



**Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας**  
**Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών**  
**Πολυτεχνική Σχολή**

**ΤΟΜΕΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ**  
**ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ**  
**ΚΑΘΕΤΟΥ ΑΞΟΝΑ ΜΕ ΚΕΛΥΦΟΣ(SHROUD)**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΜΑΡΤΙΝΟΣ ΑΛΕΞΙΟΣ-ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ ΑΕΜ:1424**

**ΠΑΡΑΔΕΙΣΑΝΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ ΑΕΜ:1433**

**Επιβλέπων: Αντώνιος Τουρλιδάκης**

**Καθηγητής Π.Δ.Μ**

**ΚΟΖΑΝΗ (ΙΟΥΛΙΟΣ 2016)**



## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μετρήσεις σε υπάρχουσα πειραματική διάταξη, του εργαστηρίου <<ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΩΝ ΚΑΙ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ>>, ανεμογεννήτριας κάθετου άξονα με κελύφος. Σε αυτές περιλαμβάνονται λεπτομερείς μετρήσεις του πεδίου ταχύτητας και πιέσεων και μετρήσεις ροπής και στροφών για την αξιολόγηση της επίδρασης προσθήκης κελύφους γύρω από μια ανεμογεννήτρια κάθετου άξονα.

Ακόμη, πραγματοποιήθηκαν οι παραπάνω πειραματικές μετρήσεις τροποποιώντας την υπάρχουσα διάταξη. Οι τροποποιήσεις που πραγματοποιήθηκαν ήταν οι εξής:

- I. Πλήρης αφαίρεση του κελύφους
- II. Τροποποιήσεις των τμημάτων του κελύφους

Στην συνέχεια παρατέθηκαν και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα, αξιολογώντας την επίδραση της παρουσίας του κελύφους στην απόδοση της ανεμογεννήτριας

Επίσης, πραγματοποιήθηκε μελέτη της συμπεριφοράς νέων αεροτομών μέσω του προγράμματος Qblade, προς βελτίωση της αεροδυναμικής της υπάρχουσας διάταξης. Αφού επιλέχθηκε ο νέος τύπος αεροτομών, σχεδιάστηκε στο Solidworks και πρόκειται να κατασκευαστεί σε συνεργασία με το T.E.I Σερρών

Στην συνέχεια, σχεδιάστηκε ο νέος δρομέας της ανεμογεννήτριας, ο οποίος είναι αρκετά ελαφρύτερος και διαθέτει χειροκίνητο μηχανισμό για την αλλαγή γωνίας τοποθέτησης των πτερυγίων.

Τα βασικά συμπεράσματα που εξήχθησαν από την πειραματική διαδικασία ήταν, ότι η ανεμογεννήτρια παρουσιάζει υψηλούς συντελεστές ισχύος για συγκεκριμένες συνθήκες πειράματος παρουσία κελύφους. Απουσία κελύφους η ανεμογεννήτρια παρουσιάζει μηδενικό συντελεστή ισχύος, αποτέλεσμα του μεγάλου βάρους, άρα και της μεγάλης ροπής αδράνειας, της κατασκευής. Οι βέλτιστες τιμές του συντελεστή ισχύος, βρέθηκαν για τιμή αδιάστατης ταχύτητας ακροπτερυγίου κοντά στο 0.8. Ακόμα, αποδείχτηκε πειραματικά ότι η αύξηση της ταχύτητας εισόδου προκαλεί αισθητή μείωση στον συντελεστή ισχύος, ενώ μέσω της ανάλυσης του ροϊκού πεδίου διαπιστώθηκε, ότι όσο μεγαλύτερη είναι η πτώση πίεσης τόσο αυξάνεται η απόδοση της ανεμογεννήτριας. Τέλος, μελετήθηκαν και επιλέχθηκαν καινούργιες μη συμμετρικές αεροτομές για την δημιουργία νέων πτερυγίων.

## Abstract

In this thesis, experimental measurements on an existing experimental setup, which is a vertical axes wind turbine with shroud and exist in the laboratory of " Fluid Mechanics and Turbomachinery", performed. These include detailed measurements of velocity and pressure field, torque and rotates per minute measurements, in order to evaluate the effect of adding shroud around a vertical axes wind turbine.

Furthermore, the above experimental measurements made, by modifying the existing layout. The changes made were the following:

- I. Complete subtraction of shroud
- II. Modification of the shroud parts

Then, the results were quoted and compared by evaluated the effect of the shroud on the performance of the wind turbine.

In addition, a study of the aerodynamic behavior of new airfoil were performed, through Qblade program, in order to improve the aerodynamics of the existing setup. After the new type of airfoil was selected, designed in Solidworks and will be constructed in cooperation with Technical Educational Institute of Serres.

Moreover, the rotor of the new wind turbine was designed, which is quite lighter and has a manual mechanism in order to change the mounting angle of blades.

The main conclusions that drew form the experimental procedure, were that the wind turbine presents the peak of power coefficient when shroud is adjusted, under specific experimental conditions. Coefficient of power is zero when shroud is not adjusted, resulting in the heavy weight and the great moment of inertia of structure. The optimal values of power coefficient found for a tip speed ratio value close to 0.8. Furthermore, it was proved experimentally that the higher intake velocity of air , causes a substantial decrease of coefficient of power. Through the analysis of flow field was found, that the greater pressure drop leads to higher coefficient of power of the wind turbine. Finally, new un symmetric airfoils were selected for the new blades.

## Ευχαριστίες

Αρχικά, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μας Αντώνιο Τουρλιδάκη για την υποστήριξη, την καθοδήγηση και την βοήθεια στο σύνολο της προετοιμασίας και διεκπεραίωσης της διπλωματική μας εργασίας.

Επίσης, ευχαριστούμε πολύ τον διδακτορικό φοιτητή Βαφειάδη Κυριάκο για την σημαντική βοήθεια του και για τον χρόνο που διέθεσε .

Τέλος, οφείλουμε ένα μεγάλο ευχαριστώ στις οικογένειές μας για την αγάπη και την αμέριστη συμπαράστασή τους όλα αυτά τα χρόνια.

## Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη.....	i
Abstract .....	ii
Ευχαριστίες.....	iii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	1
1.1 Εισαγωγή.....	2
1.2 Ο άνεμος.....	3
1.3 Ιστορικά στοιχεία .....	4
1.4 Ανεμογεννήτριες καθέτου άξονα.....	8
1.4.1 Darrieus .....	9
1.4.2 Giromill .....	10
1.4.3 Savonius .....	11
1.5 Ανεμογεννήτριες καθέτου άξονα στον αστικό ιστό .....	12
1.6 Σύγκριση ανεμογεννητριών καθέτου και οριζοντίου άξονα .....	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΑΝΕΜΟΥ .....	15
2.1 Αεροδυναμικό μέρος.....	15
2.1.1 Ισχύς ανέμου .....	16
2.1.2 Συντελεστής ισχύος.....	16
2.1.3 Όριο Betz .....	17
2.1.4 Λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου .....	17
2.1.5 Διάγραμμα $C_p - \lambda$ .....	17
2.2 Αεροδυναμική H-rotor ανεμογεννήτριας καθέτου άξονα .....	19
2.3 Θεωρητικές μέθοδοι υπολογισμού της απόδοσης του δρομέα.....	21
2.3.1 Θεωρία Πολλαπλών Σωλήνων Ροής (Multiple-streamtube theory).....	24
2.3.2 Double Multiple Streamtube Model (DMS).....	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΚΑΘΕΤΟΥ ΑΞΟΝΑ ΜΕ ΚΕΛΥΦΟΣ.....	29
3.1 Εισαγωγή.....	29
3.2 Εισαγωγή στο πείραμα .....	29
3.2.1 Πειραματική Διάταξη.....	30
3.2.2 Πειραματικά μετρήσιμα μεγέθη .....	33
3.3 Πειραματικά όργανα.....	34
3.3.1 Εισαγωγή.....	34
3.3.2 Ηλεκτρονικό Μανόμετρο .....	35

3.3.3 Στροφόμετρο .....	39
3.3.4 Δυναμόμετρο .....	41
3.3.5 Αεροδυναμική σήραγγα .....	43
3.4 Πειραματική διαδικασία.....	45
3.4.1 Βαθμονόμηση κελύφους.....	45
3.4.2 Βαθμονόμηση σωλήνα Pitot.....	47
3.5 Αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας .....	48
3.5.1 Αποτελέσματα ροϊκού πεδίου.....	48
3.5.2 Διαγράμματα $C_p$ - $\lambda$ .....	56
3.6 Ανάλυση ροϊκού πεδίου πιέσεων .....	65
3.6.1 Οριζόντιο προφίλ πιέσεων.....	65
3.6.2 Κατακόρυφα προφίλ πιέσεων.....	66
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΝΕΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ.....	69
4.1 Εισαγωγή.....	69
4.2 Το λογισμικό Qblade.....	69
4.2.1 Μελέτη αεροτομών.....	70
4.2.2 Αεροδυναμική ανάλυση με το XFOIL .....	74
4.3 Ανάλυση δρομέα ανεμογεννήτριας .....	76
4.4 Σχεδιασμός των πτερυγίων.....	78
4.5 Σχεδιασμός δρομέα ανεμογεννήτριας .....	79
4.6 Τελική διάταξη .....	82
4.7 Μελέτη αντοχής της κατασκευής.....	86
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο Συμπεράσματα-Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα .....	91
Βιβλιογραφία.....	95
Παραρτήματα .....	97
Παράρτημα Α: Μετρήσεις ροϊκού πεδίου ταχυτήτων και δυναμικών πιέσεων για $V_{air} = 3$ m/s και $N=119$ rpm .....	97
Παράρτημα Β: Μετρήσεις ροϊκού πεδίου ταχυτήτων και δυναμικών πιέσεων για $V_{air} = 3$ m/s και $N=155$ rpm .....	98
Παράρτημα Γ: Μετρήσεις ροϊκού πεδίου ταχυτήτων και δυναμικών πιέσεων για $V_{air} = 3.2$ m/s και $N=188$ rpm .....	99
Παράρτημα Δ: Μετρήσεις για την εξαγωγή της καμπύλης $C_p$ - $\lambda$ , παρουσία κελύφους.....	101
Παράρτημα Ε: Μετρήσεις για την εξαγωγή της καμπύλης $C_p$ - $\lambda$ , με διάνοιξη του κελύφους .....	104

Παράρτημα Ζ: Κατακόρυφες μετρήσεις ροϊκού πεδίου, για ταχύτητες και δυναμικές πιέσεις.....	105
Παράρτημα Η: Κατακόρυφες μετρήσεις ροϊκού πεδίου, για βέλτιστο $C_p$ .....	105
Παράρτημα Θ: Οριζόντιες μετρήσεις ροϊκού πεδίου, για βέλτιστο $C_p$ .....	106



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ



## 1.1 Εισαγωγή

Η ενέργεια πάντα είχε κυρίαρχο ρόλο στις ζωές των ανθρώπων καθώς και στην οικονομική ανάπτυξη και ευημερία των κοινωνιών. Ζωή και ενέργεια είναι δυο έννοιες άρρηκτα συνδεδεμένες . Ο σύγχρονος κόσμος απαιτεί όλο και περισσότερη χρήση ενέργειας για τις βιομηχανικές δραστηριότητες , τις καθημερινές ανάγκες της κοινωνίας καθώς και για τις μεταφορές. Ο συνδυασμός της αυξημένης ζήτησης και της ραγδαίας μείωσης των ενεργειακών αποθεμάτων αποτελεί το σύγχρονο ενεργειακό πρόβλημα. Το πρόβλημα αυτό, οδηγεί στην συνεχόμενη αύξηση των τιμών της ενέργειας αλλά και στην εξάντληση των ενεργειακών πόρων όπως τα ορυκτά καύσιμα από τα οποία προέρχεται το 78% της παγκόσμιας ενέργειας. Μια ακόμη παράμετρος που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι ότι η καύση των ορυκτών καυσίμων απελευθερώνει δισεκατομμύρια τόνους διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) στην ατμόσφαιρα παγκοσμίως κάθε χρόνο. Το διοξείδιο του άνθρακα είναι υπεύθυνο για το φαινόμενο του θερμοκηπίου καθώς και για την κλιματική αλλαγή. Η αντιμετώπιση των παραπάνω προβλημάτων έστρεψε την επιστημονική κοινότητα στην έρευνα και ανάπτυξη εναλλακτικών τρόπων παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές (ΑΠΕ).

Στις μέρες μας, το ποσοστό παραγωγής της ενέργειας παγκοσμίως από ΑΠΕ υπολογίζεται στο 16% ενώ βαίνει αυξανόμενο λόγω του ενδιαφέροντος του επιστημονικού κόσμου καθώς και την συμφωνία της Διεθνούς Κοινότητας που έγινε γνωστή ως το πρωτόκολλο του Κιότο. Σύμφωνα με τη σύμβαση αυτή η Διεθνής Κοινότητα αποφάσισε την μείωση των εκπομπών των αέριων ρύπων.

Κύριες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι :

- Αιολική ενέργεια
- Βιομάζα
- Ηλιακή ενέργεια
- Υδροηλεκτρική ενέργεια
- Κυψέλες καυσίμου
- Γεωθερμική ενέργεια

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα ασχοληθούμε με την παραγωγή ενέργειας μέσω ανεμογεννητριών.

Αναλυτικά, στο **Κεφάλαιο 1** γίνεται αναφορά στον τρόπο με την οποίο δημιουργούνται οι άνεμοι και μια ιστορική αναδρομή, η οποία αφορά τον τρόπο με τον οποίο ο άνθρωπος εκμεταλλεύτηκε τον άνεμο, από την αρχαιότητα μέχρι την σύγχρονη εποχή. Στην συνέχεια, γίνεται παράθεση ορισμένων τύπων ανεμογεννητριών με σημαντικά χαρακτηριστικά λειτουργίας, δίνοντας έμφαση στις

ανεμογεννήτριες καθέτου άξονα. Επιπλέον, γίνεται σύγκριση των ανεμογεννητριών καθέτου και οριζοντίου άξονα σύμφωνα με τα βασικά λειτουργικά και σχεδιαστικά τους χαρακτηριστικά

Στο **Κεφάλαιο 2** γίνεται διεξοδική ανάλυση των πιο σημαντικών χαρακτηριστικών της αιολικής ενέργεια ως προς το ενεργειακό της περιεχόμενο. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται αναφορά στην κινητική ενέργεια του ανέμου και στο πως τελικά αυτή μεταφράζεται σε ισχύ που παράγει ο δρομέας της ανεμογεννήτριας. Επίσης, αναλύονται οι παράγοντες οι οποίοι συμβάλουν στην πολυπλοκότητα της αεροδυναμικής ανάλυσης ανεμογεννητριών καθέτου άξονα. Τέλος, αναφέρονται οι πιο γνωστές υπολογιστικές μέθοδοι για την εκτίμηση της απόδοσης του δρομέα.

Στο **Κεφάλαιο 3** γίνεται αναφορά στην υπό μελέτη πειραματική διάταξη του εργαστηρίου "Μηχανικής Ρευστών και Στροβιλομηχανών". Αναλύονται διεξοδικά τα πειραματικά όργανα που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις ταχύτητας και πίεσης του ροϊκού πεδίου. Στην συνέχεια, υπάρχει η παράθεση των διαγραμμάτων και η ανάλυση των αποτελεσμάτων. Επιπλέον, πραγματοποιούνται διάφορες τροποποιήσεις στο πείραμα, όπως η πλήρης αφαίρεση του κελύφους και η διάνοιξη των πλαϊνών τοιχωμάτων, όπου σε κάθε μια από αυτές εξάγεται η καμπύλη του συντελεστή ισχύος ως προς την αδιάστατη ταχύτητα ακροπτερυγίου, για διάφορες ταχύτητες εισαγωγής του αέρα. Τέλος, παραθέτονται οι βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας της συγκεκριμένης ανεμογεννήτρια, ώστε να λειτουργεί στην μέγιστη απολαβή ισχύος.

Στο **Κεφάλαιο 4** αναλύονται οι λόγοι που οδήγησαν στον σχεδιασμό νέας πειραματικής διάταξης, οι οποίοι προήλθαν από τα πειραματικά αποτελέσματα της προηγούμενης διάταξης. Στην συνέχεια γίνεται αναφορά στον τρόπο επιλογής των νέων αεροτομών τύπου NACA 5522, που έχει να κάνει με την καλύτερη αεροδυναμική συμπεριφορά τους σε συγκεκριμένες συνθήκες. Επιπλέον, παρατίθεται ο τρόπος σχεδιασμού του νέου, ελαφρύτερου δρομέα και τα χαρακτηριστικά του, τα οποία μπορούν να βελτιώσουν την αεροδυναμική συμπεριφορά της διάταξης. Τέλος, γίνεται μια προκαταρκτική στατική μελέτη της νέας ανεμογεννήτριας, η οποία υποβάλλεται σε ένα ακραίο σενάριο λειτουργίας.

Στο **Κεφάλαιο 5** αναφέρονται τα συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας και οι προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

## 1.2 Ο άνεμος

Η άνιση θέρμανση της επιφάνειας της γης από τον ήλιο, έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή των ανέμων. Ως γνωστό οι θάλασσες παρουσιάζουν μεγάλη θερμοχωρητικότητα αφού, εκτός από την εξάτμιση, η θερμότητα μεταφέρεται προς τα

κάτω στις υδάτινες μάζες. Έτσι κατά την διάρκεια της ημέρας, η θερμοκρασία του αέρα πάνω από το υδάτινο στοιχείο παραμένει σχετικά χαμηλή, σε σχέση με τον αέρα της στεριάς που θερμαίνεται περισσότερο. Αυτή η θέρμανση του αέρα της στεριάς ελαττώνει την πυκνότητα του με συνέπεια την ανύψωση του δημιουργώντας κενά τα οποία τα κρύα και βαρύτερα στρώματα του αέρα που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας, κινούνται για να καλύψουν. Με αυτό τον τρόπο δημιουργούνται τα τοπικά παραλιακά ρεύματα τα οποία κατά την διάρκεια της νύχτας, όπου συμβαίνει η αντίστροφη διαδικασία, αντιστρέφονται. Έτσι ο βαρύτερος αέρας της ξηράς κινείται προς την θάλασσα όπου αναπληρώνει τον αέρα που ανυψώνεται από την επιφάνεια της θάλασσας. Παρόμοια διαδικασία συμβαίνει και στις βουνοπλαγιές με αποτέλεσμα την παραγωγή τοπικών ρευμάτων.

Κατά τον ίδιο τρόπο παράγονται οι πλανητικοί άνεμοι λόγω της μεγαλύτερης θέρμανσης της επιφάνειας της γης κοντά στον Ισημερινό από ότι στους Πόλους. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα κρύοι επιφανειακοί άνεμοι να φυσούν από τους πόλους προς τον Ισημερινό προς αντικατάσταση του αέρα που ανυψώνεται στις τροπικές περιοχές και κινείται στην ανώτερη ατμόσφαιρα προς τους πόλους.

Υπάρχουν επίσης και οι εποχιακοί άνεμοι, όπως οι Μουσώνες, καθώς και οι ετήσιοι ή Μελμέτια. Οι τελευταίοι έχουν μεγαλύτερο ενδιαφέρον, αφού έχουν πολύ συχνή παρουσία στην περιοχή του Αιγαίου. Είναι άνεμοι του καλοκαιριού, Βόρειοι - Βορειοανατολικοί μέχρι και βορειοδυτικής διεύθυνσης που αρχίζουν να πνέουν από τις αρχές του Μαΐου μέχρι τα μέσα Οκτωβρίου με μεγαλύτερη ένταση και πυκνότητα από τα μέσα Ιουλίου μέχρι τα μέσα Σεπτεμβρίου, με μέγιστη ημερήσια διακύμανση κατά τις απογευματινές ώρες και ελάχιστη την νύχτα.

### 1.3 Ιστορικά στοιχεία

Η αξιοποίηση του ανέμου απασχόλησε τον άνθρωπο από την αρχαιότητα και ήταν ο ρυθμιστής για την ανάπτυξη της ανθρωπότητας καθώς χρησιμοποιήθηκε για την ναυτιλία και την άρδευση στις αγροτικές καλλιέργειες. Η σημαντικότητα του ανέμου απεικονίζεται και στην Ελληνική μυθολογία, όπου υπήρχε ο Θεός Αίολος.

Η αιολική ενέργεια χρησιμοποιήθηκε αρχικά από τον άνθρωπο για την κίνηση των ιστιοφόρων πλοίων που σκοπό είχαν τις εμπορικές συναλλαγές καθώς και την περεταίρω εξερεύνηση της γης. Ακόμη, η Αιολική ενέργεια χρησιμοποιήθηκε από τους πρώτους ανεμόμυλους που εμφανίστηκαν γύρω στο 700 μ.Χ. στην Μεσοποταμία και στην Κίνα οι οποίοι ήταν καθέτου άξονα σύμφωνα με ιστορικές πηγές. Στην Ευρώπη όμως, κυριάρχησαν οι ανεμόμυλοι οριζοντίου άξονα με μια

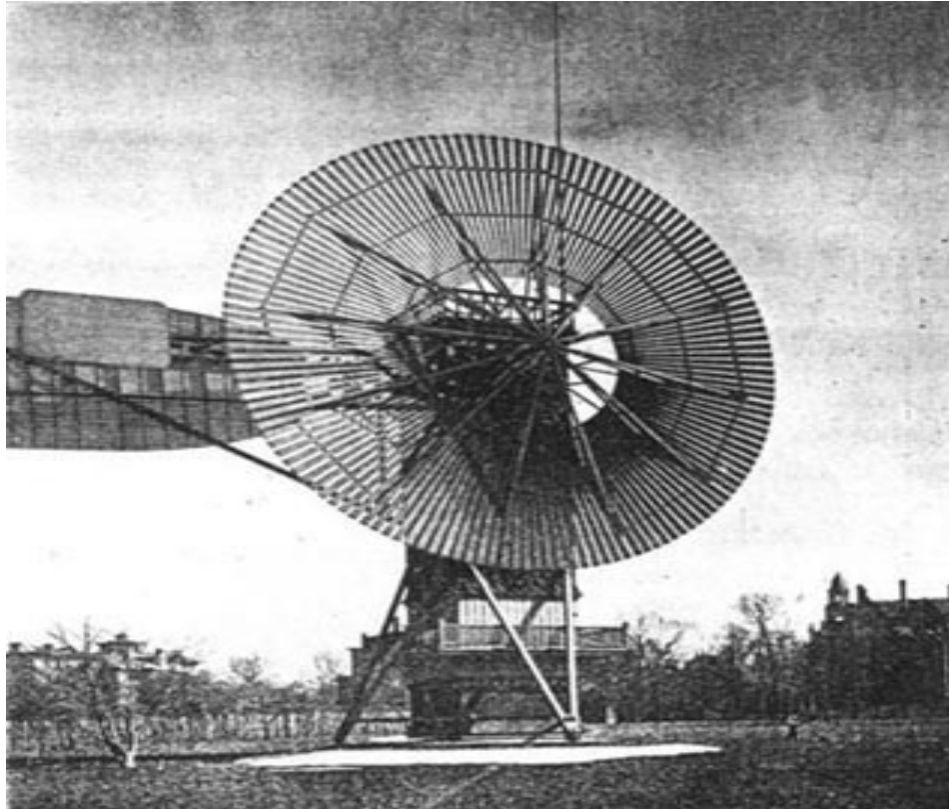
ελαφριά κλίση των πτερυγίων τους, μετά το 1500. Οι χώρες της Ευρώπης που πρωτοστάτησαν ήταν η Αγγλία και η Ολλανδία.



Σχήμα 1.1 Ανεμόμυλος τον Μεσαίωνα [2]

Περισσότεροι από 200.000 ανεμόμυλοι είχαν εγκατασταθεί στην Βόρεια Ευρώπη στις αρχές του 20ου αιώνα, ενώ στις Η.Π.Α κατασκευάστηκαν περίπου 6 εκατομμύρια ανεμόμυλοι μεταξύ του 1880 και του 2ου παγκοσμίου πολέμου

Η πρώτη προσπάθεια να χρησιμοποιηθεί η αιολική ενέργεια για την παραγωγή ρεύματος μέσω ανεμογεννήτριας, έγινε το 1888 από τον Charles F. Brush. Η ανεμογεννήτρια που κατασκευάστηκε είχε ισχύ 12kW.



Σχήμα 1.2 Ανεμογεννήτρια Brush [1]

Αφορμή για την περαιτέρω ανάπτυξη των ανεμοκινητήρων στάθηκε η πετρελαϊκή κρίση που σημειώθηκε το 1973 στις Αραβικές χώρες. Εκείνη την εποχή ο επιστημονικός κόσμος στράφηκε στην έρευνα και την ανάπτυξη των ανεμογεννητριών. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα το 1957 στην Δανία, ο Gedser να αναπτύξει την δικιά του ανεμογεννήτρια ονομαστικής ισχύος 200kW και διάμετρο ρότορα 24 m.



Σχήμα 1.3 Ανεμογεννήτρια Gedser [3]

Αντίστοιχα στις Η.Π.Α κατασκευάστηκε μια πρωτότυπη ανεμογεννήτρια το 1987 με διάμετρο 91.4 m και ονομαστικής ισχύος 2.5MW. Το μοντέλο αυτό ονομάστηκε NASA/DOE MOD-2.(Βλ.Σχ.1.4)



Σχήμα 1.4 DOE/NASA 2500kW [4]

## 1.4 Ανεμογεννήτριες καθέτου άξονα

Λιγότερο γνωστό τύπο ανεμογεννήτριας αποτελούν οι καθέτου άξονα (vertical axis wind turbine-VAWT).

Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα, οι οποίες αποτελούν και το βασικό θέμα της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, έχουν τον άξονα περιστροφής τους κάθετο ως προς το έδαφος και κατακόρυφο ως προς τη ροή του ανέμου. Πλεονέκτημα αυτής της διάταξης είναι ότι, η μηχανή δεν χρειάζεται να προσανατολίζεται προς τον άνεμο για να είναι αποδοτική, δηλαδή μπορεί να περιστρέφεται από τον άνεμο που έρχεται από κάθε κατεύθυνση ανά πάση στιγμή, οπότε δεν απαιτείται μηχανισμός προσανατολισμού. Το γεγονός αυτό δίνει πλεονέκτημα σε μέρη με μεγάλη μεταβλητότητα στην κατεύθυνση του ανέμου. Η ηλεκτρική γεννήτρια σε αυτές τις μηχανές μπορεί να τοποθετηθεί κοντά στο έδαφος, κάτι που συνεπάγεται μια απλή και οικονομική σχεδίαση για τον πύργο. Επίσης είναι συστήματα εύκολα προσβάσιμα και πολλές φορές δεν χρειάζεται πυλώνας στήριξης.

Υπάρχουν όμως και κάποια σοβαρά μειονεκτήματα που επηρεάζουν αρνητικά την λειτουργικότητα τέτοιου είδους ανεμογεννητριών. Το κυριότερο πρόβλημα είναι ότι πολλές φορές δεν είναι δυνατόν να ξεκινήσουν την περιστροφή τους χωρίς εξωτερική



παρέμβαση, λόγω της μεγάλης ροπής εκκίνησής τους. Επιπλέον, κατά την περιστροφή τους, υπάρχουν σημεία στα οποία η συνεισφορά του ανέμου είναι σχεδόν μηχανική.

Οι πιο γνωστοί τύπου ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα είναι οι εξής:

- Darrieus
- Giromill
- Savonius

#### 1.4.1 Darrieus

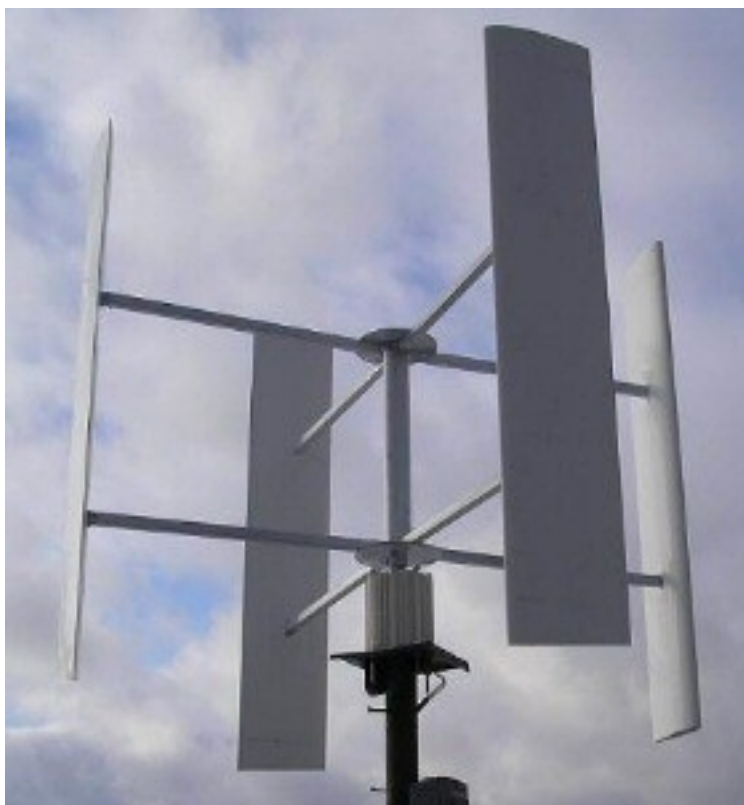
Η πρώτη ανεμογεννήτρια καθέτου άξονα ανακαλύφθηκε και σχεδιάστηκε από τον Γάλλο μηχανικό George Darrieus το 1931 στον Καναδά. Στον αρχικό σχεδιασμό υπήρχαν δύο καμπυλωτά πτερύγια συμμετρικά ως προς τον κάθετο άξονα. Έχει σχετικά χαμηλή ροπή εκκίνησης, αλλά δεν μπορεί να ξεκινήσει μόνη της όταν φυσάει ο άνεμος. Γι' αυτό συνήθως συνδυάζεται με μια μικρή ανεμογεννήτρια τύπου Savonius ώστε να αρχίσει να κινείται ή προστίθεται ένα τρίτο πτερύγιο ώστε να επιτευχθεί η αυτόνομη εκκίνησή του ή με εξωτερική διέγερση μέσω του ηλεκτρικού δικτύου όπου είναι συνδεδεμένη.



Σχήμα 1.5 Ανεμογεννήτρια Darrieus [5]

### 1.4.2 Giromill

Οι ανεμογεννήτριες τύπου Giromill ή H-rotor σχεδιάστηκαν επίσης από τον George Darrieus το 1927. Σε αυτές τις ανεμογεννήτριες καθέτου άξονα, ο τύπος πτερυγίων (egg beater) που χρησιμοποιείται στις κοινές Darrieus αντικαθίσταται με κατακόρυφα πτερύγια τα οποία συνδέονται με τον άξονα περιστροφής μέσω οριζόντιων στηρίξεων. Στην παρούσα διπλωματική θα αναλύσουμε διεξοδικά τη λειτουργία των ανεμογεννητριών Giromill.



