

Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΜΗΧ
611

ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΘΕΜΑ: «ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ
ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΣΕ ΜΟΝΤΕΛΟ
ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ»**

ΕΚΠΟΝΗΘΗΚΕ ΑΠΟ ΤΟΥΣ ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ:

- ΠΑΠΑΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ Α.Μ. 27853
- ΣΟΦΙΑΝΟΠΟΥΛΟΣ ΑΓΓΕΛΟΣ Α.Μ. 27943

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΝΙΚΑΣ ΚΩΝ/ΝΟΣ

ΠΕΙΡΑΙΑΣ, ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2012

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη.....	4
Λέξεις κλειδιά.....	4
Summary.....	4
Keywords.....	4
Συμβολισμοί.....	5

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

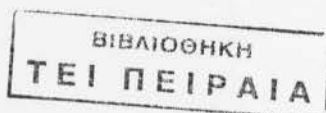
1.Εισαγωγή.....	7
-----------------	---

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2.1 Εισαγωγή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	9
2.1.1 Έννοια και περιεχόμενο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.....	9
2.1.2 Παγκόσμιο δυναμικό.....	12
2.2 Η Αιολική ενέργεια και οι εφαρμογές της στην Ελλάδα.....	14
2.3 Βασικά Χαρακτηριστικά / Ταξινόμηση Ανεμογεννητριών.....	18
2.4 Μηχανές Οριζοντίου Άξονα.....	21
2.5 Μηχανές Κατακόρυφου Άξονα.....	30
2.6 Σύγκριση της συμπεριφοράς των Αιολικών Μηχανών.....	36
2.7 Βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη Αιολικών Μηχανών.....	39
2.8 Χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας Ανεμογεννήτριας.....	43

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3.1 Βασικά χαρακτηριστικά αεροσήραγγας.....	48
3.2 Βασικές έννοιες και ορισμοί.....	49
3.2.1 Αρχή λειτουργίας Pitot.....	49
3.3 Περιγραφή συσκευής.....	50
Προδιαγραφές.....	52
3.4 Ανεμιστήρας και Inverter.....	53
3.5 Διαχύτης.....	53
3.6 Θάλαμος αποκατάστασης Ροής.....	53
3.7 Χοάνη Συστολής.....	53
3.8 Τμήμα Δοκιμών.....	54



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Διαδικασία λήψης μετρήσεων.....	56
Πίνακες Μετρήσεων / Διαγράμματα.....	70

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Σχόλια-Συμπεράσματα-Μελλοντικές εργασίες.....	97
Βιβλιογραφία.....	102

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη και καταγραφή της συμπεριφοράς της ροής του αέρα, εξετάζοντας τις πιέσεις που δημιουργούνται σε διάφορες αποστάσεις γύρω από ένα μοντέλο ανεμογεννήτριας σε διάφορες ταχύτητες και υπό διαφορετικές γωνίες μέσα στην εγκατεστημένη υποηχητική αεροδυναμική σήραγγα ανοικτού κυκλώματος Cussons FM 001 στο χώρο του εργαστηρίου μηχανικής ρευστών. Η μελέτη και λήψη των μετρήσεων διεξήχθησαν σε σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης και τα αποτελέσματα καταγράφηκαν σε πίνακες και παρουσιάζονται σε διαγράμματα.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Αεροδυναμική σήραγγα, Μοντέλο Ανεμογεννήτριας, Σωλήνας Pitot, Πίεση, Ταχύτητα ανέμου

SUMMARY

The purpose of this thesis is to study and record the behavior of the airflow around a wind-turbine model by examining the various pressures present at various speeds and under different angles in the subsonic wind tunnel located open circuit Cussons FM 001 in the fluid mechanics laboratory. The study and measurements were conducted at constant temperature and pressure and the results recorded in tables in order to present them in graphs.

KEYWORDS

Wind tunnel, Wind Turbine model, Pitot tube, Pressure, Wind speed

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

Για τους συμβολισμούς χρησιμοποιείται το διεθνές σύστημα μονάδων μέτρησης (S.I.).

Μονάδες:

Βαρομετρική πίεση	P (Pa)
Θερμοκρασία του αέρα	T (°C)
Πυκνότητα του αέρα	ρ (kg/m ³)
Ταχύτητα	U,V (m/s)
Συντελεστής ισχύος	C _p
Ύψος τοποθέτησης	H (m)
Διάμετρος πτερωτής	D. (m)
Ισχύς ανεμογεννήτριας	N (Watt)
Βαθμός απόδοσης	$\eta/\eta_M/\eta_E$
(ολικός/μηχανικός/ηλεκτρομηχανικής μετατροπής)	

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία μελετά το ρευστοδυναμικό πεδίο σε μοντέλο ανεμογεννήτριας, τη συμπεριφορά της πίεσης δηλαδή που δέχεται ο σωλήνας Pitot υπό διαφορετικές ταχύτητες του αέρα και διαφορετικές γωνίες της ανεμογεννήτριας μέσα στην ανεμοσήραγγα CUSSONS FM 001 στο χώρο του εργαστηρίου Μηχανικής Ρευστών.

Τα πειράματα έλαβαν χώρα υπό συνθήκες σταθερής πίεσης και θερμοκρασίας, ώστε να διασφαλιστεί, όσο αυτό είναι δυνατόν, η αξιοπιστία των μετρήσεων.

Τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων έχουν καταγραφεί και απεικονιστεί σε πίνακες και διαγράμματα και ακολουθούνται από τα συμπεράσματα σε παρακάτω κεφάλαια.

Η σειρά των κεφαλαίων της πτυχιακής αυτής εργασίας έχει ως εξής: Το πρώτο κεφάλαιο είναι εισαγωγικό και αναφέρεται στο αντικείμενο της εργασίας. Το δεύτερο κεφάλαιο είναι θεωρητικό και γίνεται αναφορά σε γενικά και εισαγωγικά στοιχεία περί ανεμογεννητριών. Το τρίτο κεφάλαιο είναι επίσης θεωρητικό και αναφέρεται στα χαρακτηριστικά των αεροσηραγγών ανοιχτού και κλειστού τύπου, τις βασικές έννοιες και ορισμούς που είναι απαραίτητοι για την κατανόηση της λειτουργίας τους καθώς και αυτής του σωλήνα Pitot και τέλος γίνεται περιγραφή της συγκεκριμένης συσκευής και των προδιαγραφών της ανεμοσήραγγας. Στο τέταρτο κεφάλαιο αναφέρεται η ακριβής πειραματική διάταξη, μαζί με τις σχετικές φωτογραφίες, η ακριβής διαδικασία των μετρήσεων και ακολουθούν οι πίνακες μετρήσεων καθώς και τα σχετικά διαγράμματα που προέκυψαν από αυτές. Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο έχουμε τα συμπεράσματα που βγαίνουν από τις μετρήσεις καθώς και κάποια σχόλια για αυτές, μαζί με προτάσεις για μελλοντικές εργασίες. Τέλος, ακολουθεί η βιβλιογραφία.

Κεφάλαιο 2

Θεωρία Α.Π.Ε. / Ανεμογεννητριών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΘΕΩΡΙΑ Α.Π.Ε. / ΑΝΕΜΟΓΕΝΗΤΡΙΩΝ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1.1 Έννοια και περιεχόμενο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Η παγκοσμία επιτροπή για το περιβάλλον και την ανάπτυξη διατύπωσαν την εξής έννοια της βιώσιμης ή αειφόρου ανάπτυξης «βιώσιμη είναι η ανάπτυξη η οποία ικανοποιεί τις ανάγκες της σημερινής γενιάς χωρίς να χειροτερεύει την ικανότητα των μελλοντικών γενεών να ικανοποιήσουν τις δίκες τους ανάγκες» Η δυνατότητα της βιώσιμης ανάπτυξης είναι υπαρκτή όσο υπάρχουν ανανεώσιμοι πόροι συμπεριλαμβανομένων και των ανανεώσιμων ενεργειακών πηγών και αξιοποιούνται στο μέγιστο δυνατό βαθμό.

Η ευρύτερη έννοια των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αναφέρεται σε κάθε πηγή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και ανανεώνεται μέσω φυσικών φαινομένων μόνιμου κύκλου. Πρόκειται για καθαρές" μορφές ενέργειας, πολύ φιλικές στο περιβάλλον, που δεν αποδεσμεύουν υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα όπως οι υπόλοιπες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα. Ενώ για την εκμετάλλευση τους δεν απαιτείται κάποια ενεργητική παρέμβαση όπως εξόρυξη, άντληση καύση αλλά απλώς η εκμετάλλευση της ήδη υπάρχουσας ροής ενεργείας στην φύση. Αυτό σημαίνει πως πρόκειται για ανεξάντλητες πηγές ενέργειας που βασίζονται σε διάφορες φυσικές διαδικασίες όπως: Ο ήλιος, ο άνεμος, οι υδατοπτώσεις, η ενέργεια των κυμάτων, ρευμάτων, ωκεανών, η βιομάζα, η γεωθερμία. Οι ΑΠΕ Μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε άμεσα (κυρίως για θέρμανση), είτε μετατρέπόμενες σε άλλες μορφές ενέργειας (κυρίως ηλεκτρισμό ή μηχανική ενέργεια).

Υπολογίζεται ότι το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο ενεργειακό δυναμικό απ' τις Α.Π.Ε. είναι πολλαπλάσιο της παγκόσμιας συνολικής κατανάλωσης ενέργειας. Η υψηλή όμως μέχρι πρόσφατα, τιμή των νέων ενεργειακών εφαρμογών, τα τεχνικά προβλήματα εφαρμογής, καθώς και οι πολιτικές και οικονομικές σκοπιμότητες που συνδέονται με τη διατήρηση του παρόντος επιπέδου ανάπτυξης στον ενεργειακό τομέα, εμπόδισαν την εκμετάλλευση έστω και μέρους αυτού του δυναμικού.

Το ενδιαφέρον για την ευρύτερη αξιοποίηση των ΑΠΕ, καθώς και για την ανάπτυξη αξιόπιστων και οικονομικά αποδοτικών τεχνολογιών που δεσμεύουν το δυναμικό τους, παρουσιάστηκε αρχικά μετά την πρώτη πετρελαϊκή χρήση του 1979 ως αποτέλεσμα κυρίως των απαντωτών πετρελαϊκών κρίσεων της εποχής, και παγιώθηκε την τελευταία δεκαετία, μετά τη συνειδητοποίηση των παγκόσμιων περιβαλλοντικών προβλημάτων από την χρήση κλασικών πηγών ενέργειας. Ιδιαίτερα ακριβές στην αρχή, ξεκίνησαν σαν πειραματικές εφαρμογές. Σήμερα όμως λαμβάνονται υπόψη στους επίσημους σχεδιασμούς των ανεπτυγμένων κρατών για την ενέργεια, λόγω της εξέλιξης των τεχνολογιών τους και της διεύρυνσης της παραγωγικής βάσης τεχνολογίας σε αναπτυσσόμενες χώρες, με αντίστοιχη μείωση του κόστους επένδυσης και παραγωγής.

Αποτελούν επίσης για τα κράτη στρατηγική επιλογή, αφού έχουν ωριμάσει και είναι ασφαλείς, ανταγωνιστικές και ελκυστικές σε ιδιώτες και επενδυτές. Ενώ η εφαρμογή τους συμβάλλει στη βελτίωση των περιβαλλοντικών δεικτών και ειδικότερα στη μείωση των εκπομπών CO₂ και στην απεξάρτηση από το εισαγόμενο πετρέλαιο.

Μπορούν δηλαδή να απαντήσουν αποτελεσματικά στο τρίπτυχο των προβλημάτων που

απασχολούν τον τομέα της ενέργειας:

- A) Επάρκεια αποθεμάτων
- B) ασφάλεια ανεφοδιασμού
- Γ) προστασία του περιβάλλοντος.

Εξάλλου, στην προώθηση των Α.Π.Ε. στην παγκόσμια ενεργειακή αγορά συνέβαλε το γεγονός ότι μπορούν να συμβάλλουν στην ενεργειακή αυτάρκεια

μικρών και αναπτυσσόμενων χωρών, αποτελώντας την εναλλακτική πρόταση σε σχέση με την οικονομία του πετρελαίου. Είναι προφανές ότι χώρες με μεγάλα αποθέματα στις πρωταρχικές μορφές ενέργειας έχουν συνήθως την τάση να χρησιμοποιούν αυτό το πλεονέκτημα ως μέσο για πολιτικό και οικονομικό έλεγχο των υπολοίπων. Παράδειγμα τέτοιων συνεπειών είναι η πολιτική και οικονομική κατάσταση που έχει εδραιωθεί στη Μέση Ανατολή.

Οι Α.Π.Ε. όμως, αποτελούν ευέλικτες εφαρμογές που μπορούν να παράγουν ενέργεια ανάλογη με τις ανάγκες του επί τόπου πληθυσμού, καταργώντας παράλληλα την ανάγκη για τεράστιες μονάδες ενεργειακής παραγωγής, αλλά και για μεταφορά της ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις. Ταυτόχρονα, υποβοηθείται η αποκέντρωση και η ανάπτυξη της τοπικής οικονομίας σε κάθε περιοχή όπου εγκαθίστανται τέτοιου είδους μονάδες.

Το πιο σημαντικό όφελος που μπορούν να προσφέρουν σε μια οικονομία σχετίζεται με την βελτίωση της απασχόλησης. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας παρουσιάζουν καταπληκτικό δυναμικό ως προς την δημιουργία και διαφύλαξη θέσεων εργασίας. Μελέτη του WWF για τη Βιομάζα «Biomass Study» εντοπίζει ένα δυναμικό απασχόλησης της τάξεως των 170.000-290.000 θέσεων εργασίας πλήρους απασχόλησης στις χώρες του ΟΟΣΑ μόνο και μόνο από αυτή την συγκεκριμένη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Οι εν λόγω θέσεις εργασίας υπολογίζεται ότι θα δημιουργηθούν κυρίως σε αγροτικές, αδύναμες από πλευράς υποδομών, περιοχές και θα είναι ως εκ τούτου εξαιρετικά σημαντικές.

Ένα επιπρόσθετο πλεονέκτημα είναι ο απλός στην κατασκευή και τη συντήρηση εξοπλισμός τους. Εξάλλου, το μηδενικό κόστος πρώτης ύλης, σε συνδυασμό με τις μικρές έως ελάχιστες απαιτήσεις συντήρησης που εμφανίζουν, συνεπάγεται περιορισμένο κόστος λειτουργίας. Έτσι, αντισταθμίζεται σε μεγάλο βαθμό το μέχρι σήμερα μειονέκτημα του αυξημένου κόστους που απαιτείται για την εγκατάσταση των μονάδων εκμετάλλευσής τους.

Επιπρόσθετα, στα τεχνικά πλεονεκτήματα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας περιλαμβάνονται η δυνατότητα διαφοροποίησης των ενεργειακών φορέων, τεχνολογιών και υποδομών παραγωγής θερμότητας, καυσίμων και ηλεκτρισμού και η αύξηση της ευελιξίας των συστημάτων ηλεκτροπαραγωγής, ώστε να ανταποκρίνονται στη μεταβαλλόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας.

Για κάθε χώρα η επιλογή μεταξύ των διάφορων διαθέσιμων ενεργειακών πόρων εξαρτάται έντονα από τους φυσικούς περιορισμούς που τίθενται για κάθε τύπο πόρου (υδατικό δυναμικό, αιολικό δυναμικό ανά περιοχή, μέγιστη μέση ηλιακή έκθεση ανά μονάδα επιφάνειας κλπ). Για κάθε πόρο λοιπόν υπάρχει ένα κατώφλι της βέλτιστης απόδοσης. Παρακάτω αναφέρονται επιγραμματικά τα οικονομικά και κοινωνικά κριτήρια τα οποία είναι αναγκαία προκείμενου να πραγματοποιηθούν τεχνικά οι ανανεώσιμες πηγές σε μια χώρα.:

- A) Οικονομικός ανταγωνισμός (κόστος KWh)
- B) Επιπτώσεις στην απασχόληση
- Δ) Ευαισθησία στις τιμές των πρώτων υλών (πετρέλαιο, και άλλα ορυκτά)
- E) Περιβαλλοντικές επιπτώσεις
- Z) Κοινωνική αποδοχή

2.1.2 Παγκόσμιο δυναμικό

Από το 1997 που επεγράφη το Πρωτόκολλο του Κιότο, οι επενδύσεις σε ανανεώσιμες πηγές αυξάνονται διαρκώς με ταχείς ρυθμούς. Η εγκατεστημένη ισχύς σε ανεμογεννήτριες αυξάνεται κατά 25-30% ετησίως, τα φωτοβολταϊκα κατά 50-60% ετησίως, οι ηλιακοί συλλέκτες για θέρμανση νερού κατά 15-20% ετησίως.

Παγκοσμίως ολοένα και περισσότερες χώρες στοχεύουν να αυξήσουν την παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, διαμορφώνοντας τα θεσμικά πλαίσια για την προσέλκυση επενδύσεων. 58 χώρες έχουν σήμερα θέσει στόχους για την χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ενεργειακό τους ισοζύγιο συμπεριλαμβανομένων και αναπτυσσόμενων χωρών αλλά και

πολιτειών/περιφερειών των ΗΠΑ και του Καναδά, και η πλειοψηφία αυτών έχει διαμορφώσει συγκεκριμένες πολιτικές και κίνητρα για την χρήση ΑΠΕ. Ενώ την πρωτοπορία στον κλάδο διαθέτει η Ευρώπη, έχοντας άνω του 35% του παγκόσμιου δυναμικού σε παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες.

Σήμερα πάνω από 70 χώρες έχουν αιολική ενέργεια, μεταξύ τους και αναπτυσσόμενες χώρες όπως η Κίνα, Αίγυπτος, Μεξικό, Ιράν, Βραζιλία κ.α. Η Ινδία και η Κίνα έχουν πολύ μεγάλη ισχύ σε αιολική ενέργεια, κατέχοντας 4η και 6η θέση αντίστοιχα (με τη Γερμανία και την Ισπανία να κατέχουν την 1η και 2η) στη παγκόσμια κατάταξη το 2006 όσο αφορά εγκατεστημένη ισχύ αιολικών πάρκων. Χώρες όπως η Γερμανία κατάφεραν να χρησιμοποιήσουν με τέτοιο τρόπο τις εναλλακτικές μορφές ενέργειας ώστε εκτός από τα πρωτεύοντα αποτελέσματα να αποκτήσουν οφέλη σε επίπεδο τεχνογνωσίας και κατασκευαστικής δραστηριότητας. Ο εξοπλισμός και οι κατασκευές στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αποτελούν μεγάλο κομμάτι της βιομηχανικής παραγωγής της Γερμανίας, μαζί με τη βιομηχανική παραγωγή σε αυτοκίνητα και μηχανικά εργαλεία.

Ο μεγαλύτερος κατασκευαστής φωτοβολταϊκών κύψελων στον κόσμο που χρησιμοποιούνται στους ηλιακούς συλλέκτες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκα συστήματα είναι η εταιρία Q-CELLS και βρίσκεται στο wolffen της Γερμανίας σε μια χώρα που δεν φημίζεται για την ηλιοφάνεια της. Παρόλα αυτά είναι η πρώτη στην παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και είναι η τρίτη μεγαλύτερη παραγωγός ηλιακών συλλεκτών μετά την Κινά και την Ιαπωνία.

Σε μια άλλη περιοχή της Ευρώπης στην Σκωτία οι σημαντικότερες οικονομικές δραστηριότητες τα τελευταία χρόνια προέρχονται από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Εκεί έχει πραγματοποιηθεί ένα σπουδαίο επίτευγμα με 1,5 εκατομμύριο νοικοκυριά να έχουν ρεύμα από ανανεώσιμες πηγές. Το 2007 στην γιορτή της Πράσινης Ενέργειας ανακοίνωσαν ότι ήταν η ημέρα κατά την οποία οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ξεπέρασαν σε ικανότητα παραγωγής την πυρηνική ενέργεια. Ακόμη και σε αυτήν την περίοδο της οικονομικής κρίσης η Σκωτία διαθέτει ανεβασμένους οικονομικούς

δείκτες πράγμα που αποδεικνύει την σημαντική συμβολή των ανανεώσιμων πηγών στην οικονομία της χώρας.

Ανάλογα οικονομικά οφέλη απολαμβάνει και η Δανία όπου περισσότεροι από 15.000 άνθρωποι ζουν από την αιολική ενέργεια, σχεδιάζοντας και κατασκευάζοντας ανεμογεννήτριες η τμήματα εξοπλισμού, ή προσφέροντας συμβουλευτικές υπηρεσίες καθώς και υπηρεσίες κατασκευών έργων. Σήμερα η απασχόληση ανθρώπινου δυναμικού στη Δανέζικη βιομηχανία αιολικής ενέργειας είναι μεγαλύτερη από ότι πχ η αντίστοιχη απασχόληση στην ιχθυοβιομηχανία. Η παραγωγή ανεμογεννητριών στη χώρα αυτή συνδυάζεται με την πρόσφορα 5.000 επιπλέον θέσεων εργασίας σε άλλες χώρες όπου ανεγείρονται η κατασκευάζονται μέρη του εξοπλισμού των ανεμογεννητριών όπως οι γεννήτριες και τα κιβώτια ταχυτήτων.

Αναλυτικά, τα κυριότερα είδη των Α.Π.Ε. είναι τα ακόλουθα:

- Αιολική ενέργεια
- Ηλιακή ενέργεια
- Υδροηλεκτρική ενέργεια
- Βιομάζα
- Γεωθερμική ενέργεια

2.2 Η ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΟΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Για την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας χρησιμοποιούνται ειδικές διατάξεις που εκθέτουν έναν δρομέα (πτερωτή τύπου έλικας, με ένα η περισσότερα πτερύγια) στο ρεύμα του ανέμου, λαμβάνοντας έτσι μέρος της κινητικής ενεργείας του με αποτέλεσμα την περιστροφική κίνηση του δρομέα. Οι διατάξεις αυτές λέγονται αεροκινητήρες ή ανεμογεννήτριες όταν ο άξονας τους κινεί ηλεκτρογεννήτρια παράγωγης ρεύματος. Με την χρήση αεροκινητήρων η αιολική ενέργεια μετατρέπεται σε περιστροφική κίνηση του δρομέα του αεροκινητήρα και του άξονα του.

Η σημαντικότερη οικονομικά εφαρμογή των ανεμογεννητριών είναι η σύνδεσή τους στο ηλεκτρικό δίκτυο μιας χώρας. Στην περίπτωση αυτή, ένα αιολικό πάρκο, δηλαδή μία συστοιχία πολλών ανεμογεννητριών, εγκαθίσταται και λειτουργεί σε μία περιοχή με υψηλό αιολικό δυναμικό και διοχετεύει το σύνολο της παραγωγής του στο ηλεκτρικό σύστημα. Υπάρχει βέβαια και η δυνατότητα οι ανεμογεννήτριες να λειτουργούν αυτόνομα, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε περιοχές που δεν ηλεκτροδοτούνται, μηχανικής ενέργειας για χρήση σε αντλιοστάσια, καθώς και θερμότητας. Όμως, η ισχύς που παράγεται σε εφαρμογές αυτού του είδους είναι περιορισμένη, το ίδιο και η οικονομική τους σημασία.

Η αιολική ενέργεια χρησιμοποιείται συνηθέστερα :

A) Για παραγωγή ηλεκτρισμού σε περιοχές συνδεδεμένες στο δίκτυο είτε (i) για την κάλυψη ίδιων αναγκών (ii) για την πώληση του ρεύματος στην εταιρεία εκμετάλλευσης του δικτύου (ανεξάρτητη παραγωγή)

B) Για παραγωγή ηλεκτρισμού σε περιοχές που δεν είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο, για λειτουργία είτε (i) μόνες τους με συσσωρευτές (stand alone) η (ii) σε συνδυασμό με σταθμό ηλεκτροπαραγωγής με ντίζελ (diesel-Windgenerator autonomous system).

Γ) Για θέρμανση πχ σε θερμοκήπια, με διαδοχική μετατροπή της σε ηλεκτρισμό και ακολούθως σε θερμότητα με τη χρήση ηλεκτρικής αντίστασης η με την κίνηση αντλιών θερμότητας.

Τα τελευταία 20 χρόνια υπάρχει μεγάλη τεχνολογική εξέλιξη που στοχεύει στην ανάπτυξη νέων υλικών, στην βελτίωση της αεροδυναμικής των πτερύγιων ώστε να επιτυγχάνονται καλύτεροι βαθμοί απόδοσης και στην μείωση των θορύβων. Ειδικά ο θόρυβος που προκαλούν οι ανεμογεννήτριες έχει ελαττωθεί δραστικά. Σε απόσταση 500 μέτρων που είναι η ελάχιστη επιτρεπτή απόσταση από κατοικημένες περιοχές ο θόρυβος δεν γίνεται καν αντιληπτός και αυτό χάρις την βελτίωση του μηχανολογικού τους εξοπλισμού που δίνει έμφαση στην αποφυγή κραδασμών.

Μάλιστα το κόστος της σχετικής τεχνολογίας είναι πολύ κοντά σε εκείνο της παραγωγής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα, γεγονός που ανοίγει το

δρόμο για την εξάπλωση της αιολικής ενέργειας παγκοσμίως. Χάρης στην πρόοδο της τεχνολογίας το ειδικό κόστος παραγωγής αιολικής ενέργειας έχει ήδη πέσει στο ήμισυ από το 1990 και αναμένεται ότι η απόκλιση μεταξύ του κόστους παραγωγής αιολικής ενέργειας και του κόστους ενέργειας από ορυκτά καύσιμα θα συνεχίσει να μειώνεται.

Επίσης το περιβαλλοντικό όφελος είναι τεράστιο, καθώς μια ανεμογεννήτρια ισχύος 1500KW που λειτουργεί επί 20 χρόνια απαλλάσσει την ατμόσφαιρα από 64000 τόνους CO₂ που θα εκλύονταν κατά την καύση λιγνίτη προκείμενου να παραχθεί ισοδύναμη ενέργεια. Με μια ανεμογεννήτρια 1500KW αποφεύγεται η χρήση 8000 τόνων λιγνίτη. Αν αυτήν την ποσότητα τη συσσωρεύαμε θα δημιουργούσαμε ένα βουνό που η κορυφή του θα είχε περίπου το ύψος της ανεμογεννήτριας.

Η αιολική ενέργεια χρησιμοποιείτο σε μεγάλη έκταση στο παρελθόν, κυρίως για άρδευση, όμως η επέκταση των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας στις αγροτικές περιοχές εκτόπισε σε πολύ μεγάλο βαθμό αυτές τις εφαρμογές με την εγκατάσταση ηλεκτρικών αντλιών. Με την πρώτη όμως ενεργειακή κρίση, ανανεώθηκε πλήρως το ενδιαφέρον της βιομηχανίας και των πανεπιστημιακών ερευνητικών ομάδων για την αιολική ενέργεια. Τότε άρχισαν να εμφανίζονται τα πρώτα εμπορικά μοντέλα Δανικής και Αμερικανικής κυρίως κατασκευής, με μέση ισχύ ανά A/Γ που δεν υπερέβαινε τα 50 KW και ύψος πυλώννα που έφτανε τα 15 m.

Σήμερα η βιομηχανία της αιολικής ενέργειας είναι η πλέον ταχύτατα αναπτυσσόμενη βιομηχανία ανανεώσιμων πηγών παγκοσμίως. Αξίζει να σημειωθεί ότι το 2002 εγκαταστάθηκαν 6.868MW νέας αιολικής ισχύος που αντιστοιχεί σε επενδύσεις 6,8 δισεκ. ευρώ φθάνοντας τη διεθνή εγκατεστημένη αιολική ισχύ στα 31.000 MW. Ήδη η αιολική ενέργεια καλύπτει το 2% της Ευρωπαϊκής παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας με στόχο την κάλυψη του 10% μέσα στα επόμενα 10 χρόνια και το 12% των ηλεκτρικών αναγκών του πλανήτη μέχρι το 2020.

Στην χώρα μας, οι προσπάθειες για την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας για παραγωγή ηλεκτρισμού ξεκίνησαν στις αρχές της δεκαετίας του 80 από τη ΔΕΗ όποτε και εγκαταστάθηκε (συγκεκριμένα το 1982) το πρώτο αιολικό πάρκο στην Κύθνο και στα μέσα της δεκαετίας του 1990 δόθηκε μεγάλη ώθηση με τη διευκόλυνση επενδύσεων από ιδιώτες (Ν 2244/94) . Από τότε δεκάδες αιολικά έχουν εγκατασταθεί σε περιοχές όπως: η Άνδρος, η Εύβοια, η Λήμνος, η Λέσβος, η Χίος, η Σάμος και η Κρήτη .

Σήμερα η συνολική εγκατεστημένη ισχύς φθάνει τα 331MW στα οποία έχει προστεθεί και η ισχύς των τεσσάρων νέων αιολικών πάρκων (συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 55 MW) στη Θράκη που τέθηκαν σε λειτουργία το 2003. Αξίζει να σημειωθεί ότι το Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Ενέργειας (ΕΠΕ) είχε πολύ μεγάλη συμβολή σε αυτήν την αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος, με τη χρηματοδότηση για τη δημιουργία 17 αιολικών πάρκων, με επενδύσεις ύψους 44,7 δις.δρχ. Η συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τη λειτουργία των 17 αιολικών πάρκων ανέρχεται σε 360 GWh ανά έτος.

Οι μελλοντικές προοπτικές για την ελληνική αγορά αιολικής ενέργειας είναι ιδιαίτερα ευοίωνες καθώς η κατασκευή ανεμογεννητριών αποτελεί αντικείμενο τεχνολογικά και οικονομικά προσιτό στη Μεταλλοβιομηχανία μας χωρίς προσθετές επενδύσεις σε τεχνικό εξοπλισμό. Ταυτόχρονα το αιολικό δυναμικό είναι ιδιαίτερα προικισμένο στην χώρα μας και αν το εκμεταλλευτούμε σωστά μπορεί να συνεισφέρει ουσιαστικά στο ενεργειακό μας ισοζύγιο. Σύμφωνα με συντηρητικές εκτιμήσεις υπάρχει η δυνατότητα για εγκατάσταση και λειτουργία αιολικών μονάδων συνολικής ισχύος 3.000MW τόσο στην ενδοχώρα, για άμεση ενίσχυση του διασυνδεδεμένου δικτύου, όσο και στο νησιωτικό σύμπλεγμα, με δυνατοτα να καλυφθεί το 25-35% των αναγκών της χώρας σε ηλεκτρική ενέργεια.

Οι πιο ευνοημένες, από πλευράς αιολικού δυναμικού, περιοχές στην Ελλάδα βρίσκονται στο Αιγαίο, κυρίως στην περιοχή των Κυκλάδων, της Κρήτης (βόρειο τμήμα του νησιού) στην Ανατολική και Νοτιανατολική Πελοπόννησο την Εύβοια και την Ανατολική Θράκη. Εκεί επικεντρώνονται οι προσπάθειες ανάπτυξης των αιολικών πάρκων. Από πλευράς οικονομικών

συνθηκών όμως το πρόβλημα των νησιών είναι η μη ύπαρξη διασύνδεσης με το εθνικό δίκτυο, ώστε να υπάρχει απορρόφηση της παραγόμενης ενέργειας κατά την εποχή χαμηλής ζήτησης αυτής, έξω από την τουριστική περίοδο. Περιοχές με αιολικό ενδιαφέρον όμως υπάρχουν και στη λοφώδη παράκτια ζώνη της Δυτικής Ελλάδας αλλά και σε αρκετά βουνά.

