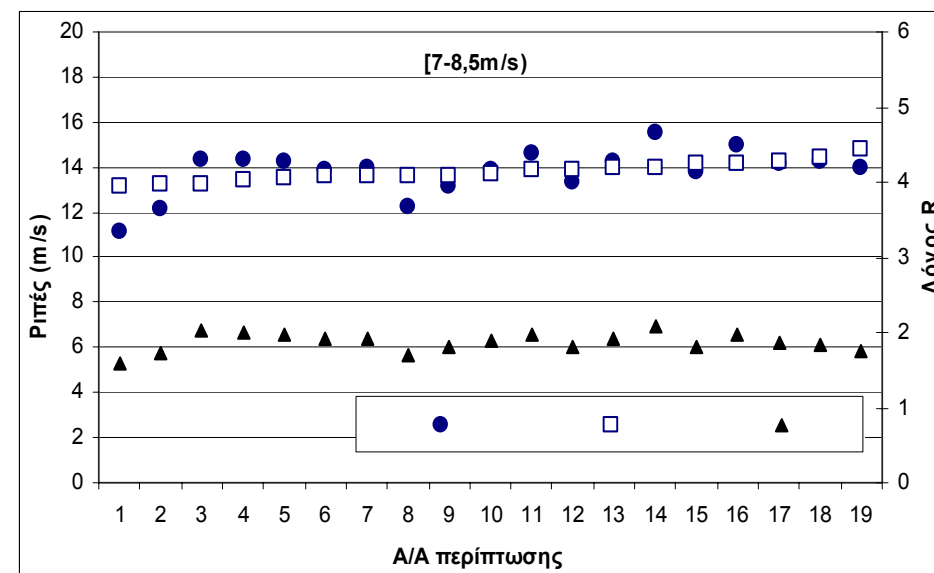
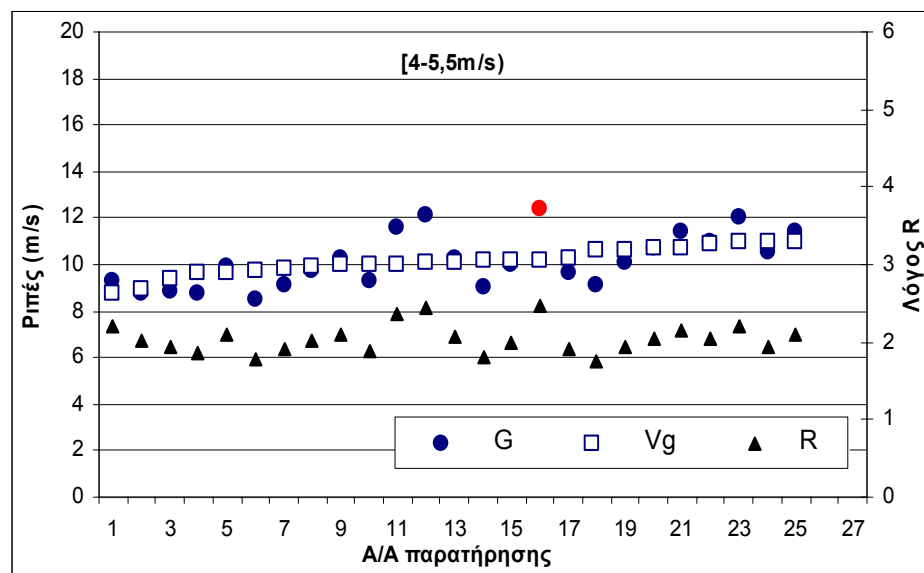
Πίνακας 6.2 Χαρακτηριστικά περιπτώσεων με Α-ΝΝΑ διεύθυνση.

Εύρος κλάσης (m/s)	N	AV	AG	AG/AV	AG-AV	C	n
[4, 5.5)	11	4,9	9,5	1,93	4,6	0,93	-
[5.5, 7)	17	6,0	11,7	1,96	5,7	1,29	1
[7, 8.5)	10	7,8	14,5	1,87	6,7	0,94	1
[8.5, 10)	2	9,1	17,0	1,86	7,9	1,08	-
[10, 11.5)	2	11,0	19,4	1,75	8,3	0,12	1

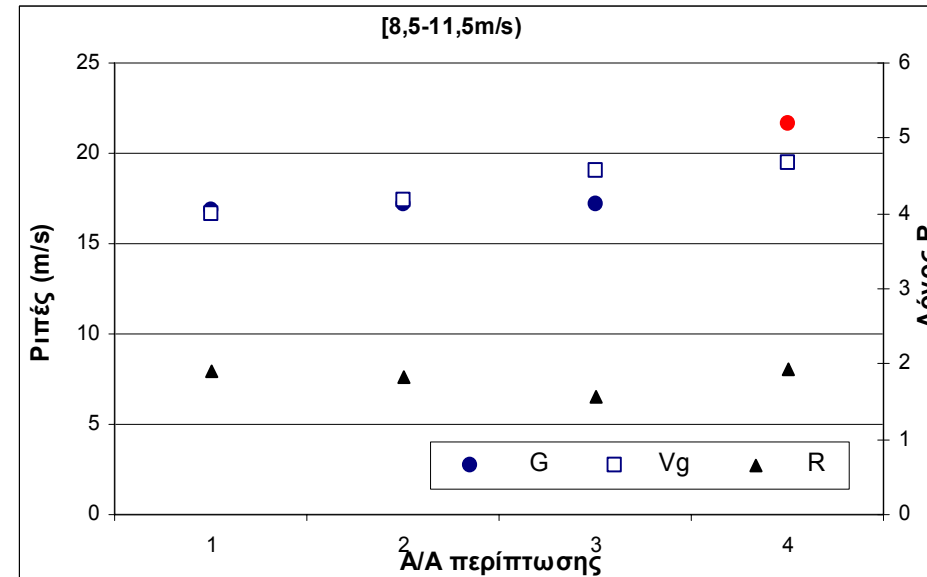
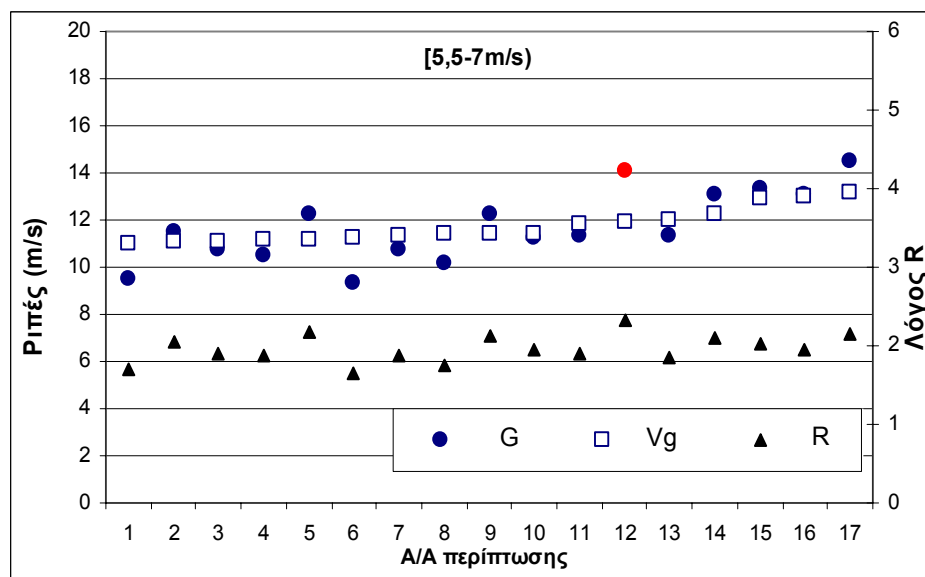
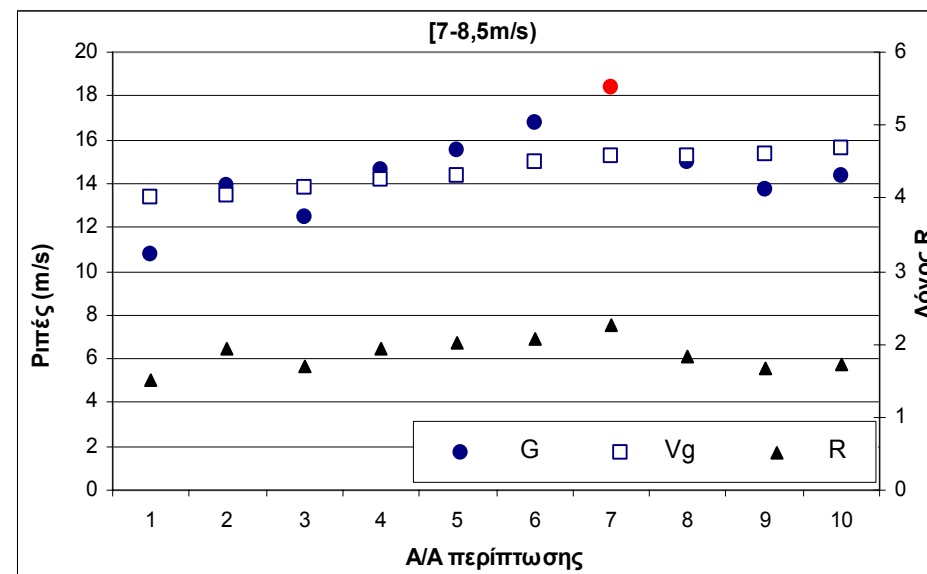
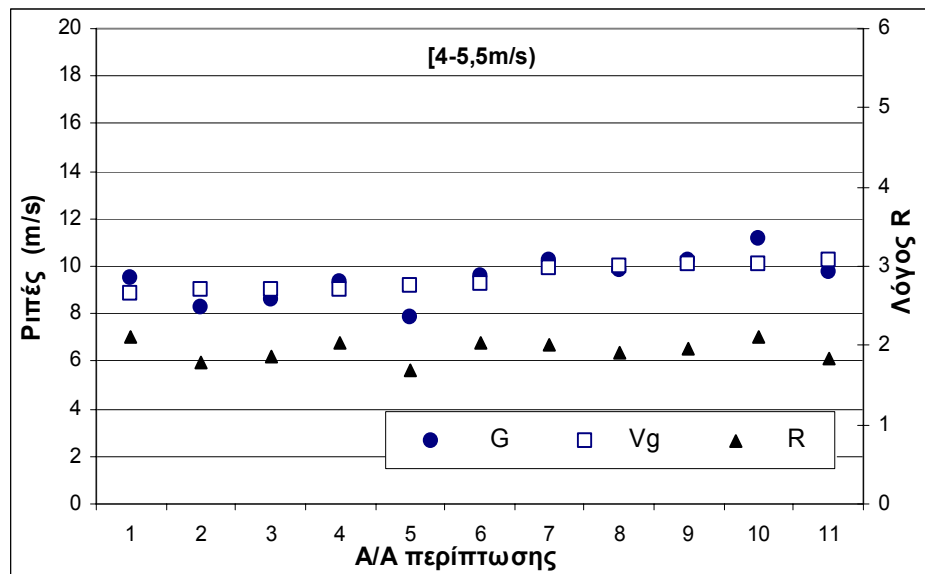
Στην συνέχεια υπολογίστηκαν οι μέγιστες ημερήσιες ριπές, έτσι όπως προβλέπονται από την σχέση 6.3, χρησιμοποιώντας παράμετρο τραχύτητας με τιμή 0,8m για τους ανατολικούς και νότιο-νοτιοανατολικούς και 1m για τις καταστάσεις Βαρδάρη. Από τη σύγκρισή τους με τις πραγματικές ριπές προκύπτει, ότι η σχέση 6.3 επιδέχεται μια μικρή διόρθωση, και συγκεκριμένα την πρόσθεση μιας σταθεράς C (πίνακας 6.1, 6.2), η οποία είναι διαφορετική για κάθε κλάση, όσο αφορά την ένταση του ανέμου, αλλά διαφορετική και για τους δύο τύπους ανέμου (ΒΔ και ΝΝΑ-Α). Στην πραγματικότητα, αυτή η σταθερά αποτελεί τη μέση τιμή της διαφοράς ανάμεσα στις μετρούμενες και τις εκτιμούμενες ριπές. Έτσι, η νέα διορθωμένη σχέση, που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των μέγιστων ημερήσιων ριπών με βάση τις ημερήσιες μέγιστες ωριαίες ταχύτητες είναι η:

