

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΥΣΙΚΗΣ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ ΑΣΚΗΣΗ ΣΤΟΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟ ΑΝΕΜΟ

1. ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΣ ΑΝΕΜΟΣ

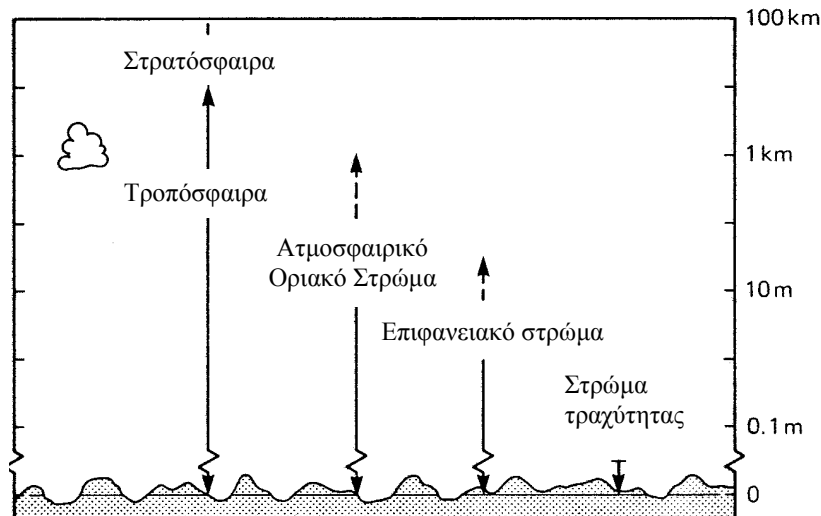
Ο ατμοσφαιρικός αέρας, που περιβάλλει τη γη, βρίσκεται σε συνεχή κίνηση. Οι παράγοντες εκείνοι που δημιουργούν και διαμορφώνουν όλες αυτές τις κινήσεις είναι η ηλιακή ακτινοβολία, που προσλαμβάνει τόσο η ατμόσφαιρα όσο και η επιφάνεια του εδάφους, η ανομοιογένεια του ανάγλυφου του εδάφους και η περιστροφική κίνηση της γης. Από τις κινήσεις του ατμοσφαιρικού αέρα, εκείνες που παρουσιάζουν ιδιαίτερη σημασία είναι οι οριζόντιες μετακινήσεις του, τις οποίες ονομάζουμε άνεμο. Δηλαδή, **άνεμος** καλείται κάθε ρεύμα του ατμοσφαιρικού αέρα που έχει κάποια σχετική κίνηση ως προς το έδαφος. Επειδή στις ατμοσφαιρικές κινήσεις η κάθετη συνιστώσα, σε σύγκριση με την οριζόντια είναι πολύ μικρή, ο όρος ‘άνεμος’ αναφέρεται συνήθως μόνο στην οριζόντια συνιστώσα της κίνησης. Ο άνεμος στα επιφανειακά στρώματα της ατμόσφαιρας παρουσιάζει πολλές μεταβολές, τόσο στη διεύθυνση όσο και στην έντασή του, εξαιτίας της κατακόρυφης θερμοβαθμίδας, των στροβίλων και της τριβής με το ανάγλυφο του εδάφους (Χρονοπούλου-Σερέλη και Φλόκας, 2010).

Ο άνεμος αποτελεί μια πολύ βασική μετεωρολογική και κλιματική παράμετρο και η εκτίμηση των χαρακτηριστικών του ανέμου στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα έχει ποικίλες εφαρμογές, όπως στη διασπορά των ρύπων, στην αιολική ενέργεια, ναυσιπλοΐα, κλπ.

1.1 ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΩΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΩΤΕΡΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ

Το ‘ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα’ (planetary or atmospheric boundary layer) εκτείνεται 500-1500 μέτρα από την επιφάνεια του εδάφους (Σχήμα 1). Η φύση της επιφάνειας του εδάφους είναι ένας από τους παράγοντες που καθορίζουν την κίνηση του ατμοσφαιρικού αέρα μέσα στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα. Διαιρώντας θεωρητικά το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα σε ατμοσφαιρικά στρώματα, που τα όρια τους εκτείνονται παράλληλα με την επιφάνεια του εδάφους, αναφέρονται συνοπτικά τα κυριότερα χαρακτηριστικά της κίνησης του αέρα μέσα σε αυτά (Oke, 1987):

- ❖ Το ‘επιφανειακό στρώμα’ (turbulent surface layer) χαρακτηρίζεται από έντονες τυρβώδεις κινήσεις. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, εκτείνεται από 20 m έως και 50 m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους. Κατά τη διάρκεια της νύχτας, όταν περιορίζεται η κατακόρυφη ανάπτυξη του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος, το ύψος του ‘επιφανειακού στρώματος’ φτάνει μόλις λίγα μέτρα πάνω από το έδαφος.
- ❖ Το ‘στρώμα τραχύτητας’ (roughness layer). Σε αυτό το στρώμα η ροή είναι ακανόνιστη, μιας και επηρεάζεται έντονα από τη φύση των στοιχείων τραχύτητας (κτήρια, θάμνοι, δέντρα, κτήρια). Τα χαρακτηριστικά των στοιχείων τραχύτητας, καθορίζουν εν μέρει την τυρβώδη κίνηση του ανέμου μέσα στο στρώμα τραχύτητας. Έχει επικρατήσει να θεωρείται ότι το ύψος επίδρασης των στοιχείων τραχύτητας εκτείνεται έως απόστασης σε 2h-3h πάνω από το έδαφος, θεωρώντας ως h το μέσο ύψος τους.
- ❖ Μερικά εκατοστά πάνω από το έδαφος εκτείνεται το ‘στρώμα στρωτής ροής’ (laminar boundary layer). Σε αυτό το ατμοσφαιρικό στρώμα θεωρείται ότι δεν επικρατούν τυρβώδεις αναταράξεις και επικρατεί η στρωτή ροή του ανέμου.



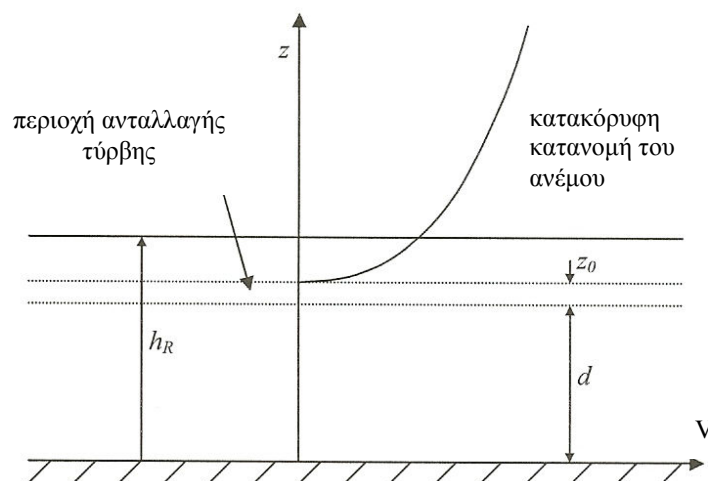
Σχήμα 1: Διαστρωμάτωση της κατώτερης ατμόσφαιρας (Oke, 1987)

1.2 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΜΕ ΤΟ ΥΨΟΣ

Το λογαριθμικό προφίλ του ανέμου είναι μια ημι-εμπειρική σχέση που χρησιμοποιείται για να περιγράψει την κατακόρυφη κατανομή της οριζόντιας συνιστώσας της ταχύτητας του ανέμου μέσα στο ατμοσφαιρικό επιφανειακό στρώμα:

$$V(z) = \frac{u_*}{k} \left[\ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right) + \psi(z, z_0, L) \right]$$

όπου $V(z)$ η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος z , u_* η ταχύτητα τριβής, k ($=0.4$) η σταθερά von Karman, z_0 το 'μήκος τραχύτητας' του εδάφους, d το 'επίπεδο μηδενικής μετατόπισης', ψ ο όρος ευστάθειας και L η παράμετρος ευστάθειας Monin-Obukhov. Σε ουδέτερες ατμοσφαιρικές (όπου $z/L=0$), ο όρος ευστάθειας ψ παραλείπεται.



Σχήμα 2: Λογαριθμική κατανομή του ανέμου με το ύψος, όπου d το επίπεδο μηδενικής μετατόπισης, z_0 το μήκος τραχύτητας και h_R το μέσο ύψος των εμποδίων (Stangroom, 2004)

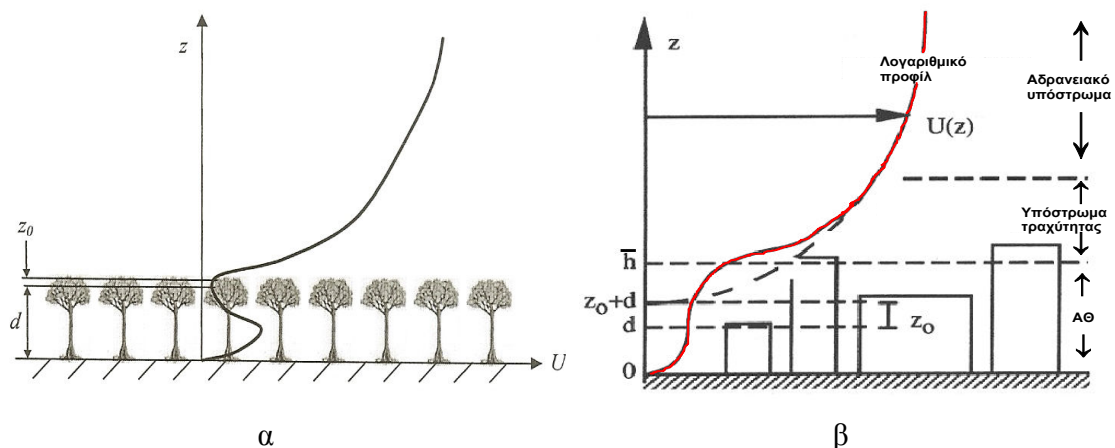
Το 'επίπεδο μηδενικής μετατόπισης' d (σχήμα 2) ορίζεται ως το ύψος πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, όπου η μέση ταχύτητα του ανέμου είναι μηδενική, εξ' αιτίας της ύπαρξης εμποδίων στη ροή του ανέμου (π.χ. δέντρα, κτήρια κλπ). Γενικά εκτιμάται ότι φτάνει έως τα $2/3$ του μέσου ύψους των εμποδίων (Garratt, 1992). Σε περίπτωση όμως που η πυκνότητα των εμποδίων είναι μεγάλη, μπορεί να θεωρηθεί ότι $d=h$, όπου h το μέσο ύψος των εμποδίων. Η τιμή του d δεν επηρεάζει την κατακόρυφη κατανομή του ανέμου, απλώς την μετατοπίζει ψηλότερα κατά d .