Πρέπει επιπλέον να αναφερθεί ότι σε πολλά ελληνικά νησιά οι κάτοικοι αντιδρούν στην εγκατάσταση αιολικών πάρκων φοβούμενοι μήπως οι ανεμογεννήτριες χαλάσουν την τουριστική εικόνα του νησιού. Σε αυτήν την περίπτωση έρχεται να δώσει λύση μια νέα πολλά υποσχόμενη τεχνολογία που αναπτύσσεται στην Βόρεια Ευρώπη και ιδιαίτερα στην Σκανδιναβία και στην Γερμανία. Είναι τα ονομαζόμενα «Αιολικά πάρκα off shore» τα οποία κατασκευάζονται μέσα στην θάλασσα σε περιοχές με ιδιαίτερα υψηλές ταχύτητες ανέμου. Το Αιγαίο πέλαγος προσφέρεται ιδιαίτερα για τέτοια χρήση και υπολογίζεται ότι ένα θαλάσσιο αιολικό πάρκο μπορεί να παράγει ετησίως μέχρι 40% περισσότερο ηλεκτρικό ρεύμα από ότι ένα ηπειρώτικο. Το μέλλον της αιολικής ενέργειας φαίνεται να βρίσκεται στα θαλάσσια αιολικά πάρκα .

2.3 ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ / ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Οι επικρατέστεροι τύποι ανεμογεννητριών ταξινομούνται σύμφωνα με τον προσανατολισμό των αξόνων τους σε σχέση με τη ροή του ανέμου. Ως εκ τούτου, οι πλέον διαδεδομένοι τύποι ανεμογεννητριών είναι οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου και οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα.

Οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα έχουν συνήθως τον άξονά τους παράλληλο προς την κατεύθυνση του ανέμου, ενώ σε μερικές περιπτώσεις, έχουμε ανεμογεννήτριες των οποίων ο άξονας είναι παράλληλος προς την επιφάνεια της γης και κάθετος προς την κατεύθυνση του ανέμου.

Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα εμφανίζουν το σημαντικό πλεονέκτημα της αυτόματης προσαρμογής στη διεύθυνση του ανέμου, δεδομένου ότι ο άξονάς τους είναι κάθετος σε αυτή, καθώς και στην επιφάνεια

της γης. Επίσης, έχουν επινοηθεί και άλλοι τύποι ανεμοκινητήρων, όπως για παράδειγμα οι ανεμογεννήτριες τύπου μεταφοράς, αποτελούμενες από οχήματα που κινούνται σε μια καθορισμένη διαδρομή και είναι συνδεδεμένα με ηλεκτρογεννήτριες.

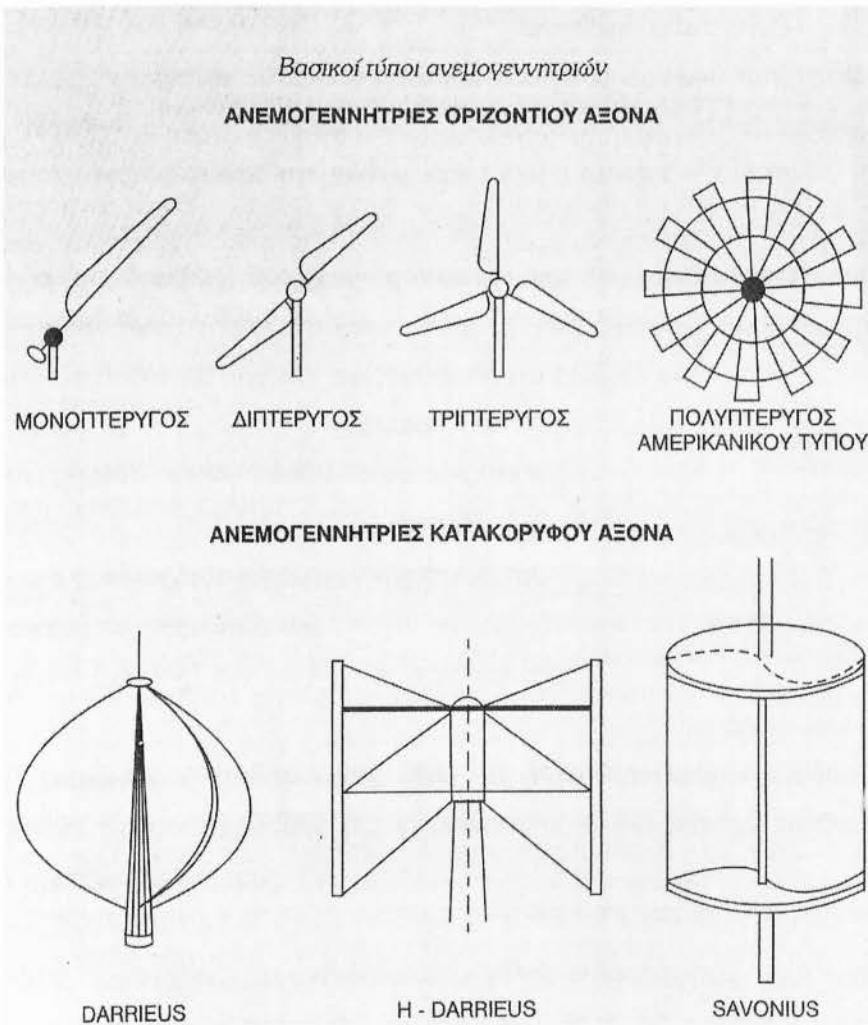
Ένα μέγεθος που συνδέεται με τη γωνιακή ταχύτητα μιας πτερωτής είναι η παράμετρος περιστροφής της μηχανής «λ», η οποία ορίζεται ως:

$$\lambda = (\omega_0 * R) / V_w$$

όπου R η ακτίνα της πτερωτής,

ω_0 η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα και

V_w η ταχύτητα του ανέμου στον άξονα της μηχανής.



Σχήμα 2.1: Βασικοί τύποι ανεμογεννητριών

Ανάλογα με τη μηχανική ισχύ N_o που παρέχουν οι ανεμοκινητήρες στην έξοδό τους, κατατάσσονται από πλευράς μεγέθους σαν:

A) Μικροί, όταν για την ονομαστική ισχύ τους ισχύει ότι:

$$50W \leq N_o \leq 30 kW$$

B) Μεσαίοι, όταν για την ονομαστική ισχύ τους ισχύει ότι:

$$30 kW \leq N_o \leq 300 kW$$

Γ) Μεγάλοι, όταν για την ονομαστική ισχύ τους ισχύει ότι:

$$300 kW \leq N_o \leq 5 MW$$

Ο χαρακτηρισμός μιας ανεμογεννήτριας ως μικρή ή μεγάλη δεν ακολουθεί αυστηρά τα παραπάνω κριτήρια, αφού οι εν λόγω τιμές είναι ενδεικτικές, ενώ αλλάζουν και από χρονική περίοδο σε χρονική περίοδο.

Τέλος, οι μηχανές κατατάσσονται και βάση του αριθμού των πτερυγίων που διαθέτει η πτερωτή τους. Έτσι χωρίζονται σε πολυπτέρυγες και ολιγοπτέρυγες, με αριθμό πτερυγίων από 1 έως 3 σε κάθε πτερωτή.

Μία παράμετρος που χρησιμοποιείται για το χαρακτηρισμό και την ταξινόμηση των ανεμοκινητήρων είναι η παράμετρος στιβαρότητας σ (solidity), η οποία για μηχανές οριζόντιου άξονα ορίζεται ως:

$$\sigma = zcR / \pi R^2$$

ενώ για μηχανές κατακόρυφου άξονα ορίζεται ως:

$$\sigma = zc/R$$

όπου z ο αριθμός των πτερυγίων της πτερωτής

R , η ακτίνα της πτερωτής και

c , η χορδή (πλάτος) των πτερυγίων της πτερωτής.

Η παράμετρος στιβαρότητας δίνει το λόγο του εμβαδού όλων των πτερυγίων προς το εμβαδόν της επιφάνειας που διαγράφουν τα πτερύγια κατά την περιστροφή τους.

Κατά κανόνα οι ανεμογεννήτριες μεγάλης στιβαρότητας είναι μηχανές αργόστροφες, αποδίδοντας τη μέγιστη ισχύ τους σε χαμηλές τιμές της παραμέτρου περιστροφής λ , έχουν σχετικά μικρό βαθμό απόδοσης, ενώ είναι

ανθεκτικές με ελάχιστες ανάγκες συντήρησης. Επιπλέον, χαρακτηρίζονται από σχετικά μεγάλες δυνάμεις στα πτερύγια και κατά συνέπεια μεγάλη ροπή στον άξονα περιστροφής, ξεκινούν από μόνες τους όταν αρχίζει να φυσάει ο άνεμος, είναι κατάλληλες για αγροτικές χρήσεις και στηρίζονται σε σχετικά απλή τεχνολογία.

Αντίθετα, οι ανεμογεννήτριες μικρής στιβαρότητας είναι μηχανές πολύστροφες, αποδίδουν τη μέγιστη ισχύ τους σε μεγάλες τιμές της παραμέτρου λ , διαθέτουν σχετικά μεγάλο βαθμό απόδοσης, είναι πλέον ευπαθείς από τις μηχανές μεγάλης στιβαρότητας και χαρακτηρίζονται από σχετικά μικρές δυνάμεις στα πτερύγια και περιορισμένη ροπή στον άξονά τους. Επίσης σε ορισμένες περιπτώσεις χρειάζονται εξωτερική βοήθεια για να ξεκινήσουν, είναι κατάλληλες για ηλεκτροπαραγωγή και θεωρούνται προϊόντα αρκετά υψηλής τεχνολογίας, ιδιαίτερα οι μεγαλύτερες από αυτές.

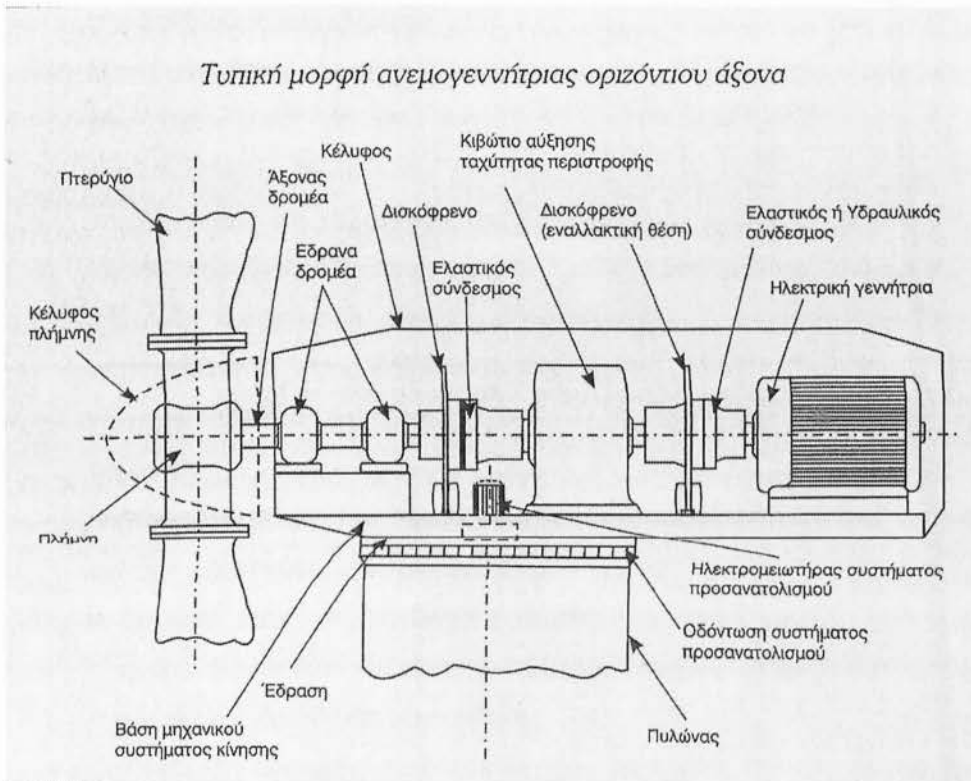
2.4 ΜΗΧΑΝΕΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΆΞΟΝΑ

Στην κατηγορία των αιολικών μηχανών οριζοντίου άξονα περιλαμβάνονται και οι ανεμογεννήτριες που κατά κύριο λόγο χρησιμοποιούνται σήμερα (περίπου το 90% του συνόλου των εγκατεστημένων μηχανών παγκοσμίως) και οι οποίες ονομάζονται ανεμογεννήτριες τύπου έλικας.

Οι μηχανές αυτές εμφανίζουν σημαντικές περιφερειακές ταχύτητες και ανάμεσα στα βασικά τους χαρακτηριστικά είναι ο μεγάλος βαθμός απόδοσής τους, αλλά και η βέλτιστη λειτουργία τους σε μεγάλες τιμές της παραμέτρου περιστροφής λ , με αποτέλεσμα την αρκετά μεγάλη σχετική ταχύτητα προσβολής των πτερυγίων από τον άνεμο.

Στις μηχανές τύπου έλικας γίνεται ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής της πτερωτής και για λόγους προστασίας της σε περιπτώσεις πολύ ισχυρών ανέμων, είτε με τη χρήση ειδικών αεροδυναμικών βοηθημάτων στην άκρη των πτερυγίων, είτε με τη στροφή της πτερωτής υπό γωνία σε σχέση με τη

διεύθυνση του ανέμου. Η αιολική ισχύς από την πτερωτή μεταφέρεται είτε μέσω συστήματος μετάδοσης κίνησης (οδοντωτοί τροχοί) στη βάση του πύργου στήριξης, είτε από τον άξονα της πτερυγώσης στην ηλεκτρική γεννήτρια η οποία βρίσκεται συνήθως επάνω στον πύργο στήριξης. Οι μηχανές οριζώντιου άξονα συνεχίζουν να αναπτύσσονται και σήμερα, ενώ κατασκευάζονται μονάδες με ισχύ που κυμαίνεται από μερικές εκατοντάδες Watt έως και αρκετά MW.



Σχήμα 2.2: Εσωτερικό ανεμογεννήτριας οριζώντιου άξονα

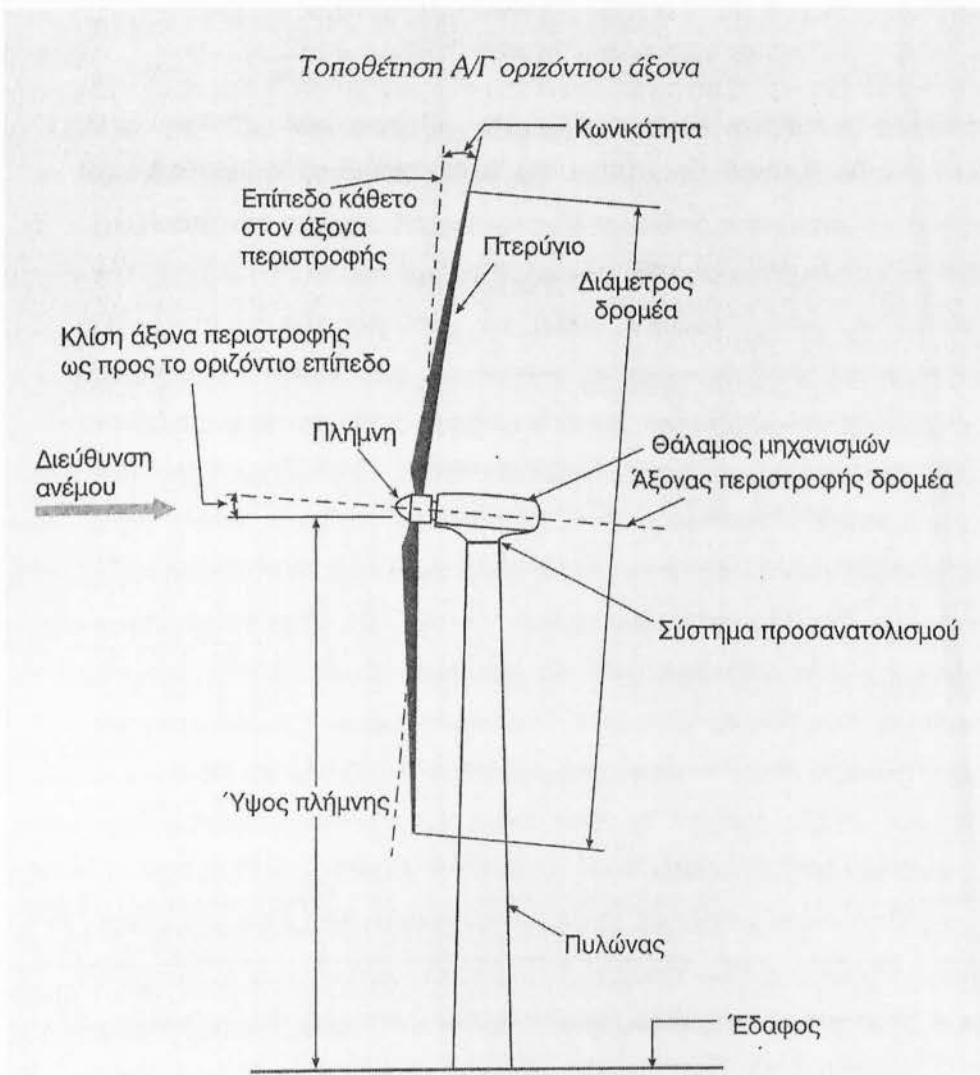
Ανάμεσα στα προβλήματα που παρουσιάζουν οι ανεμογεννήτριες οριζώντιου άξονα κατά την κατασκευή τους και κυρίως οι μηχανές τύπου έλικας, είναι τα παρακάτω:

- Ο βέλτιστος σχεδιασμός του δρομέα με σκοπό τη βελτίωση των χαρακτηριστικών λειτουργίας της μηχανής. Στόχος είναι να βρεθεί ένας βέλτιστος σχεδιασμός των παραμέτρων που συνθέτουν το δρομέα της ανεμογεννήτριας, δηλαδή του αριθμού πτερυγίων, της διανομής του

πλάτους του κάθε πτερυγίου, της κατάλληλης αεροτομής, της συστροφής του πτερυγίου κλπ.

- Η συμπεριφορά του δρομέα σε ειδικές καταστάσεις, όπως η εκκίνηση, η επιτάχυνση, η επιβράδυνση κτλ. Ένα κρίσιμο θέμα της κατηγορίας αυτής αποτελεί η ροπή εκκίνησης του δρομέα, ενώ ενδιαφέρον παρουσιάζει και η συμπεριφορά της πτερωτής σε χρονικά μεταβαλλόμενο πεδίο ροής παρουσία τύρβης, αλλά και βάσει της διανομής της ταχύτητας τύπου οριακού στρώματος του ανέμου λόγω της επίδρασης του εδάφους.
- Η ρύθμιση του βήματος των πτερυγίων και οι αντίστοιχοι αυτοματισμοί που σχετίζονται με την έναρξη και την παύση λειτουργίας του ανεμοκινητήρα. Η ρύθμιση του βήματος γίνεται είτε σε ολόκληρο το πτερύγιο είτε σε μέρος του, με σκοπό αφενός τον περιορισμό της ισχύος σε υψηλές ταχύτητες ανέμου, αφετέρου τη διατήρηση σταθερών στροφών της μηχανής. Επίσης μεταβολή του βήματος γίνεται ώστε να επιτευχθεί ο μέγιστος βαθμός απόδοσης της πτερωτής, καθώς και για τη μεγιστοποίηση της ροπής, ώστε να διευκολυνθεί η εκκίνηση της μηχανής.
- Ο προσανεμισμός του άξονα του δρομέα προς την κατεύθυνση του ανέμου, ο οποίος επιτυγχάνεται είτε με τη χρήση καθοδηγητικού πτερυγίου, είτε με κατάλληλα αισθητήρια που καταγράφουν τη στιγμιαία διεύθυνση του ανέμου και προσανατολίζουν ηλεκτρονικά την πτερωτή στη διεύθυνση του ανέμου.
- Προβλήματα αντοχής των υλικών που αφορούν την κατασκευή και έδραση των πτερυγίων. Τα προβλήματα αυτά ίσως είναι και τα βασικότερα εμπόδια κατασκευής ανεμοκινητήρων υψηλής αξιοπιστίας, αφού ο άνεμος εξασκεί πάνω στα πτερύγια και στις αντίστοιχες εδράσεις τους σημαντικές δυνάμεις, ιδιαίτερα σε μηχανές μεγάλων διαστάσεων.
- Ο καθορισμός του ύψους του δρομέα επάνω από το έδαφος, ο οποίος πρέπει να συνεκτιμά τη μορφή του πεδίου ροής που προσβάλλει την πτερωτή (τραχύτητα, εμπόδια κτλ). Γενικά, έχουμε αύξηση της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος, με παράλληλη όμως αύξηση και της δαπάνης κατασκευής της εγκατάστασης.

- Η κατασκευή του πύργου στήριξης και η θεμελίωσή του ώστε να συνδυάζει το κατάλληλο αεροδυναμικό σχήμα με τη σταθερότητα και την αντοχή σε χρονικά μεταβαλλόμενες καταπονήσεις. Επιπλέον, πρέπει να μελετηθούν φαινόμενα αλληλεπίδρασης περιστρεφόμενων πτερυγίων και πύργου στήριξης, καθώς και η θεμελίωση ανεμοκινητήρων σε εδάφη περιορισμένης στερεότητας όπως ο βυθός της θάλασσας.
- Η μελέτη του πεδίου ροής πίσω από την πτερωτή και η επίδρασή του στο περιβάλλον, καθώς και σε πιθανές απόμενες ανεμογεννήτριες. Στόχος αυτής της μελέτης είναι να μεγιστοποιηθεί η αξιοποίηση της γης.

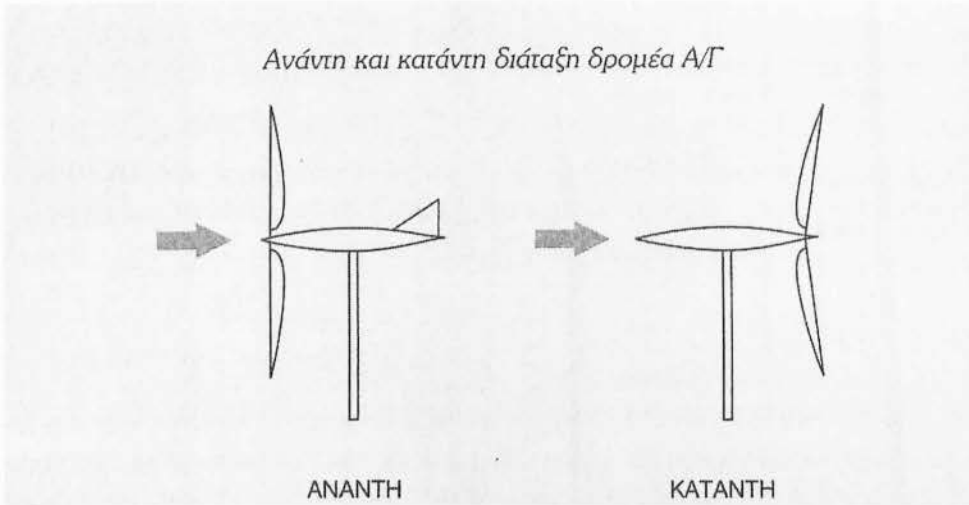


Σχήμα 2.3: Προσανατολισμός ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα

Τα βασικά μέρη μιας ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα είναι ο πύργος στήριξης, η πτερωτή, ο άξονας περιστροφής, το σύστημα μετάδοσης της κίνησης, το σύστημα ελέγχου της ανεμογεννήτριας, η ηλεκτρική γεννήτρια, καθώς και το σύστημα προσανατολισμού προσανεμισμού της μηχανής. Ορισμένα χαρακτηριστικά για τα μέρη αυτά φαίνονται παρακάτω.

- Η πτερωτή της ανεμογεννήτριας αποτελείται από πτερύγια των οποίων το σχήμα έχει προέλθει από αντίστοιχα πτερύγια αεροπορικών κινητήρων και είναι κατασκευασμένα από ελαφρά κράματα μετάλλων, ενισχυμένο πολυεστέρα, αλλά και ξύλο σε συνδυασμό με ειδικές ρητίνες. Η πτερωτή τοποθετείται είτε στα ανάντη είτε στα κατόντη του πύργου στήριξης και τα πτερύγια καλύπτουν ένα μικρό ποσοστό του εμβαδού της περιφέρειας που διαγράφουν. Όταν είναι τοποθετημένη στα κατόντη του πύργου στήριξης, έχουμε αυξημένο επίπεδο αεροδυναμικού θορύβου, αλλά και αυτόματο προσανατολισμό στη διεύθυνση του ανέμου. Κατά συνέπεια συνήθως προτιμάται η ανάντη τοποθέτηση. Η επιλογή του πλήθους των πτερυγίων σχετίζεται με την αεροδυναμική φόρτίσή τους, το βαθμό απόδοσής τους, το κόστος κατασκευής, καθώς και με θέματα αντοχής και συντονισμού. Τα πτερύγια είναι συνήθως εφοδιασμένα με συστήματα αεροδυναμικής πέδησης (αερόφρενα), τα οποία διακόπτουν τη λειτουργία της μηχανής, όταν αυτό είναι απαραίτητο. Σε κάποιες περιπτώσεις, χρησιμοποιούνται και μικρά αλεξίπτωτα, τα οποία απελευθερώνονται φυγοκεντρικά μετά από κάποιο όριο στροφών και επιβραδύνουν την ανεμογεννήτρια. Για τη βελτίωση της συμπεριφοράς μιας πτερωτής ανεμογεννήτριας, χρησιμοποιούνται πτερωτές μεταβλητού βήματος αντί για τις πιο απλές σταθερού βήματος, κάτι το οποίο σημαίνει πως το πτερύγιο περιστρέφεται γύρω από το διαμήκη άξονά του, με αποτέλεσμα τη μεταβολή της γωνίας προσβολής του από τον άνεμο. Έτσι επιτυγχάνεται η διατήρηση σταθερής ταχύτητας περιστροφής της ανεμογεννήτριας, η βελτιστοποίηση της αεροδυναμικής απόδοσης των πτερυγίων, ο έλεγχος της παραγόμενης ισχύος, ο περιορισμός των δυνάμεων που καταπονούν τα πτερύγια κ.α.

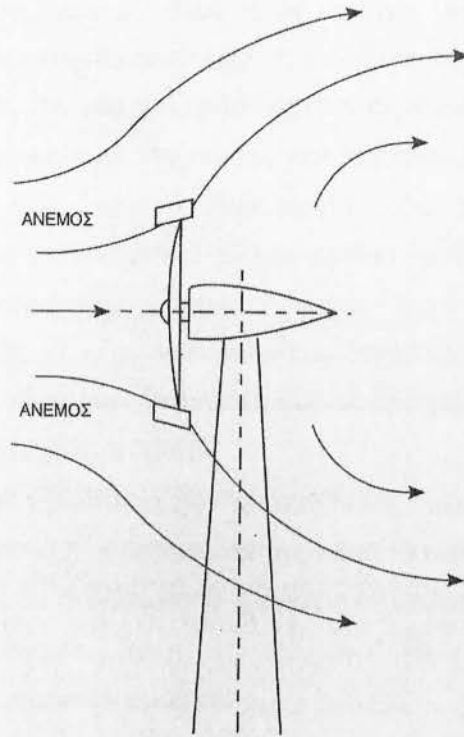
Ανάντη και κατάντη διάταξη δρομέα Α/Γ



Σχήμα 2.4: Ανάντη και κατάντη διάταξη

- Η πλήμνη αποτελεί το δεύτερο συστατικό της πτερωτής και περιλαμβάνει το μέρος της ανεμογεννήτριας πάνω στο οποίο προσαρμόζονται τα πτερύγια. Η τελική μορφή της εξαρτάται από το είδος της πτερωτής και από τους επιθυμητούς βαθμούς ελευθερίας στη θέση σύνδεσης πτερυγίων και άξονα.
- Ο άξονας της ανεμογεννήτριας κατασκευάζεται από ειδικό ενισχυμένο χάλυβα, ούτως ώστε να μπορεί δίχως πρόβλημα να μεταφέρει ισχυρές στρεπτικές και καμπτικές ροπές.
- Το σύστημα προσανατολισμού λειτουργεί με τη βοήθεια καθοδηγητικών πτερυγίων και ειδικών αυτοματισμών. Η πιο σύγχρονη μέθοδος προσανατολισμού στηρίζεται στη χρήση ειδικού αισθητηρίου και σερβομηχανισμού, που περιστρέφει την άτρακτο της μηχανής με τη βοήθεια οδόντωσης περιστροφής. Μία πιο πρόσφατη επινοήση είναι η χρήση μικρών εγκάρσιων επιφανειών στα ακροπτερύγια του δρομέα (tip-vanes), οι οποίες βοηθούν στη σύγκλιση των γραμμών ροής διαμέσου της πτερωτής με αποτέλεσμα την αύξηση της παροχής του αέρα που διασχίζει την πτερωτή, ενώ δεν παρουσιάζονται προβλήματα στο γρήγορο προσανεμισμό του συστήματος, Ωστόσο, η χρήση του συστήματος αυτού, το οποίο φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, επιβαρύνει με δυσανάλογα δυναμικά φορτία το σύνολο της πτερωτής.

Επίδραση των «tip-vanes» στη ροή



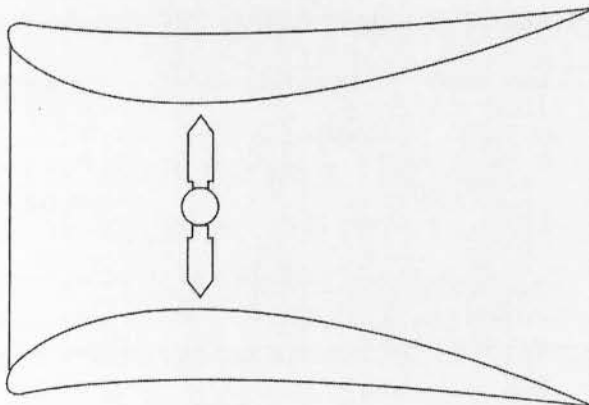
Σχήμα 2.5: Επίδραση των ακροπτερυγίων στη ροή

- Το σύστημα μετάδοσης της κίνησης που περιλαμβάνει διβάθμιο ή τριβάθμιο κιβώτιο μετασχηματισμού της χαμηλής ταχύτητας περιστροφής της περρωτής σε υψηλότερες ταχύτητες περιστροφής. Ο τυπικός βαθμός απόδοσης ενός διβάθμιου συστήματος μετάδοσης είναι περίπου 96%, ενώ για λόγους ασφαλείας η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς πρέπει να είναι τουλάχιστον διπλάσια της ονομαστικής ισχύος της ανεμογεννήτριας. Το σύστημα κίνησης περιλαμβάνει επίσης υδραυλικό ή μηχανικό φρένο και ελαστικούς συνδέσμους απορρόφησης στρεπτικών ταλαντώσεων. Το μηχανικό φρένο της ανεμογεννήτριας τοποθετείται είτε στον άξονα υψηλής ταχύτητας περιστροφής με κίνδυνο απώλειας φορτίου ή θραύση του συστήματος κίνησης, είτε στον άξονα χαμηλής ταχύτητας περιστροφής, οπότε και λόγω της μεγάλης ροπής πέδησης, απαιτείται φρένο αυξημένων διαστάσεων, βάρους και κόστους.

- Ο πύργος στήριξης της ανεμογεννήτριας αποτελείται συνήθως είτε από μεταλλικό δικτύωμα, είτε από μία στήλη από μπετόν ή μεταλλικό σωλήνα. Στην τελευταία περίπτωση υπάρχει μέριμνα για εσωτερική σκάλα ή ακόμη και ανελκυστήρα για μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες. Το ελάχιστο ύψος του πύργου στήριξης είναι συνήθως ίσο με τη διάμετρο της πτερωτής, ενώ για την εκλογή του λαμβάνουμε υπόψη το κόστος κατασκευής αλλά και τη δυνατότητα αξιοποίησης υψηλότερων ταχυτήτων του ανέμου με την αύξηση και του ύψους της πτερωτής.
- Οι ηλεκτρογεννήτριες χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική και συνήθως είναι σύγχρονες και ασύγχρονες γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος και σπανιότερα γεννήτριες συνεχούς ρεύματος.
- Τέλος, για την προστασία των τμημάτων της ανεμογεννήτριας από τις καιρικές συνθήκες, χρησιμοποιείται ειδικό κέλυφος, συνήθως από κράματα χάλυβα ή αλουμινίου ή ενισχυμένο πλαστικό, το οποίο στην περιοχή της πλήμνης πρέπει να έχει αεροδυναμική μορφή, καθώς και να έχει αντιδιαβρωτική προστασία.