$$V_g = k_g \bar{V}_{\max} + C \quad (6.4)$$

Στα σχήματα 6.1 και 6.2 φαίνονται αναλυτικά οι διαφορές ανάμεσα στις πραγματικές και τις θεωρητικές ριπές, για την κάθε κλάση ξεχωριστά, με εξαίρεση τις δύο τελευταίες



Σχήμα 6.1 Πραγματικές ριπές G, θεωρητικές ριπές Vg και ο λόγος R κάθε κλάσης, για τους ΒΔ ανέμους.



Σχήμα 6.2 Πραγματικές ριπές G, θεωρητικές ριπές Vg και ο λόγος R κάθε κλάσης, για τους A-NNA ανέμους.

κλάσεις, οι οποίες λόγω περιορισμένου αριθμού παρατηρήσεων συγχωνεύτηκαν. Ταυτόχρονα, απεικονίζεται και ο λόγος $R=G/V_{max}$ που συνοδεύει κάθε ζεύγος πραγματικής και θεωρητικής ριπής. Στους πίνακες 6.1 και 6.2, στην τελευταία στήλη, αναγράφεται το σύνολο των περιπτώσεων κατά τις οποίες οι υπολογισμένες ριπές υποεκτιμούν τις μετρούμενες τουλάχιστο κατά 2 m/s και οι οποίες στα σχήματα εμφανίζονται με κόκκινο χρώμα. Μπορούμε να πούμε ότι οι περιπτώσεις αυτές είναι σχετικά περιορισμένες σε αριθμό, καθώς παρατηρούνται μόλις 2 για τους ΒΔ και μόλις 3 για τους Α-ΝΝΑ ανέμους. Για τις υπόλοιπες περιπτώσεις η συγκεκριμένη μεθοδολογία παρέχει μια σχετικά καλή πρόβλεψη για τον κίνδυνο που διατρέχει μια κατασκευή, όπως η ανεμογεννήτρια, από έντονες ριπές ανέμου.

Θα πρέπει να τονιστεί, ότι η εκτίμηση στιγμιαίων μετρήσεων με βάση μέσες τιμές, όχι μόνο ανέμου, αλλά και γενικότερα άλλων μετεωρολογικών παραμέτρων είναι κάτι πολύ δύσκολο και γι' αυτό τα αποτελέσματα θα πρέπει να ερμηνεύονται και να αξιολογούνται με πολύ μεγάλη προσοχή. Επίσης θα πρέπει να επισημανθεί ότι λόγω απουσίας μέσων 10-λεπτων ταχυτήτων ανέμου, χρησιμοποιήθηκαν μέσες ωριαίες ταχύτητες, οι οποίες προέκυψαν μέσα από την μεσοποίηση 12 στιγμιαίων μετρήσεων για κάθε ώρα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο

Σύνοψη και συμπεράσματα

7.1 ΣΥΝΟΨΗ

Αντικειμενικός στόχος της παρούσας εργασίας είναι να επισημάνει τα απαραίτητα βήματα και τη μεθοδολογία, που πρέπει να ακολουθηθεί κάθε φορά που επιχειρείται αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού και μετατροπή του σε ηλεκτρική ενέργεια, με τη χρήση ανεμογεννητριών. Για την εκτίμηση και την πρόβλεψη του αιολικού δυναμικού, που είναι δυνατό να εξαχθεί από το κατώτερο τμήμα του οριακού στρώματος, χρησιμοποιούνται δεδομένα διεύθυνσης και ταχύτητας ανέμου από σταθμούς του δικτύου της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (ΕΜΥ) και του σταθμού του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ). Οι σταθμοί του δικτύου της ΕΜΥ που χρησιμοποιούνται είναι της Αλεξανδρούπολης, της Θεσσαλονίκης, της Λάρισας, της Λήμνου, της Κοζάνης, της Νέας Αγχιάλου και της Χρυσούπολης.

Το πρώτο βήμα της έρευνας είναι η μελέτη των βασικών κλιματολογικών χαρακτηριστικών του ανέμου για τους οκτώ σταθμούς, όπως μέγεθος της μέσης έντασης του ανέμου, καθώς και της κατανομή του στις δεκαέξι διευθύνσεις κατά εποχή. Η γνώση των βασικών ανεμολογικών χαρακτηριστικών μιας περιοχής είναι απαραίτητη, καθώς σε γενικές γραμμές καθορίζει, εάν η εφαρμογή προγραμμάτων αιολικής ενέργειας σε μια τοποθεσία είναι βιώσιμη ή όχι.

Το επόμενο βήμα για τον υπολογισμό του αιολικού δυναμικού μιας τοποθεσίας είναι η χρήση θεωρητικών κατανομών, με στόχο να περιγραφεί αναλυτικά η κατανομή της ταχύτητας του πραγματικού ανέμου. Οι κατανομές που χρησιμοποιούνται είναι κυρίως: Weibull, Gumbel, Rayleigh και Log-normal, ενώ οι παράμετροι που τις χαρακτηρίζουν διερευνώνται, τόσο με αναλυτικές, όσο και εμπειρικές μεθόδους. Στη συνέχεια επιχειρείται μια περιγραφή της γεωγραφικής κατανομής των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν την κάθε κατανομή. Επιπρόσθετα, ακολουθεί σύγκριση του αιολικού δυναμικού που υπολογίζεται από τα πραγματικά δεδομένα με το αντίστοιχο των θεωρητικών κατανομών, ώστε να προσδιοριστούν οι καταλληλότερες.

Στη συνέχεια ακολουθεί η προέκταση του ανέμου από το ύψος του ανεμομέτρου στο ύψος των 100 μέτρων, το οποίο αντιπροσωπεύει ένα ενδεικτικό ύψος των σύγχρονων ανεμογεννητριών. Η προέκταση γίνεται με βάση τον εκθετικό νόμο, ο οποίος αποτελεί μια γενίκευση των εξισώσεων της θεωρίας ομοιότητας του Monin-Obukov, κάτω από διαφορετικές καταστάσεις ατμοσφαιρικής ευστάθειας και τραχύτητας εδάφους. Η κατανομή Weibull αποτελεί μια από τις πιο κατάλληλες λύσεις, για την καθ' ύψος προέκταση του ανέμου, καθώς αξιοποιώντας την ήδη υπάρχουσα μεθοδολογία (Mikhail και Justus), επιτρέπει να περιγραφεί αναλυτικά ο άνεμος σε διαφορετικό ύψος από αυτό των ανεμομέτρων. Έτσι ελαχιστοποιείται η επίδραση των τυχαίων σφαλμάτων στις μετρήσεις, καθώς και η επίδραση που ασκεί ο φυσικός περίγυρος στο πεδίο του ανέμου κάθε τοποθεσίας, προβληματισμοί οι οποίοι θα έπρεπε να αντιμετωπιστούν κατά τη διαδικασία προέκτασης των πραγματικών μετρήσεων.