Το 'μήκος τραχύτητας' z_0 (σχήμα 2) είναι ένας διορθωτικός όρος, ο οποίος μετρά την επίδραση της τραχύτητας της επιφάνειας στη ροή του ανέμου και κυμαίνεται μεταξύ του $1/10$ και $1/30$ του μέσου ύψους των στοιχείων τραχύτητας του εδάφους. Το μήκος τραχύτητας υπολογίζεται πάνω από το επίπεδο μηδενικής μετατόπισης και είναι το ύψος όπου λαμβάνουν χώρα μερικές διεργασίες της ροής (ανταλλαγές τύρβης) αλλά η μέση ταχύτητα της ροής είναι μηδενική. Το μήκος τραχύτητας z_0 συσχετίζεται, αλλά δεν είναι ισοδύναμο, με το ύψος των στοιχείων τραχύτητας μιας περιοχής (δένδρα, κτήρια, κοκ). Συγκεκριμένα, εξαρτάται τόσο από το σχήμα, όσο και από την πυκνότητα κατανομής των στοιχείων τραχύτητας. Τυπικές τιμές του μήκους τραχύτητας z_0 παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Τυπικές τιμές τραχύτητας του εδάφους (Oke, 1987)

Περιοχή	z_0 (m)
Μη αστικές περιοχές (αγρόσπιτα, χωριά, αγροτικές περιοχές)	0.2-0.6
Ημιαστικές περιοχές	
Χαμηλής πυκνότητας δόμησης περιοχές και κήποι	0.4-1.2
Πυκνοκατοικημένες περιοχές	0.8-1.8
Αστικές περιοχές	
Πυκνοκατοικημένες περιοχές με κτίρια κάτω των πέντε ορόφων	1.5-2.5
Πυκνοκατοικημένες περιοχές με κτίρια πάνω των πέντε ορόφων	2.5-10

Στο Σχήμα 3, παρουσιάζεται η κατατομή του ανέμου με το ύψος, πάνω και κάτω από το επίπεδο μηδενικής μετατόπισης, σε περιοχές με βλάστηση (Σχήμα 3α) και κτήρια (Σχήμα 3β).



Σχήμα 3: Λογαριθμική κατατομή του ανέμου με το ύψος σε ουδέτερες συνθήκες σε περιοχές α) βλάστηση (Stangroom, 2004) και β) κτήρια (Fisher et al., 2005)

Ισοδύναμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντί του λογαριθμικού προφίλ ο εκθετικός νόμος ($V_2 = V_1(z_2/z_1)^a$), όπου οι τιμές του a λαμβάνονται σαν συνάρτηση της ευστάθειας της ατμόσφαιρας και του μήκους τραχύτητας z_0 . Προσεγγιστικά, η τιμή του a μπορεί να ληφθεί ίση με 0.15 για αγροτικές περιοχές, 0.28 για προάστια και 0.45 στο κέντρο της πόλης.

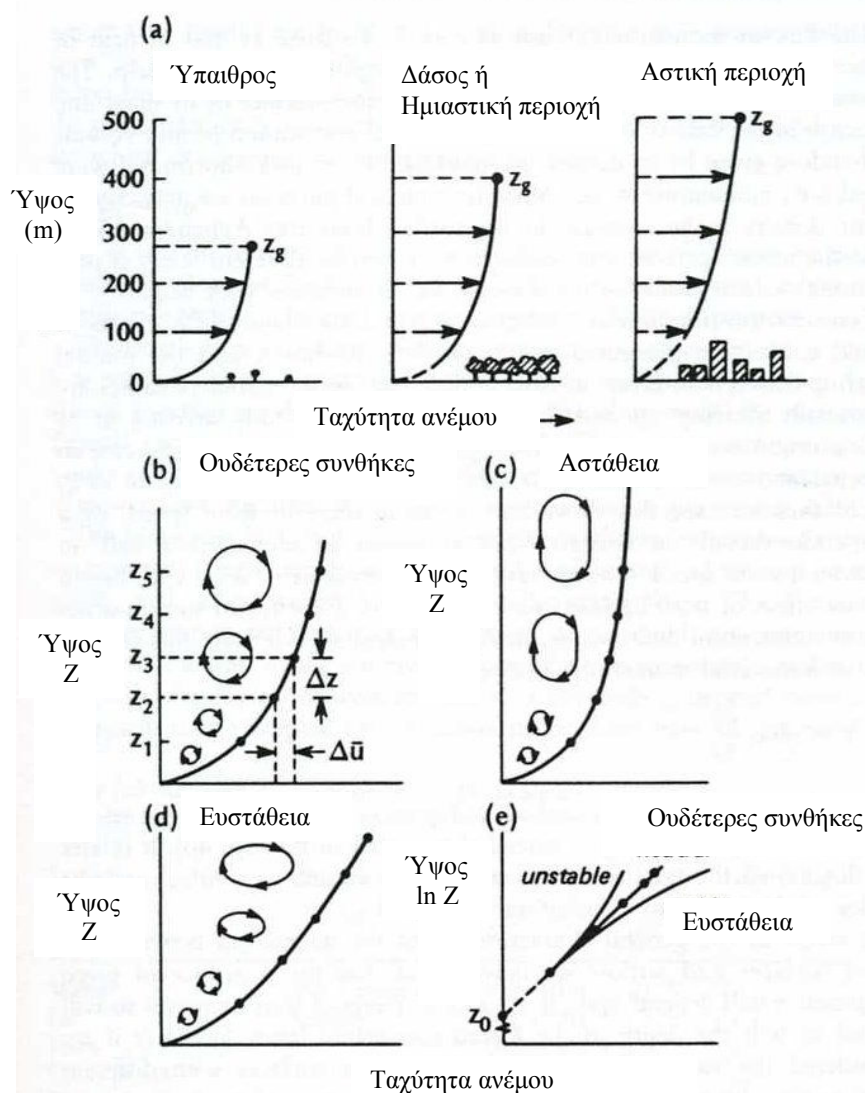
1.3 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΜΕ ΤΟ ΥΨΟΣ

Η κατατομή του ανέμου με το ύψος καθορίζεται από α) την τραχύτητα του εδάφους β) την ευστάθεια των αερίων στρωμάτων που γειτονεύουν με το έδαφος και γ) το ανάγλυφο του εδάφους.

Η τραχύτητα του εδάφους, επιβραδύνει τη ροή κοντά στο έδαφος προκαλώντας μια απότομη μείωση της μέσης οριζόντιας ταχύτητας του ανέμου. Στην περίπτωση που υπάρχουν και θερμικά φαινόμενα, το βάθος μέχρι το οποίο επιδρά η τριβή δεν εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο από την τραχύτητα του εδάφους. Στα σχήματα 4a, ο άνεμος έχει θεωρηθεί ισχυρός και η κατακόρυφη βαθμίδα της μέσης ταχύτητας του ανέμου είναι μεγαλύτερη πάνω από λείο έδαφος και μικρότερη πάνω από τραχύ έδαφος. Το ύψος z_g αποτελεί το ανώτατο όριο του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος πάνω από το οποίο η μέση ταχύτητα του ανέμου είναι περίπου σταθερή με το ύψος. Το βάθος του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος αυξάνεται όσο αυξάνει η τραχύτητα της επιφάνειας. Στην περίπτωση που ο μετρούμενος άνεμος είναι μικρής ταχύτητας, το ύψος z_g εξαρτάται επίσης και από την επιφανειακή ροή θερμότητας, στην επιφάνεια του εδάφους. Στην περίπτωση ισχυρής θέρμανσης του εδάφους το ύψος z_g είναι μεγαλύτερο από ό,τι στην περίπτωση που το έδαφος είναι λιγότερο θερμό (Oke, 1987).

Στα σχήματα 4b-4d παρουσιάζεται η επίδραση του φαινομένου της ευστάθειας στη μορφή της κατατομής της ταχύτητας του ανέμου, ενώ στο σχήμα 4e απεικονίζεται η κατατομή του ανέμου, για τις διαφορετικές συνθήκες ευστάθειας, σε λογαριθμική

κλίμακα. Όπως φαίνεται και στα σχήματα αυτά, όταν η ατμόσφαιρα γίνεται πιο ευσταθής, ή πιο ασταθής, η κατανομή παύει να είναι λογαριθμική. Στην ασταθή ροή έχουμε έντονη ανάμιξη με αποτέλεσμα τη μεταφορά αέρα με μεγάλη ορμή προς τα κατώτερα στρώματα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση ασθενών διατμητικών τάσεων (μικρή μεταβολή της ταχύτητας με το ύψος). Αντίθετα, σε ευσταθείς καταστάσεις η διατμητική τάση είναι σημαντική που είναι αποτέλεσμα των εξασθενημένων εντάσεων του ανέμου λόγω τριβής κοντά στην επιφάνεια σε σχέση με αυτά σε υψηλότερα στρώματα (μεγάλες διαφορές της ταχύτητας με το ύψος).