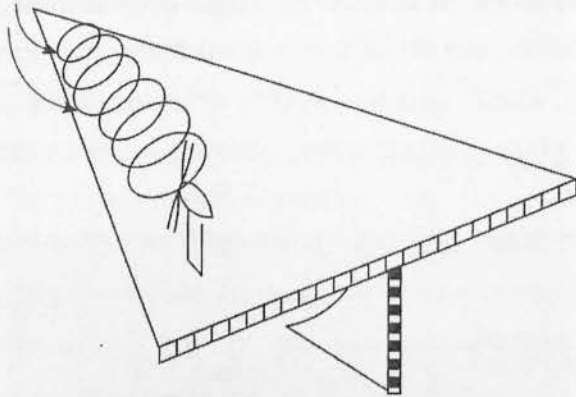
Παρακάτω βλέπουμε σχηματικά κάποιους από τους τύπους ανεμοκινητήρων οριζοντίου άξονα.

Σχηματική παρουσίαση Α/Κ με περίβλημα τύπου «Venturi»



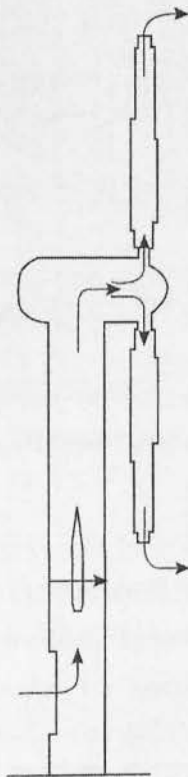
Σχήμα 2.6α: Ανεμοκινητήρας με περίβλημα Venturi

Παρουσίαση στροβίλων, πτέρυγες τύπου Δέλτα



Σχήμα 2.6β: Στρόβιλοι σε πτέρυγες τύπου Δέλτα

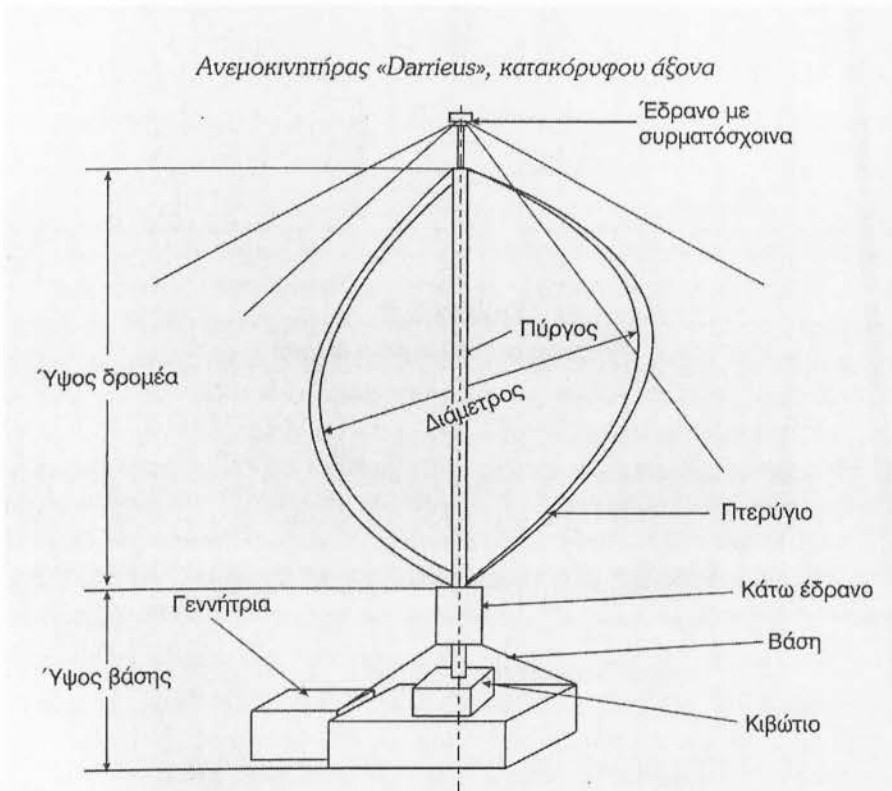
Παρουσίαση A/K Andreau-Enfield



Σχήμα 2.6γ: Ανεμοκινητήρας Andreau-Enfield

2.5 ΜΗΧΑΝΕΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΥ ΑΞΟΝΑ

Οι μηχανές κατακόρυφου άξονα εμφανίζουν το σημαντικό πλεονέκτημα αυτόματης προσαρμογής στη διεύθυνση του ανέμου, ως εκ τούτου αποτελούν και πιο απλές κατασκευές. Οι πλέον γνωστοί τύποι ανεμοκινητήρων κατακόρυφου άξονα είναι οι μηχανές τύπου Darrieus και οι μηχανές τύπου Savonius.

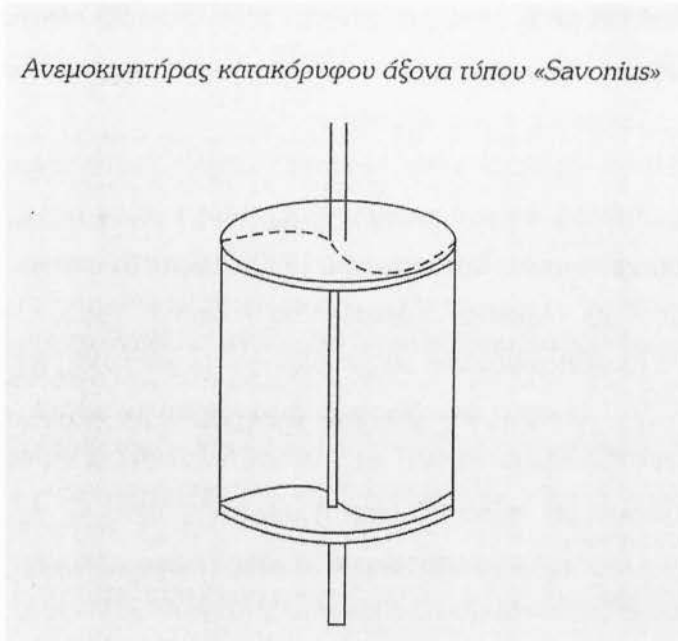


Σχήμα 2.7α: Ανεμοκινητήρας τύπου Darrieus

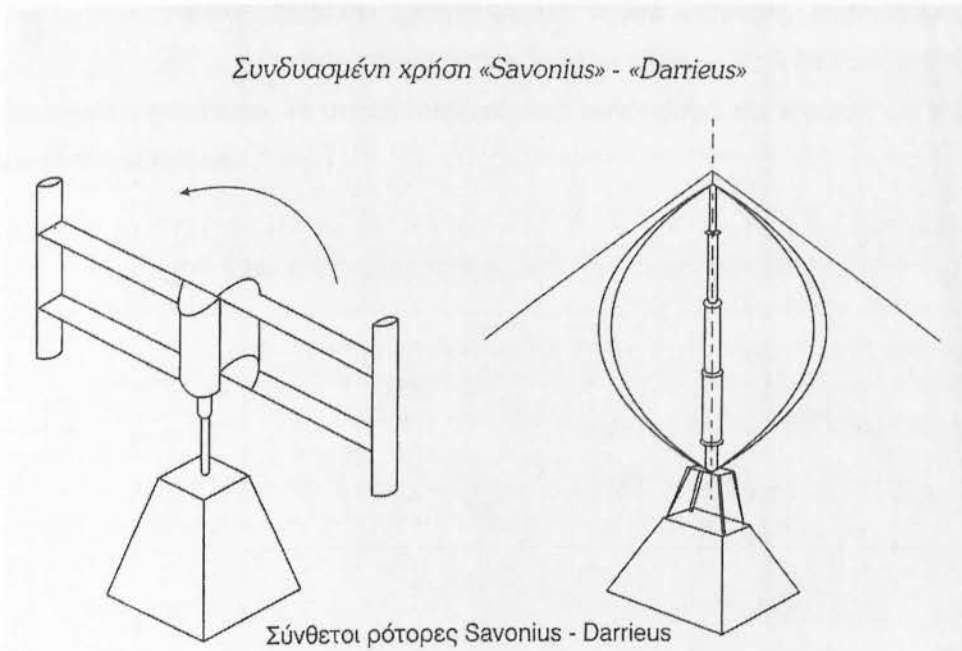
Συνοπτικά, οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα περιστρέφονται γύρω από έναν άξονα κάθετο τόσο στη διεύθυνση του ανέμου, όσο και στο έδαφος. Οι αιολικές μηχανές του τύπου αυτού έχουν καλή αεροδυναμική απόδοση, ανεξαρτησία ως προς τη διεύθυνση του ανέμου, χαμηλό κόστος κατασκευής και απλά συστήματα ελέγχου.

Με τη χρήση μηχανών του τύπου αυτού δίνεται η δυνατότητα να κατασκευασθούν μηχανές με ονομαστική ισχύ της τάξεως του ενός MW. Ένα

άλλο πλεονέκτημα των μηχανών κατακόρυφου άξονα είναι ότι οι μηχανισμοί και η γεννήτρια βρίσκονται κατά κανόνα στο έδαφος, με αποτέλεσμα να απαιτείται ελαφρότερος πυλώνας και να διευκολύνεται η λειτουργία και η συντήρηση του όλου συστήματος.



Σχήμα 2.7β: Ανεμοκινητήρας τύπου Savonius



Σχήμα 2.7γ: Συνδυασμός Savonius-Darrieus

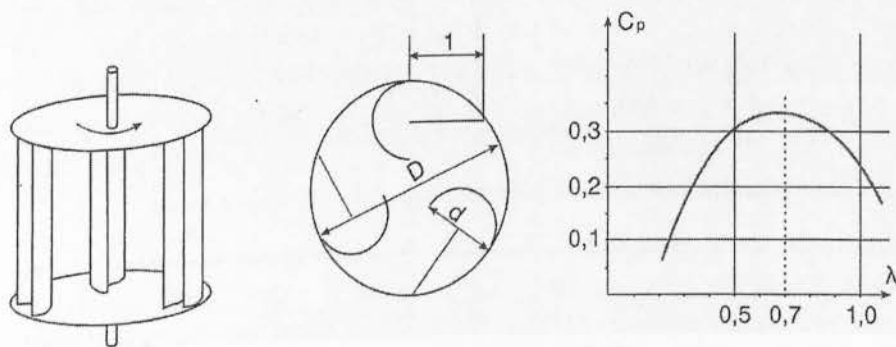
Το σύστημα μετάδοσης της κίνησης δε παρουσιάζει ιδιαίτερες διαφορές σε σύγκριση με το αντίστοιχο σύστημα των μηχανών οριζοντίου άξονα, εκτός βέβαια από το γεγονός πως τα εξαρτήματα είναι τοποθετημένα κατακόρυφα. Ο δρομέας στηρίζεται σε κατάλληλο έδρανο στη βάση του, το οποίο ακόμα και σε σταθερή ταχύτητα ανέμου καταπονείται από εναλλασσόμενα φορτία. Επίσης, η μηχανή διατηρείται σε κατακόρυφη θέση με τη βοήθεια καλωδίων, τα οποία συνδέουν την κορυφή του άξονα της μηχανής με το έδαφος.

Οι ανεμογεννήτριες τύπου Darrieus έχουν ιδιαίτερα υψηλές ταχύτητες εκκίνησης και για μεγάλα συστήματα χρησιμοποιείται βοηθητικός κινητήρας για την εκκίνηση. Επιπλέον, οι μηχανές του τύπου αυτού παρέχουν χαμηλότερο μέσο ετήσιο συντελεστή ισχύος. Οι συγκεκριμένες ανεμογεννήτριες θεωρούνται συγκρίσιμες σε οικονομικοτεχνική ελκυστικότητα με τις πλέον σύγχρονες ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα.

Αντίστοιχα, οι ανεμογεννήτριες τύπου Savonius παρουσιάζουν χαμηλό συντελεστή ισχύος, μικρή ακραία περιφερειακή ταχύτητα, περιορισμένο μέγεθος, αλλά και εξαιρετική απλότητα και οικονομικότητα κατασκευής.

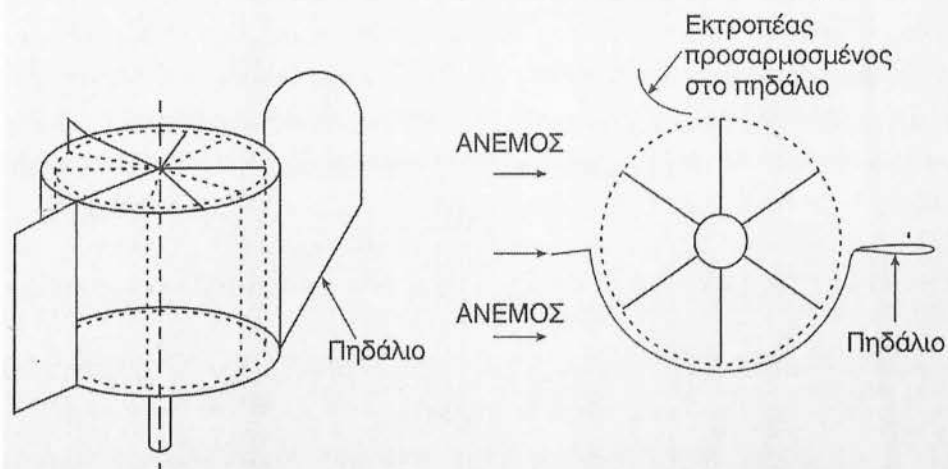
Στα παρακάτω σχήματα μπορούμε να δούμε διάφορες παραλλαγές, καθώς και τύπους ανεμοκινητήρων κατακόρυφου άξονα, ανάμεσά τους και το σύστημα «cyclonico», το οποίο βασίζεται στο συνδυασμό της ηλιακής και της αιολικής ενέργειας.

Παραλλαγές-εφαρμογές κινητήρα «Savonius»



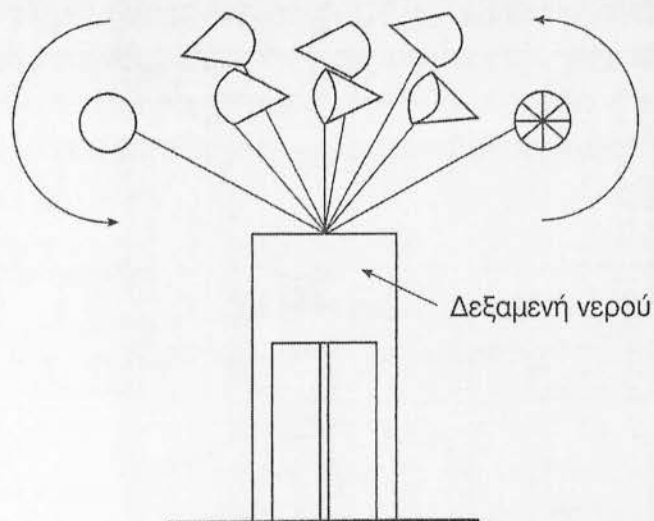
Σχήμα 2.8α: Παραλλαγές-εφαρμογές κινητήρα τύπου Savonius

Μηχανή τύπου «Προπετάσματος»



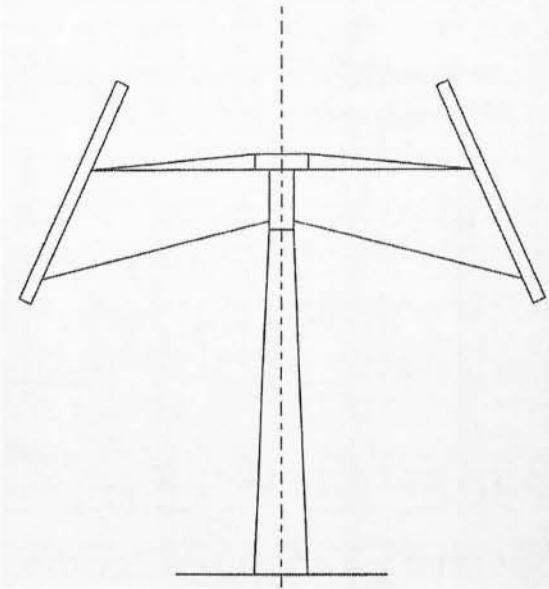
Σχήμα 2.8β: Μηχανή τύπου Προπετάσματος

Α/Κ τύπου Πανεμόνιο



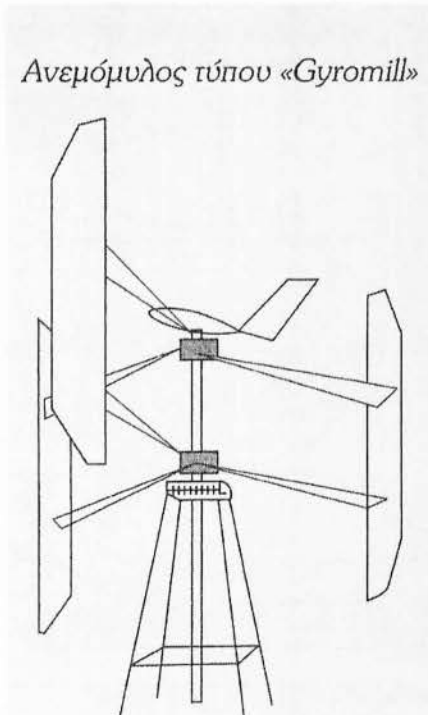
Σχήμα 2.8γ: Ανεμοκινητήρας τύπου Πανεμόνιο

Ανεμόμυλος τύπου «Musgrove»



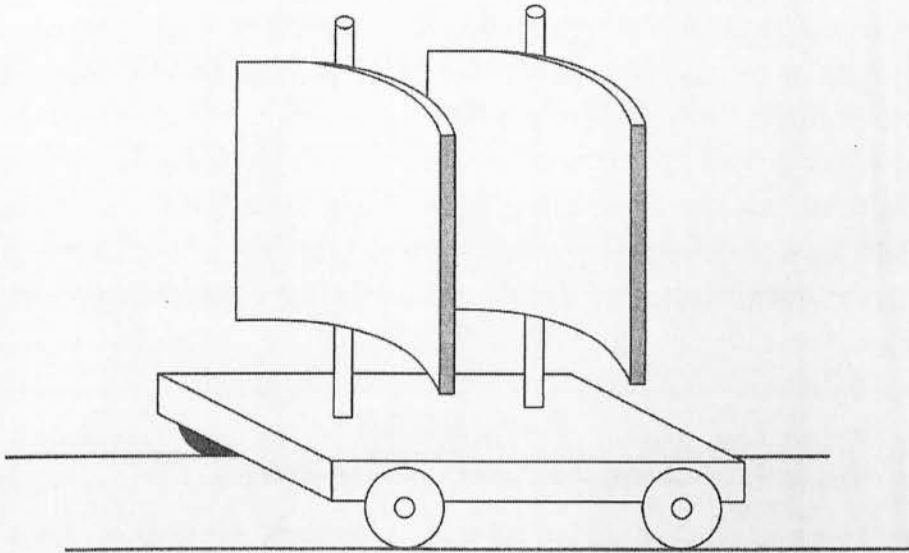
Σχήμα 2.8δ: Ανεμόμυλος τύπου Musgrove

Ανεμόμυλος τύπου «Gyromill»



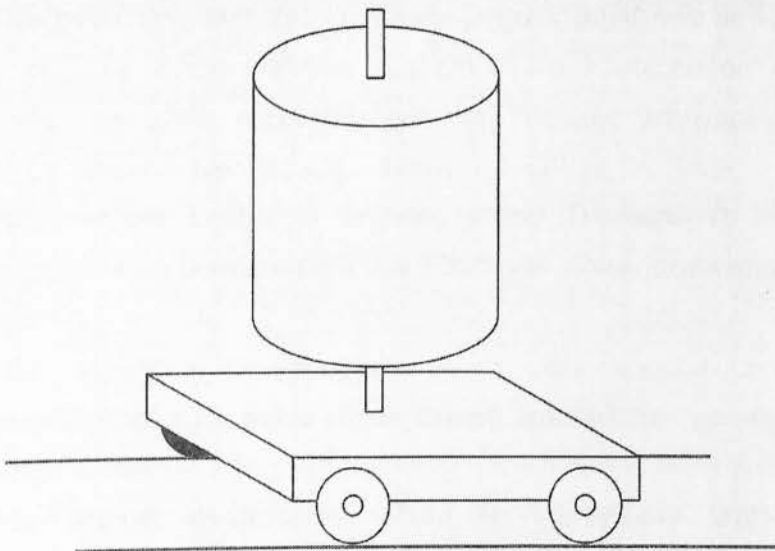
Σχήμα 2.8ε: Ανεμόμυλος τύπου Gyromill

Ενεργειακό σύστημα με κινούμενα βαγονέτα

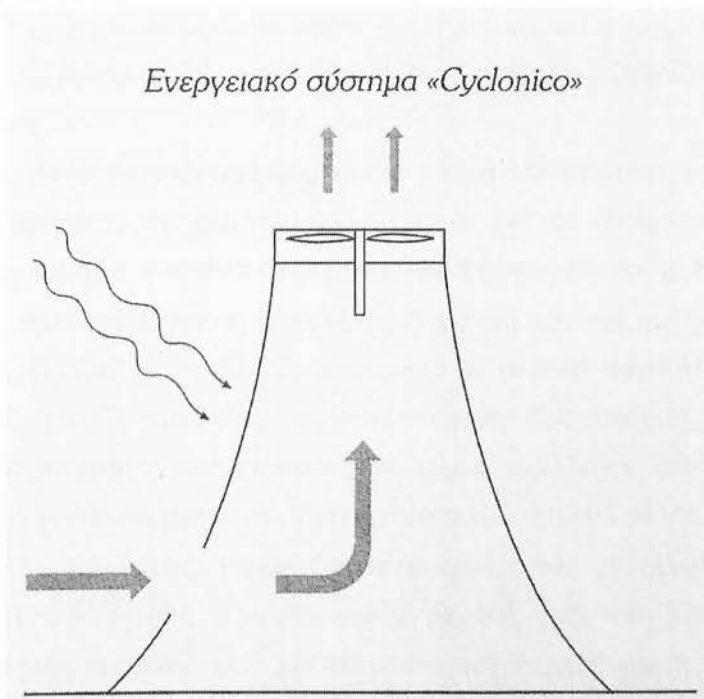


Σχήμα 2.8στ: Σύστημα κινούμενων βαγονέτων

Σύστημα «Madaras»



Σχήμα 2.8ζ: Σύστημα Madaras



Σχήμα 2.8η: Σύστημα Cyclonico

2.6 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι αιολικές μηχανές χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τις ανεμογεννήτριες οριζοντίου και κατακόρυφου άξονα. Οι επικρατέστεροι τύποι ανεμοκινητήρων της πρώτης κατηγορίας είναι οι μηχανές τύπου αεροπορικής έλικας, ενώ τη δεύτερη κατηγορία αντιπροσωπεύουν επάξια οι μηχανές τύπου Darrieus. Τα βασικότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των δύο αυτών τύπων αεροκινητήρων είναι τα εξής:

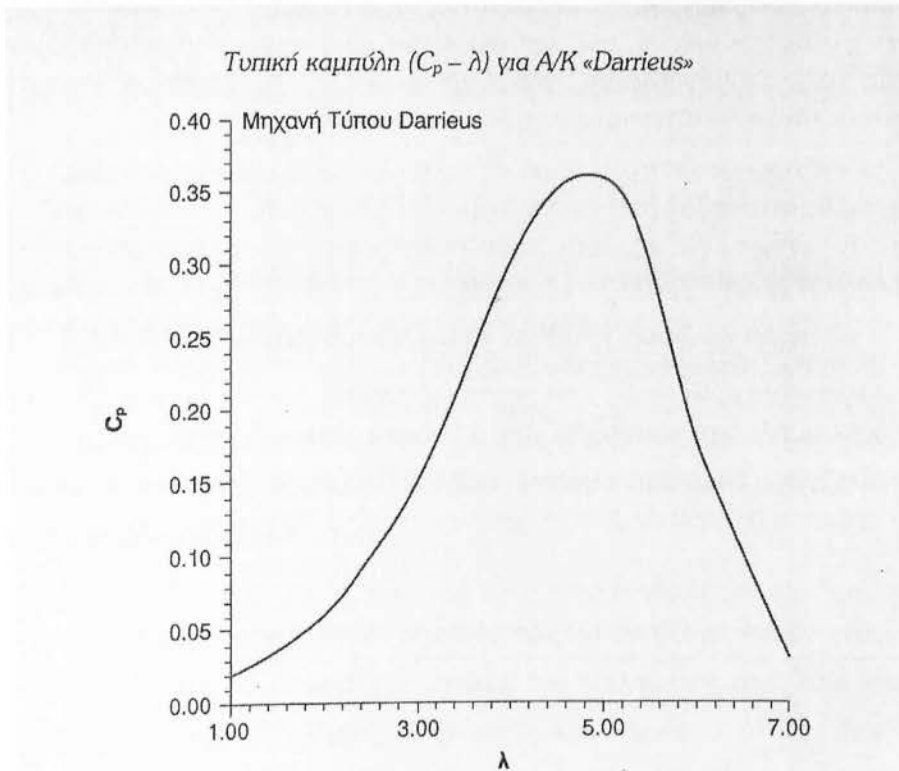
A) Οι μηχανές κατακόρυφου άξονα δε χρειάζονται σύστημα προσανατολισμού, το οποίο είναι άκρως απαραίτητο για τις μηχανές οριζόντιου άξονα.

B) Στις μηχανές κατακόρυφου άξονα το παραγόμενο μηχανικό έργο μεταφέρεται μέσω κατακόρυφου άξονα απευθείας στο έδαφος, όπου βρίσκεται τοποθετημένη και η ηλεκτρική γεννήτρια, σε αντίθεση με τις μηχανές οριζόντιου άξονα.

Γ) Στις μηχανές κατακόρυφου άξονα, η κατασκευή του πύργου στήριξης είναι απλή, ενώ στις μηχανές οριζόντιου άξονα, ο πύργος στήριξης έχει ειδικές απαιτήσεις.

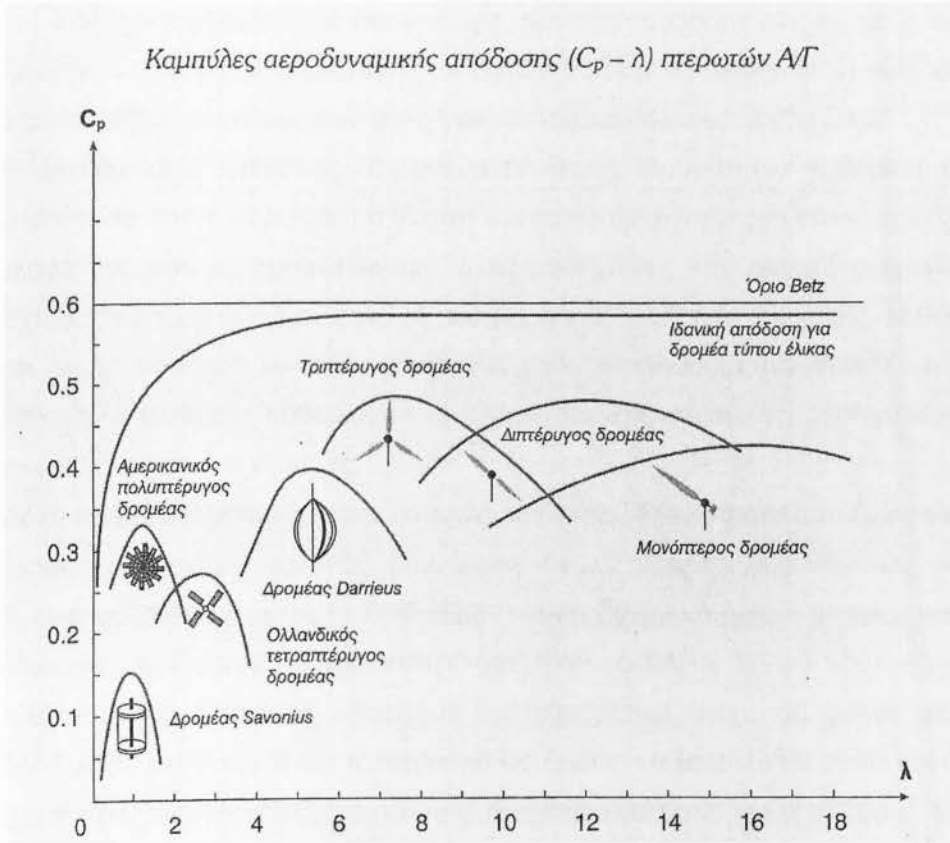
Δ) Στις μηχανές κατακόρυφου άξονα δεν υπάρχει δυνατότητα, αλλά ούτε και η ανάγκη ρύθμισης του βήματος της περρωτής για τον έλεγχο της ισχύος της μηχανής, πράγμα που είναι απαραίτητο για τις μηχανές οριζόντιου άξονα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην κατάλληλη μορφή της καμπύλης του δρομέα Darrieus, δεδομένου ότι το C_p , είναι μικρό σε μεγάλες ταχύτητες ανέμου και συνεπώς η ισχύς παραμένει περίπου σταθερή. Προϋπόθεση των ανωτέρω είναι η σταθερότητα των στροφών, όπως για παράδειγμα όταν η σύγχρονη ηλεκτρική γεννήτρια εμπλακεί στη συχνότητα του τοπικού δικτύου.

Ε) Τέλος, οι μηχανές τύπου Darrieus εργάζονται σε μεγάλες τιμές της παραμέτρου λ , γεγονός που εξασφαλίζει μεγάλες τιμές του αριθμού Reynolds και συνεπώς τυρβώδη ροή και ικανοποιητική αεροδυναμική απόδοση της περρωτής της μηχανής. Βέβαια, η τελευταία παρατήρηση πρέπει να συνδυαστεί και με την επόμενη, η οποία και αφορά την αεροδυναμική συμπεριφορά του συνόλου των αιολικών μηχανών.



Σχήμα 2.9: Καμπύλη ($C_p - \lambda$) για ανεμοκινητήρα Darrieus

ΣΤ) Ο συντελεστής ισχύος των μηχανών κατακόρυφου άξονα είναι εν γένει μικρότερος από αυτόν των μηχανών οριζοντίου άξονα. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για εμπορικές μηχανές κατακόρυφου άξονα η μέγιστη αναφερθείσα τιμή του συντελεστή ισχύος είναι $C_p = 0.36$, ενώ για τις μηχανές τύπου έλικας, η μέγιστη τιμή είναι $C_p = 0.45$.



Σχήμα 2.10: Καμπύλες αεροδυναμικής απόδοσης διαφόρων πτερωτών

Ζ) Οι μηχανές τύπου Darrieus παρουσιάζουν σημαντικό πρόβλημα κατά την εκκίνηση και απαιτείται εξωτερική βοήθεια, πράγμα που δεν εμφανίζεται στις μηχανές οριζοντίου άξονα.

Συνοψίζοντας, έχουμε ότι οι μηχανές οριζοντίου άξονα πλεονεκτούν σε συνολική απόδοση και θεωρούνται σαφώς πιο εξελιγμένες από κάθε άλλο τύπου αιολικές μηχανές. Όμως, οι μηχανές κατακόρυφου άξονα είναι πιο απλές στην κατασκευή τους και πέρα των προβλημάτων που εμφανίζουν,

είναι αρκετά ανταγωνιστικές των μηχανών οριζόντιου άξονα, λαμβάνοντας υπόψη και το κόστος της αρχικής εγκατάστασης.

2.7 ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

Κατά το σχεδιασμό και την επιλογή μιας εγκατάστασης αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας οι παράγοντες οι οποίοι πρέπει να ληφθούν υπόψη και χαρακτηρίζουν μια ανεμογεννήτρια η οποία πρόκειται να επιλεγεί είναι:

A) Η διάμετρος πτερωτής της ανεμογεννήτριας D , η οποία καθορίζει το εμβαδόν το οποίο σαρώνει η πτερωτή και συνεπώς την ενεργό επιφάνεια δια μέσου της οποίας προσπαθούμε να αξιοποιήσουμε την αιολική ενέργεια. Έχοντας κάποιες εκτιμήσεις για τη μέση ροή ενέργειας μιας περιοχής, καθώς και για το ποσοστό το οποίο μπορούμε να αξιοποιήσουμε (σε W/m^2), είναι δυνατός ο καταρχήν καθορισμός της διαμέτρου της πτερωτής, εφόσον είναι γνωστή η απαιτούμενη ισχύς.