Τέλος, επιχειρείται η μελέτη των ακραίων ανεμολογικών καταστάσεων, και συγκεκριμένα η ανεύρεση μιας σχέσης ανάμεσα στις ημερήσιες μέγιστες ριπές και τις ημερήσιες μέγιστες μέσες ωριαίες ταχύτητες του ανέμου. Γι' αυτό, χρησιμοποιούνται μετρήσεις με καλύτερη ανάλυση, οι οποίες μας παρέχουν τις μέγιστες ριπές του ανέμου κάθε 5-λεπτου. Μια τέτοια μελέτη αποτελεί απαραίτητη διαδικασία στην εγκατάσταση, τόσο ανεμογεννητριών, όσο και άλλων μηχανικών κατασκευών, όπως γέφυρες και υψηλά κτήρια, καθώς βοηθά στην εκτίμηση του κινδύνου που διατρέχουν οι κατασκευές αυτές από τις ακραίες καταστάσεις ανέμου.

7.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μετά την ολοκλήρωση της παρούσας έρευνας, που ως κύριο στόχο έχει τη μελέτη του αιολικού δυναμικού, θα μπορούσαν να επισημανθούν ορισμένα βασικά συμπεράσματα.

Πρώτον, κατά την περιγραφή της κατανομής της ταχύτητας του ανέμου με τη βοήθεια θεωρητικών κατανομών, θα πρέπει να διερευνώνται περισσότερες από μια κατανομές, ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη αναπαραγωγή του πραγματικού ανέμου. Όπως φάνηκε κατά την ανάλυση των δεδομένων, πέρα από την κατανομή Weibull, η οποία προτείνεται από την διεθνή επιστημονική κοινότητα ως η πλέον ενδεδειγμένη για μελέτες πάνω στο αιολικό δυναμικό, και η κατανομή Gumbel αποδείχθηκε αξιόπιστη στην

περιγραφή του πραγματικού ανέμου, όταν οι παράμετροι που την χαρακτηρίζουν εκτιμήθηκαν με αναλυτική μέθοδο. Και οι δύο κατανομές προσομοίωσαν το διαθέσιμο αιολικό δυναμικό με αρκετά μεγάλη αξιοπιστία, έχοντας μέση τιμή συντελεστή μεταβλητότητας 3.8%, γεγονός που υποδεικνύει ότι η κατανομή Gumbel θα πρέπει να μελετηθεί περαιτέρω, αναφορικά με εφαρμογές αιολικής ενέργειας. Αντίθετα, οι άλλες δύο κατανομές, η Rayleigh και η Log-normal, παρουσίασαν αδυναμία στο να περιγράψουν τον πραγματικό άνεμο, ικανοποιητικά. Από τη μία η κατανομή Log-normal υποεκτιμούσε το συνολικό διαθέσιμο αιολικό δυναμικό στο σύνολο των περιπτώσεων κατά 37%, ενώ από την άλλη η κατανομή Rayleigh σε ορισμένες περιπτώσεις υποεκτιμούσε και σε άλλες περιπτώσεις υπερεκτιμούσε το αιολικό δυναμικό, με μέση απόκλιση 13%. Παρόμοια αποτελέσματα, με σχετικά μικρή ακρίβεια, παίρνουμε και για την κατανομή Weibull, όταν η παράμετρος κλίμακας και η παράμετρος σχήματος υπολογίζονται με βάση ορισμένα στατιστικά χαρακτηριστικά των πραγματικών δεδομένων (μέθοδο C) ή εμπειρικές σχέσεις (μέθοδος E), και όχι από τις πραγματικές μετρήσεις στο σύνολό τους (μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων).

Από τη μελέτη των παραμέτρων που περιγράφουν την κατανομή Weibull προέκυψε ότι η παράμετρος κλίμακας παρουσιάζει έντονη μεταβολή στο χώρο και στο χρόνο, καθώς συνδέεται με τη μέση ταχύτητα του ανέμου. Έτσι παρατηρείται μια μέγιστη τιμή στο χώρο του Αιγαίου και γενικότερα παραθαλάσσιων περιοχών και μια μείωση προς τις ηπειρωτικές περιοχές, όπου οι άνεμοι εμφανίζονται ασθενέστεροι. Παρόμοια γεωγραφική μεταβλητότητα παρατηρείται και στην παράμετρος κλίμακας, όπου παρατηρείται επιπλέον και μια εποχιακή κύμανση, με ελάχιστη τιμή το χειμώνα και μέγιστη το καλοκαίρι. Από την άλλη, για την κατανομή Gumbel, μόνο η παράμετρος κλίμακας παρουσίασε έναν κανόνα χρονικής μεταβολής, με μέγιστη τιμή το χειμώνα και ελάχιστη το καλοκαίρι. Όσον αφορά τη μεταβλητότητα αυτής της παραμέτρου στο χώρο, παρατηρήθηκαν υψηλές τιμές σε σταθμούς με υψηλές ταχύτητες, όπως Λήμνος και Θεσσαλονίκη (Αεροδρόμιο Μακεδονία) και χαμηλές για τους υπόλοιπους σταθμούς, όπου παρατηρούνται μικρότερες ταχύτητες ανέμου.

Ένα σημείο της εργασίας, το οποίο επίσης αξίζει να σχολιαστεί, είναι η μέθοδος, που εφαρμόστηκε, ώστε να υπολογιστεί το αιολικό δυναμικό σε ύψος διαφορετικό από αυτό του ανεμομέτρου. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε, η οποία υιοθετεί τον εκθετικό νόμο προέκτασης του ανέμου με το ύψος, απέδωσε για την εκθετική παράμετρο τιμές από 0,24

έως 0,36. Οι τιμές αυτές είναι αρκετά υψηλότερες από την μέση τιμή 0,20 την οποία αποδέχτηκαν οι Katsoulis, 1993, και Lalas , 1983, για παρόμοιες μελέτες αιολικής ενέργειας στον ευρύτερο Ελλαδικό χώρο.

Στη συνέχεια, η ανάλυση έδειξε ότι το διαθέσιμο αιολικό δυναμικό είναι αρκετά αυξημένο για την εποχή του χειμώνα σε σχέση με τις υπόλοιπες εποχές, για όλους τους σταθμούς, κυρίως λόγω του ότι η χειμερινή περίοδος χαρακτηρίζεται από συχνότερη διέλευση βαρομετρικών συστημάτων και μικρή παρουσία καταστάσεων ασθενούς βαροβαθμίδας. Αυτή η αύξηση μάλιστα γίνεται μέγιστη για τους σταθμούς της Αλεξανδρούπολης και της Λήμνου, όπου ο χειμώνας εμφανίζει 52% περισσότερο αιολικό δυναμικό σε σχέση με τις υπόλοιπες εποχές. Αντίθετα, ο σταθμός της Λάρισας παρουσιάζει τη μικρότερη μέση αύξηση με ποσοστό 14%. Όσον αφορά το ελάχιστο αιολικό δυναμικό, αυτό έχει την τάση να εμφανίζεται την εποχή του καλοκαιριού, για τους παράκτιους σταθμούς και το φθινόπωρο, για τους ηπειρωτικούς σταθμούς. Επίσης, όσον αφορά τη γεωγραφική κατανομή του αιολικού δυναμικού, η πλέον ιδανική περιοχή για εφαρμογή προγραμμάτων αιολικής ενέργειας αποτελεί η περιοχή της Λήμνου και γενικότερα του Κεντρικού Αιγαίου, όπως εξάλλου παρατηρήθηκε και από προηγούμενες έρευνες (Katsoulis, 1993, και Lalas, 1983), γεγονός το οποίο κατά πάσα πιθανότητα οφείλεται στην απουσία φυσικών εμποδίων αλλά και σε μικρής κλίμακας (π.χ. αύρα) και μεγάλης κλίμακας (Ετησίες) συνοπτικά αίτια. Εξίσου σημαντική περιοχή είναι και η περιοχή του αεροδρομίου Μακεδονία., όπου τόσο οι συνοπτικές καταστάσεις (π.χ. Βαρδάρης), αλλά και οι καταστάσεις θαλάσσιας αύρας, συμβάλλουν στο αυξημένο αιολικό δυναμικό της περιοχής. Από την άλλη, σταθμοί με έντονα ηπειρωτικά χαρακτηριστικά, όπως της Λάρισας, της Κοζάνης και της Χρυσούπολης, εμφανίζουν μειωμένο αιολικό δυναμικό, σε σχέση με σταθμούς οι οποίοι γειτονεύουν με θάλασσα, όπως της Ν. Αγχιάλου.

Θα πρέπει να παρατηρηθεί, ότι για να επιτευχθεί η βέλτιστη εκτίμηση της γεωγραφικής και εποχιακής κατανομής του αιολικού δυναμικού μιας τόσο μεγάλης περιοχής, όπου η μορφολογία του εδάφους αλλάζει συνεχώς, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται δεδομένα περισσότερων σταθμών. Επιπρόσθετα, αναγκαία προϋπόθεση είναι και η χρήση ωριαίων μέσων ταχυτήτων ανέμου στη θέση τρίωρων παρατηρήσεων, οι οποίες είναι βέβαιο ότι δεν παρουσιάζουν την πλήρη εικόνα του πεδίου του ανέμου. Επίσης μια άλλη βασική προϋπόθεση για τη σωστή εκτίμηση του αιολικού δυναμικού

αποτελεί η ποιότητα των δεδομένων, κάτι που δεν επιτεύχθηκε στο μέγιστο δυνατό βαθμό, καθώς παρατηρήθηκε μια ανωμαλία στις μετρήσεις της ταχύτητας του ανέμου, ή οποία κατά πάσα πιθανότητα οφείλονταν σε κάποια αδράνεια στην έναρξη λειτουργίας του ανεμομέτρου. Παρόλα αυτά, αυτή η ανωμαλία που παρατηρήθηκε, έδειξε να μην επηρεάζει σημαντικά το αποτέλεσμα, καθώς αφορούσε τις μικρές ταχύτητες οι οποίες συμβάλουν ελάχιστα στο αιολικό δυναμικό, ακόμα και αν η συχνότητα εμφάνισής τους είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντίστοιχη των μεγάλων ταχυτήτων.