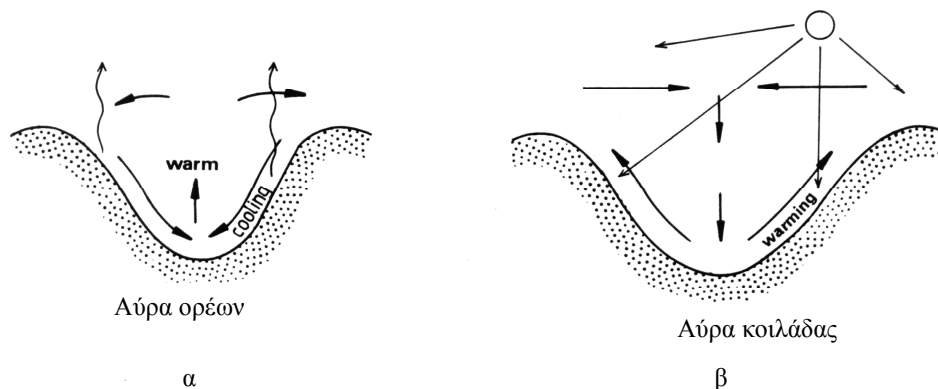
Σχήμα 4: Κατατομές της ταχύτητας του ανέμου για α) διαφορετική τραχύτητα και β) διαφορετικές συνθήκες ευστάθειας (Oke, 1987)

Όπως φαίνεται στο σχήμα 4e, η κατατομή της ταχύτητας του ανέμου δεν ξεκινάει από την αρχή του κατακόρυφου άξονα, αλλά από το ύψος z_0 .

Η κατατομή του ανέμου μεταβάλλεται και λόγω ανάγλυφου. Μια περιοχή έχει επίπεδο ανάγλυφο εφόσον: α) οι υψομετρικές διαφορές μέσα σε μία ακτίνα 12 km δεν ξεπερνούν τα 60 m ή β) οι κλίσεις του εδάφους είναι ασήμαντες. Οποιοδήποτε ανάγλυφο δεν ικανοποιεί τα κριτήρια που χαρακτηρίζουν το επίπεδο ανάγλυφο, θεωρείται ανώμαλο (π.χ. βουνά, μεμονωμένοι λόφοι, ορεινές εξάρσεις, ανωφέρειες-κατωφέρειες κλπ). Πάνω από την κορυφή ορεινών εξάρσεων, έχουμε πύκνωση των ρευματογραμμών και άρα επιτάχυνση του ανέμου. Η επιτάχυνση αυτή είναι άμεση συνάρτηση του ύψους της εξάρσης (όσο μεγαλύτερο το ύψος τόσο μεγαλύτερη η επιτάχυνση) αλλά εξαρτάται και από τον προσανατολισμό του σε σχέση με τη διεύθυνση του ανέμου. Σε σχέση με τον προσανατολισμό της ορεινής εξάρσης ως προς τη διεύθυνση του ανέμου, μέγιστη επιτάχυνση έχουμε όταν η ορεινή εξάρση είναι τοποθετημένη κάθετα στη διεύθυνση του ανέμου.

1.4 ΘΕΡΜΙΚΟΙ ΑΝΕΜΟΙ-ΤΟΠΙΚΕΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΕΣ

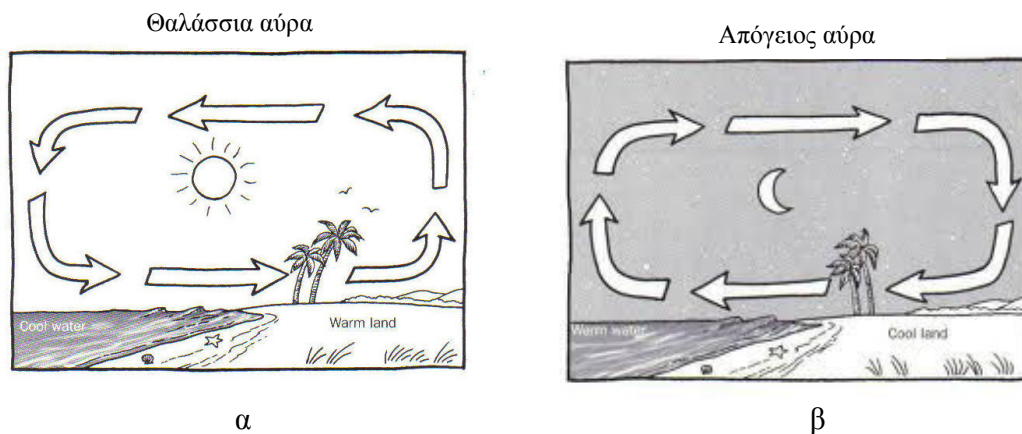
Θερμικοί-ημερήσιοι ονομάζονται οι άνεμοι εκείνοι που δημιουργούνται στη διάρκεια του 24ώρου, εξαιτίας της διαφοράς θερμοκρασίας που παρατηρείται, τόσο κατά τη διάρκεια της ημέρας, όσο και κατά τη νύχτα, ανάμεσα σε ξηρά-θάλασσα ή ανάμεσα σε πεδινές και ορεινές περιοχές. Συγκεκριμένα, στις κοιλάδες και τα φαράγγια παρατηρούνται τοπικές κυκλοφορίες όπως η *αύρα κοιλάδας* (Σχήμα 5β) κατά τη διάρκεια της ημέρας, οπότε η ηλιακή ακτινοβολία θερμαίνει τις πλαγιές των βουνών, κατά μήκος των οποίων ο θερμότερος και ελαφρύτερος αέρας ανεβαίνει. Αντίθετα, στο κέντρο της κοιλάδας παρατηρείται καθοδική κίνηση του αέρα. Τη νύχτα, αναπτύσσεται η αντίστροφη κυκλοφορία, γνωστή ως *αύρα ορέων* (Σχήμα 5α).



Σχήμα 5: α) Αύρα ορέων και β) Αύρα κοιλάδας

Σε παράκτιες περιοχές εμφανίζεται το τοπικό σύστημα της κυκλοφορίας του ανέμου που καλείται *θαλάσσια αύρα* (Σχήμα 6α). Οφείλεται στην διαφορετική θερμοχωρητικότητα μεταξύ ξηράς και θάλασσας. Συνεπώς η θαλάσσια αύρα αποτελεί έναν θερμικό άνεμο. Κατά την διάρκεια της ημέρας, η στεριά θερμαίνεται γρηγορότερα από την θάλασσα θερμαίνοντας και τον υπερκείμενο αέρα, ο οποίος γίνεται ελαφρύτερος και ανεβαίνει προς τα πάνω, δημιουργώντας μια περιοχή χαμηλής πίεσης κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. Αντίθετα, πάνω από τη θάλασσα ο αέρας είναι ψυχρότερος και πυκνότερος με

αποτέλεσμα να παρατηρείται μια περιοχή υψηλής πίεσης πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Κατά συνέπεια ο άνεμος πνέει από την περιοχή των υψηλών πιέσεων προς την περιοχή των χαμηλών πιέσεων, δημιουργώντας ένα κύτταρο τοπικής κυκλοφορίας την θαλάσσια απόγεια αύρα. Το μέγιστο εντοπίζεται κατά τις πρώτες απογευματινές ώρες. Η ακριβώς αντίθετη διαδικασία προκαλεί την εμφάνιση της *απόγειας αύρας* το βράδυ (Σχήμα 6β).

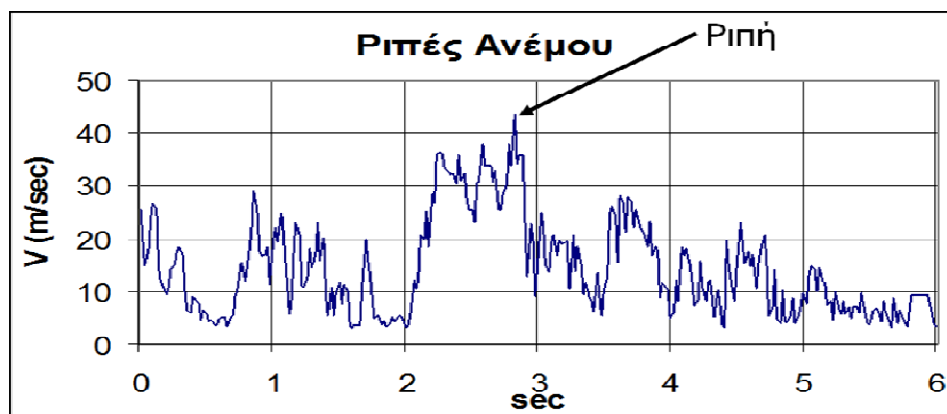


Σχήμα 6: α) Θαλάσσια αύρα β) Απόγειος αύρα

1.5 ΡΙΠΗ ΑΝΕΜΟΥ

Ριπή ανέμου (wind gust) είναι μία ξαφνική μικρής διάρκειας αύξηση στην ένταση του ανέμου, η οποία στη συνέχεια επανέρχεται στα προηγούμενα επίπεδα (Σχήμα 7). Οι ριπές οφείλονται στην ταραχώδη κίνηση του ανέμου από την τριβή του στο έδαφος. Γενικά ο άνεμος είναι λιγότερο ριπαίος πάνω από εκτεταμένες υδάτινες επιφάνειες και περισσότερο πάνω από επιφάνειες με έντονο ανάγλυφο ή υψηλά κτήρια.

Σύμφωνα με την πρακτική των παρατηρήσεων καιρού των ΗΠΑ, ριπές ανέμου σημειώνονται όταν η έξαρση της έντασης φθάσει τουλάχιστον τα 9.3 m/s και διαφέρει από τη μέση προηγούμενη ένταση του ανέμου τουλάχιστον κατά 4.6 m/s. Η διάρκεια της ριπής είναι συνήθως μικρότερη από 20 s.