B) Το ύψος τοποθέτησης H για μηχανές οριζόντιου άξονα ή απλά το ύψος του δρομέα για μηχανές κατακόρυφου άξονα. Γνωρίζουμε ότι αυξανόμενου του ύψους, αυξάνεται αφενός το διαθέσιμο αιολικό δυναμικό (μέχρι το τέλος του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος), αφετέρου το βάρος και το κόστος της εγκατάστασης. Επιπλέον, υπάρχουν και περιορισμοί ελάχιστου ύψους που βασίζονται στο γεγονός ότι τα πτερύγια δε πρέπει να βρίσκονται πολύ κοντά στο έδαφος, για να αποφεύγονται τα φαινόμενα αλληλεπίδρασης εδάφους. Εν γένει, το ύψος ενός ανεμοκινητήρα καθορίζεται με βάση τη διάμετρο της πτερωτής και η χρησιμοποιούμενες αριθμητικές τιμές είναι μεταξύ $H/D=1.0$ και $H/D=1.5$.

Γ) Το πλήθος των πτερυγίων z της πτερωτής, το οποίο συνδέεται και με τη στιβαρότητα σ της μηχανής. Στις σημερινές εφαρμογές χρησιμοποιούνται συνήθως τριπτέρυγες ή διπτέρυγες πτερωτές.

Δ) Το είδος των πτερυγίων της πτερωτής, που περιλαμβάνει αφενός τον τύπο των πτερυγίων, δηλαδή εάν αυτά ανήκουν σε κάποια τυποποιημένη κατηγορία ή όχι, το πάχος τους, τη συστροφή τους, αφετέρου τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους.

Ε) Η ονομαστική ταχύτητα περιστροφής n της πτερωτής, η οποία καθορίζεται από διάφορους παράγοντες, όπως η συχνότητα του ηλεκτρικού δικτύου σε περιπτώσεις διασυνδεδεμένων μηχανών και η αντοχή των πτερυγίων σε φυγόκεντρες τάσεις.

ΣΤ) Το βήμα της πτερωτής $\beta = \beta(r)$, το οποίο ορίζεται από τη γωνία β , η οποία σχηματίζεται από τη χορδή της αεροτομής και από το επίπεδο περιστροφής της πτερωτής. Το βήμα της πτερωτής αποτελεί γεωμετρικό στοιχείο αυτής και συνήθως μεταβάλλεται από το πόδι έως το κεφάλι των πτερυγίων, δηλαδή $\beta = \beta(r)$. Το βήμα της έλικας μειώνεται συνήθως από το πόδι έως το κεφάλι της πτερύγωσης, ενώ ο τρόπος της μεταβολής του βήματος κατά το ύψος του πτερυγίου αποτελεί ένα από τα βασικά στοιχεία επιτυχούς σχεδιασμού του δρομέα. Συνήθως, ο ορισμός του βήματος μιας πτερωτής αναφέρεται κατά σύμβαση σε απόσταση $2/3$ της ακτίνας της μηχανής από τον άξονά της ή στη θέση $2/3$ του ύψους του πτερυγίου, με επικρατέστερη τη δεύτερη άποψη.

Ζ) Ο συντελεστής ισχύος C_p της ανεμογεννήτριας αποτελεί στην ουσία τον αεροδυναμικό βαθμό απόδοσης της πτερωτής. Αξίζει να διευκρινιστεί ότι ο συντελεστής αυτός περιγράφει το ποσοστό της ισχύος του ανέμου που εκμεταλλεύεται η πτερωτή της μηχανής. Ακόμα και για μία ιδανική έλικα, ο συντελεστής ισχύος δεν είναι δυνατόν να υπερβεί το όριο του Betz, $C_p \leq 0.593$. Στην πραγματικότητα ο συντελεστής ισχύος είναι πάντοτε αρκετά μικρότερος του ορίου του Betz, λόγω της συνεκτικότητας του ανέμου, του πεπερασμένου αριθμού των πτερυγίων της πτερωτής και της απώλειας της κινητικής ενέργειας που δεν μετατρέπεται σε στατική πίεση λόγω της μη βέλτιστης σχεδίασης των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας.

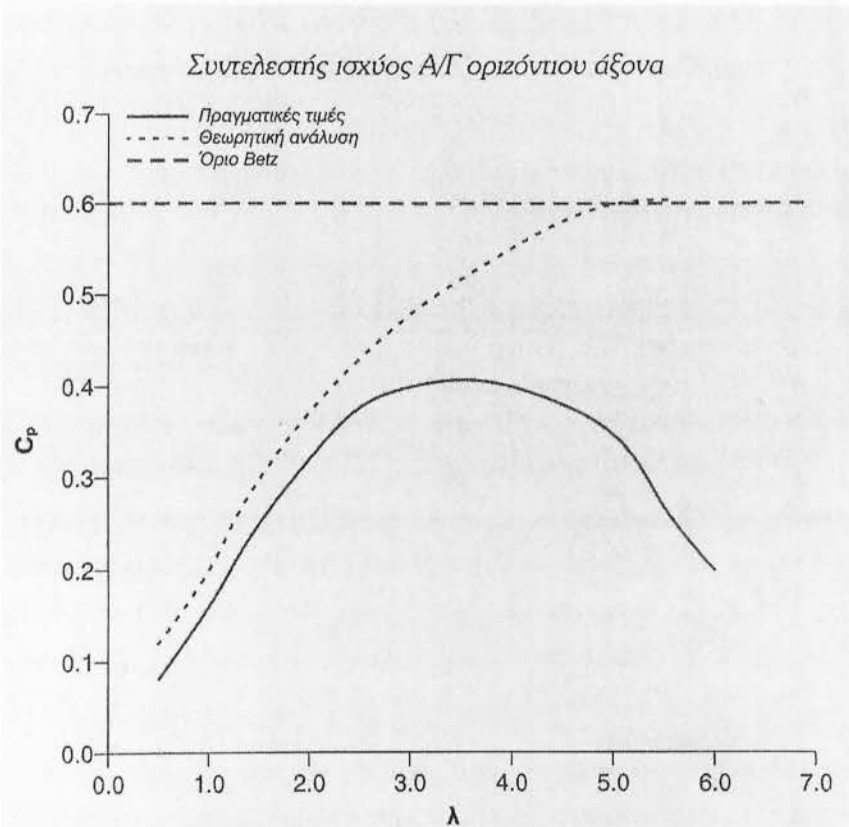
Η) Η ονομαστική ισχύς N_0 της μηχανής, η οποία καθορίζει το μέγεθος της ανεμογεννήτριας και αποτελεί το μέτρο της στιγμιαίας ωφέλιμης παραγόμενης ενέργειας απ την αξιοποίηση της αιολικής ισχύος σε μια επιφάνεια εμβαδού A , όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι V και η πυκνότητα του αέρα είναι ρ . Στην περίπτωση αυτή ισχύει η εξής σχέση:

$$N = 0.5 C_p * \eta * \rho * A * V^3$$

όπου ο βαθμός απόδοσης η περιλαμβάνει τις απώλειες του μηχανικού συστήματος η_M (απώλειες τριβής, απώλειες εδράσεων, πολλαπλασιαστής στρωφών κλπ), καθώς και τις απώλειες της ηλεκτρομηχανικής μετατροπής η_E , δηλαδή:

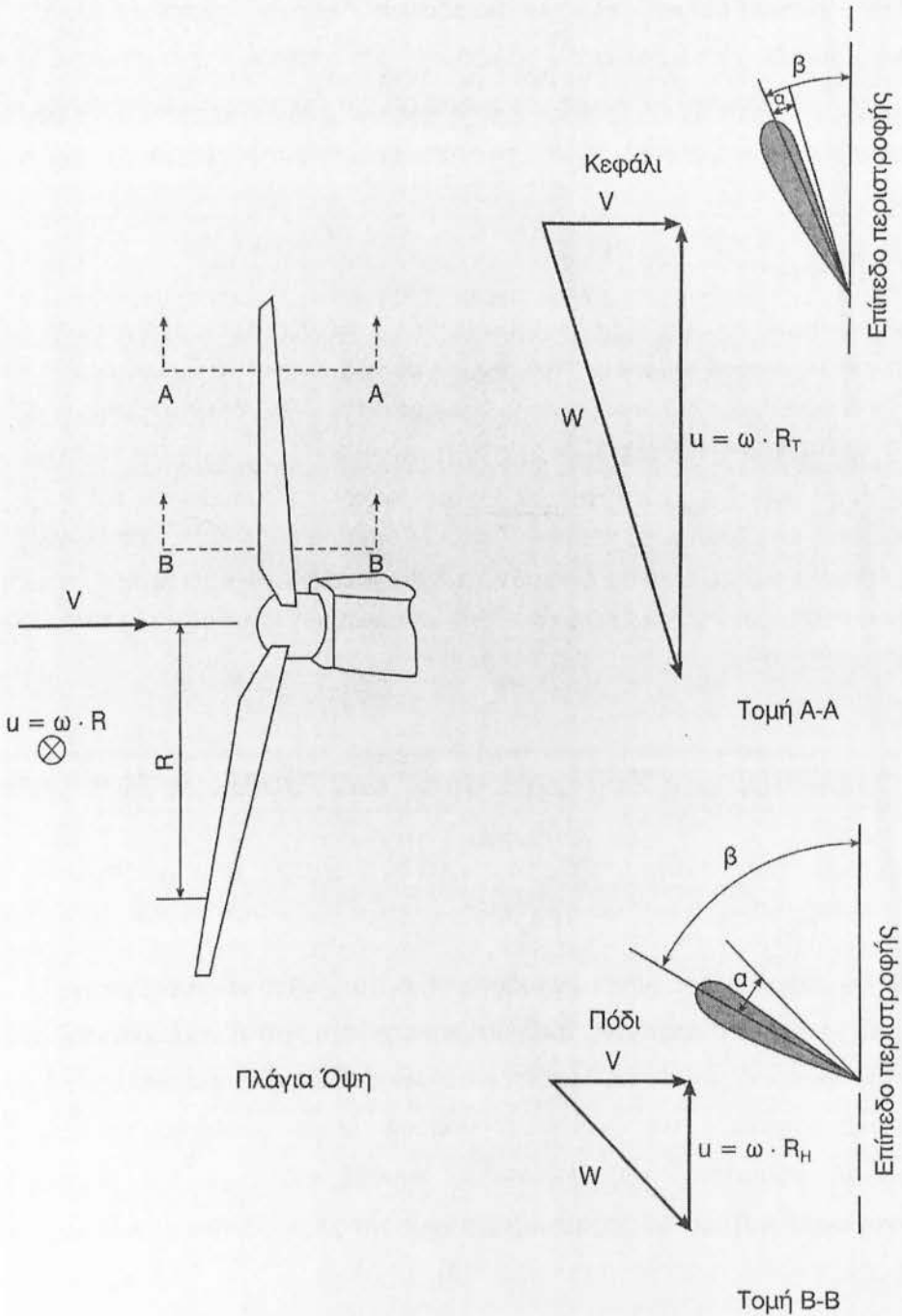
$$\eta = \eta_M * \eta_E .$$

Παρακάτω βλέπουμε μία υπολογισμένη τυπική μορφή του συντελεστή ισχύος μίας ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα συναρτήσει της παραμέτρου περιστροφής «λ». Όπως παρατηρούμε, ο συντελεστής ισχύος εμφανίζει κάποια περιοχή μέγιστης τιμής, η οποία προσδιορίζει το ονομαστικό σημείο λειτουργίας της μηχανής. Οι αποκλίσεις μεταξύ θεωρητικής και πραγματικής καμπύλης γίνονται έντονες για μεγάλες τιμές του λ.



Σχήμα 2.11: Καμπύλη συντελεστή ισχύος ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα

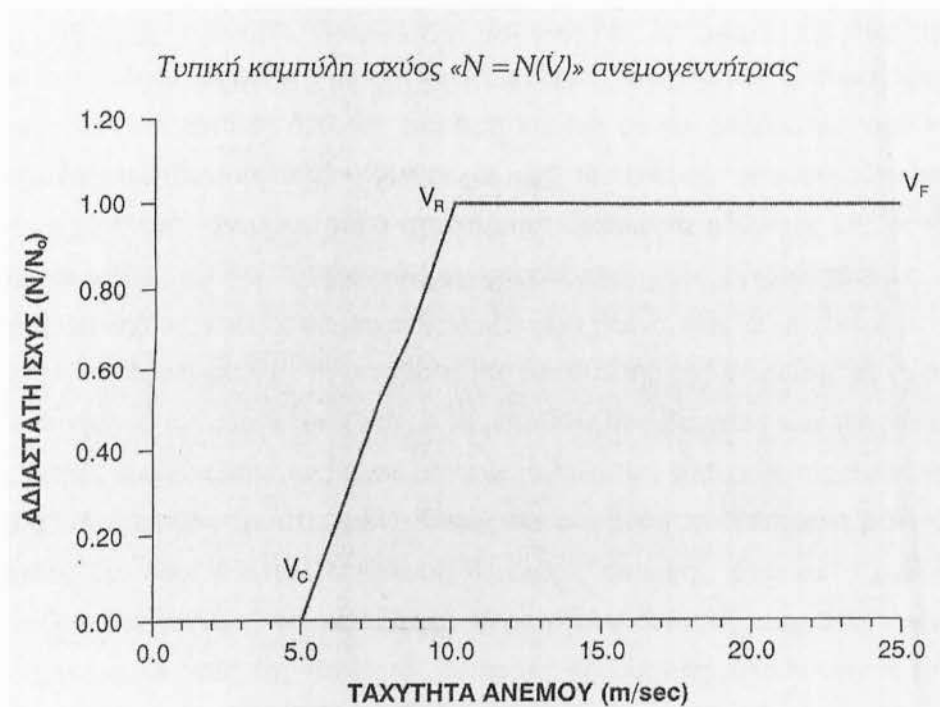
Ορισμός του βήματος κατά το ύψος της πτερωτής



Σχήμα 2.12: Ορισμός βήματος κατά το ύψος της πτερωτής

2.8 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται μία απλοποιημένη, αλλά αντιπροσωπευτική μορφή της καμπύλης παραγόμενης ισχύος μιας ανεμογεννήτριας συναρτήσει της ταχύτητας του πνέοντος ανέμου:



Σχήμα 2.13: Τυπική καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας

Παρατηρούμε συνεπώς, ότι η παραγόμενη ισχύς της ανεμογεννήτριας είναι μηδενική όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι μικρότερη από την ταχύτητα έναρξης λειτουργίας V_c , δεδομένου ότι η παραγόμενη ισχύς δεν αρκεί για να καλύψει τις απώλειες κενού φορτίου. Συνεπώς, για ταχύτητες ανέμου μικρότερες της V_c , δεν έχουμε αξιοποίηση του διαθέσιμου αιολικού δυναμικού. Οι συνήθεις τιμές της ταχύτητας έναρξης λειτουργίας κυμαίνονται από 3 έως 6 m/s.

Όταν η ταχύτητα του ανέμου υπερβεί την ταχύτητα έναρξης λειτουργίας και μέχρι την ταχύτητα ονομαστικής ισχύος V_R , η ισχύς της ανεμογεννήτριας αυξάνεται, καθώς αυξάνεται και η ταχύτητα του ανέμου. Ο ρυθμός αύξησης

της ισχύος στη λεγόμενη μεταβατική περιοχή λειτουργίας της ανεμογεννήτριας ποικίλλει και έτσι εκτός από τη γραμμική μορφή, μπορούμε να έχουμε παραβολικούς ή εκθετικούς ρυθμούς μεταβολής, ανάλογα με τον τύπο της συγκεκριμένης μηχανής. Οι τιμές της ταχύτητας ονομαστικής ισχύος βρίσκονται μεταξύ 8 και 15 m/s.

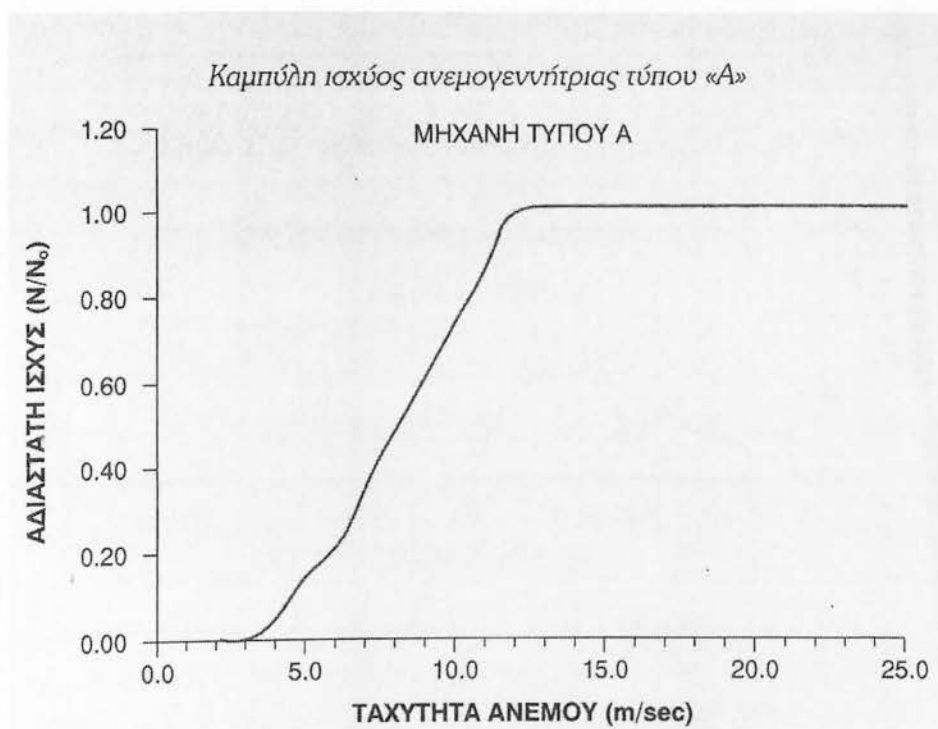
Από την ταχύτητα ονομαστικής λειτουργίας και μέχρι την ταχύτητα διακοπής λειτουργίας V_F μιας ανεμογεννήτριας, επιχειρείται η παραγόμενη ισχύς να είναι κατά το δυνατόν σταθερή και ίση με την ονομαστική τιμή της μηχανής, ανεξάρτητα από τη διαθέσιμη ισχύ του ανέμου. Η σταθεροποίηση της ισχύος ενός ανεμοκινητήρα αποκαλείται διαδικασία ρύθμισης ισχύος και γίνεται κύρια για να αποφευχθεί η υπερφόρτιση της εγκατάστασής. Η ρύθμιση ισχύος, κυρίως σε μηχανές οριζόντιου άξονα, γίνεται μηχανικά με τη χρήση αερόφρενων ή με τη μεταβολή της διεύθυνσης της πτερωτής σε σχέση με αυτήν του ανέμου, καθώς και με τη μεταβολή του βήματος των πτερυγίων (μηχανές ελέγχου βήματος) ή και με τη μεταβολή των στροφών της πτερωτής (μηχανές μεταβλητών στροφών). Όπως θα φανεί και παρακάτω, η ρύθμιση ισχύος δεν είναι πάντοτε επιθυμητή ή τελείως επιτυχής, ενώ και ο ρυθμός ανόδου της ισχύος στη μεταβατική περιοχή λειτουργίας, συχνά δεν είναι γραμμικός. Οι τιμές της ταχύτητας διακοπής λειτουργίας μεταβάλλονται από τα 20 m/s για ελαφριές κατασκευές, μέχρι και τα 30 m/s για τις πλέον στιβαρές εγκαταστάσεις.

Για ταχύτητες ανέμου πάνω από την ταχύτητα διακοπής λειτουργίας η παραγόμενη ισχύς είναι μηδενική, αφού λόγοι ασφάλειας της εγκατάστασης επιβάλλουν τη διακοπή λειτουργίας της ανεμογεννήτριας. Τέλος, η εγκατάσταση είναι ασφαλής, χωρίς βέβαια να παράγει ωφέλιμη ενέργεια, μέχρι τη ταχύτητα επιβίωσης V_S της εγκατάστασης, η οποία κυμαίνεται μεταξύ των 50 και 80 m/s (180-280 km/h). Οι ταχύτητες αυτές αντιστοιχούν σε ανέμους θυελλώδεις, που ξεπερνούν τα 9 ή και τα 10 Beauforts.

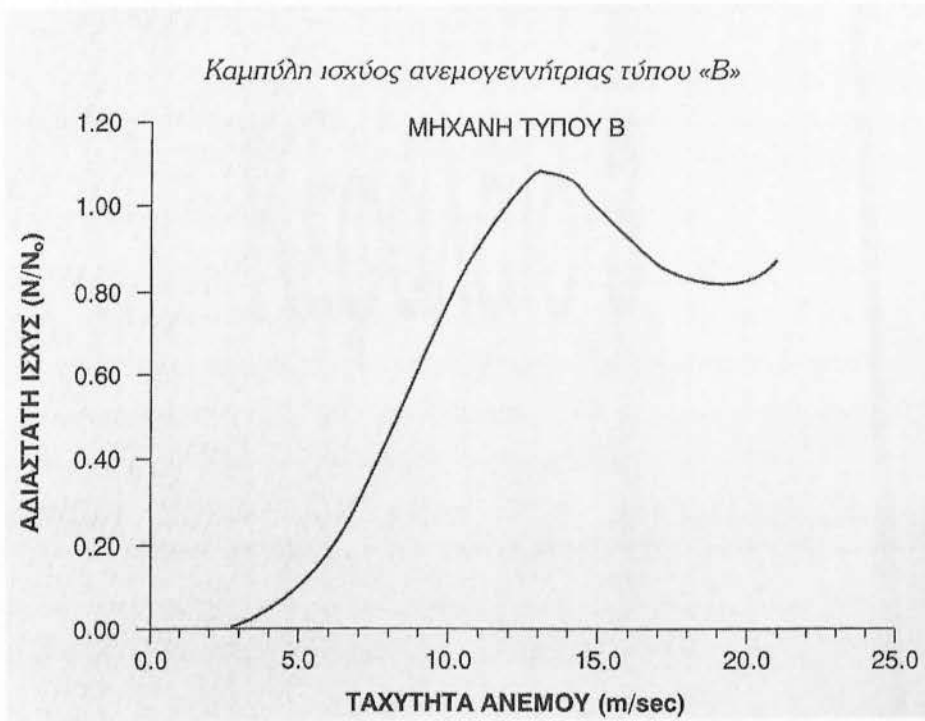
Τέλος, η μαθηματική έκφραση των παραπάνω περιορισμών που εκφράζει τμηματικά την καμπύλη ισχύος μιας ανεμογεννήτριας είναι η εξής:

$$\begin{aligned}
 N=0 & \quad (V \leq V_c) \\
 N=N(V) & \quad (V_c \leq V \leq V_R) \\
 N=N_o & \quad (V_R \leq V \leq V_F) \\
 N=0 & \quad (V \geq V_F)
 \end{aligned}$$

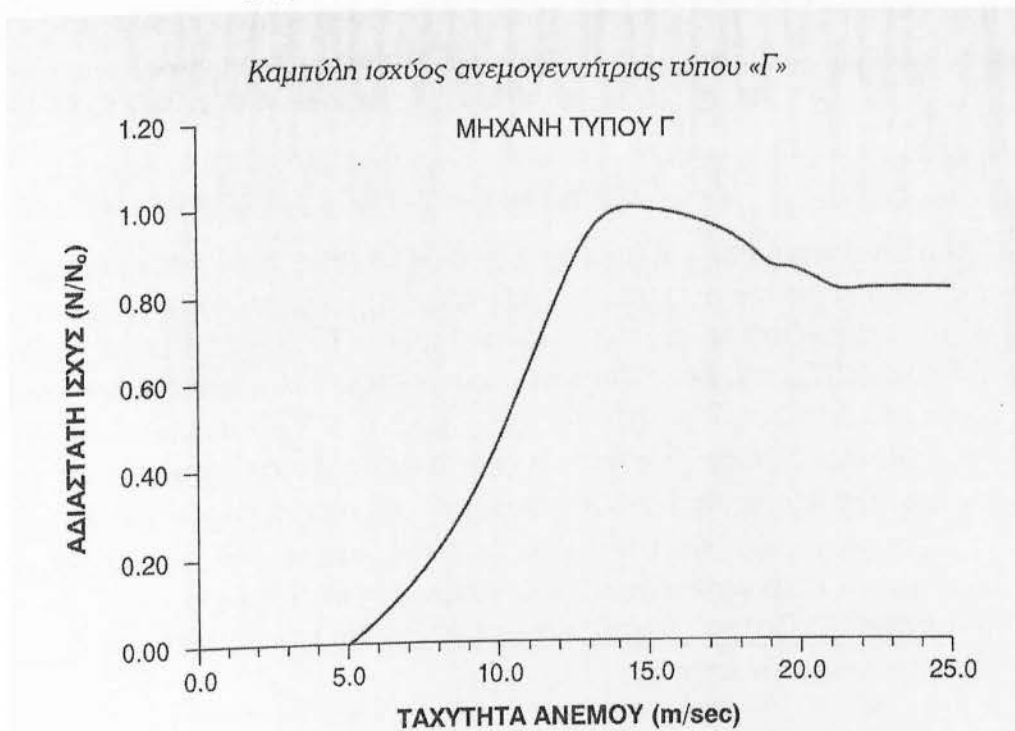
Όπως παρατηρούμε από τα παραπάνω, τελικά μόνο μία μικρή περιοχή ταχυτήτων του ανέμου είναι αξιοποιήσιμη. Στα σχήματα που ακολουθούν, παρουσιάζεται η μορφή ορισμένων εκ των πλέον αντιπροσωπευτικών καμπυλών ισχύος-ταχύτητας $N=N(V)$ αιολικών μηχανών που διατίθενται σήμερα με επιτυχία στην αγορά. Αν και οι καμπύλες των σχημάτων αυτών δεν ακολουθούν αυστηρά την τυπική γραμμική μορφή που είδαμε παραπάνω, βλέπουμε ότι υφίσταται σαφώς ο διαχωρισμός των περιοχών λειτουργίας που αναφέρθηκαν.



Σχήμα 2.14: Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας τύπου Α



Σχήμα 2.15: Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας τύπου Β



Σχήμα 2.16: Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας τύπου Γ

Κεφάλαιο 3

Θεωρία Αεροσήραγγας

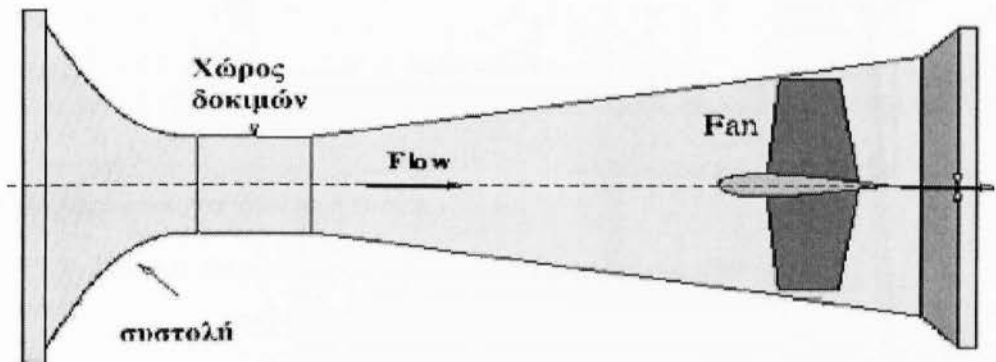
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΘΕΩΡΙΑ ΑΕΡΟΣΗΡΑΓΓΑΣ

3.1 ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΕΡΟΣΗΡΑΓΓΑΣ

Οι αεροσήραγγες ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με την διάταξη:

Ανοικτού Τύπου



Σχήμα Αεροσήραγγα ανοικτού τύπου

Σχήμα 3.1: Σχηματική απεικόνιση αεροσήραγγας ανοικτού τύπου

Τα τμήματα στα οποία διαιρείται η αεροσήραγγα ανοικτού τύπου είναι:

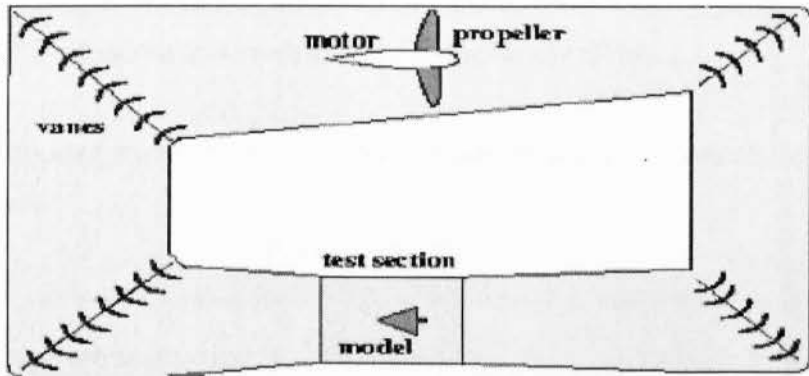
- Συλλέκτης
- Κυψέλες
- Τμήμα δοκιμών
- Διαχύτης
- Ανεμιστήρας
- Ηλεκτροκινητήρας

Κλειστού Τύπου

Τα τμήματα στα οποία διαιρείται η αεροσήραγγα κλειστού τύπου είναι:

- Συλλέκτης
- Κυψέλες
- Διαχύτης

- Ανεμιστήρας
- Ηλεκτροκινητήρας
- Χώρος δοκιμών
- Πτερύγια καμπής
- Ευθυντές



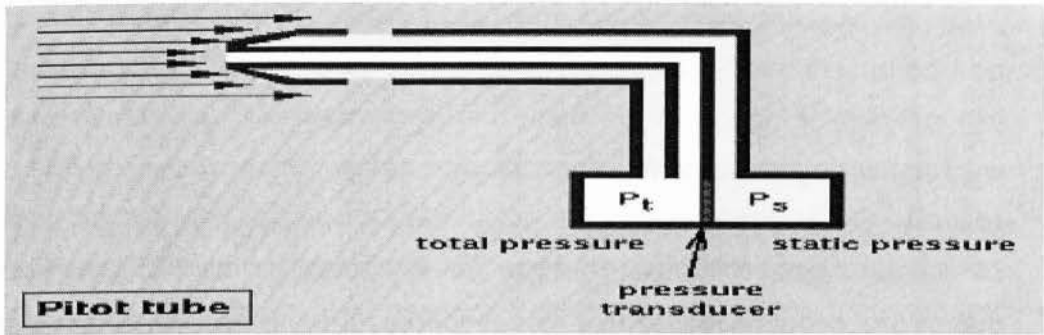
Σχήμα Αεροσήραγγα κλειστού τύπου

Σχήμα 3.2: Σχηματική απεικόνιση αεροσήραγγας κλειστού τύπου

3.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΟΡΙΣΜΟΙ

3.2.1 Αρχή λειτουργίας Pitot

Για να χρησιμοποιηθούν πρέπει να είναι γνωστή η διεύθυνση της ταχύτητας. Μεγάλη εφαρμογή βρίσκουν οι σωλήνες PITOT στην μέτρηση της ταχύτητας των αεροπλάνων. Η οπή A βρίσκεται στην κορυφή του σωλήνα ενώ στις πλευρές του υπάρχουν μερικές οπές B. Ο σωλήνας προσανατολίζεται προς την ροή της οποίας η ταχύτητα είναι "U". Η οπή A είναι κάθετη στη ροή. Στη θέση B επικρατεί η κανονική πίεση του ρευστού, ενώ στη θέση A η πίεση είναι μεγαλύτερη.