Σχήμα 1.6 Ανεμογεννήτρια Giromill [5]

### 1.4.3 Savonius

Ο Φιλανδός μηχανικός Sigurd Savonius εφεύρε το συγκεκριμένο τύπο ανεμογεννητριών που έχει σαν χαρακτηριστικό το σιγμοειδή δρομέα το 1924. Η πατέντα του εισημοποιήθηκε το 1931. Οι συγκεκριμένες ανεμογεννήτριες δεν μπορούν να περιστρέφονται με ταχύτητα μεγαλύτερη από την ταχύτητα του ανέμου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, η αποδοτικότητά τους να είναι χαμηλότερη σε σχέση με τους άλλους τύπους ανεμογεννητριών και τελικά να μην επιλέγονται για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, αλλά σε διαδικασίες όπως άντληση νερού.(Βλ.Σχ.17)



Σχήμα 1.7 Ανεμογεννήτρια Savonius [4]

## 1.5 Ανεμογεννήτριες καθέτου άξονα στον αστικό ιστό

Στην σύγχρονη εποχή, έχουν αναπτυχθεί στον αστικό ιστό διάφορες μέθοδοι παραγωγής ενέργειας για την κάλυψη των οικιακών αναγκών. Πιο συγκεκριμένα, η κάλυψη φορτίου επιτυγχάνεται από τον συνδυασμό ανανεώσιμων και μη πηγών ενέργειας. Συνήθεις διατάξεις που έχουν παρατηρηθεί είναι ο συνδυασμός ηλιακής ενέργειας με πετρέλαιο (diesel), αιολικής ενέργειας με πετρέλαιο και συνδυασμός αιολικής, ηλιακής και χρήση κυψελών καυσίμου. Όμως, λόγω της αυξημένης ζήτησης ενέργειας, η οποία συμβάλει δραστικά στην αύξηση της μόλυνσης του περιβάλλοντος και στην εξάντληση των πηγών, η παγκόσμια ερευνητική κοινότητα έχει στραφεί στην ανάπτυξη αειφόρων συστημάτων παραγωγής ενέργειας. Η εφαρμογή μικρών διαστάσεων ανεμογεννητριών σε υψηλά κτήρια αποτελεί ένα από τα προαναφερθέντα συστήματα. Το συγκεκριμένο μοντέλο, αποτελεί έναν από τους πιο σύγχρονους και ελκυστικούς τρόπους παραγωγής ενέργειας.

Τα πλεονεκτήματα των ανεμογεννητριών καθέτου άξονα στις συγκεκριμένες διατάξεις, είναι ότι μπορούν να παράγουν ενέργεια, όντας τοποθετημένες σε χαμηλότερα ύψη σε σχέση με τις ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα. Επιπλέον, οι ανεμογεννήτριες καθέτου άξονα έχουν την δυνατότητα παραγωγής ενέργειας, αξιοποιώντας τον άνεμο από οποιαδήποτε κατεύθυνση. Τα δύο παραπάνω τεκμήρια, καθιστούν σαφές, ότι η τοποθέτηση τους σε οροφές κτηρίων είναι βιώσιμη.

Έτσι, η επιστημονική κοινότητα έχει στραφεί σε διατάξεις (βλ Σχ.1.8), η οποίες διαθέτουν ένα καινοτόμο κέλυφος που λειτουργεί σαν οδηγικά πτερύγια. Το συγκεκριμένο κέλυφος, περιβάλλει την ανεμογεννήτρια και σχεδιάστηκε για να βελτιώνει την αεροδυναμική της συμπεριφορά, αυξάνοντας την ταχύτητα του εισερχόμενου ανέμου και οδηγώντας τον πάνω στα πτερύγια με μια βέλτιστη γωνία κλίσης. Με αυτό τον τρόπο, αποφεύγεται ότι η αρνητική ροπή που παράγεται κατά την περιστροφή του δρομέα. Στον αστικό ιστό, έχει παρατηρηθεί ότι το αιολικό δυναμικό είναι αδύναμο και χαρακτηρίζεται από έντονη τύρβη λόγω της τραχύτητας του εδάφους και της αλληλεπίδρασης του ανέμου με τα κτήρια. Συνθήκες οι οποίες είναι ακατάλληλες για την βέλτιστη λειτουργία συμβατικών ανεμογεννητριών. Η προσθήκη του παραπάνω κελύφους αντιμετωπίζει σε ένα μεγάλο βαθμό το πρόβλημα του αποδυναμωμένου αιολικού δυναμικού. Τέλος, η προσαρμογή του κελύφους στην ανεμογεννήτρια καθέτου άξονα επιτυγχάνει μείωση ακουστικών εκπομπών, οποίες αποτελούν μείζον πρόβλημα στον αστικό ιστό.



Σχήμα 1.8 Ανεμογεννήτρια καθέτου άξονα προσαρμοσμένη στην κορυφή κτηρίου [14]

Ακόμα ένας λόγος όπου οι διατάξεις αυτές δεν είναι ευρέως διαδεδομένες είναι η ανησυχία της κοινής γνώμης, για το αντίκτυπο που θα έχει στην αρχιτεκτονική των κτηρίων. Πιο συγκεκριμένα, οι διατάξεις αυτές θα πρέπει να φαίνονται σαν ένα ενιαίο σύνολο με το υπόλοιπο κτήριο όπως καταδεικνύει το Σχήμα 1.8.

## 1.6 Σύγκριση ανεμογεννητριών καθέτου και οριζοντίου άξονα

Σε αυτό το σημείο κρίναμε απαραίτητο να σας παραθέσουμε τις διαφορές ανάμεσα στις ανεμογεννήτριες καθέτου και οριζοντίου άξονα. Πέρα από τις βασικές σχεδιαστικές τους διαφορές, υπάρχουν και άλλες που εντοπίζονται στα σημεία λειτουργίας των δυο διαφορετικών τύπων.

Σε αυτό το σημείο θα ορίσουμε τις ανεμογεννήτριες καθέτου άξονα ως Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) και τις ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα ως Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT).

Κύριες διαφορές μεταξύ καθέτου και οριζοντίου άξονα ανεμογεννήτριες:

- Οι HAWT για να είναι αποδοτικές απαιτούν μηχανισμό προσανατολισμού στην διεύθυνση του ανέμου σε αντίθεση με τις VAWT που εκμεταλλεύονται τον άνεμο σε οποιαδήποτε διεύθυνση.
- Οι VAWT επισκευάζονται πιο εύκολα από τις HAWT επειδή το σύστημα μετατροπής είναι πιο εύκολα προσβάσιμο καθώς βρίσκεται στο έδαφος.
- Οι VAWT είναι ασφαλέστερες καθώς δεν υπάρχει ο κίνδυνος να σπάσει κάποιο πτερύγιο σε αντίθεση με τις HAWT όπου όταν η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει μια τιμή (Vcut out) για λόγους ασφαλείας ενδείκνυται η διακοπή λειτουργίας της εγκατάστασης και η ενέργεια ανέμου παραμένει τελείως αναξιοποίητη.
- Οι VAWT έχουν χαμηλότερη απόδοση από τις HAWT και χρειάζονται μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου για να υπερνικηθούν οι αδρανειακές δυνάμεις και ξεκινήσει η περιστροφή τους.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΑΝΕΜΟΥ

### 2.1 Αεροδυναμικό μέρος

Παρακάτω παραθέτουμε τον πίνακα με τα βασικά μεγέθη που θα χρησιμοποιήσουμε στο κεφάλαιο 2.

Πίνακας 2.1 Βασικά μεγέθη

α/α	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΣΥΜΒΟΛΟ	ΜΟΝΑΔΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ
1	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΕΜΟΥ	$V_{air}$	[m/s]
2	ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ	$\omega$	[1/sec]
3	ΑΚΤΙΝΑ	r	[m]
4	ΕΝΕΡΓΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ	A	[m <sup>2</sup> ]
5	ΛΟΓΟΣ ΑΚΡΟΠΤΕΡΥΓΙΟΥ/ ΤΙΡ SPEED RATIO (TSP)	$\lambda$	-
6	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ	$C_p$	-
7	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ	$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]
8	ΙΣΧΥΣ ΑΝΕΜΟΥ	$P_{air}$	[W]
9	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	T	[K]
10	ΠΙΕΣΗ	P	[Pa]
11	ΔΥΝΑΜΗ	F	[N]
12	ΡΟΠΗ	M	[Nm]
13	ΑΚΤΙΝΑ ΡΟΤΟΡΑ	R	[m]

### 2.1.1 Ισχύς ανέμου

Ανεξάρτητα από το είδος της ανεμογεννήτριας, ο βασικός της στόχος είναι να δεσμεύσει όσο το δυνατό περισσότερη ενέργεια ανέμου. Η κινητική ενέργεια του ανέμου περνώντας διαμέσου της ανεμογεννήτριας μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια και στην συνέχεια σε ηλεκτρική με την βοήθεια της γεννήτριας. Για να ορίσουμε το διαθέσιμο ποσό της ενέργειας του ανέμου, ορίζουμε τις παρακάτω βασικές σχέσεις.

Ως κινητική ενέργεια ανέμου ορίζεται :

$$E_k = \frac{1}{2} m V^2 \quad (2.1)$$

$$\dot{m} = \rho A V \quad (2.2)$$

Αν συνδυάσουμε τις εξισώσεις (2.1) και (2.2) καταλήγουμε στην ιδεατή εξίσωση παραγωγής ισχύος της ανεμογεννήτριας του ανέμου:

$$P_{air} = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (2.3)$$

Όπου  $A = \pi r^2$

### 2.1.2 Συντελεστής ισχύος

Στην πραγματικότητα η ισχύς που δίνεται από την εξίσωση (2.3) είναι η θεωρητική και δεν είναι δυνατό καμία ανεμογεννήτρια ανεξάρτητα του σχεδιασμού της να εκμεταλλευτεί αυτή την ποσότητα στο έπακρο λόγω της ύπαρξης του συντελεστή ισχύος. Το αδιάστατο μέγεθος που αντιπροσωπεύει το κλάσμα της ισχύος του ανέμου που δεσμεύεται από την ανεμογεννήτρια και χαρακτηρίζει την απόδοση αυτής. Έτσι εξάγεται ο παρακάτω τύπος που αναφέρεται στον συντελεστή ισχύος :

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A V^3} \quad (2.4)$$



### 2.1.3 Όριο Betz

Ένας από τους βασικότερους νόμους που διέπουν την λειτουργία των ανεμογεννητριών είναι η θεωρία που αναπτύχθηκε από τον Γερμανό Φυσικό Albert Betz και δημοσιεύτηκε το 1919. Η παραπάνω θεωρία αναφέρει η μέγιστη ενέργεια που μπορεί να δεσμεύσει από τον άνεμο οποιοσδήποτε τύπος ανεμογεννήτριας είναι  $C_p = 16/27 = 59\%$  της ενέργειας του ανέμου. Στην πραγματικότητα όμως ο αριθμός αυτός θα είναι ακόμη μικρότερος λόγω φαινομένων συνεκτικότητας, πεπερασμένου αριθμού πτερυγίων καθώς και υπάρχουσας συστροφής ρεύματος του αέρα πίσω από τον δρομέα το οποίο αποτελεί απώλεια ενέργειας λόγω μη μετατροπής σε πίεση.

### 2.1.4 Λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου

Μία ακόμη σπουδαία παράμετρος που αφορά την παραγόμενη ισχύ των ανεμογεννητριών είναι ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου που ορίζεται ως ο λόγος της περιστροφικής ταχύτητας των ακροπτερυγίων προς την ταχύτητα του ανέμου. Ουσιαστικά αυτός ο τύπος συσχετίζει το πόσο γρήγορα περιστρέφεται η ανεμογεννήτρια σε σχέση με την ταχύτητα του ανέμου. Ο τύπος του ακροπτερυγίου δίνεται από την παρακάτω σχέση :

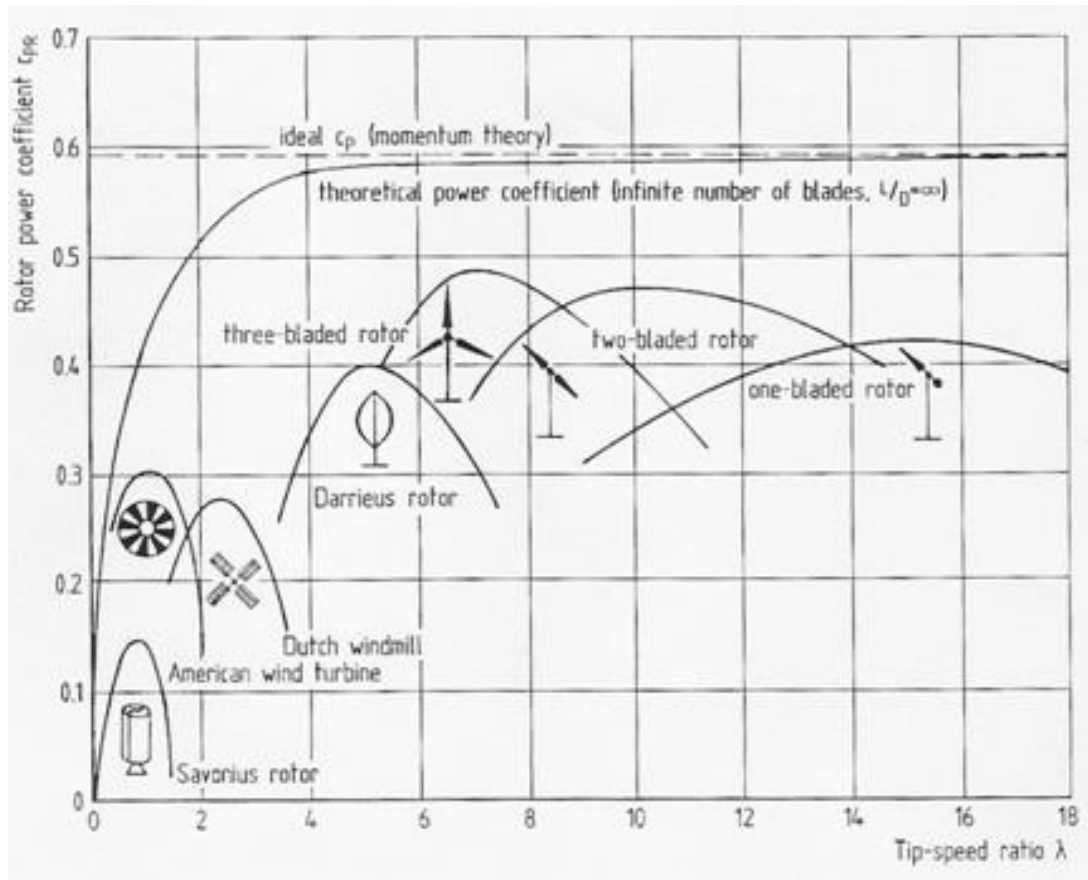
$$\lambda = \frac{\omega r}{V} \quad (2.5)$$

Αν ο ρότορας περιστρέφεται με πολύ μικρή ταχύτητα επιτρέπει μεγάλη ποσότητα αέρα να περνάει ανεπηρέαστη και έτσι δεν επιτρέπει την δέσμευση της μέγιστης ισχύος από το ρότορα μέσα στα όρια του ορίου του Betz. Από την άλλη πλευρά αν ο ρότορας περιστρέφεται με πολύ μεγάλες ταχύτητες δημιουργεί μεγάλη αντίσταση.

Η τιμή του λόγου ακροπτερυγίου εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως ο αριθμός των πτερυγίων, ο τύπος της ανεμογεννήτριας και το είδος των αεροτομών.

### 2.1.5 Διάγραμμα $C_p - \lambda$

Το βασικότερο διάγραμμα που χαρακτηρίζει την συμπεριφορά μιας ανεμογεννήτριας είναι το διάγραμμα καμπύλης ισχύος. Στην τεταγμένη του διαγράμματος βρίσκεται η παράμετρος του συντελεστή ισχύος  $C_p$  ενώ στην τετμημένη η παράμετρος της ταχύτητας ακροπτερυγίου  $\lambda$ .



Σχήμα 2.1 Συγκριτικό διάγραμμα  $C_p$ - $\lambda$  διαφόρων τύπων Α/Γ

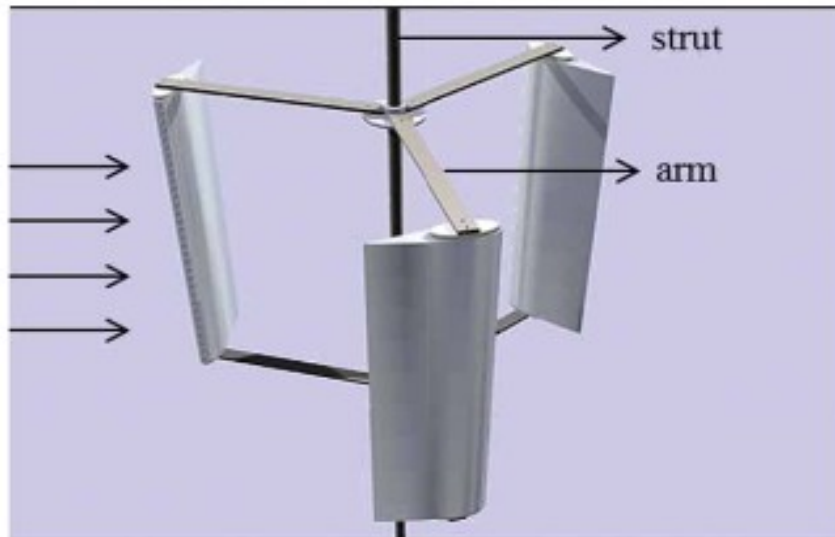
Το παραπάνω διάγραμμα απεικονίζει τις καμπύλες ισχύος για διάφορους τύπους ανεμογεννητριών και εξήχθη για δεδομένη ταχύτητα αέρα.

### ΒΑΣΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ ΤΟΥ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

- Είναι εύκολο να παρατηρηθεί ότι οι ανεμογεννήτριες καθέτου άξονα έχουν μικρότερο συντελεστή ισχύος σε σχέση με τις ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα.
- Οι VAWT φτάνουν σε μικρότερες περιστροφικές ταχύτητες σε σχέση με τις HAWT.
- Κάθε καμπύλη ανεξάρτητα από τον τύπο ανεμογεννήτριες έχει ένα βέλτιστο λόγο ακροπτερυγίο  $\lambda^*$  για το οποίο ο συντελεστής ισχύος μεγιστοποιείται.

## 2.2 Αεροδυναμική H-rotor ανεμογεννήτριας καθέτου άξονα

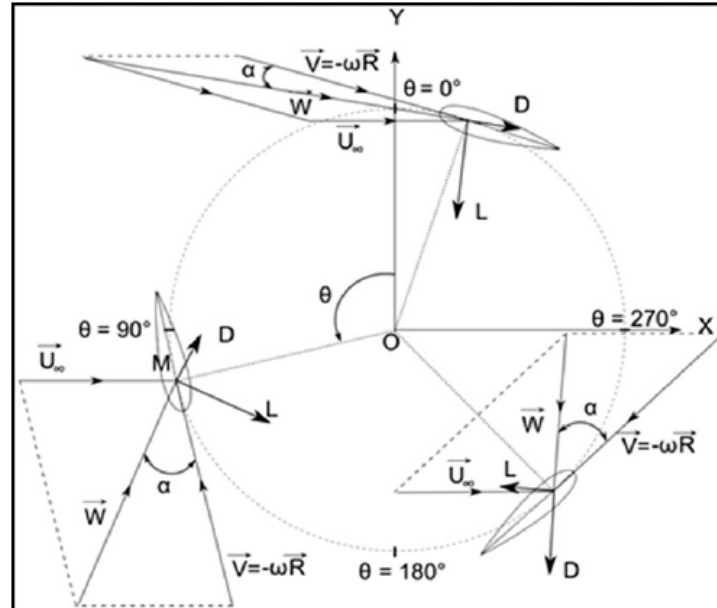
Μια τυπική H-rotor ανεμογεννήτρια καθέτου άξονα παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.2 Ανεμογεννήτρια H-Rotor

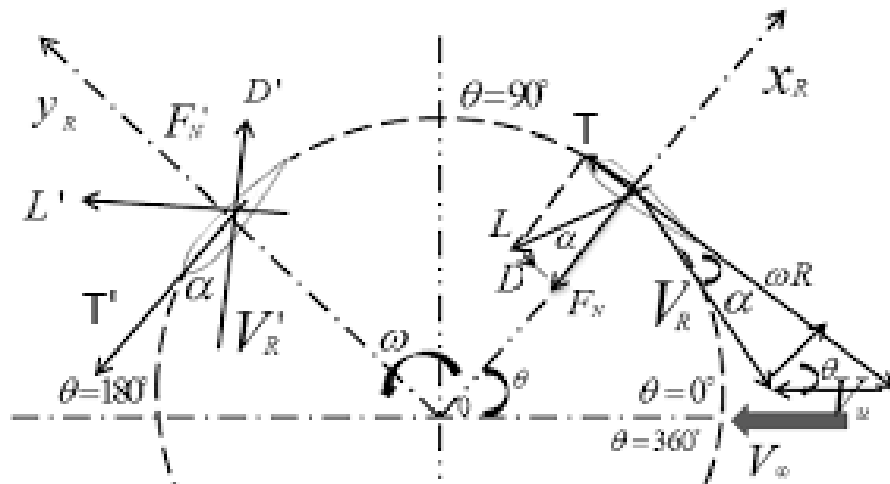
Αποτελείται από τον κάθετο άξονα περιστροφής, τους βραχίονες στήριξης και τα πτερύγια τα οποία στηρίζονται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε ο άξονας τους να είναι παράλληλος στον άξονα περιστροφής.

Παρά την απλότητα της κατασκευής, η αεροδυναμική ανάλυση είναι αρκετά περίπλοκη. Ένα χαρακτηριστικό το οποίο συμβάλλει στην πολυπλοκότητα της ανάλυσης είναι, ότι οι σχετικές ταχύτητες οι οποίες γίνονται αντιληπτές από το πτερύγιο αλλάζουν συνεχώς καθώς το πτερύγιο κινείται σε διαφορετικές αζιμουθιακές θέσεις.



Σχήμα 2.3 Τρίγωνα ταχύτητας Darrieus [6]

Το παραπάνω σχήμα (βλ. Σχήμα 2.3) απεικονίζει την τυπική ταχύτητα ροής γύρω από ένα περιστρεφόμενο πτερύγιο, ανεμογεννήτριας καθέτου άξονα, για δεδομένη γωνία αζιμούθιου καθώς και οι αεροδυναμικές δυνάμεις που αντιλαμβάνεται το πτερύγιο. Η γωνία αζιμούθιου έχει οριστεί να είναι μηδέν όταν το πτερύγιο βρίσκεται στην κορυφή του νοητού κύκλου που διαγράφει σε μια πλήρη περιστροφή. Έστω ότι εξετάζουμε το πτερύγιο το οποίο βρίσκεται στη θέση  $\theta = 90^\circ$ . Ο δρομέας περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα  $\omega$ , οπότε  $\omega R$  είναι η περιφερειακή ταχύτητα του πτερυγίου  $u$ , ενώ  $V$  είναι η ταχύτητα του ανέμου. Ο άνεμος προσπίπτει στην αεροτομή με γωνία πρόσπτωσης  $\alpha$  και σχετική ταχύτητα  $W$  και αναπτύσσεται η δύναμη άνωσης  $L$  η οποία είναι κάθετη στην σχετική ταχύτητα του ανέμου. Η δύναμη άνωσης δημιουργεί μια σημαντική συνιστώσα  $T$  κατά την εφαπτομένη του τόξου που διαγράφει το πτερύγιο (βλ. Σχήμα 2.4)



Σχήμα 2.4 Τρίγωνο ταχυτήτων - Διεύθυνση δυνάμεων

Η  $T$  έχει τη φορά της περιστροφής, επομένως παράγει έργο. Αντίστοιχη συνιστώσα αναπτύσσεται από την αεροδυναμική αντίσταση  $D$  και αφαιρείται από την συνιστώσα  $T$ . Σε αυτό το σημείο πρέπει να επισημανθεί ότι η ροπή  $T$  που δημιουργείται δεν παραμένει σταθερή, αλλά μεταβάλλεται σε κάθε διαφορετική γωνία  $\theta$  στην οποία βρίσκεται το πτερύγιο. Υπάρχουν δε και θέσεις του πτερυγίου για τις οποίες η ροπή είναι αρνητική, έχει όμως αποδειχθεί ότι η μέση ροπή σε μια πλήρη περιστροφή και σε ένα ευρύ πεδίο ταχυτήτων είναι θετική με αποτέλεσμα να έχουμε σημαντική απορρόφηση ισχύος από τον άνεμο[7].

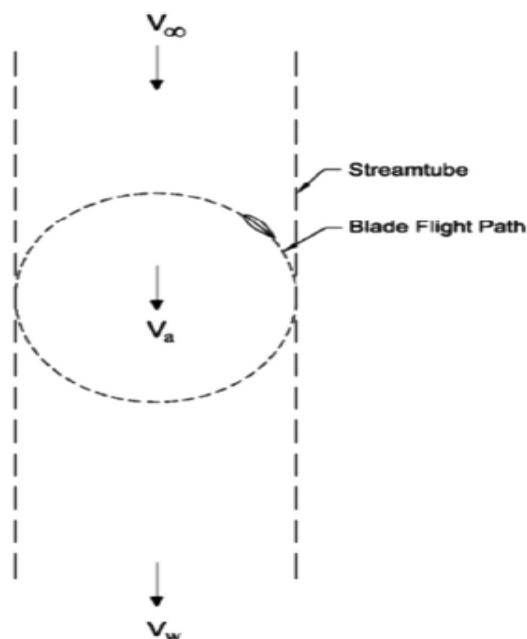
### 2.3 Θεωρητικές μέθοδοι υπολογισμού της απόδοσης του δρομέα

Κατά τον υπολογισμό της απόδοσης του δρομέα παρουσιάζονται συγκεκριμένες δυσχέρειες. Αρχικά η γωνία πρόπτωσης του ανέμου στο πτερύγιο δεν είναι σταθερή, είναι έντονα χρονικά μεταβαλλόμενη και η τιμές της κυμαίνονται μεταξύ δυο ακραίων τιμών ( $-\alpha_{max}$  έως  $+\alpha_{max}$ ). Επιπλέον, σε αντίθεση με τις ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα, το πεδίο ροής στις ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα είναι τρισδιάστατο.

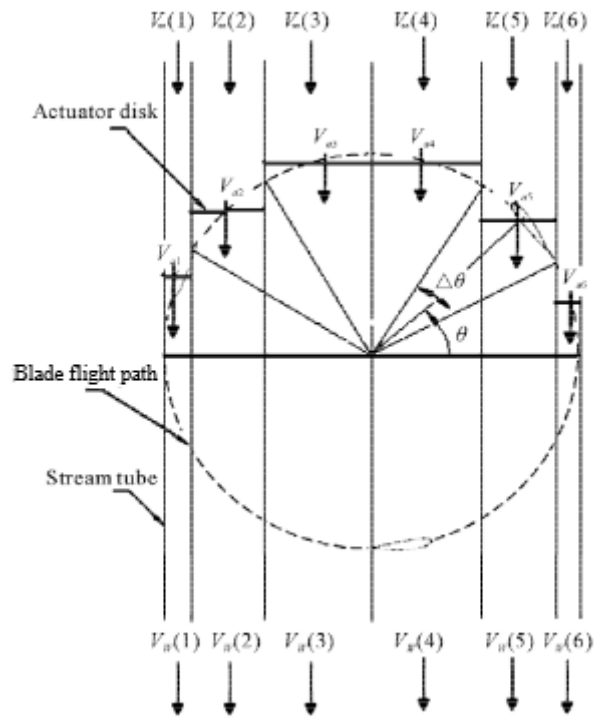
Έχει ήδη αναφερθεί ότι ο συντελεστής ισχύος δίνεται από την σχέση (2.4) και ισχύει για όλους τους τύπους ανεμοκινητήρων. Η μόνη διαφορά είναι ότι η επιφάνεια σάρωσης μιας ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα είναι κυκλική, ενώ μιας Darrius είναι ορθογωνική.

Για τον υπολογισμό της ροπής και της ισχύος και της ροπής του δρομέα, είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε την ταχύτητα του ανέμου σε κάθε σημείο στο οποίο βρίσκεται το πτερύγιο κατά την διάρκεια της περιστροφής του, κάτι το οποίο είναι ιδιαίτερα δύσκολο. Για αυτό το λόγο έχουν προταθεί και υπάρχουν δημοσιευμένες στην διεθνή επιστημονική κοινότητα, θεωρητικές μέθοδοι οι οποίες στηρίζονται στον συνδυασμό του θεωρήματος ορμής και της εξίσωσης που προκύπτει από την θεώρηση των δυνάμεων που ασκούνται στο πτερύγιο και της αεροδυναμικής θεωρίας.

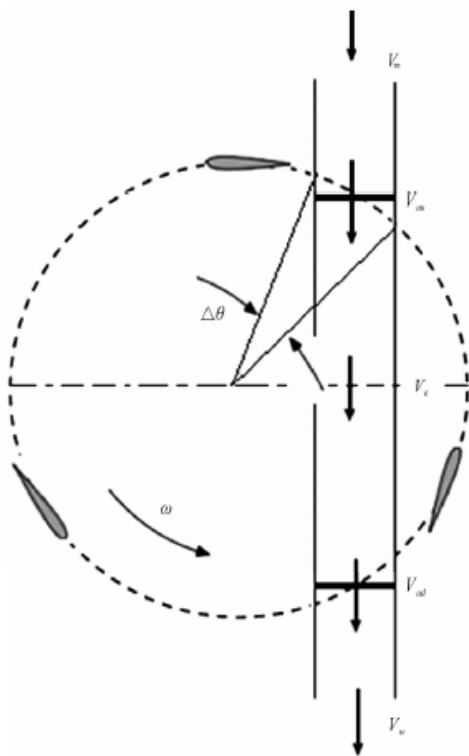
Η πιο γνωστές θεωρητικές μέθοδοι υπολογισμού της ισχύος και της ροπής του δρομέα, σύμφωνα με την βιβλιογραφία [8],[9],[10], είναι η θεωρία ενός σωλήνα ροής (Single Streamtube theory),(βλ. Σχ.2.5) κατά την οποία υπολογίζεται μια μέση ταχύτητα ανέμου σε όλη την περιοχή του δρομέα . η θεωρία πολλαπλών σωλήνων ροής (MST- Multiple Streamtube Theory),(βλ.Σχ.2.6) η οποία είναι μια εξελιγμένη μορφή αφού διαφοροποιεί την ταχύτητα του ανέμου κατά την κατακόρυφη κατεύθυνση υπολογίζοντας μέση ταχύτητα του ανέμου σε κάθε του θέση του πτερυγίου και η DMS ( Double Multiple Streamtube Model),(βλ.Σχ.2.7) κατά την οποία η επιφάνεια σάρωσης των πτερυγίων χωρίζεται σε δύο ημισφαίρια στα οποία υπάρχει ο πάνω σωλήνας ροής και ο κάτω και ο υπολογισμός των ταχυτήτων βασίζεται στους δύο παράλληλους δίσκους ενέργειας.