Σχήμα 7: Ριπή του ανέμου

Πρέπει να σημειωθεί, ότι στο λογισμικό του εργαστηρίου, οι ριπές έχουν υπολογιστεί ως το μέγιστο 5 συνεχόμενων τιμών δευτερολέπτων κατά τη διάρκεια ενός λεπτού.

1.6 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΑΝΕΜΟΥ

Οι μέθοδοι εκτίμησης του ανέμου είναι οι εξής:

α) Πειράματα πεδίου ή μετρήσεις

Οι κύριες πηγές δεδομένων της ταχύτητας του ανέμου είναι σταθμοί επιφανειακοί συνοπτικοί, κλιματολογικοί, αεροναυτικοί μετεωρολογικοί ή γεωργικοί μετεωρολογικοί. Ιδιαίτερης σημασίας στη μελέτη της εκτίμησης της δυναμικής ενέργειας του ανέμου είναι οι παρατηρήσεις του ανέμου πάνω σε ιστούς και πάνω σε ‘σταθμούς οριακού στρώματος’ (δηλ. σταθμοί εξοπλισμένοι να παρέχουν λεπτομερειακά μετεωρολογικά δεδομένα στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα). Για να μπορούν όμως να είναι αξιοποιήσιμα τα δεδομένα του ανέμου και να καταλήγουν σε ασφαλή αποτελέσματα, απαιτούνται μακροχρόνιες και αναλυτικές μετρήσεις (θα πρέπει να καλύπτουν περίοδο τουλάχιστον 5 ετών). Το κόστος των μετρήσεων και η αναπόφευκτη καθυστέρηση, σε συνδυασμό με τη συχνή έλλειψη μακροχρόνιων μετρήσεων στις περιοχές ενδιαφέροντος, οδηγούν συχνά στη χρήση αριθμητικών μοντέλων.

β) Προσομοιώσεις ανέμου σε αεροσήραγγα

Η αεροσήραγγα είναι μια διάταξη, με την οποία δημιουργούμε ροή αέρα και επομένως μπορούμε να ελέγξουμε συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της ροής. Η αεροσήραγγα χρησιμοποιείται σε εργαστηριακές έρευνες με μεγάλο πλήθος εφαρμογών, όπως μελέτη της αεροδυναμικής συμπεριφοράς των οχημάτων, συμπεριφορά των κατασκευών ή των κτηρίων στη ροή του ανέμου, και συμπεριφορά των αεροκινητήρων. Μέσω της αεροσήραγγας μελετώνται φαινόμενα όπως της ατμοσφαιρικής ροής και της διάχυσης των αερίων ρύπων. Επίσης, η αεροσήραγγα χρησιμοποιείται για την βαθμονόμηση ανεμομέτρων και ανεμοδεικτών.

γ) Αριθμητικές προσομοιώσεις με μοντέλα ροής

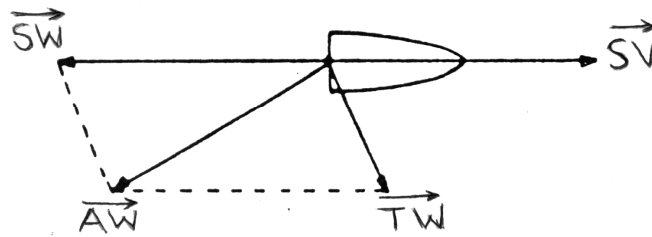
Τα αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης παρέχουν γνώσεις για το πεδίο του ανέμου σε περιοχές απουσίας, ή σποραδικών, μετρήσεων και επιπλέον, έχουν τη δυνατότητα πρόγνωσης. Για την προσομοίωση της ροής του ανέμου, υπάρχουν τα αριθμητικά μοντέλα μέσης κλίμακας, τα οποία προσομοιώνουν τοπικές κυκλοφορίες (όπως θαλάσσια/απόγεια αύρα, αναβάτες/καταβάτες ανέμους, αύρα κοιλάδας/ορέων) και χωρίζονται στις εξής κατηγορίες: 1) τα *διαγνωστικά (ή κινηματικά) μοντέλα*, τα οποία αναλύουν και παρεμβάλλουν μετρήσεις από συγκεκριμένα σημεία σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές 2) τα *δυναμικά μοντέλα*, τα οποία περιλαμβάνουν μη γραμμικές υδροδυναμικές εξισώσεις κίνησης ή τις παραγώγων τους και 3) τα *μοντέλα τετραδιάστατης προσομοίωσης δεδομένων* (Four Dimensional Data Assimilation), που συνδυάζουν τα καλύτερα χαρακτηριστικά των διαγνωστικών και των δυναμικών μοντέλων, με την ενσωμάτωση μετρήσεων σε όλη την περίοδο ολοκλήρωσης. Επίσης, αναφέρονται ενδεικτικά και τα αριθμητικά μοντέλα CFD (Computational Fluid Dynamical) με σχήματα κλεισίματος υψηλής τάξης, τα οποία χρησιμοποιούνται για τον

υπολογισμό της ροής μέσα και γύρω από περίπλοκα κτήρια και μέσα σε στενούς δρόμους, τα μοντέλα άμεσης αριθμητικής προσομοίωσης (Direct Numerical Simulation, DNS), προσομοίωσης μεγάλων στροβίλων (Large Eddy Simulation, LES) και προσομοίωση Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS).

1.7 ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΣ ΑΝΕΜΟΣ

Ο άνεμος που μετρίεται από όργανα που είναι τοποθετημένα πάνω σε κινούμενα μέσα (πλοία κλπ) δεν αντιπροσωπεύει τον πραγματικό άνεμο αλλά είναι το αποτέλεσμα δύο μεταβλητών συνιστωσών: του πραγματικού ανέμου και του ανέμου που δημιουργείται από την κίνηση του κινούμενου μέσου (π.χ. 'άνεμος του πλοίου'). Όπως είναι γνωστό κατά την κίνηση του κινούμενου μέσου με ταχύτητα $\vec{SV}$ (ship velocity) θα δημιουργείται άνεμος ίσου μέτρου και αντίθετης φοράς με την ταχύτητά του δηλ. $\vec{SW}$ (ship wind - άνεμος πλοίου) (Σχήμα 8). Ο άνεμος που προκύπτει καλείται φαινόμενος άνεμος $\vec{AW}$ (apparent wind) και είναι η συνισταμένη του πραγματικού ανέμου $\vec{TW}$ (true wind) και του ανέμου που δημιουργείται από την κίνηση του κινούμενου μέσου $\vec{SW}$ (ship wind - άνεμος πλοίου). Υπολογίζεται με εφαρμογή της διαγραμματικής μεθόδου του παραλληλογράμμου:

$$\vec{AW} = \vec{TW} + \vec{SW}$$



Σχήμα 8: Ορισμός φαινόμενου ανέμου

1.8 ΜΟΝΑΔΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗΣ ΑΝΕΜΟΥ

Στον όρο *ανυσματική ταχύτητα του ανέμου* συμπεριλαμβάνονται τόσο η ένταση, όσο και η διεύθυνση του ανέμου.

α) Μονάδες μέτρησης έντασης ανέμου

Για την ένταση του ανέμου έχουν ορισθεί οι μονάδες που φαίνονται στον Πίνακα 2. Στον Πίνακα αυτό, δίνεται και η σχέση μεταξύ των διαφόρων μονάδων (σε κάθε οριζόντια γραμμή δίνεται το ίδιο μέτρο ταχύτητας στις διαφορετικές μονάδες).

Πίνακας 2: Μονάδες μέτρησης της έντασης του ανέμου

kn (κόμβοι)	ms ⁻¹	mileh ⁻¹ (Mph)	Kmh ⁻¹	fts ⁻¹
1	0.515	1.152	1.853	1.689

1.943	1	2.237	3.600	3.281
0.868	0.447	1	1.609	1.467
0.540	0.278	0.621	1	0.911
0.592	0.305	0.682	1.097	1

Κλίμακα Beaufort

Η κλίμακα Beaufort, είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη εμπειρική κλίμακα για τη μέτρηση της έντασης της ταχύτητας του ανέμου, η οποία αναπτύχθηκε από τον κ. Francis Beaufort, το 1805. Η κλίμακα Beaufort αποτελείται από 12 υποδιαίρεσεις, συν το '0' για την περίπτωση της 'άπνοιας' (Πίνακας 3). Από το 1946 έως το 1970, μετρήθηκαν και τιμές από 13 έως 17 Beaufort, οι οποίες χαρακτηρίστηκαν ως 'τυφώνας' και δεν χρησιμοποιούνται πλέον διεθνώς, γιατί μετρήθηκαν μόνο σε συγκεκριμένες περιπτώσεις (μόνο στην Κίνα και την Taiwan, όπου δημιουργούνται συχνά τυφώνες).