Σχήμα 3.3: Απεικόνιση λειτουργίας σωλήνα Pitot

Από την εφαρμογή της εξίσωσης Bernoulli προκύπτει για ασυμπίεστο χωρίς τριβές ρευστό:

$$P_A = P_B + \frac{1}{2}\rho U^2$$

Όπου:

- ρ : πυκνότητα ρευστού
- U : ταχύτητα σώματος ως προς το ρευστό
- P_A : πίεση στο σημείο A
- P_B : πίεση στο σημείο B

Η διαφορά των πιέσεων P_A και P_B μετριέται με ένα διαφορικό μετατροπέα πίεσης και στην συνέχεια υπολογίζεται η ταχύτητα “U”. Η διάμετρος του σωλήνα PITOT πρέπει να είναι πολύ μικρή (θεωρητικά μηδενική) για να μην διαταράσσεται η ροή. Σφάλματα στην μέτρηση μπορούν να προκύψουν από κακή ευθυγράμμιση του σωλήνα με την διεύθυνση της ροής, καθώς και από το ότι η διάμετρος του σωλήνα Pitot δεν είναι μηδενική.

3.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ

Η αεροσήραγγα ανοικτού κυκλώματος, είναι κατασκευασμένη κυρίως από χάλυβα κατασκευών και υποστηρίζεται από ένα χαλύβδινο σωληνοειδές πλαίσιο. Ο αέρας εισέρχεται στη σήραγγα μέσω μιας μεταλλικής κυψέλης και η πίεσή του αυξάνεται από το φυγοκεντρικό ανεμιστήρα. Το τμήμα δοκιμών διαθέτει δύο παράθυρα από διάφανο ακρυλικό υλικό (Perspex), δίνοντας πλήρη ορατότητα και στα διάφορα μοντέλα από ένα από τους πλευρικούς

τοίχους αλλά και του ψηφιακού ζυγού ισορροπίας τριών σημείων. Στο τέλος του τμήματος δοκιμής είναι ένας στατικός σωλήνας Pitot που μπορεί να μετακινείται στις δύο διαστάσεις του χώρου (2D). Αυτός ψ, διαθέτει στο εσωτερικό της κεφαλής του ένα θερμοστοιχείο. Το θερμοστοιχείο μετράει την θερμοκρασία του αέρα που βρίσκεται στο τμήμα δοκιμών. Ο στατικός σωλήνας Pitot και το συνοδευόμενο ψηφιακό μικρομανόμετρο μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μετρήσουν την ταχύτητα αέρα μέσα στο τμήμα δοκιμών καθώς και για την βαθμονόμηση της αεροσήραγγας.

Ο δύο διαστάσεων εγκάρσιος μηχανισμός μεταφοράς μαζί με τον στατικό σωλήνα Pitot μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μετρήσουν οι ταχύτητες του αέρα σε κάθε μια από τις τρεις θέσεις που μπορεί να εγκατασταθεί. Μεταφέροντας τον μηχανισμό μεταξύ αυτών των τριών θέσεων, που απέχουν 83 mm, μπορούμε να μετρήσουμε και να σχεδιάσουμε το διδιάστατο προφίλ ταχυτήτων μέσα στο χώρο δοκιμών.

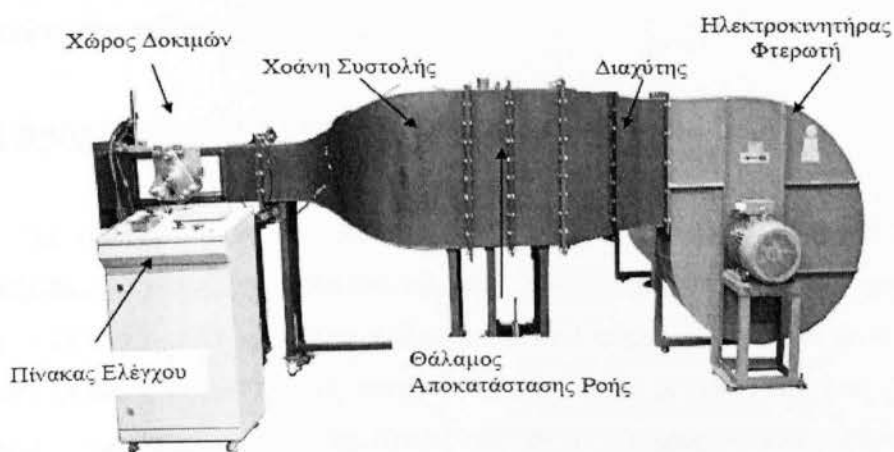
Η ταχύτητα του αέρα ελέγχεται με τον έλεγχο της ταχύτητας της κινητήριας μηχανής του ανεμιστήρα. Η αεροσήραγγα παρέχεται πλήρης με τον ακόλουθο εξοπλισμό:

- Ένα στατικό σωλήνα Pitot με θερμοζεύγος
- Ένα δείκτη ταχύτητας αέρα που χρησιμοποιείται με το σωλήνα Pitot
- Ένα ανιχνευτή πίεσης 20 καναλιών με ψηφιακό μικρο-μανόμετρο
- Μία συμμετρική αεροτομή
- Ένα ζυγό ισορροπίας τριών σημείων
- Δύο διαστάσεων εγκάρσιος μηχανισμός μεταφοράς Pitot (οριζόντιας κίνησης και κατακόρυφης με δυνατότητα μετακίνησης παράλληλα προς την κατεύθυνση της ροής του αέρα)
- Αυτόνομη μονάδα υπολογιστή HMI (Human Machine Interface) με οθόνη LCD για γραφική απεικόνιση και πληκτρολόγιο. Αυτά χρησιμοποιούνται για να ελέγχουν την ταχύτητα της κινητήριας μηχανής-πτερωτής και του 20κάναλου συγκροτήματος μέτρησης πιέσεων. Χρησιμοποιείται επίσης για την απόκτηση δεδομένων, της ταχύτητας ροής του αέρα, της θερμοκρασίας, των στιγμιαίων δυνάμεων που καταγράφονται από τον

ζυγό ισορροπίας τριών σημείων και του συγκροτήματος μέτρησης πιέσεων 20 καναλιών μέσω ενός ψηφιακού μικρομανόμετρου. Όλα τα απαιτούμενα δεδομένα εμφανίζονται στην οθόνη LCD γραφικής απεικόνισης. Τα απαιτούμενα δεδομένα μπορούν επίσης να αποθηκευτούν στην μονάδα HMI και να μεταφερθούν στον υπολογιστή όπως όταν αυτό απαιτηθεί. Ένα λογισμικό για WINDOWS XP παρέχεται για να συνδεθεί αυτή η μονάδα HMI με τον υπολογιστή και να διαχειριστείτε τα δεδομένα.

Προδιαγραφές

Ταχύτητα αέρα	: 0 έως 45 m/s
Τμήμα δοκιμών	: 320 mm x 320 mm (πλάτος x ύψος)
Μήκος τμήματος δοκιμών	: 1000 mm
Παράθυρα τμήματος δοκιμών	: Φτιαγμένα από διαφανή ακρυλικό
Κινητήρια μηχανή	: 11 KW με έλεγχο ταχύτητας από απόσταση



Σχήμα 3.4: Υποηχητική αεροδυναμική σήραγγα ανοιχτού κυκλώματος με πίνακα ελέγχου

3.4 ANEMISΤΗΡΑΣ ΚΑΙ INVERTER

Ένας φυγοκεντρικός ανεμιστήρας χρησιμοποιείται για να προωθεί τον αέρα στην αεροσήραγγα ανοιχτού κυκλώματος. Επιπλέον, ο θόρυβος και οι κραδασμοί που παράγονται από το φυγοκεντρικό ανεμιστήρα είναι σε αρκετά χαμηλό επίπεδο. Η ταχύτητα περιστροφής της φτερωτής αλλάζει μεταβάλλοντας την συχνότητα του ρεύματος τροφοδοσίας μέσω ενός inverter το οποίο ελέγχεται από την μονάδα Η.Μ.Ι.

3.5 ΔΙΑΧΥΤΗΣ

Ο ευρυγώνιος διαχύτης χρησιμοποιείται για να μειωθεί η ταχύτητα του αέρα που εξέρχεται από τον ανεμιστήρα πριν την είσοδο του στον θάλαμο αποκατάστασης ροής. Ο διαχύτης έχει σαν σκοπό την μείωση της ταχύτητας ροής και όχι για την αύξηση της πίεσης, κάτι το οποίο εμφανίζεται. Δύο κατακόρυφες σήτες ανοξειδωτου χάλυβα χρησιμοποιούνται για να περιορίσουν το διαχωρισμό του οριακού στρώματος μέσα στον ευρυγώνιο διαχύτη, μια κοίλη και μια επίπεδη.

3.6 ΘΑΛΑΜΟΣ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΡΟΗΣ

Για την βελτίωση της ποιότητας της ροής, μια κυψέλη και 2 σήτες ανοξειδωτου χάλυβα τοποθετούνται μετά από το διαχύτη και πριν από τον κώνο συστολής. Οι μεγάλης κλίμακας στροβιλισμοί μειώνονται από τους κυψελωτούς ευθυγραμμιστές ροής. Η κυψέλη ευθυγραμμίζει την ροή με την μείωση των πλευρικών ταχυτήτων. Οι σήτες μειώνουν τους αξονικούς στροβιλισμούς. Οι λεπτές σήτες διασπούν τις υπάρχουσες δίνες σε μικρότερες. Μια ικανοποιητική απόσταση παρεμβάλλεται ώστε αυτές οι μικρές δίνες να εξαλειφθούν προτού φθάσουν στο μοντέλο.

3.7 ΧΟΑΝΗ ΣΥΣΤΟΛΗΣ

Ο καλύτερος τρόπος για να αποκτήσουμε ένα ρεύμα αέρα το οποίο θα είναι απαλλαγμένο από δίνες είναι να αυξήσουμε γρήγορα την ταχύτητά του

από μια μικρή τιμή στην επιθυμητή για το πείραμα. Για αυτό τον λόγο ο αέρας εισέρχεται σε έναν σωλήνα μεγάλης διατομής και εξέρχεται από μια μικρή διατομή η οποία είναι κατάλληλα διαμορφωμένη λεία και χωρίς γωνίες.

3.8 ΤΜΗΜΑ ΔΟΚΙΜΩΝ

Μετά τη σωστή κατασκευή και τοποθέτηση του ανεμιστήρα του διαχύτη του θαλάμου αποκατάστασης ροής και του κώνου συστολής, επιτυγχάνεται ποιοτική ροή στο τμήμα δοκιμών. Για να ελαχιστοποιηθούν τα προβλήματα ροής που εμφανίζονται στις γωνίες των ορθογωνίων τμημάτων, κατασκευάζεται μια προσθήκη με γωνία 45° από την έναρξη της συστολής για να διαμορφώσει μια οκτάγωνη μορφή. Αυτή η προσθήκη διατρέχει και το τμήμα δοκιμών για να αποτραπεί η αύξηση του οριακού στρώματος στις γωνίες του, καθώς επίσης και για να επιτευχθεί ομοιόμορφη πίεση κατά μήκος του. Το τμήμα δοκιμών διαθέτει δύο αφαιρούμενα διάφανα ακρυλικά παράθυρα ένα στην κάθε πλευρά.

Κεφάλαιο 4

Πείραμα / Αποτελέσματα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΕΙΡΑΜΑ / ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΛΗΨΗΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Αρχικά ρυθμίζουμε τη σχέση μεταξύ των στροφών του κινητήρα της αεροσήραγγας και της ταχύτητας ανέμου που δημιουργείται, ώστε να έχουμε μία αρχική εκτίμηση των στροφών στις οποίες θα πρέπει να ρυθμίζεται ώστε να λαμβάνουμε τις ταχύτητες ανέμου που επιθυμούμε, οι οποίες είναι 2, 4, 6, 8 και 10 m/s . Όλα τα στοιχεία φαίνονται στην τύπου LCD οθόνη, όπως φαίνεται και στις παρακάτω φωτογραφίες.

Για την παραπάνω εκτίμηση, οι μετρήσεις έγιναν με τον σωλήνα Pitot σε κάθετη απόσταση 20 cm και οριζόντια 10 cm. Έπειτα, τοποθετήσαμε το μοντέλο ανεμογεννήτριας στην οπή 2, με τον σωλήνα Pitot να είναι τοποθετημένος στη θέση 1. Συνολικά από τους 12 πιθανούς συνδυασμούς θέσεων που θα μπορούσαμε να έχουμε, επιλέγουμε τους 3 καταλληλότερους, με κριτήριο η απόσταση μεταξύ δοκιμίου και σωλήνα Pitot να είναι τέτοια, ώστε να μπορούμε να έχουμε σωστές μετρήσεις. Οι συνδυασμοί αυτοί είναι:

- Θέση 1, Οπή 2
- Θέση 2, Οπή 3 και
- Θέση 3, Οπή 4.

Στον πρώτο συνδυασμό, η απόσταση μεταξύ σωλήνα Pitot και δοκιμίου είναι 0.2 cm, στον δεύτερο συνδυασμό 2.0 cm και τέλος στον τρίτο είναι 3.8 cm.

Για κάθε συνδυασμό θέσεων, αρχίζει η διαδικασία των μετρήσεων για κάθε μία από τις ταχύτητες ανέμου που αναφέρονται παραπάνω, εναλλάσσοντας τη γωνία του δοκιμίου από 0 έως 90 μοίρες με βήμα 15 μοιρών και παίρνοντας, μετακινώντας τον σωλήνα Pitot, μία μέτρηση στο κέντρο της πτερωτής, σε απόσταση 13.5 cm, τρεις μετρήσεις A1, A2 και A3 σε διαφορετικά σημεία της πτερωτής σε αποστάσεις 15.3, 17.0 και 19.1 cm

αντίστοιχα και άλλες τρεις μετρήσεις έξω από την πτερωτή B1, B2 και B3, σε αποστάσεις 21.3, 23.3 και 25.1 cm αντίστοιχα.

Στα διαγράμματα, με έντονη κάθετη γραμμή φαίνεται και έπειτα από ποια γωνία δοκιμίου σταματούσε η κίνηση της πτερωτής του μοντέλου ανεμογεννήτριας. Οι μετρήσεις αυτές, οι οποίες λαμβάνονταν αφού είχε σταματήσει η κίνηση της πτερωτής, έχουν σημειωθεί και στους πίνακες μετρήσεων με κόκκινο χρώμα ώστε να διαχωρίζονται εύκολα από τις υπόλοιπες στις οποίες είχαμε κανονικά κίνηση των πτερυγίων. Στις επόμενες σελίδες ακολουθούν φωτογραφίες της πειραματικής διάταξης, όλες οι μετρήσεις και τα διαγράμματα που αντιστοιχούν σε αυτές. Τέλος, ακολουθούν τα συμπεράσματα που βγαίνουν από τα διαγράμματα, καθώς και προτάσεις για μελλοντικές εργασίες.

CONTROL PANEL

DAQ. & CONTROL

cussons Technology

1/5 Air Temp 23.7 C

As Speed 3.08 m/s Ref Air Speed 10.8PM

Fan Speed 634 234RPM

Current Channel 1 Plotting Moment 0.957 Nm

Current Pressure 1.56 mbar

Diag Force 53.94 N

Lift Force -16.42 N

Angle 0 Inc 1

X Pos 160 Inc 1

X Control 1

Use Arrows to control Speed. Esc to go back to menu.