Σχήμα 2.5 Single Streamtube Theory [10]



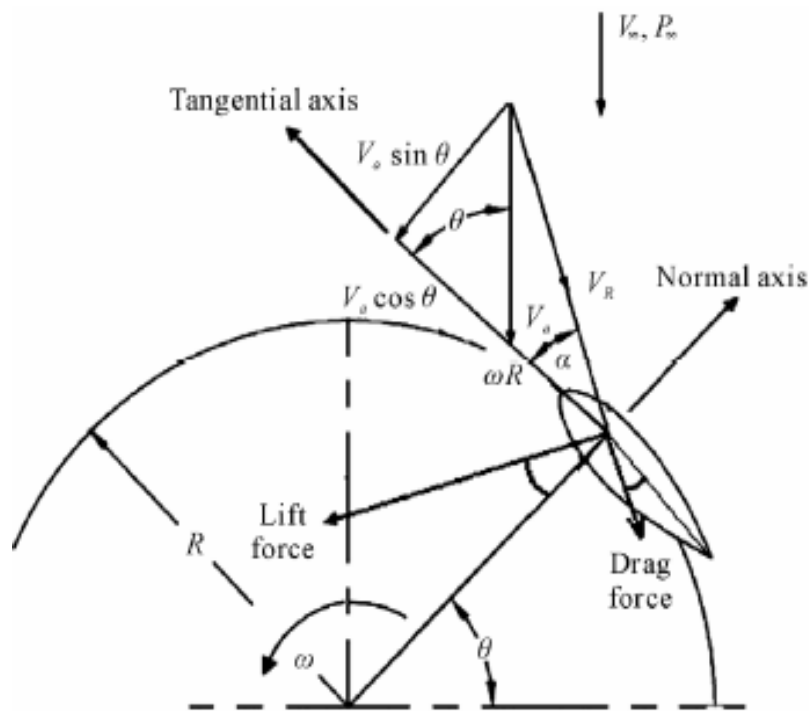
Σχήμα 2.6 Multiple Streamtube Model [9]



Σχήμα 2.7 Double-multiple Streamtube Model [9]

### 2.3.1 Θεωρία Πολλαπλών Σωλήνων Ροής (Multiple-streamtube theory)

Η ταχύτητα του ανέμου πολύ πριν τον δρομέα είναι  $V$ , κατά την αλληλεπίδραση του ανέμου με τον δρομέα ( στο επάνω τμήμα) η ταχύτητα του ανέμου γίνεται  $(1-a)V$ , όπου  $a$  είναι ο συντελεστής αξονικής επαγωγής και εκφράζει την ποσοστιαία επιβράδυνση της ταχύτητας του ανέμου όταν αυτός συναντά τον δρομέα, ενώ η ταχύτητα μετά τον δρομέα (κάτω τμήμα) γίνεται  $(1-2a)V$ . Είναι αντιληπτό ότι το ρεύμα του αέρα θα υποστεί επιβράδυνση κατά  $2aV$ . Στο παραπάνω σχήμα (βλ. Σχ. 2.6) φαίνεται πως ο δρομέας χωρίζεται σε πολλούς σωλήνες κατά την διεύθυνση πνοής του ρεύματος αέρα. Η γωνία  $\Delta\theta$  [8] είναι σταθερή για όλους τους σωλήνες ροής.



Σχήμα 2.8 Διάγραμμα ταχυτήτων και δυνάμεων πτερυγίου [9]

Παρατηρώντας το Σχήμα 2.8 έχουμε:

$$V_R = \sqrt{(V_a \sin \theta)^2 + (V_a \cos \theta + \omega R)^2} \quad (2.6)$$

όπου  $V_a$  είναι η ταχύτητα λόγω αλληλεπίδρασης με τον ρότορα,  $\omega$  είναι η περιστροφική ταχύτητα,  $R$  είναι η ακτίνα της ανεμογεννήτριας και  $\theta$  η γωνία αζιμούθιου. Εάν διαιρέσουμε την (2.6) με την ταχύτητα του ανέμου πριν συναντήσει τον ρότορα έχουμε:



$$\frac{V_R}{V} = \sqrt{((1-a)\sin\theta)^2 + ((1-a)\cos\theta + \lambda)^2} \quad (2.7)$$

όπου  $a$  είναι ο συντελεστής αξονικής επαγωγής. Επιπλέον από Σχήμα 2.8 μπορεί να οριστεί και η γωνία πρόσπτωσης του ανέμου η οποία είναι:

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{(1-a)\sin\theta}{(1-a)\cos\theta + \lambda} \right) \quad (2.8)$$

Σε αυτό το σημείο θα οριστούν οι  $C_N$  και  $C_T$

$$C_N = C_L \cos\alpha + C_D \sin\alpha \quad (2.9)$$

$$C_T = C_L \sin\alpha - C_D \cos\alpha \quad (2.10)$$

όπου  $C_L$  και  $C_D$  οι συντελεστές άνωσης και αντίστασης αντίστοιχα, για γωνία πρόσπτωσης  $\alpha$ .

Η στιγμιαία ώση ( $T_i$ ) που αναπτύσσεται σε μια αεροτομή σε ορισμένη γωνία αζιμούθιου  $\theta$  είναι:

$$T_i = \frac{1}{2} \rho V_R^2 (hc) (C_T \cos\theta - C_N \sin\theta) \quad (2.11)$$

όπου  $h$  είναι το ύψος του πτερυγίου και  $c$  η χορδή του. Η στιγμιαία ροπή  $Q_i$  που ασκείται σε μια αεροτομή σε ορισμένη γωνία  $\theta$  είναι:

$$Q_i = \frac{1}{2} \rho V_R^2 (hc) C_T R \quad (2.12)$$

Όμως το κάθε πτερύγιο περνά από κάθε ροϊκό σωλήνα δύο φορές σε μια πλήρη περιστροφή(βλ.Σχ.2.6). Η μέση χρονικά αναπτυσσόμενη ώση από  $N$  πτερύγια τελικά ορίζεται:

$$T_a = N * T_i * \frac{\Delta\theta}{\pi} * 2 \quad (2.13)$$

Η μέση αεροδυναμική ώση χαρακτηρίζεται από τον αδιάστατο συντελεστή ώσης :

$$C_T = \frac{T_a}{\frac{1}{2} \rho V^2 (hR\Delta\theta \sin\theta)} = \left( \frac{NC}{2R} \right) \left( \frac{V_R}{V} \right)^2 \frac{2}{\pi} \left( C_T \frac{\cos\theta}{\sin\theta} - C_N \right) \quad (2.14)$$

Επιπλέον, η μέση ροπή  $Q_a$  του δρομέα από  $N$  πτερύγια σε μια πλήρη περιστροφή ορίζεται:

$$Q_a = N * \sum_{i=1}^{2m} \frac{\left[ \frac{1}{2} \rho V_R^2 (hc) C_{TR} \right]}{2m} \quad (2.15)$$

όπου m είναι ο αριθμός των σωλήνων ροής και 2m ο αριθμός των Δθ.

Ο συντελεστής ροπής δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$C_Q = \frac{Q_a}{\frac{1}{2} \rho V^2 (Dh) R} \quad (2.16)$$

όπου D η διάμετρος της ανεμογεννήτριας. Τελικά ο συντελεστής ισχύος είναι:

$$C_P = \lambda C_Q \quad (2.17)$$

### 2.3.2 Double Multiple Streamtube Model (DMS)

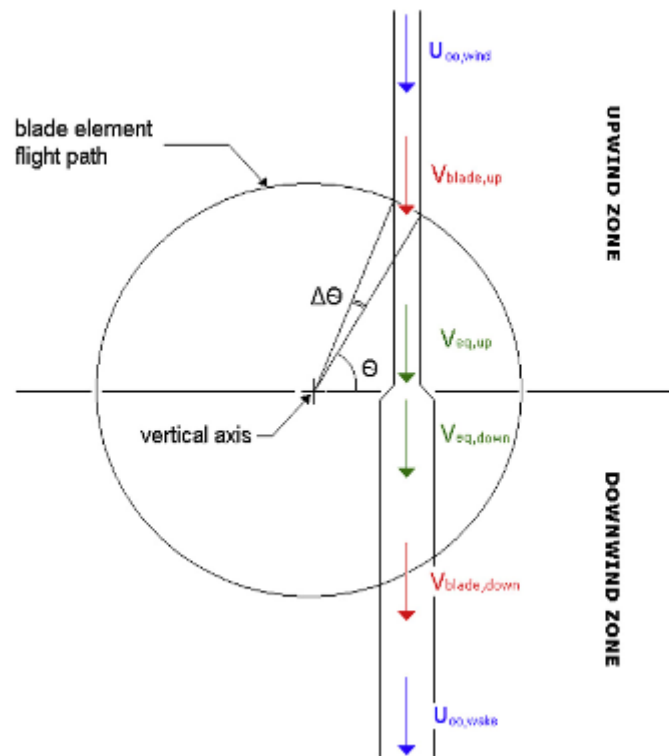
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στην DMS ανάλυση ο δρομέας θεωρείται σαν δύο παράλληλοι δίσκοι ενέργειας (βλ. Σχ.2.7), ο ένας αναπαριστά το ανάντι και ο άλλος το κατάντι τμήμα του ρότοτρα τα οποία είναι τοποθετημένα μέσα σε πολλαπλούς σωλήνες ροής και υποβάλλονται σε αεροδυναμικές δυνάμεις [11]. Η ταχύτητα του ανέμου χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της γωνίας πρόσπτωσης και των δυνάμεων που ασκούνται στα πτερύγια. Η θεωρία BEM (blade element momentum) επιβάλλει την εξίσωση των δυνάμεων του ρεύματος πάνω στην αεροτομή με την αλλαγή της ορμής του ρευστού. Αυτό επιτρέπει την εκτίμηση του συντελεστή επαγωγής a, ο οποίος ορίζεται για το επάνω τμήμα ως:

$$a = 1 - \frac{V_{blade,up}}{V} \quad (2.18)$$

και για το κάτω τμήμα είναι:

$$a = 1 - \frac{V_{blade,down}}{V_{eq,down}} \quad (2.19)$$

όπου  $V_{blade,up}$  και  $V_{blade,down}$  είναι η ταχύτητα του ανέμου στα αντίστοιχα τμήματα. Επιπλέον, V είναι η ανεπηρέαστη ταχύτητα του ανέμου η οποία επιτρέπει τον υπολογισμό της επιβραδυνόμενης ταχύτητας του δρομέα στο μεσαίο τμήμα πριν και μετά την διόρθωση επέκτασης του ροϊκού σωλήνα  $V_{eq,up}$  και  $V_{eq,down}$  (βλ. Σχ.2.8).



Σχήμα 2.8 Ταχύτητα ροής για την DMS με διόρθωση επέκτασης του ροϊκού σωλήνα [9]

Έτσι η μέση παραγόμενη ισχύς του ρότορα, η οποία προκύπτει από την λύση της εξίσωσης της ορμής του ρεύματος και υπολογίζεται ως εξής:

$$P_{out} = \omega \frac{N}{N_{\theta}} \sum_1^{N_{\theta}} \sum_1^{N_v} \frac{1}{2} \rho r C_T \frac{c \Delta h}{\sin \beta} W^2 \quad (2.20)$$

όπου  $\omega$  είναι η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα,  $N$  ο αριθμός των πτερυγίων,  $N_{\theta}$  και  $N_v$  ο αριθμός των οριζόντιων και των κάθετων υποδιαίρέσεων του πλέγματος αντίστοιχα,  $\rho$  η πυκνότητα του αέρα,  $r$  η ακτίνα του ρότορα,  $C_T$  ο συντελεστής ώσης,  $c$  η χορδή της αεροτομής,  $\Delta h$  το ύψος κάθε στοιχειώδους ροϊκού σωλήνα,  $\beta$  η γωνία του πτερυγίου με το οριζόντιο επίπεδο και  $W$  η σχετική ταχύτητα.

Τελικά, ο συντελεστής ισχύος του ρότορα μπορεί να εκτιμηθεί από την εξίσωση (2.4)

Η παραπάνω μέθοδος χρησιμοποιείται από το πρόγραμμα Qblade, για την πρόβλεψη της αεροδυναμικής συμπεριφοράς των αεροτομών, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στο ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 της παρούσας διπλωματικής εργασίας.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΚΑΘΕΤΟΥ ΑΞΟΝΑ ΜΕ ΚΕΛΥΦΟΣ

### 3.1 Εισαγωγή

Στον τομέα μηχανικής των ρευστών συχνά παρατηρείται η διεξαγωγή πειραματικών διαδικασιών καθώς από την φύση τους τα ρευστά παρουσιάζουν μια χαοτική συμπεριφορά. Η χαοτική αυτή συμπεριφορά προβλέπεται και μελετάται μέσω της υπολογιστικής ρευστομηχανικής αλλά πολλές φορές δεν αρκεί για να εξάγουμε ασφαλή συμπεράσματα. Υπό αυτό το πρίσμα, οι πειραματικές διαδικασίες εξασφαλίζουν αξιοπιστία αποτελέσματος καθώς το πείραμα πραγματοποιείται σε πραγματικές συνθήκες και όχι σε εικονικές. Η ευελιξία που προσφέρει η διεξαγωγή του πειράματος όσο αναφορά τις συνθήκες που θα επικρατούν σε αυτό, οδηγεί σε μικρότερη αβεβαιότητα για το τελικό αποτέλεσμα καθώς και ποικιλία αποτελεσμάτων.

Η ύπαρξη αεροδυναμικής σήραγγας στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας και πιο συγκεκριμένα στο εργαστήριο «ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΩΝ ΚΑΙ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ», σε συνδυασμό με την ύπαρξη της ανεμογεννήτριας τύπου «H-rotor Darrieus» ήταν η αφορμή για την διεκπεραίωση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας. Η πειραματική διαδικασία ξεκίνησε και τελείωσε στο εργαστήριο «ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΩΝ ΚΑΙ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ».

### 3.2 Εισαγωγή στο πείραμα

Ξεκινώντας την περιγραφή του πειράματος, παρατίθενται οι συνθήκες κάτω από τις οποίες διεξήχθη το πείραμα. Η θερμοκρασία του εργαστηρίου ήταν σταθερή και ίση με 22°C ενώ η πυκνότητα αέρα ήταν  $\rho=1.07 \frac{kg}{m^3}$ . Τα δύο μεγέθη αυτά υπολογίζονταν από τον πίνακα ελέγχου της αεροδυναμικής σήραγγας και πιο συγκεκριμένα από την καρτέλα «ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ».

### 3.2.1 Πειραματική Διάταξη

Σκοπός του συγκεκριμένου υποκεφαλαίου είναι να παρουσιαστεί με σαφήνεια η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή του πειράματος. Αρχικά θα ήταν χρήσιμο να αναφέρουμε ότι η κλίμακα της πειραματικής ανεμογεννήτριας είναι 25% σε σχέση με την πρωτότυπη. Τα πειραματικά μοντέλα στο επιστημονικό φάσμα της ρευστομηχανικής επιλέγονται να σχεδιάζονται μικρότερα ακλουθώντας τους νόμους και τις αρχές ομοιότητας που διέπουν τον κόσμο των ανεμογεννητριών. Παρακάτω παραθέτουμε μια φωτογραφία ολόκληρης της πειραματικής διάταξης.



Σχήμα 3.1 Πειραματική διάταξη Α/Γ

#### 3.2.1.1 Μεταλλικό πλαίσιο

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από μεταλλικό πλαίσιο που στην βάση του υπάρχουν ροδάκια ώστε να επιτυγχάνεται η εύκολη μετακίνηση του. Πιο συγκεκριμένα, το πλαίσιο αποτελείται από τέσσερις κάθετες δοκούς οι οποίες καταλήγουν στον μηχανισμό κύλισης που προαναφέρθηκε και αποτελούν την στήριξη της διάταξης στο έδαφος. Οι διαστάσεις του μεταλλικού πλαισίου είναι

1.76x1x1 [m] (μήκος-πλάτος-ύψος) ενώ το υλικό του είναι ανοδιωμένο αλουμίνιο 6063 τετραγωνικής διατομής.

### 3.2.1.2 Δρομέας ανεμογεννήτριας

Ο δρομέας της ανεμογεννήτριας είναι φτιαγμένος από χάλυβα . Έχει διάμετρο 24 χιλιοστά, μήκος 1.1 m ενώ το βάρος του άξονα βρέθηκε 4 κιλά . Η βάση και η κορυφή της ράβδου έχουν υποστεί κατεργασία σε μηχανουργείο ώστε να μειωθεί η διάμετρος στα σημεία αυτά. Η μείωση της διαμέτρου στα δυο άκρα του άξονα διευκολύνει την ομαλή και εύκολη εξαγωγή της από το πλαίσιο καθώς και την τοποθέτηση των εδράνων κύλισης σε αυτά τα σημεία . Ακόμα , πάνω στον άξονα είναι τοποθετημένοι δυο κυλινδρικού τύπου προσαρμογείς πάνω στους οποίους εδράζονται οι βραχίονες των πτερυγίων. Οι προσαρμογείς έχουν διάμετρο 100 χιλιοστά και πάχος 33 χιλιοστά. Οι βραχίονες των πτερυγίων εδράζονται σε κυκλικές οπές οι οποίες έχουν δημιουργηθεί πάνω στους προσαρμογείς.

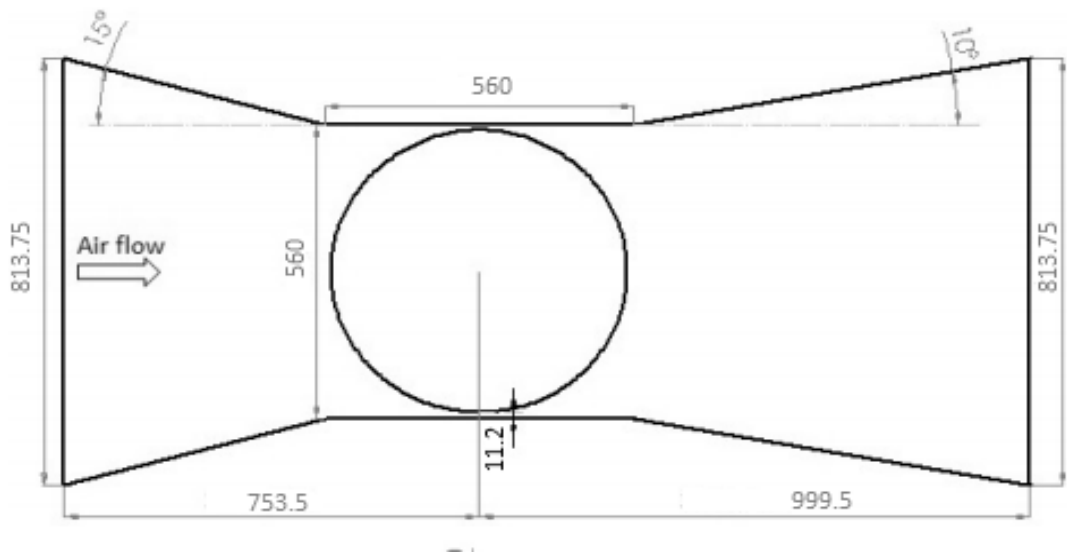
### 3.2.1.3 Πτερύγια ανεμογεννήτριας

Τα πτερύγια της ανεμογεννήτρια έχουν κατασκευαστεί από ξύλο ενώ ανήκουν στην οικογένεια των NACA αεροτομών και πιο συγκεκριμένα είναι της σειρά 0015 . Η χορδή των αεροτομών είναι 7 χιλιοστά και το ύψος τους είναι 500 χιλιοστά. Η ανεμογεννήτρια διαθέτει τρία πτερύγια με μηδενική κλίση ως προς τον κατακόρυφο άξονα.

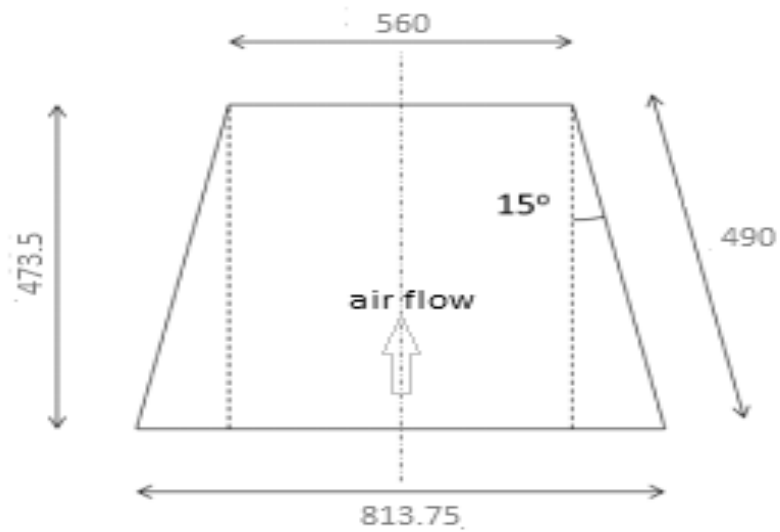
### 3.2.1.4 Κέλυφος (shroud)

Το κέλυφος της ανεμογεννήτριας έχει την γεωμετρία ενός συγκλίνων-αποκλίνων τμήματος. Η γωνία που σχηματίζει το συγκλίνων τμήμα (ακροφύσιο) είναι 15° ενώ αντίθετα το αποκλίνων τμήμα (διαχύτης) σχηματίζει γωνία 10 μοιρών. Το υλικό από το οποίο είναι φτιαγμένο το κέλυφος είναι plexiglass ενώ η συναρμογή του πλαισίου στις αλουμινένιες βάσεις επιτυγχάνεται με βίδες. Παρακάτω παρατίθεται τα σκαριφήματα του κελύφους της ανεμογεννήτριας, του συγκλίνων τμήματος του κελύφους καθώς και τα τμήματα του ακροφυσίου και του διαχύτη του κελύφους όπου δηλώνονται οι βασικές διαστάσεις του.

Σημείωση : Οι διαστάσεις που φαίνονται στα παρακάτω σχήματα είναι εκφρασμένες σε χιλιοστά [mm]

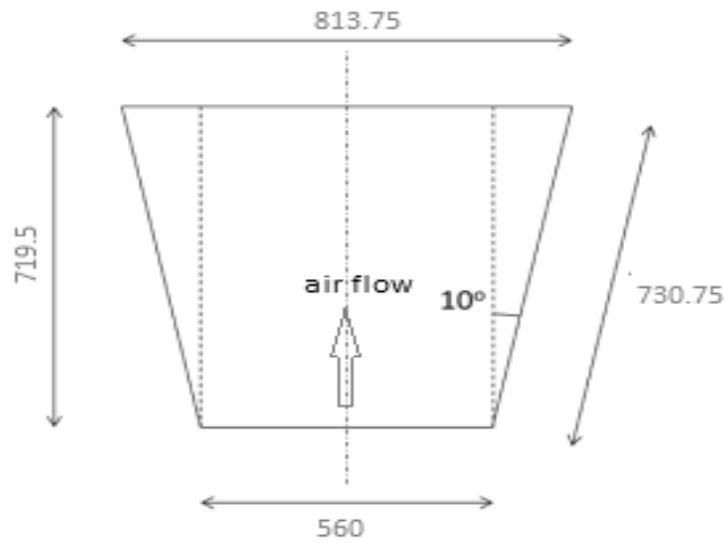


Σχήμα 3.2 Σκαρίφημα κελύφους Α/Γ



Σχήμα 3.3 Σκαρίφημα συγκλίνων-ακροφυσίου





Σχήμα 3.4 Σκαρίφημα Διαχύτη κελύφους

Παραπάνω , ορίστηκαν όλα τα βασικά τμήματα της πειραματικής διάταξης της ανεμογεννήτριας , παραθέτοντας την διαστασιολόγησή τους.

### 3.2.2 Πειραματικά μετρήσιμα μεγέθη

Σε αυτή την ενότητα αναφέρονται τα μετρήσιμα μεγέθη που εξήχθησαν κατά την διάρκεια του πειράματος , δηλαδή τα μεγέθη αυτά που συνεισέφεραν ουσιαστική επιστημονική συμβολή στα τελικά αποτελέσματα της διπλωματικής εργασίας. Η λειτουργία της πλειονότητας των ανεμογεννητριών χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένα μεγέθη όπως αυτά διατυπώθηκαν στο δεύτερο κεφάλαιο. Για να υπολογιστούν όμως μεγέθη , όπως ο συντελεστής ισχύος της ανεμογεννήτριας ή η ταχύτητα ακροπερυγίου θα πρέπει να υπολογιστούν πρώτα θεμελιώδη μεγέθη . Πιο συγκεκριμένα , μετρήθηκαν οι στροφές της ανεμογεννήτριας σε μονάδες μέτρησης Rotates per minute (RPM) όταν η ανεμογεννήτρια προσλάμβανε αιολικό δυναμικό. Η μέτρηση των στροφών του άξονα της ανεμογεννήτριας πραγματοποιήθηκε μέσω του στροφόμετρου .

Ακόμα ένα σημαντικό μέγεθος που μετρήθηκε ήταν η δύναμη του άξονα της ανεμογεννήτριας μέσω δυναμόμετρου τύπου LOAD CELL. Το συγκεκριμένο δυναμόμετρο είχε σαν επιλογή τις μονάδες μέτρησης της δύναμης σε kp ή Newton.

Το μέγεθος αυτό ήταν ιδιαίτερα σημαντικό για να υπολογιστεί τελικά η ροπή του άξονα.

Άλλο ένα μέγεθος που μετρήθηκε, ήταν η ταχύτητα του ανέμου μέσα στο κέλυφος. Υπήρξαν κάθετες και οριζόντιες μετρήσεις της ταχύτητας του ανέμου ανάντι και κατάντι της ανεμογεννήτριας. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν ανοίγοντας οπές στο κέλυφος. Οι οπές αυτές πραγματοποιήθηκαν με την χρήση τρυπανιού κεφαλής 6.5 χιλιοστών. και έγιναν με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτευχθεί μια χονδροειδής αλλά παράλληλα όσο το δυνατόν καλύτερη διακριτοποίηση του κελύφους, με σκοπό να προσδιοριστεί το ροϊκό πεδίο της πειραματικής διάταξης καθώς και το προφίλ ταχύτητας του ανέμου. Η ταχύτητα του ανέμου μετρήθηκε με ανεμόμετρο το οποίο συνδεόταν με ψηφιακό μανόμετρο και οι μονάδες μέτρησης του ήταν  $[\frac{m}{s}]$ . Αξίζει να σημειωθεί, ότι η ταχύτητα του ανέμου μετρήθηκε στο ξεκίνημα κάθε πειράματος εκτός του συγκλίνων-αποκλίνων τμήματος και πιο συγκεκριμένα σε απόσταση 30 εκατοστών από το ακροφύσιο για τον προσδιορισμό των αρχικών συνθηκών στο πείραμα.

Το επόμενο μέγεθος που ήταν αναγκαίο να μετρηθεί κατά την διάρκεια των πειραμάτων ήταν η πίεση που αναπτυσσόταν μέσα στο κέλυφος της ανεμογεννήτριας. Η μέτρηση της πίεσης επιτεύχθηκε μέσω των οπών που προαναφέρθηκαν παραπάνω, χρησιμοποιώντας την ίδια διακριτοποίηση του κελύφους και για την δημιουργία των προφίλ στατικών πιέσεων. Η μέτρηση αυτή , πραγματοποιήθηκε με το μετρητικό όργανο Pitot που κατηγοριοποιείται στους σωλήνες Pitot τύπου L και στην συνέχεια συνδεόταν με ψηφιακό μανόμετρο από το οποίο εξάγονταν οι μετρήσεις. Οι μονάδες μέτρησης του ψηφιακού μανομέτρου ήταν Pascal.

### **3.3 Πειραματικά όργανα**

#### **3.3.1 Εισαγωγή**

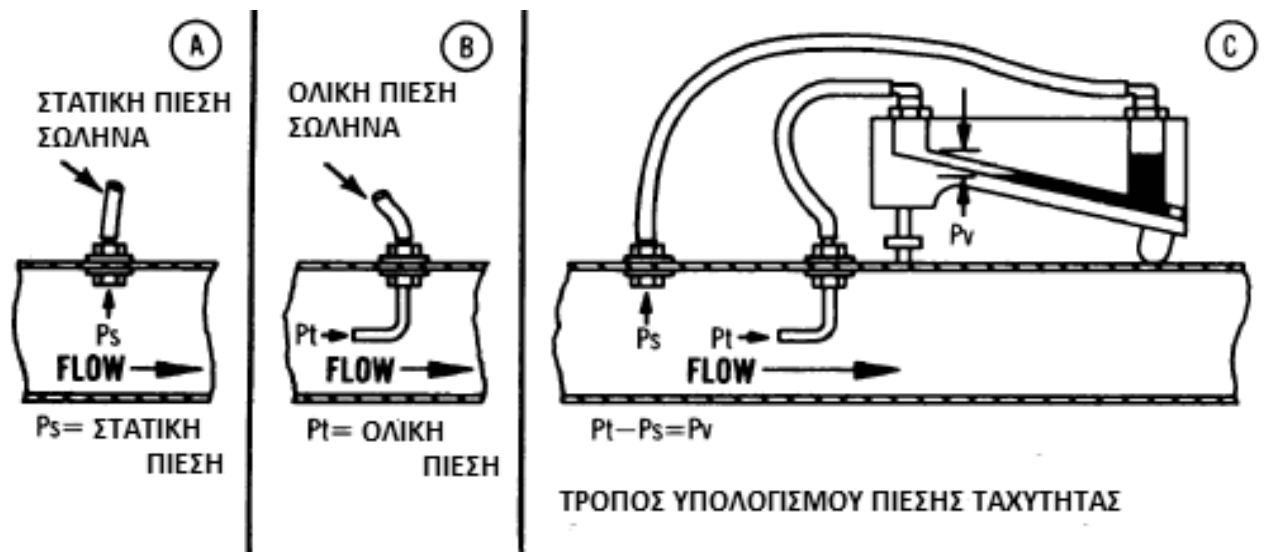
Στην προηγούμενη ενότητα αναφέρθηκαν τα μεγέθη που μετρήθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία ενώ έγινε μια μικρή αναφορά στα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των μεγεθών. Στόχος της ενότητας αυτής είναι να οριστούν με σαφήνεια τα πειραματικά όργανα και πιο συγκεκριμένα , ο τρόπος λειτουργίας τους , τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους καθώς και ο τύπος του μετρητικού οργάνου που χρησιμοποιήθηκε.

