



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ

**ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΚΥΠΕΛΛΟΦΟΡΩΝ ΑΝΕΜΟΜΕΤΡΩΝ ΚΑΙ
LiDAR ΣΕ ΣΥΝΘΕΤΗ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ ΙΩΑΝΝΗ

Επιβλέπων : Αρθούρος Ζερβός
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2013

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κ. Αρθούρο Ζερβό, υπεύθυνο καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας για την ανάθεση αυτής και τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους κ. Γιώργο Κάραλη και κ. Αντώνη Σαλιάγκα για την πολύτιμη καθοδήγηση, τη βοήθειά και τη συνεργασία σε όλα τα στάδια εκπόνησης της εργασίας.

Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω την εταιρεία Εναλλακτική Ενεργειακή (2ΕΝ) και ειδικά τον κ. Γιάννη Πανουργιά και την Βασιλική Τσαπρούνη τόσο για την συνεργασία και τη βοήθεια που μου προσέφεραν όσο και για την παροχή του πακέτου των μετρήσεων.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την αγάπη, τη στήριξη, την καθοδήγηση, τη συμπαράσταση και την υπομονή καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου στο ΕΜΠ.

Ιωάννης Βασιλείου

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Αθήνα, Ιούλιος 2013

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια η Αιολική Ενέργεια κυριαρχεί στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η ανάπτυξη που έχει συντελεστεί είναι γεγονός το οποίο συνεπάγεται την ανάγκη για αύξηση της απόδοσης των ανεμογεννητριών. Απαιτείται συνεχής βελτιστοποίηση όλων των παραμέτρων π.χ. στη σχεδίαση των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας, στη σωστή επιλογή του τύπου ανεμογεννήτριας για μια δεδομένη περιοχή ή ο προσδιορισμός του βέλτιστου ύψους τοποθέτησης του δρομέα.

Η ενασχόληση με τους παραπάνω παράγοντες προαπαιτεί την καλή γνώση των χαρακτηριστικών του αιολικού δυναμικού στην περιοχή ενός μελλοντικού αιολικού πάρκου, καθώς επίσης και τα λοιπά χαρακτηριστικά της ατμόσφαιρας που επικρατούν. Αυτό επιτυγχάνεται με την διεξαγωγή μετρήσεων στην περιοχή αυτή, οι οποίες μπορούν να πραγματοποιηθούν με διάφορους τρόπους.

Η μέθοδος που έχει επικρατήσει είναι η τοποθέτηση ειδικών μετρητικών οργάνων (ανεμόμετρα, ανεμοδείκτες, θερμόμετρα, βαρόμετρα) πάνω σε έναν μετεωρολογικό ιστό.

Την τελευταία δεκαετία όμως, με την βοήθεια προηγμένης τεχνολογίας, αρχίζουν να εφαρμόζονται νέες μέθοδοι μετρήσεων. Η πιο γνωστή είναι αυτή που γίνεται με τη χρήση της τεχνολογίας LiDAR (Light Detection And Ranging)

Σκοπός της εν λόγω διπλωματικής εργασίας είναι η σύγκριση ανεμολογικών μετρήσεων μεταξύ ενός μετεωρολογικού ιστού και ενός μηχανήματος LiDAR. Η σύγκριση αυτή στηρίζεται σε ένα αρχικό πλήθος μετρήσεων των δύο συστημάτων που πάρθηκαν ταυτόχρονα και εν συνεχεία, εφαρμόζοντας κριτήρια καταλήγουμε σε συμπεράσματα.

Λέξεις κλειδιά : LiDAR, Ανεμόμετρο, Ανεμοδείκτης, Μετρήσεις Ανέμου, Σύγκριση μετρήσεων, Σύνθετη Τοπογραφία

ABSTRACT

In recent years wind energy dominates the field of renewable energy. This growth implies the need to increase wind turbines' efficiency. It is required optimization of all the parameters e.g. the design of the wind turbine blades, the correct choice of turbine type for a given site or finding rotor's best mounting height.

Dealing with these factors requires good knowledge of the characteristics of wind potential in a future wind farm, as well as other characteristics of the atmosphere. This can be achieved by conducting measurements campaigns in this site which can be performed in various methods.

The most prevailing, reliable and accurate method is the installation of special measuring instruments (anemometers, wind vanes, thermometers, barometers) on a meteorological mast.

However, in the last decade, having taken advantage of advanced technology, new methods of measurement have been applied. The most common is the measurement made using LiDAR technology (Light Detection and Ranging).

The purpose of this thesis is to compare wind measurements between a meteorological mast and a LiDAR machine. The comparison was made first in the original set of measurements of the two systems, and thereafter, using filters and criteria, we presented some conclusions.

Keywords: LiDAR, Anemometer, Wind Vane, Wind Measurement,
Compare measurements, Complex Terrain

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
ABSTRACT	6
1 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΑΝΕΜΟΥ	11
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ	11
1.2 ΤΟ ΑΝΕΜΟΜΕΤΡΟ ΩΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΟ ΟΡΓΑΝΟ	14
1.3 Ο ΑΝΕΜΟΔΕΙΚΤΗΣ ΩΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΟ ΟΡΓΑΝΟ.....	19
1.4 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ LiDAR (Light Detection And Ranging)	21
2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ	23
2.1 ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΙ ΙΣΤΟΙ.....	23
2.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ LiDAR.....	29
2.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΙΣΤΩΝ – LiDAR.....	33
3 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΠΟΥ ΑΠΑΙΤΕΙΤΑΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	35
3.1 ΚΑΤΑΝΟΜΗ WEIBULL.....	35
3.2 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΠΡΟΦΙΛ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΜΕ ΤΟ ΥΨΟΣ	38
3.3 Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΣΤΟ ΠΡΟΦΙΛ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ	39
4 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	48
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	48
4.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΥ ΙΣΤΟΥ.....	48
4.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ LiDAR	49
4.4 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	53
4.4.1 ΑΡΧΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	55
4.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	61
4.5.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΡΧΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	61
4.5.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗ ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΤΗΣ ΔΙΕΥΡΙΝΣΗΣ ΤΟΥ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ.....	64
4.5.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗ ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ	67
4.5.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΕΥΡΟΣ ΤΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ.....	70
4.5.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗ ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΚΑΤΑΓΡΑΦΩΝ ANA RECORD	73
4.5.6 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΚΥΡΙΑ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	85
4.6 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΣΕ ΥΨΟΣ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΟ ΜΙΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ	88
4.6.1. ΣΤΗΝ ΚΥΡΙΑ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ	88

4.6.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΕΥΡΟΣ ΤΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΚΑΙ ΤΗ ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ	90
5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	92
6 ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....	95
7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	96

1 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΑΝΕΜΟΥ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ

Η Αιολική Ενέργεια είναι μια από τις παλαιότερες φυσικές πηγές ενέργειας, η οποία αξιοποιήθηκε σε μηχανική μορφή και έπαιξε σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη της ανθρωπότητας.

Οι άνεμοι αποτελούν κίνηση αέριας μάζας στην ατμόσφαιρα, που προκαλείται κυρίως από την ηλιακή ακτινοβολία. Ειδικότερα, είναι αποτέλεσμα θερμοκρασιακών διαφορών, οι οποίες δημιουργούνται είτε λόγω του γεωγραφικού πλάτους είτε λόγω της διαφορετικής θερμοκρασίας της επιφάνειας της γης. Επιπροσθέτως, έχει μεγάλο συντελεστή εκμεταλλευσιμότητας.

Ο αέρας, κατά συνέπεια και η Αιολική Ενέργεια, ανέκαθεν έλκυαν το ενδιαφέρον και την προσοχή του ανθρώπου. Η εκμετάλλευσή της χάνεται στο βάθος των αιώνων, όταν το πρώτο μεταφορικό μέσο χωρίς μυϊκή δύναμη ήταν τα ιστιοφόρα.

Για εκατοντάδες χρόνια η κίνηση των πλοίων στηριζόταν στη δύναμη του ανέμου. Το επόμενο στάδιο εκμετάλλευσης ήταν οι ανεμόμυλοι. Οι αγρότες χρησιμοποιούν ανεμόμυλους για να αλέθουν το σιτάρι και για να αποστραγγίζουν ή να αρδεύουν τις καλλιέργειές τους. Με την ανάπτυξη νέων πηγών ενέργειας πέφτουν σε αχρησία, αλλά λόγω της ενεργειακής κρίσης, οι μηχανικοί χρησιμοποιώντας νέες τεχνολογίες και υλικά, αξιοποιούν και πάλι την ενέργεια των ανέμων, με νέα είδη ανεμόμυλων.

Σήμερα η Αιολική Ενέργεια αποτελεί μια από τις κυριότερες πηγές παραγωγής ενέργειας στην Ευρώπη και το κλειδί για την επίτευξη των ενεργειακών της στόχων της μέχρι το έτος 2020.

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται κατά κύριο λόγο μέσω των αιολικών πάρκων. *Αιολικό πάρκο ονομάζεται η πολλαπλή εγκατάσταση ανεμογεννητριών σε μια περιοχή για την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας.*

Για την αξιολόγηση του αιολικού δυναμικού μιας τοποθεσίας απαιτούνται μετρήσεις για την ταχύτητα και τη διεύθυνση του ανέμου, καθώς επίσης και της βαρομετρικής πίεσης και της θερμοκρασίας.

Αυτό συμβαίνει γιατί η παραγόμενη ισχύς (**P**) από την ανεμογεννήτρια είναι ανάλογη της πυκνότητας του ανέμου, του τετραγώνου της ακτίνας των πτερυγίων της γεννήτριας και του κύβου της ταχύτητας του ανέμου. [1]

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

όπου: C_p ο συντελεστής ισχύος
 ρ η πυκνότητα του αέρα
 A η διατομή
 V η στιγμιαία ταχύτητα του αέρα

Γενικά, οι μετεωρολογικές μετρήσεις, συμπεριλαμβανομένης και της μέτρησης του ανέμου, είναι απαραίτητες για πολλές διαφορετικές εφαρμογές όπως: στην πρόβλεψη του καιρού, στη γεωργία, στη βιομηχανία καθώς και σε άλλους τομείς της έρευνας. Όλοι αυτοί οι τομείς έχουν διαφορετικές απαιτήσεις, γι' αυτό και χρειάζονται τεχνολογία προσαρμοσμένη σε καθένα από αυτούς. Σχεδόν καμία όμως από αυτές τις χρήσεις δεν απαιτεί τόσο υψηλή ακρίβεια και αξιοπιστία των μετρήσεων, όπως απαιτείται στον τομέα της αιολικής ενέργειας.

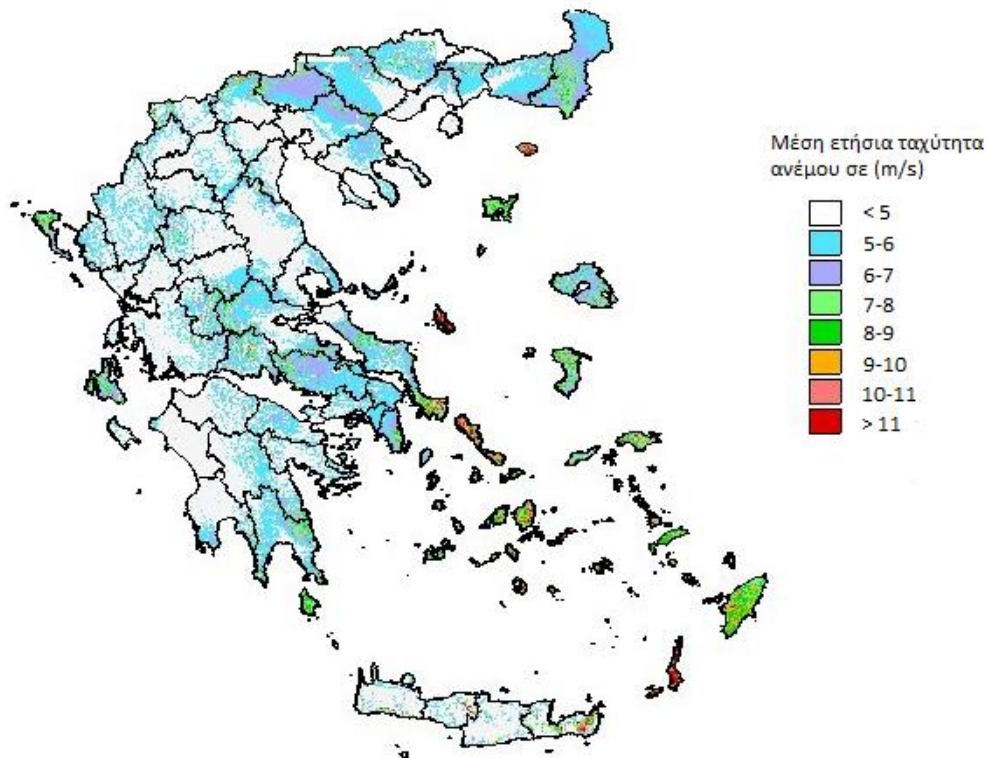
Η επιλογή του κατάλληλου εξοπλισμού μέτρησης και η σωστή εγκατάστασή του είναι ζωτικής σημασίας. Σε κάθε μέτρηση, είναι αναγκαίο το υψηλότερο δυνατό επίπεδο της μέτρησης του ανέμου καθώς και η τεχνολογία με τη μεγαλύτερη ακρίβεια, τόσο για την εκτίμηση πιθανών θέσεων αιολικού πάρκου όσο και για την παρακολούθηση και τη διατήρηση των ήδη εγκατεστημένων ανεμογεννητριών.

Μια μικρή απόκλιση μόλις 3% στην αξιολόγηση των δεδομένων της ταχύτητας, μπορεί να προκαλέσει τεράστιες οικονομικές απώλειες. Έτσι, η ανάγκη για ακριβείς μετρήσεις γίνεται μεγαλύτερη σε χώρες όπως η Ελλάδα, όπου επικρατεί έντονο ανάγλυφο. [2]

Πριν από τη εγκατάσταση ενός αιολικού πάρκου, ειδικοί σύμβουλοι μελετούν και εκτιμούν την αιολική ενέργεια της τοποθεσίας. Οι μελέτες αυτές διαρκούν τουλάχιστον δώδεκα μήνες, ενώ οι μετρήσεις περισσότερων ετών μας βοηθούν να προσεγγίσουμε με μεγαλύτερη ακρίβεια την ενεργειακή συμπεριφορά των μηχανών. Τα δεδομένα των μετρήσεων του ανέμου συλλέγονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Έπειτα, τα δεδομένα επεξεργάζονται και αξιολογούνται για το εάν η τοποθεσία είναι κατάλληλη για την εγκατάσταση αιολικού πάρκου και την εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού.

Σ' ένα αιολικό πάρκο, ακόμη και όταν αυτό τεθεί σε λειτουργία, οι μετρήσεις του ανέμου συνεχίζουν να είναι απαραίτητες για την παρακολούθηση του (π.χ. η συλλογή δεδομένων για την αξιολόγηση της απόδοσής του).[2]

Ωθηση στην ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας (και κατά συνέπεια των αιολικών μετρήσεων) στην Ελλάδα έδωσε η δημιουργία του Αιολικού Χάρτη της Ελλάδος (**εικόνα 1.1**) από το Κ.Α.Π.Ε. (Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας) το 2001. Με αυτό τον χάρτη έγιναν γνωστές οι τοποθεσίες όπου το αιολικό δυναμικό ήταν αρκετά υψηλό με αποτέλεσμα το ενδιαφέρον των επενδυτών να μεγαλώσει καθώς το ρίσκο μιας επένδυσης μπορούσε να μειωθεί.



Εικόνα 1.1: Αιολικός Χάρτης Ελλάδας

Για την εκτίμηση του αιολικού δυναμικού υπάρχουν 2 βασικές μέθοδοι:

1. Η χρήση ενός **ανεμόμετρου** και ενός ανεμοδείκτη ανά ύψος μέτρησης τοποθετημένα πάνω σε ιστούς. (Μετεωρολογικοί Ιστοί)
2. Η χρήση **LiDAR** και **SODAR**.

1.2 ΤΟ ΑΝΕΜΟΜΕΤΡΟ ΩΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΟ ΟΡΓΑΝΟ

Είναι το μετεωρολογικό όργανο που καταγράφει την ταχύτητα του ανέμου. Αντιλαμβάνεται τις μεταβολές στη φυσική ποσότητα και παράγει αντίστοιχο ηλεκτρικό σήμα. Η επεξεργασία του σήματος προϋποθέτει την ενίσχυση και την αποβολή του “θορύβου”, τη γραμμικοποίηση και ενδεχομένως τη μετατροπή του από τάση σε ρεύμα ή από τάση σε συχνότητα. Το σήμα μετατρέπεται σε ψηφιακό και καταγράφεται σε υπολογιστή ή καταγραφικό όργανο (data logger). [3]

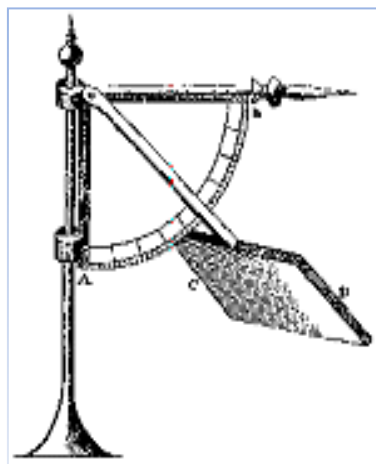
Υπάρχουν δύο κατηγορίες ανεμομέτρων:

1. αυτά που μετρούν την **ταχύτητα του ανέμου**
2. αυτά που μετρούν την **πίεση**

Ταχύτητα και πίεση όμως συνδέονται, οπότε με τη μέτρηση του ενός, διαθέτει κανείς πληροφορίες και για τα δυο. Σήμερα, στην αγορά έχουν επικρατήσει αυτά που μετρούν την ταχύτητα. [4]

Κατά το πέρασμα των αιώνων έγιναν πολλές προσπάθειες κατασκευής και εξέλιξης του ανεμόμετρου με τη σημερινή του μορφή να διαφέρει αρκετά από την αρχική, η εμφάνιση της οποίας τοποθετείται στα μέσα του 15^{ου} αιώνα. Ο Ιταλός αρχιτέκτονας **Leon Batista Alberti** ήταν ο εφευρέτης του πρώτου ανεμόμετρου το 1450, το οποίο αποτελείτο από ένα δισκίο κάθετο στη φορά του ανέμου. [4]

Λίγα χρόνια αργότερα ο Άγγλος **Robert Hooke**, ο οποίος λανθασμένα θεωρήθηκε ο εφευρέτης του ανεμόμετρου, εφηύρε ένα πανομοιότυπο ανεμόμετρο το οποίο απεικονίζεται στην **εικόνα 1.2**. [4]



Εικόνα 1.2: *Hooke's anemometer*

Ακολουθώντας τα βήματα του πρώτου ανεμόμετρου υπήρξαν πολλοί ακόμη που προσπάθησαν να το εξελίσουν, με πιο γνωστές τις προσπάθειες των **Μάγια** και του **Wolfius** το 1709. [4]

Το 1846 ο ιρλανδός φυσικός – αστρονόμος **Dr. John Thomas Romney Robinson**, εφηύρε ένα νέο τύπο ανεμόμετρου, το κυπελλοφόρο (εικόνα 1.3).

Αυτό αποτελείται από 4 ημισφαιρικά κύπελλα τοποθετημένα σε οριζόντιους βραχίονες ανά 90° πάνω σε κατακόρυφο άξονα. Καθώς τα κύπελλα στρέφονται οριζοντίως, ένας συνδυασμός των τροχών κατέγραφε τον αριθμό των περιστροφών σε μια δεδομένη χρονική στιγμή. [4]



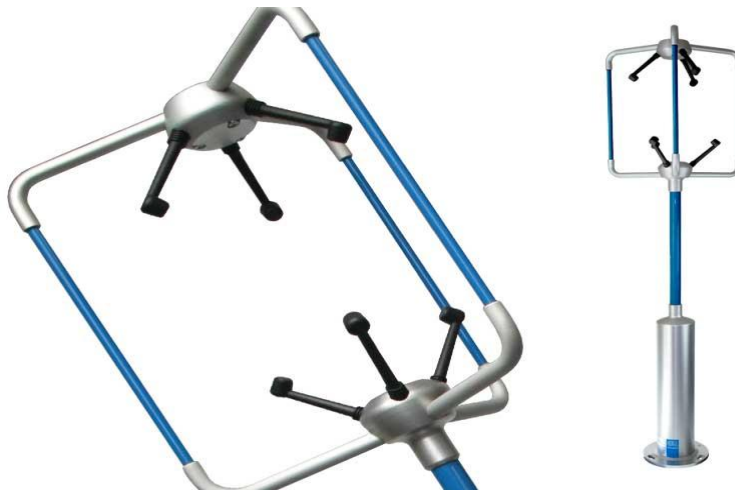
Εικόνα 1.3: 4 cup anemometer

Ακολουθως, το 1926, ο καναδός **John Patterson** εφηύρε το ανεμόμετρο με 3 κύπελλα. Ο συγκεκριμένος τύπος ανεμομέτρου δέχτηκε περαιτέρω βελτιώσεις από τους αμερικανούς **Brevort** και **Joiner** το 1935. Το μοντέλο αυτό, σε ταχύτητες έως 97 km/h, παρουσίαζε σφάλμα λιγότερο από 3%.

Το 3 cup – anemometer είχε επίσης μια πιο σταθερή ροπή και γρήγορη ανταπόκριση στις ριπές του αέρα από το 4 cup – anemometer και τροποποιήθηκε περαιτέρω από τον αυστραλό **Derek Weston** το 1991. [4]

Άλλη διαδεδομένη σύγχρονη εξέλιξη στην τεχνολογία του ανεμόμετρου είναι το ηχητικό ανεμόμετρο (sonic anemometer) (εικόνα 1.4).

Κατασκευάστηκε από τον **Dr. Andrews Pflitsch** το 1994 και λειτουργεί με τη μέτρηση των ηχητικών κυμάτων που ταξιδεύουν μεταξύ του ζεύγους των μετατροπέων. Η επιτάχυνση ή η επιβράδυνση των ηχητικών κυμάτων είναι μια ένδειξη της ταχύτητας του ανέμου και υπολογίζονται σχεδόν αμέσως. [5]



Εικόνα 1.4: *Sonic Anemometer*

Σήμερα, τα ανεμόμετρα κατηγοριοποιούνται [2] ανάλογα με τον τρόπο καταγραφής του ανέμου σε :

- Περιστροφικά ανεμόμετρα (Cup Anemometers)
- Ανεμόμετρα υπερήχων (Ultrasonic Anemometers)
- Ανεμόμετρα θερμού νήματος (Hot Wire Anemometer)
- Ανεμόμετρα Laser – Doppler
- Ανεμόμετρα θερμικού πεδίου (Thermal Field Variation)
- Ανεμόμετρα σωλήνα πίεσης (Pressure Tube Anemometers)

Τα πλέον διαδομένα ανεμόμετρα για καταγραφή του αιολικού δυναμικού παγκοσμίως είναι τα κυπελλοφόρα, λόγω του μικρού τους μεγέθους, της χαμηλής τιμής, της αξιοπιστίας, της ευκολίας τοποθέτησης και της διασύνδεσης τους σε μετρητικό σύστημα. [2]

Συνήθως, έχουν τρία (και πολύ σπάνια τέσσερα) ημισφαιρικά ή κωνοειδή κύπελλα που προσαρμόζονται κάθετα σε κατακόρυφο βραχίονα και βρίσκονται σε ίση απόσταση μεταξύ τους (**εικόνα 1.5**).



Εικόνα 1.5: 3 cup Anemometers (1.Vector 2.Thies 3.NRG)

Η περιστρεφόμενη άτρακτος είναι συνδεδεμένη με μικρή γεννήτρια που παράγει, είτε τάση AC, είτε μια σειρά παλμών των οποίων η συχνότητα είναι ανάλογη της ταχύτητας του ανεμόμετρου. Το αναλογικό σήμα εισέρχεται στο καταγραφικό μηχάνημα και μετατρέπεται σε ψηφιακό ώστε να αποθηκευτεί στην κάρτα μνήμης.[17]

Τα ανεμόμετρα κατατάσσονται σε κλάσεις σύμφωνα με το πρότυπο **IEC 61400-12-1¹** πάνω σε δύο παραμέτρους:

1. Την ακρίβεια της μέτρησης
2. Το έδαφος της μέτρησης.

Η ακρίβεια του ανεμομέτρου χαρακτηρίζεται από τον δείκτη **k**, η τιμή του οποίου κυμαίνεται από 0 έως 3. Αντίστοιχα, το έδαφος της μέτρησης χαρακτηρίζεται με τα γράμματα A,B και S. Έτσι, ένα ανεμόμετρο μπορεί να είναι κλάσης 0.5B, κλάσης 1A κλάσης 2B κλπ. [17]

Η κλάση **k** για ένα ανεμόμετρο προκύπτει μέσα από δοκιμές που πραγματοποιούνται σε αεροσύραγγες. Για **k = 0** (ακατόρθωτο) έχουμε την μέγιστη ακρίβεια οργάνου ενώ για **k = 3** η ακρίβεια είναι πολύ χαμηλή. Αντίστοιχα οι δείκτες A,B χαρακτηρίζουν τη μορφολογία εδάφους με τυπικά χαρακτηριστικά ενώ ο δείκτης S (special) χαρακτηρίζει τη μορφολογία του εδάφους με χαρακτηριστικά που δεν περιλαμβάνονται στις κλάσεις A,B (**πίνακας 1.1**).

	Class A	Class B
Μέση γωνία κλίσης της ροής (°)	-3 to 3	-15 to +15
Εύρος ταχύτητας (m/s)	4 to 16	4 to 16
Ένταση της τύρβης	0.03 to 0.12+0.48/V	0.03 to 0.12+0.96/V
Πυκνότητα αέρα (kg/m ³)	0.9 to 1.35	0.9 to 1.35
Θερμοκρασία αέρα (°C)	0 to 40	-10 to 40

Πίνακας 1.1: Περιγραφή των κλάσεων A και B.[17]

Η ακρίβεια ενός ανεμομέτρου εξαρτάται από το βάρος, τις διαστάσεις και τις εσωτερικές τριβές του και συνήθως είναι ίση με 2 %. Επίσης, η αξιοπιστία του οργάνου μπορεί να επηρεαστεί και από περιβαλλοντικούς παράγοντες. Η σκόνη της ατμόσφαιρας μπορεί να παγιδευτεί στο εσωτερικό του οργάνου με αποτέλεσμα την αύξηση της τριβής και κατά συνέπεια την μείωση της ακρίβειας. [17]

Ακόμη, οι χαμηλές θερμοκρασίες μπορούν να προκαλέσουν την ακινησία του οργάνου λόγω του πάγου που θα αναπτυχθεί στην εξωτερική του επιφάνεια. Λόγω αυτών των προβλημάτων, πραγματοποιούνται βαθμονομήσεις και συντηρήσεις του οργάνου η συχνότητα των οποίων εξαρτάται από την περιοχή εγκατάστασης.

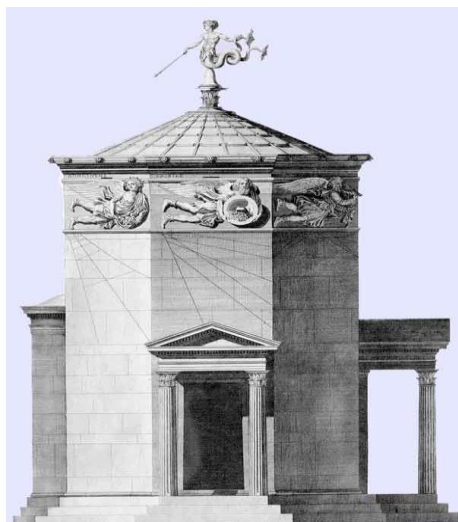
1.3 Ο ΑΝΕΜΟΔΕΙΚΤΗΣ ΩΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΟ ΟΡΓΑΝΟ

Ο ανεμοδείκτης, όπως άλλωστε υποδηλώνει και το όνομά του, καταγράφει την κατεύθυνση του ανέμου και είναι ένα από τα παλαιότερα μετεωρολογικά όργανα. [4]

Σε αντίθεση με το ανεμόμετρο, η λειτουργία και η κατασκευή του είναι πολύ πιο απλή. *Πρόκειται για ένα σώμα τοποθετημένο ασύμμετρα γύρω από ένα κατακόρυφο άξονα, στον οποίο περιστρέφεται ελεύθερα, προσανατολίζεται παράλληλα προς τη διεύθυνση του ανέμου και στέλνει στο καταγραφικό (μέσω ποτενσιόμετρου) είτε μία συνεχή τάση ανάλογη της διεύθυνσης, είτε ένα διακριτό σήμα που αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο σημείο του ορίζοντα. Στη συνέχεια το αναλογικό σήμα μετατρέπεται σε ψηφιακό και αποθηκεύεται στην κάρτα μνήμης του καταγραφικού..*

Ο ανεμοδείκτης για να κινηθεί, συνήθως απαιτεί μια ελάχιστη ταχύτητα που κυμαίνεται μεταξύ 0,5 – 1 m/s και η τοποθέτηση του πρέπει να γίνεται σε απόσταση τουλάχιστον 1,5 m από το έδαφος. [2] Όπως και στο ανεμόμετρο έτσι και στον ανεμοδείκτη, η αξιοπιστία του οργάνου επηρεάζεται από τους ίδιους περιβαλλοντικούς παράγοντες.

Η πρώτη ιστορικά καταγεγραμμένη εμφάνιση του ανεμοδείκτη τοποθετείται χρονικά στην αρχαία Ελλάδα και πρόκειται για το μεγάλο χάλκινο άγαλμα του θεού Τρίτωνα (εικόνα 1.6), το οποίο βρισκόταν στην κορυφή του πύργου των ανέμων στη ρωμαϊκή αγορά των Αθηνών, το οποίο κατασκευάστηκε από τον αστρονόμο Ανδρόνικο. [4]



Εικόνα 1.6: Το μεγάλο χάλκινο άγαλμα του θεού Τρίτωνα



Εικόνα 1.7: Ανεμοδείκτης με τη μορφή κόκορα σε καμπαναριό καθολικής εκκλησίας

Κατά το πέρασμα των αιώνων, ο ανεμοδείκτης χρησιμοποιήθηκε σε ποικίλους χώρους, όπως στο καμπαναριό καθολικών εκκλησιών με τη μορφή κόκορα τον 9^ο αιώνα, ύστερα από διαταγή του πάπα Γρηγόριου, ο οποίος το θεωρούσε ως το καταλληλότερο έμβλημα του χριστιανισμού (**εικόνα 1.7**). Στη Βρετανία, τη Νορμανδία και τη Γερμανία το χρησιμοποιούσαν οι τοξότες για να αντιλαμβάνονται την κατεύθυνση του ανέμου. [4]

Ακόμη τον 18^ο και 19^ο αιώνα, αρκετά διαδεδομένη ήταν η τοποθέτησή του σε σκεπές των σπιτιών, με διάφορα περίτεχνα σχέδια, είτε ως διακοσμητικό είτε για εμπειρική πρόβλεψη των αλλαγών των καιρικών συνθηκών. [6]

Αξίζει να σημειωθεί ότι πολλοί ανεμοδείκτες εκείνης της εποχής έχουν συνδεθεί με μεγάλες προσωπικότητες που έζησαν τότε και σήμερα έχουν συλλεκτική αξία. [6] Αργότερα, χρησιμοποιήθηκε σε αεροδρόμια για τη διευκόλυνση των πιλότων.

Σήμερα, με τη βοήθεια της τεχνολογίας, είναι ένα μετεωρολογικό όργανο με μεγάλη ακρίβεια και χρησιμοποιείται κυρίως για την πρόβλεψη των καιρικών φαινομένων, όπως επίσης και για μετρήσεις αιολικού δυναμικού.

Ο ακριβής υπολογισμός της μέσης ετήσιας κατεύθυνσης του ανέμου μιας περιοχής είναι εξαιρετικά σημαντικός καθώς γνωρίζοντας το ρόδο ανέμου μας βοηθάει στη σωστή χωροθέτηση των ανεμογεννητριών μέσα στο αιολικό πάρκο.



Εικόνα 1.8: Ανεμοδείκτες (1.Vector 2.Thies 3.NRG).

1.4 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ LiDAR (Light Detection And Ranging)

Η γνώση του προφίλ της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου καθ' ύψος αλλά και σε σημαντικά μεγαλύτερο ύψος σε σχέση με παλαιότερα, γίνεται ολοένα και πιο αναγκαία, καθώς κάτω από την ανάγκη για μείωση του κόστους της παραγόμενης ενέργειας το μέγεθος των ανεμογεννητριών αυξάνεται συνεχώς. Για το λόγο αυτό, απαιτείται η χρήση μηχανημάτων **με τεχνολογία LiDAR**.

Ο βασικός λόγος για τον οποίο οι συσκευές αυτές έχουν αρχίσει να καθιερώνονται στον τομέα της αιολικής ενέργειας τα τελευταία 10 χρόνια (και όχι νωρίτερα) είναι επειδή η αξιοποίηση τους έως τότε δεν ήταν οικονομικά συμφέρουσα, εξαιτίας του υψηλού κόστους επένδυσης αλλά και της αδυναμίας της τότε τεχνολογίας να μετρήσει ταχύτητες σε μεγάλα ύψη.

Η τεχνολογία LiDAR βασίζεται στην εκπομπή παλμικής ακτινοβολίας λέιζερ στην ατμόσφαιρα και ακολούθως στην καταγραφή της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας.[4] Αναλυτικότερη περιγραφή της λειτουργίας του παρατίθεται στα κεφάλαια 2.2 και 4.3.

Η εμφάνιση της τεχνολογίας **LiDAR** ανάγεται στις προ λέιζερ εποχές. Στη δεκαετία του 1930 έγιναν οι πρώτες προσπάθειες για τον υπολογισμό του προφίλ της πυκνότητας της ατμόσφαιρας με προσδιορισμό της σκεδαζόμενης έντασης των δεσμίδων φωτός. Ο πρώτος που το επιχείρησε ήταν ο E.H.Synge. [7]

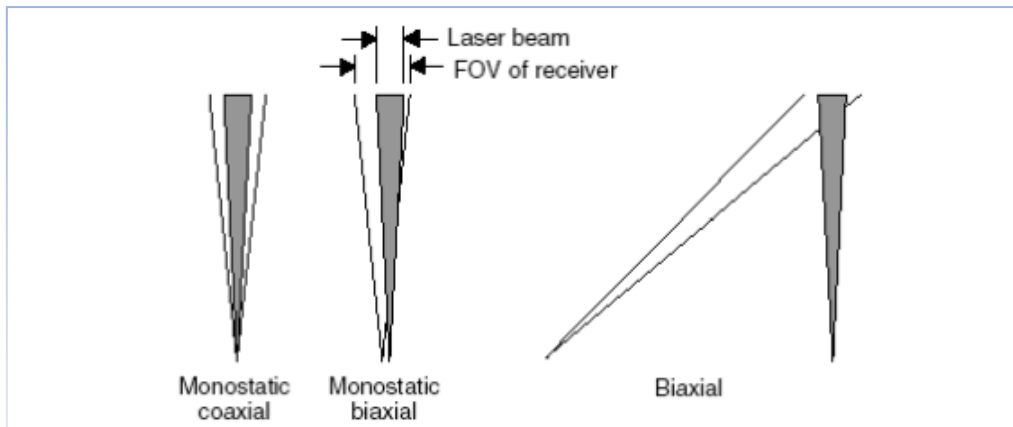
Τα πρώτα συστήματα **LiDAR**, όπως ο τύπος που πρότεινε ο Synge, λειτουργούσαν σε διαξονική λειτουργία.