ESC

0

1 speed 1 2 3

2 4 5

3 7 8

4 0

Unitronics

10

11

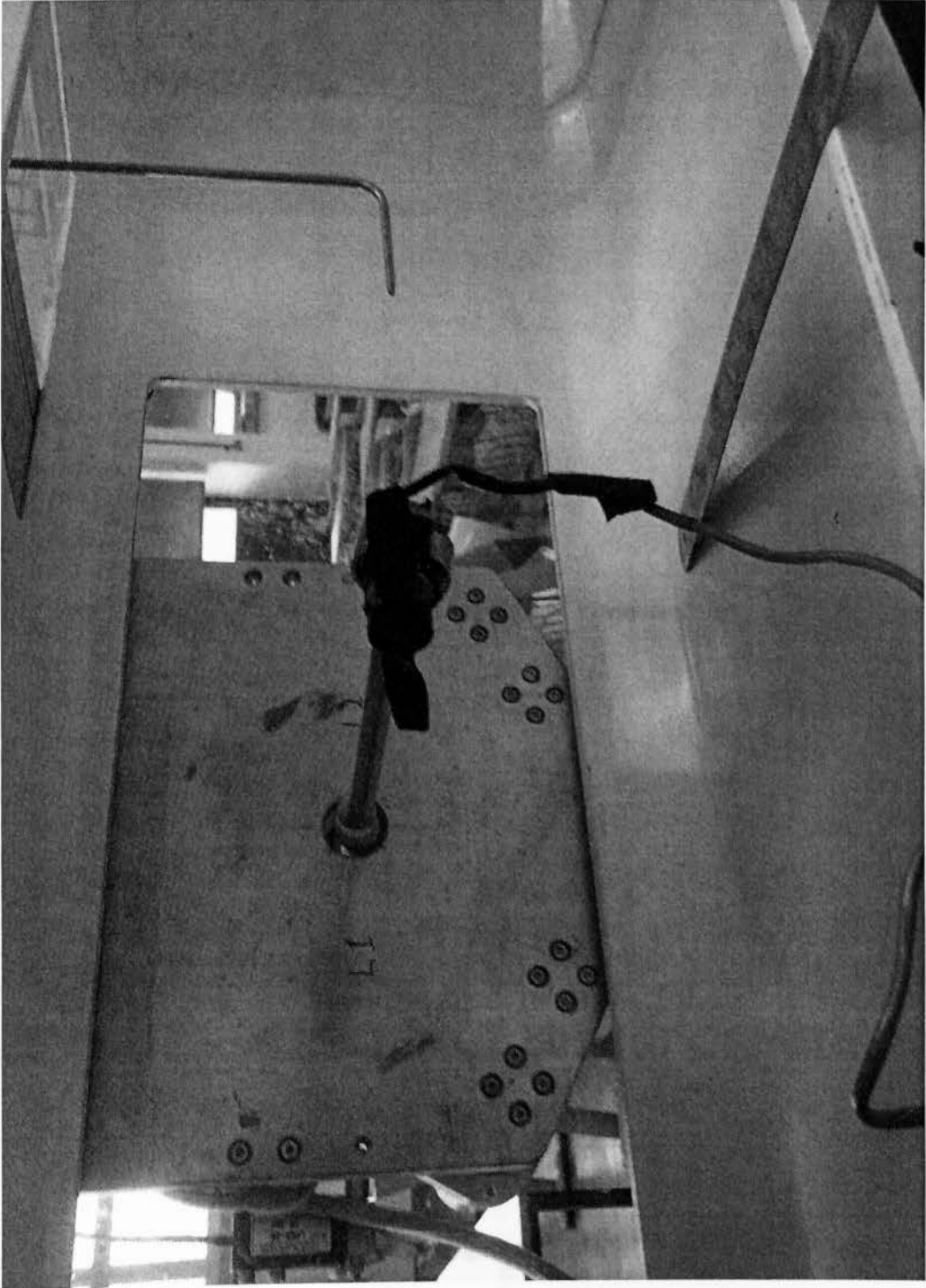
12

13

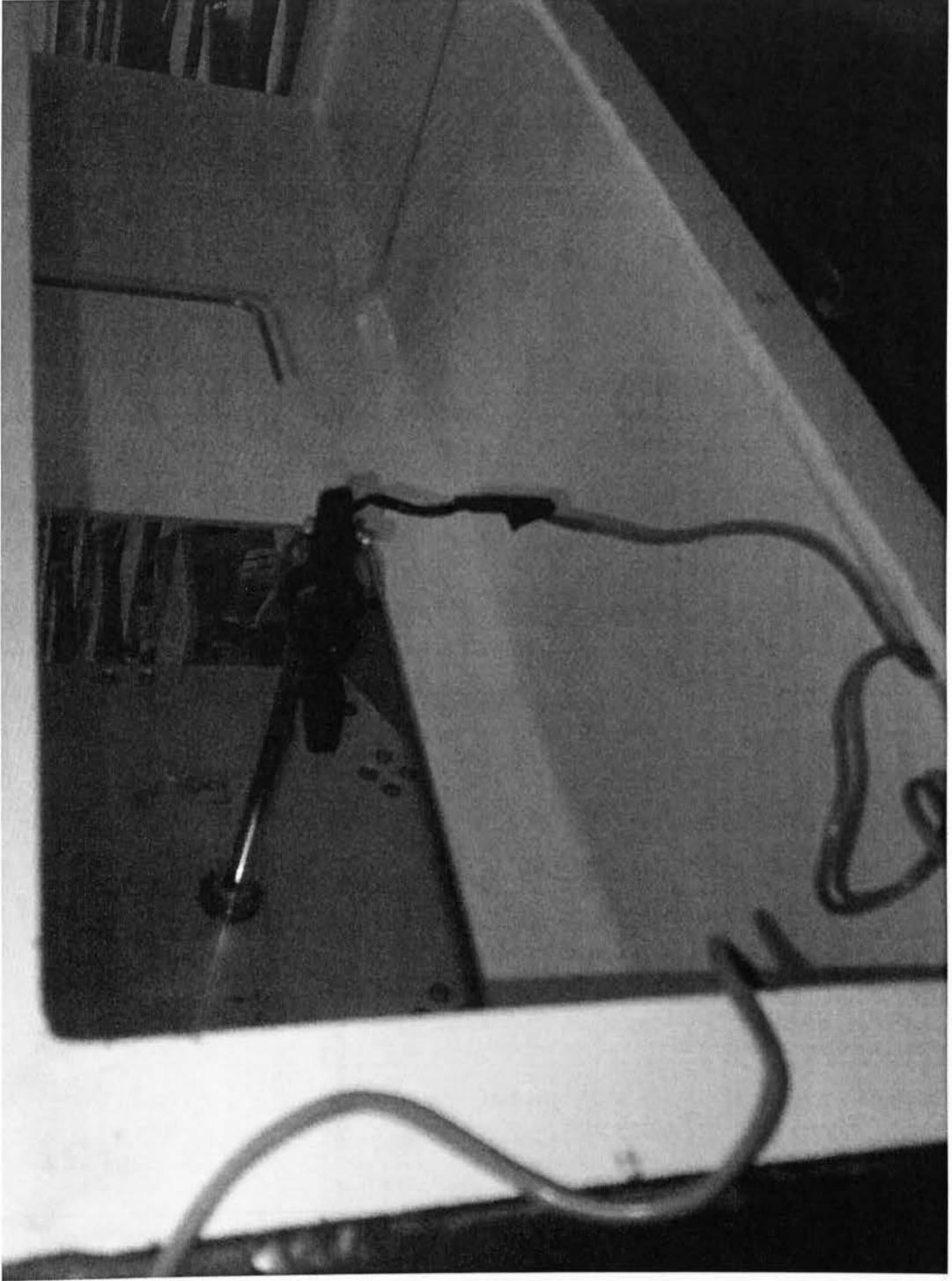
14

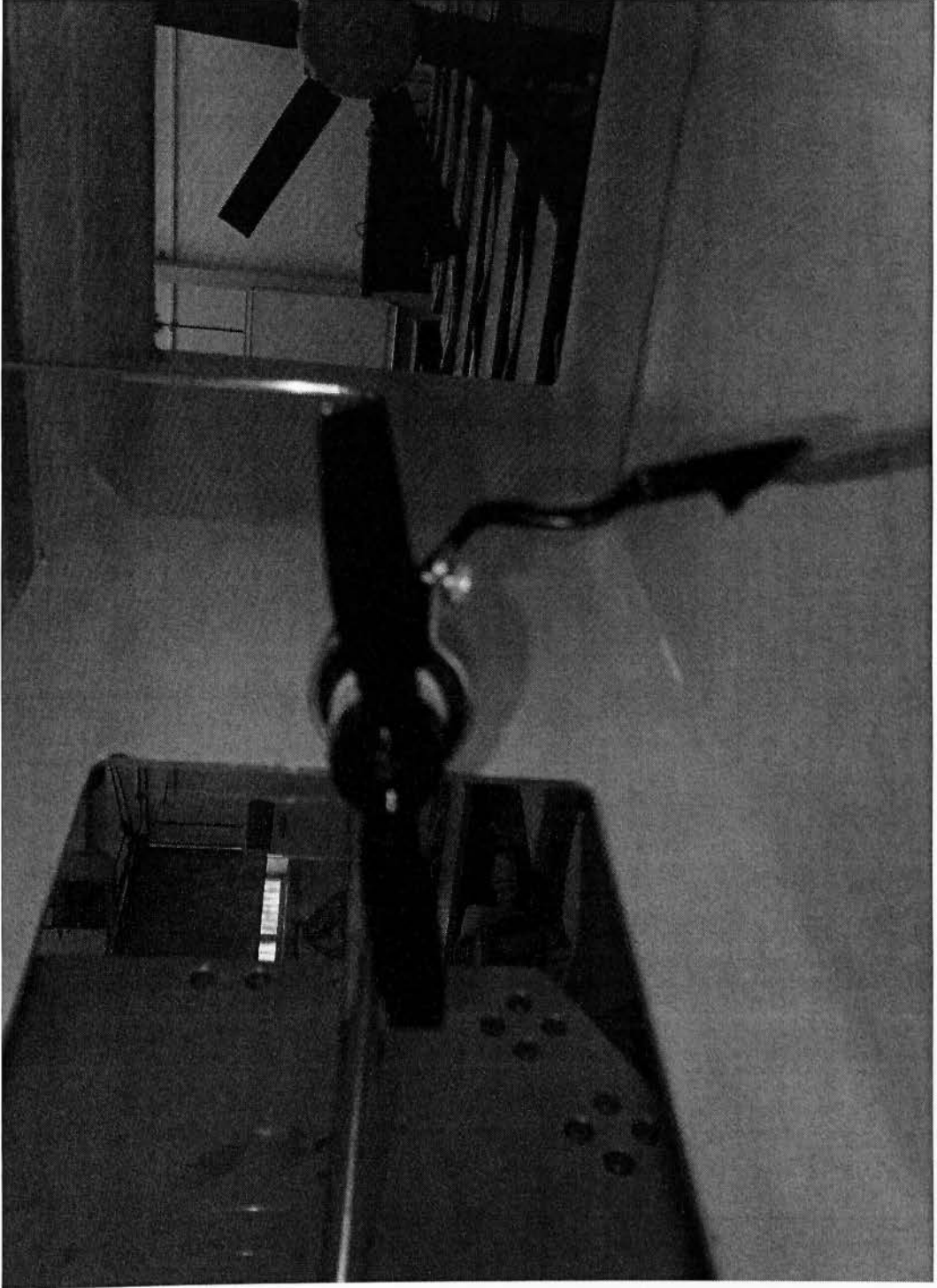
15

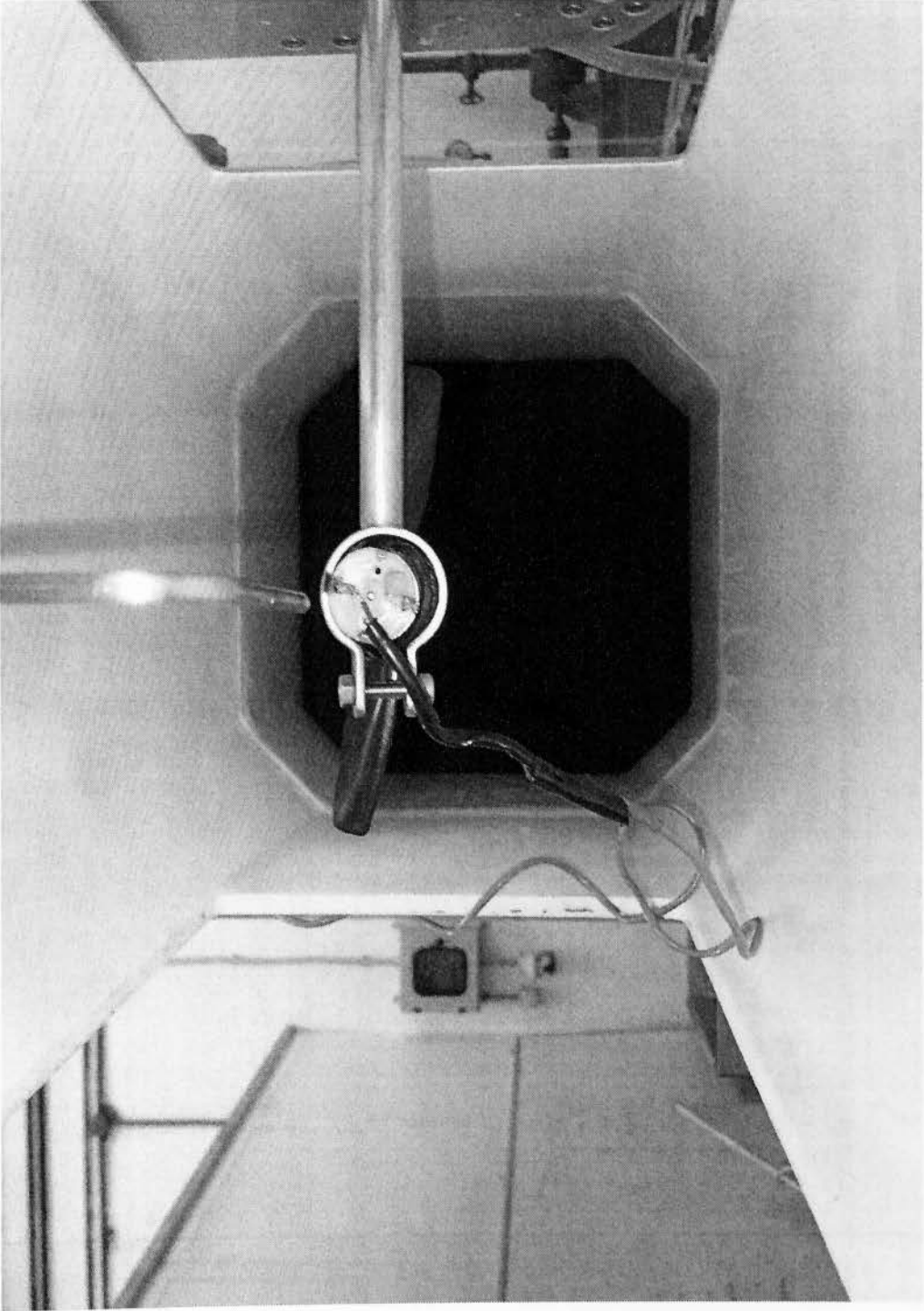
C2

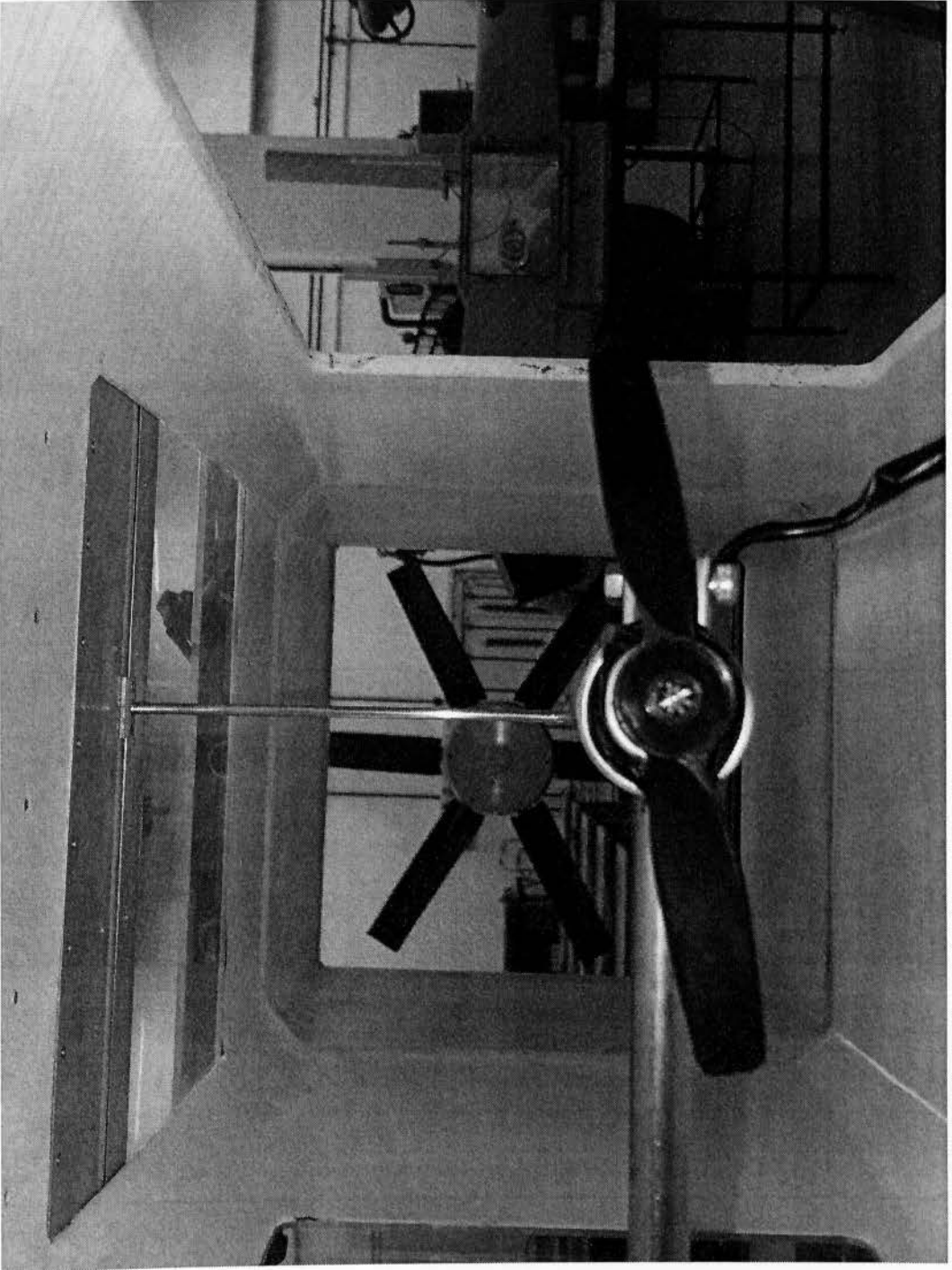


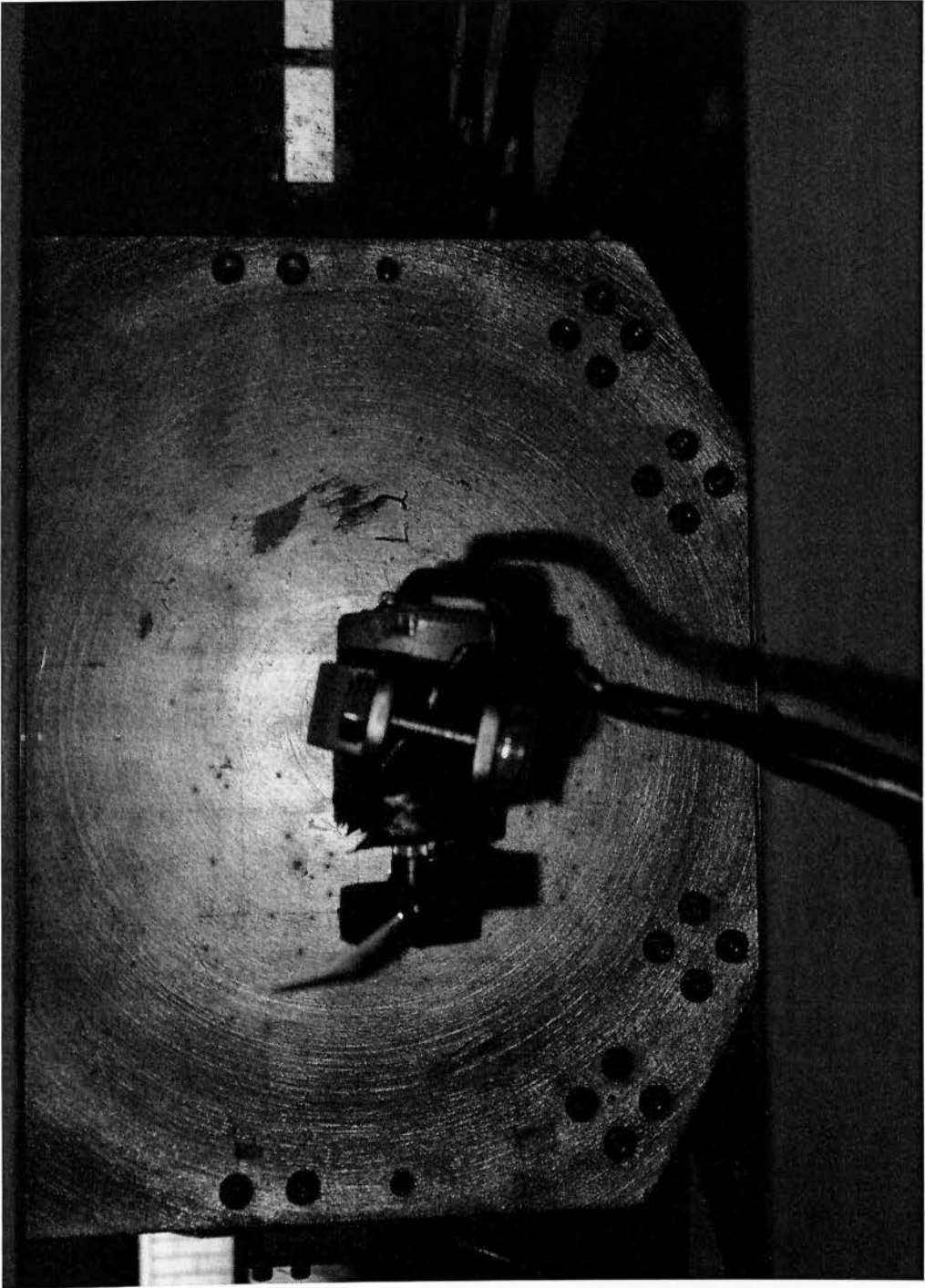


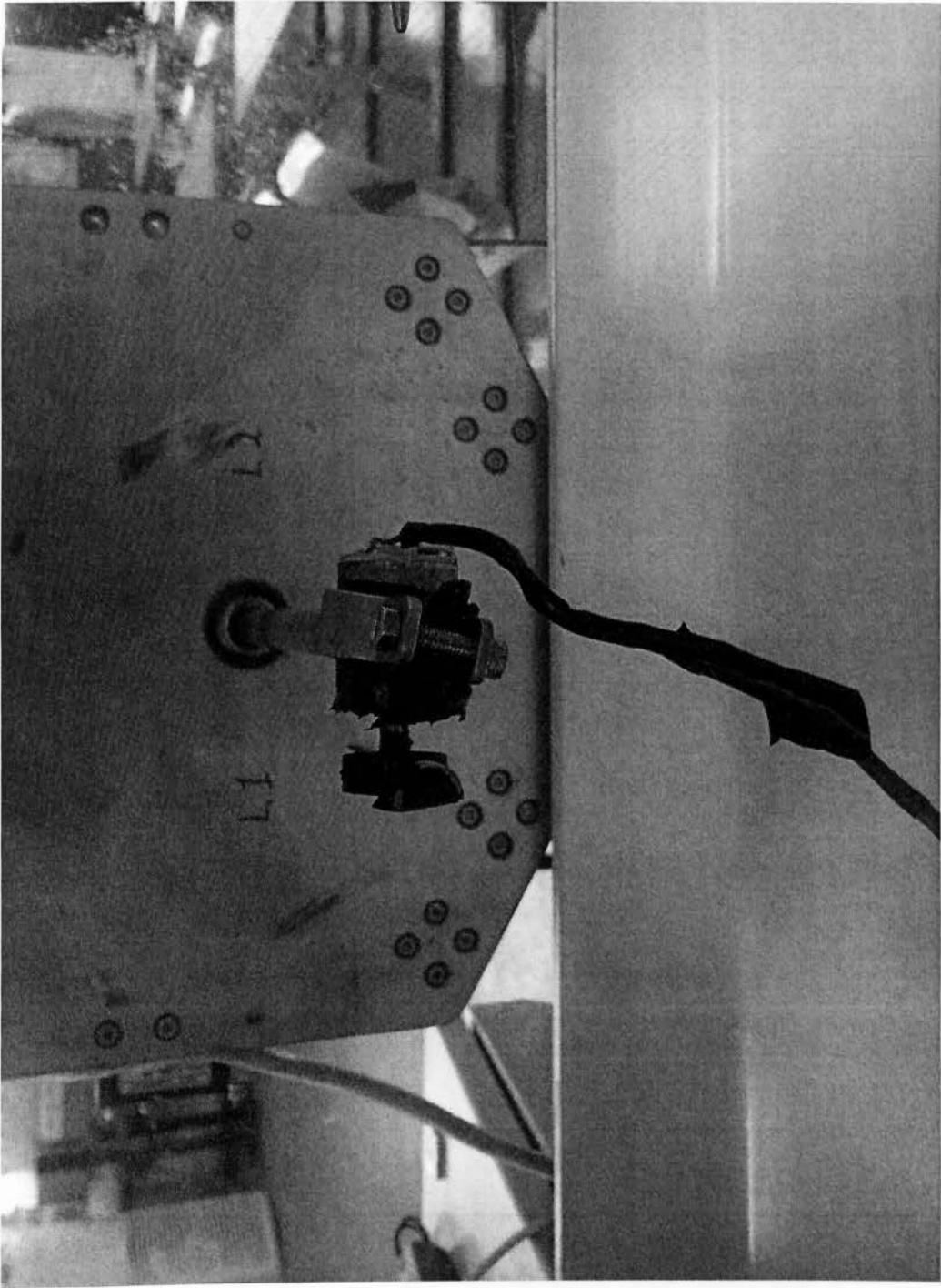


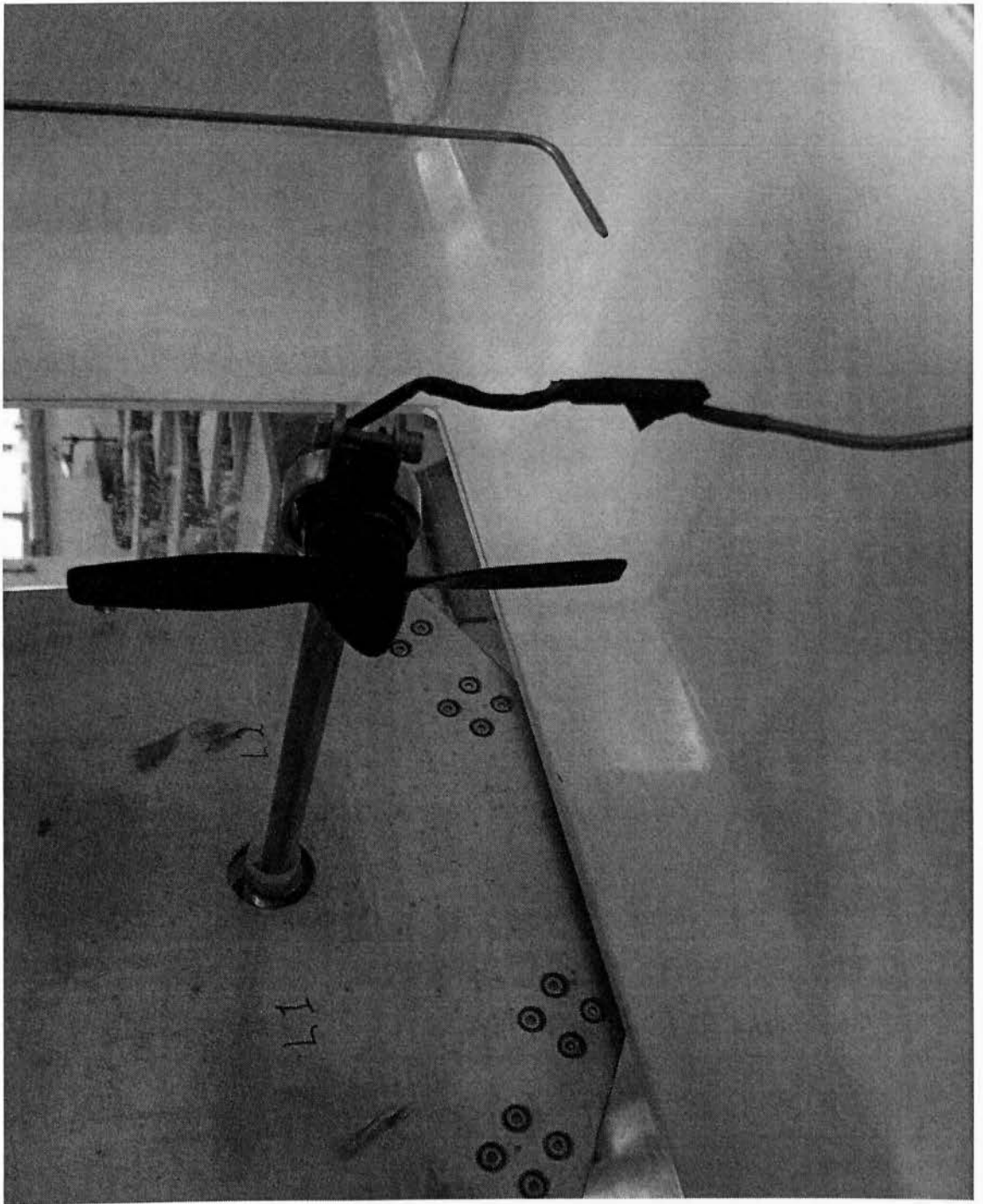




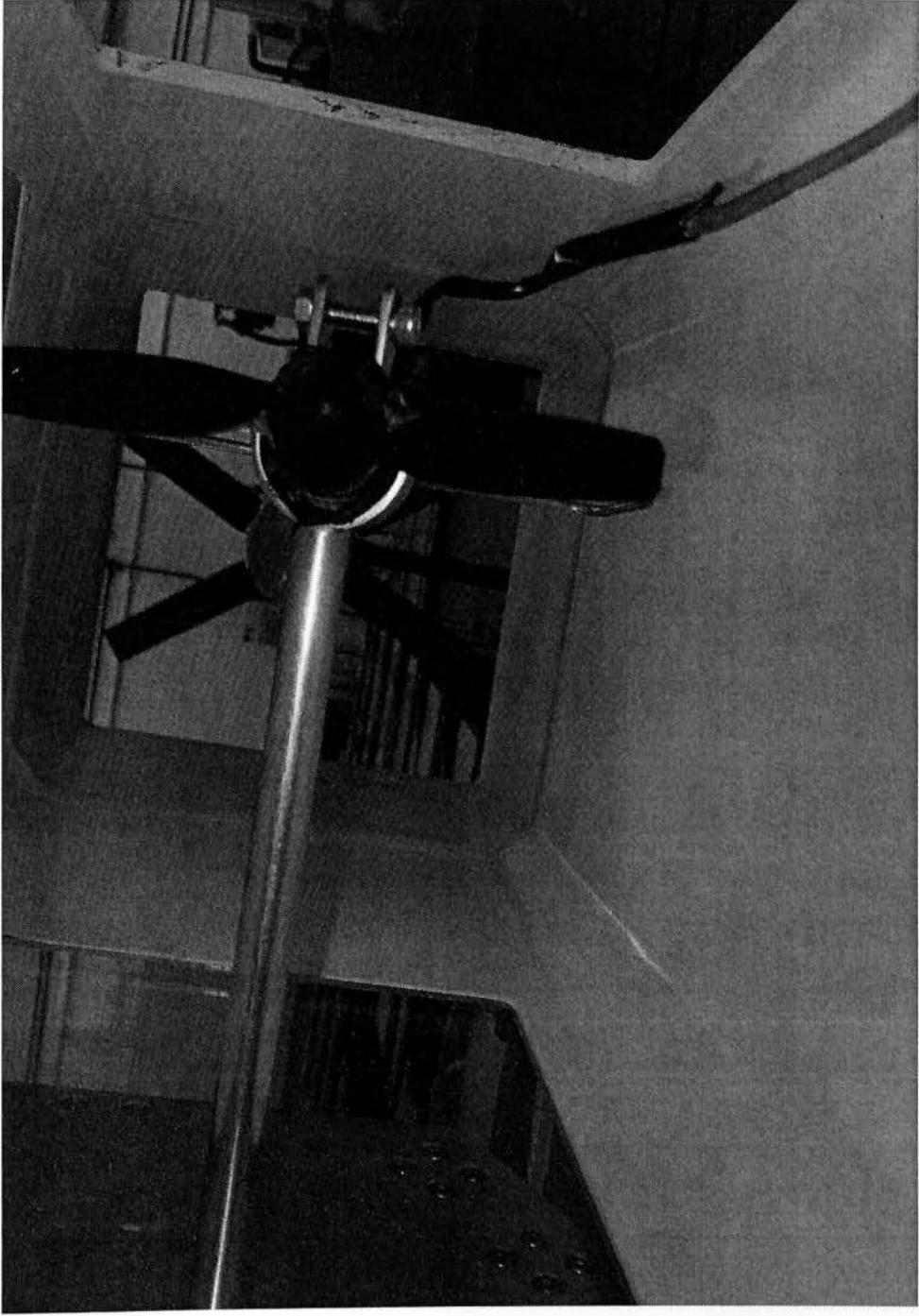








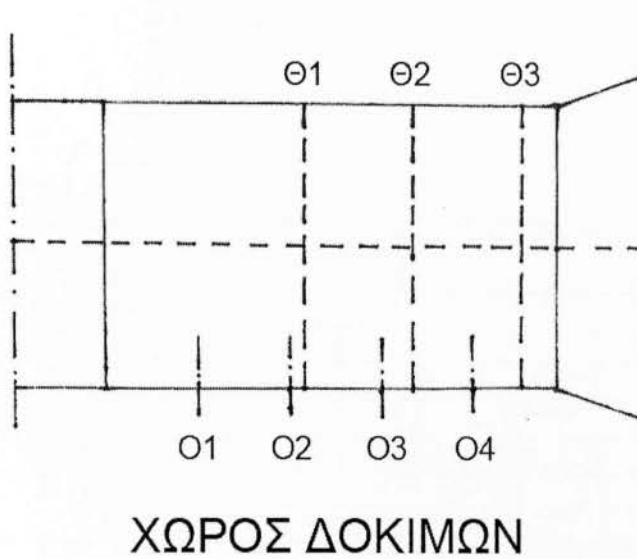
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ
ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ





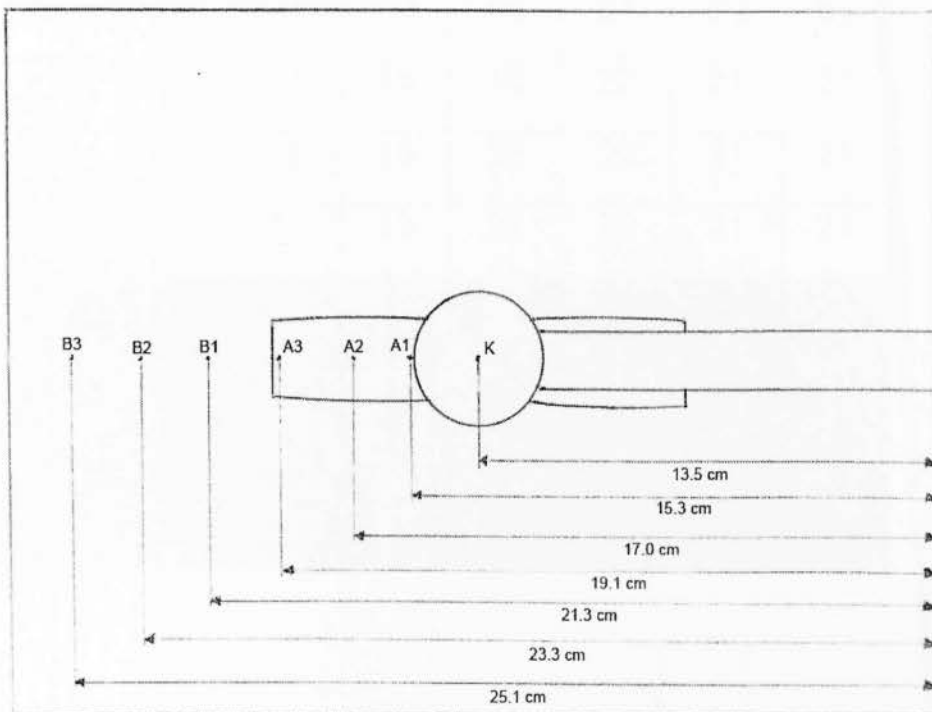
Πίνακες Μετρήσεων / Διαγράμματα

Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε μία σχηματική αναπαράσταση των θέσεων (Θ) του σωλήνα Pitot και των οπών (Ο) τοποθέτησης του μοντέλου ανεμογεννήτριας μέσα στο χώρο δοκιμών της αεροσήραγγας.



Σχήμα 4.1: Σχηματική αναπαράσταση Θέσεων/Οπών στο χώρο δοκιμών

Επίσης, στο ακόλουθο σχήμα φαίνονται οι θέσεις στις οποίες πάρθηκαν οι μετρήσεις στο μοντέλο ανεμογεννήτριας με τον σωλήνα Pitot, καθώς και οι αποστάσεις τους από το τοίχωμα της αεροσήραγγας στο οποίο είχε τοποθετηθεί το μοντέλο.



Σχήμα 4.2: Σχηματική αναπαράσταση Θέσεων/Αποστάσεων των μετρήσεων που πάρθηκαν με το σωλήνα Pitot

- Για θέση 1, σπή 2:

U= 2 m/s							
	P (Pa)						
R (deg)	K	A1	A2	A3	B1	B2	B3
0	-7	13	15	16	22	21	21
15	-7	16	16	22	22	21	21
30	-8	10	19	22	22	21	21
45	-2	0	25	23	22	22	21
60	-1	2	26	23	22	22	22
75	0	16	25	23	22	22	22
90	-6	27	24	23	22	22	22

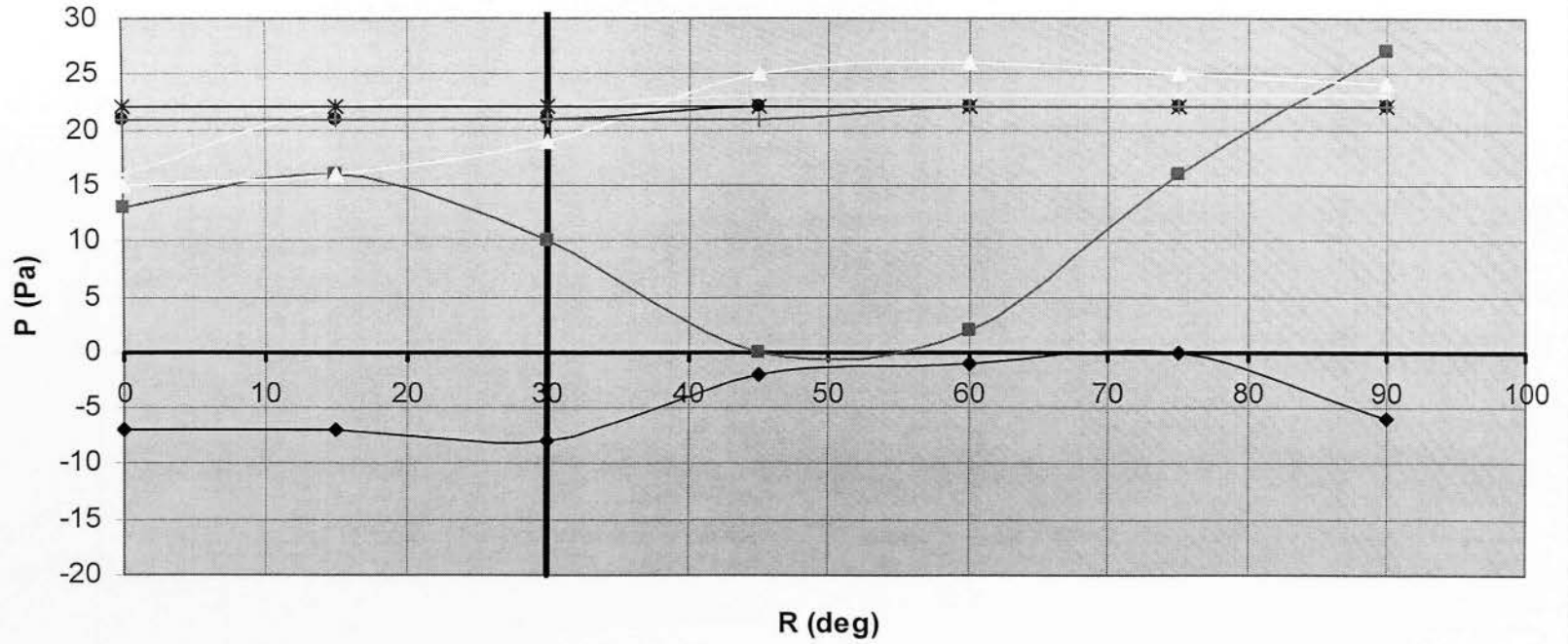
U= 4 m/s							
	P (Pa)						
R (deg)	K	A1	A2	A3	B1	B2	B3
0	-15	13	31	34	43	43	43
15	-14	32	34	42	43	43	43
30	-15	23	39	45	44	44	44
45	-12	4	48	45	44	44	44
60	-8	-5	51	47	45	44	44
75	1	11	53	48	45	45	45
90	1	23	53	47	45	45	45

U= 6 m/s							
	P (Pa)						
R (deg)	K	A1	A2	A3	B1	B2	B3
0	-18	22	48	54	66	65	65
15	-26	47	52	65	66	64	64
30	-20	10	58	68	66	65	66
45	-13	-9	72	68	64	65	65
60	-13	-4	76	69	67	66	66
75	-5	44	75	70	67	66	66
90	-11	24	74	69	66	65	65

U= 8 m/s							
	P (Pa)						
R (deg)	K	A1	A2	A3	B1	B2	B3
0	-8	30	65	72	88	87	86
15	-9	65	70	86	88	86	86
30	-20	46	79	90	88	88	88
45	-18	8	95	91	88	87	87
60	-21	-1	100	93	89	88	88
75	-19	34	101	92	89	88	88
90	-5	71	103	94	90	89	88

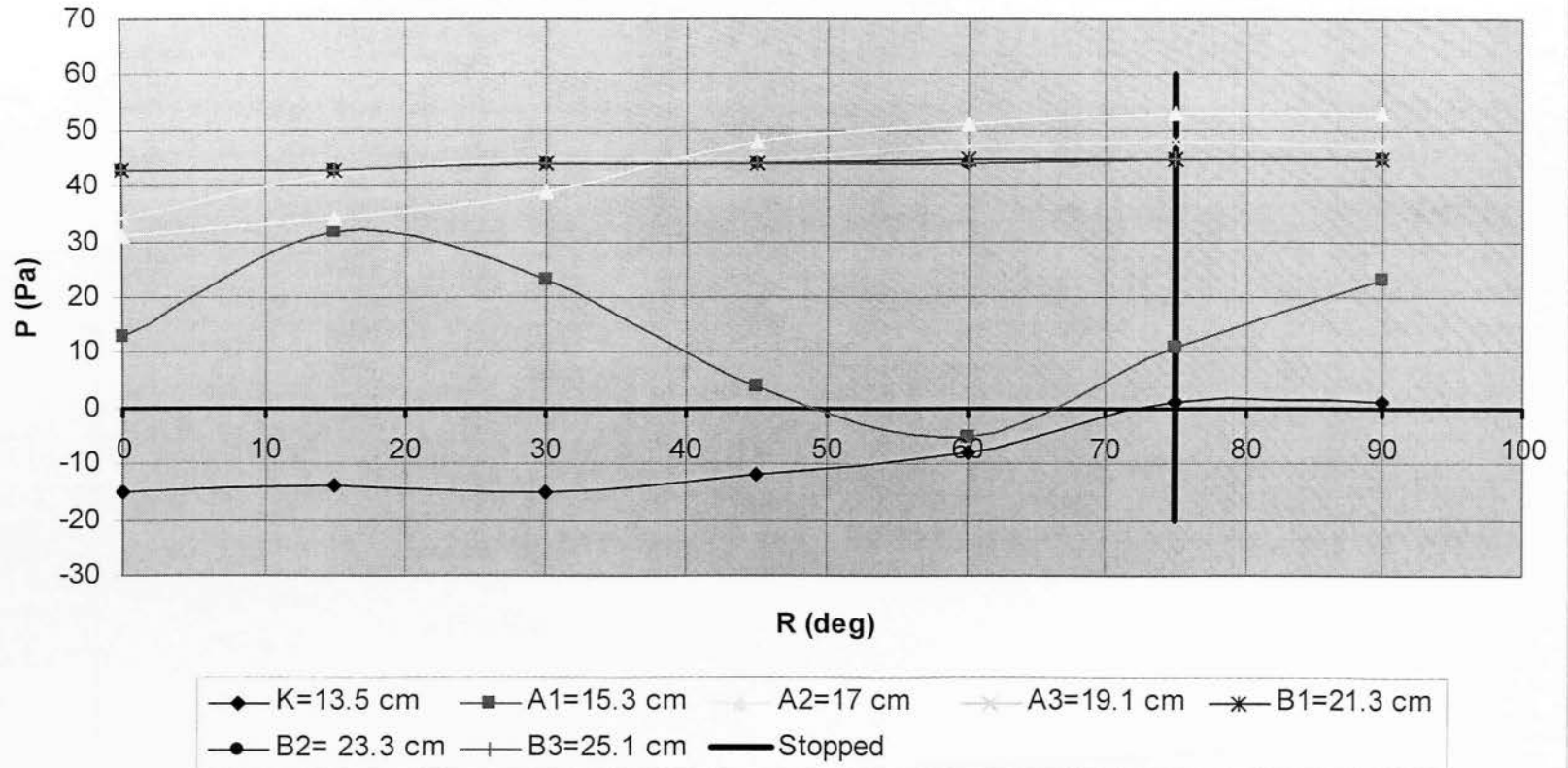
U= 10 m/s							
	P (Pa)						
R (deg)	K	A1	A2	A3	B1	B2	B3
0	-29	39	79	88	107	105	104
15	-36	76	85	107	106	105	105
30	-29	66	96	110	107	106	105
45	-26	3	116	111	107	106	106
60	-25	2	122	113	108	106	105
75	-12	31	123	113	108	106	107
90	6	39	126	114	110	108	107

U=2 m/s

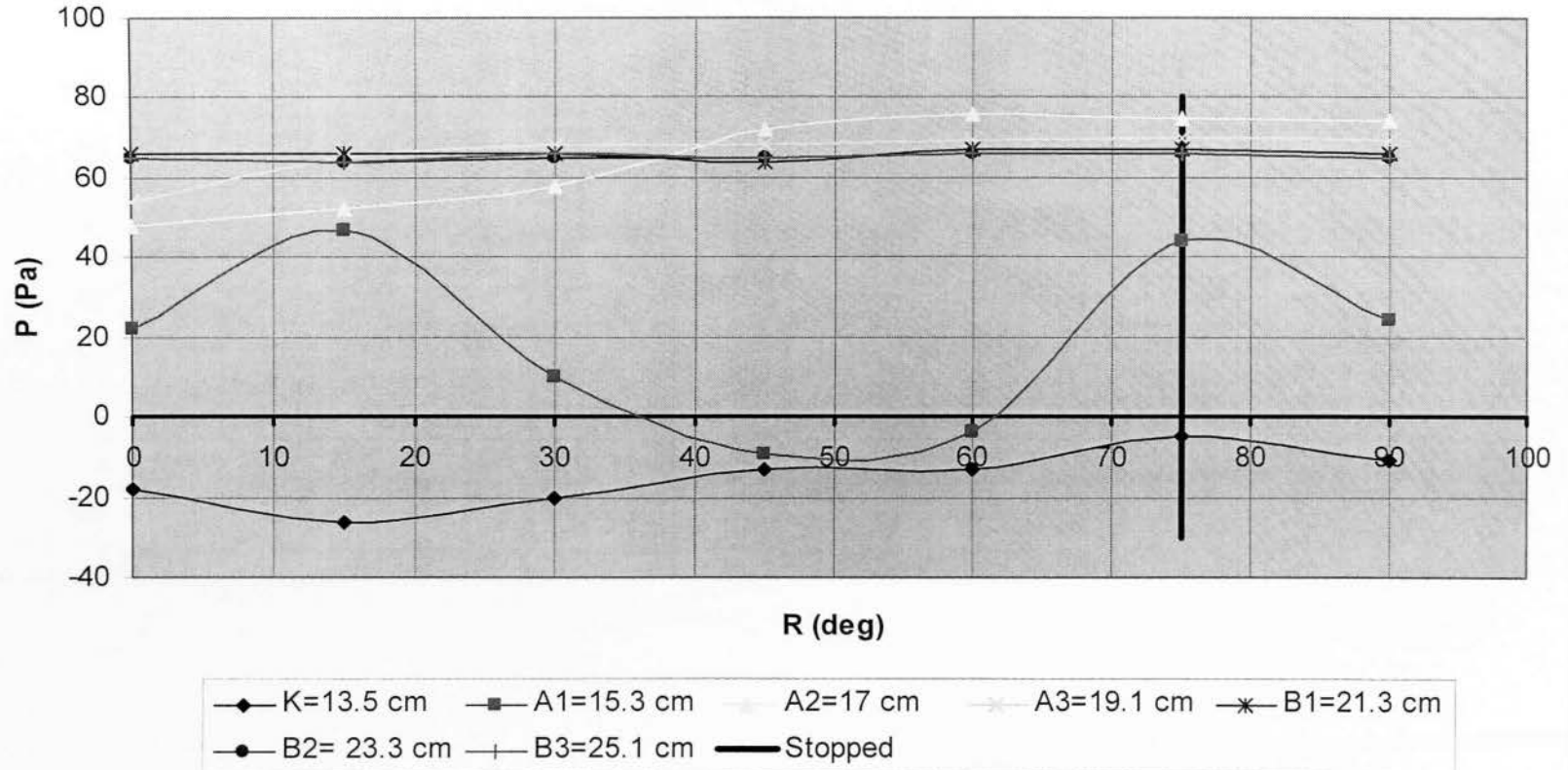


◆ K=13.5 cm ■ A1=15.3 cm ▲ A2=17 cm ✖ A3=19.1 cm ✖ B1=21.3 cm
● B2=23.3 cm + B3=25.1 cm — Stopped