Τέλος, αναφορικά με την ανάλυση που διεξήχθη με στόχο τον εντοπισμό μιας σχέσης ανάμεσα στις μέγιστες ημερήσιες ριπές και στις ημερήσιες μέγιστες ωριαίες ταχύτητες για όλες τις μέρες που η ταχύτητα ήταν μεγαλύτερη από 4m/s για περισσότερες από δύο διαδοχικές ώρες, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι εκτιμώμενες ριπές που υποεκτιμούν τις πραγματικές ριπές περισσότερο από 2m/s είναι μόλις επτά περιπτώσεις. Οι υπόλοιπες μετρούμενες ριπές προσομοιώθηκαν με μεγαλύτερη ακρίβεια, και αποδεικνύεται ότι το μοντέλο εκτίμησης των μέγιστων ημερήσιων ριπών θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη καταστάσεων ανέμου, που θα μπορούσαν να θέσουν σε κίνδυνο την ασφάλεια των ανεμογεννητριών.

Βιβλιογραφία

- Corotis R.B., Sigl A.B. and Klein J., 1978: Probability models of wind Velocity, Magnitude and Persistence. *Solar Energy*, Vol. **20**, 483-493.
- David W. Keith, Joseph F. DeCarolis et al., 2004: The influence of large scale wind power on global climate. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, Vol. **101**, No. 46, 16115-16120.
- Ernest W. Petersen, Joseph P. Hennessey, 1978: On the use of power laws for estimates of wind power potential. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. **17**, 390-394.
- Justus C.G. and Mikhail A., 1976: Height variation of wind speed and wind distribution statistics. *Geophysical research letters*, Vol. **3**, No. 5, 261-264.
- Justus C.G., 1978: *Wind and Wind System Performances*, Franklin Institute Press.
- Justus C.G., 1978: Wind energy statistics for large arrays of wind turbines (New England and U.S. Regions). *Solar Energy*, Vol. **20**, 379-386.
- Justus C.G., 1985: Wind Energy. In: Houghton D.D. (editor) *Handbook of Applied Meteorology*, pp. 915-944. New York: Wiley J. and sons.
- Katsoulis B.D. and Metaxas D.A., 1992: The wind energy potential in Western Greece. *Solar Energy*, Vol. **49**, No. 6, 463-476.
- Katsoulis B.D., 1993: A survey on the assessment of Wind Potential in Greece. *Theoretical and Applied Meteorology*, **47**, 51-63.
- Labraga Juan C., 1994: Extreme winds in the Pampa del Castillio Plateau, Patagonia, Argentina, with reference to wind farm settlement. *Journal of Applied Meteorology*, **33**, 85-96.
- Lalas D.P., Tselepidaki H. and Theoharatos G., 1983: An analysis of wind power potential in Greece. *Solar energy*, Vol. **30**, No. 6, 497-505.
- Leon Sedefian, 1980: On the vertical extrapolation of mean wind power density. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. **19**, 488-493.
- Lidija Cvitan, 2003: Determining wind gusts using mean hourly wind speed. *Geofysika*, Vol. **20**, 63-72.
- Maheras P, 1983: Climatologie de la Mer Egee et de ses marges continentales. These d'Etat Dijon, pp 266.

- Martner B.E. and Marwitz J.D., 1982: Wind characteristics in southern Wyoming. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. **21**, 1815-1827.
- Palutikof J.P., Kelly P.M. and Davies T.D., 1987: Impacts of spatial and temporal windspeed variability on wind energy output. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, **26**, 1124-1134.
- Poje D. and Cividini B., 1988: Assessment of Wind Energy Potential in Croatia. *Solar energy*, Vol. **41**, No. 6, 543-554.
- Raymond K.W. Wong, 1977: Weibull distribution Iterative Likelihood Techniques and hydrometeorological data. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. **16**, 1360-1364.
- Stull B. Roland, 1994: *An introduction to Boundary Layer Meteorology*, Kluwer Academic Press.
- Takle E.S. and Brown J.M., 1978: Note on the use of Weibull statistics to characterize wind speed data. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. **17**, 556-559.
- Unkasevic M., Malisic J. and Tosic I., 1998: On some new statistical characteristics of the wind "Koshava". *Meteorology and Atmospheric Physics*, **66**, 11-21.
- Wilks S. Daniel, 1995: *Statistical methods in the Atmospheric science*, Academic Press.
- Αρσένη Π.Α., 1984: Συμβολή στην μελέτη του προβλήματος των Ετησίων. Διδακτορική διατριβή, σελ. 133-139, Τομέας Μετεωρολογίας-Κλιματολογίας, ΑΠΘ.
- Καρακώστας Θ.Σ., Φλόκα Ε.Α. και Κακαλιάγκου Ο.Κ., 1988: Αξιολόγηση των μεθόδων υπολογισμού των συντελεστών της διπαραμετρικής κατανομής Weibull. *Πρακτικά 3^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Ήπιων Μορφών Ενέργειας*, 651-658.
- Μακρογιάννης Τ.Ι. και Σαχσαμάνογλου Χ.Σ.: Εκτίμηση του Αιολικού Δυναμικού στην Β. Ελλάδα. *Πρακτικά 2^{ου} Πανελλήνιο Συνέδριο Ήπιων Μορφών Ενέργειας*, 499-505.
- Μανητσάρης και Αρσένη Π.Α., 1992: Προοπτικές εγκατάστασης αιολικού πάρκου στον Όλυμπο. *Πρακτικά 6^{ου} Συνεδρίου Ελασσόνας*.
- Μπαλαφούτης Χ.Ι. και Αρσένη Π.Α., 1992: Δυνατότητα αιολικής εκμετάλλευσης του Ολύμπου. *Πρακτικά 6^{ου} Συνεδρίου Ελασσόνας*.
- Μπλούτσος Α.Α., 1989: Μοντέλο αέριας κυκλοφορίας στην ορεινή περιοχή του Ολύμπου, Τομέας Μετεωρολογίας-Κλιματολογίας, ΑΠΘ.
- Μωυσιάδης Α.Α. και Κουνιάς Σ., 1995: *Θεωρία Πιθανοτήτων Ι*, Εκδόσεις Ζήτη.

- Ρωσσιάδου Κ., 2001: Ανάλυση του μέσου ισοβαρικού πεδίου στον Ελλαδικό χώρο και του μέσου πεδίου του ανέμου στο Αιγαίο. Μεταπτυχιακή διατριβή ειδίκευσης, Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, ΑΠΘ.
- Φλόκας Α., 1987: Έρευνα-μελέτη-αποτύπωση του αιολικού δυναμικού της Ελλάδας. Τελική τεχνική έκθεση ΔΕΗ/ΔΕΜΕ, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας.
- Ψαρρή Α.Π., 2005: Ο τοπικός άνεμος της Θεσσαλονίκης, Βαρδάρης. Μεταπτυχιακή διατριβή ειδίκευσης, Τομέας Μετεωρολογίας-Κλιματολογίας, ΑΠΘ.

ON THE STUDY OF WIND VECTOR CHARACTERISTICS IN NORTHERN GREECE FOR IMPLEMENTATION OF WIND ENERGY PROGRAM

ABSTRACT OF THESIS

The overall objective of this research thesis is to provide a scientific methodology for the performance of a feasibility study concerning the implementation of wind energy programs, with the purpose of converting energy from the wind to electric power, with the use of wind turbines. To meet this objective, wind speed and wind direction data from six meteorological stations of the northern part of the Greek National Meteorological Service network are used, in order to predict and calculate wind potential that can be extracted through the lower part of the boundary layer.

The first step of this research is to study the climatological wind conditions at the six meteorological stations in Northern Greece. This initial study of the wind regime will provide the general wind characteristics, like mean wind speed and distribution of wind to the sixteen wind directions, during the four seasons of the year, which are important elements in deciding, if a site is suitable for wind farm settlement.

The second step in computing the wind potential at a site, is the use of theoretical distributions, in order to characterize the behavior of the actual wind. Different theoretical distributions, such as the Weibull, Raylight, Gumbel, and the Log-normal, are evaluated. The Gumbel and the two parametric Weibull distributions are proven to characterize in a best way the actual wind. Different methods of computing the scale and the shape parameters of the Weibull distribution are also evaluated.

The next step is to study the extrapolation of the wind from the anemometer level to different heights, which represent the hub height of existing wind turbines. The power law, which is a generalization of the Monin-Obukov similarity theory equations, under different atmospheric stability and roughness length conditions, is utilized. The power law is essential for extrapolating the Weibull distribution, which is proven to give the best theoretical fit to the actual data, to hub level. The use of the theoretical data that are created to different heights is essential, in order to minimize the influence of both random errors in wind measurements and the broader vicinity of the generator site to the calculation of the wind potential.

Finally, an additional study on the wind regime is implemented, concerning the behavior of the maximum wind speeds and particularly the gust winds. Using better resolution measurements, a relationship between the gust winds and the hourly (daily) mean wind speeds is established. This relationship is very useful, in order to assess and forecast the hazards that extreme wind conditions poses to the wind generator.