Η κλίμακα Beaufort βασίζεται στην εμπειρική σχέση:

$$V_{(m/s)} = 0.836 B^{3/2}, \text{ ή } V_{(km/h)} = 3.01 B^{3/2}, \text{ ή } V_{(kn)} = 1.625 B^{3/2}$$

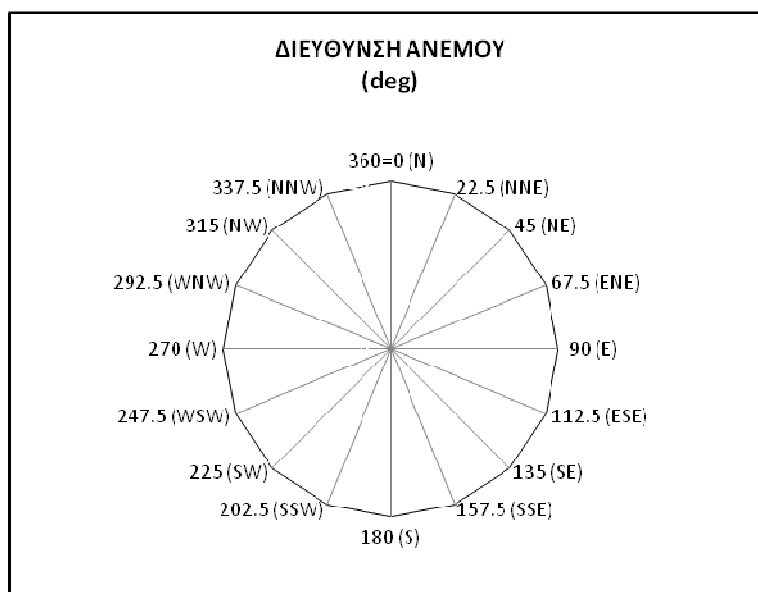
όπου B η υποδιαίρεση της κλίμακας Beaufort και V η ταχύτητα ανέμου.

Πίνακας 3: Η ανεμομετρική κλίμακα Beaufort

Beaufort	Χαρακτηρισμός	m/s	Αποτελέσματα ανέμου στην ξηρά
0	Άπνοια	<0.2	Ο καπνός υψώνεται κατακόρυφα.
1	Υποπνέων άνεμος	0.3-1.5	Η διεύθυνση του ανέμου φαίνεται από την φορά του καπνού. Ο ανεμοδείκτης ακίνητος.
2	Ασθενής άνεμος	1.6-3.3	Άνεμος αισθητός στο πρόσωπο. Τα φύλλα των δέντρων κινούνται. Κοινός ανεμοδείκτης τίθεται σε κίνηση.
3	Λεπτός άνεμος	3.4-5.4	Φύλλα και κλαδιά των δέντρων σε συνεχή κίνηση. Σημαία κυματίζει ελαφρά.
4	Μέτριος άνεμος	5.5-7.9	Ο άνεμος σηκώνει σκόνη και ελεύθερα τεμάχια χαρτιού. Κινούνται οι μικροί κλάδοι των δέντρων.
5	Λαμπρός άνεμος	8.0-10.7	Μικρά δένδρα κουνιούνται. Στην επιφάνια χερσαίων υδάτων σχηματίζονται μικρά κύματα με κορυφή.
6	Ισχυρός Άνεμος	10.8-13.8	Τα μεγάλα κλαδιά των δέντρων κινούνται. Οι ομπρέλες χρησιμοποιούνται μετά δυσκολίας.
7	Σφοδρός Άνεμος	13.9-17.1	Ο άνεμος κουνάει τα δέντρα εξ ολοκλήρου. Το βάδισμα αντίθετα προς τον άνεμο καθίσταται δύσκολο.
8	Θυελλώδης άνεμος	17.2-20.7	Ο άνεμος θραύει κλώνους και παρεμποδίζει το βάδισμα.
9	Θύελλα	20.8-24.4	Ελαφρές ζημιές στις οικοδομές.
10	Ισχυρά θύελλα	24.5-28.4	Εκριζώνονται δέντρα. Σημαντικές ζημιές στις οικοδομές.
11	Σφοδρά θύελλα	28.5-32.6	Απαντάται σπανιότατα. Συνοδεύεται από ζημιές σε μεγάλο βαθμό.
12	Τυφώνας	32.7+0	

β) Μονάδες μέτρησης διεύθυνσης ανέμου

Η διεύθυνση του ανέμου ορίζεται ως προς τον αληθή Βορρά στον τόπο παρατήρησης και αφορά στη διεύθυνση από την οποία πνέει ο άνεμος. Εκφράζεται είτε σε μοίρες (deg), ως προς τον αληθή Βορρά, είτε σε τομείς διευθύνσεων (που αντιστοιχούν σε 8, ή 16 ή 32 - ανάλογα με την απαιτούμενη ακρίβεια - θέσεις της πυξίδας σε έναν πλήρη κύκλο). Στο Σχήμα 9, δίνεται σχηματικά το ακριβές ισοδύναμο κάθε διεύθυνσης σε μοίρες, σε 16 τομείς ενός πλήρους κύκλου.



Σχήμα 9: Το ακριβές ισοδύναμο κάθε διεύθυνσης σε μοίρες (deg) σε 16 τομείς ενός πλήρους κύκλου.

1.9 ΚΑΤΑΓΡΑΦΙΚΑ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ - ΥΨΟΣ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ

α) Καταγραφικά της ταχύτητας του ανέμου

Τα όργανα και τα καταγραφικά της έντασης του ανέμου επιγραμματικά ταξινομούνται στις ακόλουθες κατηγορίες: α) Περιστρεφόμενοι ανεμογράφοι, β) Ανεμογράφοι πίεσης, γ) Ανεμογράφοι με thermistor, δ) Ανεμογράφοι υπέρυθρου νήματος (hotwire). ε) Ηχητικά ανεμόμετρα που εξαρτώνται από την ταχύτητα του ήχου και στ) Τριαξονικοί ανεμογράφοι.

Κάποιοι από τους παραπάνω αισθητήρες είναι προορισμένοι να χρησιμοποιούνται για *συνοπτικής ή μεγάλης κλίμακας* μετρήσεις της έντασης του ανέμου και άλλοι για *μικρής κλίμακας* μετρήσεις. Η διακριτοποίηση των αισθητήρων βασίζεται στα τεχνικά χαρακτηριστικά τους όπως το κατώφλι, η ακρίβεια των οργάνων και ο ρυθμός καταγραφής των πειραματικών μετρήσεων. Οι τριαξονικοί ανεμογράφοι και τα κυπελλοφόρα ανεμόμετρα είναι τα πλέον δόκιμα για τη μέτρηση μετεωρολογικών μεγεθών. Τα ηχητικά ανεμόμετρα, αν και σχετικά ακριβότερα και με γνωστικές απαιτήσεις στα ηλεκτρονικά, έχουν τους καλύτερους διαθέσιμους αισθητήρες και θεωρούνται τα πλέον κατάλληλα για την αποτύπωση της ατμοσφαιρικής τύρβης.

β) Ύψος τοποθέτησης καταγραφικών

Για μετρήσεις ταχύτητας ανέμου μεγάλης ή συνοπτικής κλίμακας, που είναι απαραίτητες για συνοπτικούς και κλιματολογικούς σκοπούς, είναι ανάγκη να ορισθεί αυστηρά το ύψος τοποθέτησης του ανεμομέτρου ή του ανεμογράφου για να λαμβάνονται αξιόπιστες μετρήσεις, ανεπηρέαστες από τοπικούς παράγοντες.

Για ανοικτό και επίπεδο ανάγλυφο το ύψος αυτό ορίζεται στα 10 m πάνω από το έδαφος. Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις, χρειάζεται να γίνουν προσαρμογές του ύψους τοποθέτησης του οργάνου ώστε οι μετρούμενες εντάσεις και διευθύνσεις του ανέμου να είναι αντιπροσωπευτικές της ευρύτερης περιοχής και όχι των τοπικών συνθηκών.

Για παράδειγμα, σε μία θέση χωρίς σημαντικά εμπόδια δηλ. με εμπόδια που είτε δεν είναι μεγάλα (έως 12m) και κατανέμονται σχεδόν ομοιόμορφα γύρω από το όργανο, τα κύπελλα του ανεμογράφου πρέπει να τοποθετηθούν σε ένα “ενεργό ύψος” $h + 10m$, όπου h είναι το μέσο ύψος των εμποδίων. Όταν τα κύπελλα των ανεμογράφων πρέπει να τοποθετηθούν σε ένα απομονωμένο κτήριο, το ίδιο το κτήριο διαταράσσει σημαντικά τη ροή του αέρα, ανάλογα με το μέγεθος και το σχήμα του. Χονδρικά, ο ιστός ή ο πύργος που θα υψωθεί στην οροφή, πρέπει να έχει ύψος ίσο τουλάχιστον με το $\frac{1}{2}$ ή τα $\frac{3}{4}$ του ύψους του κτιρίου (θεωρώντας το κτήριο μεγάλο).

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗΣ ΑΝΕΜΟΥ ΤΟΥ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΤΟΥ ΠΑΝ/ΜΙΟΥ ΑΘΗΝΩΝ

2.1 Ανεμόμετρο



Ο αισθητήρας που χρησιμοποιείται στον Μετεωρολογικό Σταθμό του Εργαστηρίου είναι τύπου 1900 NRG #40C.

Το ύψος τοποθέτησης του αισθητήρα είναι 10.7 m από το οριζόντιο επίπεδο.

Η χαμηλή τους αδράνεια και το μοναδικό ρουλεμάν επιτρέπουν την πολύ γρήγορη ανταπόκριση σε ριπές ανέμου και νηνεμίες. Λόγω της γραμμικότητας της παραγωγής τους, οι αισθητήρες θεωρούνται ιδανικοί για χρήση με ποικίλα συστήματα ανάκτησης δεδομένων. Τα κυριότερα τεχνικά χαρακτηριστικά του ανεμομέτρου του εργαστηρίου, φαίνονται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4: Τα κυριότερα τεχνικά χαρακτηριστικά του ανεμομέτρου

Τεχνικά χαρακτηριστικά	Τιμές
Μέγιστη τιμή της ταχύτητας του ανέμου για την οποία	96 m/s

Λειτουργεί ο αισθητήρας	
Ακρίβεια ανεμομέτρου	$\pm 0.1 \text{ m/sec}$
Θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας	55 °C to 60 °C
Κατώφλι μετρήσεων	0.35 m/s
Συχνότητα λειτουργίας	0 Hz to 125 Hz
Ρυθμός καταγραφής ενδείξεων	1 min
Σήμα εξόδου	0-5V pulse
Συχνότητα αναλογική της ταχύτητας του ανέμου	$\text{speed(m/s)} = 0.758 * \text{freq} + 0.35$
Ρυθμός επανάληψης	1 παλμός ανά περιστροφή

2.2 Ανεμοδείκτης

Η διεύθυνση του ανέμου προσδιορίζεται με τη χρήση ενός ανεμοδείκτη. Η κατεύθυνση του βέλους του ανεμοδείκτη καθορίζει το σημείο του ορίζοντα από το οποίο πνέει ο άνεμος.