### 3.3.2 Ηλεκτρονικό Μανόμετρο

Το μανόμετρο είναι το όργανο μέτρησης της πίεσης αερίων ή υγρών και χρησιμοποιείται κατά κόρον στην βιομηχανία καθώς και σε πειραματικές εφαρμογές. Υπάρχουν διάφορα είδη μανομέτρων όπως τα μανόμετρα τύπου «U», τα κεκλιμένα μανόμετρα καθώς και τα ηλεκτρονικά μανόμετρα. Κατά την διάρκεια του πειράματος που διεξήχθη χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρονικό μανόμετρο. Μέσω του ηλεκτρονικού μανομέτρου και του σωλήνα Pitot υπολογίστηκαν οι στατικές πιέσεις του ανέμου ( $P_s$ ), η ολική πίεση της πειραματικής διάταξης ( $P_t$ ) καθώς και η πίεση ταχύτητας, που συχνά αναφέρεται και ως δυναμική πίεση ( $P_u$ ). Οι τρεις παραπάνω πιέσεις συνδέονται μέσω της σχέσης :

$$P_u = P_t - P_s \quad (3.1)$$

Παρακάτω φαίνεται ο τρόπος υπολογισμού των τριών πιέσεων που αναφέρθηκαν νωρίτερα μέσω του μανομέτρου. Γίνεται αντιληπτό, ότι για να υπολογιστεί η πίεση ταχύτητας θα πρέπει να υπολογιστούν πρώτα η στατική πίεση καθώς και η ολική πίεση.



Σχήμα 3.5 Τρόπος υπολογισμού πιέσεων [12]

Το μανόμετρο που χρησιμοποιήθηκε ήταν της εταιρίας KIMO και ο τύπος του μοντέλου ήταν ο VT 200. Παρακάτω παρουσιάζεται το μανόμετρο που

χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις των πιέσεων κατά την διεξαγωγή των πειραματικών διαδικασιών.



Εικόνα 3.6 Ηλεκτρονικό μανόμετρο VT 200

Το ηλεκτρικό μανόμετρο της εικόνας 3.6 διαθέτει τρεις υποδοχές στις οποίες συνδεόταν το Pitot τύπου L καθώς και το ζεύγος thermocouple τύπου K. Στις δύο υποδοχές συνδεόντουσαν σωληνάκια για την μέτρηση της πίεσης του ανέμου όπως δείχνει και το σχήμα 3.5 στην παράθεση c. Αντίθετα, στην τρίτη υποδοχή συνδεόταν το ζεύγος thermocouple για την μέτρηση της θερμοκρασίας του ανέμου. Αξίζει να σημειωθεί σε αυτό το σημείο, ότι η μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου με ανεμόμετρο μετρήθηκε μόνο στην περιοχή των 30 cm μπροστά από το ακροφύσιο για τον προσδιορισμό των αρχικών συνθηκών του πειράματος.

### 3.3.2.1 Pitot τύπου L

Οι σωλήνες Pitot τύπου L (βλ.Σχ.3.7) έχουν ευρεία εφαρμογή στις πειραματικές διατάξεις. Για τις σωστές μετρήσεις με το σωλήνα Pitot υπάρχουν

βασικές αρχές που πρέπει να τηρηθούν για την σωστή εκλογή πειραματικών αποτελεσμάτων.



Σχήμα 3.7 Σωλήνας Pitot τύπου L

Βασικές αρχές μέτρησης με σωλήνες Pitot τύπου L :

- Το «κεφάλι» του μετρητικού οργάνου που καταλήγει σε ελλειψοειδή μύτη θα πρέπει να παραμένει παράλληλο με την ροή του ανέμου κατά την διάρκεια της μέτρησης.
- Το σωληνάκι που μετράει την ολική πίεση (+) , θα πρέπει να συνδέεται στην αντίστοιχη υποδοχή (+) του ηλεκτρονικού μανομέτρου.
- Το σωληνάκι που μετράει την στατική πίεση (-) , θα πρέπει να συνδέεται στην αντίστοιχη υποδοχή (-) του ηλεκτρονικού μανομέτρου.

### **3.3.2.2 Ζεύγος thermocouple τύπου K**

Το ζεύγος thermocouple τύπου K (βλ.Σχ.3.8) είναι το μετρητικό όργανο της θερμοκρασίας του ανέμου μέσα στο κέλυφος. Κατά την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας, το thermocouple συνδεόταν στην ειδική υποδοχή του ηλεκτρονικού μανομέτρου για να επιτευχθεί η μέτρηση.



Σχήμα 3.8 Thermocouple τύπου K

### 3.3.2.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά ηλεκτρονικού μανομέτρου

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά (βλ.Πιν.3.1) του μανομέτρου που χρησιμοποιήθηκε κατά την πειραματική διαδικασία φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Να σημειωθεί, ότι τα χαρακτηριστικά του μανομέτρου έχουν παρθεί από το user manual .

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΚΑΘΕΤΟΥ  
ΑΞΟΝΑ ΜΕ ΚΕΛΥΦΟΣ(SHROUD)

Πίνακας 3.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά μανόμετρου

	ΜΟΝΑΔΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	ΕΥΡΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	ΑΚΡΙΒΕΙΑ	ΑΝΑΛΥΣΗ
<b>ΠΙΕΣΗ</b>	Pa, mm H <sub>2</sub> O, In WG, mbar, hPa, mmHg, DaPa, kPa bar , PSI	Από 0 μέχρι $\pm 500 Pa$	$\pm 100 Pa$ : $\pm 0.2\%$ of reading $\pm 0.8 Pa$ , beyond $\pm 0.2\%$ of reading $\pm 1.5 Pa$	0.1 Pa από -100 έως 100 Pa  1 Pa
		Από 0 μέχρι $\pm 2500 Pa$	$\pm 0.2\%$ of reading $\pm 2 Pa$	1 Pa
		Από 0 μέχρι $\pm 10,000 Pa$	$\pm 0.2\%$ of reading $\pm 10 Pa$	
		Από 0 μέχρι $\pm 500 mbar$	$\pm 0.2\%$ of reading $\pm 0.5 mbar$	0.1 mbar  1 mbar
		Από 0 μέχρι $\pm 2000 mbar$	$\pm 0.2\%$ of reading $\pm 2 mbar$	
<b>ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΕΜΟΥ (ΣΩΛΗΝΑΣ ΡΙΤΟΤ)</b>	$\frac{m}{s}$ , fpm , $\frac{km}{h}$ , mph	Από 2 μέχρι 5 [ $\frac{m}{s}$ ]	$\pm 0.3$ [ $\frac{m}{s}$ ]	0.1 [ $\frac{m}{s}$ ]
		Από 5.1 μέχρι 100 [ $\frac{m}{s}$ ]	$\pm 0.5\%$ of reading $\pm 0.2$ [ $\frac{m}{s}$ ]	0.1 [ $\frac{m}{s}$ ]
<b>ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ</b>	°C, °F	K: Από -200 έως 1300 °C	$\pm 1.1^\circ C$ ή 0.4% reading	0.1 °C
		J: Από -100 έως 750 °C	$\pm 0.8^\circ C$ ή 0.4% reading	0.1 °C
		T: Από -200 έως 400 °C	$\pm 0.5^\circ C$ ή 0.4% reading	0.1 °C
<b>ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΕΜΟΥ (ΑΝΕΜΟΜΕΤΡΟ)</b>	$\frac{m}{s}$ , fpm , $\frac{km}{h}$	Από 0.8 μέχρι 3 [ $\frac{m}{s}$ ]	$\pm 3\%$ of reading $\pm 0.1 \frac{m}{s}$	0.1 $\frac{m}{s}$
		Από 3.1 μέχρι 25 [ $\frac{m}{s}$ ]	$\pm 1\%$ of reading $\pm 0.3 \frac{m}{s}$	0.1 $\frac{m}{s}$

### 3.3.3 Στροφόμετρο

Για τον προσδιορισμό των στροφών και κατ επέκταση της γωνιακής ταχύτητας του άξονα της ανεμογεννήτριας, χρησιμοποιήθηκε το ψηφιακό στροφόμετρο (βλ.Σχ.3.9) ως μετρητικό όργανο. Για την ορθή λειτουργία του στροφόμετρου καθώς και για αξιόπιστα αποτελέσματα ενδείξεων απαιτούνται κάποιες αναγκαίες συνθήκες . Οι συνθήκες αυτές παρουσιάζονται παρακάτω :

- I. Επισύναψη στην κορυφή του άξονα της ανεμογεννήτριας ένα μικρό κομμάτι αντανακλαστικού υλικού πάνω στο οποίο θα πέφτει η δέσμη φωτός του στροφόμετρου.
- II. Ευθυγράμμιση της δέσμης φωτός με το αντανακλαστικό υλικό και διατήρηση σταθερής απόστασης από αυτό περίπου 20 cm.
- III. Εξαγωγή μέτρησης κατόπιν σταθεροποίησης της τιμής που αναγράφεται στην οθόνη του στροφόμετρου.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά (βλ.Πιν.3.2) όπως αναφέρονται στο user manual για το στροφόμετρο είναι :

Πίνακας 3.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά στροφόμετρου

<b>ΕΥΡΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ</b>	<b>5 έως 99,999 RPM</b>
<b>ΑΝΑΛΥΣΗ</b>	0.1 RPM έως 1000 RPM και 1 RPM για RPM>1000
<b>ΑΚΡΙΒΕΙΑ</b>	$\pm 0.1\%$ και στα 2 ψηφία
<b>ΧΡΟΝΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ</b>	1 second (60 RPM)



Σχήμα 3.9 Στροφόμετρο



### 3.3.4 Δυναμόμετρο

Η μέτρηση της ροπής του άξονα της ανεμογεννήτριας αποτελεί ένα από τα βασικότερα μεγέθη γιατί όσο μεγαλύτερη είναι η ροπή του , τόσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής ισχύος της ανεμογεννήτριας. Όπως προαναφέρθηκε , για την μέτρηση της δύναμης χρησιμοποιήθηκε το δυναμόμετρο τύπου LOAD CELL και μοντέλο 475055 της εταιρίας EXTECH INSTRUMENTS (βλ.Σχ.3.10). Αφού υπολογίστηκε η δύναμη του άξονα κατά την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας στην συνέχεια πολλαπλασιάστηκε με την διάμετρο του δρομέα ώστε να προκύψει η ροπή στρέψης του άξονα. Οι μετρήσεις από το δυναμόμετρο προκύπτουν από τον σιγμοειδή αισθητήρα φορτίου , ο οποίος συνδέεται μέσω καλωδίου που στην άκρη του υπάρχει ένα βύσμα το οποίο καταλήγει στην υποδοχή του δυναμόμετρου.



Σχήμα 3.10 Δυναμόμετρο

Το συγκεκριμένο δυναμόμετρο , όπως και τα υπόλοιπα μετρητικά όργανα που αναφέρθηκαν παραπάνω, απαιτεί συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας. Αρχικά , για να ξεκινήσουν οι μετρήσεις στον άξονα της ανεμογεννήτριας, επινοήθηκε ο παρακάτω τρόπος υπολογισμού της δύναμης που παράγεται από περιστρεφόμενο μέρος (βλ.Σχ.3.11).



Σχήμα 3.11 Πειραματικός υπολογισμός δύναμης του άξονα

Στο Σχήμα 3.11 φαίνεται ο τρόπος υπολογισμού της δύναμης του άξονα. Για να επιτευχθεί αυτό, χρειάστηκαν ένας προεντατήρας, ένας υφασμάτινος ιμάντας καθώς και το δυναμόμετρο. Αρχικά, βιδώθηκε ο προεντατήρας στην μία κάθετη ράβδο της πειραματικής διάταξης (βλ. Σχ. 3.11), ενώ στην άλλη εδράστηκε ο σιγμοειδής αισθητήρας του δυναμόμετρου (βλ. Σχ. 3.10 και Σχ. 3.11). Για να επιτευχθεί η έδραση του αισθητήρα, αφαιρέθηκε η κυκλική στεφάνη αυτού (βλ. Σχ. 3.10) και βιδώθηκε πάνω σε ήλο που βρισκόταν πάνω στην κάθετη ράβδο. Στην συνέχεια, τρυπήθηκε ο υφασμάτινος ιμάντας σε δύο μέρη ώστε να πιάνεται στον προεντατήρα καθώς και στο άγκιστρο του σιγμοειδή αισθητήρα. Ο ιμάντας τοποθετήθηκε με τέτοιο τρόπο, ώστε να εφαρμόζεται στον άξονα και το φορτίο που έδειχνε το δυναμόμετρο πριν την έναρξη της πειραματικής διαδικασίας ήταν μηδενικό. Το πλεονέκτημα του συγκεκριμένου τρόπου υπολογισμού της δύναμης του άξονα είναι, ότι δύναται, με την σύσφιξη του προεντατήρα συνεπώς και του ιμάντα, ο άξονας να ξεκινήσει την πειραματική διαδικασία με αρχικό φορτίο.

Για την ορθή λειτουργία του δυναμόμετρου, απαιτείται ο σιγμοειδής αισθητήρας να είναι κάθετος ή οριζόντιος με τον άξονα της ανεμογεννήτριας. Διαφορετικά, το μετρητικό όργανο εμφανίζει λανθασμένα αποτελέσματα. Ακόμα, απαιτείται να οριστεί η αρχική σύσφιξη του ιμάντα ως μηδενικό επίπεδο της δύναμης του άξονα πριν από κάθε νέα μέτρηση της πειραματικής διαδικασίας. Στην συνέχεια,

παρατίθεται ο πίνακας των τεχνικών χαρακτηριστικών του δυναμόμετρου (βλ.Πιν.3.3).

Πίνακας 3.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά δυναμόμετρου

<b>ΕΥΡΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ</b>	220 lb , 100 kg , 280 N
<b>ΑΚΡΙΒΕΙΑ (T=23 °C)</b>	±(0.5% of reading + 0.1 lbs, 0.1 kg ή 0.4 N)
<b>ΑΝΑΛΥΣΗ</b>	0.05 lbs, 0.05 kg , 0.2 N
<b>ΥΠΕΡΦΟΡΤΩΣΗ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ</b>	150 kg

### 3.3.5 Αεροδυναμική σήραγγα

Όπως αναφέρθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο, κάθε ανεμογεννήτρια απαιτεί αιολικό δυναμικό ώστε να επιτευχθεί ο μηχανισμός απαγωγής ενέργειας από τον άνεμο. Κατά την διαδικασία των πειραμάτων που διεξήχθησαν στο εργαστήριο «Μηχανικής Ρευστών και Στροβιλομηχανών», η δημιουργία του αιολικού δυναμικού επιτεύχθηκε μέσω της αεροδυναμικής σήραγγας.

#### 3.3.5.1 Τρόπος λειτουργίας

Η αεροδυναμική σήραγγα λειτουργεί όπως μια ογκομετρική μηχανή ή αντλία μετακινώντας ποσότητες ανέμου ή άλλου αερίου από ένα σημείο σε ένα άλλο. Κατά την μετακίνηση αυτή, η αεροδυναμική σήραγγα παρέχει το απαραίτητο ποσό ενέργειας στο ρευστό , ώστε να υπερνικηθεί η αντίσταση στην ροή του και να διατηρηθεί η συνεχόμενη κίνηση. Το έργο που παρέχεται στην ροή επιτυγχάνεται με την πρόσδοση ενέργειας στην αεροδυναμική σήραγγα. Η ποσότητα ενέργειας που απαιτείται εξαρτάται από παράγοντες όπως ο βαθμός απόδοσης της μηχανής, ο όγκος του ρευστού που απαιτείται για μετακίνηση καθώς και η αντίσταση της ροής του ρευστού που χρειάζεται να υπερνικήσει η μηχανή . Μια τυπική διάταξη αξονικής αεροδυναμικής σήραγγας αποτελείται από έναν κινητήρα, περιστρεφόμενη πτερωτή με πτερύγια καθώς και από περίβλημα που εμπεριέχει τον εισερχόμενο άνεμο. Στο σημείο αυτό , αξίζει να τονιστεί ότι δεν αναφέρονται ενδελεχώς όλα τα τμήματα της αεροδυναμικής σήραγγας παρά μόνο τα κύρια μέρη της.

### 3.3.5.2 Περιγραφή αεροδυναμικής σήραγγας

Η αεροδυναμική σήραγγα (βλ.Σχ.3.12) αποτελείται από τα παρακάτω κύρια τμήματα :

- Ακροφύσιο εισόδου
- Αεραγωγός εισόδου μήκους 2400 mm
- Αξονικός φυσητήρας ονομαστικής παροχής  $43200 \frac{m^3}{h}$  στις 1460 RPM
- Αεραγωγός εξόδου, μήκους 1900 mm
- Μηχανισμός ρύθμισης παροχής, με χρήση τεσσάρων κωνικών πτερυγίων.

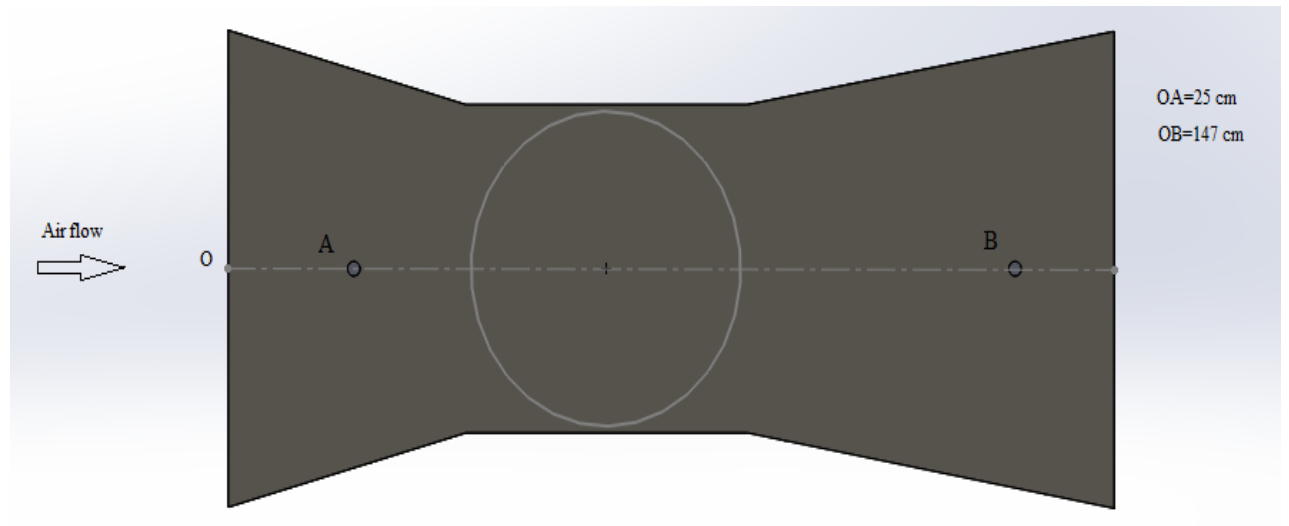


Σχήμα 3.12 Αεροδυναμική Σήραγγα

### 3.4 Πειραματική διαδικασία

#### 3.4.1 Βαθμονόμηση κελύφους

Ένα από τα πρώτα ζητήματα που αντιμετωπίστηκαν πριν από το ξεκίνημα των πειραματικών διαδικασιών, ήταν η βαθμονόμηση του κελύφους. Το παραπάνω ζήτημα ήταν ιδιαίτερα σημαντικό καθώς θα έπρεπε να επιτευχθεί όσο το δυνατόν καλύτερη διακριτοποίηση του κελύφους όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Υπό αυτό το πρίσμα, δημιουργήθηκαν τέσσερις οπές στο πλάι του κελύφους εκ των οποίων οι δυο έγιναν στο τμήμα του ακροφυσίου ενώ οι άλλες δυο έγιναν στο τμήμα του διαχύτη. Ακόμα δημιουργήθηκαν δυο οπές στο πάνω μέρος του κελύφους, για την πραγματοποίηση κάθετων μετρήσεων ανάντι και κατάντι της ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 3.13 Οπές για κάθετες μετρήσεις στο επάνω μέρος του κελύφους

Στο σχήμα 3.13 φαίνονται οι δυο οπές στο πάνω μέρος του κελύφους. Οι οπές βρίσκονται πάνω στην νοητή αξονική ευθεία που περνάει από το κέντρο του άξονα της ανεμογεννήτριας. Θεωρώντας ως μηδενική αρχή αξόνων (ή μηδενικό σημείο μέτρησης της απόστασης της αξονικής ευθείας της ανεμογεννήτριας) το σημείο O, που συμπίπτει με το σημείο εισόδου του ρευστού στο ακροφύσιο και θετική φορά μέτρησης την φορά ροής του ανέμου (βλ. Σχ. 3.13) τότε οι αποστάσεις των οπών A και B από το σημείο O είναι :

- OA= 25 cm
- OB= 147 cm

Η θέση της οπής Α έγιναν με σκοπό να διερευνηθεί η επίπτωση του ακροφυσίου στο ρευστό ,ενώ η θέση της οπής Β έγινε με σκοπό να διερευνηθεί η συμπεριφορά του ρευστού κατάντι της ανεμογεννήτριας υπό την επίδραση του διαχύτη.



Σχήμα 3.14 Οπές στο πλευρικό μέρος του κελύφους

Στο σχήμα 3.14 φαίνονται οι πλευρικές οπές που δημιουργήθηκαν στο κέλυφος. Οι πλευρικές οπές δημιουργήθηκαν στο μέσο ύψος του κελύφους. Το κέλυφος έχει ύψος 54 cm, οπότε το ύψος των οπών είναι 27 cm. Τα κέντρα των οπών είναι συνευθειακά. Οι οπές Γ και Δ ανήκουν στο τμήμα του ακροφυσίου. Πιο συγκεκριμένα, στην οπή Γ φαίνεται η επίδραση του συγκλίνων τμήματος στο ρευστό ενώ αντίθετα η οπή Δ βρίσκεται κοντά στο λαιμό-στένωση του συγκλίνων-αποκλίνων τμήματος. Η χρησιμότητα της οπής Δ φαίνεται στα πειραματικά αποτελέσματα , όπου παρατηρούνται οι μέγιστες ταχύτητες του ρευστού καθώς και οι μέγιστες στατικές πιέσεις. Οι αποστάσεις των οπών στην οριζόντια διεύθυνση θεωρώντας ως Ο' το σημείο που βρίσκεται στο μέσο ύψος του κελύφους είναι :

- $O\Gamma = 29 \text{ cm}$
- $O\Delta = 50 \text{ cm}$

Οι οπές E και Z δημιουργήθηκαν για την μελέτη του ρευστού στον ομόρροου της ανεμογεννήτριας υπό την επίδραση του διαχύτη. Οι αποστάσεις από το σημείο Ο' είναι:

- $O'E = 113.5 \text{ cm}$
- $O'Z = 146.5 \text{ cm}$

### 3.4.2 Βαθμονόμηση σωλήνα Pitot

Η δημιουργία των οπών καθώς και η βαθμονόμηση του κελύφους που αναφέρθηκε παραπάνω, δεν ήταν δυνατό να λύσει όλα τα προβλήματα στο θέμα της διακριτοποίησης του όγκου του κελύφους. Για να εξαχθούν πλήρεις και αξιόπιστες πειραματικές μετρήσεις, ήταν αναγκαίο να βαθμονομηθεί και ο σωλήνας Pitot τύπου L. Δίχως την βαθμονόμηση του Pitot θα ήταν αδύνατο να γνωρίζουμε το ακριβές πλάτος της μέτρησης, όταν αυτή γινόταν στα πλαϊνά μέρη του κελύφους. Δεχόμενοι, ότι το κελύφος μαθηματικά περιγράφεται από τα σημεία στον τρισδιάστατο χώρο (x,y,z) όπου το x δηλώνει το πλάτος το y δηλώνει το μήκος και το z το ύψος, τότε η βαθμονόμηση του σωλήνα Pitot περιγράφει το πλάτος του συνόλου των σημείων που πραγματοποιήθηκε μέτρηση.

Για την βαθμονόμηση του σωλήνα Pitot αρχικά, μετρήθηκε το συνολικό μήκος του σωλήνα. Στην συνέχεια, αποφασίστηκε ότι θα ήταν χρήσιμο να παρθούν 6 μετρήσεις κατά πλάτος του κελύφους. Σύμφωνα με αυτή την λογική, κολλήθηκαν έξι κομμάτια μονωτικής ταινίας κατά μήκος του σωλήνα Pitot (βλ.Σχ.3.15). Με αυτό τον απλό τρόπο προσδιοριζόταν η θέση του πλάτους του κελύφους που λάμβανε χώρα η πειραματική μέτρηση.



Σχήμα 3.15 Βαθμονόμηση Σωλήνα Pitot

### 3.5 Αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας

#### 3.5.1 Αποτελέσματα ροϊκού πεδίου

Τα αποτελέσματα από την πειραματική διαδικασία χωρίστηκαν σε δυο κύριες κατηγορίες. Η μια κατηγορία αποτελεί την ανάλυση του ροϊκού πεδίου, ενώ η άλλη αποτελείται από τα αποτελέσματα που αποτυπώνουν την καμπύλη του συντελεστή ισχύος της ανεμογεννήτριας συναρτήσει της αδιάστατης ταχύτητας ακροπερυγίου. Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστεί και θα σχολιαστεί η πειραματική ανάλυση του ροϊκού πεδίου.

Κατά την πειραματική μελέτη του ροϊκού πεδίου, μετρήθηκαν οι μεταβολές της πίεσης και της ταχύτητας του ρευστού κατά την ροή του μέσω του ειδικά διαμορφωμένου κελύφους. Τέλος ,αξίζει να σημειωθεί, ότι όλες οι μετρήσεις που θα παρουσιαστούν στην ενότητα 3.5, αντιπροσωπεύουν την μέση τιμή των μετρήσεων, που υπολογίστηκε από τα μετρητικά όργανα, σε ένα λεπτό πειραματικής λειτουργίας.



Σχήμα 3.16 Πειραματική διαδικασία, μετρήσεις με σωλήνα Pitot



ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΚΑΘΕΤΟΥ  
ΑΞΟΝΑ ΜΕ ΚΕΛΥΦΟΣ(SHROUD)

---

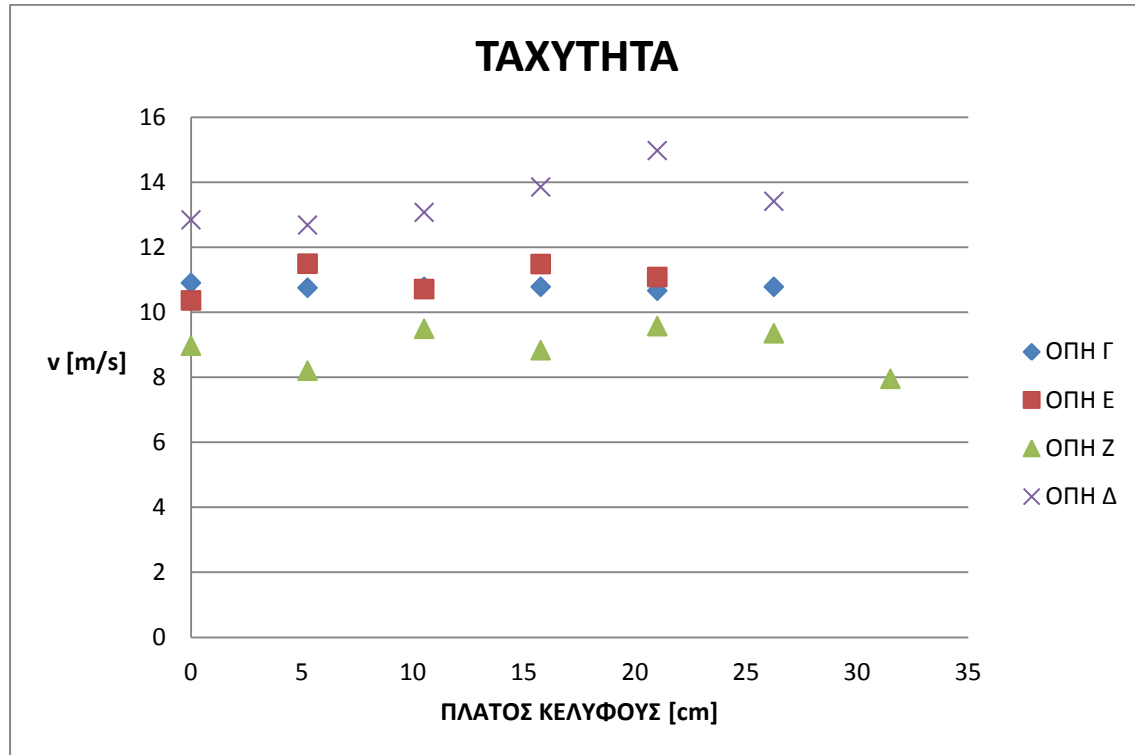


Σχήμα 3.17 Πειραματική διαδικασία, άποψη δρομέα



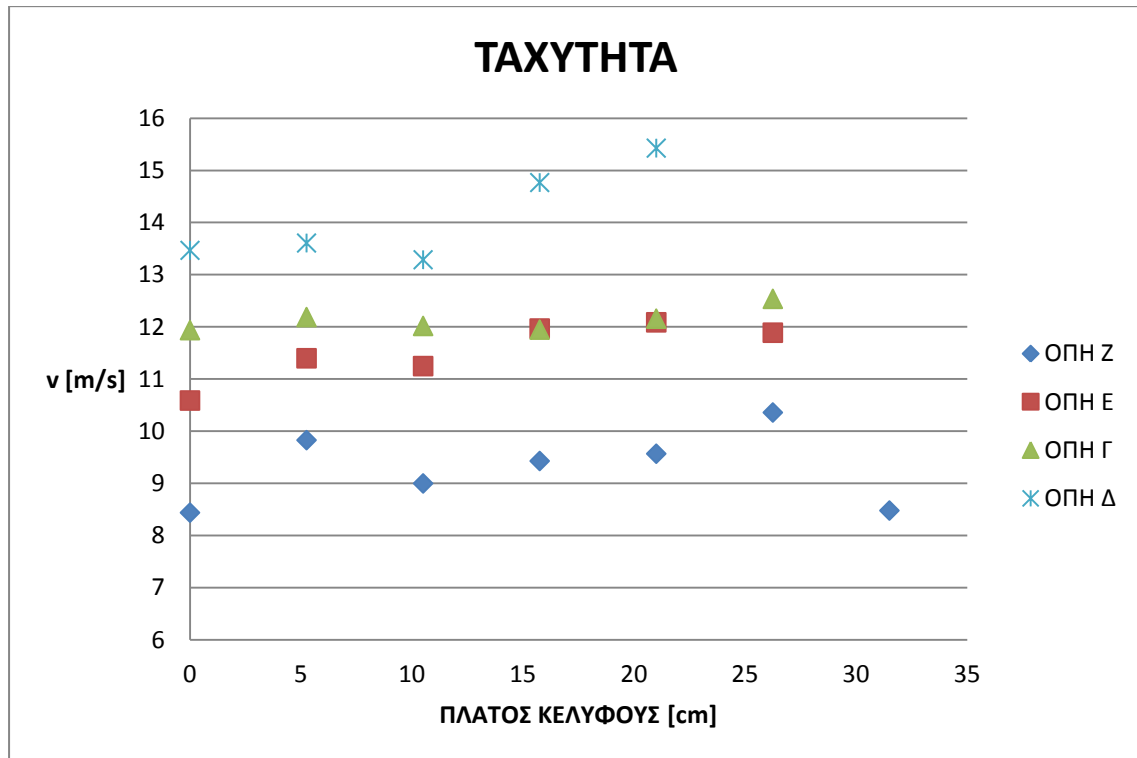
Σχήμα 3.18 Πειραματική διαδικασία, μετρητικά όργανα

### 3.5.1.1 Οριζόντιες μετρήσεις ταχύτητας



Σχήμα 3.19 Οριζόντιο προφίλ ταχύτητας ανέμου

Στο παραπάνω σχήμα (βλ. Σχ. 3.19) απεικονίζεται η ταχύτητα του ανέμου όπως μετρήθηκε από τις οπές (βλ. Σχ.3.14) κατά πλάτος του κελύφους. Να σημειωθεί ότι η ταχύτητα ανέμου στην είσοδο του κελύφους ήταν  $3 \frac{m}{s}$  ενώ οι στροφές της ανεμογεννήτριας ήταν 118 RPM. Παρατηρείται, η αρχική επίδραση του ακροφυσίου στην επιτάχυνση της ροής στην μέτρηση της οπής Γ, καθώς η ταχύτητα του ανέμου έχει αυξηθεί αισθητά. Στην συνέχεια, στην μέτρηση της οπής Δ, η ταχύτητα του ανέμου έχει την μέγιστη τιμή της, λόγω της μέγιστης σύγκλισης του ακροφυσίου. Η μέγιστη τιμή που παρατηρήθηκε ήταν  $14.97 \frac{m}{s}$ , σχεδόν πενταπλάσια της αρχικής ταχύτητας εισόδου. Η επόμενη μέτρηση αφορά την οπή Ε, όπου φαίνεται η μείωση της ταχύτητας ανέμου λόγω της αλληλεπίδρασης του ρευστού με το δρομέα. Τέλος, στην οπή Ζ παρατηρούνται οι μικρότερες ταχύτητες αφού η ροή διέρχεται από τον διαχύτη, στον οποίο συμβαίνει ανάκτηση πίεσης του ρευστού εις βάρος της κινητικής του ενέργειας.