Σε μία διαξονική εγκατάσταση, ο ανιχνευτής του **LiDAR** βρίσκεται σε κάποια απόσταση (έως αρκετά χιλιόμετρα μακριά) από το σημείο όπου το φως εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα. [8]

Το 1936, ο Duclaux μπορούσε να έχει μετρήσει την πυκνότητα της ατμόσφαιρας σε υψόμετρο 3.4 km εφαρμόζοντας την μέθοδο του Synge. Αργότερα, ο Hulbert αύξησε το υψόμετρο δυνατότητας των μετρήσεων στα 28 km. [8]

Στα χρόνια που ακολούθησαν στην τεχνολογία **LiDAR** εφαρμόστηκε η μονοστατική διάταξη όπου ο πομπός και ο δέκτης έχουν τοποθετηθεί σε ομοαξονική ή διαξονική διεύθυνση. Αυτή η βελτίωση του σχεδιασμού επέτρεψε στα συστήματα LiDAR να ενσωματώσουν πομπούς με παλμούς φωτός, κάνοντας έτσι δυνατή τη μέτρηση του χρόνου που χρειάζονται για να επιστρέψουν οι διάσπαρτοι παλμοί φωτός. [8]

Στην **εικόνα 1.10** βλέπουμε ότι η ακτίνα laser στην ομοαξονική διεύθυνση επιστρέφει στο σημείο εκκίνησής της, ενώ στην διαξονική σχηματίζεται κάποια γωνία μεταξύ της ακτίνας που εκπέμπεται και αυτής που επιστρέφει. [8]



Εικόνα 1.10: Σχηματική αναπαράσταση μονοστατικής ομοαξονικής και διαξονικής διεύθυνσης

Το 1938, ο **Bureau** ήταν ο πρώτος που χρησιμοποίησε παλμικό μονοστατικό σύστημα για τον προσδιορισμό του ύψους των νεφών, σηματοδοτώντας την αρχή της τεχνικής των μετρήσεων, όπως τις γνωρίζουμε σήμερα. [8]

Με την ευελιξία που έδινε η μονοστατική διαμόρφωση στον υπολογισμό κατακόρυφων προφίλ μετρήσεων, η επόμενη σημαντική εξέλιξη ήρθε από την έλευση του σύγχρονου laser το 1960 από τον **Theodore H. Maiman**. [8]

Ένα ακόμα άλμα για την τεχνολογία **LiDAR** ήταν η εμφάνιση γιγαντιαίων παλμικών λέιζερ από τους FJ McClung και RW Hellworth το 1962. Το 1963 Οι Smullins και Fiocco ήταν οι πρώτοι που ενσωμάτωσαν σύγχρονη τεχνολογία λέιζερ σε ένα σύστημα LiDAR, όταν χρησιμοποίησαν ένα παλμικό λέιζερ ρουμπινιού για να ανιχνεύει το φως που διαχέεται αρχικά από την επιφάνεια του φεγγαριού και αργότερα από την κατώτερη ατμόσφαιρα. [8]

Μια δεκαετία αργότερα όλες οι βασικές τεχνικές **LiDAR** είχαν προταθεί και αποδειχθεί. [7] Έτσι το 1976 δημοσιεύτηκε το πρώτο βιβλίο για τεχνολογία LiDAR από τον E.D. Hinkley. Από τότε η ανάπτυξη του LiDAR ήταν συνδεδεμένη με την πρόοδο στην οπτική και ηλεκτρονική τεχνολογία και ειδικότερα στην τεχνολογία λέιζερ. Η τεχνολογία LiDAR στον τομέα των μετρήσεων αιολικού δυναμικού, έγινε ευρέως γνωστή όταν το 2005 η αγγλική εταιρία κατασκευής αμυντικών συστημάτων Qinetiq εισήγαγε το μοντέλο ZephIR LiDAR. Έπειτα, το 2006, η γαλλική εταιρεία Leosphere εισήγαγε ένα δεύτερο μοντέλο, το Windcube, το οποίο γνώρισε εμπορική επιτυχία ενώ διαφέρει σε αρκετά σημεία από το βρετανικό. [7]



Εικόνα 1.11: Leosphere Windcube LiDAR



Εικόνα 1.12: Qinetiq ZephIR LiDAR

2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ

2.1 ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΙ ΙΣΤΟΙ

Μετεωρολογικός ιστός είναι η μεταλλική μηχανολογική εγκατάσταση πάνω στην οποία τοποθετούνται τα μετεωρολογικά όργανα και τα συνοδευτικά εξαρτήματα ώστε να πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις για την εκτίμηση του αιολικού δυναμικού σε μία περιοχή. Το ύψος τους σήμερα κυμαίνεται από 10 m έως 140 m., ενώ, όπως προείπαμε, συνεχώς υπάρχει η ανάγκη για όλο και υψηλότερους ιστούς, προκειμένου να τοποθετήσουμε όργανα σε διαφορετικά ύψη, έτσι ώστε να καταγράψουμε το προφίλ του ανέμου και να υπολογίσουμε με ακρίβεια την ενεργειακή απόδοση της ανεμογεννήτριας, καθώς επίσης και τα φορτία καταπόνησής της.

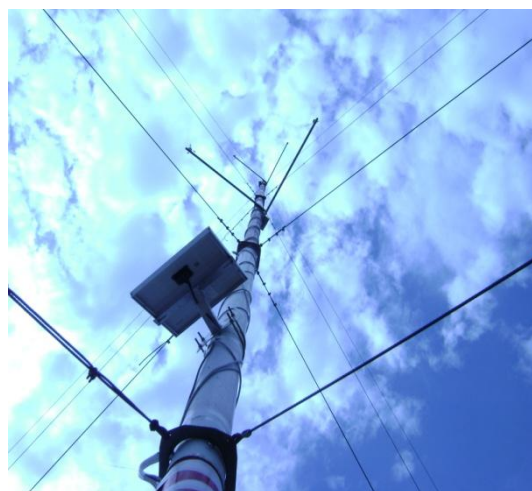
Η εγκατάσταση και η συντήρησή τους, καθώς επίσης και η συλλογή και αξιολόγηση των μετρήσεων, γίνεται από εταιρείες με εξειδικευμένο προσωπικό και υψηλό επίπεδο τεχνογνωσίας. Επίσης, για την εγκατάσταση απαιτείται έγκριση από το δασαρχείο και από την πολιτική αεροπορία.

Οι μετεωρολογικοί ιστοί χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

1. Σωληνωτοί

Οι σωληνωτοί, είναι βαρέως τύπου, το ύψος τους είναι σχετικά μικρό και κυμαίνεται από 10 έως 40 m, ενώ αντίστοιχα η διάμετρος τους από 130 έως 200 mm. [9]

Οι ιστοί αυτού του τύπου είναι κατάλληλοι για μικρά υψόμετρα (έως 1000 m), όπου οι καιρικές συνθήκες, είναι πιο ήπιες και σπάνια εμφανίζονται φαινόμενα όπως ο πάγος μεγάλου πάχους ή υψηλές ταχύτητες ανέμων, τα οποία επιβαρύνουν αισθητά τον ιστό και τις στηρίξεις του. [9]



Εικόνα 2.1: Σωληνωτός μετεωρολογικός ιστός καλυμμένος από πάγο.

2. Δικτυωτοί

Οι δικτυωτοί χρησιμοποιούνται σε πιο μόνιμες εγκαταστάσεις, είναι ελαφρού τύπου και ανθεκτικοί για θέσεις με μεγάλο υψόμετρο, όπου εμφανίζεται περισσότερος πάγος και ταχύτητες ανέμου ακόμη και 50 m/s.

Οι ιστοί αυτοί είναι τριγωνικού σχήματος (ισόπλευρο) και τα μήκη των πλευρών τους ποικίλουν από περίπου 350 mm έως 1000 mm, ανάλογα με το υψόμετρο εγκατάστασης. Το ύψος τους ξεκινάει συνήθως από τα 40 m και φθάνει ακόμη και τα 140 m. [9]



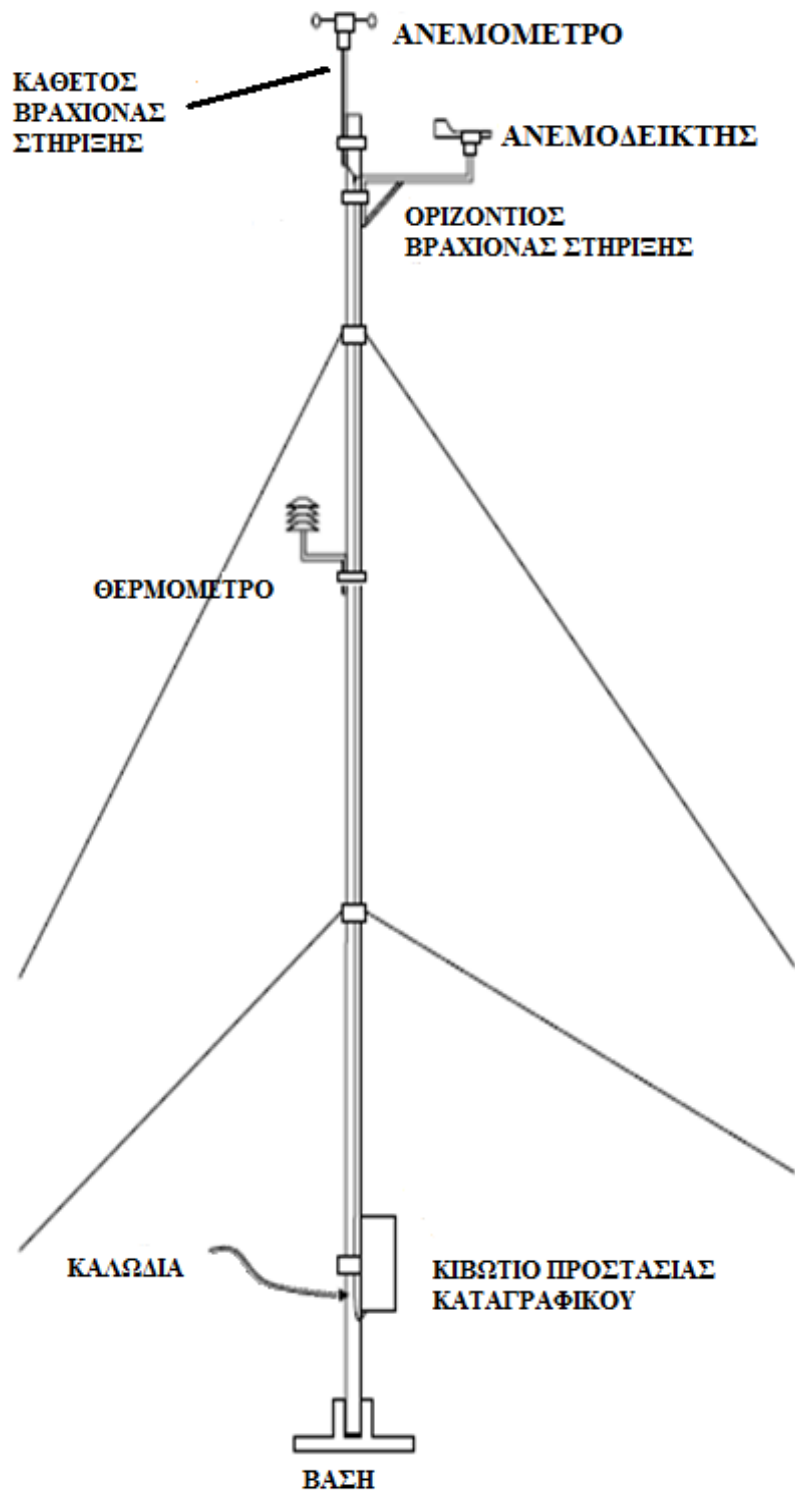
Εικόνα 2.2: Δικτυωτός μετεωρολογικός ιστός.

Προφανώς, το κόστος των δικτυωτών ιστών είναι αρκετά σημαντικότερο από αυτό των σωληνωτών τόσο λόγω της τεχνολογίας τους όσο και λόγω της δυσκολίας εγκατάστασής τους σε δυσπρόσιτες περιοχές.

Στη συνέχεια παρουσιάζουμε παραδείγματα μετρητικών ιστών.

Ένα απλό σύστημα ιστού 10 m περιλαμβάνει (εικόνα 2.3) [9]:

- Ένα ανεμόμετρο στα 10 m
- Έναν ανεμοδείκτη στα 10 m
- Ένα θερμόμετρο και ένα βαρόμετρο για την εκτίμηση της πυκνότητας του ανέμου
- Ένα καταγραφικό με τουλάχιστον 1 κανάλι απαριθμητή (counter) για το ανεμόμετρο και τουλάχιστον 3 αναλογικά κανάλια (analog) για τους υπόλοιπους αισθητήρες.
- Μόντεμ για ασύρματη επικοινωνία με το σταθμό.
- Μπαταρία μολύβδου 12V, με φορτιστή και φωτοβολταϊκό, για την τροφοδοσία του συστήματος.

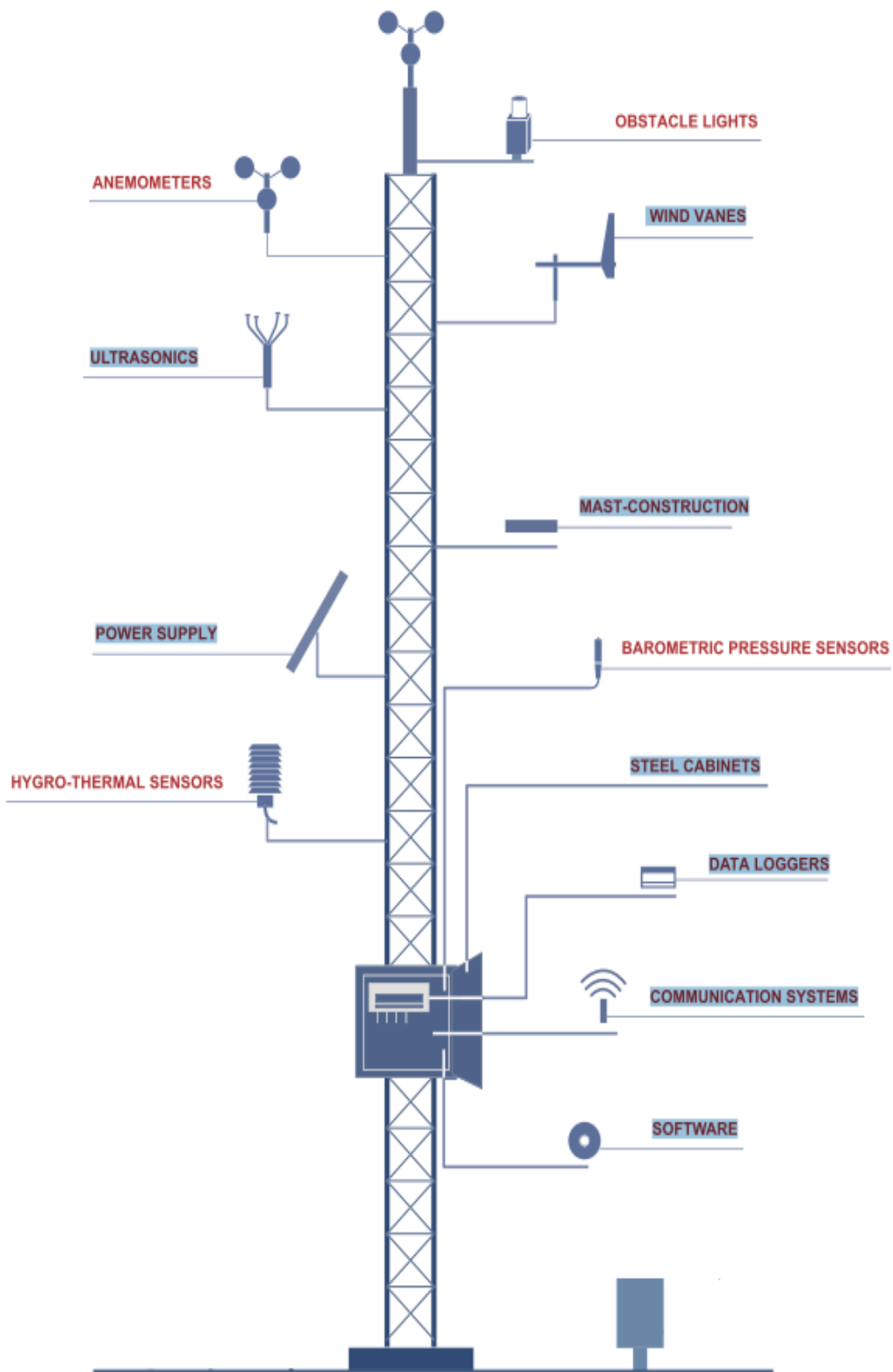


Εικόνα 2.3: Σχεδιάγραμμα εγκατάστασης σωληνωτού ιστού.

Ένα πιο σύνθετο σύστημα ιστού 40 m περιλαμβάνει (εικόνα 2.4) [9]:

- 4 ανεμόμετρα. Ένα για μέτρηση στα 10 m, 1 για μέτρηση στα 30 m και 2 για την κορυφή. Το δεύτερο ανεμόμετρο κορυφής χρησιμοποιείται για επιβεβαίωση της μέτρησης και σε περίπτωση που καταστραφεί ή καεί το ένα από τα δύο.
- 3 ανεμοδείκτες στα 10 m, 30 m και 40 m.
- Ένα θερμόμετρο για την εκτίμηση της θερμοκρασίας.
- Ένα βαρόμετρο για την εκτίμηση της ατμοσφαιρικής πίεσης.
- Ένα υγρόμετρο για την εκτίμηση της υγρασίας.
- Ένα καταγραφικό με τουλάχιστον 4 κανάλια απαριθμητή (counter) για τα ανεμόμετρα και τουλάχιστον 5 αναλογικά κανάλια (analog) για τους υπόλοιπους αισθητήρες.
- Μόντεμ για ασύρματη επικοινωνία με το σταθμό.
- Μπαταρία μολύβδου 12V, με φορτιστή και φωτοβολταϊκό, για την τροφοδοσία του συστήματος
- Λάμπα αεροπλοΐας όπως ορίζουν οι κανονισμοί της πολιτικής αεροπορίας.

Όπως παρατηρούμε από τα σχετικά διαγράμματα των ιστών, το καταγραφικό τοποθετείται μέσα σε κουτί (κατάλληλο για όλες τις καιρικές συνθήκες) σε χαμηλό ύψος, ώστε να είναι εύκολα προσβάσιμο. Επίσης, τα όργανα εγκαθίστανται σε οριζόντιους ή κάθετους βραχίονες.



Εικόνα 2.4: Σχεδιάγραμμα δικτυωτού ιστού.

Η τοποθέτηση των μετρητικών αιολικών συστημάτων πάνω στον ιστό δεν είναι τυχαία και γίνεται βάσει ευρωπαϊκών προτύπων.

Το πρότυπο **IEC 61400-12-1**, σε σχέση με τους αισθητήρες μετρητικών αιολικών συστημάτων, προβλέπει τα εξής:

1. **Τα ανεμόμετρα** πρέπει να εγκαθίστανται σε ύψος ± 2.5 % του ύψους του ρότορα της μελλοντικής ανεμογεννήτριας. Προτιμότερο είναι να τοποθετούνται στην κορυφή μιας κάθετης ράβδου, που στέκεται χωρίς εμπόδια στην κορυφή του ιστού. Τα κύπελλα πρέπει να απέχουν τουλάχιστον 75 cm από την κορυφή. Επιπλέον, μπορούν να εγκατασταθούν ανεμόμετρα και σε χαμηλότερα ύψη πάνω σε οριζόντιους βραχίονες, προσαρμοσμένους στην άκρη του ιστού δείχνοντας προς στην επικρατέστερη διεύθυνση του ανέμου. Για την ελάττωση της επίδρασης τυχόν εμποδίων στη ροή του ανέμου πρέπει: η κάθετη απόσταση από οποιοδήποτε άλλο βραχίονα να είναι τουλάχιστον 7 φορές η διάμετρος του βραχίονα, ενώ η οριζόντια απόσταση από τον ιστό τουλάχιστον 7 φορές η μέγιστη διάμετρος του ιστού (είτε πρόκειται για σωληνωτό είτε για δικτυωτό).
2. **Οι ανεμοδείκτες** θα εγκαθίστανται σε ύψος $\pm 10\%$ του ύψους του ρότορα της μελλοντικής ανεμογεννήτριας. Προσοχή πρέπει να δοθεί ώστε η θέση τους να μην προκαλεί παραμόρφωση της ροής του αέρα μεταξύ των ανεμομέτρων και ανεμοδεικτών. Η απόλυτη ακρίβεια της μετρούμενης διεύθυνσης του ανέμου πρέπει να είναι καλύτερη από 5 μοίρες.
3. **Η πυκνότητα του ανέμου** υπολογίζεται από τη θερμοκρασία (αντιστρόφως ανάλογη) και την πίεση (ανάλογη) του ανέμου. Ο αισθητήρας θερμοκρασίας πρέπει να τοποθετηθεί τουλάχιστον 10 m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους και κοντά στο ύψος του ρότορα της μελλοντικής ανεμογεννήτριας. Το ίδιο ισχύει και για τον αισθητήρα βαρομετρικής πίεσης, αλλά σε περίπτωση που τοποθετηθεί σε διαφορετικό ύψος, οι μετρήσεις μπορούν να διορθωθούν και να αναχθούν στο σωστό ύψος, σύμφωνα με το ISO 2533.

Τέλος, πολύ συχνό είναι το φαινόμενο ένας μετεωρολογικός ιστός να χτυπηθεί από κεραυνό. Έτσι, για να αποφύγουμε τις καταστροφές του μετρητικού εξοπλισμού τοποθετούμε στην κορυφή του ιστού μια αντικεραυνική ράβδο η οποία είναι συνδεδεμένη με μια γείωση στη βάση του ιστού.

2.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ LiDAR

Η βασική αρχή λειτουργίας των συστημάτων LiDAR είναι το φαινόμενο Doppler.

Το φαινόμενο Doppler πήρε την ονομασία του από τον αυστριακό φυσικό Christian Doppler το 1842.

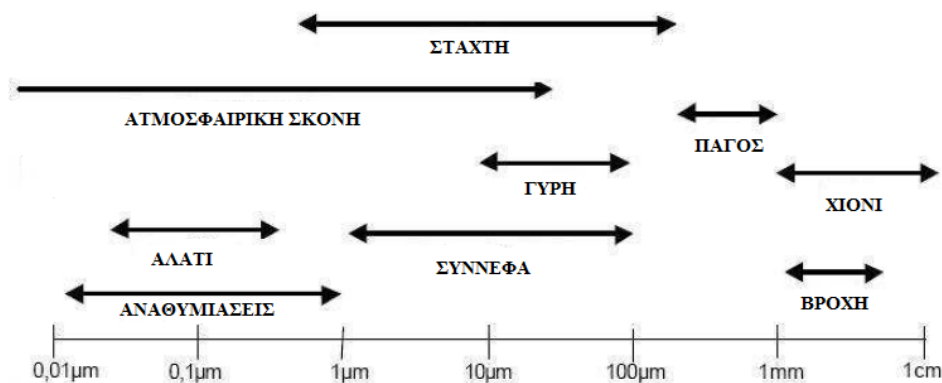
Το φαινόμενο αυτό είναι η παρατηρούμενη αλλαγή στη συχνότητα ενός κύματος από παρατηρητή που βρίσκεται σε σχετική κίνηση με την πηγή των κυμάτων.

Η συχνότητα του κύματος είναι υψηλότερη όταν ο παρατηρητής πλησιάζει την πηγή, στιγμιαία ίση με την πραγματική κατά το χρονικό σημείο της συνάντησης τους και χαμηλότερη κατά την απομάκρυνση του. [4]

Σε ένα σύστημα LiDAR η δέσμη laser, που χαρακτηρίζεται από ένα μήκος κύματος, υποβάλλεται σε μετατόπιση του μήκους κύματός της καθώς σκορπίζεται από τα μόρια του αέρα. [10]

Τα σωματίδια αυτά αποτελούνται τόσο από φυσικά στοιχεία (σταγονίδια νερού, υγρασία, σκόνη) όσο και από μη φυσικά (σκόνη από ανθρώπινες κατασκευές, σκουπίδια, αέρια κλπ). [10]

Στην **εικόνα 2.6** που ακολουθεί, απεικονίζουμε τα μεγέθη των πιο χαρακτηριστικών σωματιδίων της ατμόσφαιρας, με μεγαλύτερα αυτά της βροχής και του χιονιού.



Εικόνα 2.6: Μεγέθη των σωματιδίων της ατμόσφαιρας. [10]

Ένα σύστημα LiDAR αποτελείται από 3 βασικά εξαρτήματα:

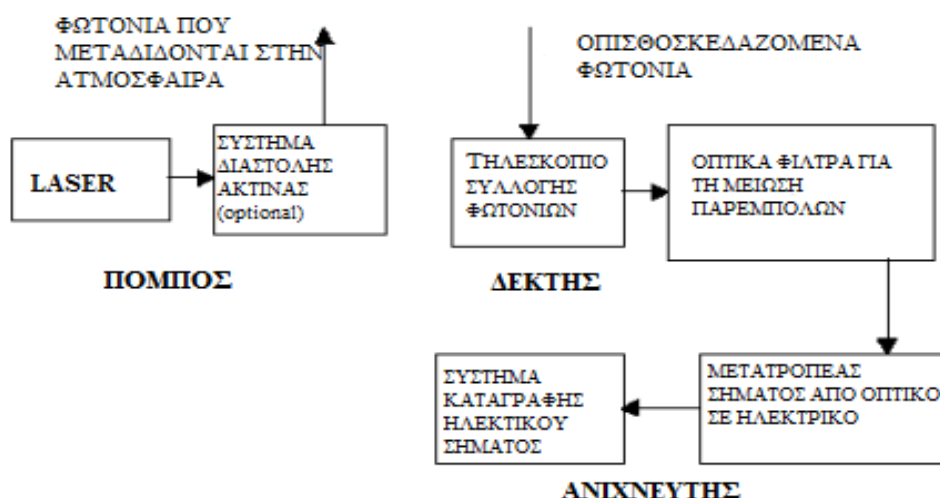
- τον πομπό,
- τον δέκτη και
- τον ανιχνευτή.

Στον πομπό βρίσκεται το laser που παράγει μια συνεχόμενη ή παλλόμενη δέσμη φωτός με μήκη κύματος που κυμαίνονται από το υπέρυθρο έως το υπεριώδες. Η μεγάλη ποικιλία των μηκών κύματος που χρησιμοποιούνται σε συστήματα LiDAR δίνει την δυνατότητα να μετράμε αρκετές ατμοσφαιρικές μεταβλητές. Σήμερα, το κατάλληλο μήκος κύματος για τις εφαρμογές στην αιολική ενέργεια είναι το 1,5 μm. [8]

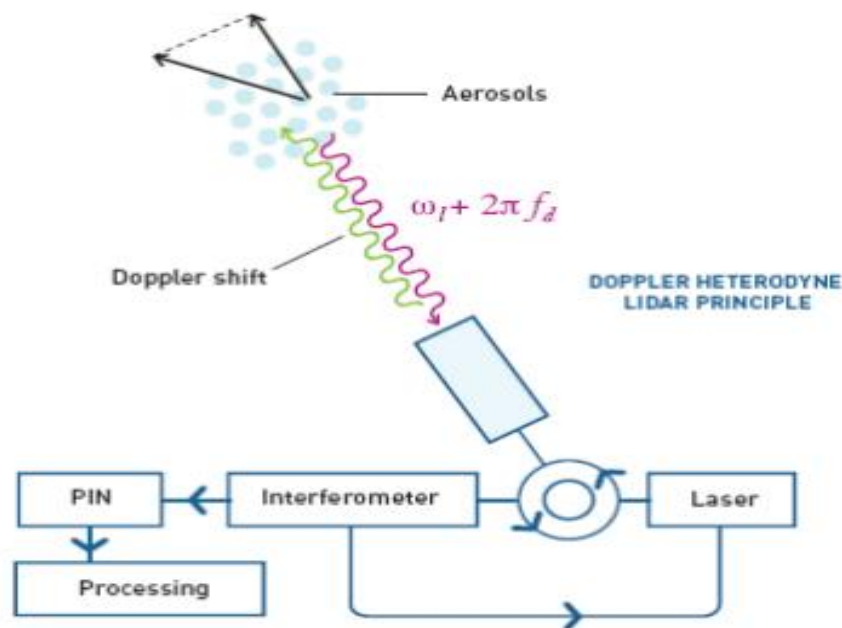
Στον δέκτη ένα οπτικό τηλεσκόπιο συλλέγει τα φωτόνια που σκεδάζονται από το μετρούμενο σώμα και τα κατευθύνει σε ένα φωτοανιχνευτή που μετατρέπει το φως σε ηλεκτρικό σήμα. Το μέγεθος του τηλεσκοπίου διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην ακρίβεια του LiDAR, δεδομένου ότι η ισχύς του ηλεκτρικού σήματος εξαρτάται από την ποσότητα των φωτονίων που μπορεί να συλλέξει το τηλεσκόπιο. Φυσικά, όσο μεγαλύτερο είναι το οπτικό τηλεσκόπιο, τόσο μεγαλύτερο ποσοστό των φωτονίων μπορεί να ανιχνευθεί μετά την σκέδαση. Πολλά σύγχρονα συστήματα LiDAR, πριν από τον ανιχνευτή, περιέχουν ειδικά φίλτρα, προκειμένου να μειώσουν τις παρεμβολές από φωτόνια με διαφορετικά μήκη κύματος. [8]

Ο ανιχνευτής είναι το εξάρτημα που καταγράφει την ένταση του φωτονίων που συλλέγονται από το δέκτη. [8]

Η παραπάνω περιγραφή της λειτουργίας ενός συστήματος LiDAR απεικονίζεται σχηματικά στην **εικόνα 2.7** που ακολουθεί όπου βλέπουμε πως συνδέονται οι λειτουργίες κάθε εξαρτήματος. [8]



Εικόνα 2.7: Σχηματικό διάγραμμα ενός συστήματος LiDAR.



Εικόνα 2.8: Εκπομπή Laser και σκέδασης της σε σωματίδια της ατμόσφαιρας [11]

Όπως παρατηρούμε και από την παραπάνω **εικόνα 2.8**, το **LiDAR** εκπέμπει μια δέσμη laser και μετράει τις ακτίνες που ανακλώνται, όταν αυτές συγκρουστούν με τα σωματίδια της ατμόσφαιρας. Συγκρίνοντας, λοιπόν, την εισερχόμενη και την εξερχόμενη ακτίνα laser υπολογίζεται το μέγεθος της επίδρασης του φαινομένου Doppler στη συχνότητα της ακτίνας και συνεπώς, μπορούμε να υπολογίσουμε την ταχύτητα του αέρα, που στην προκειμένη περίπτωση είναι ο παρατηρητής.

Το **LiDAR** απαιτεί την εντόπιση ενός φωτονίου για κάθε 10^{12} φωτόνια που διαδίδονται, ώστε να μπορεί να μετρήσει την ταχύτητα του ανέμου. [10]

Εδώ πρέπει να αναφέρουμε, ότι θεωρούμε πως τα σωματίδια της ατμόσφαιρας έχουν πάντα την ταχύτητα του αέρα, κάτι που δεν μας οδηγεί σε σημαντικές αποκλίσεις, καθώς έχουν πολύ μικρό μέγεθος.

Επίσης, αξίζει να σημειωθεί το εξής: η μεταβολή του μήκους κύματος και της πραγματικής ταχύτητας του ανέμου συνδέονται με τον παρακάτω τύπο [10]:

$$\Delta\lambda = \frac{2v_{wind}\lambda}{c}$$

Όπου:

- **C** είναι η ταχύτητα του φωτός ($3 \cdot 10^8$ m/s).
- **λ** είναι το μήκος κύματος της ακτίνας, το οποίο, όπως προαναφέραμε, είναι ίσο με 1,5 μm.

Συμπεραίνουμε λοιπόν πως μια βασική αρχή της λειτουργίας του LiDAR είναι πως τα οπισθοσκεδαζόμενα φωτόνια προέρχονται από σωματίδια της ατμόσφαιρας, τα οποία κινούνται με την ταχύτητα του αέρα. Η λειτουργία αυτή μπορεί να επηρεαστεί από τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή στην οποία πραγματοποιούνται οι μετρήσεις οπότε και είναι έντονη η ανομοιομορφία των σωματιδίων της ατμόσφαιρας.

Κατά την διάρκεια της βροχής, οι σταγόνες επηρεάζουν αρνητικά την μέτρηση της κάθετης συνιστώσας της ταχύτητας του άνεμου καθώς το LiDAR υπολογίζει και την κάθετη συνιστώσα της ταχύτητα της σταγόνας. Το φαινόμενο αυτό γίνεται πιο έντονο όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος της σταγόνας καθώς προφανώς αποκτά μεγαλύτερη ταχύτητα και θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση στις τυπικές αποκλίσεις των μετρήσεων. Το ίδιο ισχύει και για τις νιφάδες χιονιού, το χαλάζι κλπ.

Επίσης όταν οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε ορεινές περιοχές, όπου η πιθανότητα εμφάνισης κεραυνού είναι μεγάλη, συνηθίζεται η παράλληλη εγκατάσταση ενός μικρού ιστού (6 m) με αλεξικέραυνο και γείωση, ώστε να αποφεύγεται πιθανή βλάβη στη λειτουργία του μηχανήματος.

Οι μετρήσεις με μηχανήμα **LiDAR** συνήθως διαρκούν από 1 έως 3 μήνες. Η χρήση του μπορεί να λύσει το πρόβλημα της εγκατάστασης ιστών σε δυσπρόσιτες περιοχές, το οποίο συνεπάγεται υψηλό κόστος και εργασία ανθρώπινου δυναμικού υπό δυσμενείς συνθήκες. Η εγκατάστασή του γίνεται από έμπειρο προσωπικό, δεν απαιτεί άδεια εγκατάστασης ενώ υπάρχει δυνατότητα απομακρυσμένης επικοινωνίας και παρακολούθησης μέσω Ethernet ή GPRS. [9]

Τέλος, απαραίτητη είναι η εγκατάσταση μονάδας τροφοδοσίας για την παροχή ενέργειας στο μηχανήμα και καθώς έχουν παρατηρηθεί συχνά πολλά φαινόμενα βανδαλισμού και κλοπής κρίνεται αναγκαία η προστασία του συστήματος από προσωπικό ασφαλείας.