Γενικά ένας ανεμοδείκτης πρέπει:

- Να γυρίζει γύρω από τον άξονα περιστροφής του με την ελάχιστη δυνατή τριβή
- Να είναι σωστά ισορροπημένος, αλλιώς θα παρουσιάζει συστηματικό σφάλμα προς μία συγκεκριμένη διεύθυνση,
- Να έχει σχεδιασθεί ώστε να παράγει τη μέγιστη ροπή, για δεδομένη μεταβολή στη διεύθυνση του ανέμου, σε σχέση με τη ροπή αδράνειας,
- Να μην συντονίζεται με τις φυσικές ταλαντώσεις του ανέμου, να έχει γρήγορη απόκριση στις διακυμάνσεις της διεύθυνσης του ανέμου



Ο αισθητήρας που χρησιμοποιείται στον Μετεωρολογικό Σταθμό του Εργαστηρίου είναι τύπου 1900 NRG #40C.

Η αρχή λειτουργίας του ανεμοδείκτη, που χρησιμοποιεί το Εργαστήριο Μετεωρολογίας, βασίζεται στο αγωγίμο πλαστικό ποτενσιόμετρο που βρίσκεται στο κύριο σώμα. Μια αναλογική τάση εξόδου ευθέως ανάλογη προς την κατεύθυνση του ανέμου παράγεται όταν μια σταθερή τάση διέγερσης DC εφαρμόζεται με το ποτενσιόμετρο. Τα κυριότερα τεχνικά χαρακτηριστικά του ανεμοδείκτη φαίνονται στον Πίνακα 5:

Πίνακας 5: Τα κυριότερα τεχνικά χαρακτηριστικά του ανεμοδείκτη

Τεχνικά χαρακτηριστικά	Τιμές
Σήμα εξόδου	αναλογική DC τάση 0-5V μέσω αγωγίμου ποτενσιόμετρου
Κατώφλι των μετρήσεων	1 m/sec
Ανάλυση σήματος	0 - 5V με 152μV
Ακρίβεια μετρήσεων	1% (ακρίβεια $\pm 3,6^\circ$)
Θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας	-55 °C to 60 °C
Χρόνος ζωής του οργάνου	2-6 χρόνια κανονικής λειτουργίας

3 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ-ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΤΙΜΩΝ

Η διεύθυνση του επιφανειακού ανέμου συνήθως μεταβάλλεται έντονα και γρήγορα με το χρόνο. Οι μεταβολές είναι ανώμαλες σε περίοδο και πλάτος, ιδιότητα γνωστή ως *‘τυχαιότητα’* ή *τύρβη*. Έτσι, συνήθως χρησιμοποιείται η μέση ταχύτητα του ανέμου για χρονικό διάστημα 10 λεπτών πριν από τη στιγμή της παρατήρησης.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ένα τυπικό παράδειγμα στατιστικής επεξεργασίας ανεμολογικών δεδομένων σε μια περιοχή.

3.1 Κατανομή συχνοτήτων

Αρχικά, ταξινομούνται τα στοιχεία του δείγματος σε τάξεις διαστημάτων, όπου η αρχή του πρώτου και το τέλος του τελευταίου καθορίζονται από τις οριακές τιμές που λαμβάνουν η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου. Ο ορισμός του αριθμού των τάξεων διαστημάτων υπολογίζεται ως το πενταπλάσιο του λογαρίθμου του δείγματος. $A=5\log N$. Το εύρος της τάξης διαστήματος είναι κατά προτίμηση περιττός αριθμός, ώστε η μεσαία τιμή του να αντιστοιχεί στην αντιπροσωπευτική τιμή του διαστήματος. Οι τάξεις διαστημάτων δεν πρέπει να συμπίπτουν τμηματικά και θα πρέπει να επιλεγθούν έτσι ώστε να μην συγκεντρώνεται σε μια από αυτές το μεγαλύτερο μέρος των δεδομένων. Σημαντική είναι η επιλογή των οριακών τιμών των τάξεων διαστημάτων, έτσι ώστε εάν το τέλος μιας τάξεως διαστήματος είναι κλειστό, η αρχή της επόμενης πρέπει να είναι ανοιχτή. Για την παρουσίαση των δεδομένων της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου οι τάξεις διαστημάτων θα είναι ισομήκεις.

Σε κάθε τάξη διαστήματος αντιστοιχεί ένας συγκεκριμένος αριθμός δεδομένων, ο οποίος καλείται απόλυτη συχνότητα. Για παράδειγμα, στον Πίνακα 6 παρουσιάζεται η κατανομή των απόλυτων συχνοτήτων εμφάνισης των τάξεων διαστημάτων της ταχύτητας του ανέμου, καθώς και η μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου ανά διεύθυνση. Ο υπολογισμός της μέσης τιμής της ταχύτητας ανά διεύθυνση παρουσιάζεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 3.3.

Πίνακας 6: Κατανομή απόλυτων συχνοτήτων της ταχύτητας του ανέμου ανά διεύθυνση, καθώς και η μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου ανά διεύθυνση

Διεύθυνση (deg)		Ταχύτητα (m/s)							Μέση τιμή
Εύρος διαστήματος		0.5-2.1	2.1-3.6	3.6-5.7	5.7-8.8	8.8-11.1	>=11.1	Σύνολο	
	Αντιπ τιμή	1.3	2.85	4.65	7.25	9.95	11.55		(m/s)
348.75-11.25	0 N	3	2	1	2	0	0	8	3.59
11.25-33.75	22.5 NNE	2	1	3	0	0	0	6	3.23
33.75-56.25	45 NE	2	3	10	4	0	0	19	4.56

56.25-78.75	67.5 ENE	7	11	10	4	1	0	33	3.82
78.75-101.25	90 E	10	11	9	1	1	0	32	3.23
101.25-123.75	112.5 ESE	5	4	6	1	0	0	16	3.32
123.75-146.25	135 SE	6	6	5	4	0	0	21	3.67
146.25-168.75	157.5 SSE	5	4	3	2	0	0	14	3.31
168.75-191.25	180 S	8	8	2	1	0	0	19	2.62
191.25-213.75	202.5 SSW	5	3	2	0	0	0	10	2.44
213.75-236.25	225 SW	2	0	0	0	0	0	2	1.30
236.25-258.75	247.5 WSW	5	0	2	2	0	0	9	3.37
258.75-281.25	270 W	3	1	7	0	0	0	11	3.57
281.25-303.75	292.5 WNW	5	0	1	0	0	1	7	3.24
303.75-326.25	315 NW	2	4	3	1	0	0	10	3.52
326.25-348.75	337.5 NNW	2	7	5	4	0	0	18	4.16
Μερικό σύνολο		72	65	69	26	2	1	235	
Άπνοια								3	
Σύνολο								238	

Σχετική ονομάζεται η συχνότητα που υπολογίζεται ως το πηλίκο της απόλυτης συχνότητας προς το σύνολο των αντίστοιχων δεδομένων. Η σχετική συχνότητα είναι πάντοτε μικρότερη της μονάδος και δίδεται με τη μορφή εκατοστιαίας αναλογίας (%). Το σύνολο των σχετικών συχνοτήτων μιας μεταβλητής έχει άθροισμα την μονάδα (Πίνακας 7).

Πίνακας 7: Η κατανομή των σχετικών συχνοτήτων της ταχύτητας του ανέμου ανά διεύθυνση

Διεύθυνση (deg)		Ταχύτητα (m/s)						
Εύρος διαστήματος	Αντιπ. τιμή	0.5-2.1	2.1-3.6	3.6-5.7	5.7-8.8	8.8-11.1	>=11.1	Σύνολο
		1.3	2.85	4.65	7.25	9.95	11.55	%
348.75-11.25	0 N	1.26	0.84	0.42	0.84	0.00	0.00	3.36
11.25-33.75	22.5 NNE	0.84	0.42	1.26	0.00	0.00	0.00	2.52
33.75-56.25	45 NE	0.84	1.26	4.20	1.68	0.00	0.00	7.98
56.25-78.75	67.5 ENE	2.94	4.62	4.20	1.68	0.42	0.00	13.87
78.75-101.25	90 E	4.20	4.62	3.78	0.42	0.42	0.00	13.45
101.25-123.75	112.5 ESE	2.10	1.68	2.52	0.42	0.00	0.00	6.72