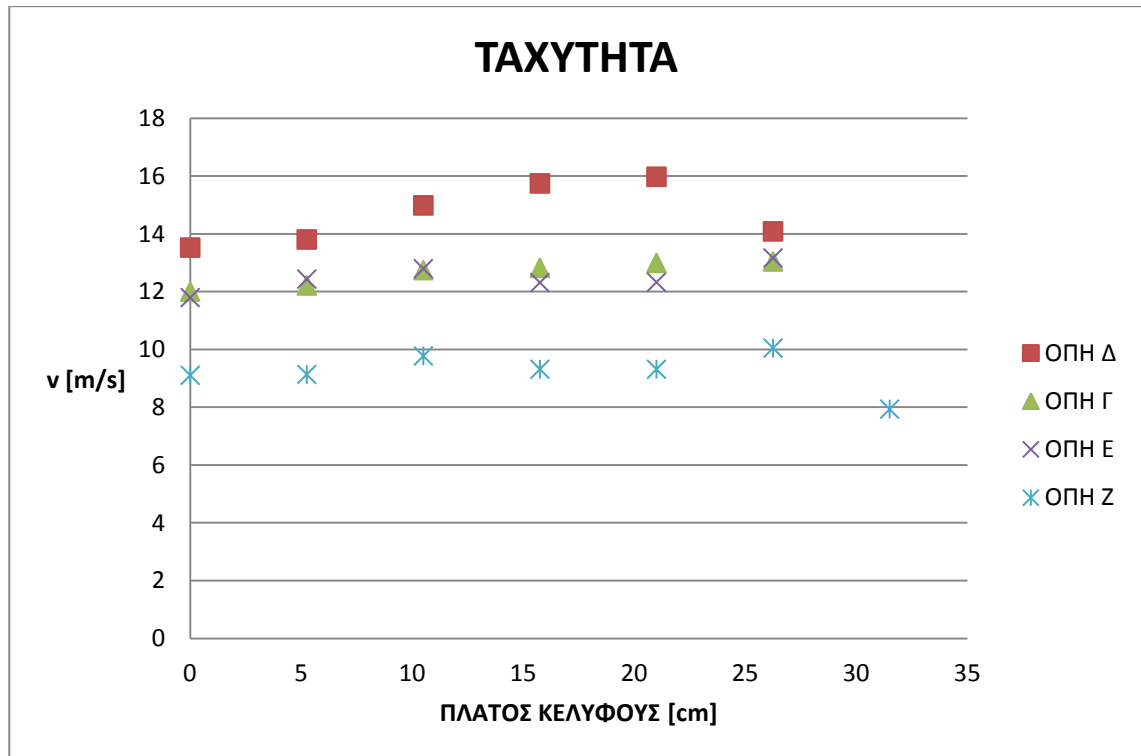


Σχήμα 3.20 Οριζόντιο προφίλ ταχύτητας ανέμου

Στο παραπάνω σχήμα (Σχ. 3.20) παρατίθενται το προφίλ ταχύτητας του ανέμου για συνθήκες πειράματος τις παρακάτω :

- $V_{\text{air}} = 3 \frac{m}{s}$  στην είσοδο του κελύφους.
- $N = 155 \text{ RPM}$ .

Παρατηρείται ότι, με την αύξηση των στροφών της ανεμογεννήτριας επιτυγχάνονται μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου σε ολόκληρο το κέλυφος. Η μέγιστη τιμή της ταχύτητας ήταν  $15.43 \frac{m}{s}$ . Στα δυο άκρα του διαχύτη μετρήθηκαν οι μικρότερες τιμές ταχύτητας, όπου γίνεται ξεκάθαρη η επίδραση των οριακών στρωμάτων στο προφίλ της ταχύτητας, όπως και στην θέση  $x=0$  σε κάθε οπή.

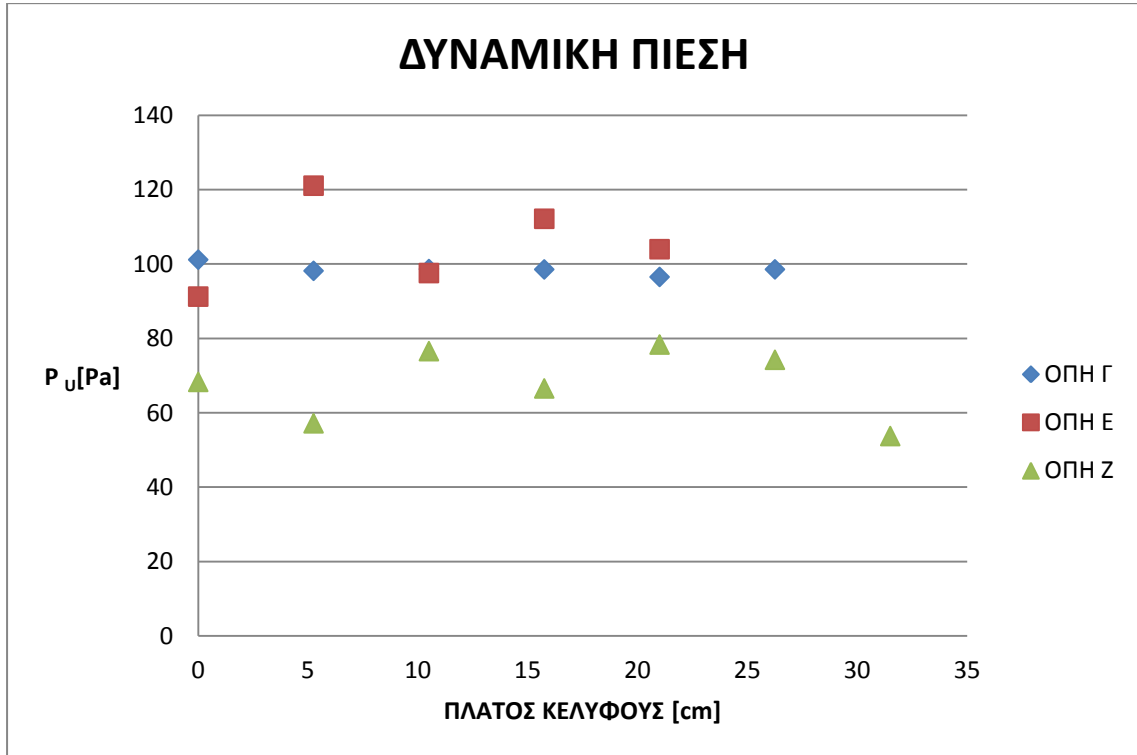


Σχήμα 3.21 Οριζόντιο προφίλ ταχύτητας ανέμου

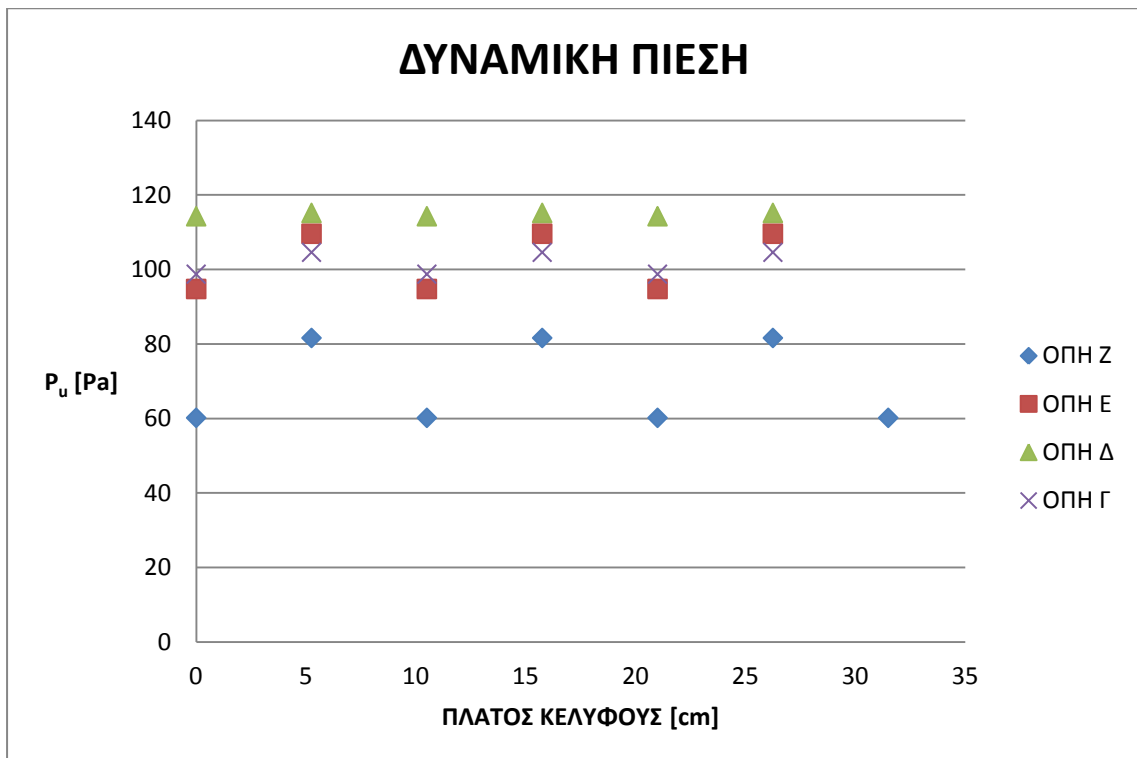
Το προφίλ ταχύτητας του σχήματος 3.18 εξήχθη για τις παρακάτω συνθήκες πειραματικής διαδικασίας. Η ταχύτητα ανέμου στην είσοδο του κελύφους ήταν  $3.2 \frac{m}{s}$  ενώ οι στροφές του ρότορα μετρήθηκαν στις 188 RPM. Η αύξηση της ταχύτητας εισόδου στο κελύφος συνεισφέρει στην αύξηση των ταχυτήτων μέσα στο ροϊκό πεδίο. Όπως και στο σχήμα 3.17 παρατηρείται η επίδραση των οριακών στρωμάτων στις ταχύτητες των ακραίων θέσεων.

### 3.5.1.2 Οριζόντιες μετρήσεις δυναμικής πίεσης

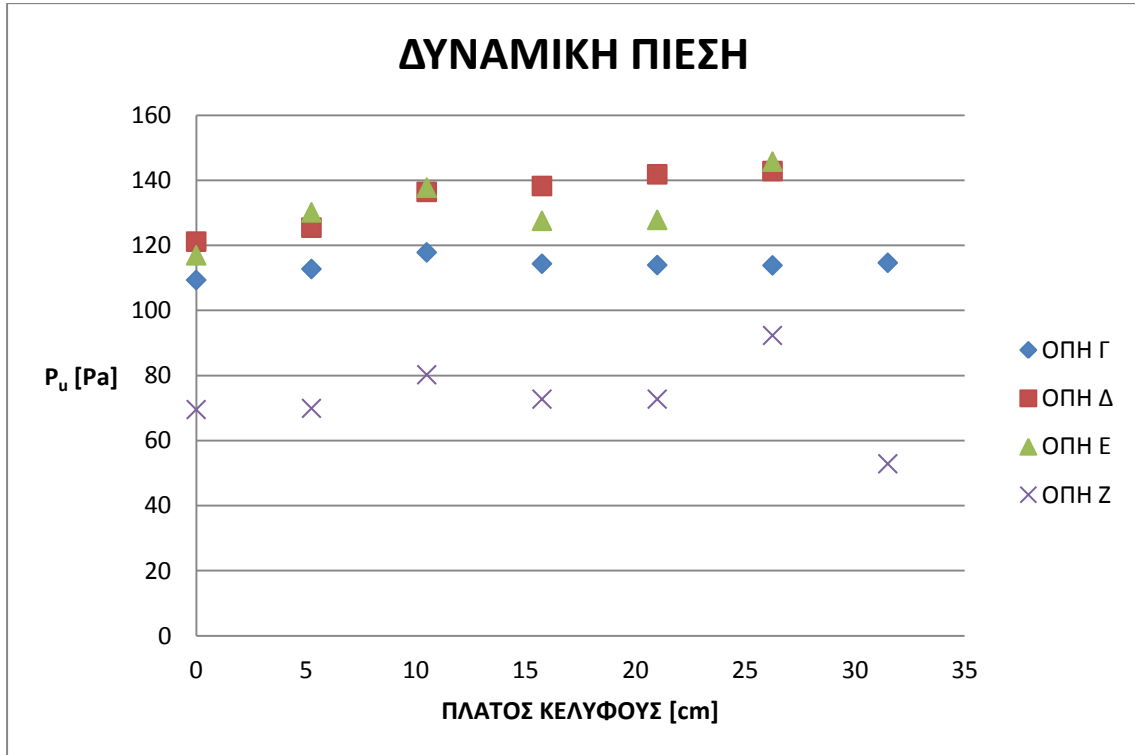
Στην ενότητα αυτή θα παρατεθούν οι οριζόντιες μετρήσεις της δυναμικής πίεσης. Όπως είναι φυσιολογικό έχουν παρόμοια συμπεριφορά με τα παραπάνω διαγράμματα ταχύτητας στο ροϊκό πεδίο. Αξίζει να αναφερθεί, ότι οι δυναμικές πιέσεις που παρουσιάζονται παρακάτω μετρήθηκαν στις ίδιες συνθήκες πειράματος με τις σχήματα ταχυτήτων που αναφέρονται παραπάνω.



Σχήμα 3.22 Μετρήσεις δυναμικής πίεσης για  $v_{air}=3 \frac{m}{s}$  και  $N=1118$  RPM.

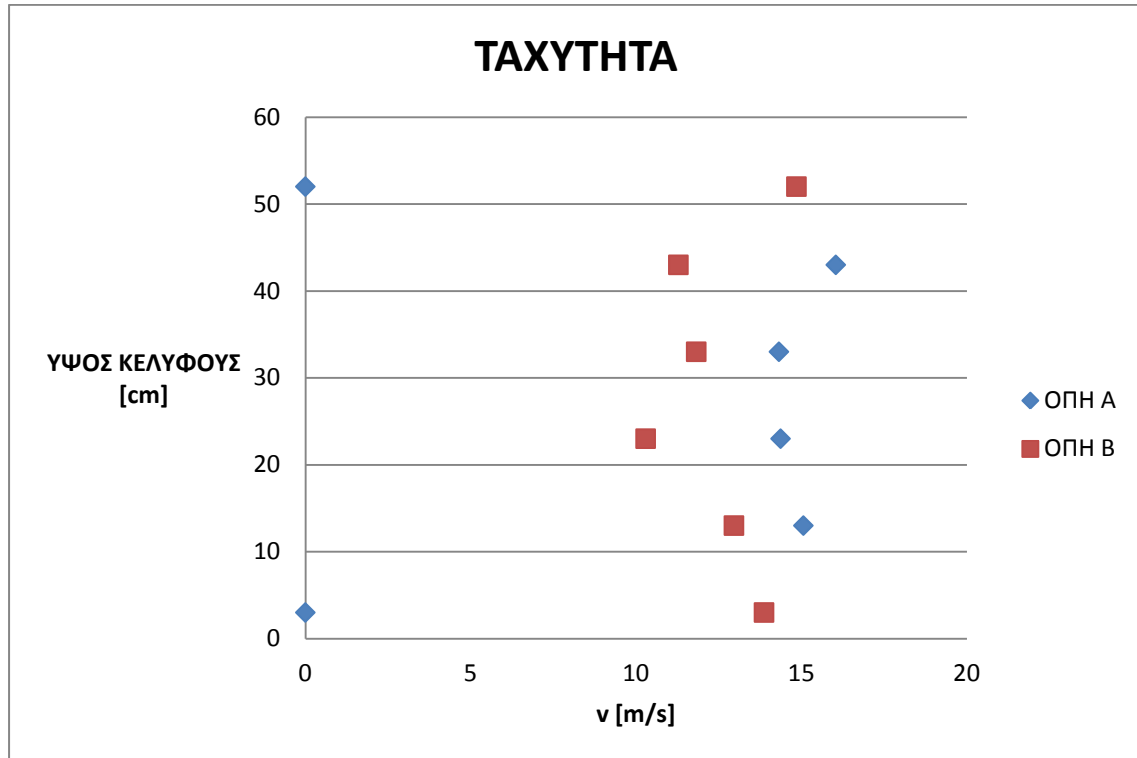


Σχήμα 3.23. Μετρήσεις δυναμικής πίεσης για  $v_{air}=3 \frac{m}{s}$  και  $N=155$  RPM



Σχήμα 3.23. Μετρήσεις δυναμικής πίεσης για  $v_{air}=3.2 \frac{m}{s}$  και  $N=188$  RPM

### 3.5.1.3 Κατακόρυφο προφίλ ταχύτητας και δυναμικής πίεσης



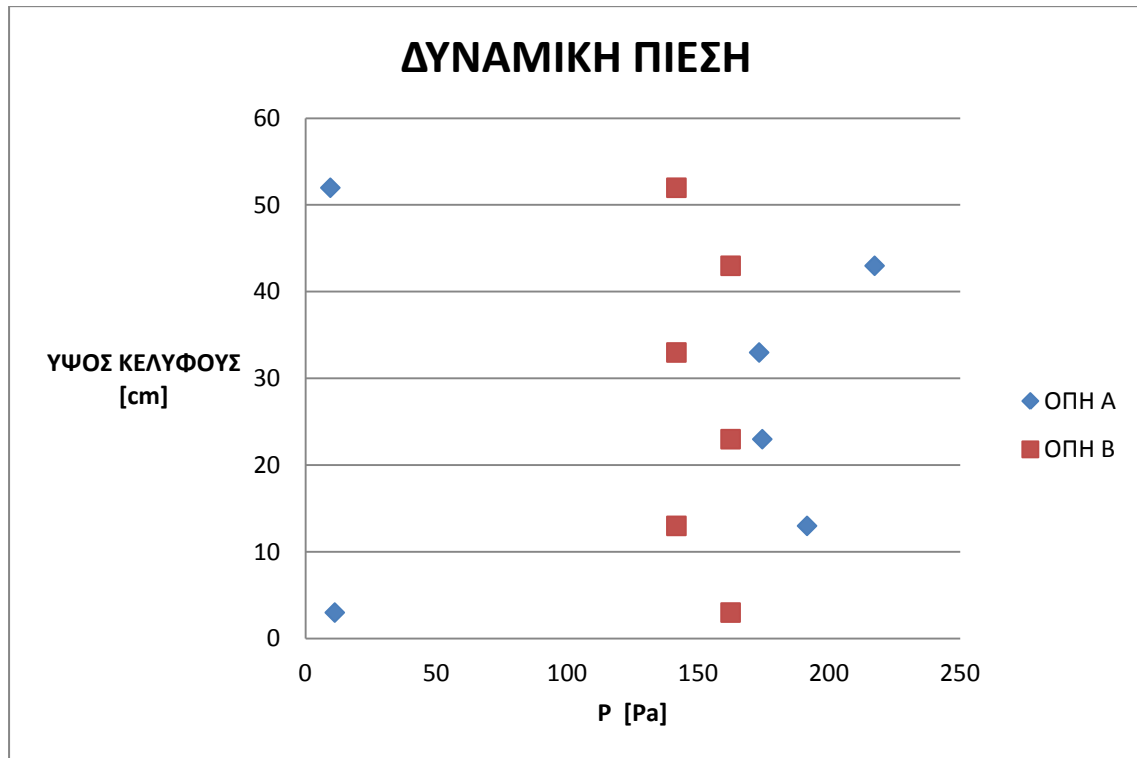
Σχήμα 3.24 Κατακόρυφο προφίλ ταχύτητας

Στο σχήμα 3.22 φαίνονται οι κατακόρυφες μετρήσεις ταχύτητας για συνθήκες πειράματος :

- Ταχύτητα ανέμου στην είσοδο της ανεμογεννήτριας ήταν  $4 \frac{m}{s}$ .
- Οι στροφές του άξονα ήταν 255 RPM.

Οι στροφές του άξονα της ανεμογεννήτριας ήταν οι μέγιστες που επιτεύχθηκαν με την συγκεκριμένη ταχύτητα εισόδου και κρίθηκε σκόπιμο να παρθούν κατακόρυφες μετρήσεις . Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν μέσω των οπών Α και Β (βλ. Σχ. 3.13).

Παρατηρείται , ότι η ταχύτητα στα ακραία σημεία καθ ύψος του κελύφους είναι μηδενική στο διάστημα, όπου το ρευστό περνάει μέσω του ακροφυσίου, ενώ αντίθετα στον διαχύτη δεν υπάρχει παρόμοια συμπεριφορά. Οι ταχύτητές που μετρήθηκαν μέσω της οπής Α, όπως ήταν αναμενόμενο είναι μεγαλύτερες από τις ταχύτητες της οπής Β και φαίνεται ένα πιο ξεκάθαρο παραβολικό προφίλ σε σχέση με την οπή Β.



Σχήμα 3.25 Κατακόρυφο προφίλ δυναμικής πίεσης

Το προφίλ δυναμικής πίεσης έχει παρόμοια συμπεριφορά με τις ταχύτητες που παρουσιάστηκαν στο σχήμα 3.24. Είναι απόλυτα φυσιολογικό καθώς, η πίεση αυτή είναι συναρτήση της ταχύτητας.

### 3.5.2 Διαγράμματα $C_p$ - $\lambda$

Η ενότητα αυτή, αναφέρεται στην δεύτερη κατηγορία των πειραματικών αποτελεσμάτων και πιο συγκεκριμένα, στις καμπύλες του συντελεστή ισχύος συναρτήσεως της αδιάστατης ταχύτητας ακροπτερυγίου, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Χαρακτηρίζει την συμπεριφορά κάθε τύπου ανεμογεννήτριας για διάφορες συνθήκες λειτουργίας. Βασικό μέλημα της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η εξαγωγή τέτοιου είδους καμπυλών για διάφορες ταχύτητες εισαγωγής του ανέμου στο κελύφος και διαφορετικές προσαρμογές του κελύφους οι οποίες ήταν:

1. Πλήρης παρουσία κελύφους
2. Πλήρης αφαίρεση κελύφους
3. Άνοιγμα πλαϊνών τοιχωμάτων, στο τμήμα της στένωσης του κελύφους, κατά  $4^\circ$ , την ελάχιστη δυνατή διάνοιξη.



Με αυτό τον τρόπο θα υπάρχει μια ξεκάθαρη εικόνα για την αεροδυναμική συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας, αλλά και η επίδραση της παρουσίας του κελύφους στην απόδοση της συγκεκριμένης ανεμογεννήτριας.

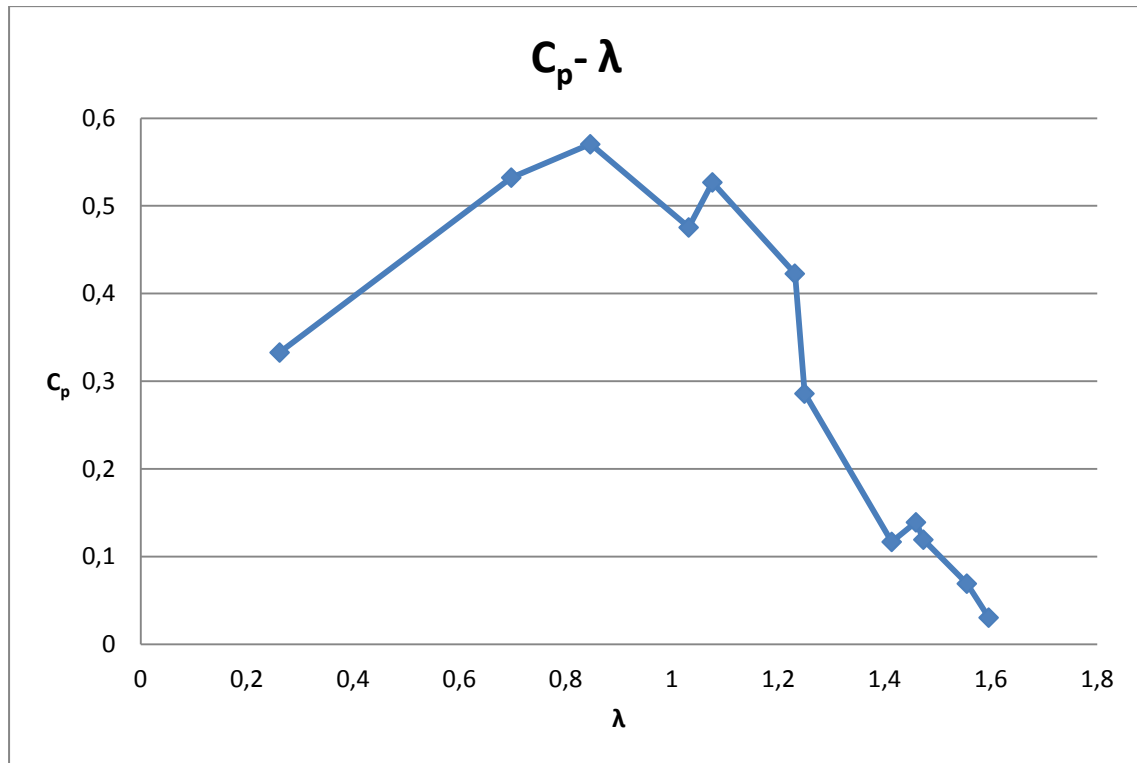
### 3.5.2.1 Διάγραμμα $C_p$ - $\lambda$ για πλήρη παρουσία κελύφους

Κατά την πλήρη παρουσία κελύφους εξήχθησαν χαρακτηριστικές καμπύλες απόδοσης για διαφορετικές ταχύτητες εισαγωγής οι οποίες είναι:

- $V_{air} = 3\text{m/s}$
- $V_{air} = 4\text{m/s}$
- $V_{air} = 5\text{m/s}$

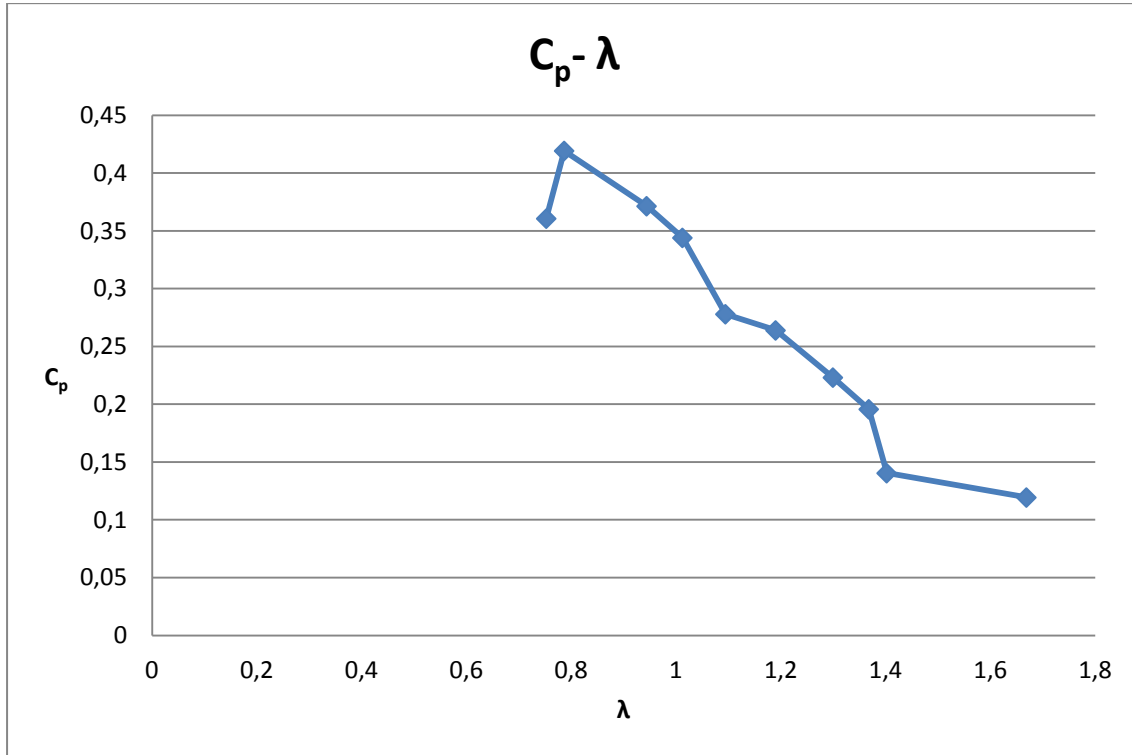
Αξίζει να σημειωθεί πως η ταχύτητα εισαγωγής του αέρα  $5\text{m/s}$  ήταν η υψηλότερη που μπορούσε να δημιουργήσει η αεροδυναμική σήραγγα του εργαστηρίου «Μηχανικής Ρευστών και Στροβιλομηχανών».