Στη συνέχεια (**κεφάλαιο 4.3**) θα περιγράψουμε τη λειτουργία του μηχανήματος **Windcube** της εταιρείας **Leosphere**, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις της εργασίας.



Εικόνα 2.9: LiDAR με αυτόνομο σύστημα παροχής ενέργειας και προσωπικό φύλαξης.

2.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΙΣΤΩΝ – LiDAR

Στις δύο παραπάνω παραγράφους αναφέραμε και αναλύσαμε τα δυο συστήματα μέτρησης του ανέμου. Παρατηρούμε πως σε κάθε σύστημα υπάρχουν σημαντικά πλεονεκτήματα αλλά και μειονεκτήματα. Θα προσπαθήσουμε να αναφερθούμε σε αυτά για κάθε σύστημα ξεχωριστά.

ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΙΣΤΟΣ

Πλεονεκτήματα

- ✓ Γνώση του προφίλ της ταχύτητας για όλες τις εποχές επειδή οι μετρήσεις διαρκούν τουλάχιστον 12 μήνες. Αυτό είναι πολύ σημαντικό, ειδικά στον Ελλαδικό χώρο, που λόγω της μορφολογίας του εδάφους και του κλίματος, οι εποχιακές διακυμάνσεις του ανέμου είναι έντονες.
- ✓ Μέτρηση 3 συνιστωσών της ταχύτητας (u,v,w). (με χρήση *sonic anemometer*)
- ✓ Μεγάλη ακρίβεια μέτρησης.
- ✓ Υπάρχει μεγάλη εμπειρία και τεχνογνωσία για μετρήσεις.
- ✓ Τα δεδομένα των μετρήσεων θεωρούνται έγκυρο στοιχείο για τις τράπεζες, ώστε ο επενδυτής να πάρει χρηματοδότηση για μελλοντικό αιολικό έργο.
- ✓ Απαιτεί μικρή ισχύ και οι ανάγκες του καλύπτονται από ένα μικρό φ/β 10 – 20 Watt

Μειονεκτήματα

- ✗ Το μέγιστο ύψος μέτρησης είναι μικρότερο από αυτό των LiDARs.
- ✗ Ο μετεωρολογικός ιστός χρειάζεται συντήρηση.
- ✗ Η εγκατάστασή του είναι δύσκολη και επίπονη.
- ✗ Πιθανές ζημιές είτε στον ιστό είτε στα όργανα από έντονες καιρικές συνθήκες.
- ✗ Κόστος εγκατάστασης.
- ✗ Απαιτείται άδεια εγκατάστασης από δασαρχείο και πολιτική αεροπορία.

LiDAR

Πλεονεκτήματα

- ✓ Δυνατότητα μέτρησης του ανέμου σε υψόμετρο έως και 200 m.
- ✓ Μέτρηση 3 συνιστωσών της ταχύτητας (u,v,w).
- ✓ Η εγκατάσταση του είναι πιο εύκολη και πιο φθηνή σε σχέση με αυτή ενός ιστού.
- ✓ Δυνατότητα εκτίμησης πολλών θέσεων σε μικρό χρονικό διάστημα καθώς οι μετρήσεις πραγματοποιούνται πολύ πιο σύντομα.
- ✓ Δεν απαιτείται άδεια εγκατάστασης από δασαρχείο και πολιτική αεροπορία.
- ✓ Δεν χρειάζεται καμία υποδομή για την εγκατάσταση.
- ✓ Ευελιξία αφού είναι εφικτή η εγκατάσταση του σε δυσπρόσιτα σημεία.

Μειονεκτήματα

- * Απαραίτητη εγκατάσταση μονάδας τροφοδοσίας του συστήματος.
- * Επηρεασμός μετρήσεων από έντονη βροχή.
- * Τα δεδομένα των μετρήσεων δεν είναι ακόμη αποδεκτά από όλες τις τράπεζες, αν και αυτό σιγά σιγά αλλάζει ειδικά για επενδύσεις σε υπεράκτιες περιοχές.
- * Απαιτείται φύλαξη του μηχανήματος για την αποφυγή βανδαλισμών ή κλοπών.
- * Απαιτείται μονάδα τροφοδοσίας 24 V DC ή 100/240 V AC
- * Υψηλό κόστος αγοράς.

3

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΠΟΥ ΑΠΑΙΤΕΙΤΑΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Για να μπορέσει κάποιος να αξιοποιήσει τα δεδομένα που θα έχει μετά από μια περίοδο μετρήσεων και να κάνει ενεργειακούς υπολογισμούς για το αιολικό δυναμικό της περιοχής, πρέπει να διαθέτει πολύ καλές γνώσεις τόσο πάνω σε μαθηματικές συναρτήσεις όσο και στις πιθανότητες. Σε αυτή την παράγραφο θα προσπαθήσουμε να κάνουμε μια μικρή αναφορά σε κάποιες από τις βασικές συναρτήσεις και εξισώσεις που χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία των μετρήσεων, καθώς και πως τις αξιοποιούμε.

3.1 ΚΑΤΑΝΟΜΗ WEIBULL

Η καμπύλη διάρκειας των ταχυτήτων του ανέμου ή η καμπύλη της συχνότητας της ταχύτητας του ανέμου μπορεί να περιγραφεί μέσω μιας συνεχούς μαθηματικής συνάρτησης. Οι κατανομές Weibull και Rayleigh είναι αυτές που αντιπροσωπεύουν καλύτερα την στατιστική της ταχύτητας του ανέμου. [3]

Η κατανομή Weibull καθορίζεται από δύο παραμέτρους και προσδιορίζει την πιθανότητα η ταχύτητα του ανέμου να βρίσκεται σε μια περιοχή της ταχύτητας v . [3]

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας $p(v)$ της ταχύτητας του ανέμου v δίδεται από τη σχέση :

$$p(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}$$

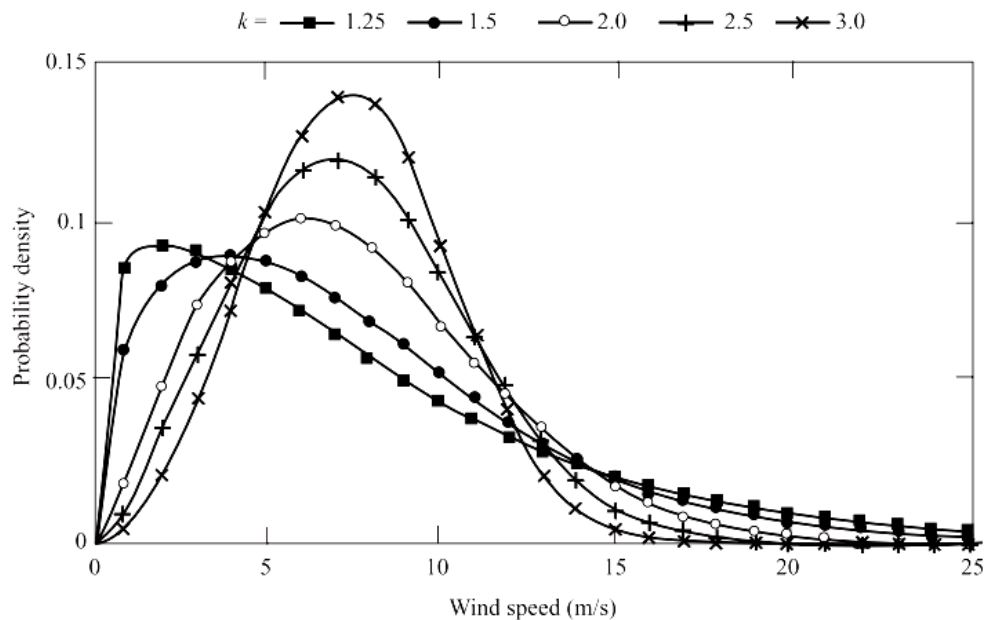
όπου k είναι η παράμετρος μορφής και c η παράμετρος κλίμακας της κατανομής. [3][16]

Για $k = 2$ η κατανομή Weibull ονομάζεται Rayleigh. Η κατανομή Rayleigh χρησιμοποιείται από όλους τους κατασκευαστές των ανεμογεννητριών για να υπολογίσουν την ενεργειακή απόδοση των μηχανών σε περιοχές για τις οποίες δεν διαθέτουν αναλυτικά ανεμολογικά στοιχεία αλλά γνωρίζουν μόνο μία τιμή, π.χ. την μέση ετήσια ταχύτητα. [1][16]

Η παράμετρος κλίμακας c συνδέεται με τη μέση ταχύτητα των μετρήσεων v_m με τον τύπο:

$$c = \frac{v_m}{\Gamma(1 + \frac{1}{k})}$$

όπου Γ είναι η συνάρτηση Γάμμα. [1]



Εικόνα 3.1: Τυπική μορφή κατανομής Weibull. [16]

Η ετήσια μεταβλητότητα του ανέμου [1] είναι:

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} (v - \bar{v})^2 P(v) dv$$

Η συνάρτηση ολικής πιθανότητας p [1] δίνεται από τη σχέση :

$$P(v \leq v_x) = \int_0^{v_x} P(v)dv = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v_x}{c}\right)^k\right]$$

η οποία με λογαρίθμηση μπορεί να πάρει την μορφή:

$$\ln[-\ln\{1 - p(v \leq v_x)\}] = -k \ln c + k \ln v_x$$

Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των παραμέτρων μορφής και κλίμακας προσδιορίζοντας την ευθεία ελαχίστων τετραγώνων. Οι **τιμές $P(v \leq v_x)$** υπολογίζονται από τις καμπύλες διάρκειας των ανεμομετρικών σταθμών. [3][16]

Οι παράμετροι της κλίμακας της ταχύτητας c και μορφής k της κατανομής Weibull είναι δυνατόν να υπολογισθούν, αν υπάρχουν μετεωρολογικές μετρήσεις στην περιοχή, προσαρμόζοντας με ελάχιστα τετράγωνα την αναλυτική σχέση στα πειράματα. [3]

Έστω, λοιπόν, ότι από πειραματικές μετρήσεις γνωρίζουμε την κατανομή των ταχυτήτων σε συγκεκριμένο σημείο A στην ευρύτερη περιοχή ενδιαφέροντος η οποία έχει μέση ετήσια ταχύτητα V_a . Με χρήση της παραπάνω λογαριθμικής εξίσωσης υπολογίζουμε τις παραμέτρους k_a και c_a .

Για κοντινές αποστάσεις, έως μερικά χιλιόμετρα μπορούμε να θεωρήσουμε ότι έχουν ίδια τιμή παραμέτρου k , αλλά διαφορετική τιμή c . [3]

Αν θεωρητικά ή πειραματικά εκτιμήσουμε την μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου στη θέση V_b μπορούμε να υπολογίσουμε και την παράμετρο c_b .

Έτσι είναι δυνατό να υπολογίσουμε την νέα κατανομή των ταχυτήτων του ανέμου, για $k_b = k_a$ και c_b . [3]

Η κατανομή αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με την καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας για τους ενεργειακούς υπολογισμούς.

Τέλος, η μεταφορά της ταχύτητας από το σημείο της μέτρησης σε άλλο σημείο γίνεται πλέον από μοντέλα όπως το windsim, windpro, wasp κλπ.

3.2 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΠΡΟΦΙΛ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΜΕ ΤΟ ΥΨΟΣ

Έχει διαπιστωθεί ότι η κατακόρυφη μεταβολή της οριζόντιας συνιστώσας της ταχύτητας του ανέμου εκφράζεται είτε με εκθετικό είτε με λογαριθμικό νόμο.

Ο εκθετικός νόμος δίνει το προφίλ της ταχύτητας για τα πρώτα 1000 m από το έδαφος με τον παρακάτω τύπο.[1][3]

$$\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{z_1}{z_2}\right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (\text{εκθετικός νόμος})$$

Ο εκθετικός νόμος είναι μια προσέγγιση του λογαριθμικού νόμου που εφαρμόζεται για ύψη έως 150 m. [1][3]

$$\frac{V}{U_*} = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (\text{λογαριθμικός νόμος})$$

όπου : V , V_1 και V_2 οι οριζόντιες συνιστώσες της ταχύτητας στα αντίστοιχα ύψη z , z_1 , z_2

- : u_* η ταχύτητα τριβής
- : $1/\alpha$ ο εκθέτης του εκθετικού νόμου
- : k η σταθερά von Karman
- : z_0 το μήκος τραχύτητας

3.3 Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΣΤΟ ΠΡΟΦΙΛ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ

Η αξιολόγηση της μορφολογίας του εδάφους σε μία τοποθεσία και το πώς επηρεάζεται ο άνεμος από αυτή (έως υψόμετρο 200m) είναι πολύ σημαντική ώστε οι μετρήσεις μας να είναι ακριβείς. Όσο πιο κοντά βρισκόμαστε στο έδαφος τόσο πιο πολύ το προφίλ της ταχύτητας του ανέμου επηρεάζεται από την επιφάνεια της Γης.

Η ανάγκη να κατανοήσουμε πώς ακριβώς μεταβάλλει το complex terrain την ταχύτητα του ανέμου γίνεται ακόμη μεγαλύτερη σε περιοχές με έντονη μορφολογία, όπως η Ελλάδα.

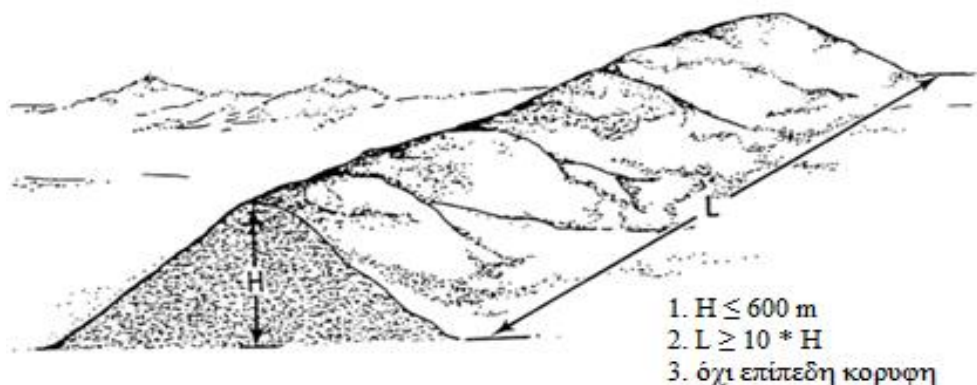
Σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61400-12, με τον όρο **complex terrain** αναφερόμαστε στο έδαφος γύρω από το σημείο λήψης μετρήσεων το οποίο διαθέτει σημαντικές διακυμάνσεις στην τοπογραφία καθώς και εμπόδια που μπορεί να προκαλέσουν παραμόρφωση της ροής. [12]

Μπορεί να διαχωριστεί σε δύο κατηγορίες [13]:

1. Υπερυψωμένο έδαφος όπως λόφοι, κορυφογραμμές και γκρεμοί.
2. Έδαφος με καταθλίψεις όπως κοιλάδες, φαράγγια και περάσματα.

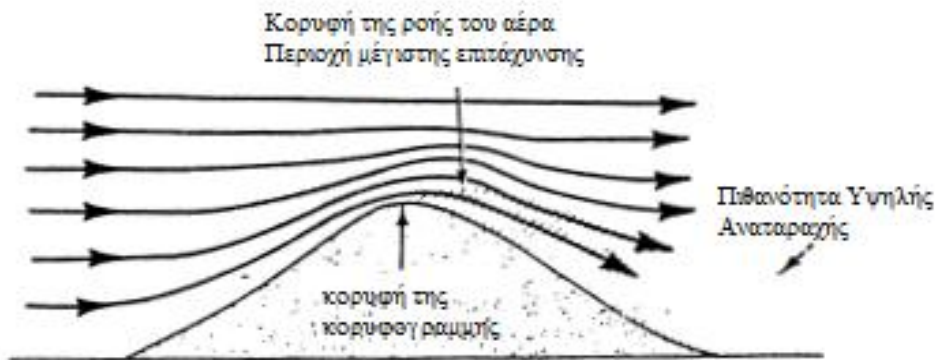
Κορυφογραμμές [13]

Ως κορυφογραμμή ορίζεται ένας επιμήκης λόφος με ύψος έως 600m, ο οποίος έχει μικρές, ή και καθόλου επίπεδες επιφάνειες στην κορυφή (εικόνα 3.2).



Εικόνα 3.2: Χαρακτηριστικά μιας τυπικής κορυφογραμμής

Το χαρακτηριστικό μιας κορυφογραμμής είναι ότι επιταχύνει την ροή του αέρα στην κορυφή της. Αυτό φαίνεται παρακάτω, στην **εικόνα 3.3** όπου ο αέρας συμπιέζεται σε ένα λεπτότερο στρώμα, το οποίο προκαλεί την επιτάχυνσή του.



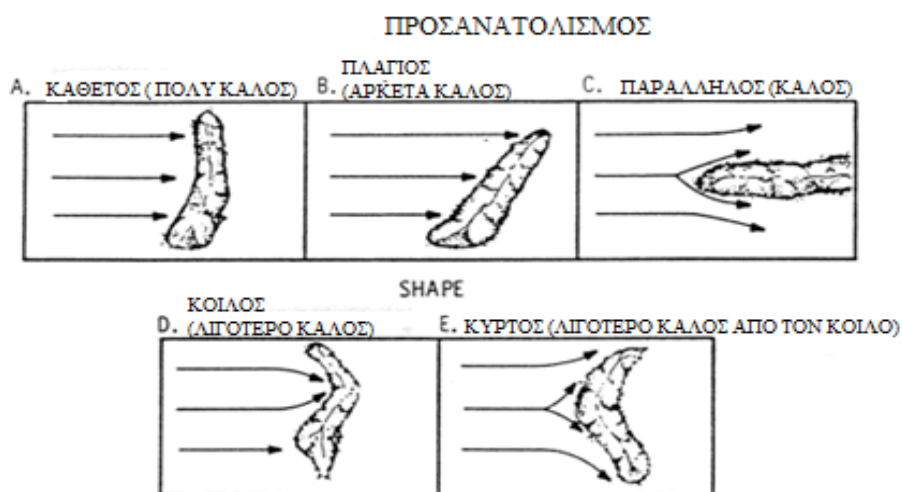
Εικόνα .33: Επιτάχυνση της ροής στην κορυφή της κορυφογραμμής.

Το μέγεθος της επιτάχυνσης σχετίζεται με τον προσανατολισμό της κορυφογραμμής σε σχέση με την διεύθυνση του ανέμου. **Μέγιστη επιτάχυνση στην κορυφή μιας κορυφογραμμής έχουμε όταν η κορυφογραμμή είναι κάθετη στην ροή του αέρα.**

Στην **εικόνα 3.4** παρατίθενται κάποια χαρακτηριστικά σχήματα, προσανατολισμού της κορυφογραμμής σε σχέση με τη ροή του αέρα.

Στο σχήμα A της εικόνας βλέπουμε τον ιδανικό προσανατολισμό μιας κορυφογραμμής σε σχέση με τον άνεμο. Η επιτάχυνση μειώνεται, όταν δεν είναι κάθετη με τον άνεμο, όπως στο σχήμα B. Όταν είναι παράλληλη με αυτόν η επιτάχυνση είναι μικρή (σχήμα C). Σε αυτήν την περίπτωση συμπεριφέρεται σαν απομονωμένος λόφος και θα αναλυθεί στη συνέχεια.

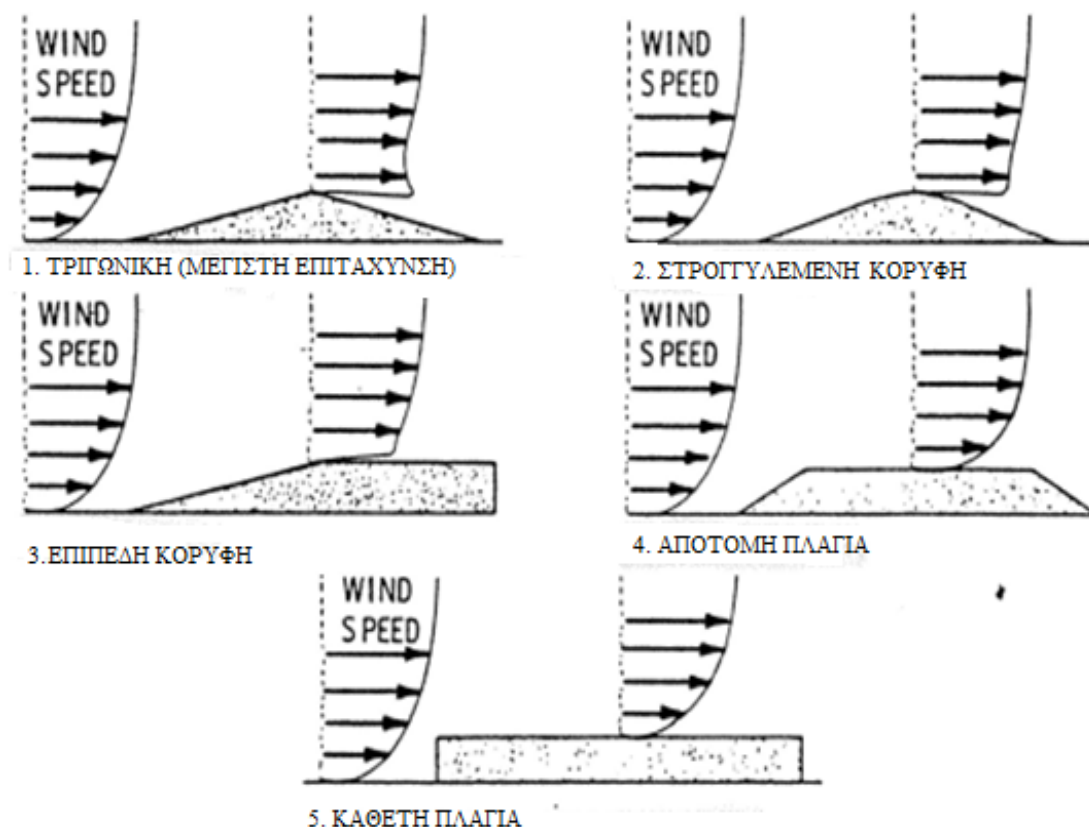
Στα σχήματα D και E όπου η κορυφογραμμή είναι κοίλη και κυρτή παρατηρούμε ότι προκαλούνται νέες διαμορφώσεις στην ροή του αέρα. Στη μεν κοίλη η επιτάχυνση ενισχύεται συγκεντρώνοντας τον αέρα, στη δε κυρτή μειώνεται εκτρέποντάς τον.



Εικόνα 3.4: Η ροή του αέρα σε σχέση με τον προσανατολισμό της κορυφογραμμής

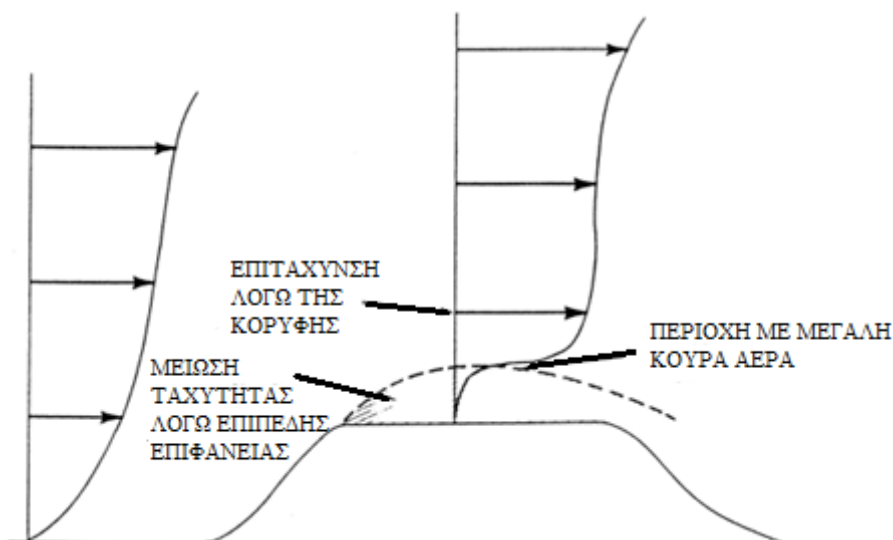
Αμέσως παρακάτω παρατίθενται κάθετες τομές από διάφορες κορυφογραμμές και κατατάσσονται ανάλογα με την επιτάχυνση που δίνουν στη ροή του ανέμου. Εύκολα παρατηρούμε πως όσο πιο επίπεδη είναι η κορυφή μιας κορυφογραμμής, τόσο μειώνεται η επιτάχυνση που προσδίδεται στη ροή.

Η κατάταξη αυτή έγινε με βάση αποτελέσματα πειραμάτων σε εργαστήρια με κατάλληλες προσομοιώσεις.



Εικόνα 3.5: Κατάταξη κάθετων τομών κορυφογραμμών με κριτήριο την ποσότητα επιτάχυνσης της ροής.

Σε αυτό το σημείο, πρέπει να επισημάνουμε πως στις κορυφογραμμές με επίπεδες κορυφές παρουσιάζονται προβλήματα στη ροή του αέρα στα χαμηλά επίπεδα, δημιουργείται δηλαδή μια περιοχή με αρκετά μειωμένη ταχύτητα ανέμου και διακυμάνσεις στην κατεύθυνση του (εικόνα 3.5).



Εικόνα 3.6: Τμήμα επίπεδης κορυφογραμμής με αρκετά μειωμένη ταχύτητα

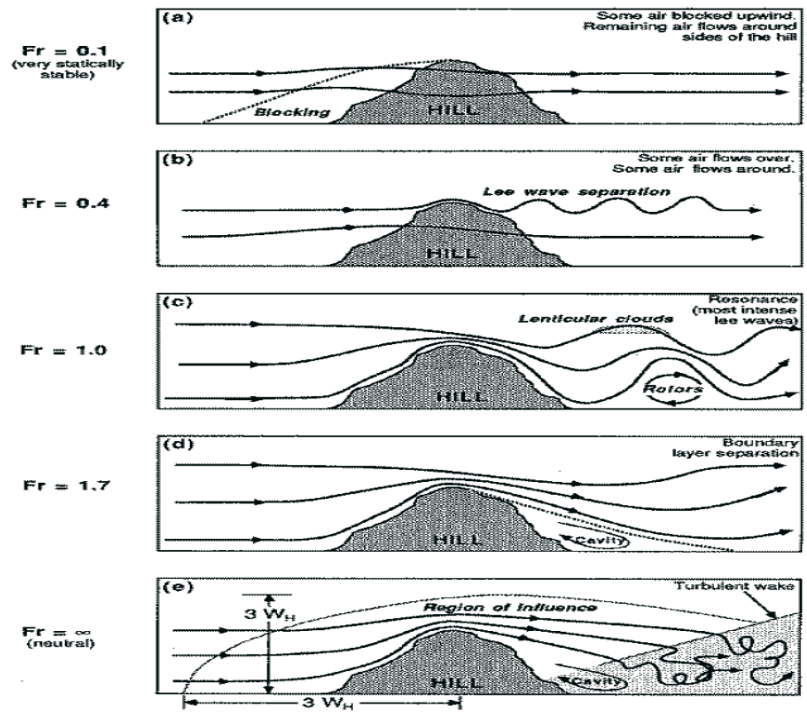
Βλέπουμε δηλαδή, πως υπάρχει μια περιοχή με αρκετά μειωμένη ταχύτητα έως κάποιο ύψος και μετά απότομη επιτάχυνση της ροής λόγω της κορυφής.

Απομονωμένοι λόφοι και βουνά [13]

Τα κύρια χαρακτηριστικά της ροής πάνω από ένα λόφο καθορίζονται όχι μόνον από το σχήμα του λόφου, αλλά και από το μέγεθός του και την σταθερότητα της ατμόσφαιρας. Ο λόφος έχει υψόμετρο από 150 m έως 600 m και μήκος 10 φορές μικρότερο ή ίσο από το ύψος του. Λόφοι με μεγαλύτερο υψόμετρο θεωρούνται βουνά.

Όπως και στις κορυφογραμμές, η ροή επιταχύνεται στην κορυφή τους, σε μικρότερο όμως βαθμό. Επίσης, σε αυτήν την κατηγορία, η ροή δέχεται αρκετές παραμορφώσεις και από τις καιρικές συνθήκες, κυρίως κατά τους χειμερινούς μήνες από χιονοπτώσεις, πάγο κλπ.

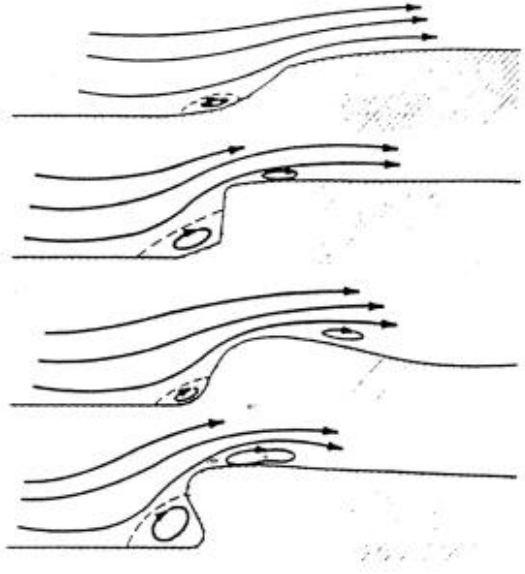
Μετά από πειραματικές μελέτες που έχουν διεξαχθεί τόσο σε εργαστήρια όσο και σε πραγματικές συνθήκες, για μια ιδανική ροή πάνω από ένα λόφο και για διάφορες συνθήκες σταθερότητας της ατμόσφαιρας, προκύπτουν τα παρακάτω σχήματα.



Εικόνα 3.7: Ιδανική ροή πάνω σε λόφο για διαφορετικές συνθήκες σταθερότητας της ατμόσφαιρας.

Γκρεμοί [13]

Γκρεμός ονομάζεται η κάθετη ή σχεδόν κάθετη βραχώδης επιφάνεια επαρκούς μήκους (10 φορές το ύψος του ή και παραπάνω) ο οποίος αναγκάζει τη ροή του αέρα να περάσει από πάνω και όχι γύρω του. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ροή του αέρα πάνω από τους γκρεμούς είναι η κλίση, το ύψος, η καμπυλότητα και η τραχύτητα του εδάφους.



Εικόνα 3.8: Ροή πάνω από γκρεμούς με διαφορετικές κλίσεις

Παρατηρούμε πως στη βάση του γκρεμού δημιουργούνται στροβιλισμοί και αποκολλήσεις της ροής και η ένταση τους αυξάνεται ανάλογα με το ύψος και την κλίση του γκρεμού. Όσο μεγαλύτερη είναι η κλίση, τόσο πιο έντονοι είναι οι στροβιλισμοί και οι αποκολλήσεις.

Τέλος, σημαντικό ρόλο παίζουν και τυχόν καμπυλότητες στην κάθετη επιφάνεια οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν διαχωρισμό της ροής όπως στην **εικόνα 3.9**.



Εικόνα 3.9: Ροή αέρα πάνω από κοίλες και κυρτές προσόψεις γκρεμού

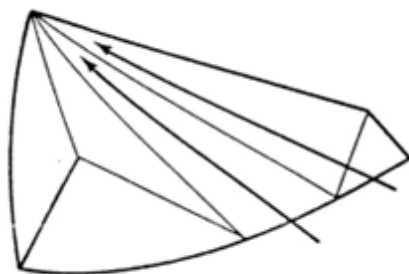
Κοιλιάδες [13]

Η ροή του αέρα σε μια κοιλάδα ή σε ένα φαράγγι εξαρτάται κυρίως από τον προσανατολισμό της κοιλάδας σε σχέση με την διεύθυνση του ανέμου, την κλίση του εδάφους της, το μήκος, το ύψος και το πλάτος των γύρω κορυφογραμμών όπως επίσης και την τραχύτητα της κοιλάδας.

Υπάρχουν 3 είδη ροής που εμφανίζονται στα συστήματα των κοιλάδων.

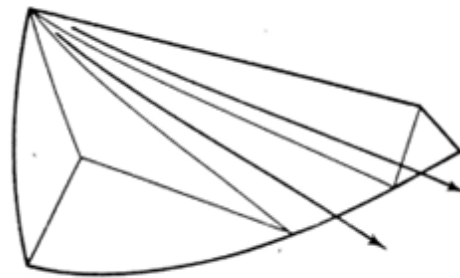
1. Το πρώτο εμφανίζεται όταν οι άνεμοι μεγάλης κλίμακας πάνω από την περιοχή είναι ασθενείς και υπερτερεί η τοπική κυκλοφορία του αέρα από την ημερήσια θέρμανση και ψύξη. Αυτό συμβαίνει κυρίως τους θερμούς μήνες (Μάιος – Σεπτέμβριος).

ΑΕΡΑΣ ΚΟΙΛΙΑΔΑΣ



Μεσημέρι έως Δύση του ηλίου

ΑΕΡΑΣ ΒΟΥΝΟΥ



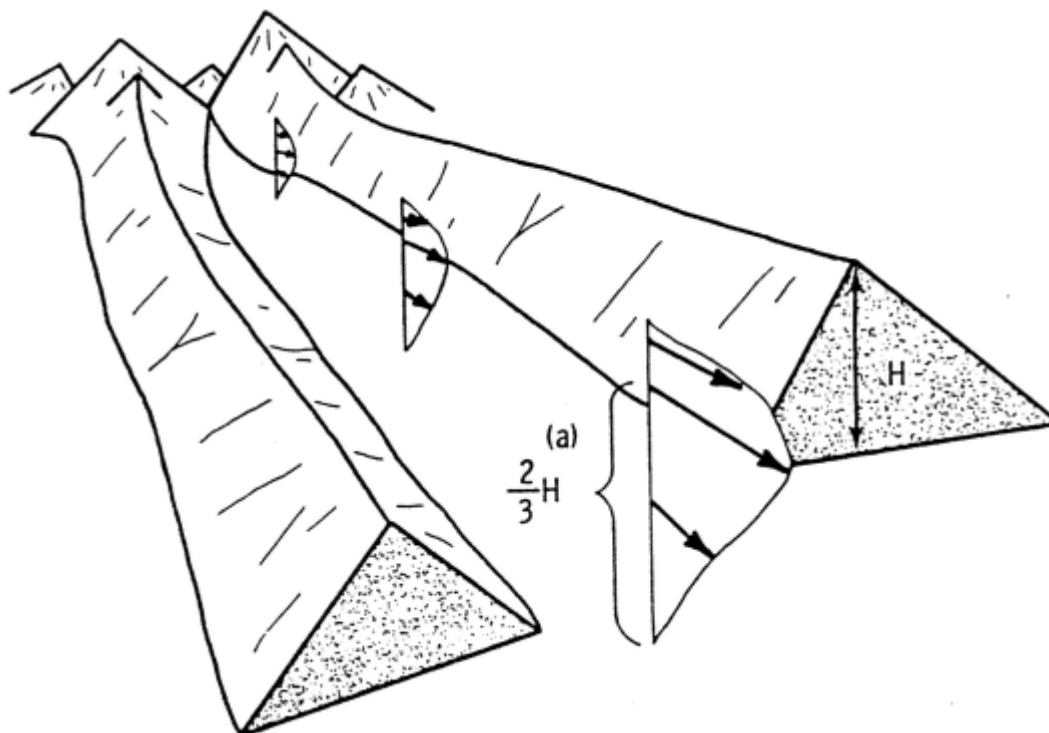
Βράδυ έως Ανατολή

Εικόνα 3.10: Καθημερινή εναλλαγή διεύθυνσης του αέρα ανάμεσα σε βουνό και κοιλάδα

Όπως παρατηρούμε και στην **εικόνα 3.10**, τις απογευματινές ώρες ο άνεμος στην κοιλάδα είναι πλήρως ανεπτυγμένος, ενώ τις πρώτες νυχτερινές ώρες εξασθενεί. Επίσης, τα βουνά έχουν χαμηλότερες θερμοκρασίες από τις κοιλάδες και έτσι ο άνεμος σε αυτά είναι πλήρως ανεπτυγμένος έως τις πρώτες πρωινές ώρες.