Damianos F. Mantsis

Παράρτημα Α – Τιμές των παραμέτρων της κατανομής Weibull

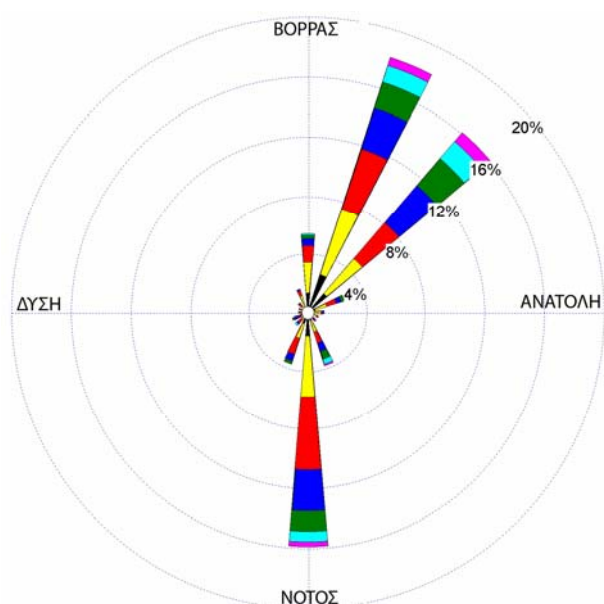
Στον πίνακα του παραρτήματος Α παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων σχήματος (**k**) και κλίμακας (**c**) της θεωρητικής κατανομής Weibull, έτσι, όπως υπολογίστηκαν με βάση τις μεθόδους Γ και Ε.

Σταθμός	Εποχή	Μέθοδος Γ		Μέθοδος Ε	
		c	k	C	k
Αλεξανδρούπολη	Άνοιξη	2,50	0,81	3,00	1,22
	Καλοκαίρι	2,56	0,74	2,71	1,17
	Φθινόπωρο	2,80	0,97	3,00	1,22
	Χειμώνας	2,98	0,48	3,21	1,26
Θεσσαλονίκη ΑΠΘ	Άνοιξη	1,89	1,17	1,77	0,98
	Καλοκαίρι	1,89	1,13	1,71	0,96
	Φθινόπωρο	1,42	0,95	1,36	0,88
	Χειμώνας	1,67	0,96	1,67	0,95
Θεσσαλονίκη Αεροδρόμιο Μακεδονία	Άνοιξη	2,91	1,00	3,15	1,25
	Καλοκαίρι	3,45	1,12	3,60	1,33
	Φθινόπωρο	2,63	0,91	2,93	1,21
	Χειμώνας	2,81	0,83	3,33	1,28
Κοζάνη	Άνοιξη	1,26	0,65	1,69	0,96
	Καλοκαίρι	1,74	0,80	2,00	1,03
	Φθινόπωρο	1,07	0,61	1,52	0,92
	Χειμώνας	1,55	0,66	2,13	1,05
Λάρισα	Άνοιξη	1,51	0,74	1,81	0,98
	Καλοκαίρι	1,93	0,87	2,12	1,05
	Φθινόπωρο	0,98	0,63	1,30	0,86
	Χειμώνας	1,43	0,50	1,14	0,82
Λήμνος	Άνοιξη	4,73	1,20	4,93	1,54
	Καλοκαίρι	4,74	1,43	4,78	1,51
	Φθινόπωρο	5,11	1,24	5,32	1,59
	Χειμώνας	5,95	1,22	5,68	1,72
Ν. Αγχίαλος	Άνοιξη	2,78	1,00	2,98	1,22
	Καλοκαίρι	3,14	1,14	3,23	1,26
	Φθινόπωρο	2,80	1,04	2,93	1,21
	Χειμώνας	3,05	1,06	3,21	1,26
Χρυσούπολη	Άνοιξη	2,67	1,09	2,73	1,17
	Καλοκαίρι	2,02	1,03	2,02	1,03
	Φθινόπωρο	1,96	0,93	2,05	1,04
	Χειμώνας	2,33	0,94	2,51	1,13

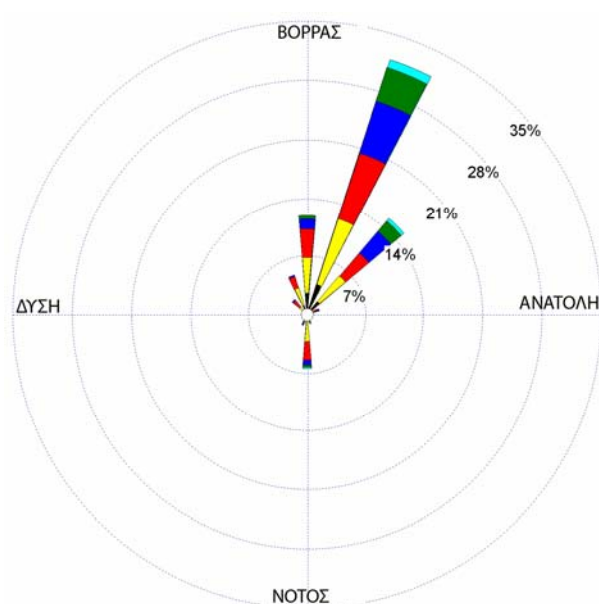
Παράρτημα Β – Εποχιακά ροδογράμματα των σταθμών της μελέτης

Στο παράρτημα Β παρουσιάζονται εποχιακά ροδογράμματα, για τους σταθμούς που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη. Το κάθε ροδόγραμμα περιγράφει την εποχιακή κατανομή της διεύθυνσης του ανέμου στις 16 διευθύνσεις, από τις οποίες η κάθε μία καλύπτει τόξο 22,5 μοιρών. Παράλληλα, περιγράφεται και η κατανομή της ταχύτητας του ανέμου σε κάθε μια από τις 16 διευθύνσεις.

Μετεωρολογικός σταθμός Λήμνου

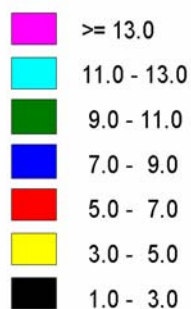


Άνοιξη (άπνοιες: 25%)

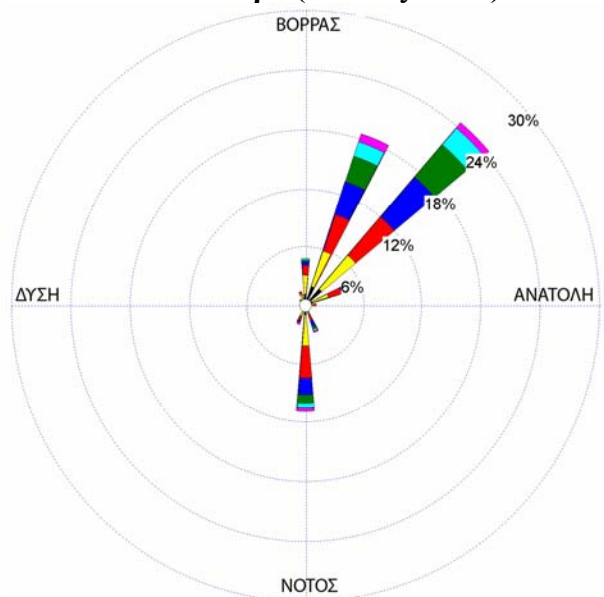


Καλοκαίρι (άπνοιες: 20%)

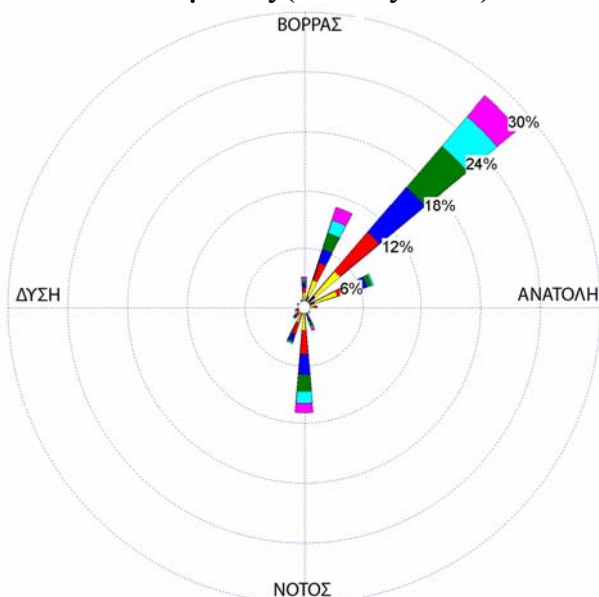
Ταχύτητα ανέμου
(m/s)



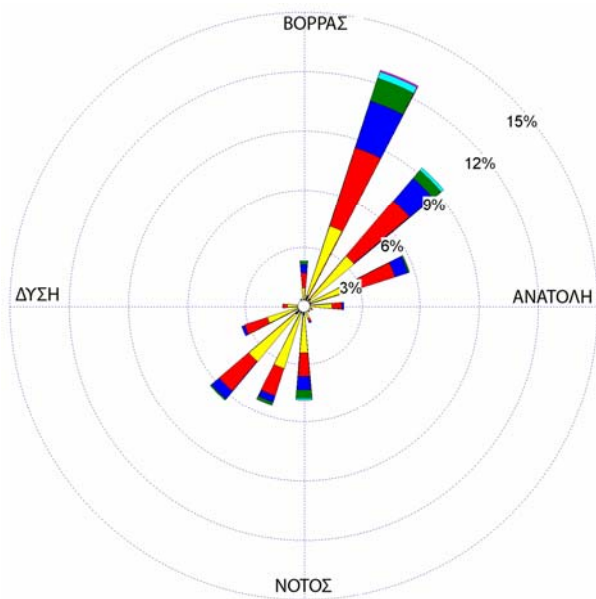
Φθινόπωρο (άπνοιες: 24%)