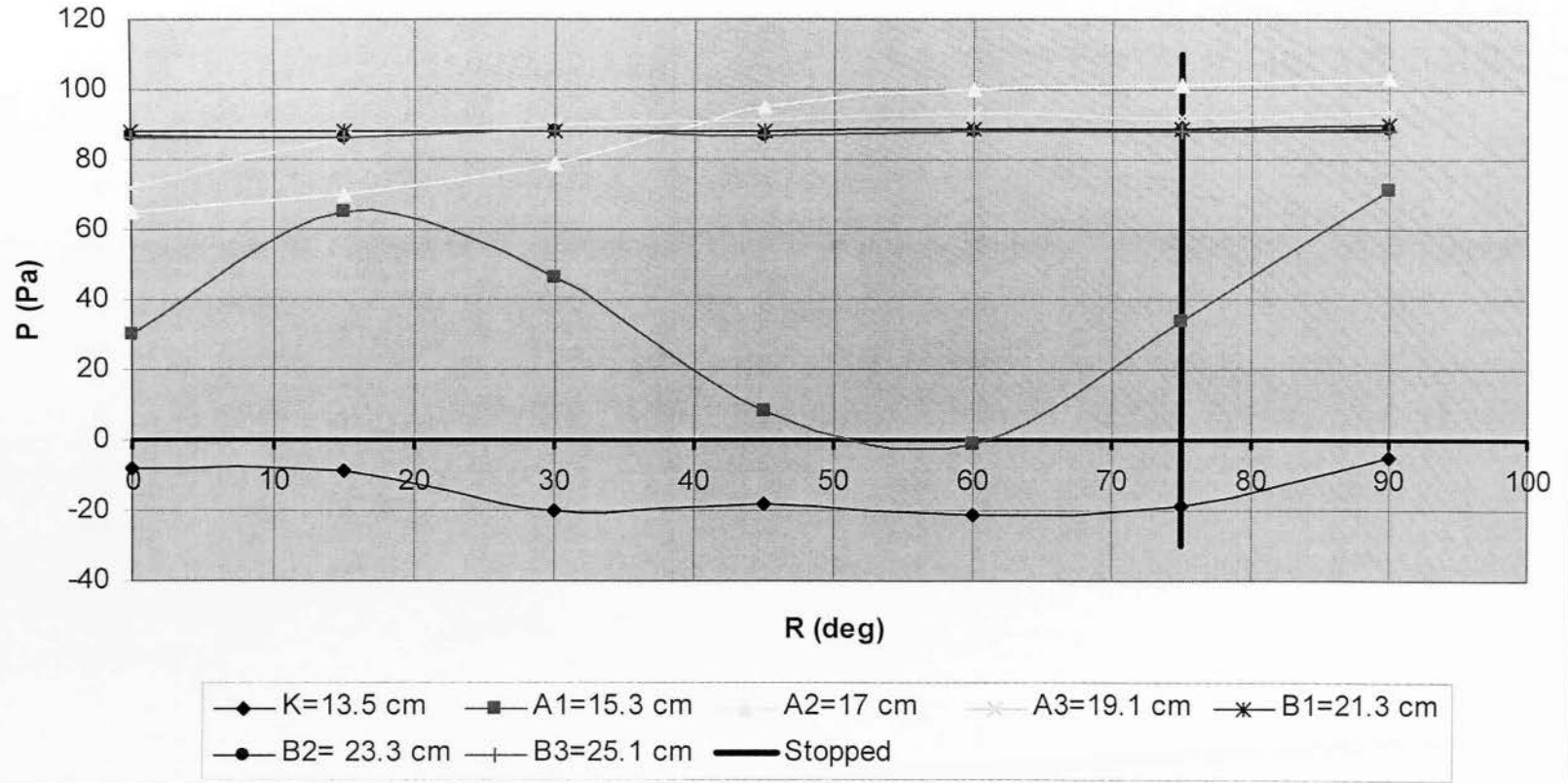
U=4 m/s



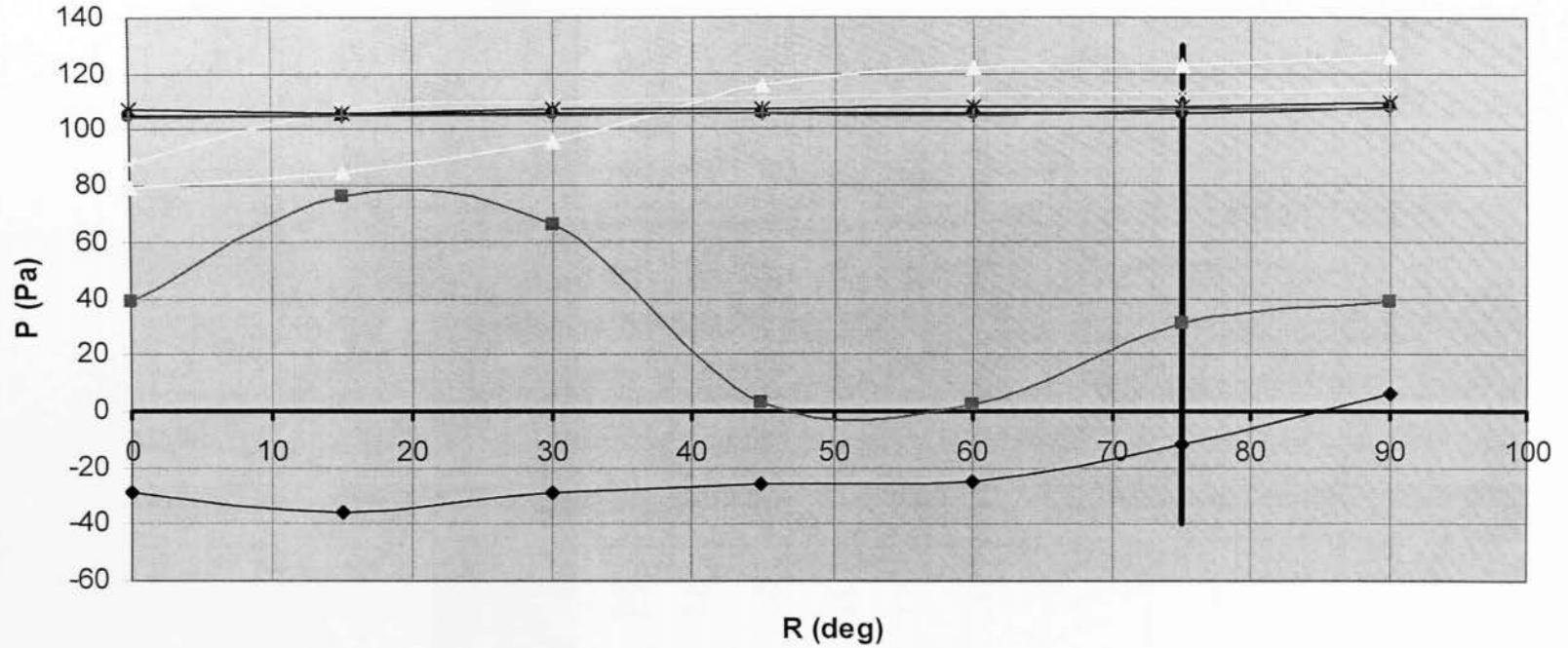
U=6 m/s



U=8 m/s



U=10 m/s



◆ K=13.5 cm ■ A1=15.3 cm ○ A2=17 cm × A3=19.1 cm * B1=21.3 cm
● B2=23.3 cm + B3=25.1 cm — Stopped

- Για θέση 2, σπή 3:

U= 2 m/s							
	P (Pa)						
R (deg)	K	A1	A2	A3	B1	B2	B3
0	-3	12	14	16	21	21	21
15	-4	14	15	20	21	21	21
30	-7	9	18	23	22	22	22
45	-8	9	23	23	22	22	22
60	-6	0	25	24	23	23	23
75	-8	10	24	24	23	23	23
90	-7	2	24	24	23	23	23

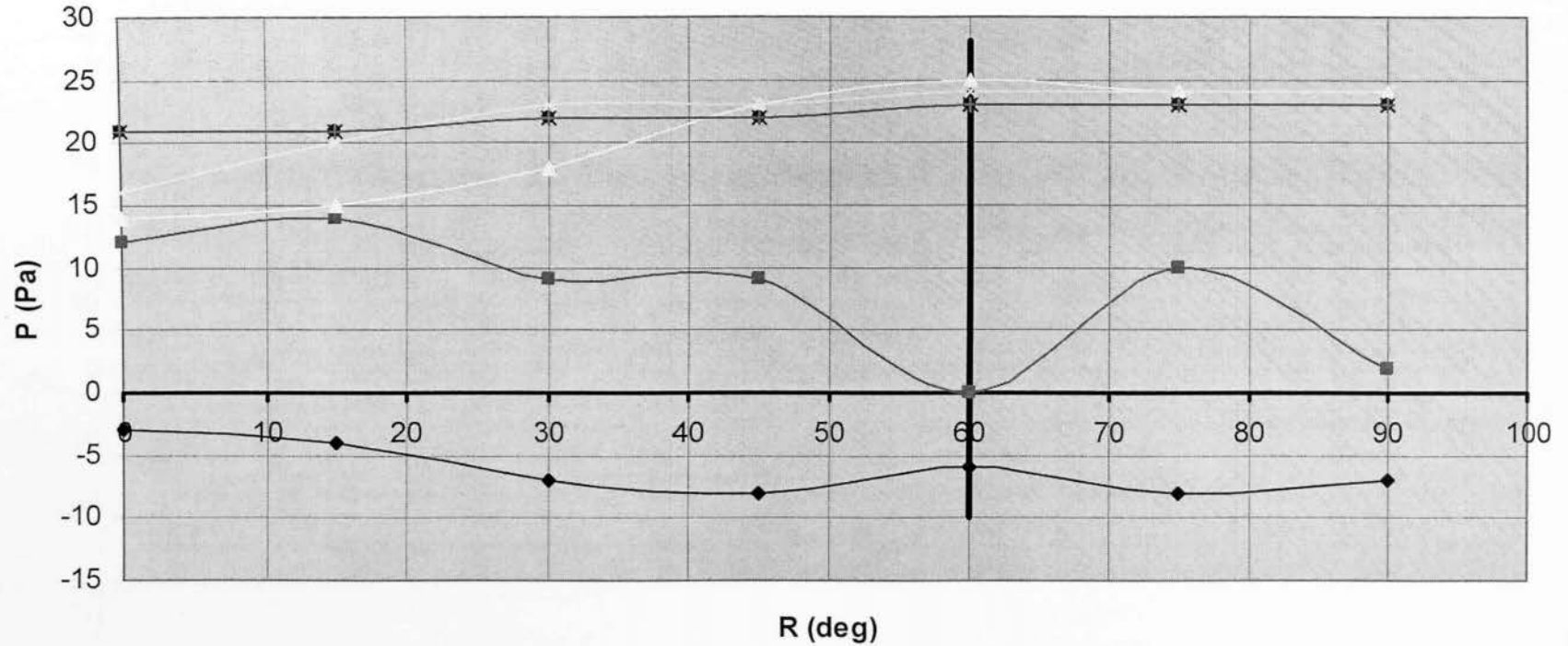
U= 4 m/s							
	P (Pa)						
R (deg)	K	A1	A2	A3	B1	B2	B3
0	-4	23	29	33	42	42	42
15	-8	29	32	40	42	42	42
30	-14	17	36	43	43	43	43
45	-15	5	43	43	42	42	42
60	-17	1	44	43	42	42	42
75	-14	1	47	45	44	43	43
90	-16	25	46	44	43	43	43

U= 6 m/s							
	P (Pa)						
R (deg)	K	A1	A2	A3	B1	B2	B3
0	-8	34	45	51	64	63	63
15	-13	45	49	59	64	63	63
30	-24	31	55	64	64	64	64
45	-24	15	64	65	64	64	63
60	-30	-5	66	65	65	64	64
75	-25	3	69	66	65	64	64
90	-26	37	69	66	66	65	64

U= 8 m/s							
	P (Pa)						
R (deg)	K	A1	A2	A3	B1	B2	B3
0	-5	39	60	67	85	85	85
15	-16	61	66	79	85	85	85
30	-30	40	73	87	86	85	85
45	-34	5	86	87	86	85	86
60	-37	-6	88	87	86	85	85
75	-39	79	89	87	86	85	85
90	-36	71	91	88	86	85	85

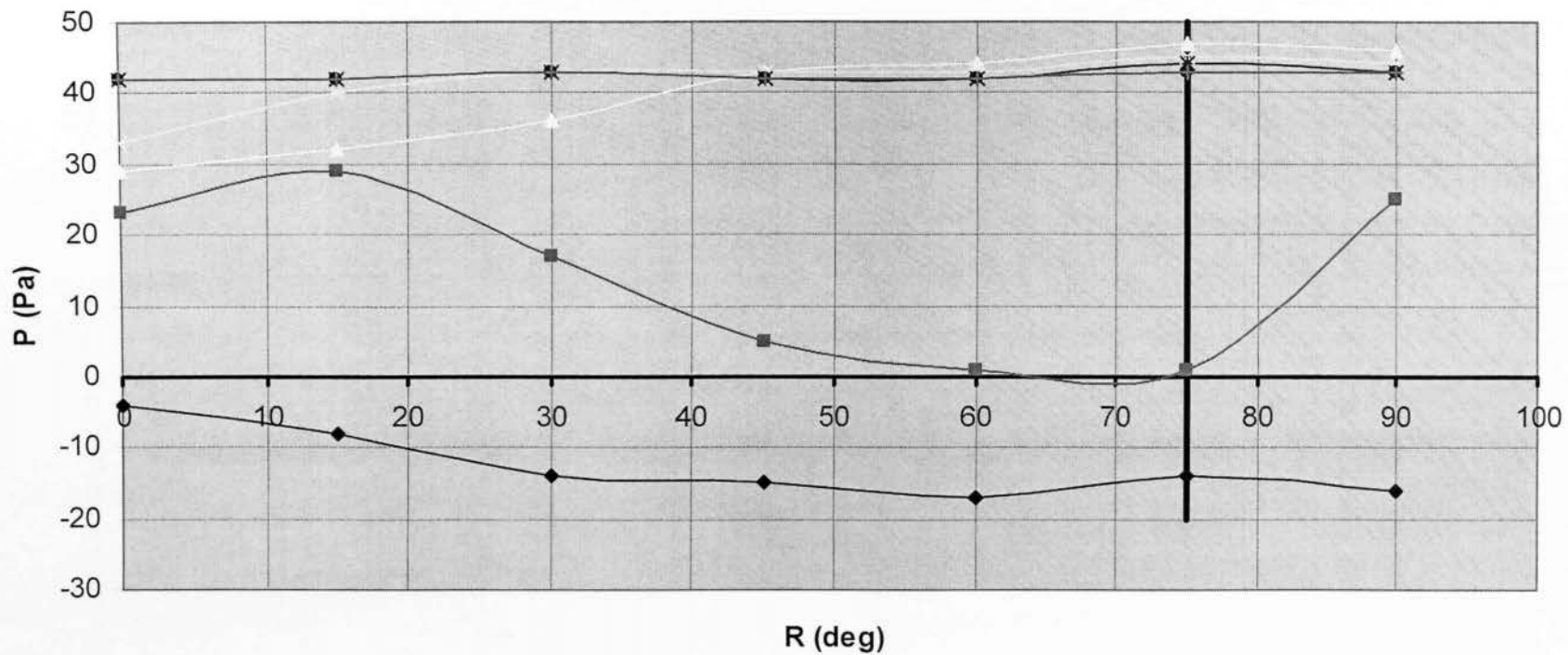
U= 10 m/s							
	P (Pa)						
R (deg)	K	A1	A2	A3	B1	B2	B3
0	-10	53	72	82	103	103	103
15	-25	72	80	94	103	103	103
30	-38	27	90	105	104	103	103
45	-41	8	102	105	104	103	102
60	-44	4	107	105	104	103	102
75	-45	50	109	106	105	103	102
90	-45	80	111	108	105	103	103

U=2 m/s



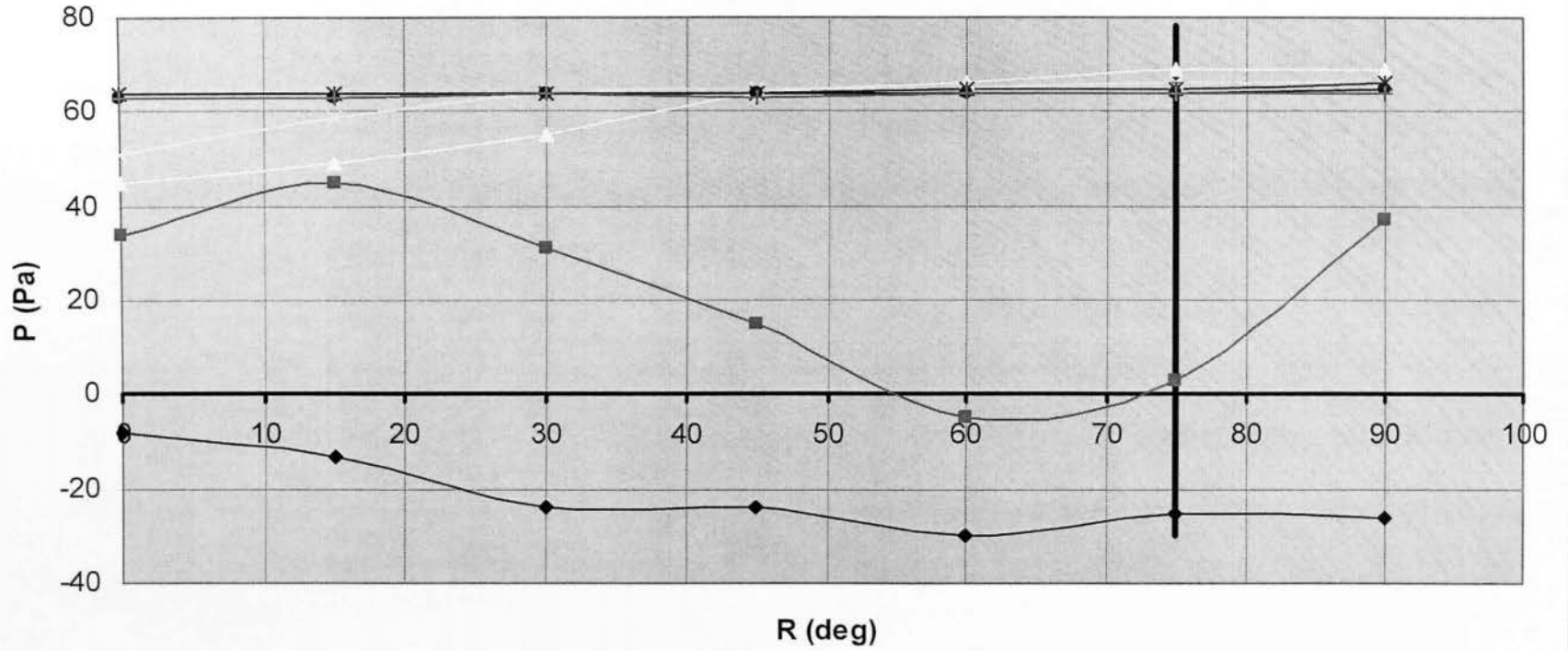
—◆— K=13.5 cm —■— A1=15.3 cm —▲— A2=17 cm —×— A3=19.1 cm —*— B1=21.3 cm
—●— B2=23.3 cm —+— B3=25.1 cm ——— Stopped

U=4 m/s



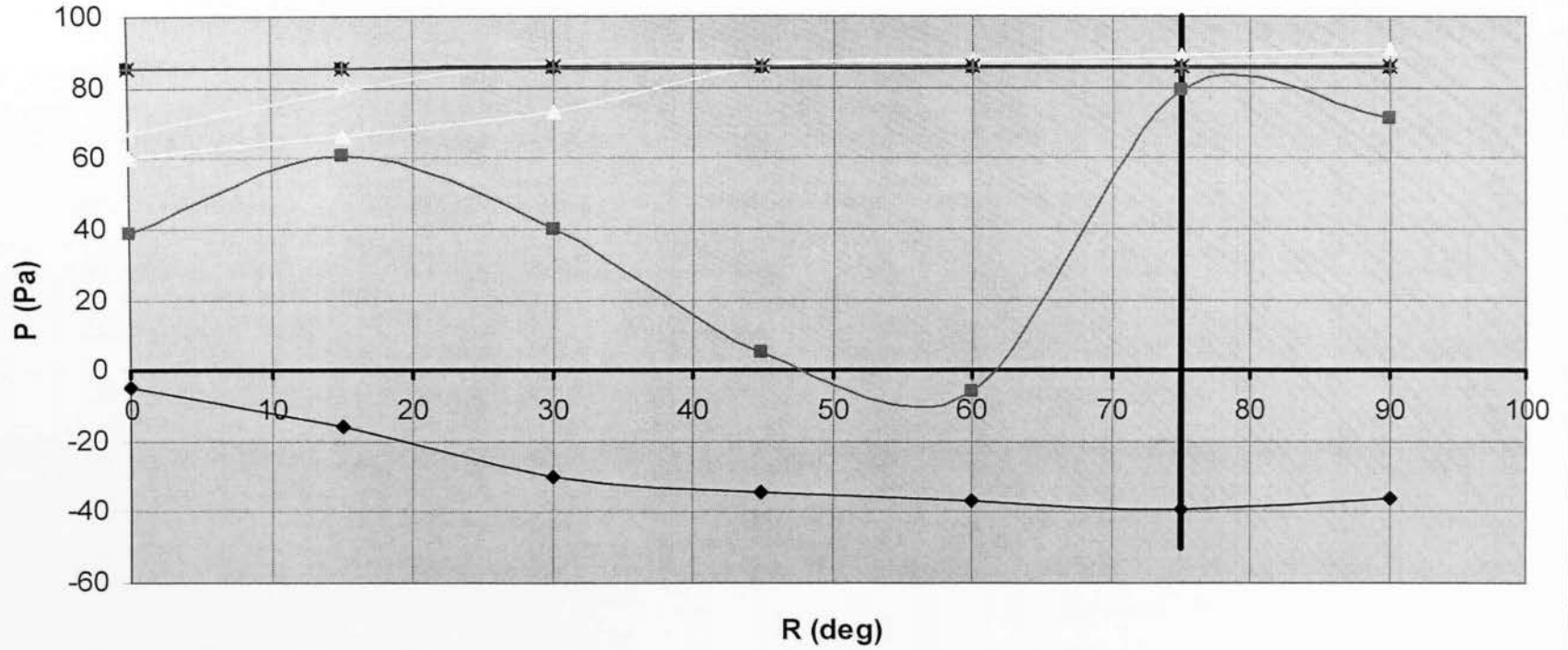
—◆— K=13.5 cm —■— A1=15.3 cm —▲— A2=17 cm —◇— A3=19.1 cm —*— B1=21.3 cm
—●— B2=23.3 cm —+— B3=25.1 cm ——— Stopped

U=6 m/s



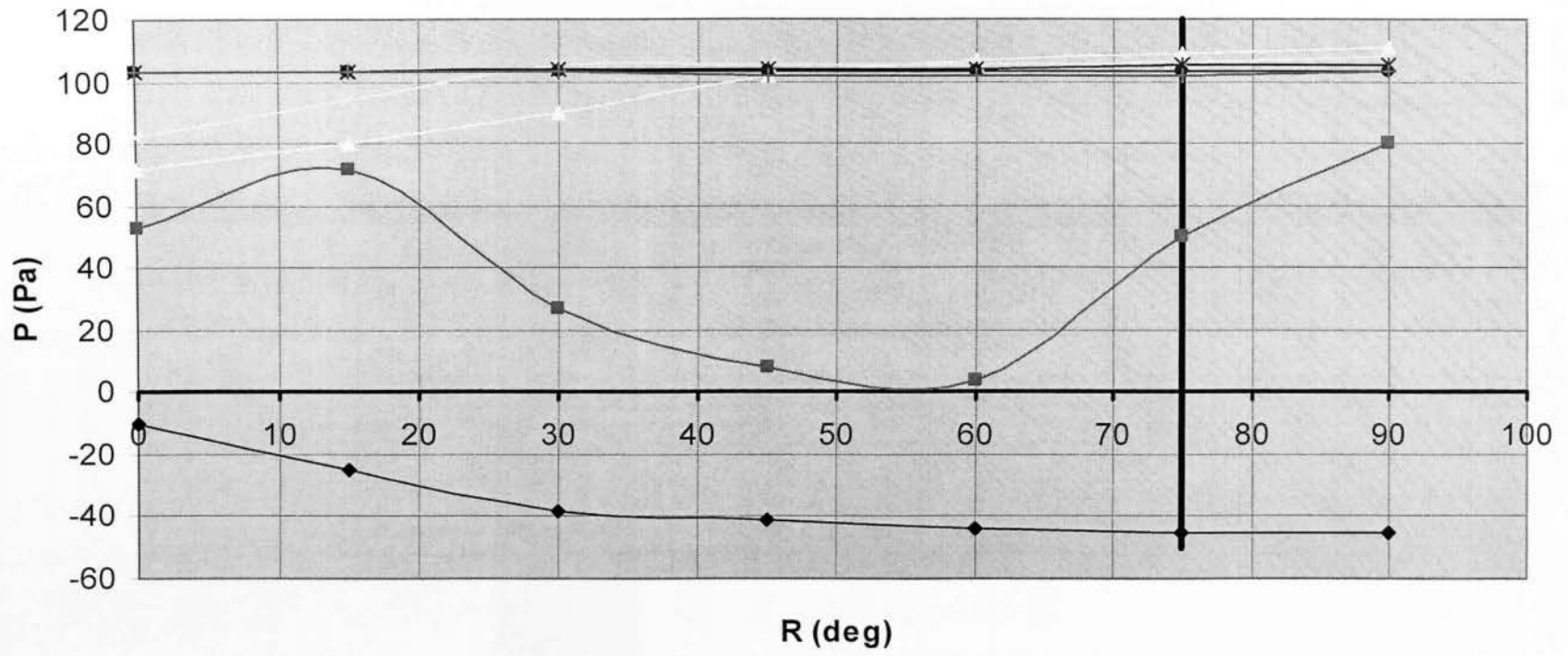
◆ K=13.5 cm ■ A1=15.3 cm ▲ A2=17 cm ✕ A3=19.1 cm * B1=21.3 cm
● B2=23.3 cm + B3=25.1 cm — Stopped

U=8 m/s



◆ K=13.5 cm ■ A1=15.3 cm ▲ A2=17 cm ✕ A3=19.1 cm ✕ B1=21.3 cm
● B2=23.3 cm + B3=25.1 cm — Stopped

U=10 m/s



—◆— K=13.5 cm —■— A1=15.3 cm —▲— A2=17 cm —✱— A3=19.1 cm —✱— B1=21.3 cm
—●— B2= 23.3 cm —+— B3=25.1 cm ——— Stopped

- Για θέση 3, σπή 4:

U= 2 m/s							
	P (Pa)						
R (deg)	K	A1	A2	A3	B1	B2	B3
0	2	13	15	17	22	22	22
15	1	13	16	20	22	22	22
30	1	9	18	23	23	22	22
45	-8	8	23	23	22	22	22
60	-7	20	22	22	22	22	22
75	-9	21	22	22	22	22	22
90	-8	22	22	22	22	22	22

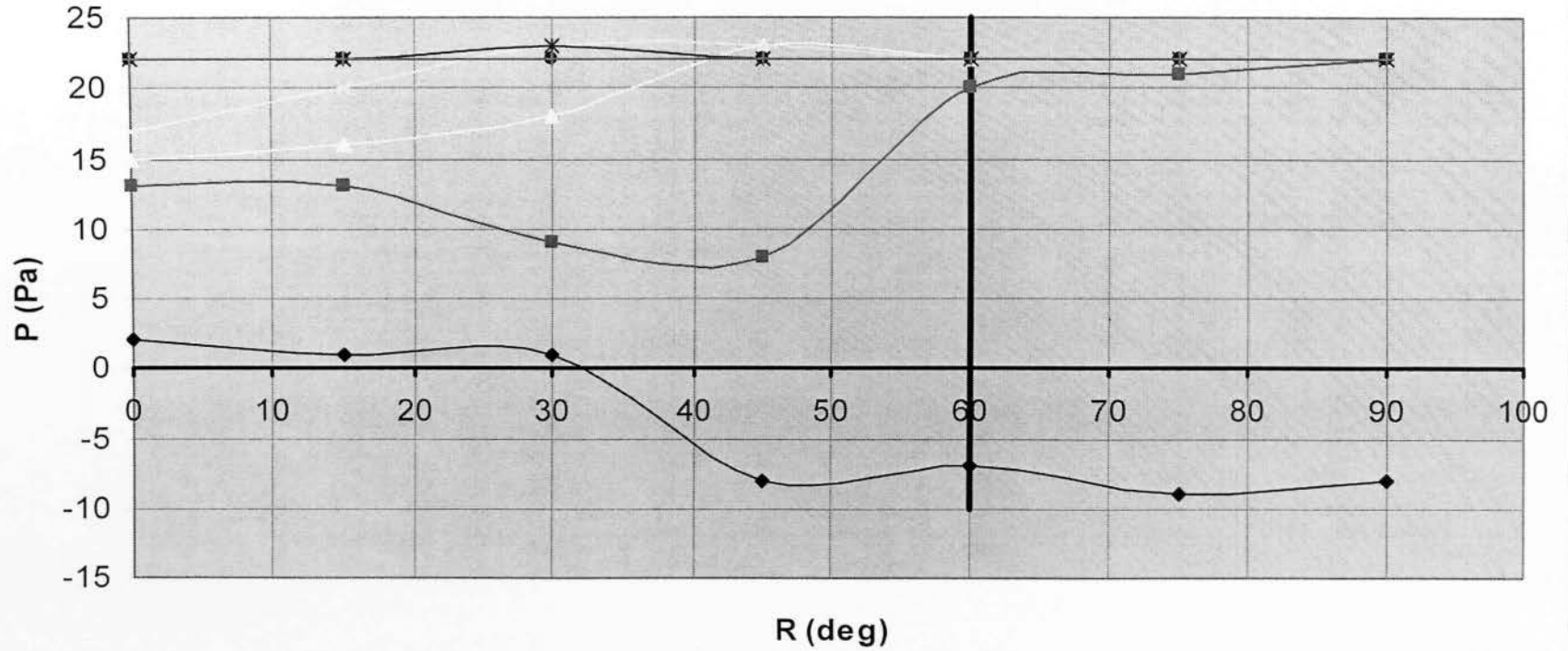
U= 4 m/s							
	P (Pa)						
R (deg)	K	A1	A2	A3	B1	B2	B3
0	4	26	29	32	42	41	41
15	2	27	31	39	41	41	42
30	1	12	36	42	41	41	41
45	-13	20	42	42	42	42	42
60	-16	6	42	42	42	42	42
75	-18	20	43	42	42	42	42
90	-13	36	42	42	42	42	42