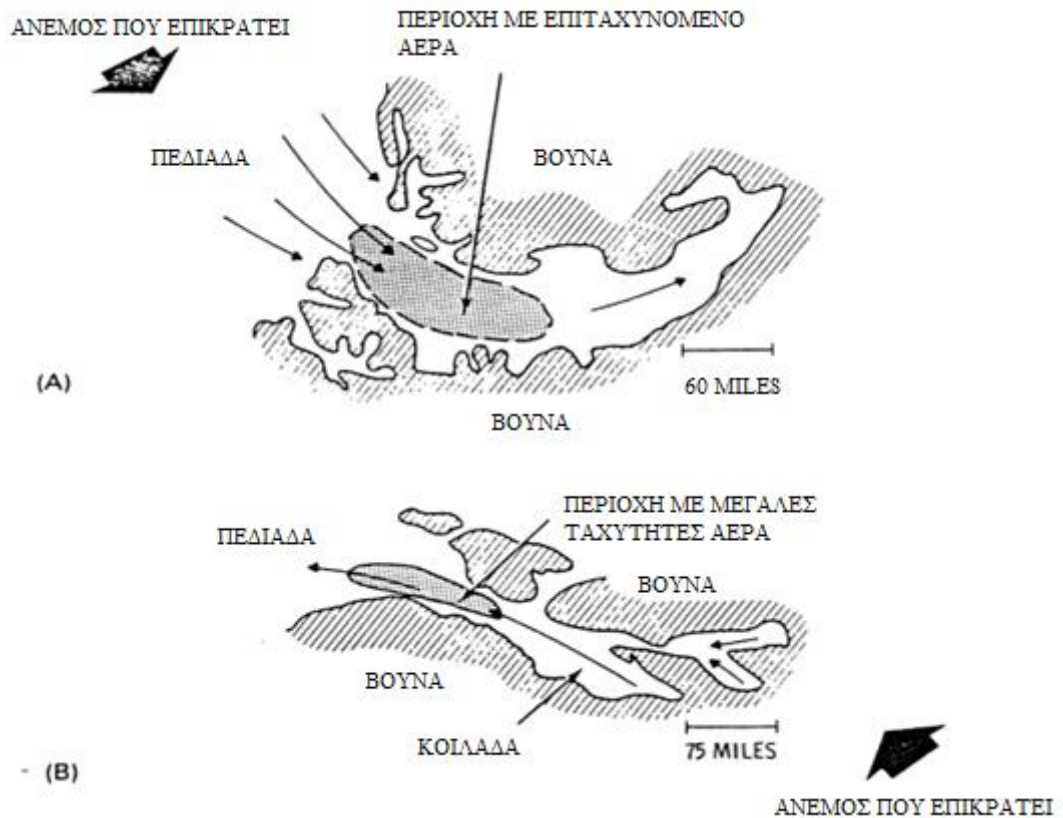
Από πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί σε μια κοιλάδα που περικλείεται από μακρόστενες κορυφογραμμές, προκύπτει το προφίλ ανέμου που απεικονίζει η **εικόνα 3.11**. Βλέπουμε ότι η μέγιστη ταχύτητα εμφανίζεται στο κατώτερο άκρο της κοιλάδας, στο κέντρο της και σε ύψος περίπου ίσο με τα $\frac{2}{3}$ του ύψους των κορυφογραμμών που την περικλείουν.

Τέλος, αναφέρουμε πως στο κάτω μισό του προφίλ της ταχύτητας, συχνά εμφανίζεται τύρβη ενώ το προφίλ του ανέμου είναι πιο ομαλό τις νυχτερινές ώρες καθώς δεν υπάρχει η θερμότητα που παράγεται από τον ήλιο.



Εικόνα 3.11: Κάθετο προφίλ ταχύτητας κοιλάδες που περικλείεται από κορυφογραμμές.

2. Το δεύτερο είδος εμφανίζεται, όταν μέτριοι έως ισχυροί άνεμοι είναι παράλληλοι με την κοιλάδα ή σχηματίζουν γωνία έως 35° . Σε αυτήν την περίπτωση η ροή του ανέμου μπορεί να επιταχυνθεί. Ακολουθεί σχετικό σχήμα.



Εικόνα 3.12: Ροή του αέρα όταν είναι σε παραλληλία με την κοιλάδα ή σχηματίζουν το πολύ 35° .

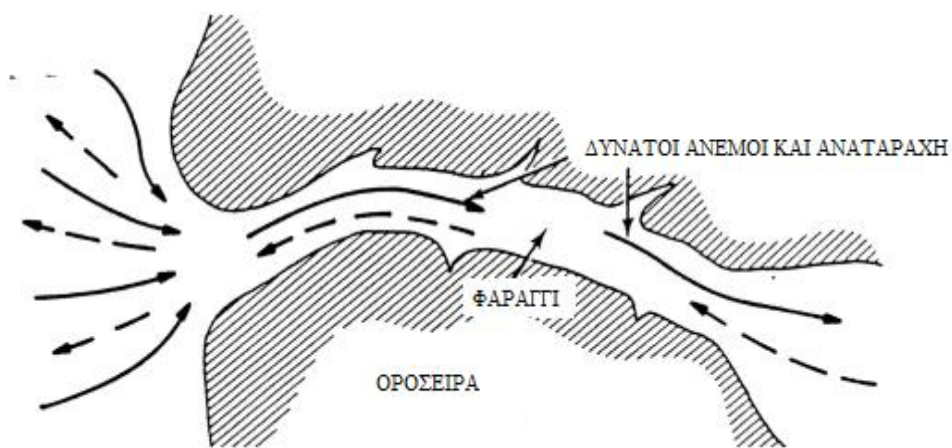
3. Το τρίτο είδος εμφανίζεται όταν η ροή είναι κάθετη ή με γωνία $55^\circ - 90^\circ$ στην κοιλάδα. Σε αυτή την περίπτωση, η εμφάνιση στροβιλισμών είναι αρκετά πιθανή.

Φαράγγια και περάσματα [13]

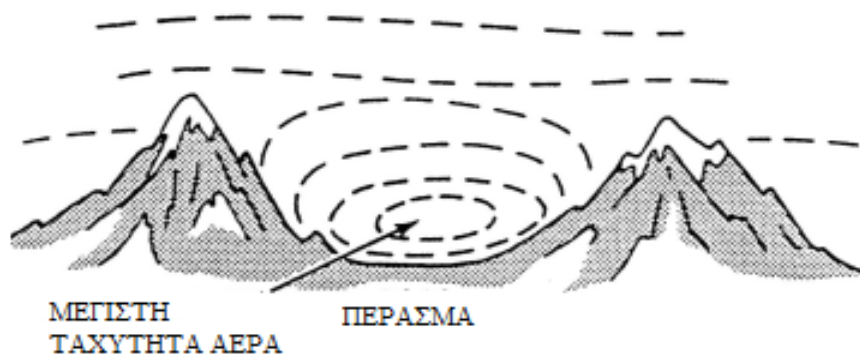
Τα φαράγγια αποτελούν συνήθως την μοναδική δίοδο (χαμηλού υψομέτρου) διέλευσης του αέρα από το ένα βουνό με αποτέλεσμα πολύς αέρα να συμπιέζεται σε αυτήν την περιοχή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την έντονη επιτάχυνση της ροής.

Το ίδιο ισχύει και στα περάσματα, αλλά με χαμηλότερη επιτάχυνση. Όμως, το γεγονός ότι συνήθως είναι αρκετά στενά σε πλάτος, δημιουργεί έντονη τύρβη.

Και στις δύο αυτές γεωγραφικές περιγραφές, (κυρίως στα φαράγγια), η ροή του αέρα εξαρτάται από τον προσανατολισμό τους, το πλάτος και το μήκος τους, τις υψομετρικές διαφορές σε σχέση με τα γειτονικά βουνά, την κλίση τους και την τραχύτητα του εδάφους



Εικόνα 3.13: Ροή αέρα μέσα από φαράγγι.



Εικόνα 3.14: Ροή αέρα μέσα από πέρασμα.

4 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετήσουμε και θα συγκρίνουμε μετρήσεις δεδομένων ενός μετεωρολογικού ιστού και ενός μηχανήματος LiDAR ώστε να μπορέσουμε στη συνέχεια να εξάγουμε συμπεράσματα για τη συσχέτιση που υπάρχει ανάμεσα τους. Αρχικά, θα προσπαθήσουμε να αποκτήσουμε μια γενική εικόνα των μετρήσεων για την περιοχή παραθέτοντας αντίστοιχα διαγράμματα, ενώ στη συνέχεια, θα ασχοληθούμε εκτενέστερα με τις μετρήσεις ώστε να μπορέσουμε να τις συγκρίνουμε απεικονίζοντάς τες σε αντίστοιχα διαγράμματα.

Να αναφέρουμε πως θα γίνει χρήση του προγράμματος **Windrose**. [15] Το windrose είναι ένα λογισμικό που αναπτύχθηκε από το Κ.Α.Π.Ε (Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας) και χρησιμοποιείται για την ανάλυση αιολικών δεδομένων.

4.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΥ ΙΣΤΟΥ

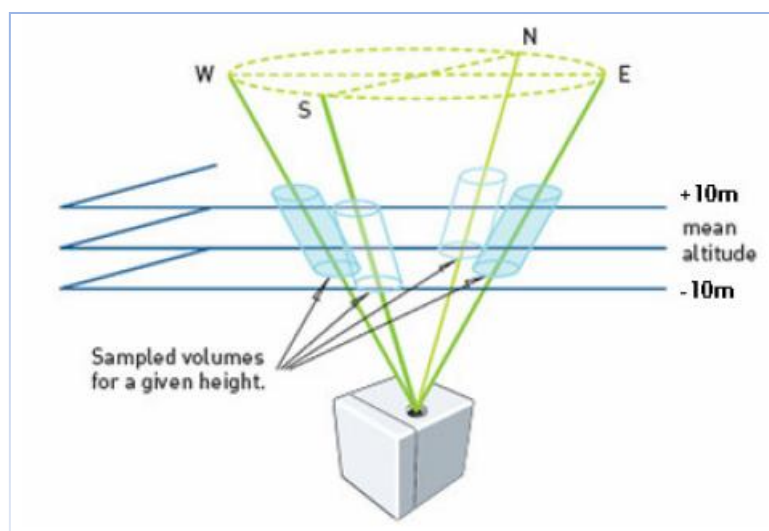
Κατά την διάρκεια των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε δικτυωτός ιστός μέτρησης ο οποίος διέθετε εγκατεστημένα στα 44 m ανεμόμετρο και ανεμοδείκτη, τύπου VECTOR, σε πλάγιους βραχίονες, καθώς και θερμομέτρο τύπου VECTOR στα 5 m από τη βάση του ιστού.



Εικόνα 4.1: Τοποθεσία μετρήσεων

4.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ LiDAR

Το LiDAR που χρησιμοποιήθηκε είναι το **Windcube** της γαλλικής εταιρείας **Leosphere** και ήταν τοποθετημένο απόσταση τέτοια ώστε να μην επηρεάζεται από τον ιστό.



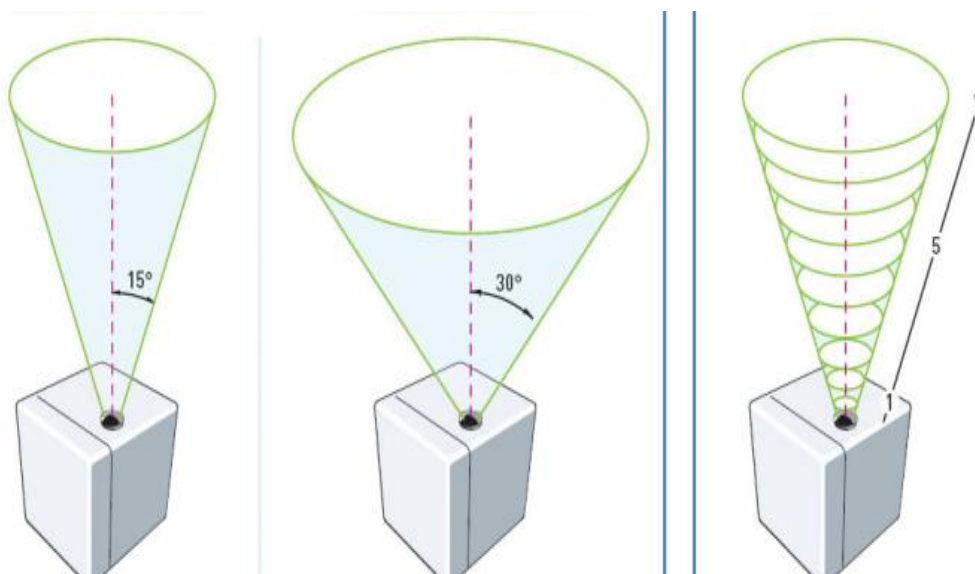
Εικόνα 4.2: Εκπομπή δέσμης laser κωνικού σχήματος

Η συσκευή εκπέμπει μια δέσμη Laser, η οποία εκτελεί μία πλήρη περιστροφή ανά δευτερόλεπτο και μπορεί να εστιάσει στο επιθυμητό ύψος, που κυμαίνεται από 40 έως και 200 μέτρα. Η δέσμη αυτή εκπέμπεται υπό γωνία 30 μοιρών ως προς τον κατακόρυφο άξονα με τη χρήση πρίσματος, το οποίο περιστρέφεται με την παραπάνω συχνότητα (1 περιστροφή/sec). Η συσκευή αυτή είναι εκπομπής παλλόμενου κύματος. Το μήκος κύματος της δέσμης που εκπέμπεται είναι 1,5 μm . Έτσι προκύπτει, ότι η δέσμη αυτή Laser είναι κωνικού σχήματος. [11]

Τα σημεία τα οποία λαμβάνονται υπόψη ανά μέτρηση είναι 4, βρίσκονται στη βάση του κώνου και είναι τοποθετημένα συμμετρικά στο χώρο, δηλαδή επιλέγεται ένα ανά 90°. [11]

Το Windcube, λόγω της παλμικής δέσμης, έχει την δυνατότητα να πραγματοποιεί ταυτόχρονη καταμέτρηση της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου σε όλα τα ύψη. Μπορεί να ανακτήσει μετρήσεις από 10 διαφορετικά υψόμετρα κάθε 1 δευτερόλεπτο, ενώ κάθε 6 δευτερόλεπτα λαμβάνουμε το σύνολο των μετρήσεων, από το οποίο παίρνουμε τις μέσες τιμές. Τα υπολειπόμενα 2 δευτερόλεπτα απαιτούνται για τη μετακίνηση του μηχανισμού. [11]

Επιπροσθέτως, όπως βλέπουμε στην **εικόνα 4.3**, η συσκευή αυτή έχει δυνατότητα επιλογής της γωνίας εκπομπής της δέσμης, είτε 15° είτε 30° , γεγονός που επιτρέπει στο Windcube να δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα, ακόμα και σε σύνθετες τοπογραφίες (15° για περιοχές με έντονη τύρβη / 30° για περιοχές με ομαλή ροή αέρα). Σε αυτό το σημείο θα δώσουμε ένα παράδειγμα για να κατανοήσουμε την παραπάνω λειτουργία. Όταν οι μετρήσεις πραγματοποιούνται με γωνία εκπομπής 30° σε ύψος π.χ. 150, η διάμετρος του όγκου σάρωσης είναι αρκετά μεγάλη με συνέπεια τα δύο άκρα της να απέχουν αρκετά από το σημείο τοποθέτησης του LiDAR. Αυτό, σε μια σύνθετη τοπογραφία είναι αρκετά σημαντικό καθώς το έδαφος γύρω από το σημείο εγκατάστασης του μηχανήματος μπορεί να έχει έντονες υψομετρικές διαφορές π.χ. εγκατάσταση κοντά σε γκρεμό.

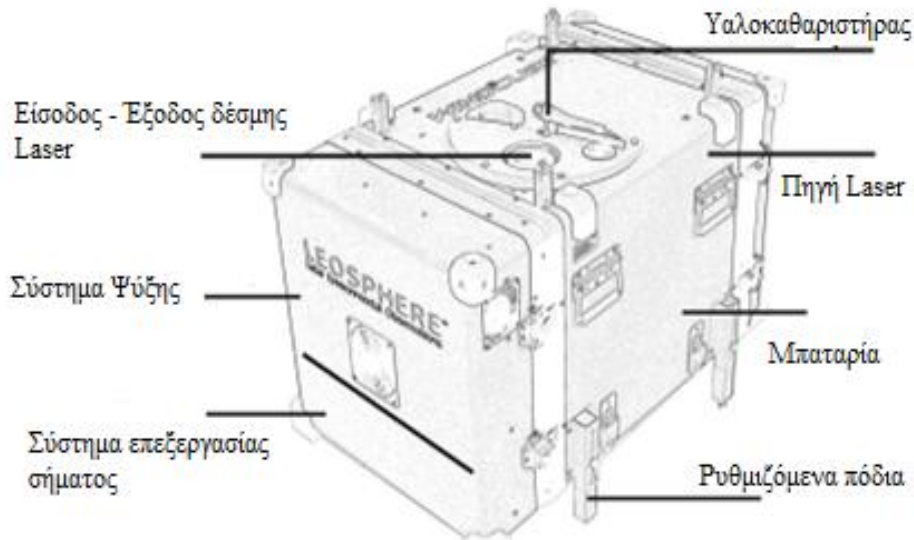


Εικόνα 4.3: Εκπομπή δέσμης laser κωνικού σχήματος με 15° και 30° και δυνατότητα λήψης μετρήσεων έως 10 διαφορετικά σημεία. [11]

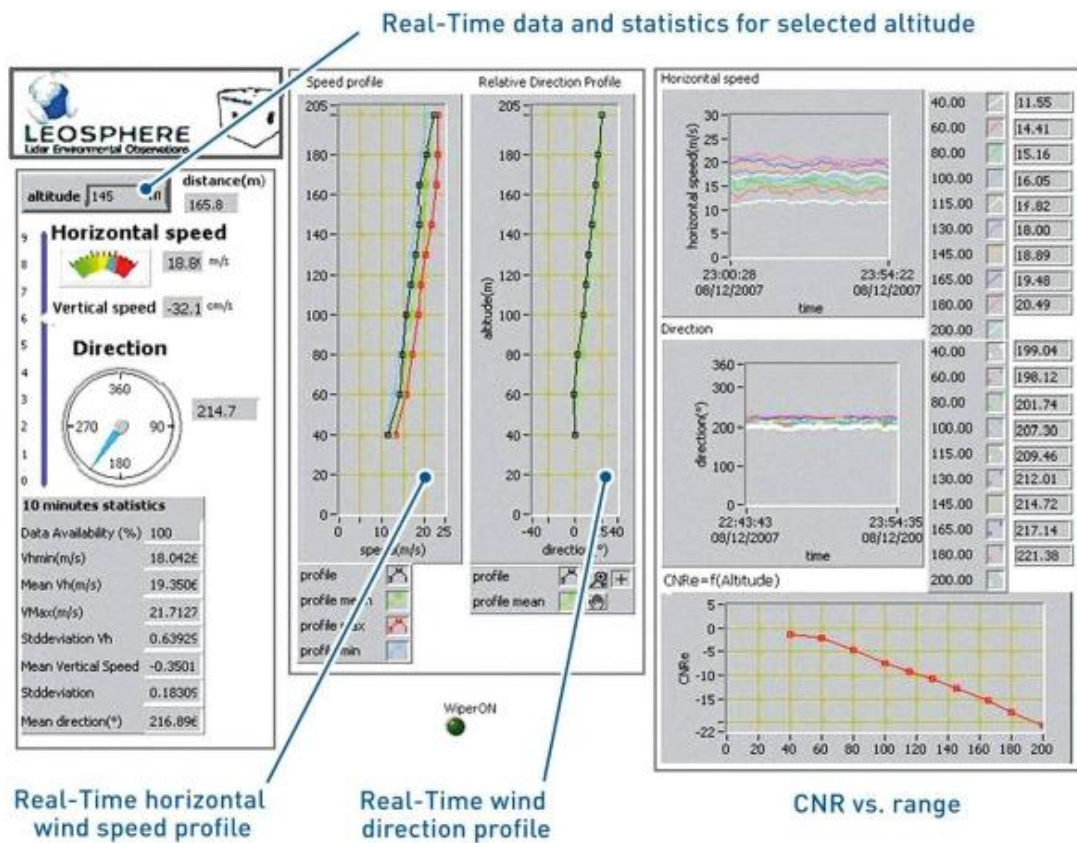
Ακόμη, το Windcube μπορεί να δώσει μετρήσεις ακόμα και σε περιπτώσεις χαμηλών ταχυτήτων ανέμου, καθώς το εύρος λειτουργίας του κυμαίνεται από 0 m/s έως 60 m/s. [11]

Τέλος, διαθέτει κατάλληλο λογισμικό, το οποίο φιλτράρει αυτόματα τα δεδομένα των μετρήσεων, ενώ σημαντικό εξάρτημα για τον περιορισμό σφαλμάτων στη λειτουργία του είναι ο υαλοκαθαριστήρας (wiper) στη έξοδο και στην είσοδο του laser στο πάνω μέρος του μηχανήματος. [11]

Στην συνέχεια παραθέτουμε την **εικόνα 4.4** με τη δομή των εξαρτημάτων του Windcube ώστε να έχουμε μια πλήρη εικόνα για την μορφή και τη λειτουργία του μηχανήματος.



Εικόνα 4.4: Δομή εξαρτημάτων Windcube.



Εικόνα 4.5: Λογισμικό διασύνδεσης

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Date	Vhm1	dVh1	VhMax1	VhMin1	Azim1	um1	du1	vm1	dv1	wm1	dw1	availability1
2	09/02/2007 10:19	2,5	0,94	5,21	0	1,1315	0,98	1	2,07	0,93	-0,87	0,46	100
3	09/02/2007 10:29	2,02	0,66	4,34	0,19	0,9871	1,03	0,75	1,55	0,68	-0,39	0,21	100
4	09/02/2007 10:39	3,23	0,97	5,93	0,21	1,0585	1,47	1,01	2,62	1,15	-0,82	0,31	100
5	09/02/2007 10:50	2,75	1,02	6,08	0,29	0,8969	1,58	1,05	1,98	1,03	-0,9	0,25	100
6	09/02/2007 11:00	2,38	0,81	5,02	0,22	1,0736	1,04	0,84	1,92	0,91	-1,03	0,21	100
7	09/02/2007 11:10	2,35	0,84	4,54	0,29	1,1802	0,75	1,19	1,82	0,98	-0,96	0,37	100
8	09/02/2007 11:20	2,35	0,89	5,5	0,51	0,9853	1,16	0,97	1,75	0,99	-0,65	0,31	100
9	09/02/2007 11:30	2,97	0,86	5,43	0,79	1,2543	0,87	0,94	2,66	0,92	-0,76	0,28	100
10	09/02/2007 11:40	3,62	0,82	6,04	1,26	1,1424	1,42	1,07	3,11	0,93	-0,79	0,26	100
11	09/02/2007 11:50	3,55	0,88	5,92	0,43	0,9822	1,87	1,08	2,8	0,93	-0,76	0,31	100
12	09/02/2007 12:00	3,41	0,83	5,66	0,74	0,9431	1,91	0,91	2,63	0,98	-0,91	0,32	100
13	09/02/2007 12:10	3,43	1,12	6,48	0,48	0,8637	2,02	1,34	2,37	1,24	-0,98	0,39	100
14	09/02/2007 12:21	3,08	1	7,03	0,72	0,9261	1,68	1,16	2,24	1,16	-0,88	0,32	100
15	09/02/2007 12:31	3,06	0,8	6,33	0,78	0,9724	1,63	0,73	2,39	1,06	-0,69	0,23	100
16	09/02/2007 12:41	3,8	0,75	6,13	1,27	0,9935	1,97	1,03	3,03	0,91	-0,69	0,26	100
17	09/02/2007 12:51	3,98	0,85	6,94	1,19	1,0436	1,95	0,85	3,35	0,93	-0,64	0,21	100
18	09/02/2007 13:01	3,84	0,76	5,79	1,48	1,0648	1,8	0,89	3,25	0,88	-0,54	0,27	100
19	09/02/2007 13:11	3,54	1,05	6,5	0,44	0,9443	1,97	1,07	2,72	1,09	-0,62	0,35	100
20	09/02/2007 13:21	3,33	0,99	5,49	0,51	0,8213	2,15	1,02	2,31	1,03	-0,65	0,34	100
21	09/02/2007 13:31	3,69	1,11	8,68	0,77	0,8149	2,3	1,36	2,44	1,31	-0,68	0,38	100
22	09/02/2007 13:41	3,42	0,93	6,48	1,17	0,8312	2,16	1,2	2,37	0,91	-0,58	0,28	100
23	09/02/2007 13:51	3,73	0,94	5,98	1,24	0,6526	2,85	0,97	2,18	1,01	-0,76	0,29	100
24	09/02/2007 14:01	3,97	1,24	8,41	0,6	0,2772	3,57	1,15	1,01	1,48	-0,68	0,29	100
25	09/02/2007 14:11	4,94	1,33	8,74	1,37	0,0635	4,67	1,3	0,3	1,61	-0,7	0,41	100
26	09/02/2007 14:21	4,83	1,28	7,76	0,9	0,2371	4,39	1,34	1,06	1,68	-0,59	0,41	100
27	09/02/2007 14:31	5,15	1,41	9,57	1,18	0,0437	4,83	1,46	0,21	1,72	-0,63	0,47	100

Εικόνα 4.6: Δείγμα δεδομένων των μετρήσεων

4.4 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε τοποθεσία με υψόμετρο **1409 m** και διήρκεσαν ακριβώς 1 μήνα, από **20/11/2008** έως και **20/12/2008**. Κατά την διάρκεια αυτής της περιόδου, τόσο το LiDAR όσο και ο μετεωρολογικός ιστός βρισκόταν σε συνεχή λειτουργία, καταγράφοντας συνολικά 4302 records. Οι μετρήσεις αυτές περιλαμβάνουν, για κάθε ύψος, τις τιμές min, max, ave, sdn κάθε δεκαλέπτου της ταχύτητας του ανέμου, τις τιμές min, max, ave, sdn κάθε δεκαλέπτου της διεύθυνσης του ανέμου, καθώς και τη διαθεσιμότητα των μετρήσεων για κάθε δεκάλεπτο σε ποσοστό %.

Οι μετρήσεις του μετεωρολογικού ιστού περιέχουν επιπλέον τις τιμές min, max, ave, sdn κάθε δεκαλέπτου για την θερμοκρασία του αέρα.



Εικόνα 4.7: Τοποθεσία μέτρησης

Οι μετρήσεις με τον παραπάνω ιστό έγιναν με ανεμόμετρο και ανεμοδείκτη τοποθετημένα σε ύψος 44 m, ενώ με το μηχάνημα LiDAR σε ύψος 40 m, 44 m, 55 m, 67 m, 78 m, 100 m, 120 m, 140 m και 160 m.

Πριν ξεκινήσουμε τη σύγκριση των μετρήσεων, θα πρέπει να λάβουμε υπόψη τις καιρικές συνθήκες που επικρατούσαν εκείνη την περίοδο.

Από τα δελτία καιρού [14] της ανωτέρω αναφερόμενης περιόδου, βρήκαμε ότι κατά την διάρκειά της οι καιρικές συνθήκες σε όλο τον ελλαδικό χώρο ήταν έντονες με αρκετές βροχές, χαμηλές θερμοκρασίες και χιόνια στα ορεινά, όπου και πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις.

Οι έντονες καιρικές συνθήκες πολλές φορές προκαλούν σφάλματα στις μετρήσεις του LiDAR, ενώ σε πολλές περιπτώσεις χαμηλών θερμοκρασιών παρατηρείται το φαινόμενο τα μετρητικά όργανα του ιστού να παγώνουν.

Επίσης, μελετώντας το **διάγραμμα 1** της θερμοκρασίας με το χρόνο (από τα δεδομένα του μετεωρολογικού ιστού) βλέπουμε πως η θερμοκρασία πέφτει πολύ συχνά υπό το 0.



Διάγραμμα 1: Διακύμανση θερμοκρασίας με το χρόνο (θερμόμετρο 5 m)

4.4.1 ΑΡΧΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Σε αυτό το σημείο, θα παραθέσουμε τον πίνακα με τις μέσες μηνιαίες τιμές της ταχύτητας, της διεύθυνσης και της θερμοκρασίας καθώς και τα διαγράμματα των μέσων ημερήσιων τιμών τους, που υπολογίσαμε με το πρόγραμμα Windrose από τα δεδομένα του ιστού, ώστε να έχουμε μια γενική άποψη για τις συνθήκες που επικρατούσαν από 20/11/2008 έως 20/12/2008 στην περιοχή.

20/11/2008 – 20/12/2008	
Μέση ταχύτητα	7,6 m/s (44 m)
Μέγιστη μέση ταχύτητα	24,2 m/s (44 m)
Μέση διεύθυνση	202,5° (44 m)
Μέση θερμοκρασία	0,64 °C (5 m)
Μέγιστη ριπή	30,8 m/s (04/12/2008 10:50)
Ποσοστό άπνοιας	6,2 %

Πίνακας 4.1: Πίνακας μέσων τιμών της μετρούμενης περιόδου

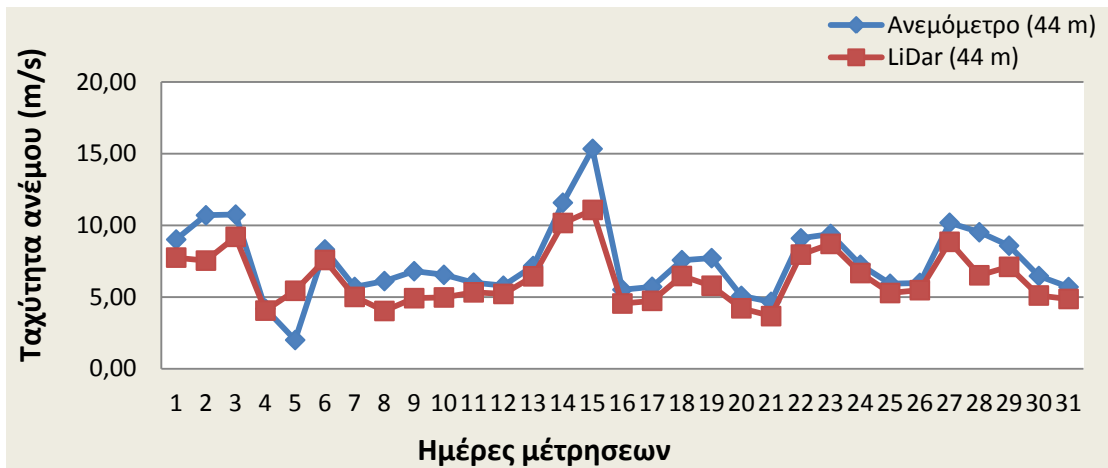
Να αναφέρουμε, πως ως μετρήσεις αναφοράς θα θεωρήσουμε αυτές του μετεωρολογικού ιστού στα 44 m.

Στο **διάγραμμα 2**, παριστάνουμε τη μέση τιμή της ημερήσιας ταχύτητας του ανέμου που μετράει το ανεμόμετρο και το LiDAR στα 44 m η οποία είναι η μέση τιμή των μετρήσεων που έχουμε για κάθε δεκάλεπτο μιας ημέρας.

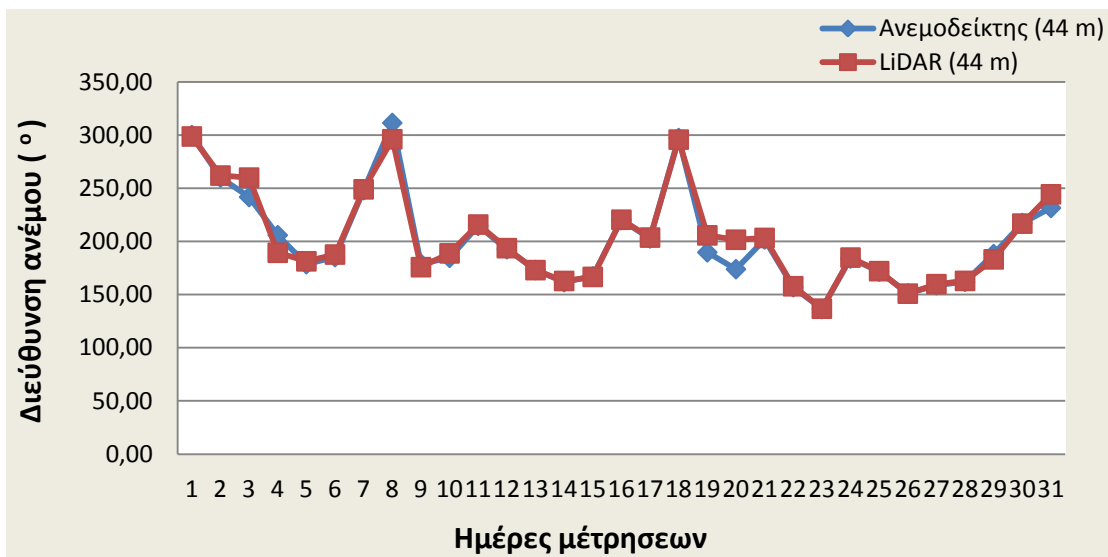
Όπως παρατηρούμε στο διάγραμμα, γενικά υπάρχει μια καλή συσχέτιση των μετρήσεων μεταξύ των δύο μεθόδων, αλλά υπάρχουν συγκεκριμένες περιπτώσεις, όπως η 2^η, 5^η, 15^η και 28^η ημέρα, όπου οι διαφορές δείχνουν να είναι σημαντικές.

Στη συνέχεια, στο **διάγραμμα 3**, παριστάνουμε τη μέση τιμή της ημερήσιας διεύθυνσης του ανέμου στα 44 m.