Για την εξαγωγή των καμπυλών απόδοσης απαιτείται ο προσδιορισμός των μεγεθών της ροπής του άξονα, την γωνιακής ταχύτητας της ανεμογεννήτριας και της θεωρητικής ισχύος του ανέμου. Τα αναλυτικά αποτελέσματα των μετρήσεων, βάσει των οποίων εξήχθησαν οι παρακάτω καμπύλες βρίσκονται στο Παράρτημα των μετρήσεων, το οποίο βρίσκεται στο τέλος της παρούσας διπλωματικής εργασίας.



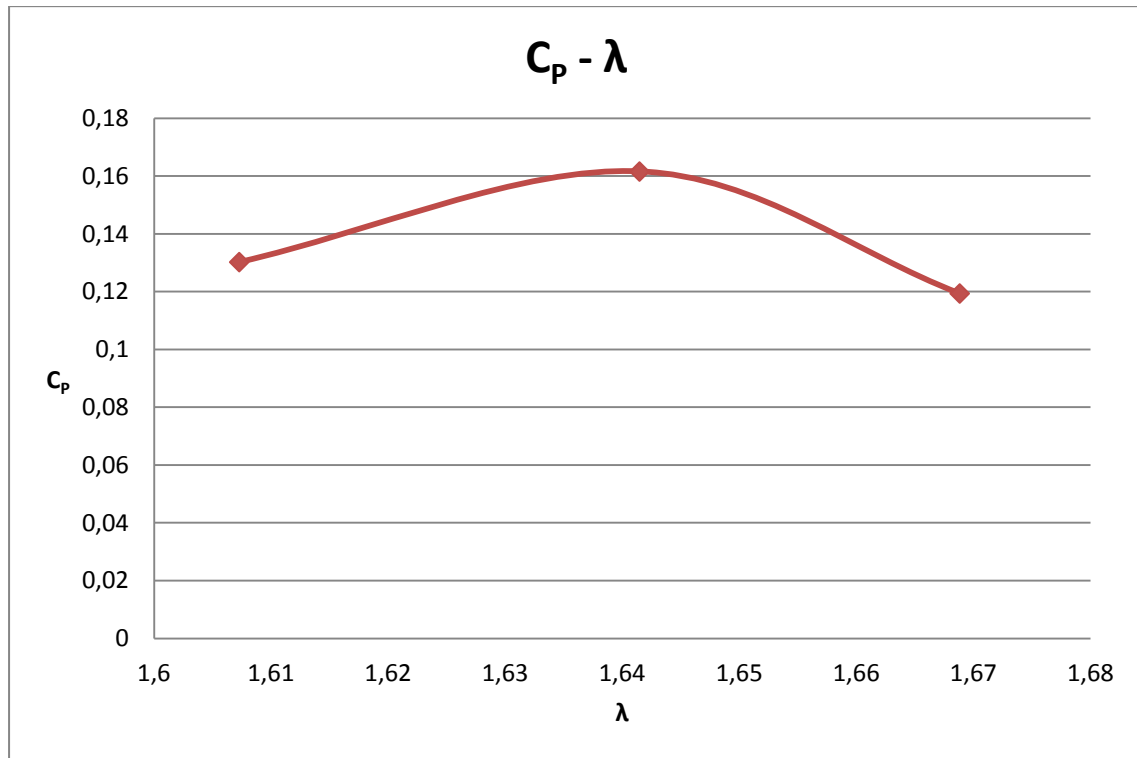
Σχήμα 3.26 C<sub>p</sub> - λ για  $v_{air} = 3 \frac{m}{s}$

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, πάρθηκαν δώδεκα μετρήσεις για διαφορετικές στροφές του άξονα της ανεμογεννήτριας και συνεπώς διαφορετικές τιμές της δύναμης. Η ταχύτητα εισόδου του αέρα στο κέλυφος ήταν σταθερή και ίση με  $3 \frac{m}{s}$  καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος. Παρατηρείτε, ότι η συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια έχει αύξον συντελεστή ισχύος για ταχύτητες ακροπτερυγίου από 0.26 έως 0.82. Για την τελευταία τιμή, βρέθηκε ο μέγιστος δυνατός συντελεστής ισχύος, που ισούται με 0.571, της διάταξης υπό τις προαναφερθέντες συνθήκες πειράματος. Στην συνέχεια, φαίνεται μια φθίνουσα πορεία του C<sub>p</sub> καθώς οι ταχύτητες ακροπτερυγίου αυξάνονται. Μοναδική εξαίρεση αποτελεί το σημείο για λ=1.07 και C<sub>p</sub>=0.527, όπου αποτελεί τοπικό μέγιστο. Ο συντελεστής απόδοσης της συγκεκριμένης πειραματικής διάταξης, εμφανίζει πολύ χαμηλές τιμές, σχεδόν μηδενικές για μεγάλα tip speed ratio. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα, ότι καθώς οι στροφές του άξονα αυξάνονται και η ροπή του άξονα μειώνεται, ενώ ταυτόχρονα η ταχύτητα του αέρα στην είσοδο μένει σταθερή, το μεγαλύτερο μέρος της αιολικής ισχύς παραμένει ανεκμετάλλευτο.



Σχήμα 3.27  $C_p - \lambda$  για  $v_{air} = 4 \frac{m}{s}$

Το παραπάνω σχήμα, απεικονίζει την καμπύλη  $C_p - \lambda$  της ανεμογεννήτριας, για ταχύτητα αέρα στην είσοδο του κελύφους  $4 \frac{m}{s}$ . Για να εξαχθεί, πάρθηκαν δέκα πειραματικές μετρήσεις. Παρατηρείται, ότι ο μέγιστος συντελεστής ισχύος είναι 0.419 και βρέθηκε για ταχύτητα ακροπερυγίου ίση με 0.787. Στην συνέχεια, ο συντελεστής ισχύος φθίνει συνεχώς καθώς η ταχύτητα ακροπερυγίου αυξάνει. Γίνεται αντιληπτό, σε σχέση με το Σχήμα 3.27 ότι, ενώ η ταχύτητα ανέμου στην είσοδο του κελύφους αυξήθηκε, ο μέγιστος συντελεστής ισχύος ελαττώθηκε. Από το παραπάνω, προκύπτει ότι η ανεμογεννήτρια έχει καλύτερη αεροδυναμική συμπεριφορά για ταχύτητα εισόδου του αέρα  $3 \frac{m}{s}$ . Αυτό επαφίεται στον σχεδιασμό της συγκεκριμένης κατασκευής. Ακόμα, παρατηρείται, ότι ο μέγιστος συντελεστής ισχύος επιτυγχάνεται και στις δυο περιπτώσεις για παραπλήσιες τιμές της ταχύτητας ακροπερυγίου, συμπεραίνοντας ότι η πειραματική μας διάταξη αποδίδει καλύτερα για  $\lambda$ , μικρότερα της μονάδας.

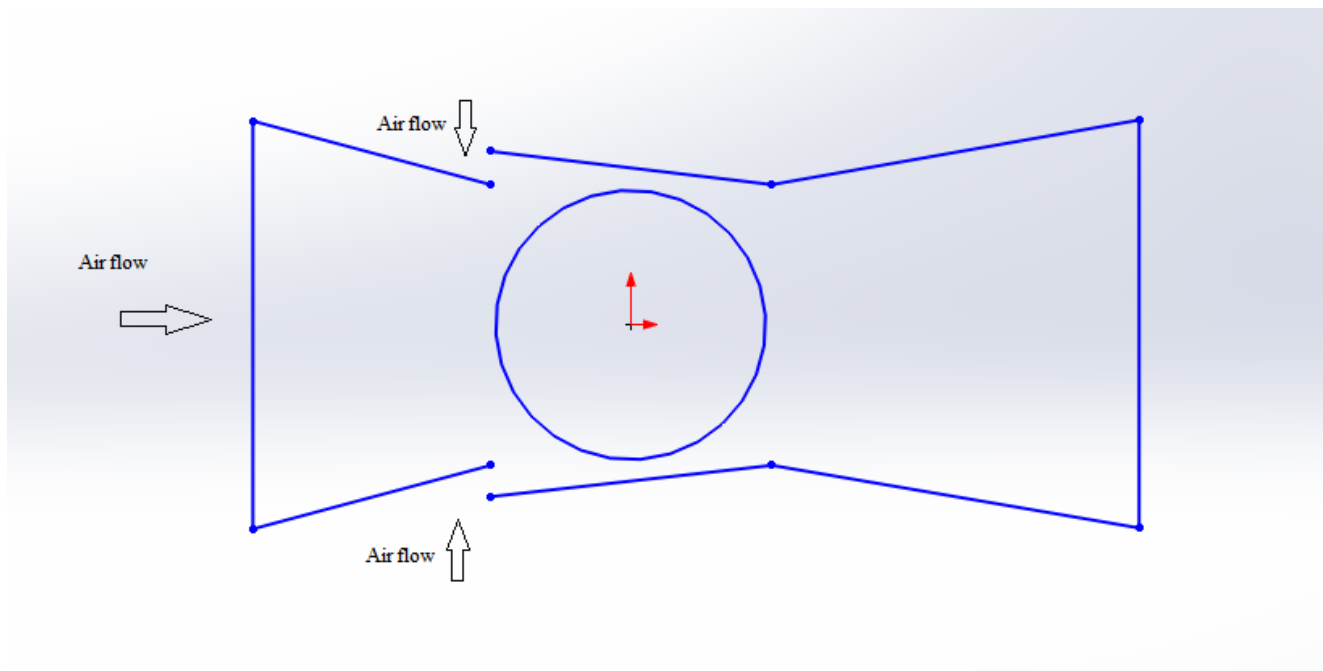


Σχήμα 3.28  $C_p - \lambda$  για  $v_{air} = 5 \frac{m}{s}$

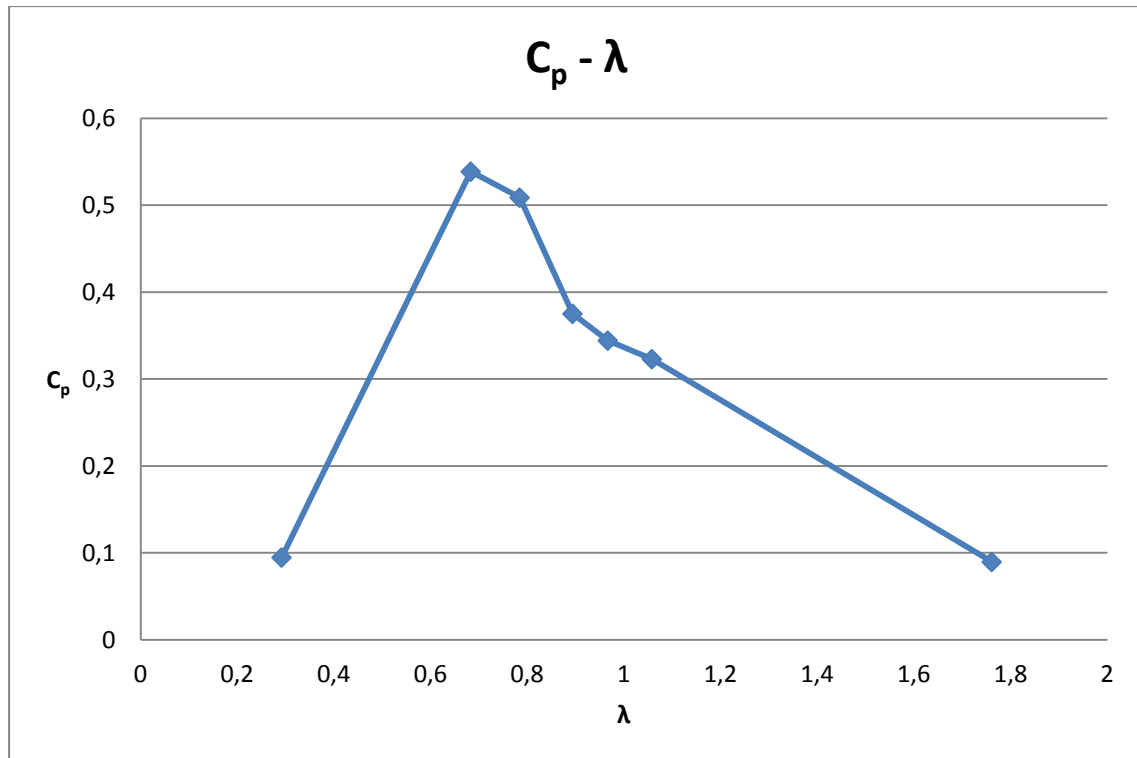
Το παραπάνω σχήμα απεικονίζει την καμπύλη  $C_p - \lambda$  της πειραματικής διάταξης για ταχύτητα ανέμου στην είσοδο του κελύφους  $5 \frac{m}{s}$ . Στο σχήμα απεικονίζονται τρεις μετρήσεις, καθώς η αρχική ταχύτητα εισαγωγής του ανέμου στο κέλυφος, ήταν η μέγιστη δυνατή που μπορούσε να δημιουργήσει η αεροδυναμική σήραγγα του εργαστηρίου και δεν ήταν δυνατό να επιτευχθεί για μεγάλο χρονικό διάστημα, ώστε να παρθούν παραπάνω μετρήσεις, θέτοντας την σε κίνδυνο. Παρατηρείται ότι, η καμπύλη του συντελεστή ισχύος είναι μετατοπισμένη σε υψηλότερες τιμές της αδιάστατης ταχύτητας ακροπτερυγίου, φυσικό ακόλουθο της αυξημένης ταχύτητας εισόδου, άρα και των στροφών της ανεμογεννήτριας. Αυτή η αύξηση όμως, φαίνεται να μην έχει θετική συνεισφορά στην απολαβή ισχύος από τον άνεμο. Η μέγιστη τιμή του  $C_p$  ανέρχεται σε 0.1616 για  $\lambda=1.64$ . Ο μέγιστος συντελεστής ισχύος έχει χαμηλή τιμή γιατί για υψηλές τιμές  $\lambda$ , έχει παρατηρηθεί (βλ. Σχ. 3.26, 3.27) ότι το  $C_p$  μειώνεται αισθητά. Η περιοχή της αδιάστατης ταχύτητας ακροπτερυγίου κοντά στο 0.8 ήταν αδύνατο να επιτευχθεί πειραματικά για την παραπάνω αρχική συνθήκη ταχύτητας ανέμου.

### 3.5.2.2 $C_p - \lambda$ με διάνοιξη των πλαϊνών τοιχωμάτων

Το επόμενο βήμα για την πλήρη αξιολόγηση της πειραματικής διαδικασίας, ήταν η διάνοιξη των πλαϊνών τοιχωμάτων του κελύφους στην περιοχή της στένωσης (βλ.Σχ.3.29). Πιο συγκεκριμένα, δημιουργήθηκε γωνία διάνοιξης ίση με  $4^\circ$ , η ελάχιστη δυνατή που μπορούσε να πραγματοποιηθεί. Βασικό μέλημα της παρούσας ιδέας, ήταν η δημιουργία συνθηκών υποπίεσης στα ανοίγματα των τοιχωμάτων. Είναι γνωστό, ότι το ρευστό μετακινείται από περιοχές υψηλής πίεσης σε περιοχές χαμηλότερης πίεσης. Με αυτό τον τρόπο, δημιουργήθηκαν τρία ρεύματα ανέμου αντί για ένα επιτυγχάνοντας αύξηση παροχής του ανέμου μέσα στο κέλυφος. Στα σημεία διάνοιξης, η ταχύτητα που μετρήθηκε έφτανε μέχρι και τα  $16.5 \frac{m}{s}$ . Αξίζει να τονιστεί, ότι στα διαγράμματα που ακολουθούν θεωρείται ταχύτητα εισόδου του ανέμου αυτή που βρίσκεται στην είσοδο του ακροφυσίου.

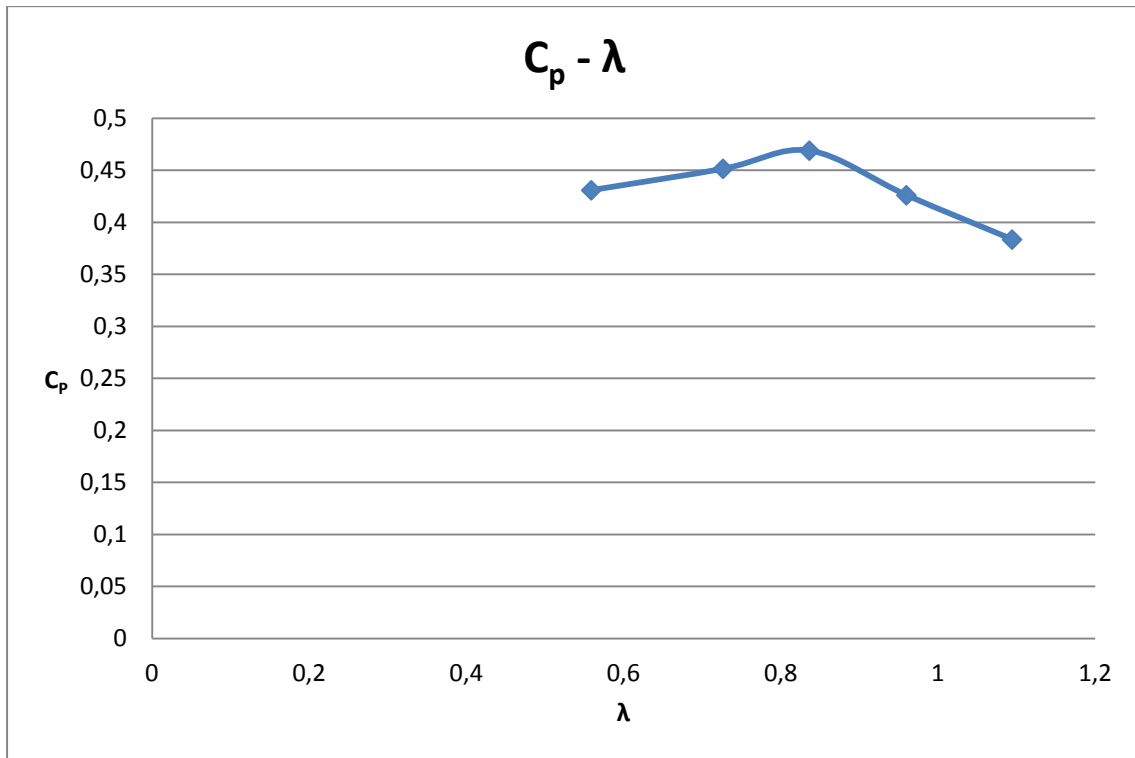


Σχήμα 3.29 Σχηματική απεικόνιση κελύφους με διάνοιξη



Σχήμα 3.30  $C_p - \lambda$  για  $v_{air} = 3 \frac{m}{s}$

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται η καμπύλη ισχύος για ταχύτητα εισόδου  $3 \frac{m}{s}$ . Η μέγιστη τιμή του  $C_p$  είναι 0.539 και επιτυγχάνεται για  $\lambda=0.683$ . Παρατηρείται, ότι με την διάνοιξη των πλαϊνών τοιχωμάτων, ο μέγιστος δυνατός συντελεστής ισχύος βρίσκεται σε λίγο μικρότερη αδιάστατη ταχύτητα ακροπτερυγίου. Ακόμα, αξίζει να σημειωθεί ότι, παρά τις αρχικές εκτιμήσεις για αύξηση του  $C_p$  τα πολύπλοκα φαινόμενα που δημιουργούνται, λόγω των τριών ρευμάτων εισαγωγής φαίνεται να μην επιτρέπουν την περαιτέρω αύξηση του συντελεστή ισχύος. Καθώς το  $\lambda$  αυξάνει, για τιμές μεγαλύτερες του 0.8, φαίνεται ότι τα ποσά απολαβής της ισχύος του άξονα από το ρεύμα ανέμου μειώνονται συνεχώς, ενισχύοντας τα προαναφερθέντα αποτελέσματα για βέλτιστη αεροδυναμική συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας για τιμές  $\lambda$  κοντά στο 0.8.



Σχήμα 3.31  $C_p - \lambda$  για  $v_{air} = 3.5 \frac{m}{s}$

Στο παραπάνω σχήμα, φαίνεται η καμπύλη συντελεστή ισχύος της ανεμογεννήτριας συναρτήσει της αδιάστατης ταχύτητας ακροπτερυγίου για ταχύτητα αέρα στην είσοδο του ακροφυσίου  $3.5 \frac{m}{s}$ . Η μικρή αύξηση της ταχύτητας εισόδου, οδηγεί σε μικρότερο μέγιστο συντελεστή ισχύος. Η τιμή του είναι 0.469 και επιτυγχάνεται για  $\lambda = 0.836$ . Η συγκεκριμένη ταχύτητα στην είσοδο του ακροφυσίου ήταν η μέγιστη δυνατή που μπορούσε να επιτευχθεί κάτω από αυτές τις συνθήκες. Για  $0.5 \geq \lambda \geq 1.2$  παρατηρήθηκε, αισθητή μείωση του συντελεστή απόδοσης, η οποία δεν φαίνεται στο σχήμα.

### 3.5.2.3 $C_p$ - $\lambda$ με πλήρη απουσία κελύφους

Το τελευταίο βήμα για την αξιολόγηση της πειραματικής διαδικασίας, ήταν η πλήρης αφαίρεση του κελύφους. Με αυτό τον τρόπο θα υπάρχει ολοκληρωμένη εικόνα για την επίδραση της παρουσίας του κελύφους, στην απόδοση της ανεμογεννήτριας.

Όμως, κατά την αφαίρεση του κελύφους παρατηρήθηκε ότι η ανεμογεννήτρια δεν ήταν δυνατόν να ξεκινήσει την περιστροφή της, ακόμη και αν η αεροδυναμική σήραγγα του εργαστηρίου, λειτουργούσε στα κατασκευαστικά της όρια. Όπως έχει ήδη αναφερθεί παραπάνω, κατά την λειτουργία της ανεμογεννήτριας, παρουσία του κελύφους, η ταχύτητα του ανέμου στο τέλος του ακροφυσίου ξεπερνούσε τα 15 m/s. Βέβαια, η αεροδυναμική σήραγγα δεν ήταν δυνατό να επιτύχει μια τέτοιου μεγέθους ταχύτητα απουσία του κελύφους. Έτσι, δόθηκε μια αρχική ροπή στρέψης στον άξονα της ανεμογεννήτριας, η οποία όμως δεν ήταν ικανή να διατηρήσει την περιστροφική κίνηση της για το χρονικό διάστημα των μετρήσεων. Η περιστροφική ταχύτητα της ανεμογεννήτριας συνεχώς έφθινε, με αποτέλεσμα να σταματά μετά από λίγες περιστροφές.

Ο μηδενικός συντελεστής ισχύος της ανεμογεννήτριας, όταν αυτή θέτεται στην παραπάνω συνθήκες λειτουργίας, είναι αποτέλεσμα του μεγάλου βάρους της κατασκευής. Με την μέγιστη ταχύτητα ανέμου που μπορεί να δημιουργήσει η αεροδυναμική σήραγγα, η οποία είναι 5 m/s, οι δυνάμεις που ασκούνται από τον άνεμο στον δρομέα δεν είναι ικανές να ξεπεράσουν την ροπή αδράνειας του.

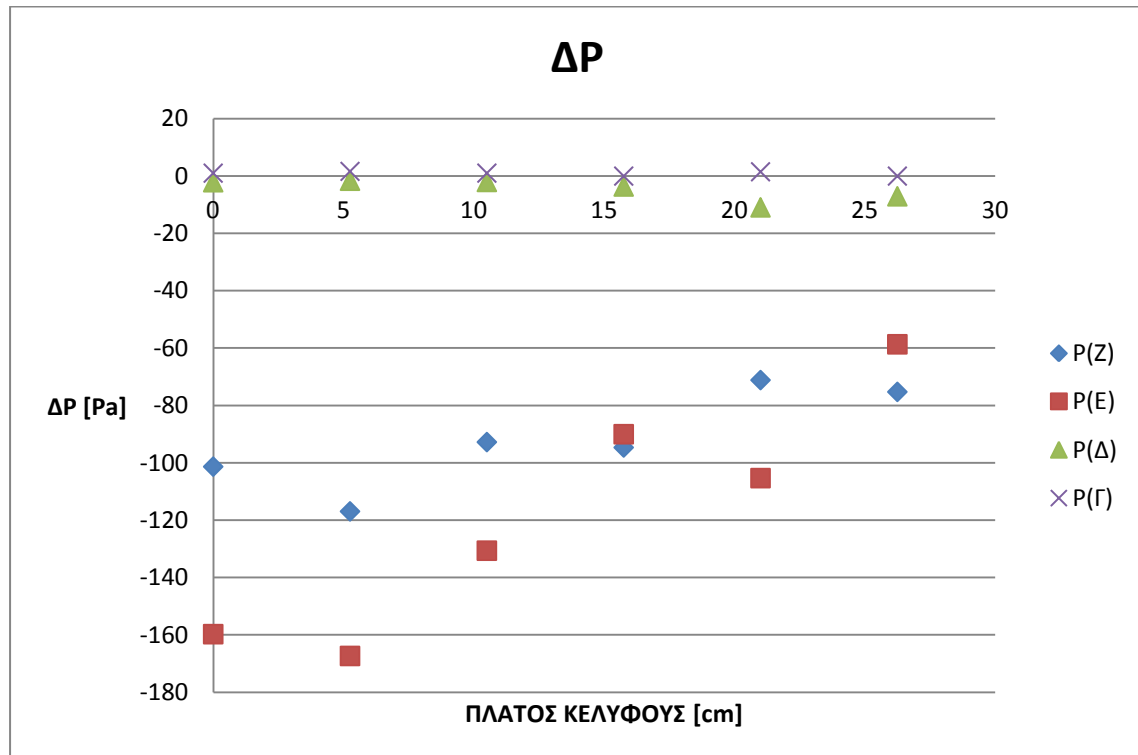
Για αυτόν τον λόγο, αποφασίστηκε ο σχεδιασμός νέας πειραματικής διάταξης με μικρότερο βάρος, άρα και ροπή αδράνειας, ο οποίος αναλύεται διεξοδικά στο Κεφάλαιο 4 της παρούσας διπλωματικής εργασίας.



### 3.6 Ανάλυση ροϊκού πεδίου πιέσεων

Στην παρούσα ενότητα της διπλωματικής εργασίας, θα αναλυθεί το ροϊκό πεδίο μέσω της διαφοράς πίεσης που δημιουργείται κατά την διέλευση του ανέμου από το κέλυφος. Κρίθηκε σκόπιμη η αναλυτική παράθεση των αποτελεσμάτων για τις συνθήκες λειτουργίας, στις οποίες η ανεμογεννήτρια έχει τον μέγιστο συντελεστή ισχύος, δηλαδή για αδιάστατη ταχύτητα ακροπτερυγίου  $\lambda = 0.82$  και  $C_p = 0.571$ .