U= 6 m/s							
	P (Pa)						
R (deg)	K	A1	A2	A3	B1	B2	B3
0	7	42	47	51	64	64	64
15	3	39	50	62	64	64	64
30	3	21	56	65	64	64	64
45	-17	19	65	65	65	64	64
60	-22	6	65	65	65	64	64
75	-29	24	67	66	65	65	64
90	-21	49	65	65	65	65	65

U= 8 m/s							
	P (Pa)						
R (deg)	K	A1	A2	A3	B1	B2	B3
0	7	51	62	67	84	84	84
15	2	47	66	79	84	84	84
30	0	29	74	84	84	84	84
45	-22	6	84	84	84	84	84
60	-30	14	85	85	84	84	84
75	-39	78	84	84	84	84	84
90	-28	74	84	84	84	84	84

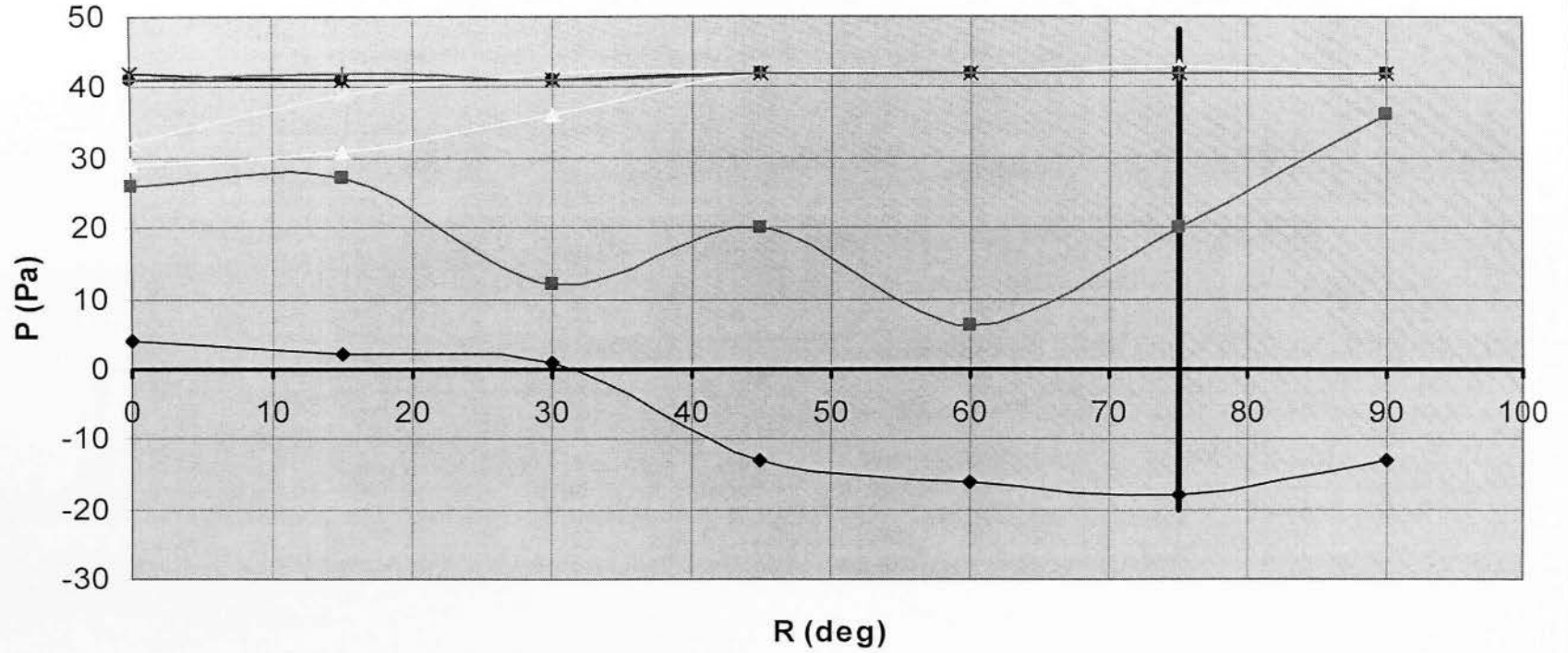
U= 10 m/s							
	P (Pa)						
R (deg)	K	A1	A2	A3	B1	B2	B3
0	9	64	79	84	104	104	104
15	3	55	83	98	105	104	104
30	0	29	93	105	105	105	104
45	-28	9	106	105	105	104	104
60	-36	15	105	105	105	104	104
75	-47	97	104	104	104	104	104
90	-24	100	105	106	105	104	104

U=2 m/s



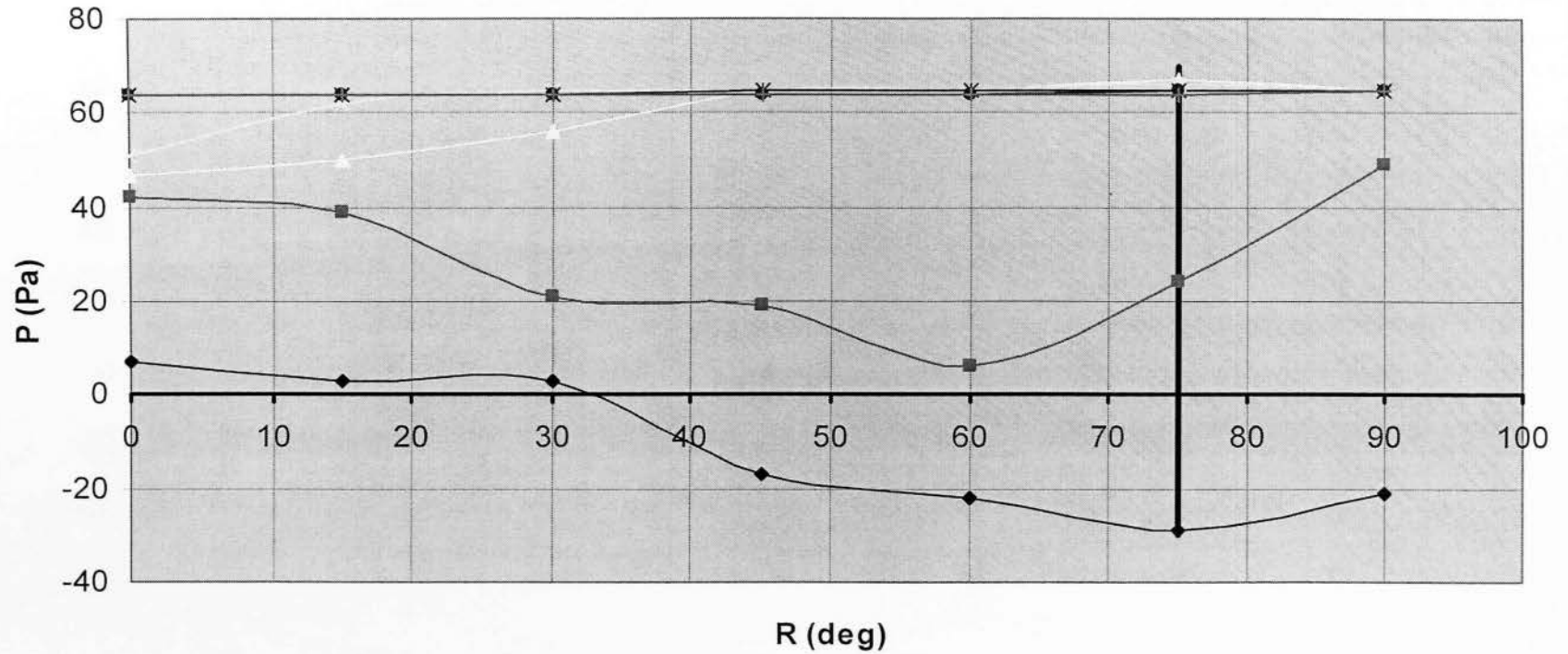
◆ K=13.5 cm ■ A1=15.3 cm ▲ A2=17 cm ▲ A3=19.1 cm * B1=21.3 cm
● B2=23.3 cm + B3=25.1 cm — Stopped

U=4 m/s



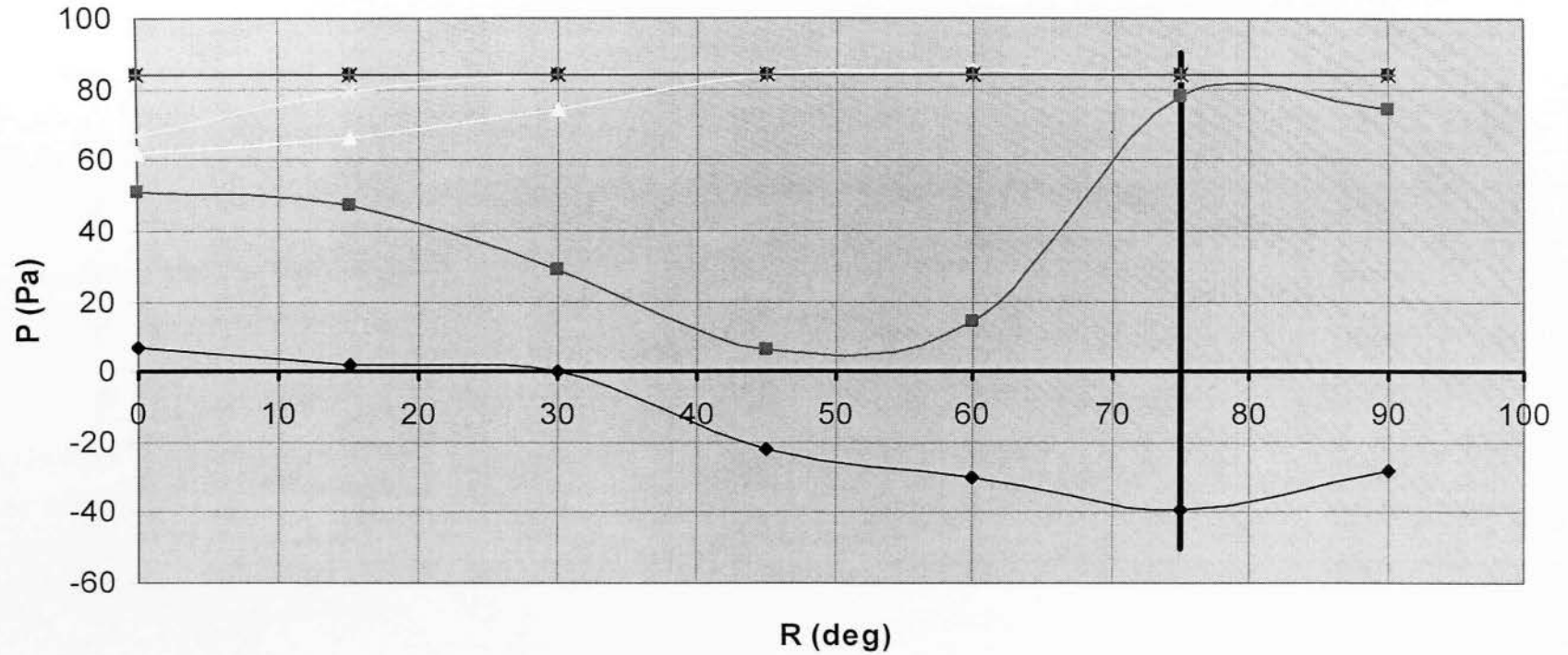
◆ K=13.5 cm ■ A1=15.3 cm ▲ A2=17 cm △ A3=19.1 cm * B1=21.3 cm
● B2=23.3 cm + B3=25.1 cm — Stopped

U=6 m/s



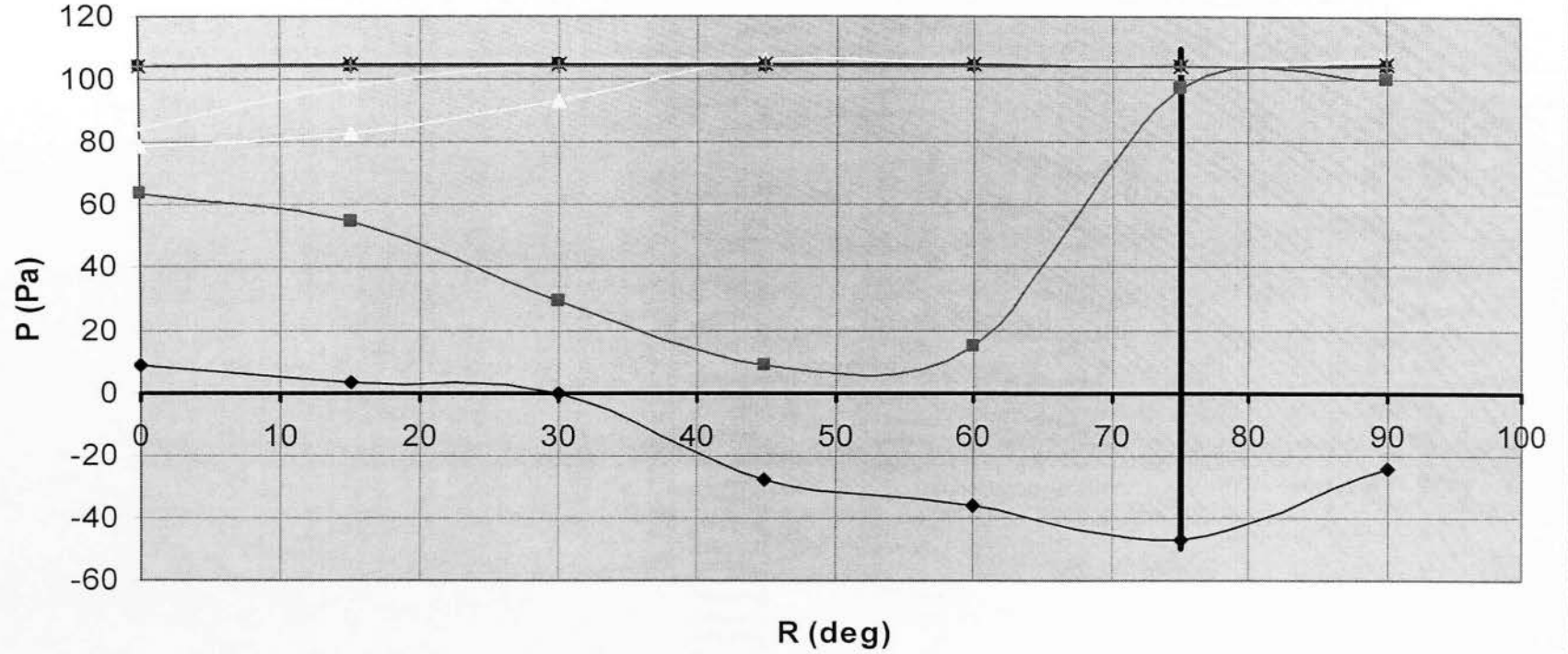
—◆— K=13.5 cm —■— A1=15.3 cm —●— A2=17 cm —▲— A3=19.1 cm —*— B1=21.3 cm
—●— B2=23.3 cm —+— B3=25.1 cm ——— Stopped

U=8 m/s



◆ K=13.5 cm ■ A1=15.3 cm ▲ A2=17 cm ✦ A3=19.1 cm ✱ B1=21.3 cm
● B2=23.3 cm + B3=25.1 cm — Stopped

U=10 m/s



◆ K=13.5 cm ■ A1=15.3 cm ▲ A2=17 cm ✖ A3=19.1 cm * B1=21.3 cm
● B2=23.3 cm + B3=25.1 cm — Stopped

Κεφάλαιο 5

Σχόλια / Συμπεράσματα / Μελλοντικές Εργασίες

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΧΟΛΙΑ / ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ / ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ

5.1 ΣΧΟΛΙΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Είναι συχνό φαινόμενο, κατά τη διεξαγωγή πειραμάτων, να υπάρχουν σφάλματα τα οποία μπορεί να επηρεάσουν, περισσότερο ή λιγότερο, τα τελικά αποτελέσματα και να οδηγήσουν σε ασαφή ή ακόμη και λανθασμένα συμπεράσματα. Κατά τη διάρκεια του συγκεκριμένου πειράματος, οι αιτίες που μπορεί να οδήγησαν σε πιθανά σφάλματα ενδέχεται να ήταν και οι παρακάτω:

- Ο σωλήνας Pitot πολλές φορές μπορεί να μην ήταν απόλυτα κάθετος προς τη ροή του αέρα.
- Λόγω διακυμάνσεων των ιδιαίτερα ευαίσθητων οργάνων καταγραφής.
- Λόγω της μετακίνησης του σωλήνα Pitot ώστε να λαμβάνονται όλες οι μετρήσεις για συγκεκριμένη ταχύτητα και συνδυασμό θέσεων, μπορεί να είχαμε παρέμβαση στην φυσιολογική ροή του αέρα από την αεροσήραγγα, επηρεάζοντας τα αποτελέσματα.
- Εφόσον οι μετρήσεις πάρθηκαν σε διάφορες ημέρες, υπήρχε στην πραγματικότητα απόκλιση στη θερμοκρασία του χώρου, από 25 έως 29 °C .
- Η κατασκευή του μοντέλου ανεμογεννήτριας δεν ήταν ιδιαίτερα ακριβής, ούτε είχαν ληφθεί υπόψη όλες οι αεροδυναμικές παράμετροι που θα έπρεπε να είχαν παίξει ρόλο στην κατασκευή της, μειώνοντας έτσι τη στιβαρότητά της.

Χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις που πάρθηκαν κατά τη διεξαγωγή του πειράματος, δημιουργήθηκαν οι γραφικές παραστάσεις, στις οποίες απεικονίζονται όλα τα αποτελέσματα σε μορφή διαγραμμάτων, ώστε να είναι πιο εύκολη η συνολική παρατήρησή τους και η εξαγωγή συμπερασμάτων.

Όπως έχει ήδη σημειωθεί παραπάνω, στους πίνακες μετρήσεων τα δεδομένα που είναι στις περιοχές με κόκκινο χρώμα είναι αφού το μοντέλο ανεμογεννήτριας είχε ήδη σταματήσει την κίνησή του και κατά συνέπεια δεν ανήκουν στην «ωφέλιμη» λειτουργία της ανεμογεννήτριας. Παρόλα αυτά έχουν συμπεριληφθεί στις γραφικές παραστάσεις έτσι ώστε να φαίνεται η όποια αλλαγή στις πιέσεις και είναι οι περιοχές των γραφικών παραστάσεων δεξιά από την πιο μεγάλου πάχους μαύρη κάθετη γραμμή σε όλα τα διαγράμματα.

Τέλος, όπως φαίνεται και στις γραφικές παραστάσεις, σε κάθε γράφημα για συγκεκριμένη ταχύτητα αέρα και συγκεκριμένο συνδυασμό θέσεων, έχουν συμπεριληφθεί όλες οι μετρήσεις σε ξεχωριστές σειρές για κάθε σημείο μέτρησης (από το κέντρο του μοντέλου της ανεμογεννήτριας, έως και το πιο απομακρυσμένο σημείο εξωτερικά των πτερυγίων της), ώστε να είναι άμεση η σύγκρισή τους, αντί να δημιουργηθεί ξεχωριστό γράφημα για κάθε μία θέση, κάτι το οποίο μπορεί να έδειχνε πιο καθαρά της αυξομειώσεις των δεδομένων, δεν θα προσφέρονταν όμως για άμεση οπτική σύγκριση αυτών.

Εξετάζοντας τις γραφικές παραστάσεις, μπορούμε να παρατηρήσουμε τα εξής:

- Όλες οι γραφικές παραστάσεις έχουν κάποια κοινά σημεία από τα οποία μπορούμε να συμπεράνουμε πως τουλάχιστον με τη συγκεκριμένη διάταξη μετρήσεων δεν υπάρχει κάποια περίπτωση δεδομένων που να μας προβληματίζουν ως προς το ότι μας δείχνουν κάποια αντίθετη τάση. Φυσικά, για το αν τα γραφήματα αυτά είναι πραγματικά χαρακτηριστικά του ρευστοδυναμικού πεδίου ενός μοντέλου ανεμογεννήτριας, θα πρέπει να πραγματοποιηθούν και άλλα αντίστοιχα πειράματα, υπό διαφορετικές συνθήκες και με διαφορετικές διατάξεις.
- Παρατηρούμε πως σε όλες τις περιπτώσεις, όταν το δοκίμιο βρισκόταν υπό γωνία 90 μοιρών, η πτερωτή είχε σταματήσει να γυρνάει, κάτι το οποίο βέβαια αναμενόταν, λόγω της θέσης του μέσα στην

αεροσήραγγα και εφόσον η ροή του αέρα ήταν κάθετη στον άξονα της πτερωτής.

- Με την αύξηση της ταχύτητας του αέρα παρατηρείται γενικά μια άνοδος των τιμών της πίεσης σε όλο το φάσμα των μετρήσεων και για όλους τους συνδυασμούς θέσεων του δοκιμίου και του σωλήνα Pitot.
- Επίσης παρατηρούμε πως σε γενικές γραμμές, με την αύξηση της γωνίας του μοντέλου ανεμογεννήτριας και τουλάχιστον μέχρι να σταματήσει η πτερωτή να κινείται, έχουμε ταυτόχρονη αύξηση των πιέσεων υπό σταθερή ταχύτητα, με λίγες εξαιρέσεις σε όλο το φάσμα των μετρήσεων, όπου έχουμε κάποιες αυξομειώσεις.
- Σε όλες τις περιπτώσεις, η πτερωτή συνέχιζε να κινείται μέχρι και υπό γωνία 75 μοιρών, ενώ σταματούσε στις 90 μοίρες. Εξαιρέση σε αυτό ήταν οι μετρήσεις υπό χαμηλή ταχύτητα ($U = 2 \text{ m/s}$), όπου και σταματούσε πιο νωρίς και στους 3 συνδυασμούς θέσεων, κάτι που επίσης αναμενόταν, αφού η ροή του αέρα δεν ήταν αρκετά δυνατή για να συνεχίσει να γυρνάει την πτερωτή υπό γωνία. Βλέπουμε επίσης ότι το μεγαλύτερο πρόβλημα υπήρξε για τη θέση 1, οπή 2, όπου η πτερωτή είχε ήδη σταματήσει να γυρνάει στις 45 μοίρες.
- Κάτι πολύ ενδιαφέρον που μπορεί να παρατηρηθεί από τις γραφικές παραστάσεις είναι τα κοινά σημεία μεταξύ τους όσον αφορά στις σειρές των δεδομένων σε σχέση με το ακριβές σημείο των μετρήσεων. Βλέπουμε λοιπόν πως σε όλες τις περιπτώσεις, οι μετρήσεις που έγιναν στο κέντρο της πτερωτής έδειξαν πολύ χαμηλές πιέσεις, αρκετές φορές και υποπιέσεις, κάτι το οποίο ακούγεται λογικό λόγω του ότι παρεμβαλλόταν η πτερωτή μεταξύ της ροής του αέρα και του σωλήνα Pitot. Το γεγονός αυτό δε φάνηκε να επηρεάζεται ιδιαίτερα από τη γωνία του μοντέλου ανεμογεννήτριας, αφού οι σταθερά χαμηλές πιέσεις συνεχίζονταν σε όλο το φάσμα γωνιών.
- Αντίθετα, οι μετρήσεις που έγιναν στο εξωτερικό μέρος των πτερυγίων και κυρίως αυτές που πάρθηκαν εκτός του πεδίου των πτερυγίων (B1, B2, B3) μας έδειξαν ιδιαίτερα υψηλές πιέσεις και αυτό αναμενόμενο λόγω του ότι δεν υπήρχε καμία παρεμβολή της ανεμογεννήτριας μεταξύ της ροής του αέρα και του σωλήνα Pitot. Το παραπάνω όμως

ισχύει και για τις δύο εξωτερικές μετρήσεις εντός του πεδίου των πτερυγίων (A2, A3), γεγονός που μας δείχνει πως οι μεγαλύτερες πιέσεις στην ανεμογεννήτρια είναι στο εξωτερικό μέρος των πτερυγίων της και φυσικά αυτό πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τον σχεδιασμό τους, ώστε και να έχουν μεγαλύτερη αντοχή, αλλά και να μπορούν να εκμεταλλεύονται καλύτερα την ενέργεια του ανέμου σε μία εγκατάσταση. Βλέπουμε πως όπως και οι μετρήσεις στο κέντρο της πτερωτής, έτσι και οι παραπάνω και ειδικά οι μετρήσεις A3 έως και B3, είναι σχετικά σταθερές σε σχέση με τη γωνία του δοκιμίου.

- Ειδικά για την περίπτωση των μετρήσεων στη θέση A2, παρατηρείται πως σε όλα τα γραφήματα, οι πιέσεις αρχίζουν σε ελαφρώς πιο χαμηλά επίπεδα από τις μετρήσεις A3 έως και B3, όμως όσο η γωνία του δοκιμίου αυξάνεται, οι πιέσεις ανεβαίνουν στα υψηλότερα επίπεδα όλων, σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις. Συνήθως οι πιέσεις του σημείου A2 ξεπερνούν τις υπόλοιπες μεταξύ 45 και 60 μοιρών. Μοναδική εξαίρεση είναι για τον πρώτο συνδυασμό θέσεων (θέση 1, σπή 2), όπου το φαινόμενο αυτό παρατηρείται πιο νωρίς, κοντά στις 40 μοίρες. Έτσι, σε αυτό το σημείο έχουμε ελαφρώς μεγαλύτερη μεταβλητότητα, με αυξητική τάση, των πιέσεων, όσο αυξάνεται η γωνία του μοντέλου ανεμογεννήτριας.
- Το πιο ενδιαφέρον είναι το σημείο A1, όπου έχουμε πολύ μεγάλη μεταβλητότητα στις πιέσεις σε σχέση με τις γωνίες, όπου σε όλες τις περιπτώσεις οι πιέσεις άρχιζαν σε μεσαία προς υψηλά επίπεδα, σε μεσαίες γωνίες οι πιέσεις έπεφταν και σε μεγαλύτερες γωνίες συνήθως ανέβαιναν και πάλι - κάποιες φορές με γραφική μορφή που θυμίζει κυματοειδή, σε κάποιες άλλες με πιο τυχαία μορφή – φτάνοντας πολλές φορές τις πιέσεις των πιο εξωτερικών σημείων ή ακόμα και ξεπερνώντας τις στην περίπτωση των 2 m/s στη θέση 1, σπή 2.
- Λαμβάνοντας υπόψη και τη μεταβλητότητα των πιέσεων του σημείου A1, βλέπουμε πως το σταμάτημα της κίνησης των πτερυγίων της πτερωτής δεν επηρέασε ιδιαίτερα τη μορφή των γραφικών παραστάσεων, τουλάχιστον όχι σε βαθμό ώστε να μπορεί να

παρατηρηθεί με τη συγκεκριμένη μεθοδολογία και αριθμό των μετρήσεων.

5.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ

Από τα παραπάνω θεωρούμε πως θα είχαν ενδιαφέρον μελλοντικές εργασίες, όπου θα υπήρχε πιο λεπτομερής μελέτη της μεταβολής των πιέσεων στο εσωτερικό σημείο των πτερυγίων ενός μοντέλου ανεμογεννήτριας, ώστε να επιβεβαιωθεί ή όχι η μεταβλητότητα που φάνηκε να έχουν οι πιέσεις σε σχέση με τη γωνία πρόσπτωσης του αέρα στα πτερύγια. Επίσης, μία άλλη εργασία θα μπορούσε να αφορά στο συνδυασμό μετρήσεων διαφόρων μοντέλων ανεμογεννητριών μέσα στην αεροσήραγγα, ώστε να φανεί εάν το ρευστοδυναμικό πεδίο του αέρα είναι παρόμοιο ανάμεσα στα διαφορετικά μοντέλα ή τι διαφορές φαίνεται να υπάρχουν. Επιπλέον, εφόσον υπάρξει η δυνατότητα αυτή, θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν παρόμοιες μετρήσεις σε μεγαλύτερη εγκατάσταση (πιθανώς μία κανονική μικρού μεγέθους ανεμογεννήτρια, αντί για μοντέλο), όπου θα υπάρξει και καθαρότερη εικόνα για το αν υπήρχαν όντως σημαντικά σφάλματα στο πείραμα της εργασίας αυτής λόγω του μικρού μεγέθους της εγκατάστασης και του ελλιπού σχεδιασμού του μοντέλου ανεμογεννήτριας που χρησιμοποιήθηκε.

Τέλος, εάν οι παραπάνω, καθώς και άλλες πρόσθετες παρόμοιες εργασίες έχουν ολοκληρωθεί, θα μπορούσε να συνταχθεί μία θεωρητική με βάση όλες τις παραπάνω, η οποία θα έβγαζε συμπεράσματα από το συνδυασμό των αποτελεσμάτων αυτών και θα μπορούσε να προτείνει αλλαγές στο σχεδιασμό της πτερωτής ή και γενικότερα μίας εγκατάστασης ανεμογεννητριών, ώστε να έχουν μεγάλη αντοχή στις πιέσεις (πιθανότατα λαμβάνοντας υπόψη και το κόστος μετά από μία οικονομοτεχνική μελέτη) και να εκμεταλλεύονται όσο καλύτερα τη ροή του ανέμου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. «Διαχείριση της Αιολικής Ενέργειας» , Ιωάννης Κλεάνθη Καλδέλλης, Εκδόσεις Σταμούλη (2005)
2. «Μηχανική Ρευστών Ι – Θεωρία και Ασκήσεις» , Περικλής Κορωνάκης, ΟΕΔΒ (1998)
3. «Μηχανική Ρευστών ΙΙ – Θεωρία και Ασκήσεις» , Περικλής Κορωνάκης, ΟΕΔΒ (1998)
4. «Εργαστηριακή Ρευστοδυναμική ΙΙ» , Περικλής Κορωνάκης, Εκδόσεις ΙΩΝ (2000)
5. «Μετρήσεις Τεχνικών Μεγεθών» , Σ.Ε. Σιμοπούλου, Εκδόσεις ΕΜΠ (1989)
6. «Τεχνικές Μετρήσεις Ρευστοδυναμικών Μεγεθών» , Γ. Μπεργελέ, Δ. Παπαντώνη, Σ. Τσαγκάρη, Εργαστήριο Αεροδυναμικής ΕΜΠ (1990)
7. «Εισαγωγή στο δίκαιο ηλεκτροπαραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας» , Βατάλης, Εκδόσεις Σακκούλα (2007)
8. «Πηγές Ενέργειας – Συμβατικές και Ανανεώσιμες» , Γελεγένης – Αξαόπουλος, Εκδόσεις Σύγχρονη Εκδοτική
9. «Applied Hydro and Aerodynamechanics» , L. Prandtl and O.G. Tietjens, Dover Publications (1957)
10. «Fluids Mechanics» , V.L. Streeter, McGraw-Hill (1966)
11. «KENT's Mechanical Engineers' Handbook – Power Volume» , John Wiley & Sons (1966)
12. «Thermodynamics of Fluid Flow» , Prentice-Hall Inc. (1951)
13. «Διαχείριση Φυσικών Πόρων και Ενέργειας» , Δημήτρης Σταμούλης, Κοδοσάκη
14. «Αιολική Ενέργεια & Ανεμογεννήτριες» , John Walker , Nicholas Jenkins, Εκδόσεις ΙΩΝ
15. «Οικονομική Ελευθερία και Προστασία του Περιβάλλοντος» , Χαρίκλεια Αθανασοπούλου, Εκδόσεις Σακκούλα
16. <http://www.tpub.com/content/engine/14105/>
17. <http://www.anemogennitria.gr/hawt-vs-vawt.htm>