Παρατηρούμε, ότι η συσχέτιση των δύο μετρήσεων είναι αρκετά καλή με εξαίρεση το διάστημα μεταξύ 19^{ης} και 21^{ης} ημέρας, όπου παρατηρούνται σημαντικές διαφορές.



Διάγραμμα 2: Μέσες ημερήσιες ταχύτητες Ιστού και LiDAR στα 44 m.



Διάγραμμα 3: Μέση ημερήσια κατεύθυνση Ιστού και LiDAR στα 44 m.

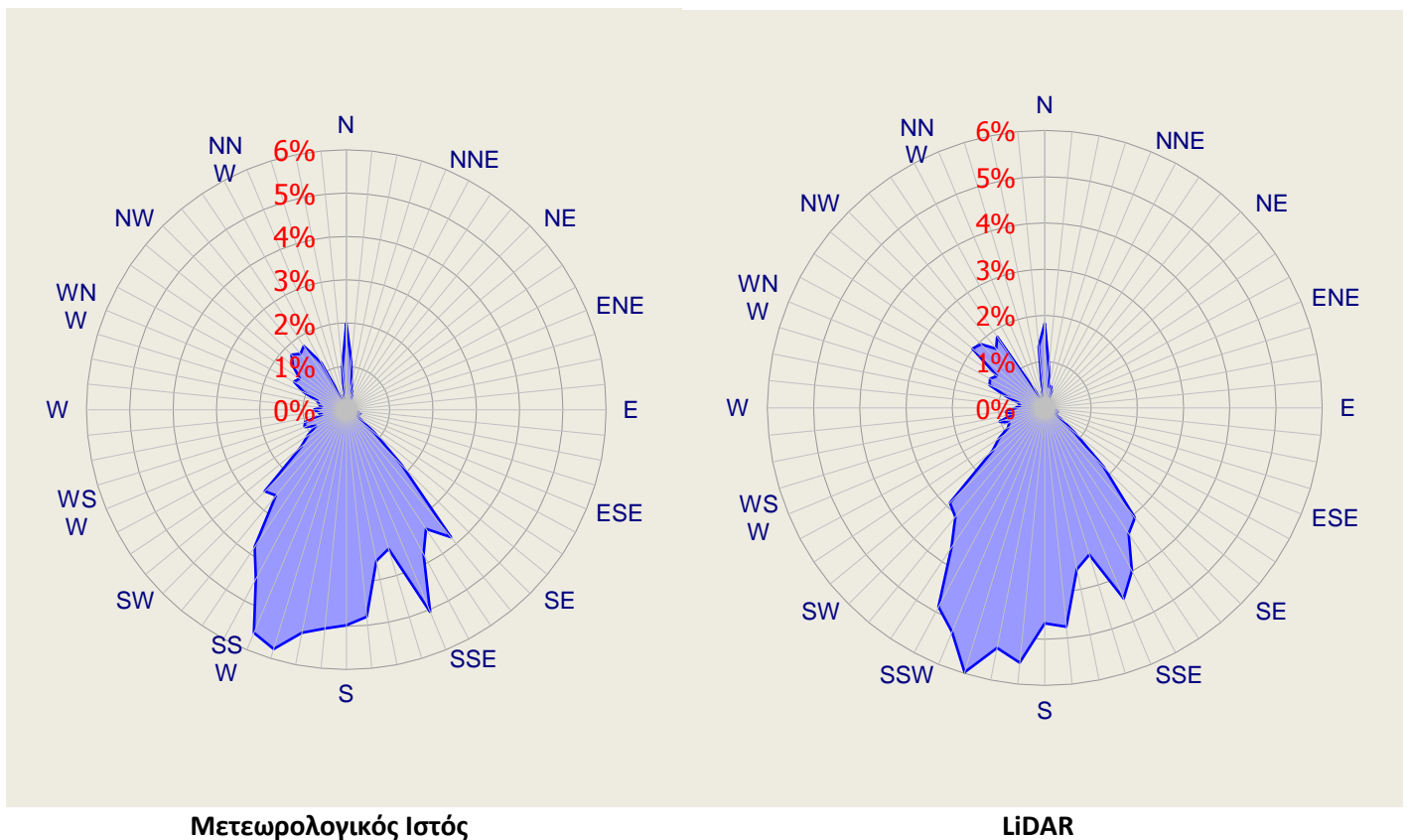


Διάγραμμα 4: Μέση ημερήσια θερμοκρασία (Ιστός – 5 m)

Στο **διάγραμμα 4** απεικονίζει τη μέση ημερήσια θερμοκρασία του αέρα βάσει των δεδομένων που έχουμε από τον ιστό, και παρατηρούμε πως κάποιες από τις μεγάλες αποκλίσεις συμπίπτουν με τις πολύ χαμηλές θερμοκρασίες.

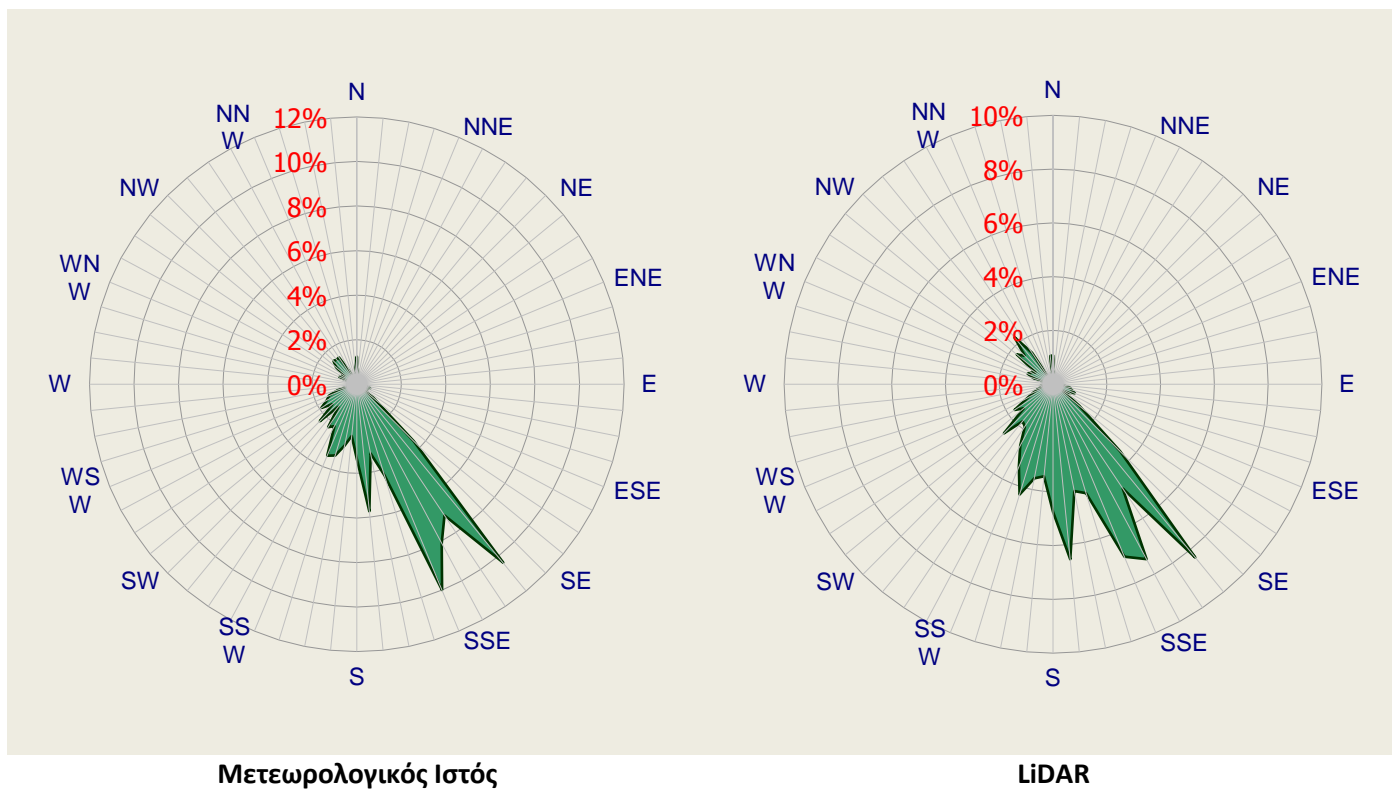
Ακολούθως θα δώσουμε μια συνοπτική εικόνα του πως είναι κατανομημένη η ταχύτητα και η κατεύθυνση του στη συγκεκριμένη τοποθεσία με τη βοήθεια του προγράμματος windrose, όπου με την εισαγωγή των δεδομένων που πήραμε από τις μετρήσεις του ιστού, προκύπτουν τα παρακάτω δεδομένα.

Στο **διάγραμμα 5**, παριστάνουμε την κατανομή της διεύθυνσης του αέρα σε σχέση με το χρόνο και παρατηρούμε, ότι η κύρια διεύθυνση του ανέμου στο δεδομένο χρονικό διάστημα είναι νότιο – νοτιοδυτική.



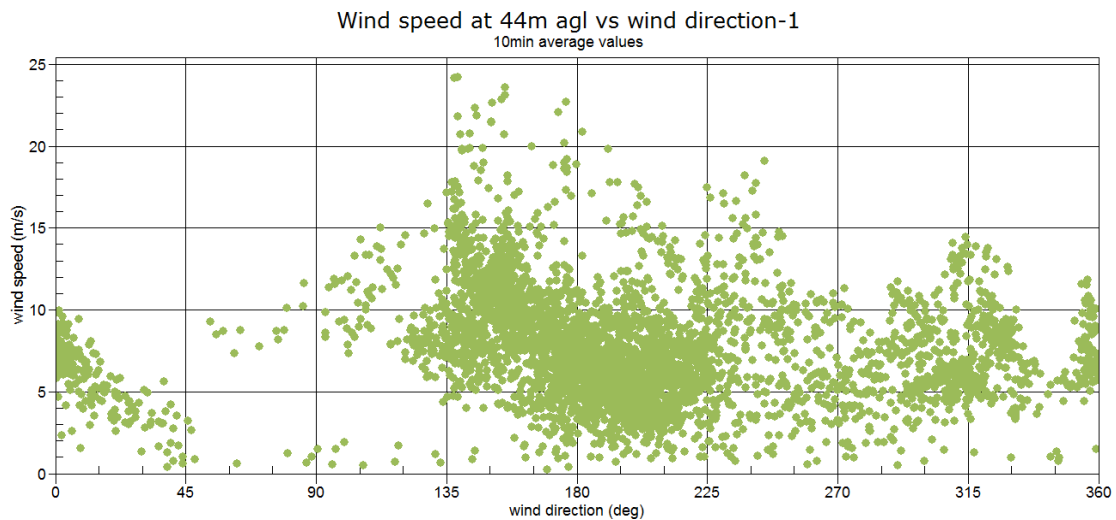
**Διάγραμμα 5: Ροδόγραμμα διεύθυνσης ανέμου Ιστού και LiDAR στα 44 m
20/11/2008 – 20/12/2008**

Επίσης, στο **διάγραμμα 6**, παριστάνουμε την κατανομή της διεύθυνσης του αέρα σε σχέση με την ενέργεια και παρατηρούμε ότι για το ίδιο χρονικό διάστημα η κύρια διεύθυνση είναι η νότιο – νοτιοανατολική.

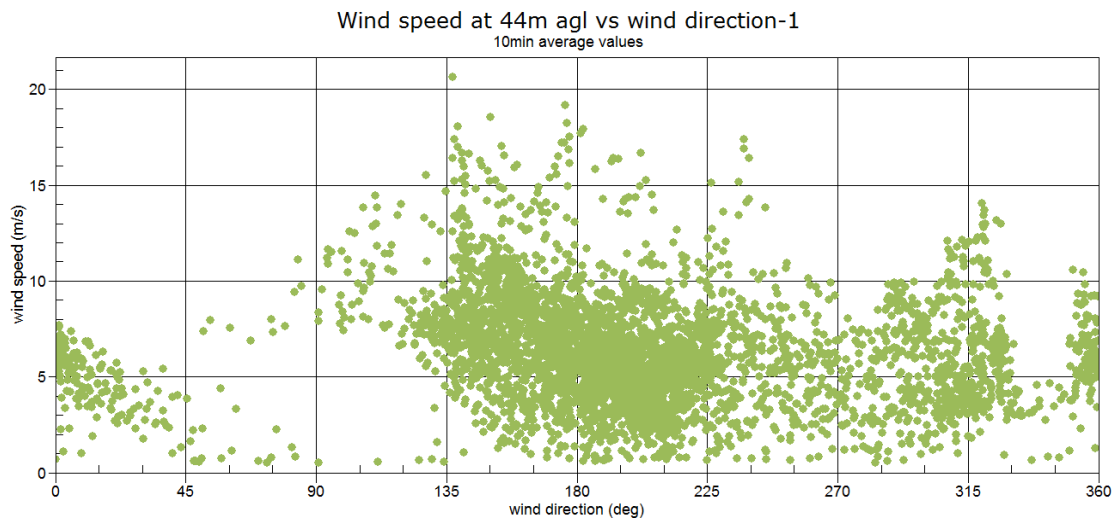


**Διάγραμμα 6: Ροδόγραμμα ενέργειας ανέμου Ιστού και LiDAR στα 44 m
20/11/2008 – 20/12/2008**

Το **διάγραμμα 7** απεικονίζει αντίστοιχα τη σχέση μεταξύ της ταχύτητας του ανέμου με τη διεύθυνση του. Στο τελευταίο παρατηρούμε ότι η μεγαλύτερη πυκνότητα εμφανίζεται για διευθύνσεις $180^{\circ} - 225^{\circ}$, όπως αναφέραμε και πιο πάνω, ενώ οι μεγαλύτερες ταχύτητες, με εξίσου μεγάλη πυκνότητα, εμφανίζονται για διευθύνσεις μεταξύ $135^{\circ} - 180^{\circ}$.



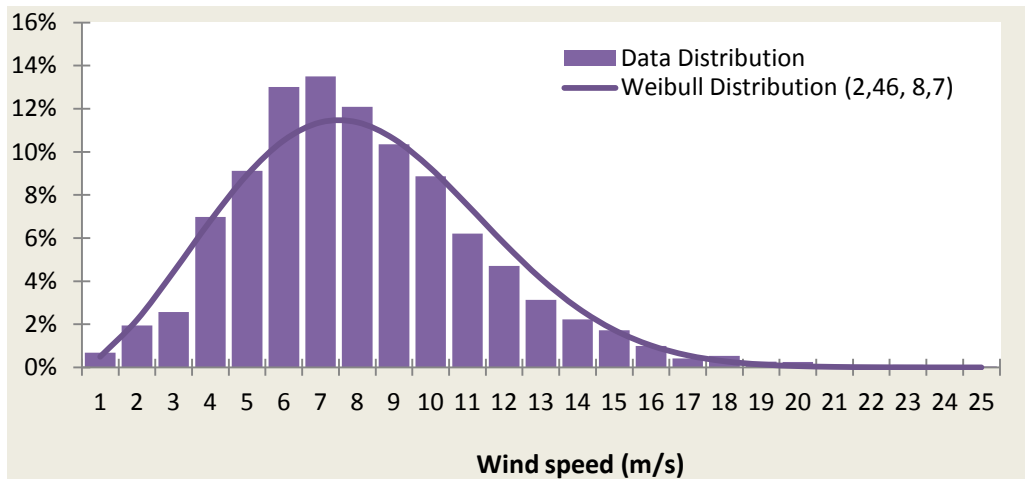
Μετεωρολογικός Ιστός



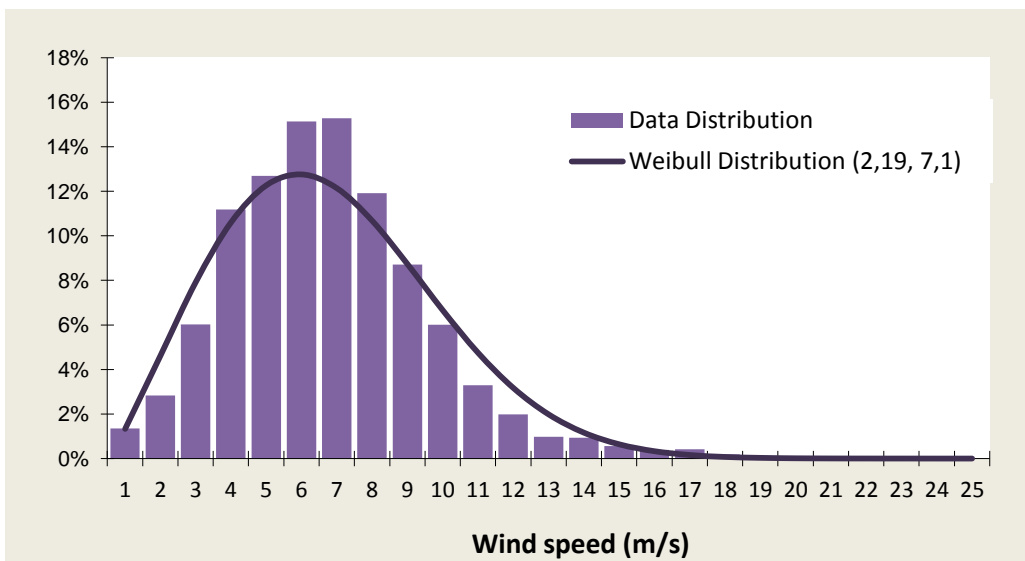
LiDAR

Διάγραμμα 7: Ταχύτητα ανέμου σε σχέση με τη διεύθυνση Ιστού και LiDAR στα 44 m.

Ακολουθως, το **διάγραμμα 8** απεικονίζει την κατανομή των συχνοτήτων ταχύτητας ανέμου (κατανομή Weibull) όπου βλέπουμε ότι η ταχύτητα με την μεγαλύτερη πιθανότητα είναι 7 m/s.



Μετεωρολογικός Ιστός



LiDAR

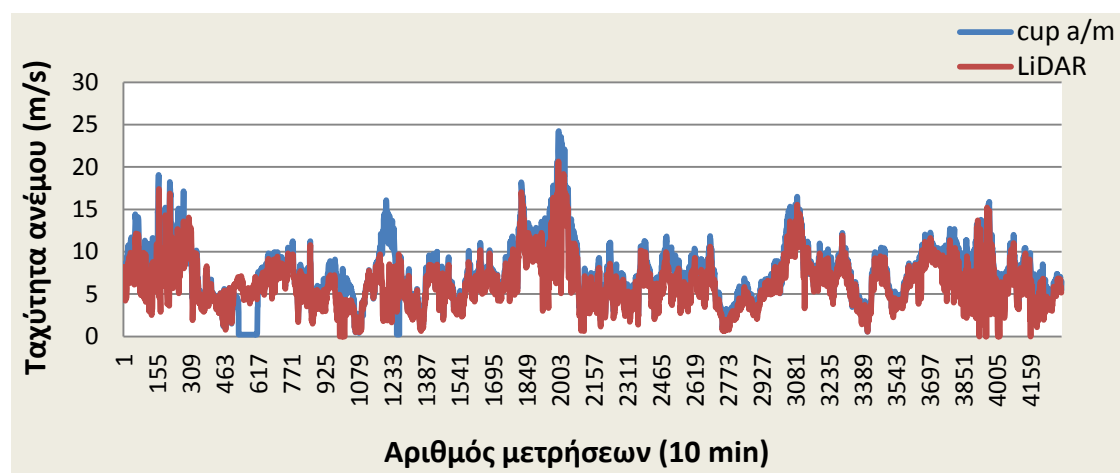
Διάγραμμα 8: Κατανομή πυκνότητας πιθανοτήτων Ιστού και LiDAR στα 44 m

4.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

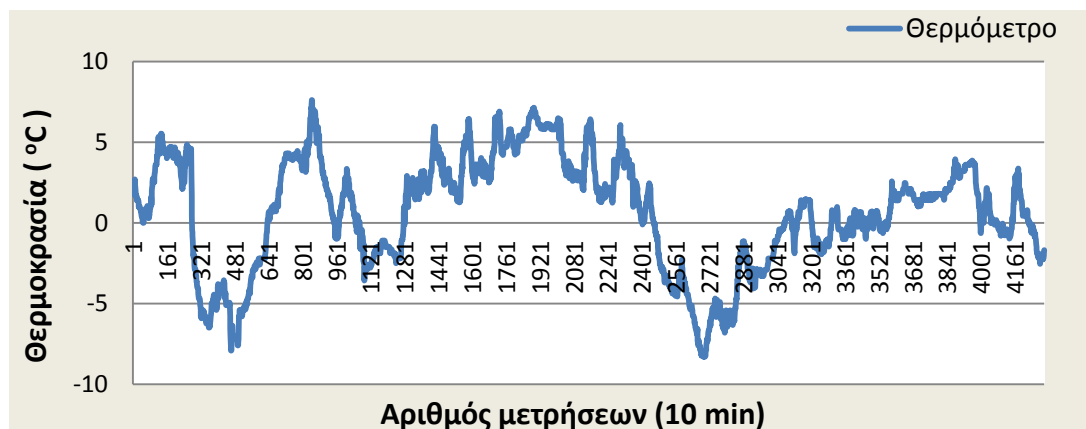
4.5.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΡΧΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Όπως προαναφέραμε στην αρχή αυτής της παραγράφου, το σύνολο των δεδομένων αυτής της περιόδου αποτελείται από 4302 δεκάλεπτα μετρήσεων. Ρίχνοντας μια γρήγορη ματιά στις μετρήσεις, παρατηρούμε πως υπάρχουν δεκάλεπτα στα δεδομένα του LiDAR για τα οποία δεν υπάρχει τιμή αλλά ένδειξη **NaN**. Η ένδειξη αυτή αντιπροσωπεύει δεκάλεπτα των οποίων ο θόρυβος ήταν μικρότερος των -22 db και για τα οποία το LiDAR αδυνατεί να δώσει μετρήσεις. Αντίστοιχα στον ιστό, υπάρχουν μετρήσεις στις οποίες τα όργανα υπολειπονται λόγω συσσώρευσης πάγου.

Το **διάγραμμα 9** μας δείχνει την διακύμανση της ταχύτητας σε σχέση με το χρόνο για τις 4302 αρχικές μετρήσεις ενώ στο **διάγραμμα 10** παριστάνουμε τη συσχέτιση τους.



Διάγραμμα 9: Σύγκριση ταχύτητας ανεμόμετρου και LiDAR με το χρόνο στα 44 m (μη επεξεργασμένες μετρήσεις).



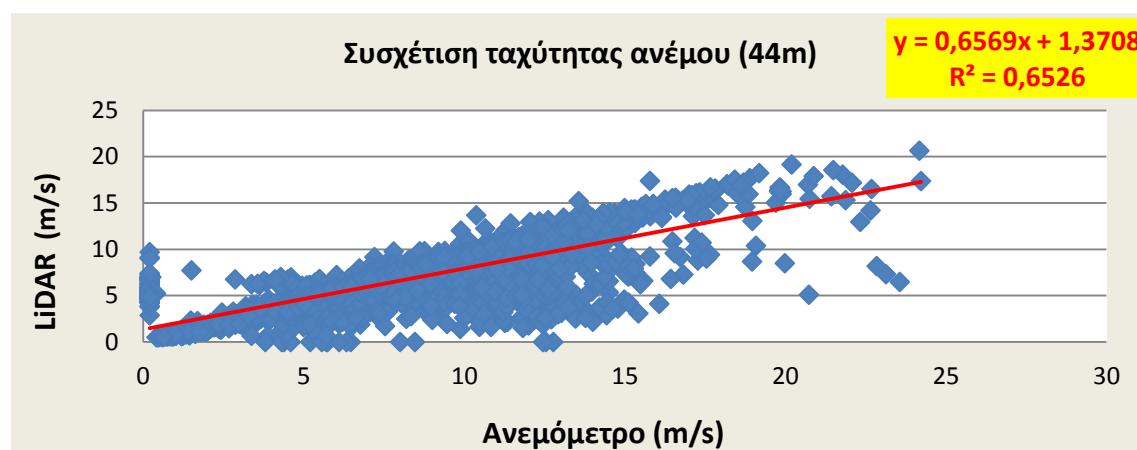
Διάγραμμα 1: Διακύμανση θερμοκρασίας με το χρόνο (θερμόμετρο 5 m)

Βλέπουμε ότι σε γενικές γραμμές υπάρχει μια καλή συσχέτιση των τιμών, αλλά υπάρχουν συγκεκριμένα διαστήματα που διαπιστώνουμε έντονες διαφορές.

Πιο συγκεκριμένα, εξετάζοντας παράλληλα τόσο τις μετρήσεις όσο και το **διάγραμμα 1** (το οποίο παραθέσαμε ξανά για να είναι πιο ευδιάκριτη η παρατήρηση μας), βλέπουμε πως κατά τα διαστήματα αυτά η θερμοκρασία του αέρα είναι σταθερά υπό το 0. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μη λειτουργία του ανεμομέτρου και κατά συνέπεια τη μηδενική ένδειξη ταχύτητας, όταν για τα αντίστοιχα δεκάλεπτα το LiDAR καταγράφει ταχύτητες μη μηδενικές.

Επίσης, διακρίνονται διαστήματα κατά τα οποία το LiDAR καταγράφει μηδενικές τιμές ενώ το ανεμόμετρο δείχνει μη μηδενικές ταχύτητες.

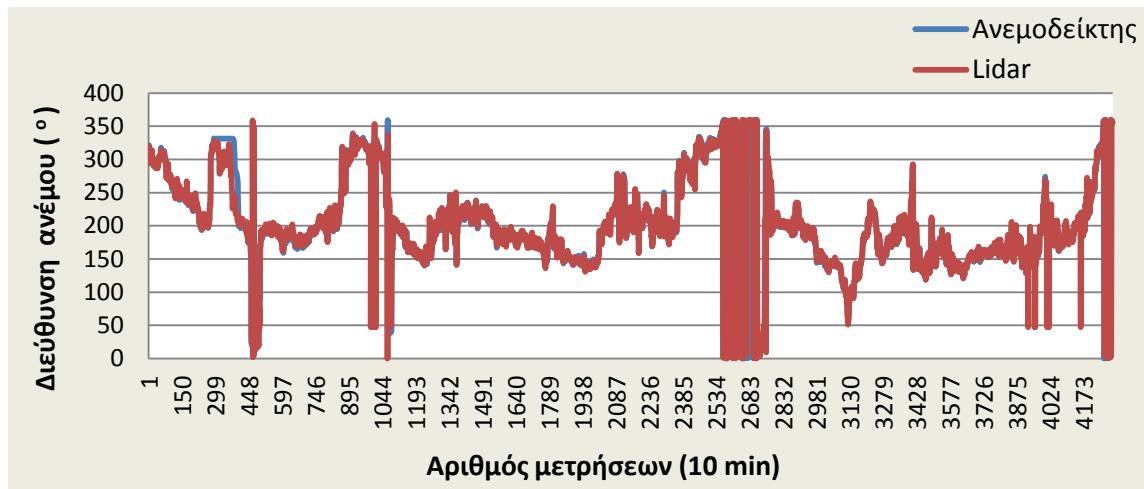
Ανατρέχοντας στα αντίστοιχα δεκάλεπτα, συμπεραίνουμε πως οφείλονται στην μικρή διαθεσιμότητα (low availability) ανά record του LiDAR, πιθανότατα λόγω των έντονων καιρικών φαινομένων (έντονες βροχές, χιονοπτώσεις, έντονη νέφωση).



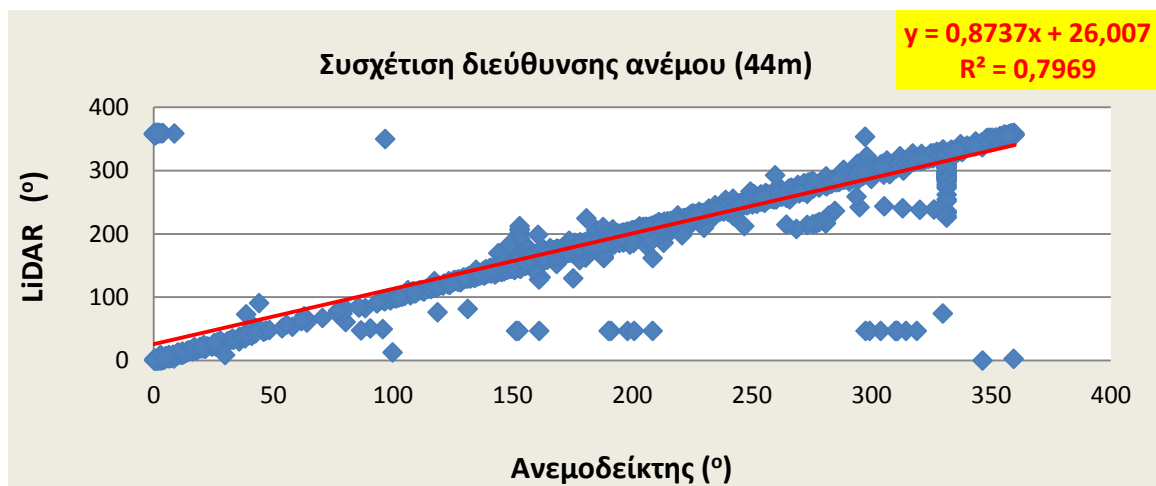
Διάγραμμα 10: Σύγκριση ταχύτητας ανεμομέτρου και LiDAR στα 44 m (μη επεξεργασμένες μετρήσεις).

Στο **διάγραμμα 10**, βλέπουμε ότι η συσχέτιση που παράγουν οι μετρήσεις για την ταχύτητα δεν είναι τόσο καλή, αφού ο δείκτης $R^2 = 0,6526$, ενώ θα πρέπει να τείνει στη μονάδα ($R^2 \rightarrow 1$), για να είναι καλύτερη η συσχέτιση.

Αντίστοιχα, **στο διάγραμμα 11**, παρατηρούμε ότι η απόκλιση των μετρήσεων για την διεύθυνση είναι πολύ μικρότερη, ωστόσο σε κάποια διαστήματα διακρίνονται κάποιες διαφορές. Αυτό οφείλεται στο ότι η θερμοκρασία που επικρατούσε στον αέρα στα διαστήματα αυτά ήταν υπό το 0 με αποτέλεσμα ο ανεμοδείκτης να παγώσει και να δείχνει για συνεχόμενα δεκάλεπτα την ίδια διεύθυνση.



Διάγραμμα 11: Σύγκριση διεύθυνσης ανεμοδείκτη και LiDAR με το χρόνο στα 44 m (μη επεξεργασμένες μετρήσεις).



Διάγραμμα 12: Σύγκριση διεύθυνσης ανεμοδείκτη και LiDAR στα 44 m (μη επεξεργασμένες μετρήσεις).

Τέλος, από το **διάγραμμα 12** συμπεραίνουμε ότι η συσχέτιση των μετρήσεων της διεύθυνσης του ανέμου είναι σχετικά καλή και ίση $R^2 = 0,7969$.

Βλέπουμε λοιπόν, ότι λόγω καιρικών συνθηκών βρήκαμε αρκετές μετρήσεις οι οποίες επηρεάζουν αρνητικά τα αποτελέσματά μας.

Έτσι λοιπόν στη συνέχεια θα εισάγουμε μια σειρά από κριτήρια, με κάθε ένα από τα οποία θα «φιλτράρουμε» τις μετρήσεις ώστε να εξάγουμε πιο έγκυρα συμπεράσματα.

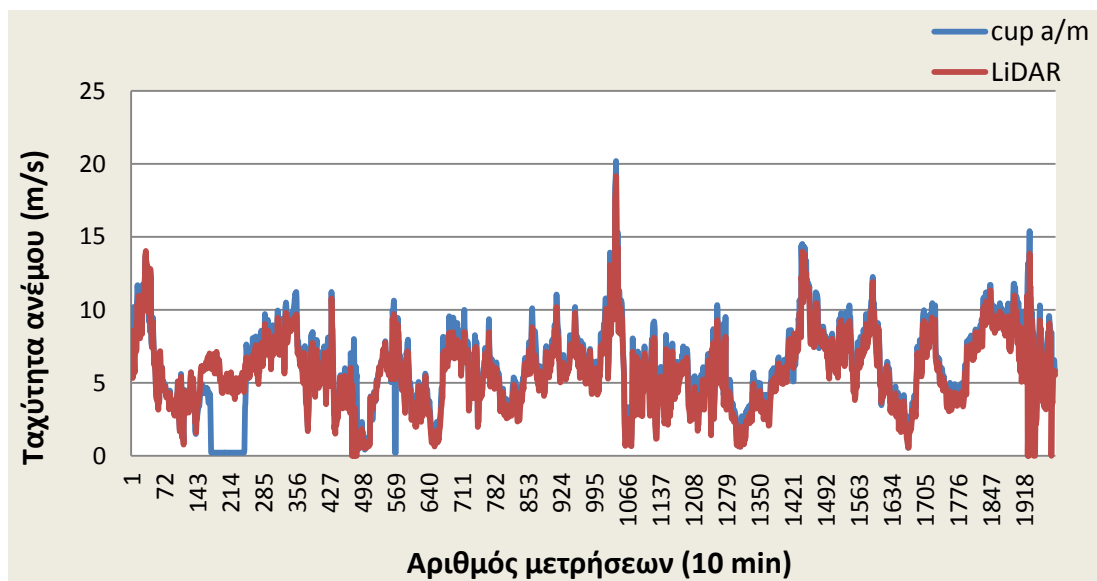
4.5.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗ ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΤΗΣ ΔΙΕΥΡΙΝΣΗΣ ΤΟΥ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ

Σε αυτό το σημείο, σύμφωνα με την υπόδειξη του κατασκευαστή, θα απομακρύνουμε τις μετρήσεις κατά τις οποίες η τυπική απόκλιση των συχνοτήτων του φάσματος είναι μεγαλύτερη του 0,4 ($d\sigma < 0,4$)

ΠΛΗΘΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ (%)
1985	46.14

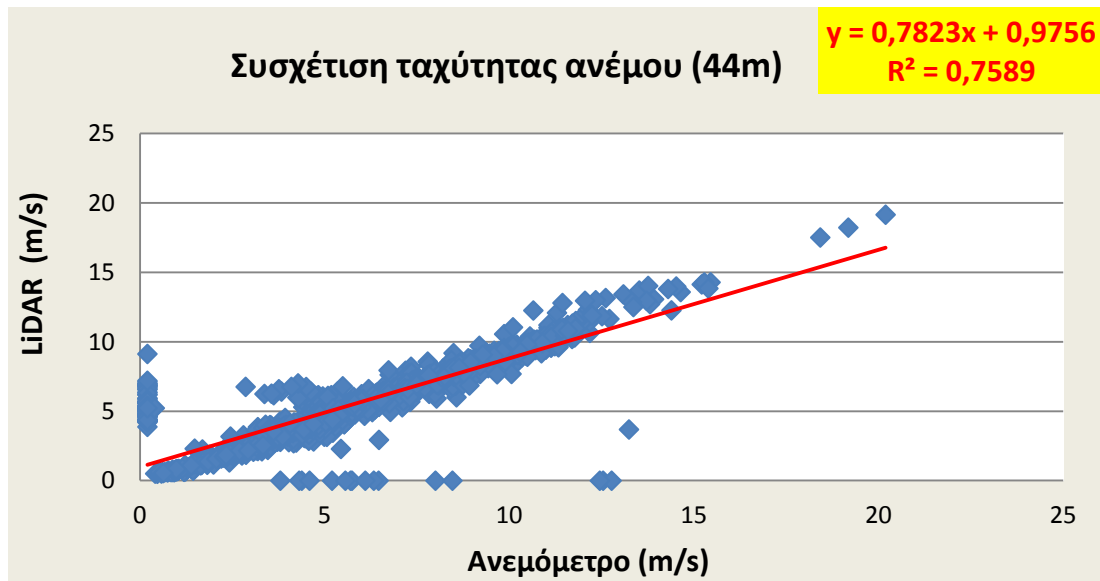
Πίνακας 4.2: Πλήθος μετρήσεων ανά επίπεδο σύγκρισης

Ακολούθως, στο διάγραμμα 13 απεικονίζεται η σύγκριση των ταχυτήτων με το χρόνο όπου βλέπουμε καλύτερη σύγκλιση των τιμών.