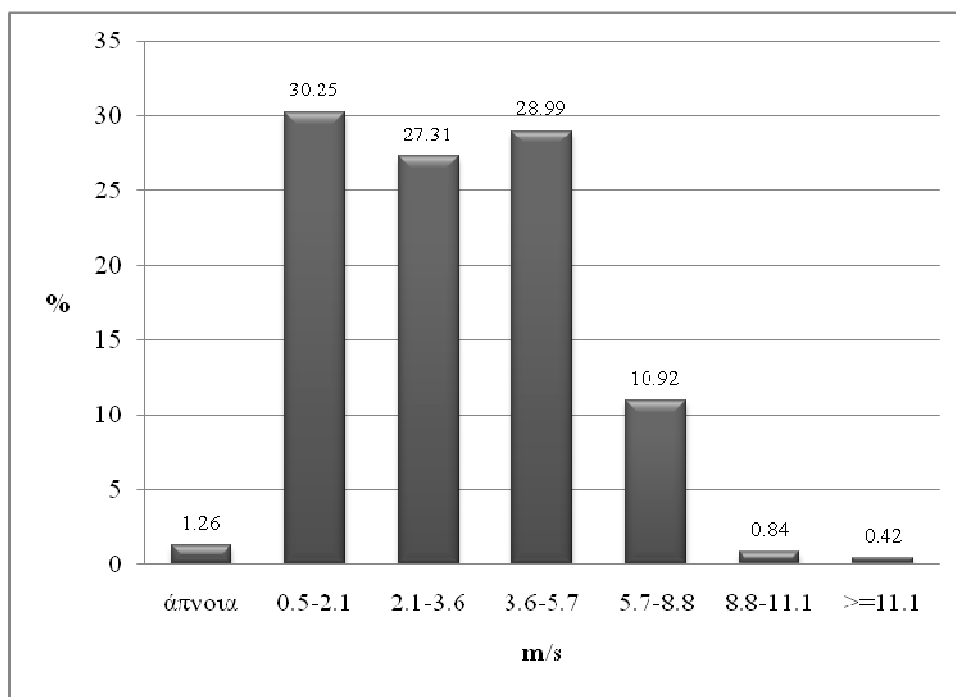
123.75-146.25	135 SE	2.52	2.52	2.10	1.68	0.00	0.00	8.82
146.25-168.75	157.5 SSE	2.10	1.68	1.26	0.84	0.00	0.00	5.88
168.75-191.25	180 S	3.36	3.36	0.84	0.42	0.00	0.00	7.98
191.25-213.75	202.5 SSW	2.10	1.26	0.84	0.00	0.00	0.00	4.20
213.75-236.25	225 SW	0.84	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.84
236.25-258.75	247.5 WSW	2.10	0.00	0.84	0.84	0.00	0.00	3.78
258.75-281.25	270 W	1.26	0.42	2.94	0.00	0.00	0.00	4.62
281.25-303.75	292.5 WNW	2.10	0.00	0.42	0.00	0.00	0.42	2.94
303.75-326.25	315 NW	0.84	1.68	1.26	0.42	0.00	0.00	4.20
326.25-348.75	337.5 NNW	0.84	2.94	2.10	1.68	0.00	0.00	7.56
Μερικό σύνολο (%)		30.25	27.31	28.99	10.92	0.84	0.42	98.74
Άπνοια								1.26
Σύνολο								100

3.2 Γραφικές παραστάσεις

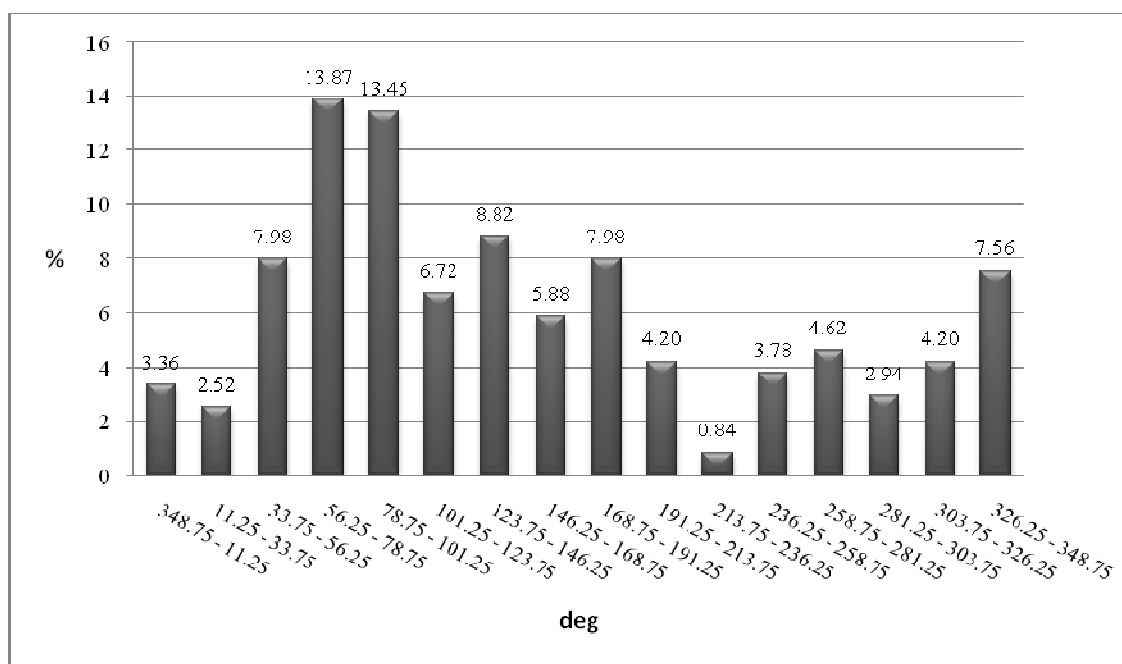
α) Ιστογράμματα

Η γραφική απεικόνιση της κατανομής της σχετικής ή της απόλυτης συχνότητας μιας μεταβλητής μπορεί να γίνει μέσω ιστογράμματος. Για την απεικόνιση μέσω ιστογράμματος στον κατακόρυφο άξονα (yy') δίδεται η συχνότητα (απόλυτη ή σχετική) και στον οριζόντιο άξονα (xx') έχουμε θεωρήσει ίσα διαστήματα που αντιστοιχούν στις τάξεις διαστημάτων. Συνεπώς, σε κάθε τάξη διαστήματος, αντιστοιχεί ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο, το οποίο έχει ύψος ίσο με τη συχνότητα εμφάνισης τιμών μέσα σε αυτή την τάξη διαστήματος.

Η απεικόνιση της σχετικής συχνότητας της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου, μέσω ιστογραμμάτων, φαίνεται στα Σχήματα 10 και 11 αντίστοιχα, τα οποία βασίζονται στις τιμές που έχουν υπολογιστεί στον Πίνακα 7.



Σχήμα 10: Ιστόγραμμα κατανομής σχετικών συχνοτήτων ταχύτητας του ανέμου



Σχήμα 11: Ιστόγραμμα κατανομής σχετικών συχνοτήτων διεύθυνσης ανέμου

β) Πολικά διαγράμματα –Ροδόγραμμα

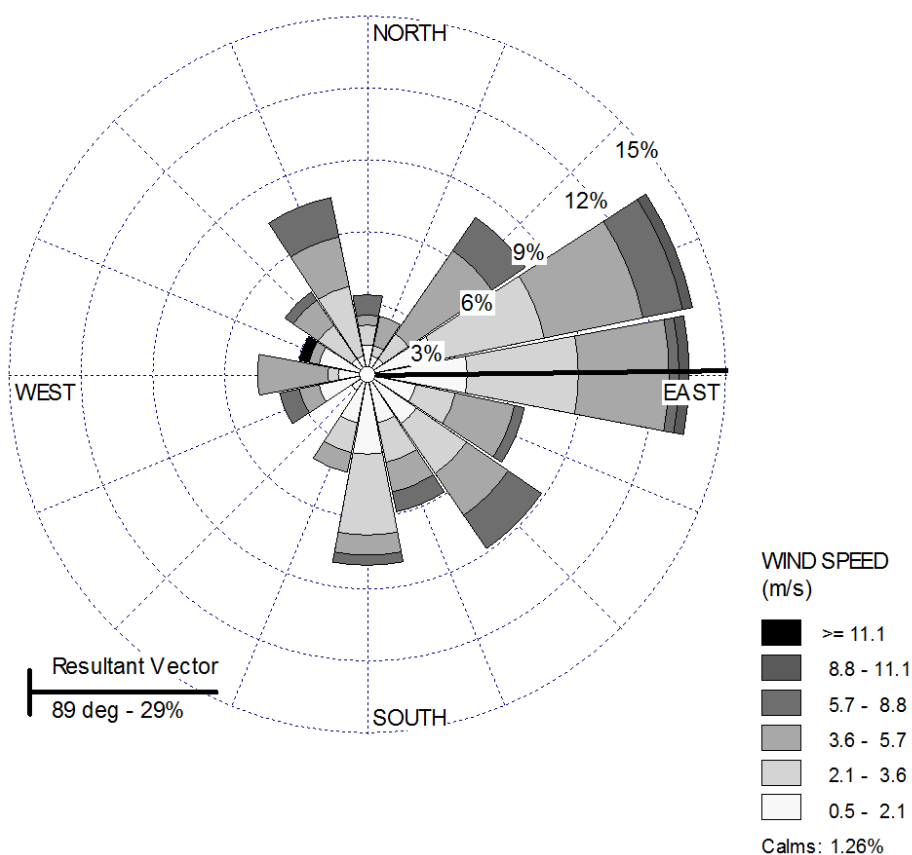
Η βέλτιστη απεικόνιση ενός διανυσματικού μεγέθους, όπως αυτό του ανέμου, γίνεται με χρήση πολικών συντεταγμένων. Σε ένα πολικό διάγραμμα, που έχουμε ορίσει τις κυριότερες διευθύνσεις του ανέμου (π.χ. 16), χαράσσουμε ανά διεύθυνση πρόσπτωσης του ανέμου για κάθε πεδίο ταχυτήτων ορθογώνια παραλληλόγραμμα (ή σφήνες) χρωματικής διαβάθμισης. Η χρωματική διαβάθμιση σχετίζεται με την διαβάθμιση του μέτρου της ταχύτητας του ανέμου, ενώ η σχετική συχνότητα εμφάνισης του ανέμου ανά διεύθυνση, υποδηλώνεται από τους ομόκεντρους κύκλους που εμφανίζονται στο πολικό διάγραμμα.