#### 3.6.1 Οριζόντιο προφίλ πιέσεων



Σχήμα 3.32 Οριζόντιο προφίλ ολικών πιέσεων

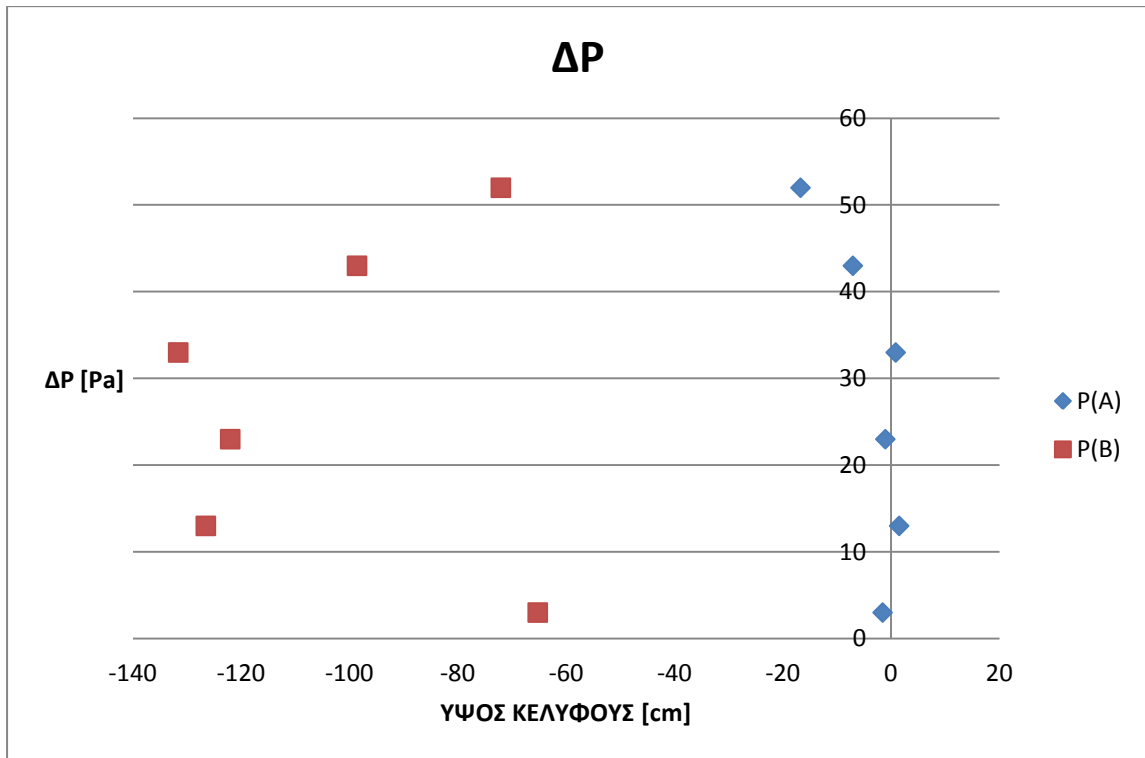
Στο Σχήμα 3.32 παρατηρείτε πως στην οπή Γ δεν υπάρχει πτώση πίεσης, η ολική πίεση είναι ίση ή και λίγο μεγαλύτερη από την ατμοσφαιρική. Θεωρείτε

γνωστό ότι κατά την διέλευση ρευστού από ένα ακροφύσιο, η ροή επιταχύνεται. Όμως, επιτάχυνση της ροής σημαίνει και πτώση της ολικής του πίεσης, κάτι που φαίνεται ξεκάθαρα στις μετρήσεις της οπής Δ, όπου υπάρχει μια μικρή πτώση πίεσης που φτάνει έως τα 10 Pa. Στη συνέχεια, στις μετρήσεις της οπής Ε εμφανίζεται η μέγιστη πτώση πίεσης, η οποία ανέρχεται στα 167.3 Pa. Σε αυτό το σημείο είναι εμφανής η αλληλεπίδραση του ρευστού με τον δρομέα της ανεμογεννήτριας. Ο δρομέας εκμεταλλεύεται την κινητική ενέργεια του ρευστού και απάγει ενέργεια, η οποία μεταφράζεται σε πτώση πίεσης. Το ρευστό βγαίνει αποδυναμωμένο στον ομόρροο της ανεμογεννήτριας. Για αυτό τον λόγο είναι αρκετά σημαντική η παρουσία του διαχύτη, η χρήση του οποίου εξυπηρετεί στην ανάκτηση της πίεσης του ρευστού, ώστε να συνεχίσει την ροή του. Αυτή η επίδραση του διαχύτη φαίνεται στις μετρήσεις της οπής Ζ, όπου η πτώση πίεσης του ρευστού αρχίζει να ελλατώνεται.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι παραπάνω μετρήσεις πάρθηκαν για αρκετές διαφορετικές συνθήκες, όμως τα προφίλ της ολικής πίεσης δεν διέφεραν πολύ μεταξύ τους. Αυτό που παρατηρήθηκε είναι ότι στο Σχήμα 3.32, το οποίο όπως έχει ήδη ειπωθεί αναφέρεται στις βέλτιστες πειραματικές συνθήκες λειτουργίας της ανεμογεννήτριας, υπήρχε η πιο σημαντική πτώση πίεσης σε σύγκριση με τις μετρήσεις άλλων συνθηκών. Έτσι αποδείχτηκε και πειραματικά ότι όσο μεγαλύτερη είναι η πτώση πίεσης, τόσο μεγαλύτερη είναι η παραγόμενη ροπή, άρα και η απόδοση της ανεμογεννήτριας.

### **3.6.2 Κατακόρυφα προφίλ πιέσεων**

Για τον βέλτιστο συντελεστή ισχύος πάρθηκαν και κατακόρυφες μετρήσεις ολικής πίεσης (βλ. Σχ.3.33), για την πλήρη μελέτη του ροϊκού πεδίου στο τρισδιάστατο επίπεδο.



Σχήμα 3.33 Κατακόρυφο προφίλ ταχύτητας ολικών πιέσεων

Στο παραπάνω σχήμα παρατηρείται το παραβολικό προφίλ των ολικών πιέσεων καθ ύψος του κελύφους. Είναι εμφανής η διαφορά στην πτώση πίεσης ανάμεσα στις μετρήσεις της οπής A και την οπής B. Όπως αναμενόταν, στην αρχή του ακροφυσίου, όπου η ταχύτητα δεν έχει επιταχυνθεί πλήρως, η ολική πίεση σχεδόν ισούται με την ατμοσφαιρική. Στον διαχύτη φαίνεται ξεκάθαρα ότι έχει προηγηθεί απολαβή ισχύος του ρευστού από τον δρομέα, με την πτώση πίεσης να ανέρχεται στα 131.6 Pa.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΝΕΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

### 4.1 Εισαγωγή

Κατά την πειραματική διερεύνηση της υπάρχουσας διάταξης, η οποία αναλύθηκε διεξοδικά στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, παρατηρήθηκε ότι δεν ήταν δυνατή η επίτευξη υψηλών τιμών της αδιάστατης ταχύτητας ακροπερυγίου λ. Για αυτό τον λόγο, χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα Qblade προσπαθήσαμε να προβλέψουμε την αεροδυναμική συμπεριφορά διάφορων αεροτομών τύπου NACA. Επιπλέον, κατά την πλήρη αφαίρεση του κελύφους (shroud), όπως έχει ήδη αναφερθεί, παρατηρήθηκε ότι ακόμα και όταν η αεροδυναμική σήραγγα του εργαστηρίου τέθηκε στα όρια λειτουργίας της, η ανεμογεννήτρια δεν ξεκινούσε την περιστροφή της. Έτσι, γεννήθηκε η ιδέα του σχεδιασμού νέου δρομέα με μειωμένο βάρος και ροπή αδράνειας και επιπρόσθετο χειροκίνητο μηχανισμό, ο οποίος επιτρέπει την αλλαγή της γωνίας τοποθέτησης των πτερυγίων. Με αυτό τον τρόπο θα μπορούσε να μελετηθεί πειραματικά το κατά πόσο επηρεάζει η κλίση των πτερυγίων την απόδοση της ανεμογεννήτριας.

Αν συνοπλογίσουμε τα παραπάνω, μέσω του προγράμματος Solidworks σχεδιάστηκε εξολοκλήρου η νέα ανεμογεννήτρια. Η διαδικασία σχεδιασμού παραθέεται διεξοδικά στο παρόν κεφάλαιο.

### 4.2 Το λογισμικό Qblade

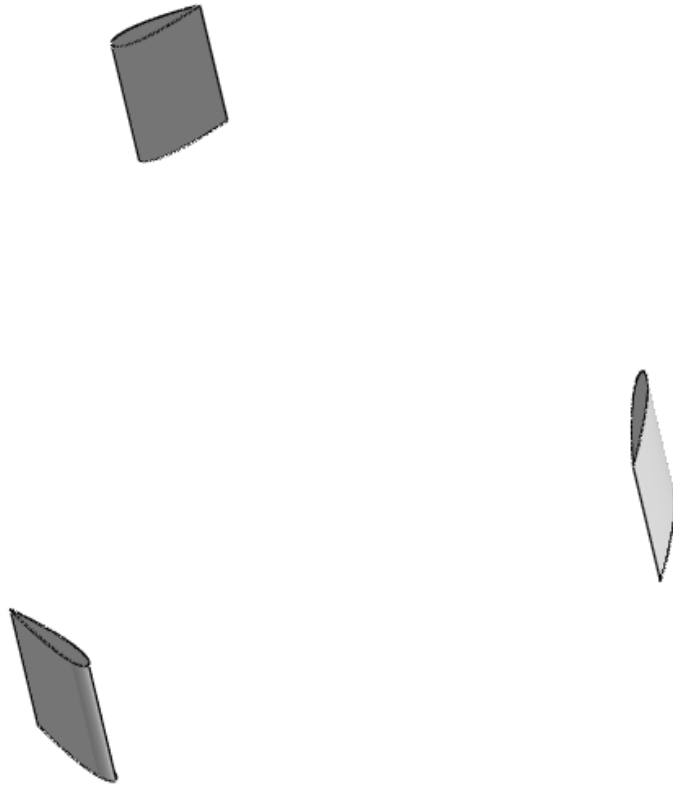
Το Qblade είναι ένα λογισμικό ανοιχτού πηγαίου κώδικα, το οποίο ουσιαστικά βασίζεται στην ένωση δυο άλλων ευρέως διαδεδομένων λογισμικών του XFOIL και του XFLRS, με τα οποία γίνεται δυνατή η γρήγορη σχεδίαση αεροτομών και η ανάλυση τους, ώστε να προκύψουν οι πίνακες των αεροδυναμικών τους χαρακτηριστικών και να χρησιμοποιηθούν στην τελική σχεδίαση και ανάλυση δρομέων και ανεμογεννητριών. Επιπλέον, το συγκεκριμένο λογισμικό επιτρέπει την μετεπεξεργασία των δεδομένων ανάλυσης του δρομέα και της ανεμογεννήτριας ώστε ο χρήστης να είναι σε θέση να αντιληφθεί την επίδραση διάφορων σχεδιαστικών παραμέτρων των πτερυγίων και του δρομέα. Σε αυτό το σημείο γίνεται η παράθεση των χαρακτηριστικών του προγράμματος, τα οποία είναι τα εξής:

- Σχεδιασμός και προσομοίωση αεροτομών με το XFOIL.

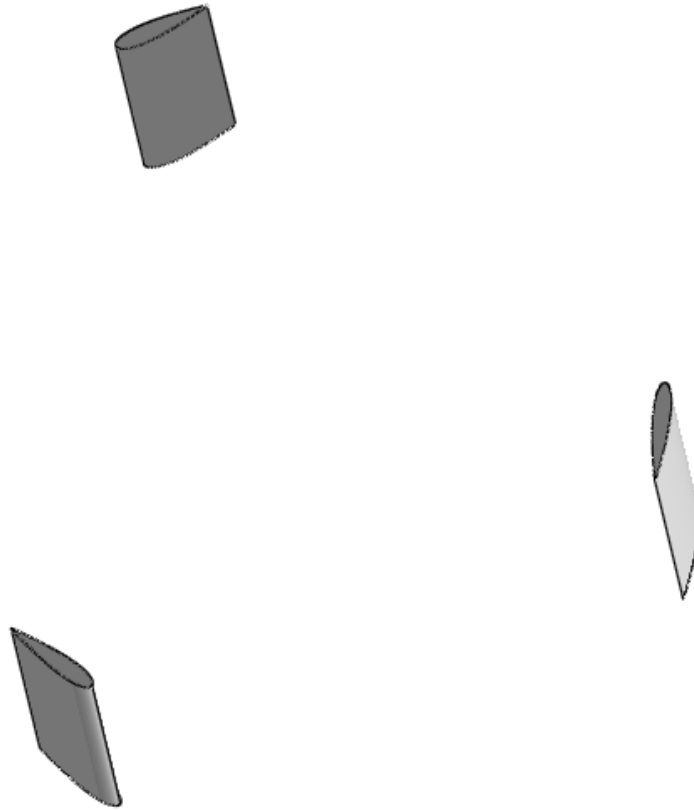
- Παρεκβολή των παραγόμενων ή εισερχόμενων από το XFOIL αεροδυναμικών χαρακτηριστικών για γωνίες παρεκβολής μέχρι  $360^\circ$ .
- Σχεδιασμός, βελτιστοποίηση και τρισδιάστατη απεικόνιση πτερυγίων.
- Ορισμός ανεμογεννήτριας (πτερύγιο, σύστημα ελέγχου, τύπος ανεμογεννήτριας κτλ.)
- Υπολογισμός της απόδοσης του δρομέα και της ανεμογεννήτριας (λαμβάνοντας υπόψη το πτερύγιο, το σύστημα ελέγχου, τον τύπο ανεμογεννήτριας, τις απώλειες κτλ.) σε σχέση με ένα εύρος τιμών της αδιάστατης ταχύτητας ακροπτερυγίου  $\lambda$ , ή ένα εύρος ταχυτήτων  $U_\infty$ , με χρήση των αλγορίθμων BEM (Blade Element Momentum) για τις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα και DMS (Double Multiple Streamtube) για τις ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα και επιλογή των χρησιμοποιούμενων παραμέτρων διόρθωσης.
- Πολυπαραμετρικές προσομοιώσεις του δρομέα.
- Υπολογισμός της ετήσιας ενεργειακής απόδοσης με την κατανομή Weibull.
- Ορισμός μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων του πτερυγίου και ανάλυση ιδιομορφών.
- Δημιουργία τυρβώδους πεδίου ταχύτητας.
- Χρονικά μεταβαλλόμενες προσομοιώσεις οι οποίες βασίζονται στην θεωρία γραμμής άνωσης (line simulation) τόσο για τις οριζόντιου όσο και για τις κατακόρυφου άξονα ανεμογεννήτριες
- Πλήρης σύζευξη με το λογισμικό AeroDyn/FAST του NREL (National Renewable Energy Laboratory) για ανάλυση
- Δυνατότητα εξαγωγής όλων των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης τόσο της γεωμετρίας όσο και του πτερυγίου

#### 4.2.1 Μελέτη αεροτομών

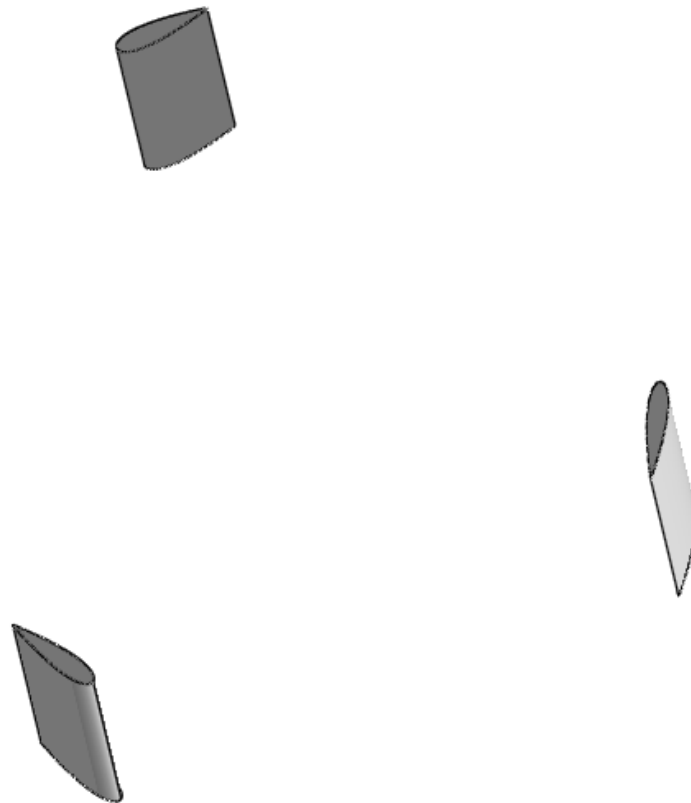
Αναζητώντας την αεροτομή η οποία θα βελτιστοποιούσε τον συντελεστή ισχύος της νέας ανεμογεννήτριας συναρτήσει των συνθηκών του πειράματος (αδιάστατη ταχύτητα ακροπτερυγίου  $\lambda$ ), μελετήθηκε η αεροδυναμική συμπεριφορά παραπάνω από πενήντα αεροτομών τύπου NACA τεσσάρων ή πέντε ψηφίων. Κρίθηκε σκόπιμη η παράθεση αυτών με τα σημαντικότερα αποτελέσματα, των συμμετρικών αεροτομών NACA 0015(ήδη υπάρχουσα), NACA 0018, NACA 0021 και των μη-συμμετρικών NACA 4412, NACA 4415, NACA 5522.



Σχήμα 4.1 Άποψη δρομέα NACA 0015

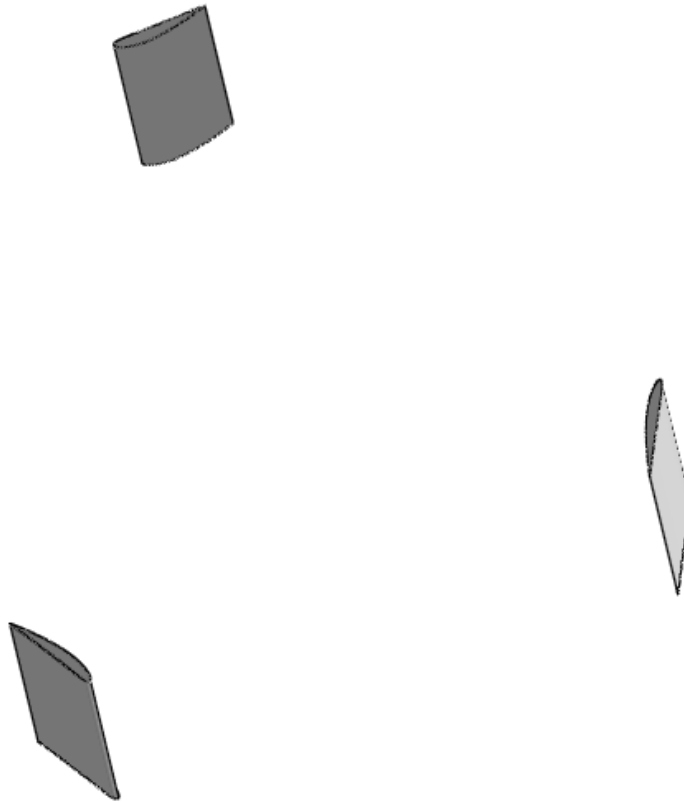


Σχήμα 4.2 Άποψη δρομέα NACA 0018

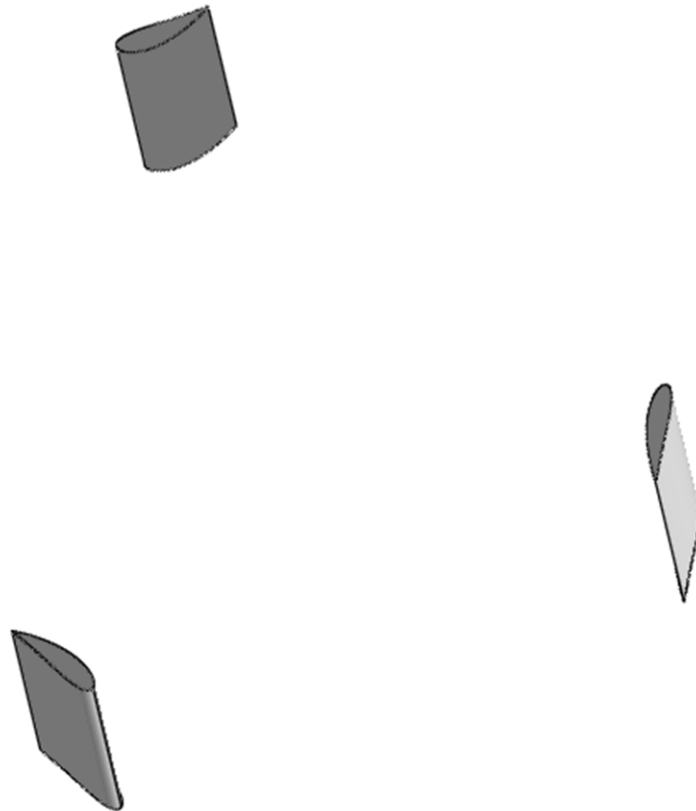


Σχήμα 4.3 Άποψη δρομέα NACA 0021





Σχήμα 4.4 Άποψη δρομέα NACA 4412



Σχήμα 4.5 Άποψη δρομέα NACA 5522

#### 4.2.2 Αεροδυναμική ανάλυση με το XFOIL

Η αεροδυναμική ανάλυση των παραπάνω τύπων αεροτομών έγινε με χρήση του XFOIL το οποίο είναι ενσωματωμένο στο πρόγραμμα Qblade. Για να εξάχθουν οι αδιάστατοι συντελεστές άνωσης, ώσης και αντίστασης, χρειάζεται να υπολογιστεί ο αριθμός Reynolds της ροής για τις συνθήκες διεξαγωγής του πειράματος.

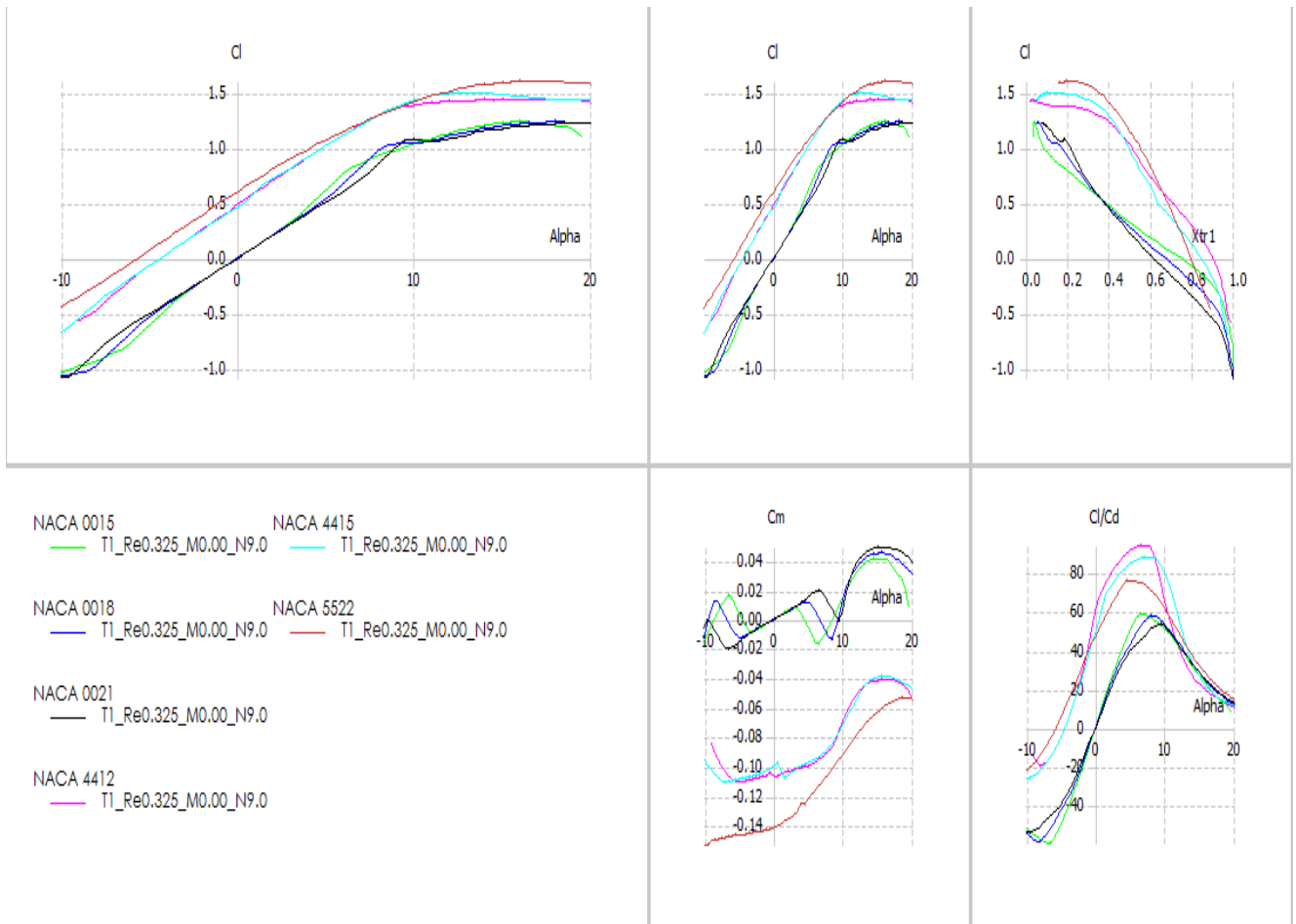
Ο αριθμός Reynolds ορίζεται ως εξής:

$$Re = \frac{U_R c}{\nu} \quad (4.1)$$

όπου  $\rho$  η πυκνότητα του αέρα,  $U_R$  η σχετική ταχύτητα του ανέμου,  $c$  η χορδή της αεροτομής και  $\nu$  το κινηματικό ιξώδες του αέρα. Για τις συνθήκες του πειράματος που αναλύθηκαν στον Κεφάλαιο 3 έχουμε  $Re = 32.5230 * 10^4$ . Επιπλέον, ο αριθμός Mach της ροής είναι πολύ μικρός, αφού η μέγιστη ταχύτητα του ανέμου μέσα στο κέλυφος ήταν σχεδόν αμελητέα σε σχέση με την ταχύτητα του ήχου και η ροή είναι φανερά υποηχητική.

Σύμφωνα με τα παραπάνω είχαμε τα ακόλουθα αποτελέσματα (βλ.Σχ.4.6).

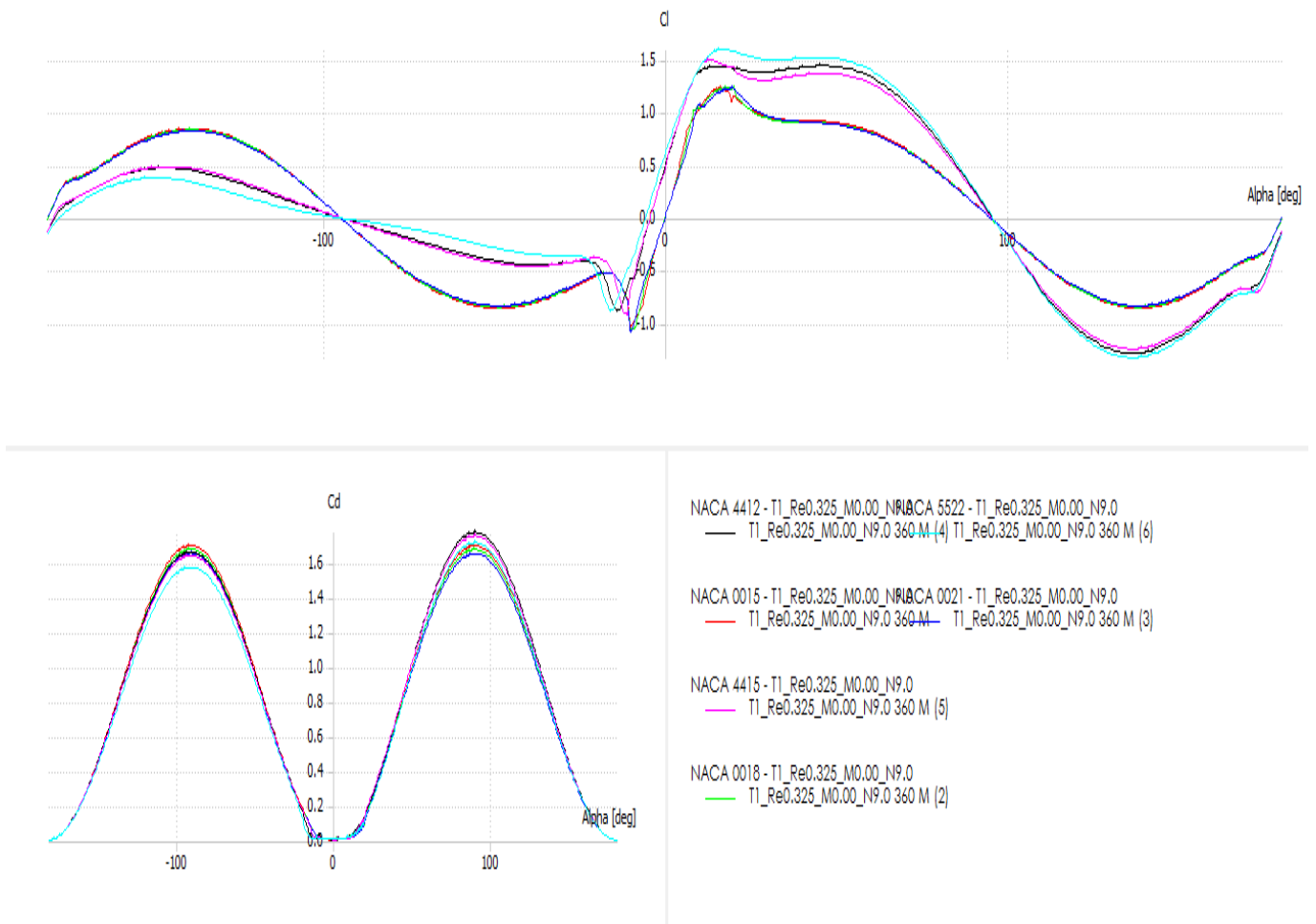
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΚΑΘΕΤΟΥ  
ΑΞΟΝΑ ΜΕ ΚΕΛΥΦΟΣ(SHROUD)



Σχήμα 4.6 Αδιάστατοι συντελεστές αεροτομών

Τα παραπάνω αποτελέσματα προήλθαν για γωνίες προσβολής από -10 έως 20 μοίρες. Θεωρείται γνωστό ότι το πτερύγιο κατά την λειτουργία του, μπορεί να βρεθεί εκτός του παραπάνω εύρους γωνιών, οι οποίες μελετήθηκαν με το XFOIL. Το πρόγραμμα Qblade παρέχει την δυνατότητα παρεκβολής των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών σε εύρος  $360^\circ$  (βλ.Σχ.4.7) κι έτσι δίνεται μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα για την αεροδυναμική συμπεριφορά της αεροτομής.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΚΑΘΕΤΟΥ  
ΑΞΟΝΑ ΜΕ ΚΕΛΥΦΟΣ(SHROUD)



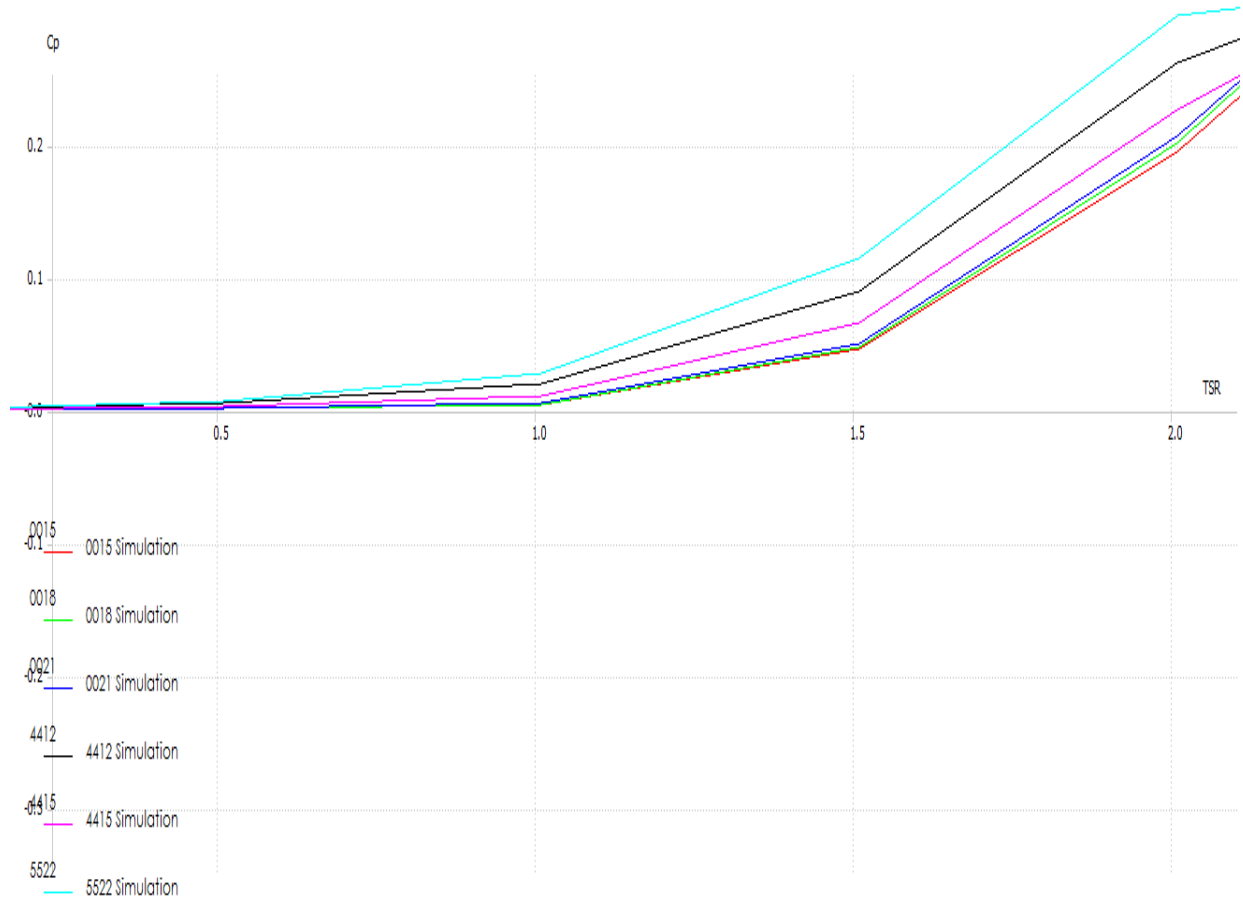
Σχήμα 4.7 Αεροδυναμικά χαρακτηριστικά αεροτομών σε εύρος 360°

Στο Σχήμα 4.7 φαίνεται ότι η αεροτομή NACA 5522 (μπλε γραμμή), έχει για ένα αρκετά μεγάλο εύρος γωνιών τον υψηλότερο συντελεστή άνωσης και τον χαμηλότερο συντελεστή αντίστασης.