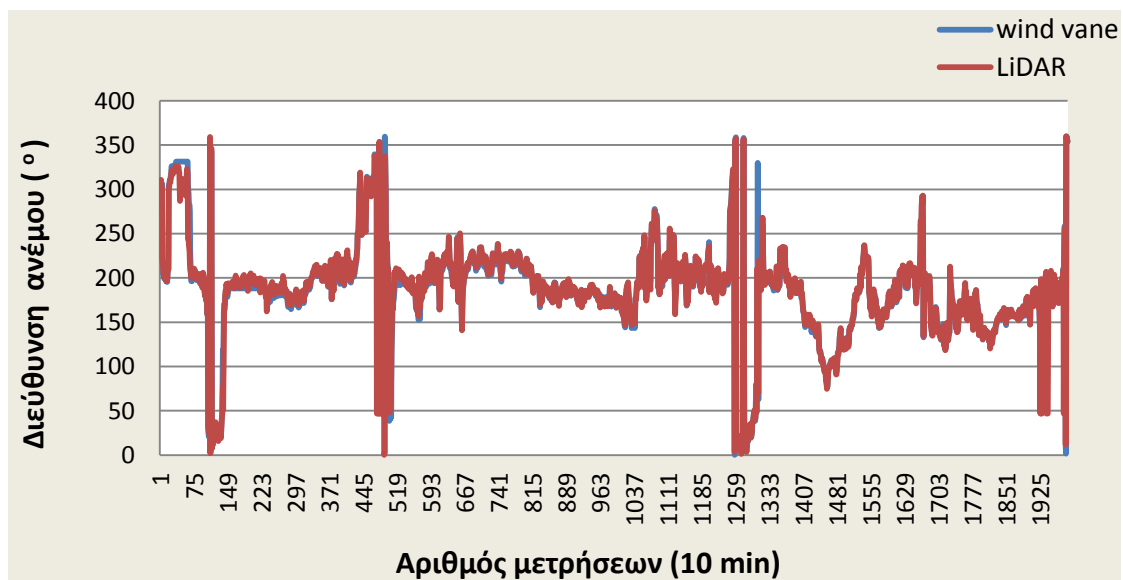
Διάγραμμα 13: Σύγκριση ταχύτητας ανεμόμετρου και LiDAR με το χρόνο στα 44 m ($d\sigma < 0,4$).

Στη συνέχεια, στο διάγραμμα 14 βλέπουμε τη συσχέτιση μεταξύ των ταχυτήτων η οποία βελτιώθηκε και είναι $R^2 = 0,7589$.



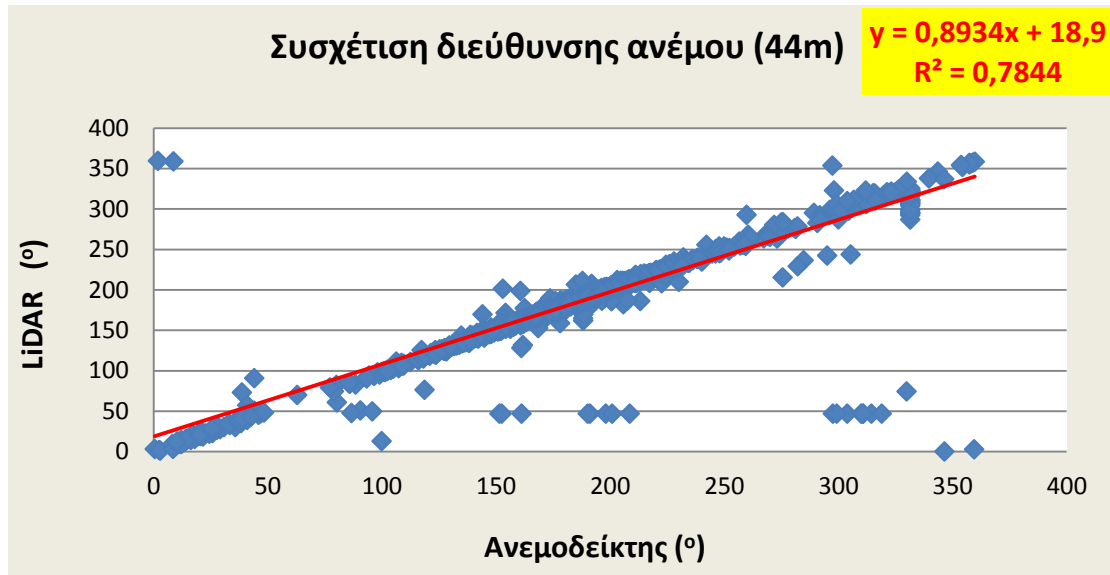
Διάγραμμα 14: Σύγκριση ταχύτητας ανεμομέτρου και LiDAR στα 44 m ($d\sigma < 0,4$).

Αντίστοιχα, στο διάγραμμα 15 απεικονίζουμε τη σύγκριση των διευθύνσεων του ιστού και του LiDAR



Διάγραμμα 15: Σύγκριση διεύθυνσης ανεμοδείκτη και LiDAR με το χρόνο στα 44 m ($d\sigma < 0,4$).

Τέλος, στο διάγραμμα 16 απεικονίζεται η συσχέτιση των διευθύνσεων που προκύπτει για το νέο πλήθος τιμών, η οποία έχει βελτιωθεί και είναι $R^2 = 0,7844$.



Διάγραμμα 16: Σύγκριση διεύθυνσης ανεμοδείκτη και LiDAR στα 44 m ($d\sigma < 0,4$).

4.5.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗ ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ

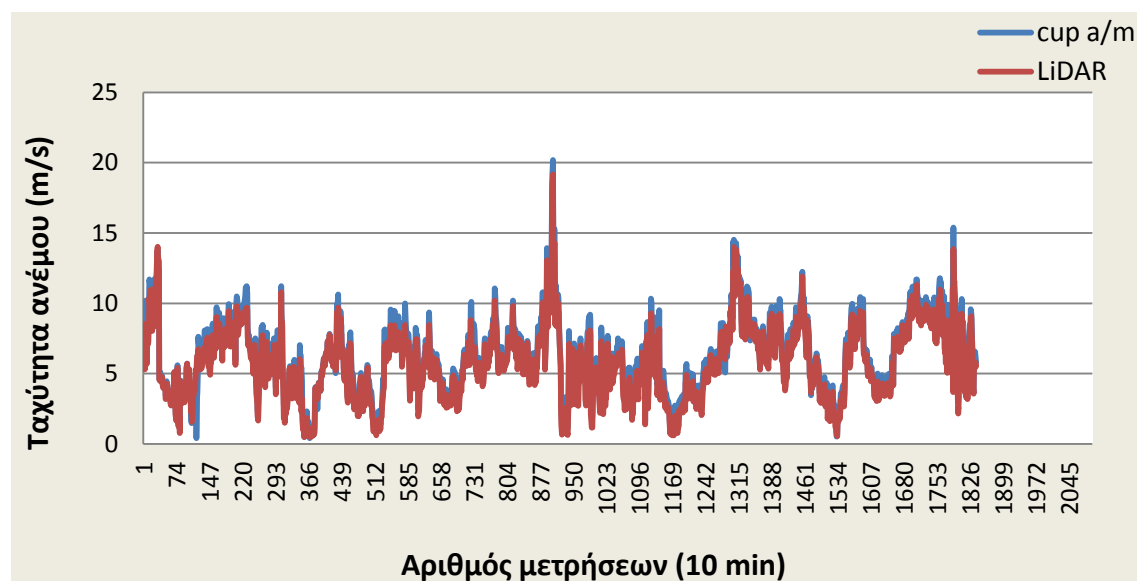
Με όσα αναφέραμε παραπάνω, θα πρέπει να αφαιρέσουμε τις μετρήσεις κατά τις οποίες τα όργανα του ιστού ήταν παγωμένα καθώς επίσης και αυτές που η διαθεσιμότητα του LiDAR ήταν 0.

Έτσι, μετά το φιλτράρισμα το σύνολο των μετρήσεων είναι 1840, δηλαδή το 42,7 % του αρχικού πλήθους.

ΠΛΗΘΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ (%)
1840	42,7

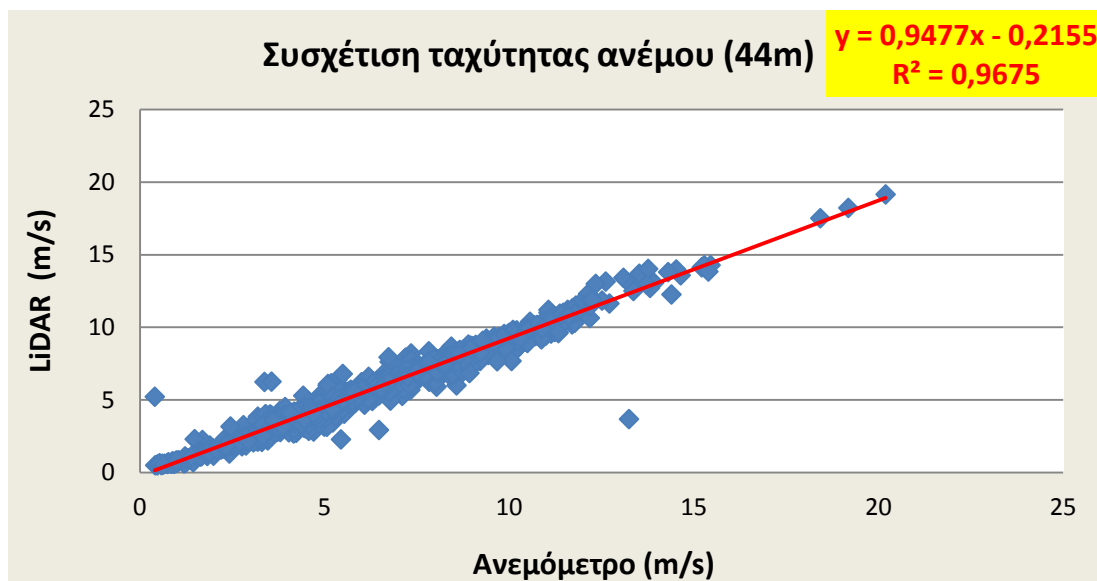
Πίνακας 4.3: Πλήθος μετρήσεων ανά επίπεδο σύγκρισης

Έτσι προκύπτει το **διάγραμμα 17** το οποίο απεικονίζει τη σύγκριση της ταχύτητας με το χρόνο ενώ το **διάγραμμα 18** παριστάνει την συσχέτιση της ταχύτητας που προέκυψε με το νέο πλήθος μετρήσεων.



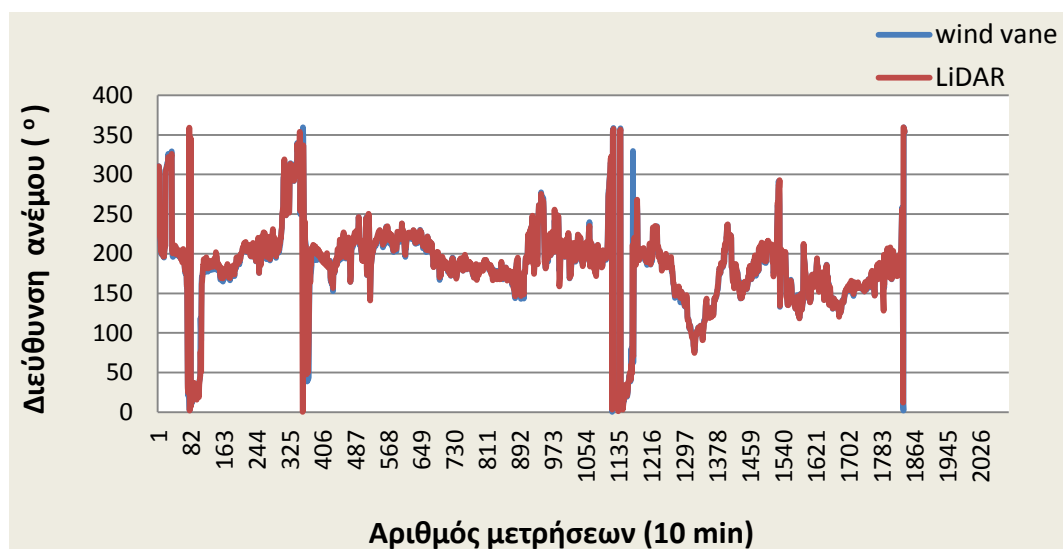
Διάγραμμα 17: Σύγκριση ταχύτητας ανεμόμετρου και LiDAR με το χρόνο στα 44 m (μη μηδενική διαθεσιμότητα οργάνων).

Βλέπουμε ότι έχουμε πολύ καλύτερα αποτελέσματα αφού ο συντελεστής της συσχέτισης τώρα είναι $R^2 = 0,9675$.

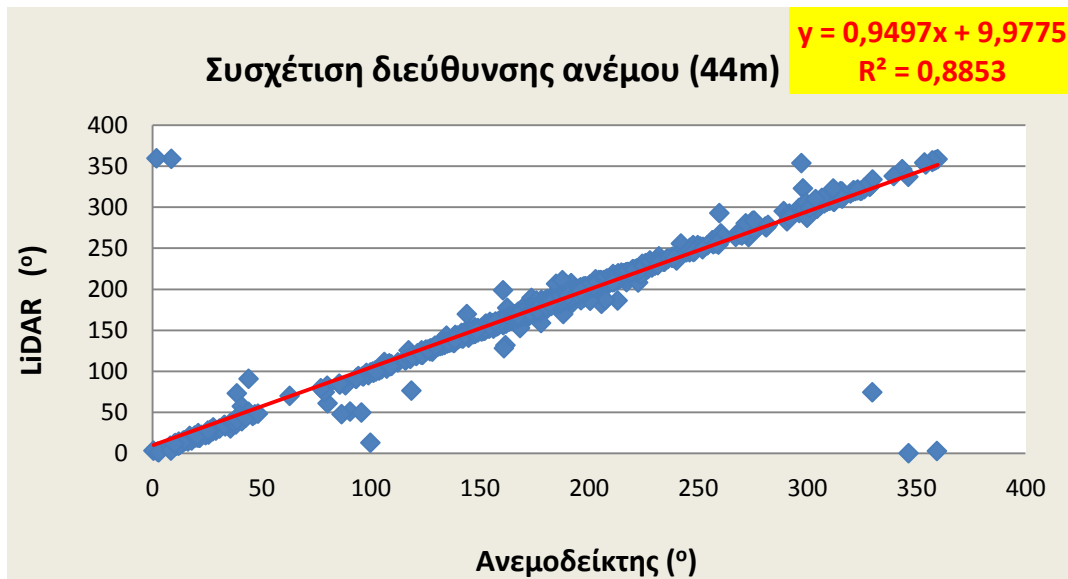


Διάγραμμα 18: Σύγκριση ταχύτητας ανεμομέτρου και LiDAR στα 44 m (μη μηδενική διαθεσιμότητα οργάνων).

Αντίστοιχα στον ανεμοδείκτη το **διάγραμμα 19** δείχνει τη σύγκριση της διεύθυνσης με το χρόνο ενώ το **διάγραμμα 20** τη συσχέτιση η οποία βελτιώνεται αρκετά και είναι $R^2 = 0,8853$.



Διάγραμμα 19: Σύγκριση διεύθυνσης ανεμοδείκτη και LiDAR με το χρόνο στα 44 m (μη μηδενική διαθεσιμότητα οργάνων).



Διάγραμμα 20: Σύγκριση διεύθυνσης ανεμοδείκτη και LiDAR στα 44 m (μη μηδενική διαθεσιμότητα οργάνων).

Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να αναφέρουμε το εξής:

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε πως κάποιες μετρήσεις δείχνουν να έχουν αρκετά μεγάλη απόκλιση, αλλά στην πραγματικότητα δεν έχουν. Αυτό συμβαίνει διότι δύο μετρήσεις με τιμές π.χ. 0 και 359, μπορεί αριθμητικά να απέχουν πολύ, αλλά σαν διευθύνσεις είναι πολύ κοντά. Οι μετρήσεις αυτές επηρεάζουν αρκετά την παραπάνω συσχέτιση που προκύπτει αλλά για να επιλυθεί αυτό το πρόβλημα έχουμε δύο επιλογές:

1. να τις επεξεργαστούμε, πράγμα που ίσως θα επηρέαζε την αξιοπιστία μετρήσεων
2. να τις διαγράψουμε, που θα ήταν λάθος, καθώς οι μετρήσεις είναι πραγματικές και συγκλίνουν.

Έτσι, αν και επηρεάζουν σημαντικά τον συντελεστή συσχέτισης R^2 , τις θεωρούμε σωστές και συνεχίζουμε.

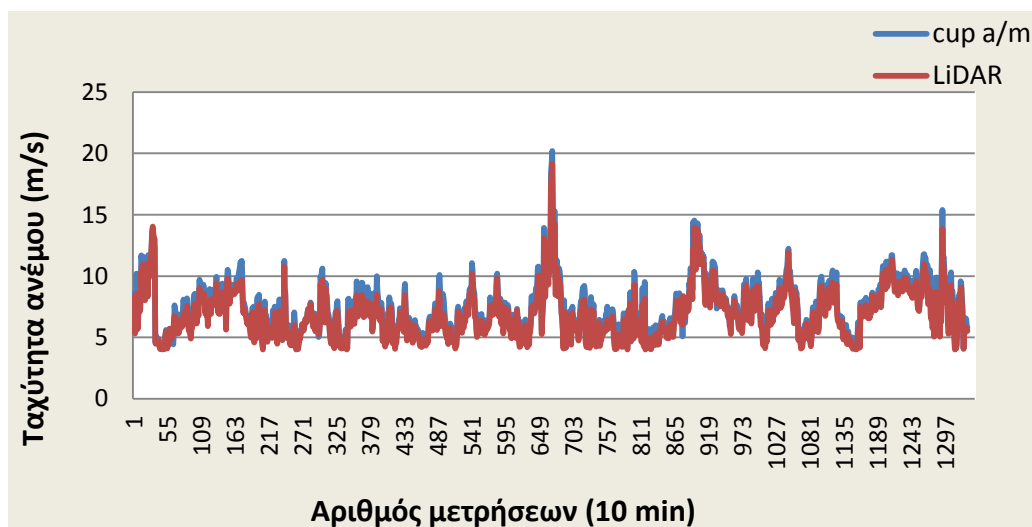
4.5.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΕΥΡΟΣ ΤΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ

Μέχρι στιγμής, τόσο στα διαγράμματα των ταχυτήτων όσο και σε αυτά των διευθύνσεων, έχουμε υπόψη μας όλο το φάσμα τιμών των ταχυτήτων που μετρήθηκαν (0,2 m/s – 24,2 m/s). Όμως, είναι γνωστό ότι οι ανεμογεννήτριες ξεκινούν τη λειτουργία τους συνήθως στα 4 m/s, γι' αυτό στο επόμενο στάδιο των συγκρίσεων μας θα αφαιρέσουμε τις μετρήσεις στις οποίες η ταχύτητα είναι μικρότερη από 4 m/s. Το πλήθος που προκύπτει είναι 1333 και αντιστοιχεί στο 30,98 του αρχικού.

ΠΛΗΘΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ (%)
1333	30,98

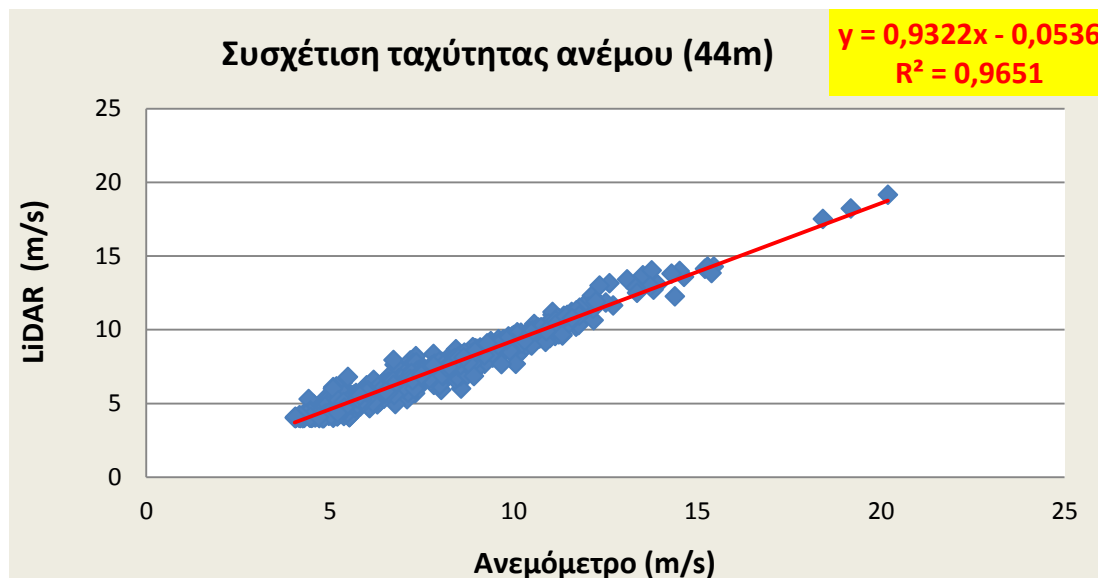
Πίνακας 4.4: Πλήθος μετρήσεων ανά επίπεδο σύγκρισης

Έτσι προκύπτει το **διάγραμμα 21** που δείχνουμε τη σύγκριση των ταχυτήτων με το χρόνο και το **διάγραμμα 22** για τη νέα συσχέτιση μεταξύ των ταχυτήτων.



Διάγραμμα 21 : Σύγκριση ταχύτητας ανεμόμετρου και LiDAR με χρόνο στα 44 m (ταχύτητα ≥ 4 m/s).

Βλέπουμε λοιπόν ότι η συσχέτιση στο **διάγραμμα 22**, για την ταχύτητα, ο δείκτης συσχέτισης παραμένει πολύ κάλος και είναι $R^2 = 0,9651$, δηλαδή έχουμε μία ελάχιστη μείωση.



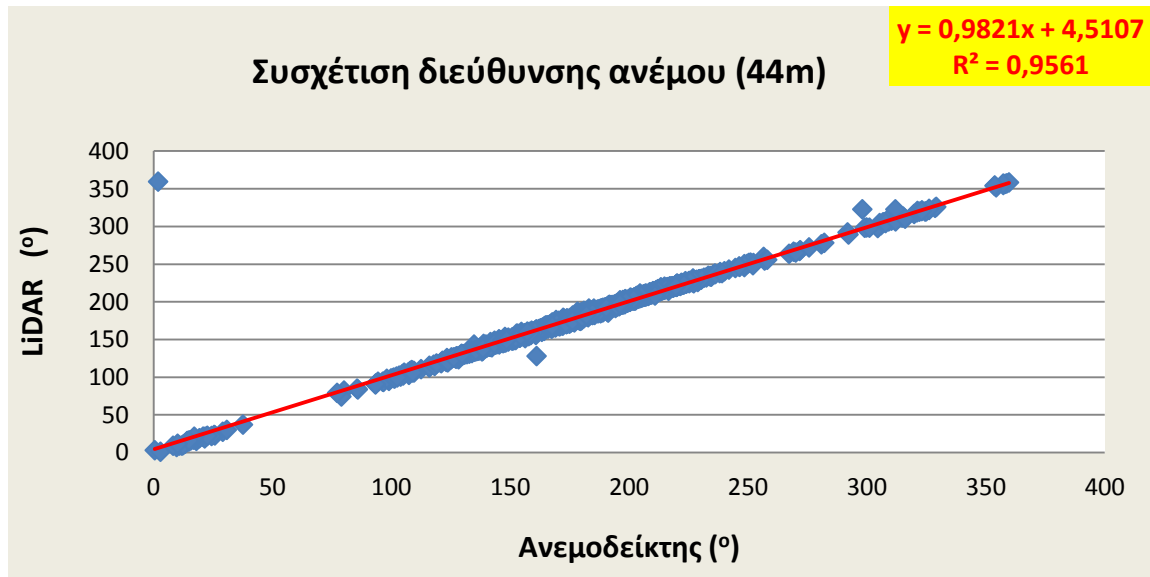
Διάγραμμα 22: Σύγκριση ταχύτητας ανεμομέτρου και LiDAR στα 44 m (ταχύτητα ≥ 4 m/s).

Ακολουθώς, στο **διάγραμμα 23** βλέπουμε την διακύμανση των διευθύνσεων με το χρόνο.



Διάγραμμα 23: Σύγκριση διεύθυνσης ανεμοδείκτη και LiDAR με το χρόνο στα 44 m (ταχύτητα > 4 m/s).

Αντίθετα, για τον ανεμοδείκτη στο **διάγραμμα 24** παρατηρούμε μια πολύ καλύτερη τιμή συσχέτισης, $R^2 = 0,9561$, από το οποίο συμπεράνουμε πως για τις τιμές των ταχυτήτων που μας αφορούν, το LiDAR δίνει τη διεύθυνση του ανέμου στο αντίστοιχο ύψος με μεγάλη ακρίβεια, πράγμα πολύ σημαντικό για μια μελλοντική εγκατάσταση αιολικού πάρκου.



Διάγραμμα 24: Σύγκριση διεύθυνσης ανεμοδείκτη και LiDAR στα 44 m (ταχύτητα > 4 m/s).

4.5.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗ ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΚΑΤΑΓΡΑΦΩΝ ΑΝΑ RECORD

Στη συνέχεια, θέλοντας να συγκρίνουμε μετρήσεις με μεγαλύτερη αξιοπιστία, προσπαθήσαμε να επικεντρωθούμε σε δεκάλεπτα με μεγαλύτερη διαθεσιμότητα μετρήσεων (availability). Είναι προφανές ότι όσο πιο μεγάλο είναι το ποσοστό διαθεσιμότητας μια μέτρησης, τόσο πιο αξιόπιστη είναι η τιμή της.

4.5.5.1 Διαθεσιμότητα > του 50 %

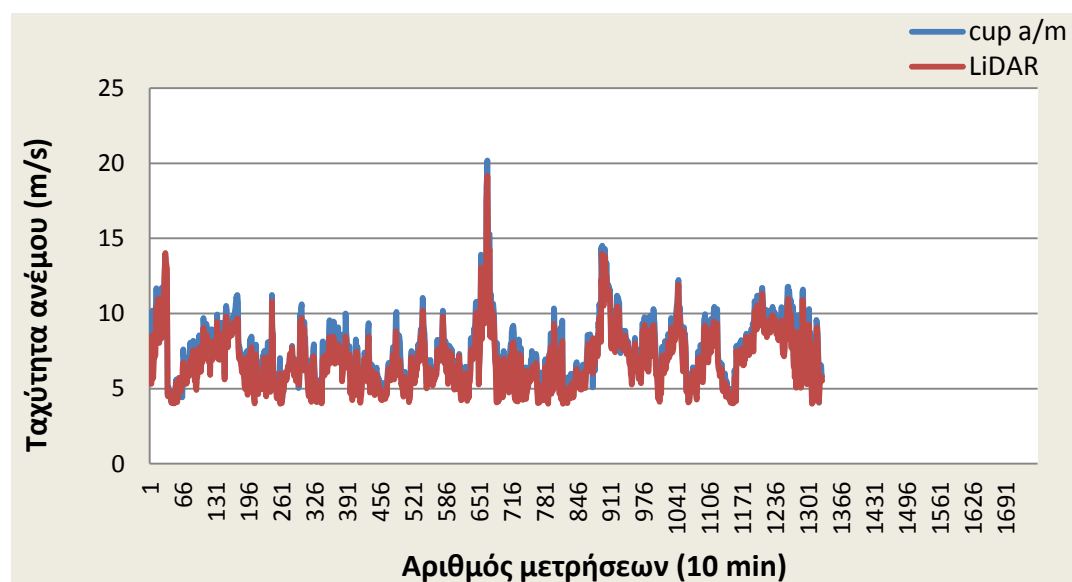
Αρχικά, αφαιρέσαμε όλες τις τιμές με διαθεσιμότητα κάτω του 50 % και φτιάξαμε τα διαγράμματα συσχέτισης για την ταχύτητα και τη διεύθυνση του ανέμου, ενώ έπειτα συνεχίσαμε για μεγαλύτερες τιμές διαθεσιμότητας.

Το πλήθος των μετρήσεων που προκύπτει είναι 1329 και αντιστοιχεί στο 30,89 % του αρχικού.

ΠΛΗΘΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ (%)
1329	30,89

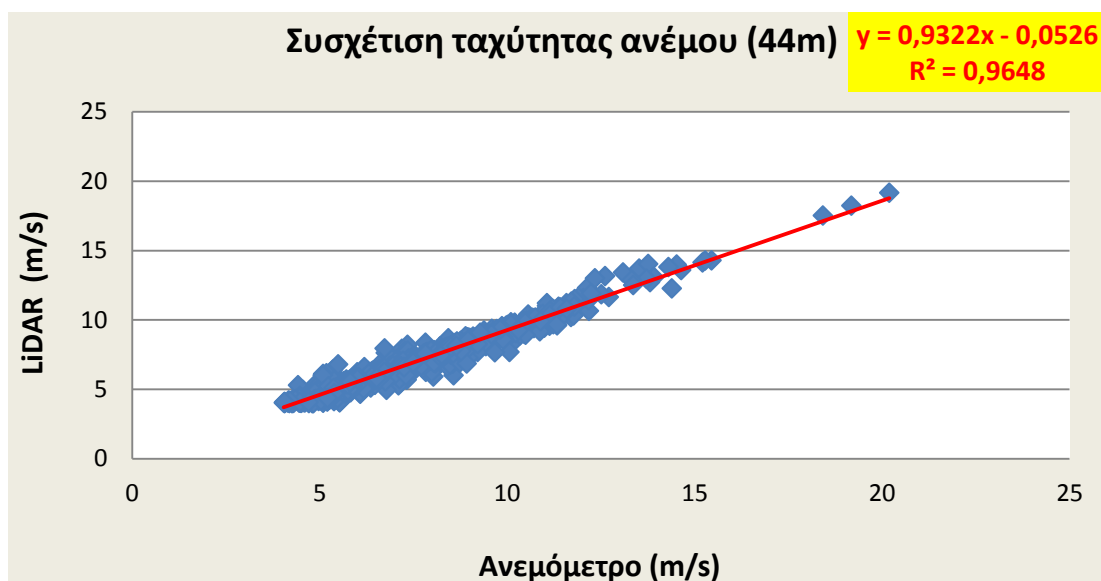
Πίνακας 4.5: Πλήθος μετρήσεων ανά επίπεδο σύγκρισης

Αρχικά, στο **διάγραμμα 25** βλέπουμε τη σύγκριση των ταχυτήτων με το χρόνο.



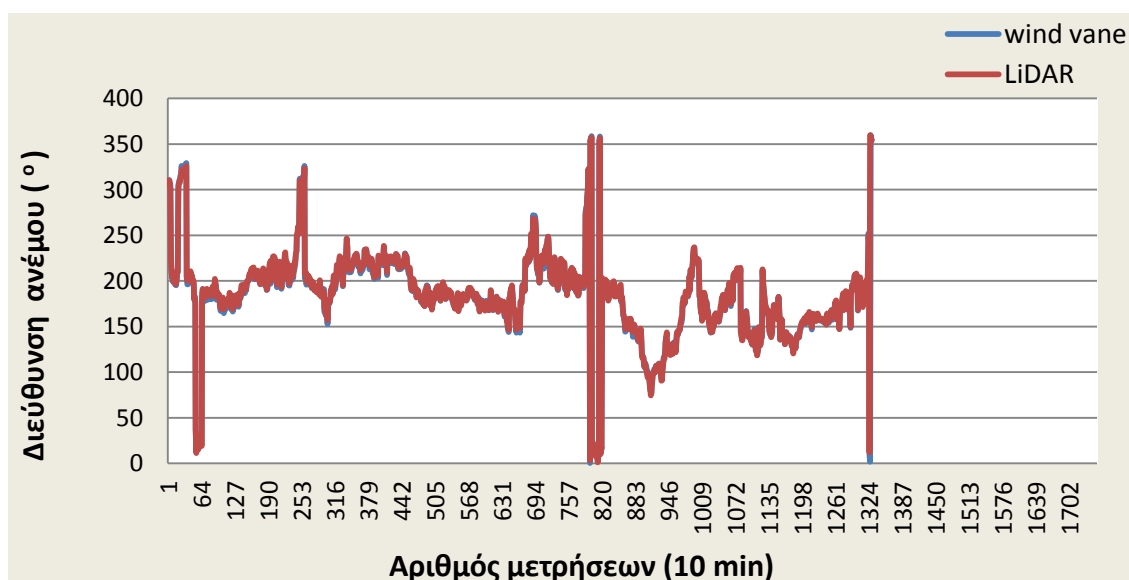
Διάγραμμα 25: Σύγκριση ταχύτητας ανεμομέτρου και LiDAR με το χρόνο στα 44 m (διαθεσιμότητα>50%).

Ακολουθως, βλέπουμε ότι στο **διάγραμμα 26** η συσχέτιση από τη σύγκριση των ταχυτήτων παραμένει το ίδιο ιακοποιητική και είναι $R^2 = 0,9648$.