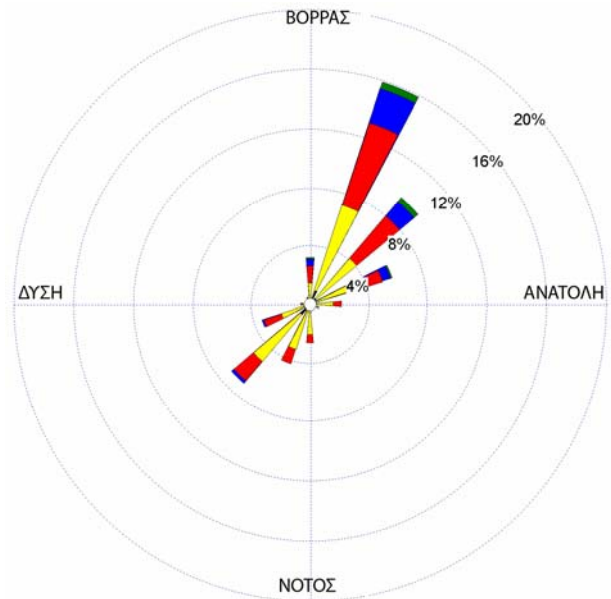
Χειμώνας (άπνοιες: 24%)



Μετεωρολογικός σταθμός Αλεξανδρούπολη



Άνοιξη (άπνοιες: 44%)

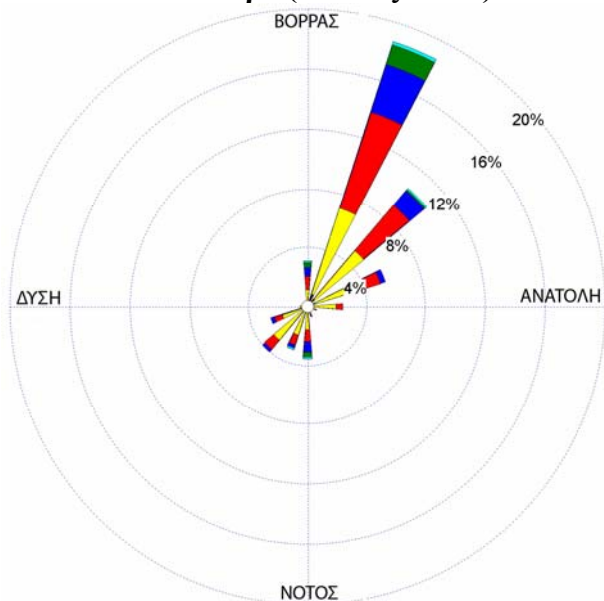


Καλοκαίρι (άπνοιες: 43%)

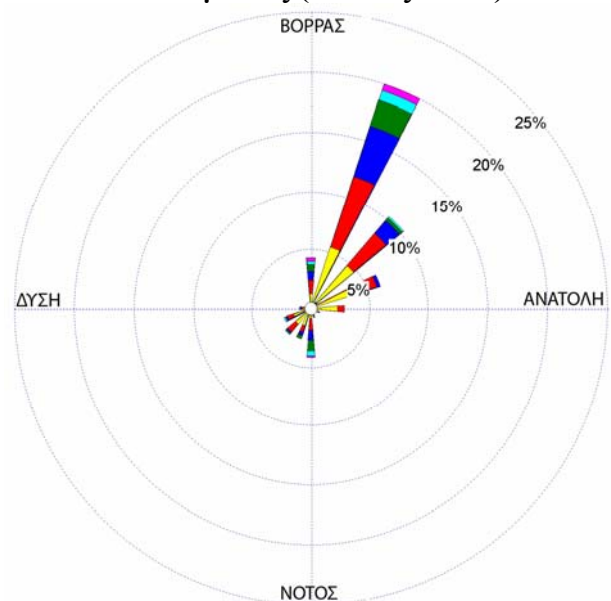
Ταχύτητα ανέμου
(m/s)



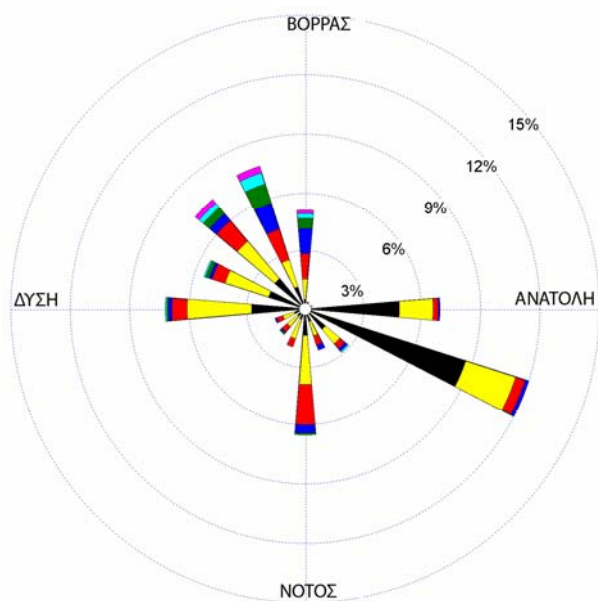
Φθινόπωρο (άπνοιες: 43%)



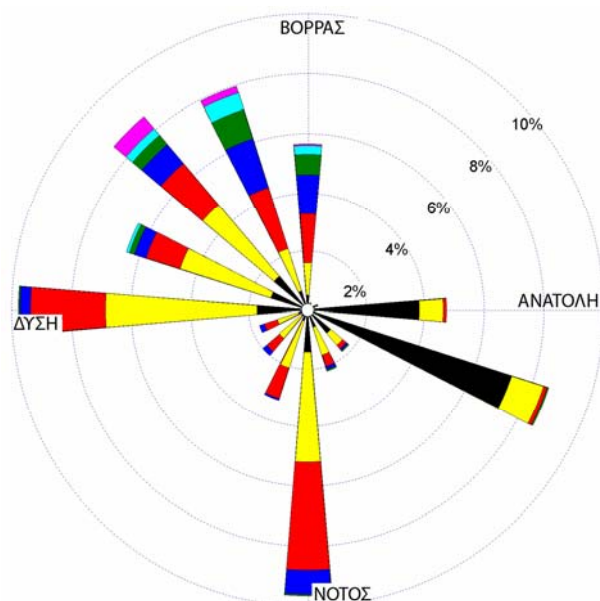
Χειμώνας (άπνοιες: 40%)



Μετεωρολογικός σταθμός αεροδρομίου 'Μακεδονία'



Άνοιξη (άπνοιες: 30%)

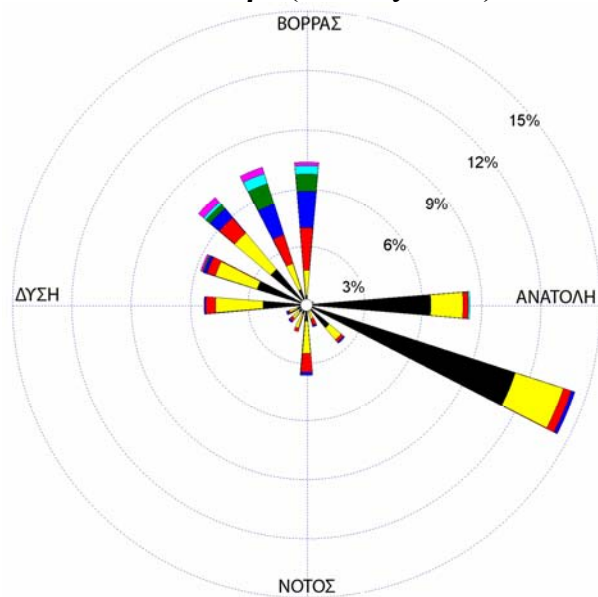


Καλοκαίρι (άνοιες: 27%)

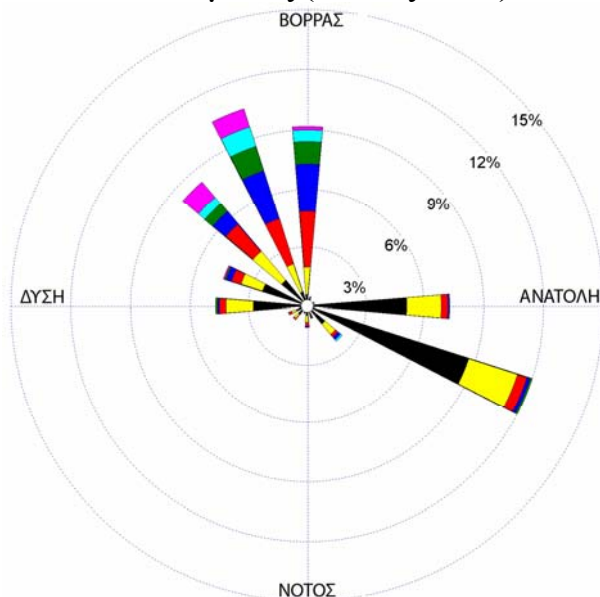
Ταχύτητα ανέμου
(m/s)