Το πιο συνηθισμένο παράδειγμα πολικού διαγράμματος στην περίπτωση του ανέμου είναι το *ροδόγραμμα* (Σχήμα 12). Για τον υπολογισμό των τιμών του ροδογράμματος, κατατάσσονται τα δεδομένα σε πίνακα διπλής εισόδου, επιλέγοντας ίσα διαστήματα όσον αφορά τις τάξεις διαστημάτων της ταχύτητας του ανέμου και κατατάσσονται τα δεδομένα συγχρόνως και σε σχέση με την διεύθυνση του ανέμου, όπως φαίνεται στον Πίνακα 8. Στον Πίνακα αυτό, έχει υπολογιστεί η κατανομή των ταχυτήτων ανά διεύθυνση θεωρώντας 100 % το άθροισμά τους ανά διεύθυνση. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, στο ροδόγραμμα, οι ομόκεντροι κύκλοι αντιστοιχούν στη σχετική συχνότητα εμφάνισης της κάθε διεύθυνσης και η χρωματική διαβάθμιση σχετίζεται με την επί τοις εκατό (%) διαβάθμιση του μέτρου της ταχύτητας του ανέμου ανά διεύθυνση.

Πίνακας 8: Κατανομή σχετικών συχνοτήτων της ταχύτητας του ανέμου ανά διεύθυνση, θεωρώντας 100 % το άθροισμά τους ανά διεύθυνση

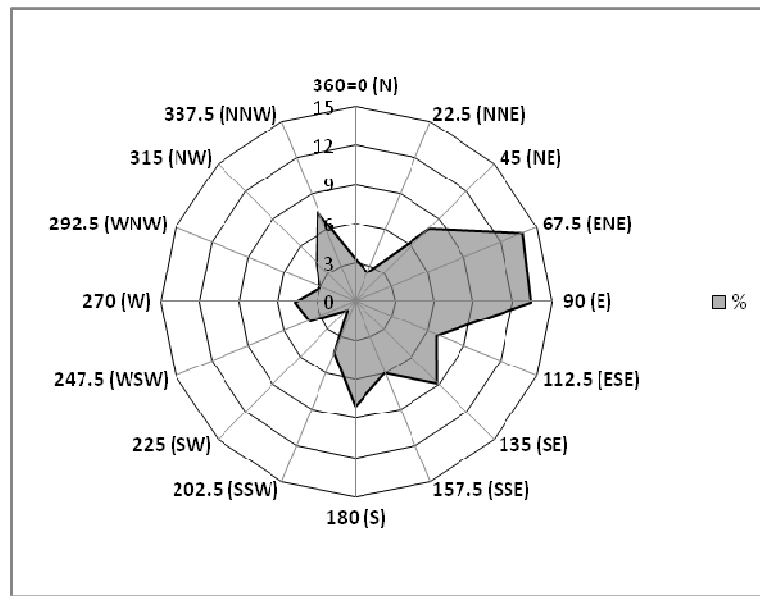
Διεύθυνση (deg)		Ταχύτητα (m/s)							Σχετ Συχν %.
Εύρος διαστήματος		0.5-2.1	2.1-3.6	3.6-5.7	5.7-8.8	8.8-11.1	>=11.1	Σύνολο (%)	
	Αντιπ τιμή	1.3	2.85	4.65	7.25	9.95	11.55		
348.75-11.25	0 N	37.50	25.00	12.50	25.00	0.00	0.00	100	3.36
11.25-33.75	22.5 NNE	33.33	16.67	50.00	0.00	0.00	0.00	100	2.52
33.75-56.25	45 NE	10.53	15.79	52.63	21.05	0.00	0.00	100	7.98
56.25-78.75	67.5 ENE	21.21	33.33	30.30	12.12	3.03	0.00	100	13.87
78.75-101.25	90 E	31.25	34.38	28.13	3.13	3.13	0.00	100	13.45
101.25-123.75	112.5 ESE	31.25	25.00	37.50	6.25	0.00	0.00	100	6.72
123.75-146.25	135 SE	28.57	28.57	23.81	19.05	0.00	0.00	100	8.82
146.25-168.75	157.5 SSE	35.71	28.57	21.43	14.29	0.00	0.00	100	5.88
168.75-191.25	180 S	42.11	42.11	10.53	5.26	0.00	0.00	100	7.98
191.25-213.75	202.5 SSW	50.00	30.00	20.00	0.00	0.00	0.00	100	4.20
213.75-	225	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100	0.84

236.25	SW								
236.25-258.75	247.5 WSW	55.56	0.00	22.22	22.22	0.00	0.00	100	3.78
258.75-281.25	270 W	27.27	9.09	63.64	0.00	0.00	0.00	100	4.62
281.25-303.75	292.5 WNW	71.43	0.00	14.29	0.00	0.00	14.29	100	2.94
303.75-326.25	315 NW	20.00	40.00	30.00	10.00	0.00	0.00	100	4.20
326.25-348.75	337.5 NNW	11.11	38.89	27.78	22.22	0.00	0.00	100	7.56
Άπνοια								1.26	

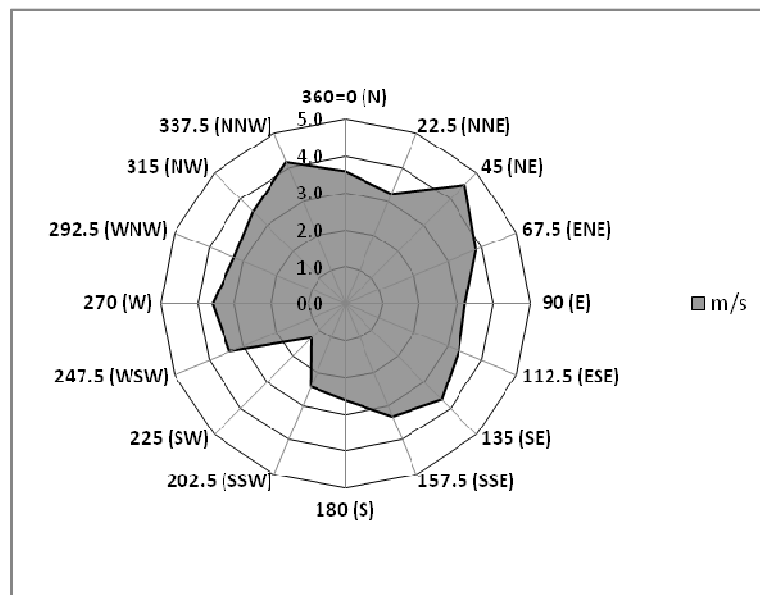


Σχήμα 12: Ροδόγραμμα ανέμου

Στα Σχήματα 13 και 14, παρουσιάζονται τα πολικά διαγράμματα μόνο της κατανομής των σχετικών συχνοτήτων διεύθυνσης και της μέσης τιμής της ταχύτητας του ανέμου ανά διεύθυνση, αντίστοιχα, βάσει των τιμών που έχουν υπολογιστεί από τους Πίνακες 7 και 6.



Σχήμα 13: Πολικό διάγραμμα κατανομής σχετικών συχνοτήτων διεύθυνσης



Σχήμα 14: Πολικό διάγραμμα της μέσης τιμής της έντασης του ανέμου ανά διεύθυνση

3.3 Μέση τιμή της έντασης του ανέμου (βαθμωτό μέγεθος)

Η μέση τιμή της έντασης του ανέμου ($\bar{u}$), αν αυτή θεωρηθεί βαθμωτό μέγεθος, μπορεί να υπολογιστεί είτε από τη σχέση:

$$\bar{u} = \frac{1}{N} \sum_i u_i$$

$\bar{u} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i$ όπου N το πλήθος των μετρούμενων u_i τιμών, είτε από τη σχέση:

$$\bar{u} = \frac{1}{N} \sum_i f_i u_i$$

$\bar{u} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_i u_i$ αν τα δεδομένα u_i έχουν ομαδοποιηθεί βάσει των απόλυτων συχνοτήτων (f_i) εμφάνισης τους στο δείγμα.

Η τυπική απόκλιση (standard deviation) υπολογίζει την διασπορά των δεδομένων πλήθους N γύρω από την τιμή του αριθμητικού μέσου. Είναι προφανές ότι όσο μεγαλώνει η διασπορά των τιμών γύρω από την μέση τιμή, τόσο ελαττώνεται η σημασία της μέσης τιμής. Υπολογίζεται από την σχέση:

$$s = \left\{ \sum_i (u_i - \bar{u})^2 / N - 1 \right\}^{0.5}$$

Όπου $u_i - \bar{u}$ οι αποκλίσεις από την μέση τιμή της ταχύτητας.

Η διακύμανση ή δειγματική διασπορά (variance) ενός δείγματος ορίζεται ως το τετράγωνο της τυπικής απόκλισης (s^2).

Στην περίπτωση που τα δεδομένα έχουν ομαδοποιηθεί σε τάξεις διαστημάτων η τυπική απόκλιση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$s = \left\{ \left[\sum_i f_i u_i^2 - \left(\sum_i (f_i u_i)^2 / N \right) \right] / N - 1 \right\}^{0.5}$$

3.4 Επικρατούσα διεύθυνση ανέμου

Επικρατούσα είναι η διεύθυνση που εμφανίζει μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης μέσα στο δείγμα.

Σε ομαδοποιημένες παρατηρήσεις υπολογίζεται βάσει της σχέσης:

$$M_o = \chi(\lambda) + \frac{[f(\max) - f(\max-1)] * (E.T.\Delta.)}{\{[f(\max) - f(\max-1)] + [f(\max) - f(\max+1)]\}}$$

Όπου E.T.Δ. ορίζεται το εύρος της τάξεως διαστήματος και $\chi(\lambda)$ είναι η κατώτερη τιμή της τάξεως της μέγιστης συχνότητας. Οι συχνότητες μία τάξη πριν, στην τάξη της μέγιστης συχνότητας, και μία τάξη μετά την τάξη της μέγιστης συχνότητας καλούνται $f(\max-1)$, $f(\max)$ και $f(\max+1)$.

Στο παράδειγμα του Πίνακα 7, η επικρατούσα διεύθυνση είναι 67.5 deg (ENE) με σχετική συχνότητα εμφάνισης 13.87%.