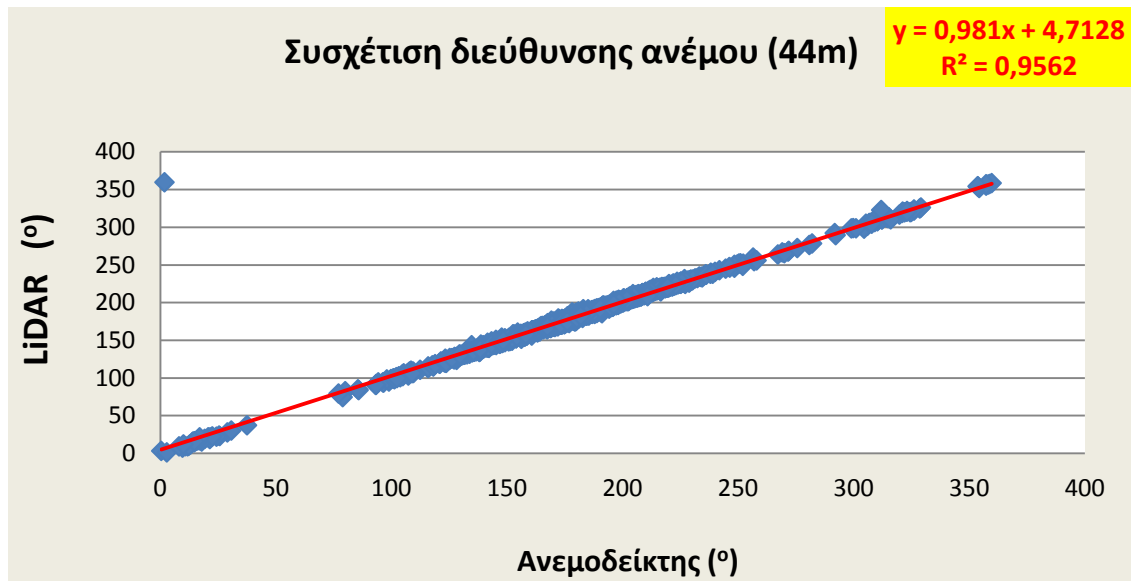


Διάγραμμα 26: Σύγκριση ταχύτητας ανεμομέτρου και LiDAR στα 44 m (διαθεσιμότητα>50%).

Στην συνέχεια, παραθέτουμε το **διάγραμμα 27** με τη σύγκριση των διευθύνσεων με το χρόνο ενώ στο **διάγραμμα 28** απεικονίζουμε την συσχέτισή τους.



Διάγραμμα 27: Σύγκριση διευθύνσεων ανεμοδείκτη και LiDAR με το χρόνο στα 44 m (διαθεσιμότητα>50%).



Διάγραμμα 28: Σύγκριση διεύθυνσης ανεμοδείκτη και LiDAR στα 44 m (διαθρονημότητα>50%).

Βλέπουμε λοιπόν ότι ο δείκτης συσχέτισης παραμένει ίδιος και είναι $R^2 = 0,9562$.

4.5.5.2 Διαθεσιμότητα > του 80 %

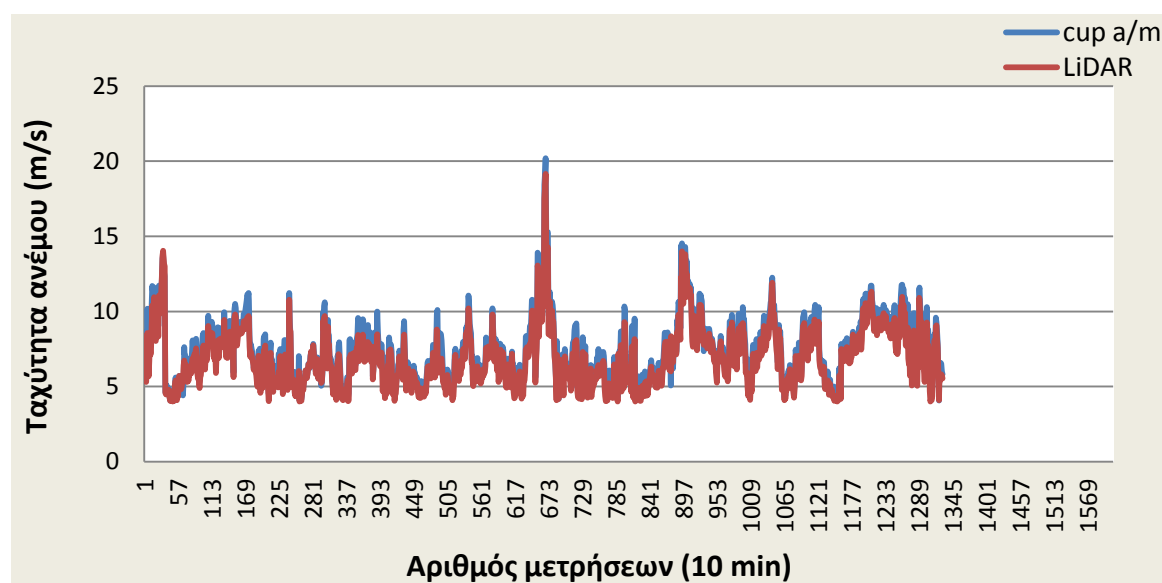
Στη επόμενη υποκεφάλαια θα επαναλάβουμε την ίδια διαδικασία και θα αφαιρέσουμε σταδιακά μετρήσεις με όλο και μικρότερη διαθεσιμότητα δεκαλέπτου παραθέτοντας τα αντίστοιχα διαγράμματα συσχέτισης.

Οι μετρήσεις με διαθεσιμότητα μεγαλύτερη του 80 % είναι 1328 και αποτελούν το 30,86 % του αρχικού πλήθους.

ΠΛΗΘΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ (%)
1328	30,86

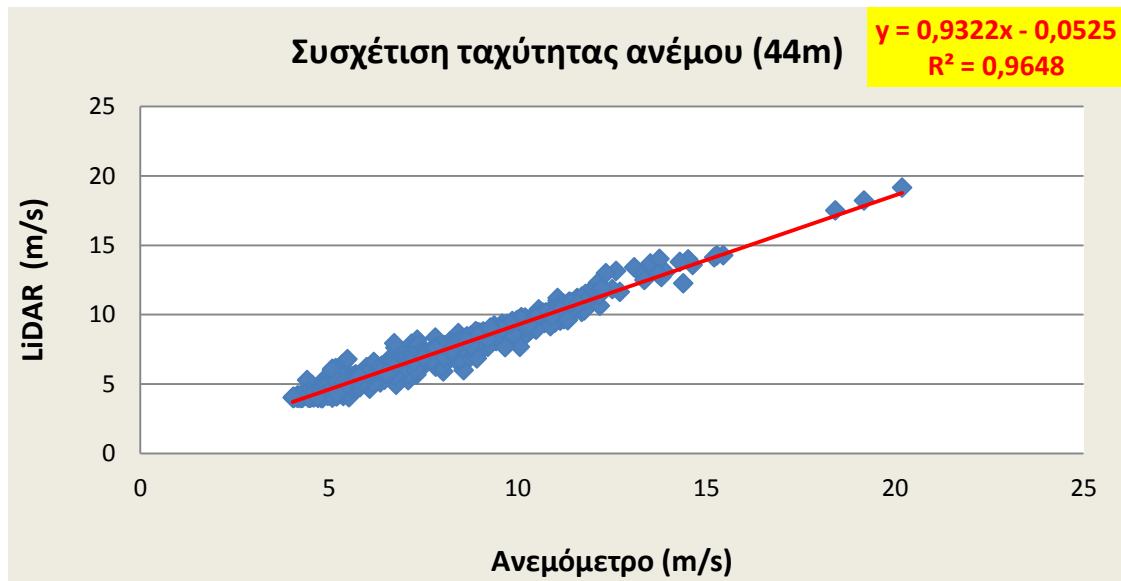
Πίνακας 4.6: Πλήθος μετρήσεων ανά επίπεδο σύγκρισης

Αρχικά βλέπουμε το **διάγραμμα 29** με τη σύγκριση των ταχυτήτων με το χρόνο.



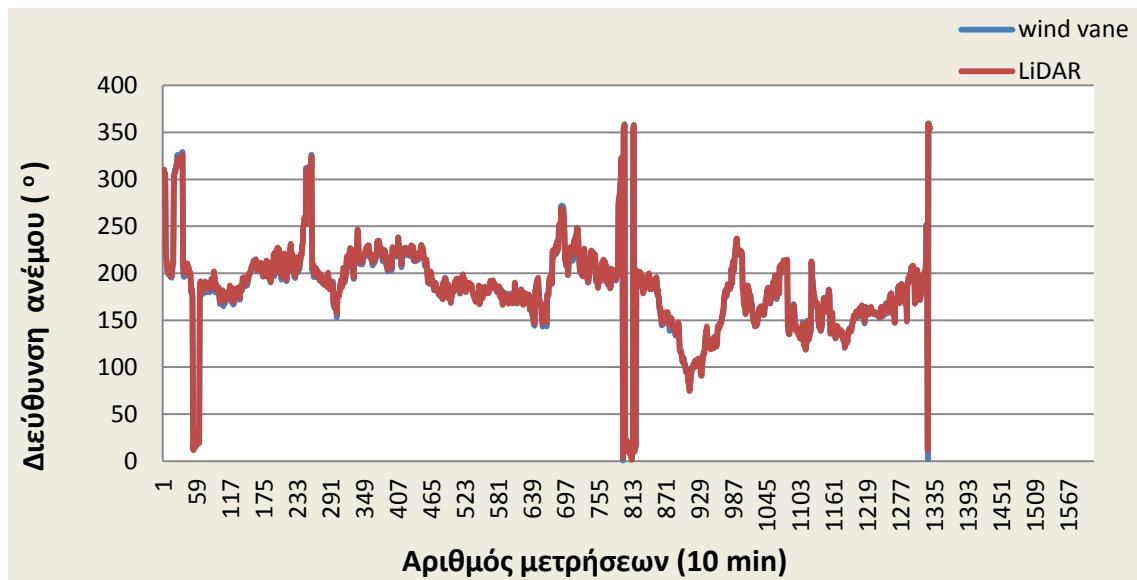
Διάγραμμα 29: Σύγκριση ταχύτητας ανεμόμετρου και LiDAR με το χρόνο στα 44 m (διαθεσιμότητα>80%).

Ακολουθως παραθέτουμε το **διάγραμμα 30** με τη συσχέτιση των ταχυτήτων όπου βλέπουμε πως παραμένει ίδια και είναι $R^2 = 0,9648$.



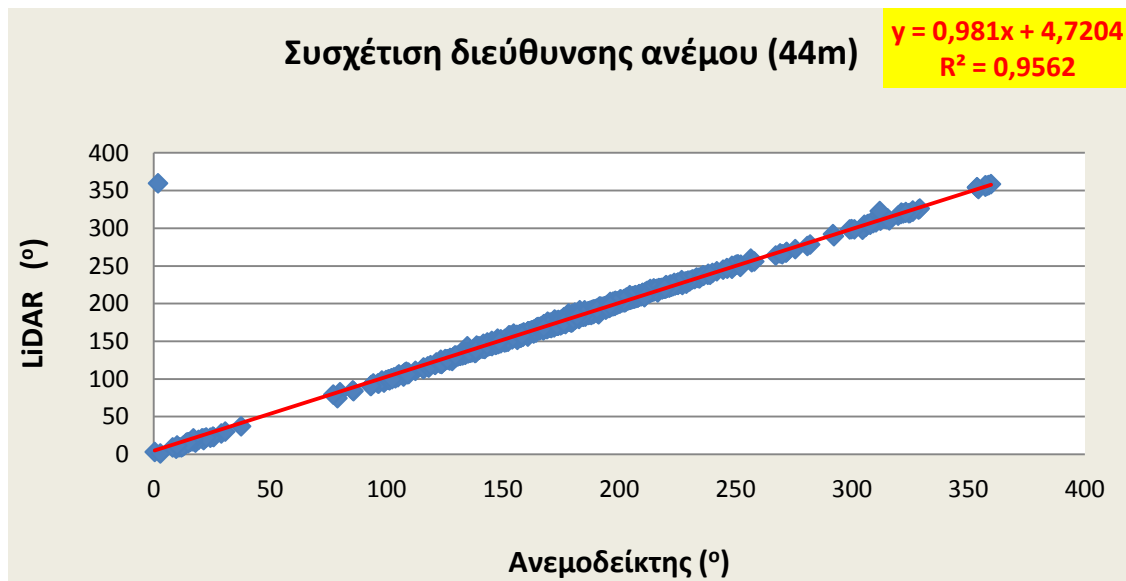
Διάγραμμα 30: Σύγκριση ταχύτητας ανεμομέτρου και LiDAR στα 44 m (διαθεσιμότητα>80%).

Αντίστοιχα, το **διάγραμμα 31** μας δείχνει την σύγκριση των διευθύνσεων με το χρόνο.



Διάγραμμα 31: Σύγκριση διευθύνσεων ανεμοδείκτη και LiDAR με το χρόνο στα 44 m (διαθεσιμότητα>80%).

Στη συνέχεια, στο **διάγραμμα 32** απεικονίζεται η συσχέτιση που προκύπτει για τις διευθύνσεις όπου βλέπουμε ότι είναι $R^2 = 0,9562$, δηλαδή παρέμεινε αμετάβλητη.



Διάγραμμα 32: Σύγκριση διεύθυνσης ανεμοδείκτη και LiDAR στα 44 m (διαθεσιμότητα >80%).

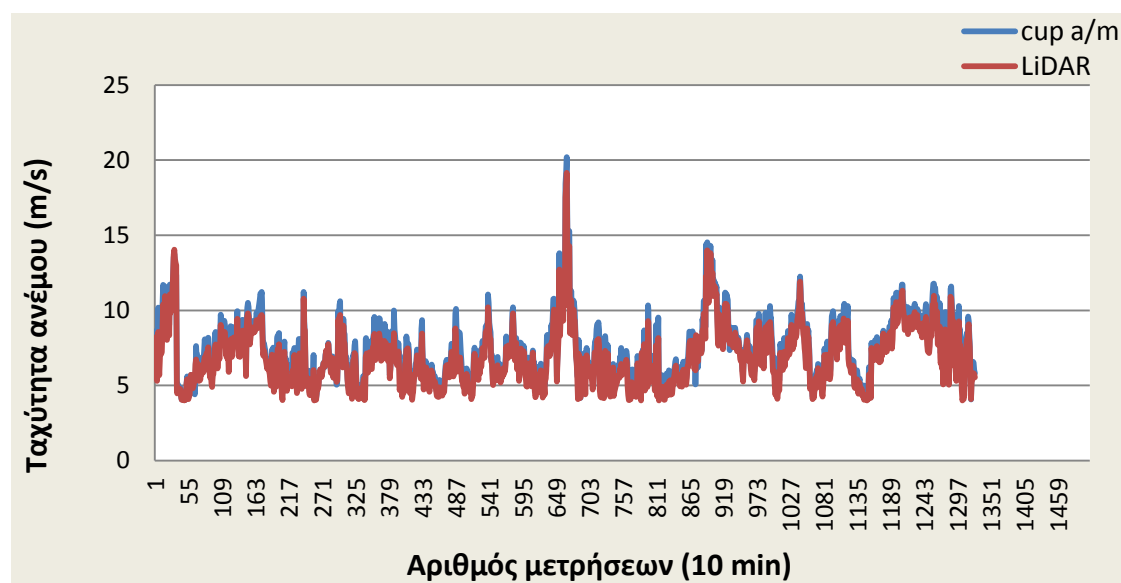
4.5.5.3 Διαθεσιμότητα > του 90 %

Ακολουθως, αφαιρώντας τις τιμές με διαθεσιμότητα μικρότερη του 90 % το πλήθος των μετρήσεων είναι 1325 και αντιστοιχεί στο 30,79 % του αρχικού.

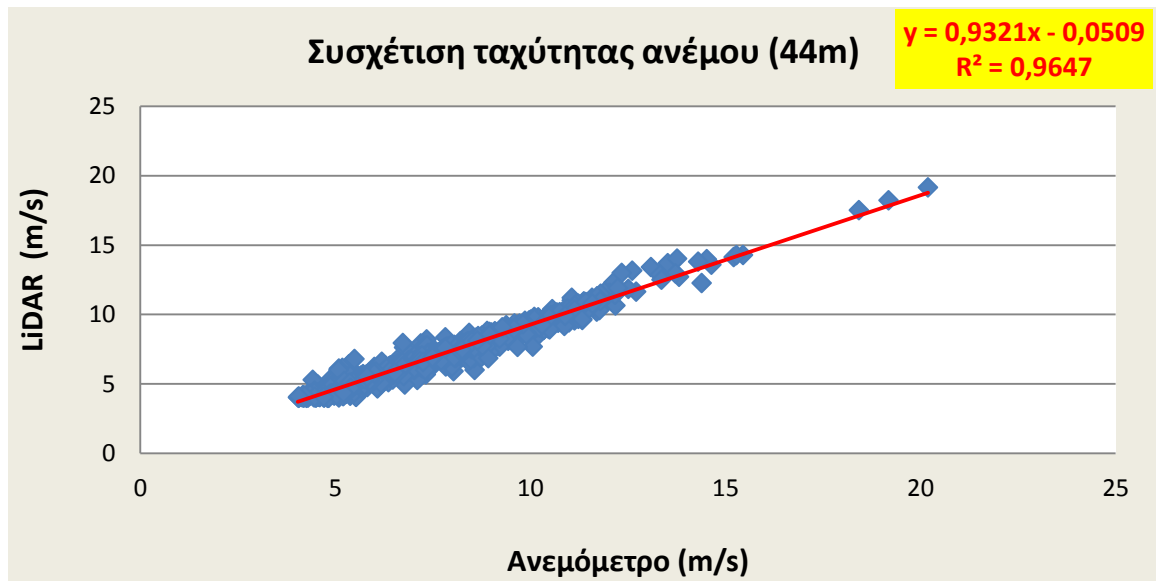
ΠΛΗΘΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ (%)
1325	30,79

Πίνακας 4.7: Πλήθος μετρήσεων ανά επίπεδο σύγκρισης

Στο **διάγραμμα 33** που ακολουθεί βλέπουμε τη σύγκριση των ταχυτήτων με το χρόνο ενώ στο **διάγραμμα 34** απεικονίζουμε την συσχέτιση τους.



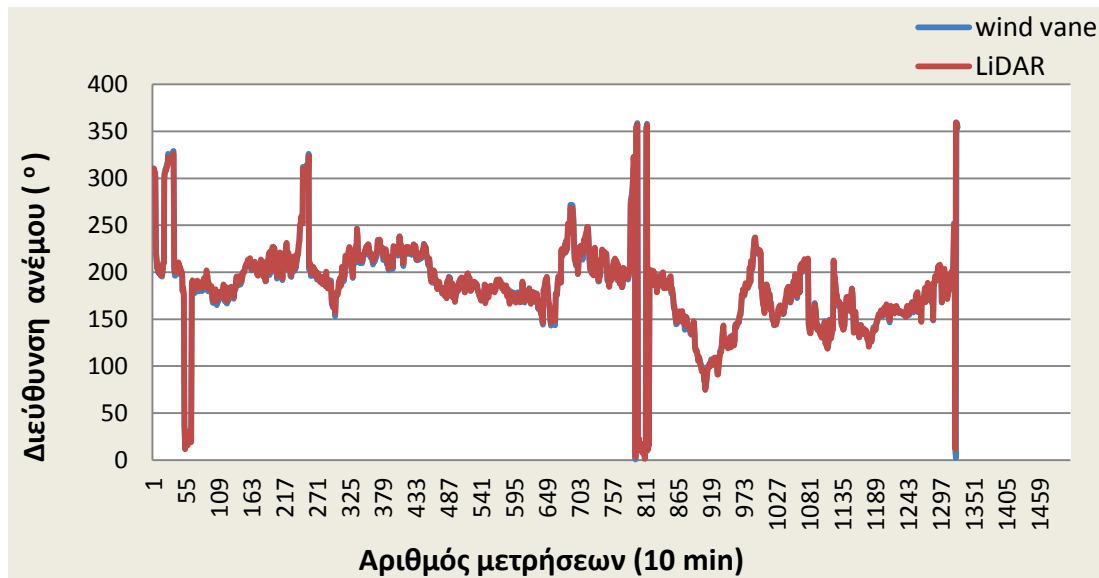
Διάγραμμα 33: Σύγκριση ταχύτητας ανεμόμετρου και LiDAR με το χρόνο στα 44 m (διαθεσιμότητα>90%).



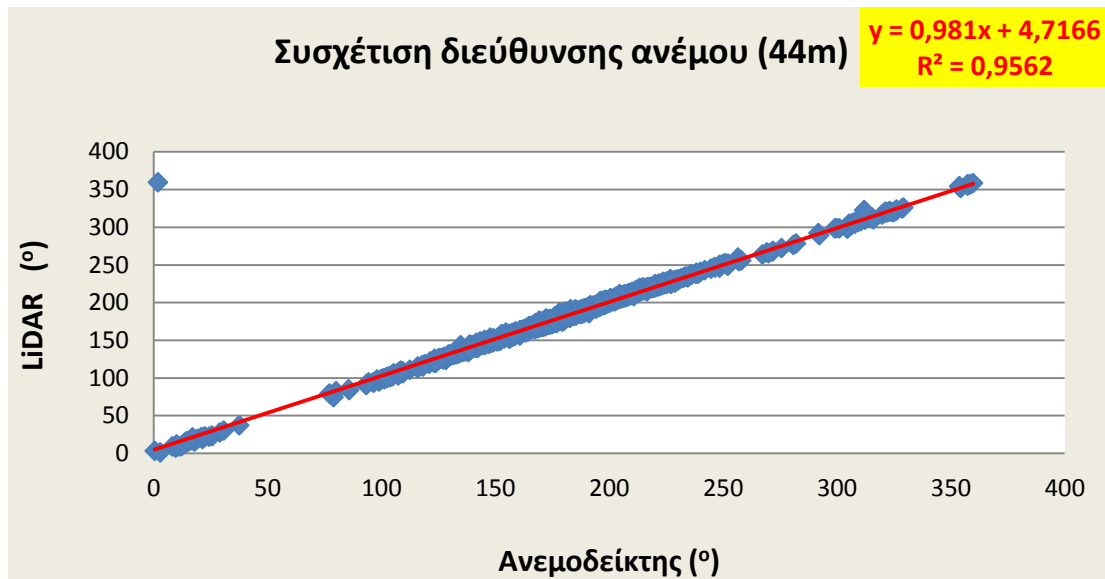
Διάγραμμα 34: Σύγκριση ταχύτητας ανεμομέτρου και LiDAR στα 44 m (διαθεσιμότητα > 90%).

Βλέπουμε ότι η συσχέτιση παραμένει ίδια και είναι $R^2 = 0,9647$.

Ακολουθως βλέπουμε τη σύγκριση των διευθύνσεων για μετρήσεις με διαθεσιμότητα > 90 % (διάγραμμα 35) και εν συνεχεία στο διάγραμμα 36 τη συσχέτιση τους.



Διάγραμμα 35: Σύγκριση διεύθυνσης ανεμοδείκτη και LiDAR με το χρόνο στα 44 m (διαθεσιμότητα > 90%).



Διάγραμμα 36: Σύγκριση διεύθυνσης ανεμοδείκτη και LiDAR στα 44 m (διαθεσιμότητα >90%).

Παρατηρούμε πως η συσχέτιση παραμένει ίδια και είναι $R^2 = 0,9562$.

4.5.5.4 Διαθεσιμότητα = 100 %

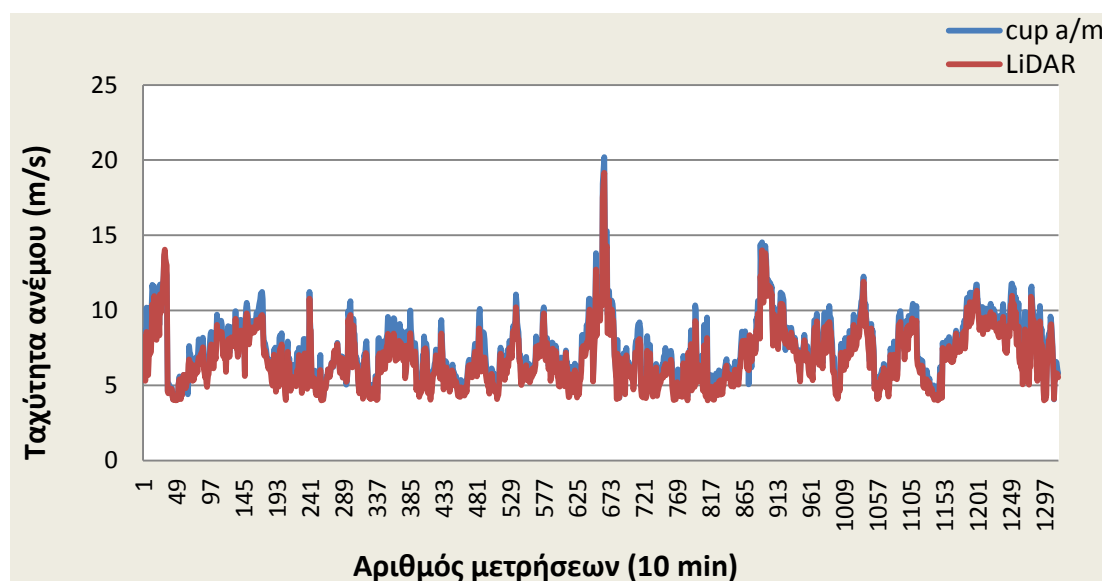
Τέλος, σε αυτό το σημείο θα συγκρίνουμε και θα προσπαθήσουμε να δούμε τι συμβαίνει στις μετρήσεις με διαθεσιμότητα 100 %.

Αφαιρώντας λοιπόν όλες τις μετρήσεις με διαθεσιμότητα μικρότερη του 100 %, έχουμε ένα σύνολο 1317 μετρήσεων που αντιστοιχεί στο 30,6 %.

ΠΛΗΘΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ (%)
1317	30,6

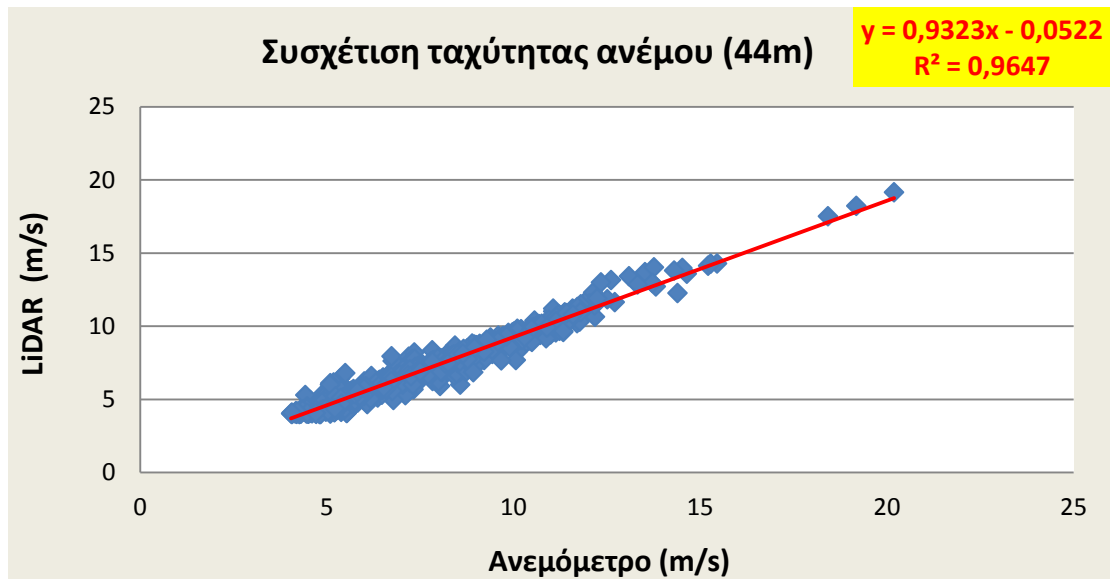
Πίνακας 4.8: Πλήθος μετρήσεων ανά επίπεδο σύγκρισης

Στο **διάγραμμα 37** απεικονίζεται η σύγκριση των ταχυτήτων για τιμές με διαθεσιμότητα 100%.



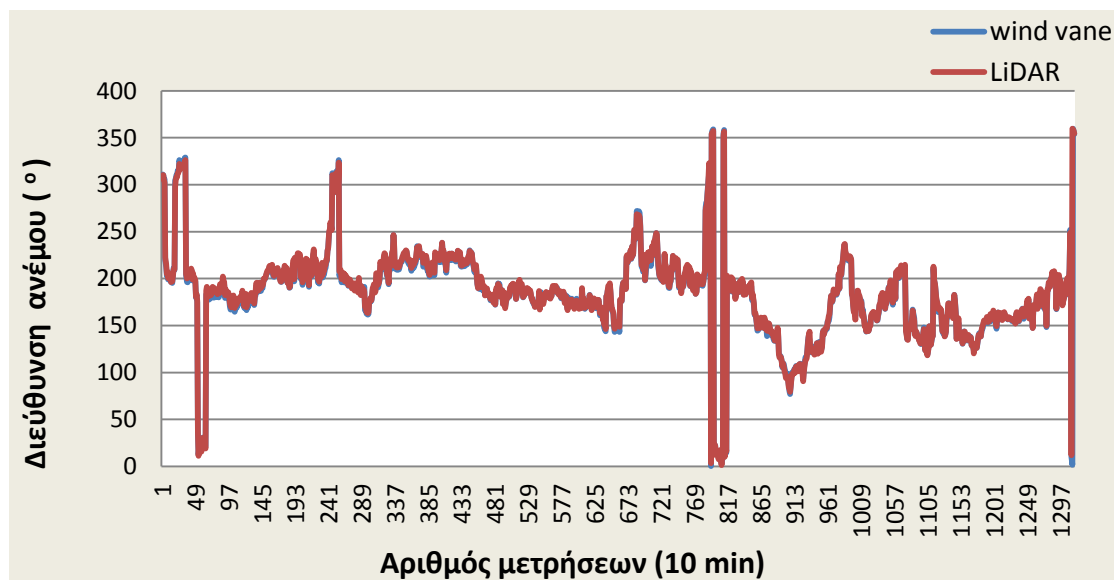
Διάγραμμα 37: Σύγκριση ταχύτητας ανεμομέτρου και LiDAR με το χρόνο στα 44 m (διαθεσιμότητα=100 %).

Ακολουθώντας στο **διάγραμμα 38**, βλέπουμε τη συσχέτιση που προκύπτει και είναι $R^2 = 0,9647$, δηλαδή παραμένει ακριβώς ίδια.

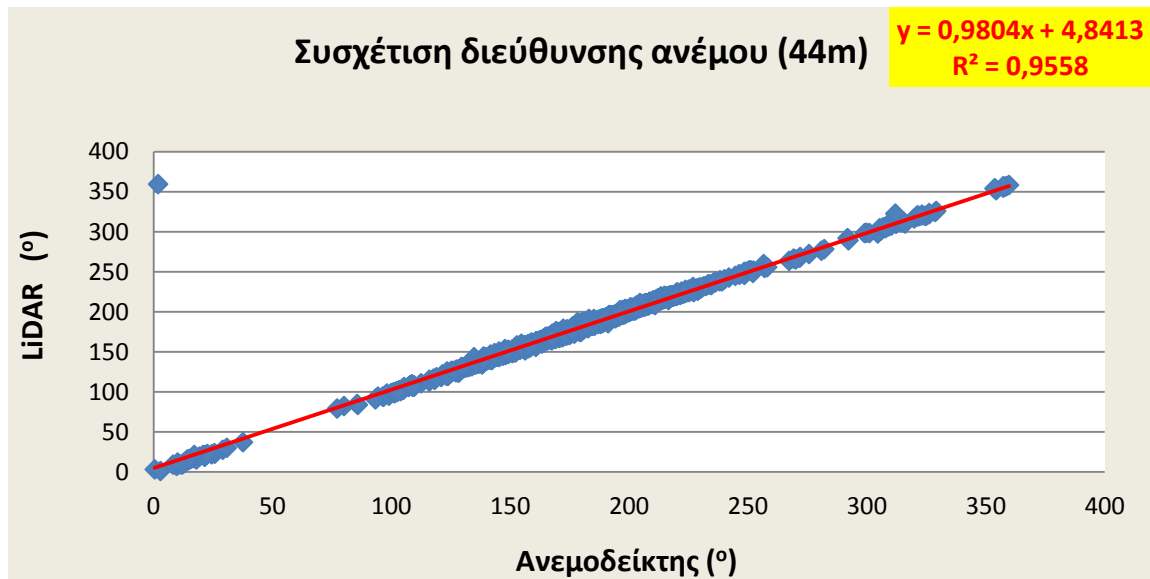


Διάγραμμα 38: Σύγκριση ταχύτητας ανεμομέτρου και LiDAR στα 44 m (διαθεσιμότητα=100 %).

Στη συνέχεια, στο **διάγραμμα 39** βλέπουμε τη σύγκριση των διευθύνσεων με το χρόνο και στο **διάγραμμα 40** που ακολουθεί, απεικονίζουμε τη συσχέτισή τους.



Διάγραμμα 39: Σύγκριση διεύθυνσης ανεμοδείκτη και LiDAR με το χρόνο στα 44 m (διαθεσιμότητα=100 %).



Διάγραμμα 40: Σύγκριση διεύθυνσης ανεμοδείκτη και LiDAR στα 44 m (διαθεσιμότητα=100 %).

Παρατηρούμε πως ο δείκτης συσχέτισης είχε ελάχιστη μείωση και είναι $R^2 = 0,9558$.

4.5.6 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΚΥΡΙΑ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ενδιαφέρον και χρήσιμο θα ήταν να δούμε τι συμβαίνει στη κύρια διεύθυνση της ενέργειας καθώς εκεί θα θέλαμε η συσχέτιση των δύο μετρήσεων να είναι αρκετά καλή καθώς αποτελεί κύριο κριτήριο επιλογής της κατάλληλης ανεμογεννήτριας.

Να διευκρινίσουμε πως αναφερόμαστε στην κύρια διεύθυνση για το χρονικό διάστημα των μετρήσεων από **20/11/2008** έως **20/12/2008**

Η κύρια διεύθυνση σε σχέση με την ενέργεια, βρήκαμε ότι είναι η νότιο – νοτιοανατολική, δηλαδή $157,5^{\circ}$. Εμείς, θα δούμε τι γίνεται στο κομμάτι από 135° έως 180° .

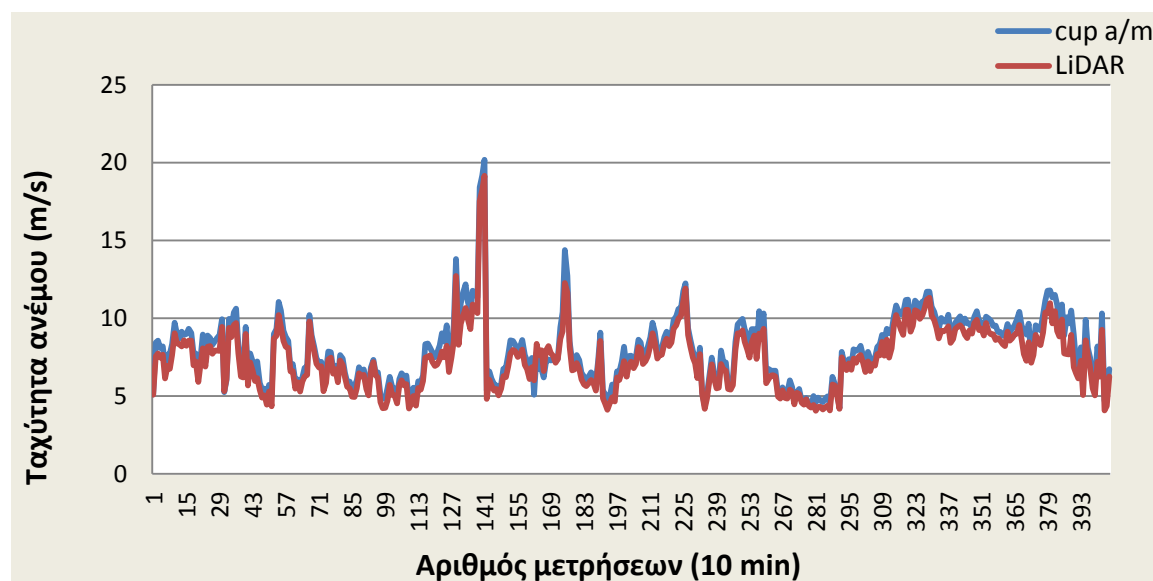
Έτσι λοιπόν, αφαιρέσαμε τις μετρήσεις με διεύθυνση μικρότερη από 135° και μεγαλύτερη από 180° .