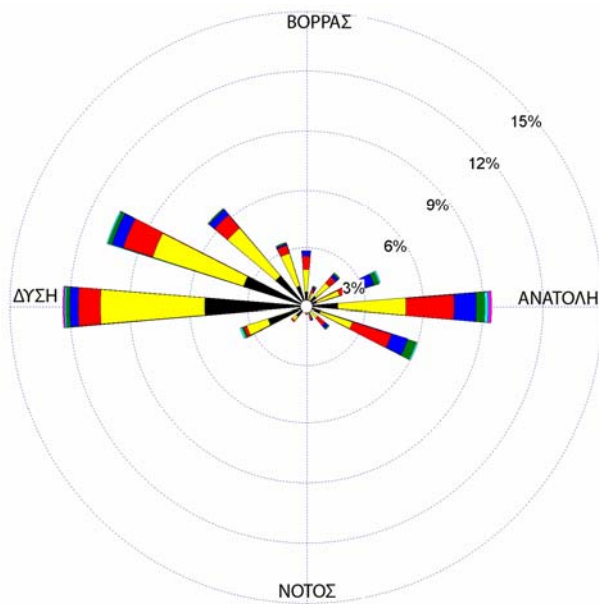
Φθινόπωρο (άπνοιες: 24%)



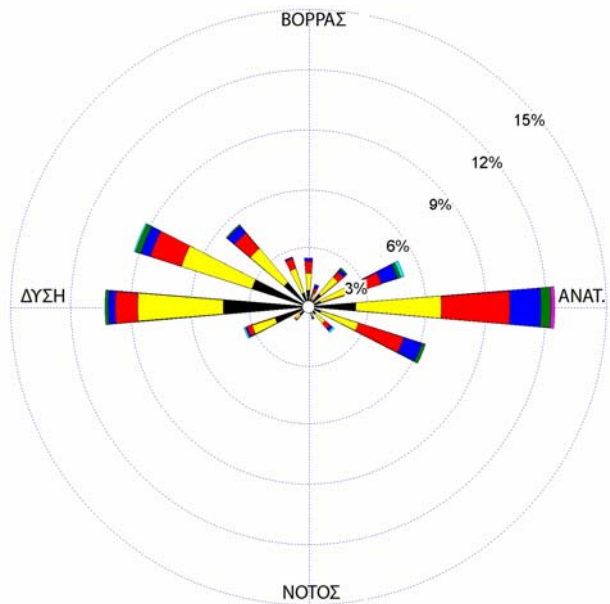
Χειμώνας (άπνοιες: 36%)



Μετεωρολογικός σταθμός Νέας Αγχιάλου



Άνοιξη (άπνοιες: 34%)

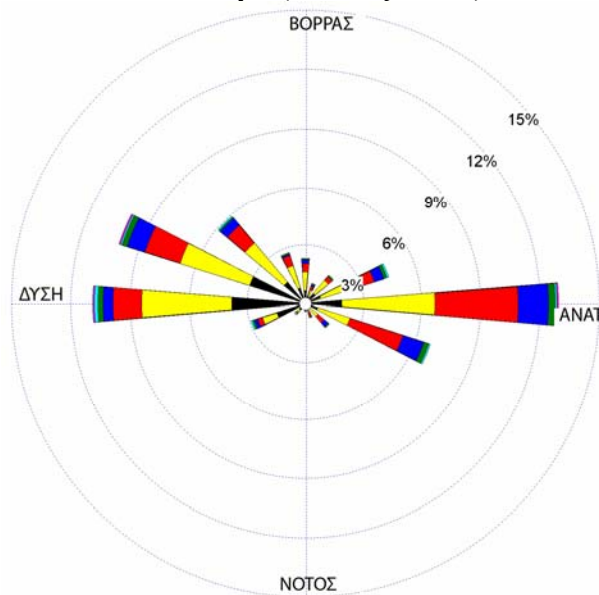


Καλοκαίρι (άπνοιες: 35%)

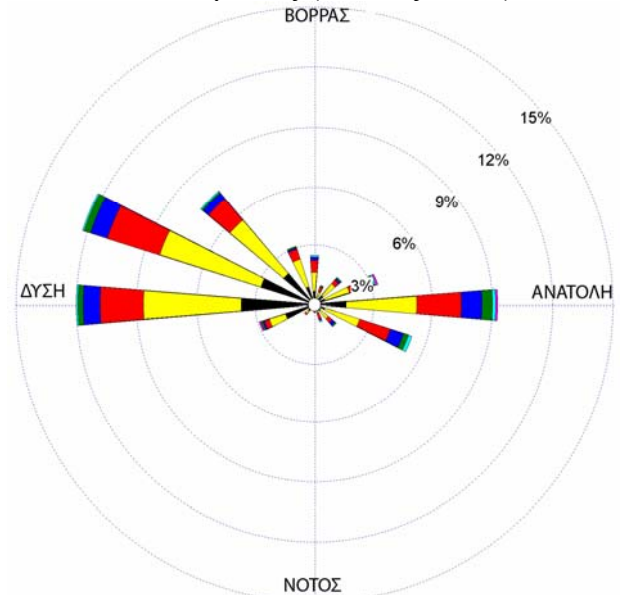
Ταχύτητα ανέμου
(m/s)



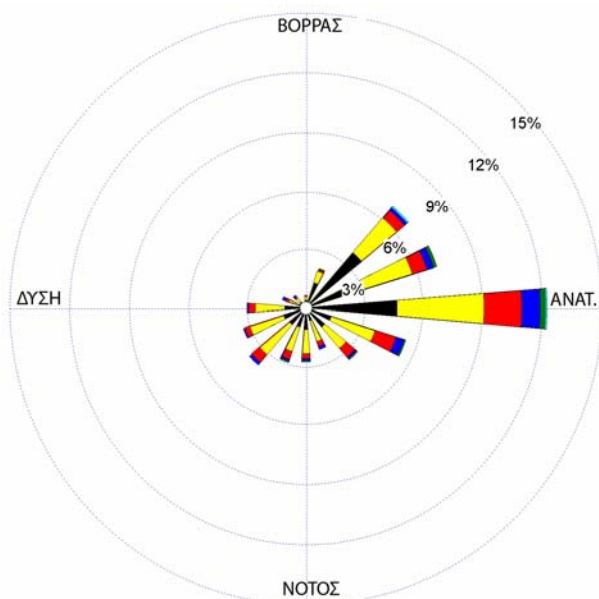
Φθινόπωρο (άπνοιες: 34%)



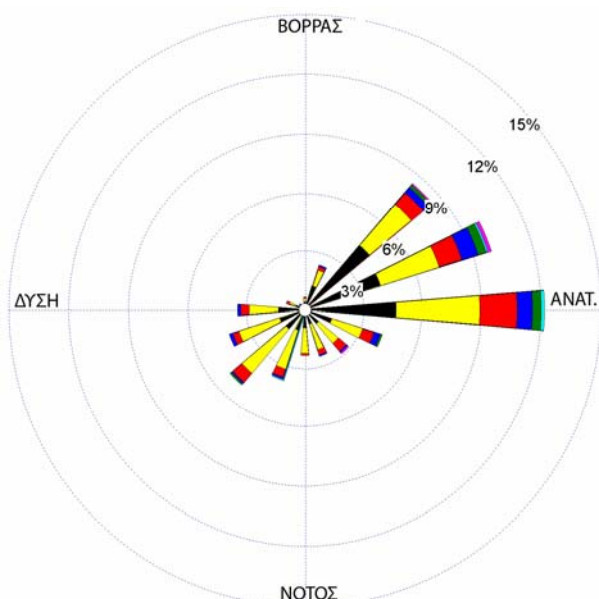
Χειμώνας (άπνοιες: 35%)



Μετεωρολογικός σταθμός Χρυσούπολης



Άνοιξη (άπνοιες: 42%)

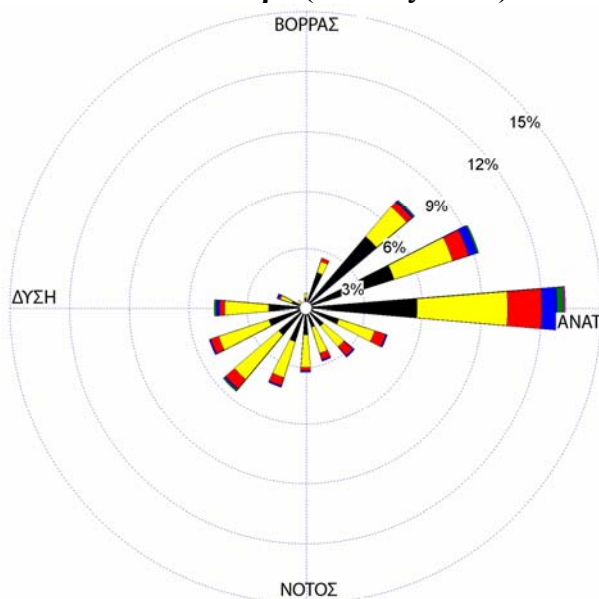


Καλοκαίρι (άπνοιες: 37%)

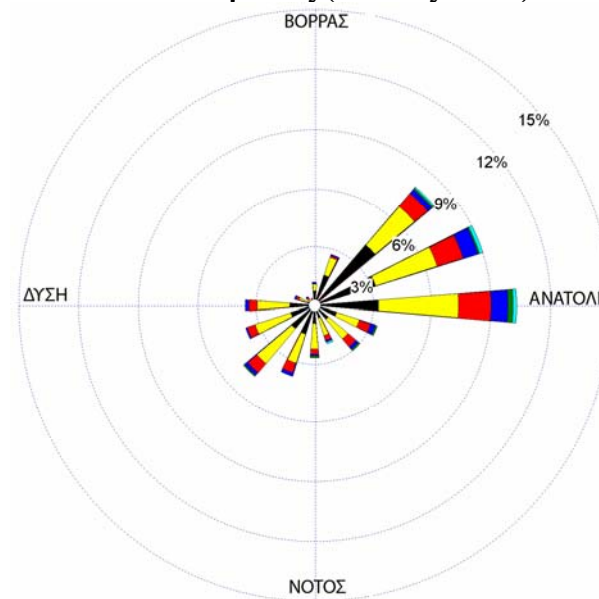
Ταχύτητα ανέμου
(m/s)



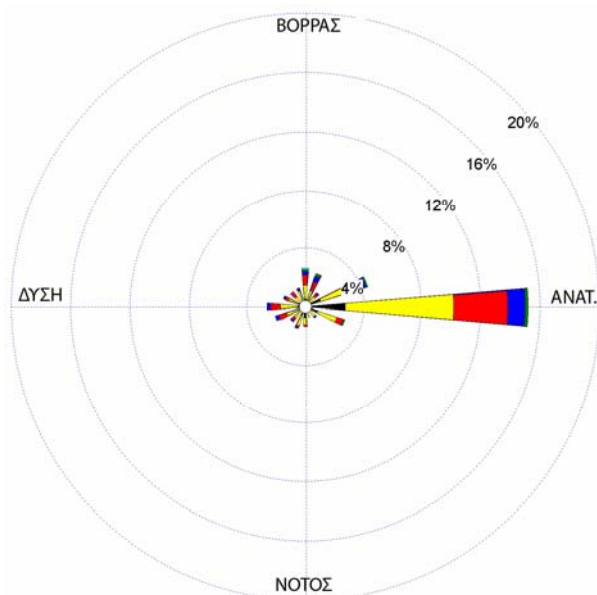
Φθινόπωρο (άπνοιες: 31%)



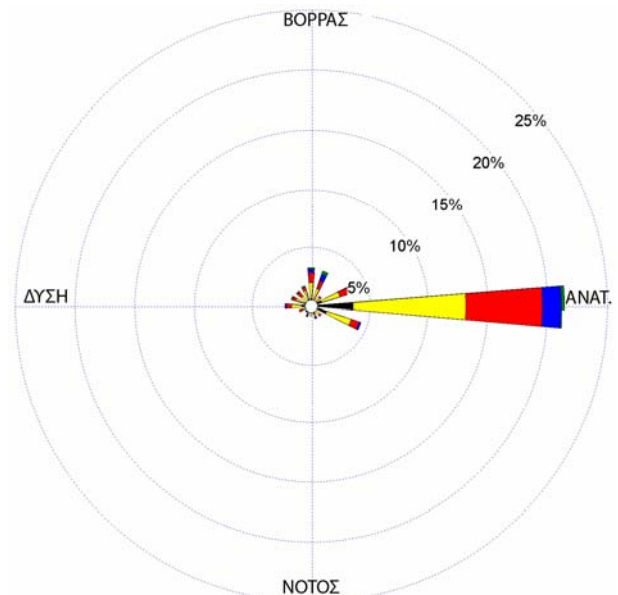
Χειμώνας (άπνοιες: 40%)



Μετεωρολογικός σταθμός Λάρισα



Άνοιξη (άπνοιες: 56%)

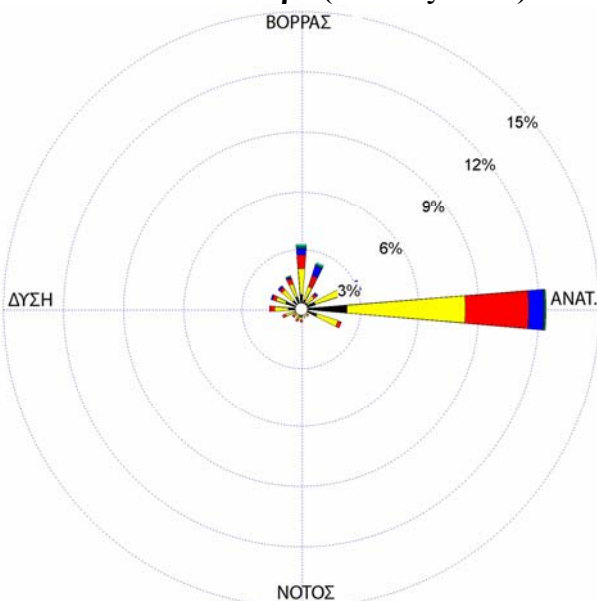


Καλοκαίρι (άπνοιες: 49%)

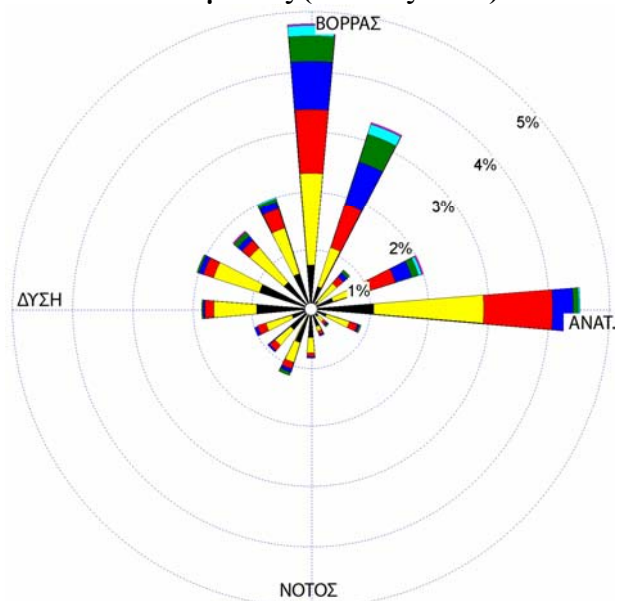
Ταχύτητα ανέμου
(m/s)



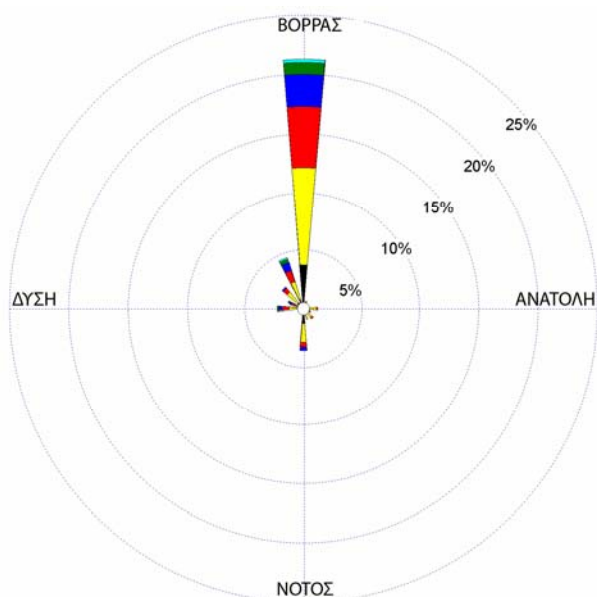
Φθινόπωρο (άπνοιες: 65%)



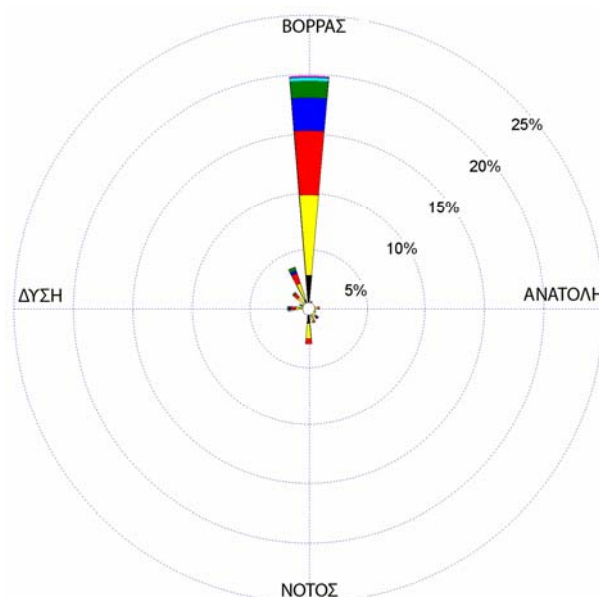
Χειμώνας (άπνοιες: 71%)



Μετεωρολογικός σταθμός Κοζάνης

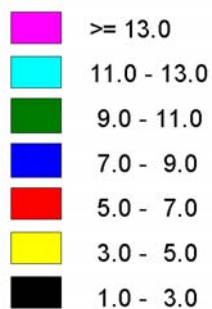


Άνοιξη (άπνοιες: 57%)

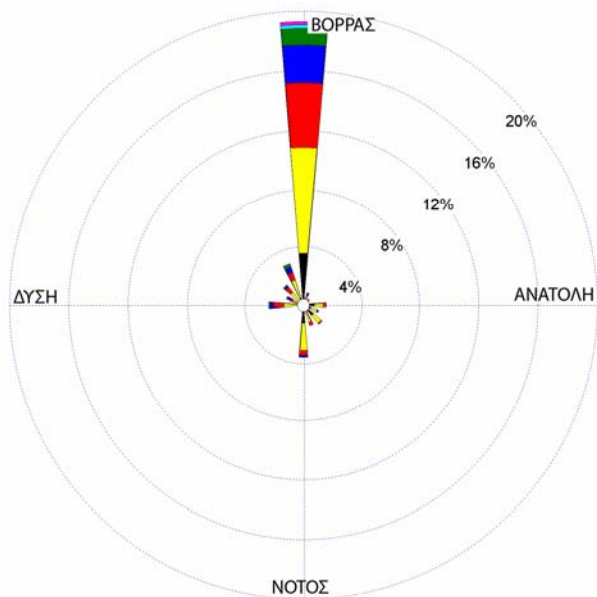


Καλοκαίρι (άπνοιες: 62%)

Ταχύτητα ανέμου
(m/s)



Φθινόπωρο (άπνοιες: 59%)



Χειμώνας (άπνοιες: 57%)