Το πλήθος που προκύπτει είναι μόλις 405 μετρήσεις που αντιστοιχεί στο 9,5 % του αρχικού.

ΠΛΗΘΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ (%)
405	9,5

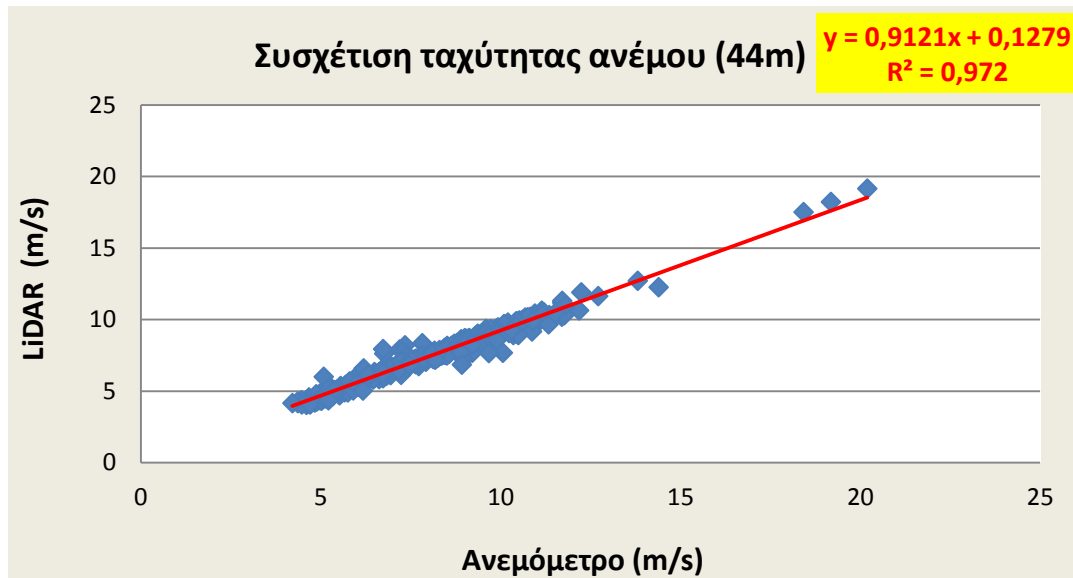
Πίνακας 4.9: Πλήθος μετρήσεων ανά επίπεδο σύγκρισης

Στο **διάγραμμα 41** βλέπουμε τη σύγκριση των ταχυτήτων με το χρόνο ενώ στο **διάγραμμα 42** που ακολουθεί απεικονίζουμε την συσχέτιση τους.



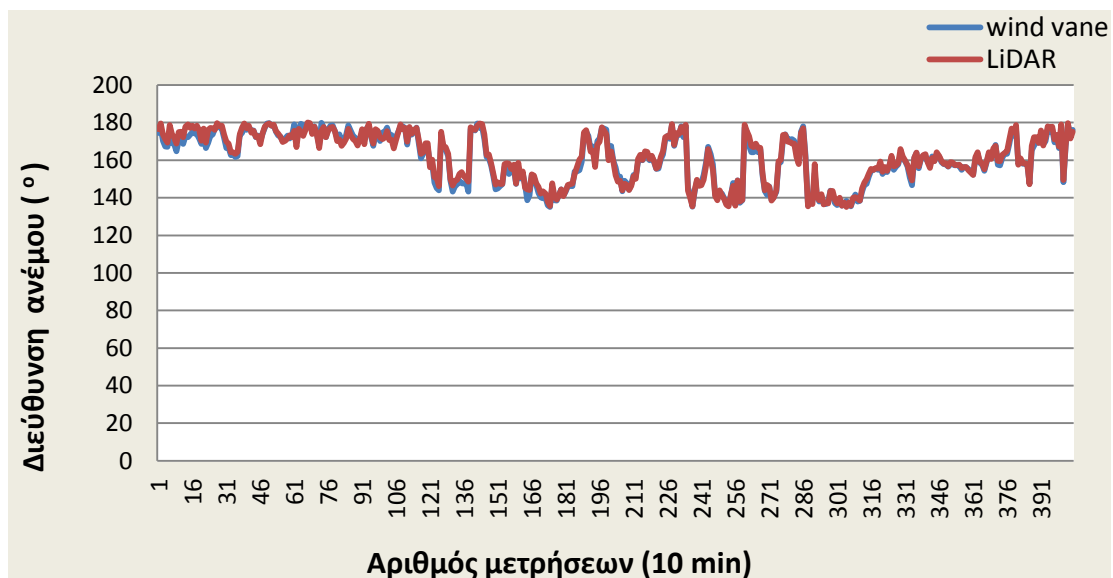
Διάγραμμα 41: Σύγκριση ταχύτητας ανεμομέτρου και LiDAR με το χρόνο στα 44 m (κύρια διεύθυνση ενέργειας 20/11/2008 – 20/12/2008).

Στο **διάγραμμα 42** βλέπουμε πως στο δείκτη συσχέτισης έχουμε μια μικρή βελτίωση με $R^2 = 0,972$.

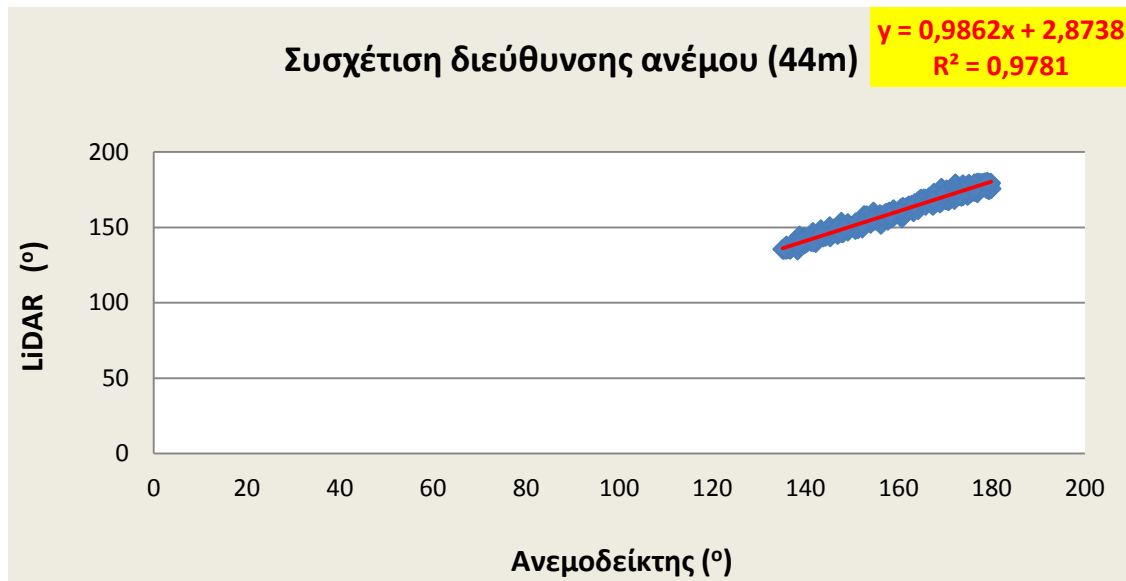


Διάγραμμα 42: Σύγκριση ταχύτητας ανεμομέτρου και LiDAR στα 44 m (κύρια διεύθυνση ενέργειας 20/11/2008 – 20/12/2008).

Τέλος, στο **διάγραμμα 43** παριστάνουμε τη σύγκριση των διευθύνσεων με το χρόνο και ακολούθως στο **διάγραμμα 44** τη συσχέτιση τους η οποία παρατηρούμε πως η είναι πάρα πολύ καλή και είναι $R^2 = 0,9781$.



Διάγραμμα 43: Σύγκριση διεύθυνσης ανεμοδείκτη και LiDAR με το χρόνο στα 44 m (κύρια διεύθυνση ενέργειας 20/11/2008 – 20/12/2008).



**Διάγραμμα 44: Σύγκριση διεύθυνσης ανεμοδείκτη και LiDAR στα 44 m
(κύρια διεύθυνση ενέργειας 20/11/2008 – 20/12/2008).**

4.6 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΣΕ ΥΨΟΣ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΟ ΜΙΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Σε αυτό το σημείο θα προσπαθήσουμε να συγκρίνουμε τις μετρήσεις του ιστού και του LiDAR, όσον αφορά την ταχύτητα, σε υψόμετρο ανάλογο με αυτό του ρότορα μιας ανεμογεννήτριας. Όπως προαναφέραμε, το ύψος μιας ανεμογεννήτριας αυξάνεται συνεχώς και σήμερα ένα τυπικό ύψος τοποθέτησης του ρότορα είναι τα 80 m. Οι πιο κοντινές μετρήσεις του LiDAR σε αυτό το υψόμετρο είναι στα 78 m.

4.6.1. ΣΤΗΝ ΚΥΡΙΑ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ

Εισάγοντας τις μετρήσεις του LiDAR (78 m) στο πρόγραμμα windrose, προκύπτουν οι εκθέτες του εκθετικού νόμου της μεταβολής της ταχύτητας καθ' ύψος για την συγκεκριμένη τοποθεσία. Ο εκθέτης (**a**) για μία περιοχή εξαρτάται από τη διεύθυνση και την ταχύτητα που έχει ο άνεμος στην περιοχή αυτή. Έτσι έχουμε διαφορετικές τιμές του **a** ανά διεύθυνση και ανά "bin" ταχύτητας.

Οι εκθέτες αναγράφονται στον παρακάτω **πίνακα 4.10**.

m/s	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N	average	sdv
5-6						0,086	0,208	0,241	0,195	0,207	0,330	0,314	0,482	0,401		0,265	0,251	0,146
6-7						0,158	0,238	0,228	0,181	0,181	0,317	0,229	0,421	0,378	0,385	0,266	0,248	0,139
7-8						0,153	0,164	0,188	0,184	0,185	0,318	0,322	0,448	0,346		0,245	0,234	0,140
8-9						0,154	0,113	0,137	0,165	0,219	0,266		0,383	0,294		0,221	0,207	0,136
9-10							0,139	0,156	0,172	0,176			0,332	0,260			0,200	0,112
10-11							0,099	0,125	0,179	0,178				0,217			0,162	0,102
11-12														0,267			0,200	0,079
12-13														0,187			0,193	0,085
13-14																	0,158	0,070
14-15																	0,131	0,050
15-16																	0,116	0,051
16-17																	0,109	0,071
17-18																		
18-19																		
19-20																		
20-21																		
21-22																		
22-23																		
23-24																		
24-25																		
25-																		
average						0,138	0,160	0,179	0,179	0,191	0,308	0,288	0,414	0,294	0,385	0,249	0,233	
sdv	0,181	0,365	0,083	0,057	0,085	0,098	0,129	0,161	0,157	0,154	0,187	0,224	0,159	0,150	0,182	0,137		0,112

Πινάκας 4.10: Εκθέτης καθ' ύψους μεταβολής **a** ανά διεύθυνση και ταχύτητα.

Χρησιμοποιώντας τον εκθετικό νόμο και τον αντίστοιχο εκθέτη για κάθε κατηγορία κάνουμε αναγωγή των μετρήσεων του ιστού από τα 44 m στα 78 m, ώστε να μπορέσουμε να πραγματοποιήσουμε τη σύγκριση.

Για τη σύγκρισή μας θα επικεντρωθούμε στα δεκάλεπτα μετρήσεων που αφορούν την κύρια διεύθυνση του ανέμου που υπολογίσαμε έχοντας ως ύψος αναφοράς τα 44 m. Με τη βοήθεια του ροδογράμματος για τη ενέργεια επιλέγουμε εύρος διευθύνσεων από 135° έως 202,5°. Έτσι, για την αναγωγή της ταχύτητας θα χρησιμοποιήσουμε το μέσο όρο των εκθετών των διευθύνσεων της κύριας διεύθυνσης του ανέμου της τοποθεσίας, όπου είναι $a = 0.164$.

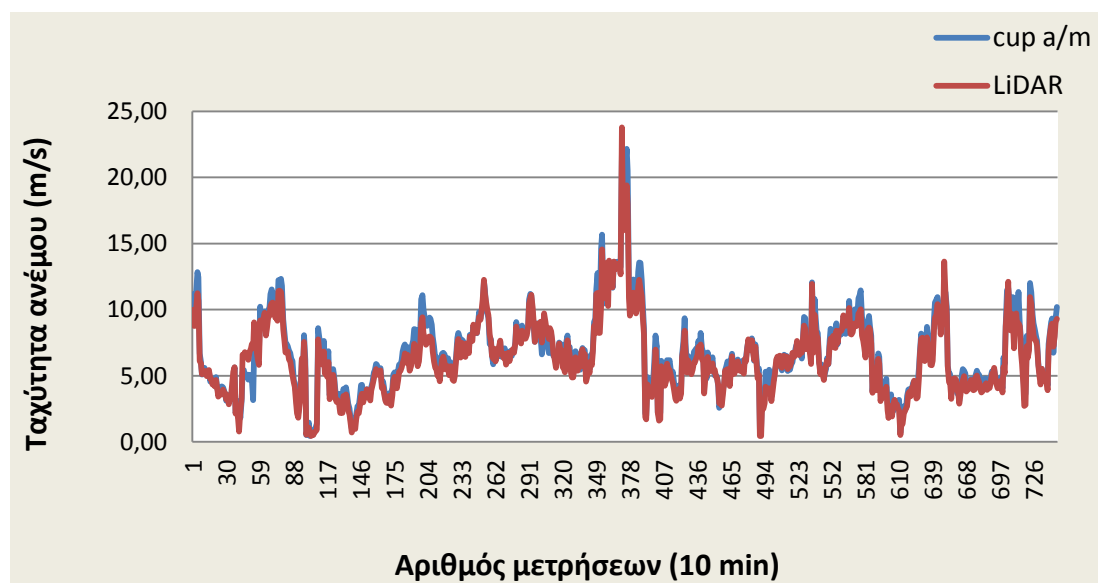
Στη συνέχεια, αφαιρέσαμε τις μετρήσεις κατά τις οποίες είχαμε $d\sigma < 0,4$, η διαθεσιμότητα του LiDAR ήταν 0 %, καθώς επίσης και τις μετρήσεις στις οποίες το ανεμόμετρο ήταν παγωμένο και υπολειτουργούσε.

Το πλήθος που προκύπτει είναι 746 και αντιστοιχεί στο 17,34 % του αρχικού πλήθους.

ΠΛΗΘΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ (%)
746	17,34

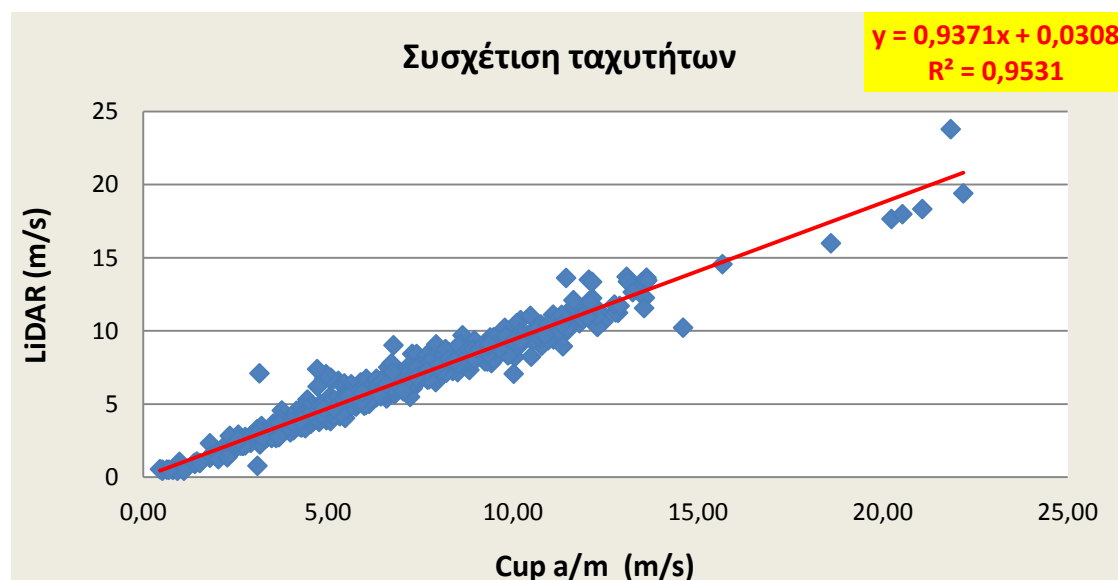
Πίνακας 4.11: Πλήθος μετρήσεων ανά επίπεδο σύγκρισης

Στο **διάγραμμα 45** απεικονίζουμε τη σύγκριση των ταχυτήτων με το χρόνο όπου παρατηρούμε αρκετά καλή σύγκλιση των τιμών.



Διάγραμμα 45: Σύγκριση ταχύτητας ανεμομέτρου και LiDAR με το χρόνο στα 78 m (κύρια διεύθυνση ενέργειας, $d\sigma < 0,4$, μη μηδενική διαθεσιμότητα, 20/11/2008 – 20/12/2008).

Ακολούθως, το **διάγραμμα 46** παριστάνει τη συσχέτιση των ταχυτήτων που προκύπτει και η οποία είναι πολύ καλή, με $R^2 = 0,9577$.



Διάγραμμα 46: Σύγκριση ταχύτητας ανεμομέτρου και LiDAR στα 78 m (κύρια διεύθυνση ενέργειας, $d\sigma < 0,4$, μη μηδενική διαθεσιμότητα, 20/11/2008 – 20/12/2008).

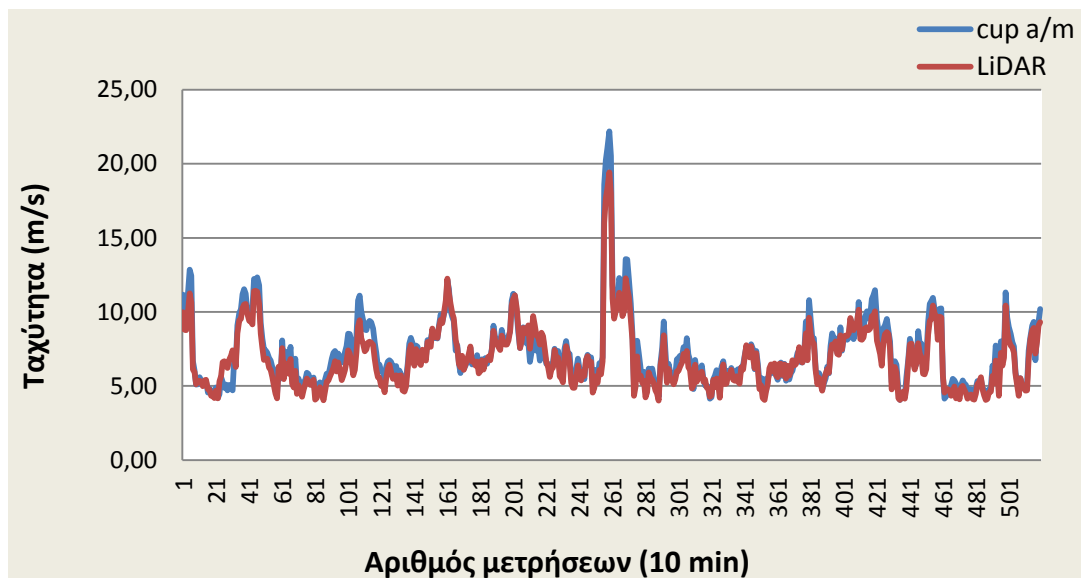
4.6.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΕΥΡΟΣ ΤΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΚΑΙ ΤΗ ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ

Όπως προαναφέραμε μια ανεμογεννήτρια τίθεται σε λειτουργία συνήθως σε ταχύτητες των 4 m/s και άνω. Έτσι, αφαιρούμε τις μετρήσεις στις οποίες η ταχύτητα είναι μικρότερη από 4 m/s. Επίσης αφαιρούμε τις μετρήσεις με διαθεσιμότητα μικρότερη από 100 %. Το πλήθος που προκύπτει είναι 520 και αντιστοιχεί στο 12,09 % του αρχικού.

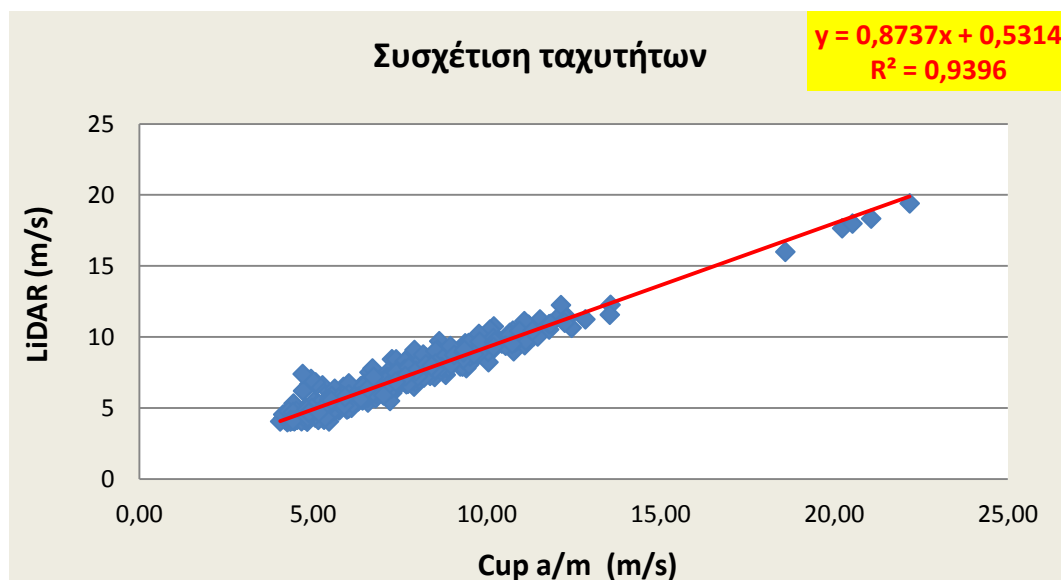
ΠΛΗΘΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ (%)
520	12,09

Πίνακας 4.12: Πλήθος μετρήσεων ανά επίπεδο σύγκρισης

Στο **διάγραμμα 47** απεικονίζουμε τη σύγκριση των ταχυτήτων με το χρόνο ενώ ακολούθως στο **διάγραμμα 48** παριστάνουμε τη συσχέτιση των ταχυτήτων του ιστού και του LiDAR η οποία, αν και έχει μια ελάχιστη μείωση, παραμένει πολύ καλή, με $R^2 = 0,9396$.



Διάγραμμα 47: Σύγκριση ταχύτητας ανεμομέτρου και LiDAR με το χρόνο στα 78 m (κύρια διεύθυνση ενέργειας 20/11/2008 – 20/12/2008, $\sigma < 0,4$, ταχύτητα > 4 m/s, availability 100%).



Διάγραμμα 48: Σύγκριση ταχύτητας ανεμομέτρου και LiDAR στα 78 m (κύρια διεύθυνση ενέργειας 20/11/2008 – 20/12/2008, $\sigma < 0,4$, ταχύτητα > 4 m/s, availability 100%).

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτό το σημείο θα παρουσιάσουμε συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα που βρήκαμε στο κεφάλαιο 4 συγκρίνοντας τις μετρήσεις του μετεωρολογικού ιστού και του μηχανήματος LiDAR (πίνακας 5.1 και πίνακας 5.2).

ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΣΥΓΚΡΙΣΗΣ	ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ $y=ax + b$ R^2	ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗΣ $y=ax + b$ R^2	ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ (%)
ΑΡΧΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	$y=0,6569x + 1.3708$ $R^2=0.6526$	$y=0,8737x + 26.007$ $R^2=0.7969$	100
DSIGMA < 0,4	$y = 0,7823x + 0,9756$ $R^2 = 0,7589$	$y = 0,8934x + 18,9$ $R^2 = 0,7844$	46,14
ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΟΡΓΑΝΩΝ	$y = 0,9477x - 0,2155$ $R^2 = 0,9675$	$y = 0,9497x + 9,9775$ $R^2 = 0,8853$	42,7
ΤΑΧΥΤΗΤΑ > 4 m/s	$y = 0,9322x - 0,0536$ $R^2 = 0,9651$	$y = 0,9821x + 4,5107$ $R^2 = 0,9561$	30,98
ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ > 50 %	$y = 0,9322x - 0,0526$ $R^2 = 0,9648$	$y = 0,981x + 4,7128$ $R^2 = 0,9562$	30,89
ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ > 80 %	$y = 0,9322x - 0,0525$ $R^2 = 0,9648$	$y = 0,981x + 4,7204$ $R^2 = 0,9562$	30,86
ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ > 90 %	$y = 0,9321x - 0,0509$ $R^2 = 0,9647$	$y = 0,981x + 4,7166$ $R^2 = 0,9562$	30,79
ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ =100 %	$y = 0,9323x - 0,0522$ $R^2 = 0,9647$	$y = 0,9804x + 4,8413$ $R^2 = 0,9558$	30,6
ΚΥΡΙΑ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	$y = 0,9121x + 0,1279$ $R^2 = 0,972$	$y = 0,9862x + 2,8738$ $R^2 = 0,9781$	9,5

Πίνακας 5.1 : Πίνακας συσχέτισης και διαθεσιμότητας ανά κριτήριο (44 m).

ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΣΥΓΚΡΙΣΗΣ	ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ $y=ax + b$ R^2	ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ (%)
DSIGMA < 0,4 ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΟΡΓΑΝΩΝ	$y = 0,9371x + 0,0308$ $R^2 = 0,9531$	17,34
ΤΑΧΥΤΗΤΑ > 4 m/s ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ =100 %	$y = 0,8737x + 0,5314$ $R^2 = 0,9396$	12,09

Πίνακας 5.2 : Πίνακας συσχέτισης και διαθεσιμότητας ανά κριτήριο (78 m).

Παρατηρώντας τον παραπάνω **πίνακα 5.1** συμπεράνουμε τα εξής:

- Το LiDAR δίνει πολύ καλά αποτελέσματα.
- Τα δεκάλεπτα των μετρήσεων κατά τα οποία είχαμε $dsigma > 0,4$ καθώς επίσης και τα δεκάλεπτα στα οποία τα όργανα του ιστού υπολειπούν, επηρέαζαν πολύ το αποτέλεσμα της σύγκρισης.
- Στο εύρος των ταχυτήτων που λειτουργεί μια ανεμογεννήτρια, η συσχέτιση της ταχύτητας και της διεύθυνσης είναι πάρα πολύ καλή, πράγμα που είναι πολύ σημαντικό για την χωροθέτηση και τον προσανατολισμό ενός μελλοντικού αιολικού πάρκου όπως επίσης και για την επιλογή του κατάλληλου τύπου ανεμογεννήτριας.
- Η συσχέτιση μεταξύ των μετρήσεων είναι πολύ καλή ακόμη και για δεκάλεπτα με μικρή διαθεσιμότητα μετρήσεων του LiDAR.
- Στην κύρια διεύθυνση της ενέργειας οι συσχετίσεις τόσο των ταχυτήτων όσο και των διευθύνσεων είναι αρκετά καλές, ωστόσο το πλήθος των μετρήσεων είναι μόλις το 9,5 % του αρχικού.
- Επίσης, παρατηρούμε πως για μετρήσεις σε ύψος αντίστοιχο με αυτό μιας ανεμογεννήτριας (78 m), στην κύρια διεύθυνση του ανέμου η συσχέτιση των ταχυτήτων είναι πολύ καλή.

Ένας παράγοντας που επηρεάζει τα αποτελέσματα των συγκρίσεων είναι πώς καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων είχαμε άσχημες καιρικές συνθήκες, κυρίως έντονες βροχοπτώσεις και χιονοπτώσεις οι οποίες επηρεάζουν την ομοιογένεια των σωματιδίων της ατμόσφαιρας.

Παρατηρούμε λοιπόν ότι το LiDAR πλεονεκτεί του ιστού κατά τη διάρκεια μετρήσεων οι οποίες πραγματοποιούνται σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες καθώς είδαμε ότι σε αρκετά δεκάλεπτα τα όργανα του ιστού (ανεμόμετρο, ανεμοδείκτης) υπολειπόμενες όντας παγωμένα ενώ αντίθετα το LiDAR βρισκόταν σε κανονική λειτουργία και συνέχιζε να καταγράφει δεδομένα. Καθ' όλη τη διάρκεια της περιόδου των μετρήσεων ο ιστός υπολειπόμενος συνολικά 110 δεκάλεπτα που αντιστοιχούν στο 2,5 % του αρχικού πλήθους ενώ αντίθετα το LiDAR σε μόλις 16 που αντιστοιχούν στο 0.37 % του αρχικού.

Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι οι μετρήσεις διήρκεσαν μικρό χρονικό διάστημα καθώς επίσης και τις καιρικές συνθήκες της περιόδου αυτής, συμπεράνουμε πως το LiDAR δίνει αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την εύκολη μεταφορά και εγκατάσταση του, το κάνει να υπερέχει για μετρήσεις ανέμου σε περιοχές όπου η εγκατάσταση ιστού είναι δύσκολη όπως π.χ. ορεινές δυσπρόσιτες περιοχές, υπεράκτιες κλπ.

Ενδιαφέρον θα ήταν να είχαμε μετρήσεις του ιστού (ταχύτητα, διεύθυνση, θερμοκρασία) και για μεγαλύτερα ύψη, όπου η ροή θα είναι πιο ομαλή, ώστε να τις συγκρίνουμε με αυτές του LiDAR και κατ' επέκταση να συγκρίνουμε τις συσχετίσεις των μεγεθών ανά ύψος. Έτσι, διαθέτοντας τη θερμοκρασία για διαφορετικά ύψη, θα γνωρίζαμε την ευστάθεια της ατμόσφαιρας και θα μπορούσαμε να συγκρίνουμε τις μετρήσεις ξεχωριστά, ημέρα και νύχτα.

Τέλος, χρήσιμο θα ήταν να κάναμε μια ανάλογη σύγκριση και για μετρήσεις που θα διαρκούσαν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, καθώς επίσης και για μετρήσεις σε περίοδο με πιο ήπιες καιρικές συνθήκες.

6

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν να επιχειρήσουμε τη σύγκριση μετρήσεων ανάμεσα σε ένα μηχάνημα LiDAR και ένα μετεωρολογικό ιστό.

Στην αρχή της εργασίας αναφερθήκαμε εκτενώς τόσο στην ιστορία κάθε μεθόδου, όσο και στον τρόπο λειτουργίας και εγκατάστασης τους, δίνοντας μεγαλύτερη έμφαση στο LiDAR.

Είδαμε ότι σε σημαντικούς τομείς υπερέχει ενός ιστού, όπως π.χ. στην ταυτόχρονη μέτρηση σε διαφορετικά ύψη και στην εύκολη μεταφορά και εγκατάστασή του.

Στη συνέχεια προχωρήσαμε στη σύγκριση των μετρήσεων, όπου σταδιακά προσπαθήσαμε να επικεντρωθούμε σε μετρήσεις με μεγαλύτερη αξιοπιστία, οι οποίες οδηγούν σε πιο έγκυρα συμπεράσματα.

Ακολουθώντας, παρατηρώντας τα αποτελέσματα, διαπιστώσαμε μικρές αποκλίσεις στις τιμές των μετρήσεων του LiDAR από αυτές ενός ιστού, κυρίως στις τιμές της ταχύτητας.

Αυτή τη στιγμή, η μέθοδος μετρήσεων με σύστημα LiDAR βρίσκεται σε μεταβατικό στάδιο καθώς έχει αρχίσει να γίνεται αποδεκτή από τις τράπεζες ώστε να χρηματοδοτηθούν μελλοντικές επενδύσεις, αφού για την έγκριση δάνειου ήταν απαραίτητες και οι μετρήσεις του ιστού. Το γεγονός αυτό είναι πολύ σημαντικό, διότι με αυτόν τον τρόπο θα μπορέσουν να πραγματοποιηθούν πιο εύκολα μετρήσεις σε θαλάσσιο χώρο, καθώς η εγκατάσταση ιστού θεωρείται αρκετά δύσκολη.

Τέλος, η τεχνολογία LiDAR θεωρείται εξελίξιμη και συνεχώς γίνονται έρευνες για την βελτιστοποίηση της.

Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με τα πλεονεκτήματα που αναφέραμε, κάνει πολλούς να το θεωρούν το μέλλον στις μετρήσεις για την εκτίμηση αιολικού δυναμικού.

7

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. Γ. ΜΠΕΡΓΕΛΕΣ, " ΑΝΕΜΟΚΙΝΗΤΗΡΕΣ " , εκδόσεις Συμείων, 2005
- [2]. www.ammonit.com, Know – how for successful wind measurements, 2011
- [3]. Δημήτρης Β. Κανελλόπουλος, " Αιολική Ενέργεια – Σχεδιάζοντας στις Αυλές των Ανέμων " , εκδόσεις Ίων
- [4]. http://en.wikipedia.org/wiki/Wind_measurement#History
- [5]. <http://www.logicenergy.com/articles/history-anemometer/>
- [6]. http://www.ehow.com/about_5377313_history-wind-vanes.html
- [7]. Claus Weitkamp, " Lidar " , Range – Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere, εκδόσεις Springer
- [8]. Daniel W. Jaynes, " Lidar " , University of Massachusetts, Department of Mechanical and Industrial Engineering, Renewable Energy Research Laboratory, July 2007
- [9]. <http://www.2en.gr/>
- [10]. Ferhat Bingöl, " Adapting a Doppler laser anemometer to wind energy " , Technical University of Denmark Fluid Mechanics Section, March 2005
- [11]. Windcube, Wind LiDAR System for wind Measurement, Product Information
- [12]. Ferhat Bingöl, " Complex Terrain and Wind Lidars " , Risø DTU, National Laboratory for Sustainable Energy, August 2009
- [13]. Harry L. Wegley, James V. Ramsdell, Montie M. Orgill and Ron L. Drake, " A sitting Handbook for Small Wind Energy Conversion Systems " , εκδόσεις Windbooks
- [14]. <http://www.skai.gr/news/search>
- [15]. <http://www.windrose.gr/index.php/download>

- [16]. Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins, Ervin Bossanyi, " Wind Energy Handbook "
- [17]. Pramod Jain, " Wind Energy Engineering " , 2011