### 4.3 Ανάλυση δρομέα ανεμογεννήτριας

Η ανάλυση του δρομέα μιας ανεμογεννήτριας καθέτου άξονα γίνεται μέσω της μεθόδου DMS (Double Multiple Streamtube), η οποία έχει αναλυθεί στην ενότητα 2.3.2 της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Μέσω του προγράμματος Qblade εξήχθη το παρακάτω (βλ.Σχ.4.8) χαρακτηριστικό διάγραμμα ( $C_p - \lambda$ ) των αναφερθέντων αεροτομών.



Σχήμα 4.8 Συγκριτικό διάγραμμα ( $C_p - \lambda$ )

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, κατά την διάρκεια και τις συνθήκες της πειραματικής διερεύνησης παρατηρήθηκε ότι οι τιμές της αδιάστατης ταχύτητας ακροπερυγίου δεν ξεπερνούσαν την τιμή  $\lambda=1.7$ . Για αυτό το λόγο, στόχος της παρούσας μελέτης είναι η επιλογή μιας αεροτομής όπου η αεροδυναμική συμπεριφορά της σε χαμηλά tsp (tip speed ratio) θα βελτιώσει το συντελεστή ισχύος της ανεμογεννήτριας.

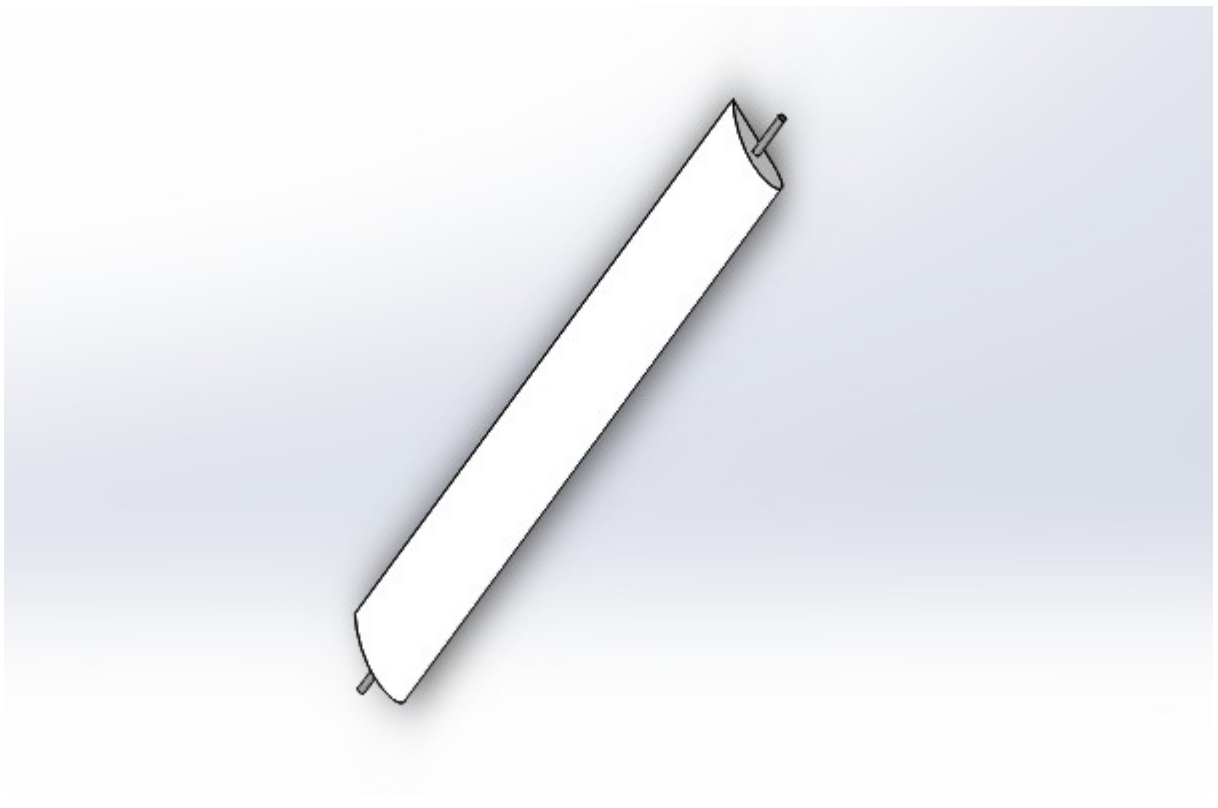
Σύμφωνα με τις συνθήκες που τέθηκαν στο πρόγραμμα Qblade, παρατηρείται ότι η αεροτομή NACA 5522 έχει τον υψηλότερο συντελεστή ισχύος  $C_p$ , περίπου τρεις φορές μεγαλύτερο από τον συντελεστή ισχύος της ήδη υπάρχουσας αεροτομής NACA 0015.

Έτσι, επιλέχθηκε η νέα ανεμογεννήτρια να αποτελείται από τρία πτερύγια NACA 5522, τα οποία σχεδιάστηκαν στο πρόγραμμα Solidworks

#### 4.4 Σχεδιασμός των πτερυγίων

Για την κατασκευή των πτερυγίων θα χρησιμοποιηθεί ως υλικό το ανθρακόνημα έτσι ώστε να διατηρείται η ροπή αδράνειας των πτερυγίων χαμηλή κατά την περιστροφή τους, λόγω βάρους του υλικού αλλά και ανθεκτικότητας κατά τα δυναμικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα.

Το ύψος των πτερυγίων είναι 500mm ενώ η χορδή τους είναι 70mm. Θεωρείται γνωστό ότι σε μια αεροτομή τύπου NACA τεσσάρων ψηφίων, τα δύο τελευταία καταδεικνύουν το ποσοστό της χορδής που μεταφράζεται στο μέγιστο πάχος του πτερυγίου. Στην συγκεκριμένη περίπτωση τα πτερύγια αποτελούνται από την αεροτομή NACA 5522, άρα το μέγιστο πάχος του πτερυγίου είναι  $0.22 \times 70mm = 15.4mm$ . Επιπλέον, στα πτερύγια ανοίχτηκε μια διαμπερής οπή 7mm (βλ. Σχ.4.9), μέσω της οποίας διέρχεται η ντίτσα που επιτρέπει την αλλαγή της γωνίας τοποθέτησης των πτερυγίων η οποία με την σειρά της μεταβάλλει και την γωνία προσβολής του ρευστού πάνω στα πτερύγια.



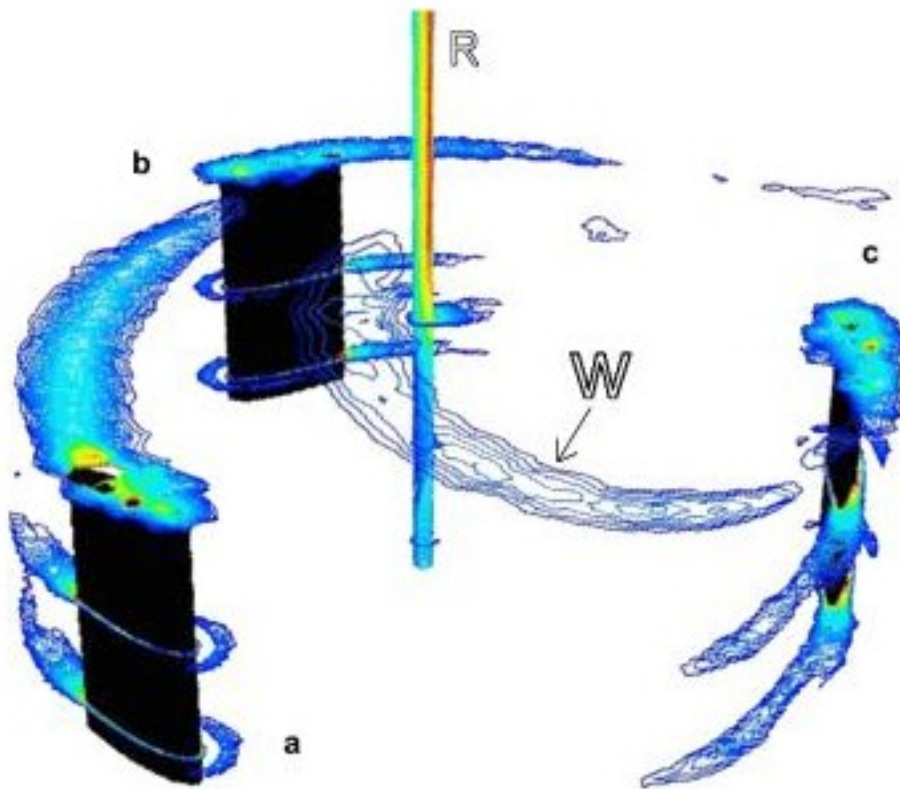
Σχήμα 4.9 Σχηματική απεικόνιση πτερυγίου ανεμογεννήτριας με προσαρμοσμένο τον χειροκίνητο μηχανισμό αλλαγής της γωνίας τοποθέτησης

#### 4.5 Σχεδιασμός δρομέα ανεμογεννήτριας

Κατά την πειραματική διερεύνηση της διάταξης που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 3, παρατηρήθηκε ότι με την πλήρη αφαίρεση του κελύφους δεν δύναται η περιστροφή της ανεμογεννήτριας ακόμα και όταν η αεροδυναμική σήραγγα του εργαστηρίου λειτουργεί στα κατασκευαστικά της όρια.

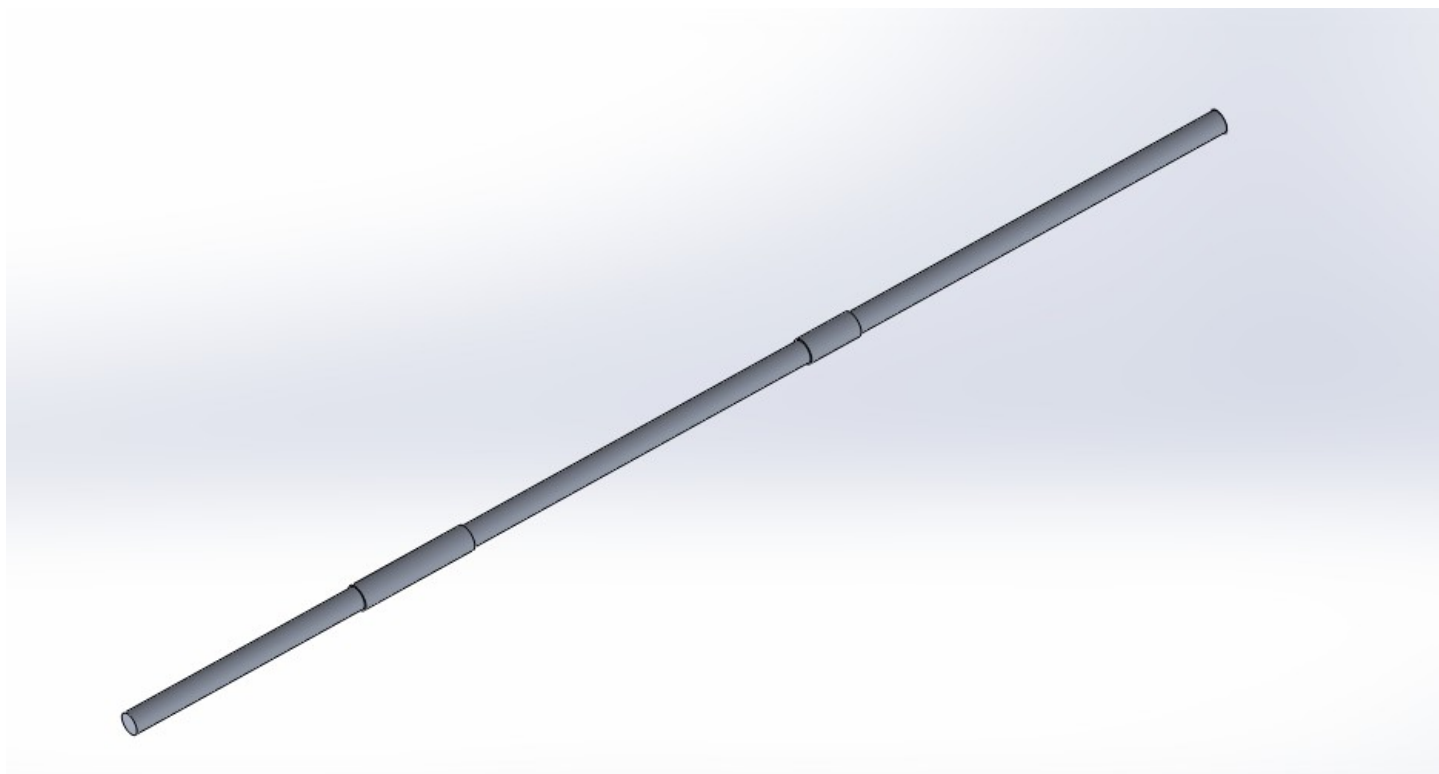
Έτσι, δημιουργήθηκε η σχεδιαστική πρόκληση της μείωσης του βάρους, άρα και της μείωσης της ροπής αδράνειας κατά την περιστροφή, της κατασκευής. Το βάρος της προηγούμενης διάταξης ανέρχεται στα 12 kg (άξονας ανεμογεννήτριας, κυλινδρικός προσαρμογέας των βραχιόνων, βραχίονες των πτερυγίων). Για αυτό το λόγο, μέσω του προγράμματος Solidworks σχεδιάστηκε ο νέος άξονας περιστροφής της ανεμογεννήτριας ο οποίος είναι από αλουμίνιο και είναι κούφιος για εξοικονόμηση βάρους. Η βασική διάμετρος του άξονα είναι 20mm και έχει μήκος 1100mm. Η διάμετρος εκλέχθηκε έτσι ώστε να είναι εφικτή η προσαρμογή του άξονα στα ήδη υπάρχοντα έδρανα κυλίσεως που τοποθετούνται στα άκρα του. Ειδικότερα (βλ.Σχ.4.11), υπάρχουν δύο σημεία του άξονα, "δακτυλίδια", στα οποία η διάμετρος αυξάνεται σε 23mm και πάνω σε αυτά εδράζονται οι βάσεις στήριξης των πτερυγίων. Βάσεις στήριξης των πτερυγίων αποτελούν δύο πλάκες, οι οποίες απέχουν μεταξύ τους όσο είναι το μήκος των πτερυγίων, από λαμαρίνα 7mm (βλ.Σχ.4.12) . Αποτελούνται από κυκλική διατομή εξωτερικής διαμέτρου 100mm στα κέντρα των οποίων υπάρχει διαμπερής οπή διαμέτρου 21mm μέσω της οποίας διέρχεται ο άξονας περιστροφής. Οι συγκεκριμένες πλάκες θα κατεργαστούν με τέτοιο τρόπο, ώστε να προσαρμόζονται σε αυτές οι τρεις βραχίονες στήριξης, ένας για κάθε πτερύγιο, οι οποίοι έχουν μήκος 216mm. Παρατηρώντας το Σχήμα 4.12, στο τέλος κάθε βραχίονα στήριξης είναι προσαρμοσμένες πλάκες 80mm, οι οποίες είναι σχεδιασμένες έτσι, ώστε όταν γίνει η τελική συναρμολόγηση της διάταξης, να εφάπτονται στο πάνω και στο κάτω τμήμα του πτερυγίου. Με αυτό τον τρόπο βελτιώνεται η αεροδυναμική συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας, αφού καταστρέφονται οι δίνες κορυφής (tip vortices) οι οποίες δημιουργούνται κατά την περιστροφή της ανεμογεννήτριας (βλ.Σχ.4.10).

Οι δίνες κορυφής δημιουργούνται κατά την περιστροφή της ανεμογεννήτριας, αφού το ρευστό έχει την τάση να μετακινείται από τις πλευρές υψηλής πίεσης στις πλευρές χαμηλής πίεσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της δύναμης άνωσης, άρα και της ώσης και την αύξηση της οπισθέλκουσας δύναμης.

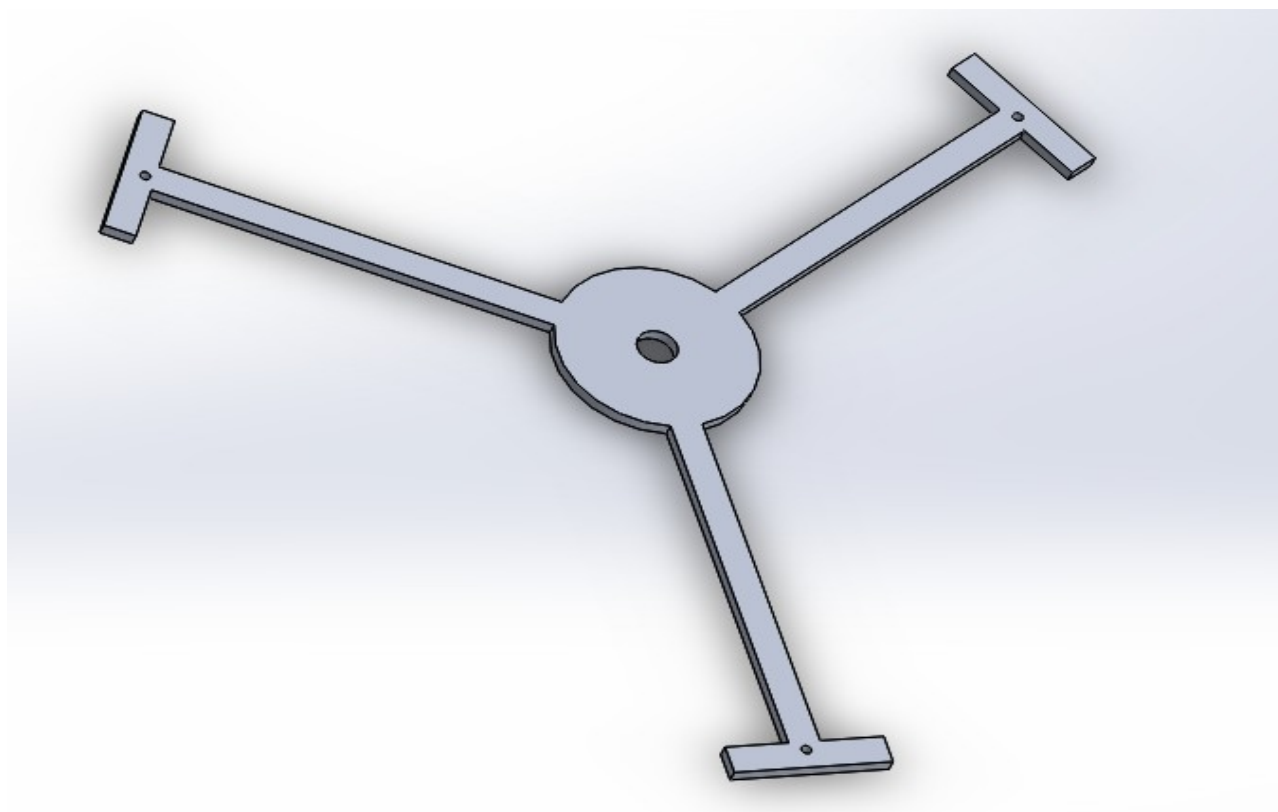


Σχήμα 4.10 Δημιουργία δινών κορυφής κατά την περιστροφή ανεμογεννήτριας καθέτου άξονα [12]





Σχήμα 4.11 Σχηματική απεικόνιση του άξονα περιστροφής της ανεμογεννήτριας



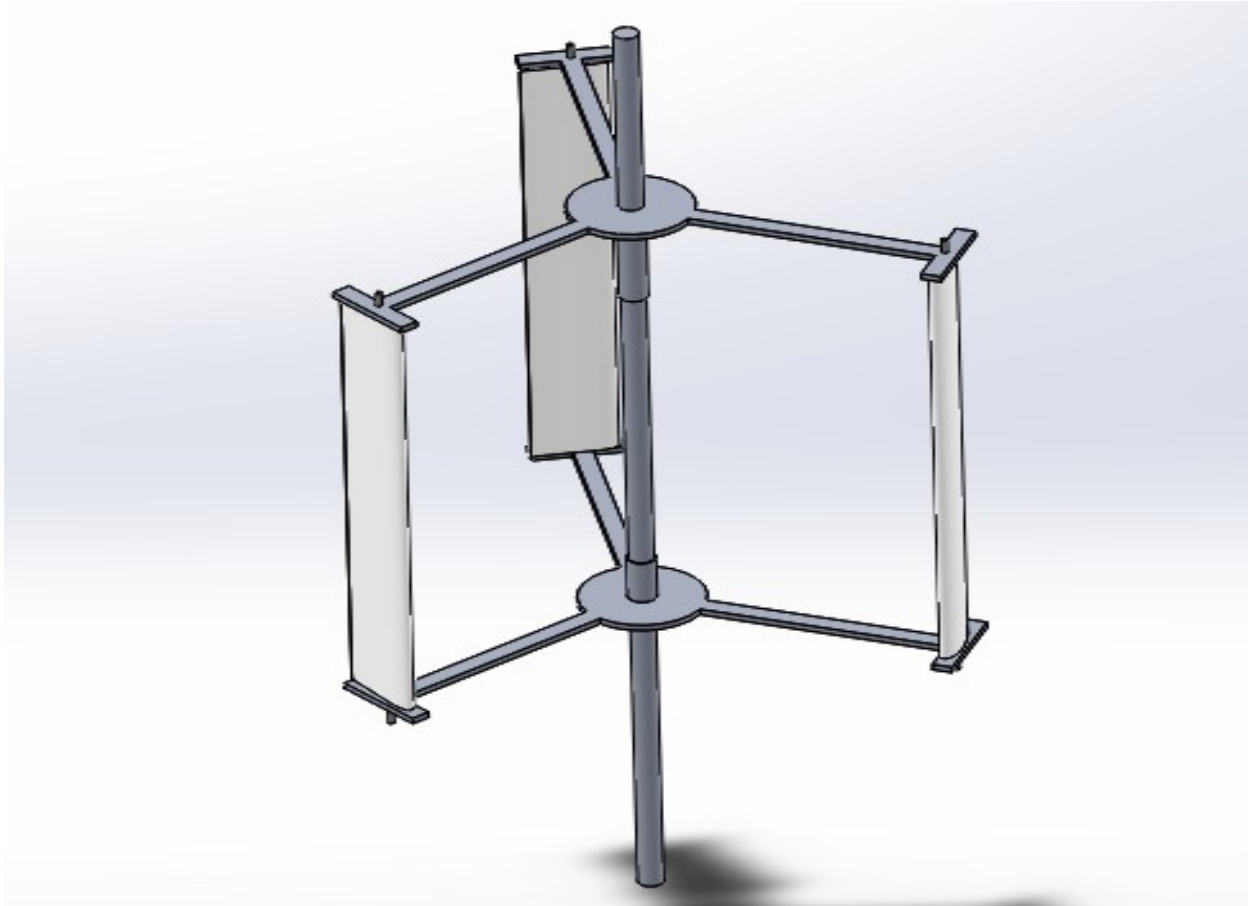
Σχήμα 4.12 Σχηματική απεικόνιση βραχιόνων στήριξης

#### 4.6 Τελική διάταξη

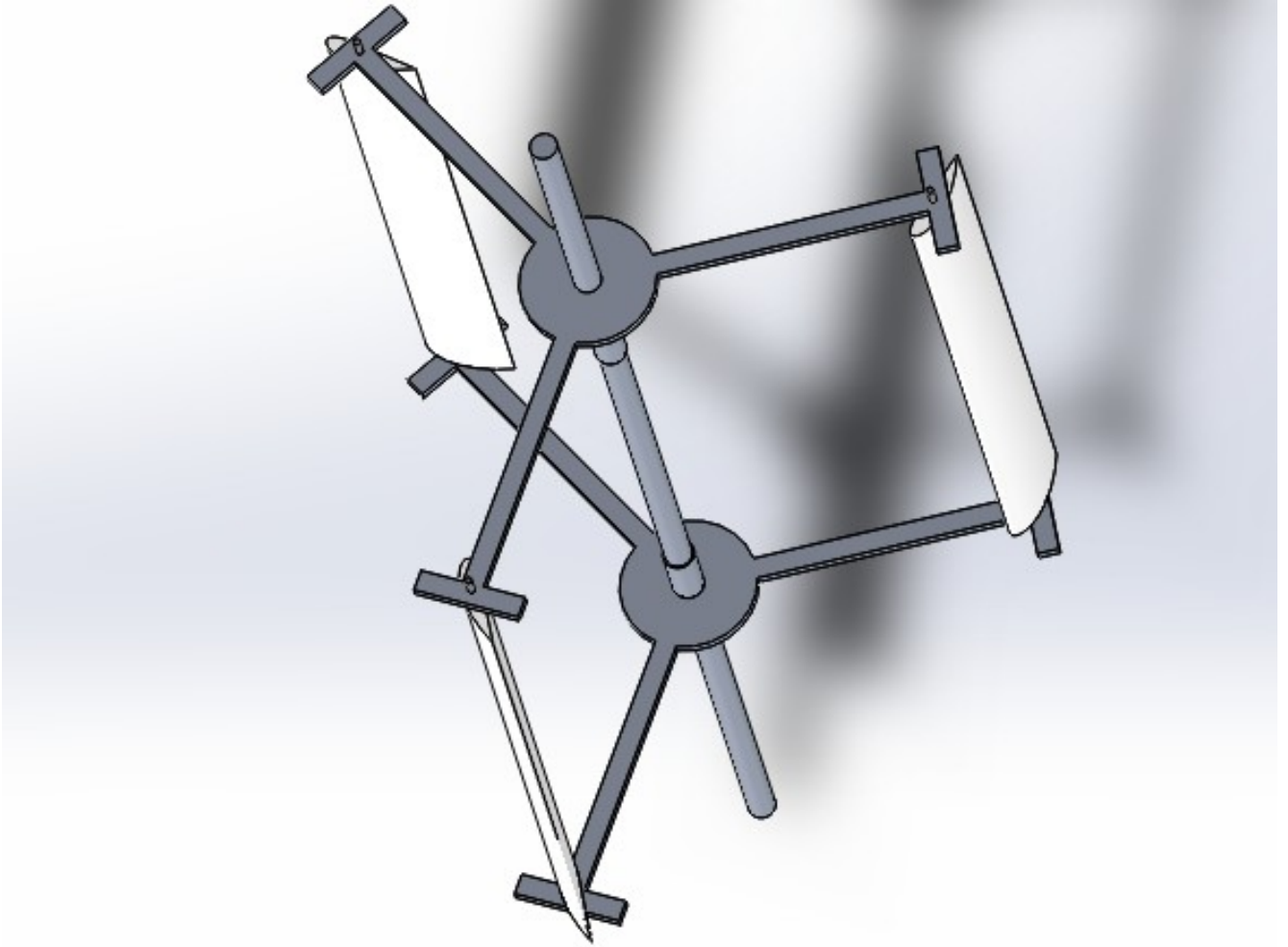
Οι τελικές διαστάσεις τις νέας ανεμογεννήτριας (βλ.Σχ.4.13) εκλέχθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να προσαρμόζεται στο πλαίσιο και στο κέλυφος, τα οποία έχουν ήδη αναφερθεί στο Κεφάλαιο 3. Τα πλεονεκτήματά της συγκριτικά με την προηγούμενη διάταξη είναι το αρκετά μειωμένο βάρος της κατασκευής, κάτι που επιτρέπει την πειραματική μελέτη της νέας ανεμογεννήτριας απουσία κελύφους. Επιπλέον, μέσω του χειροκίνητου μηχανισμού αλλαγής της γωνίας τοποθέτησης των πτερυγίων η οποία επηρεάζει την γωνία προσβολής (angle of attack) του ρευστού πάνω στα πτερύγια, είναι δυνατή η πειραματική μελέτη την επίδρασης της γωνίας προσβολής στην απόδοση της ανεμογεννήτριας. Έχει επιλεγεί, οι γωνίες τοποθέτησης να ρυθμίζονται χειροκίνητα περιστρέφοντας την ντίζα (βλ.Σχ.4.14) και να ασφαλίζονται στις επιθυμητές θέσεις με την χρήση περικοχλίου. Στον παρακάτω πίνακα παραθέτονται τα βασικά χαρακτηριστικά της νέας ανεμογεννήτριας

Πίνακας 4.1 Χαρακτηριστικά μεγέθη νέας ανεμογεννήτριας

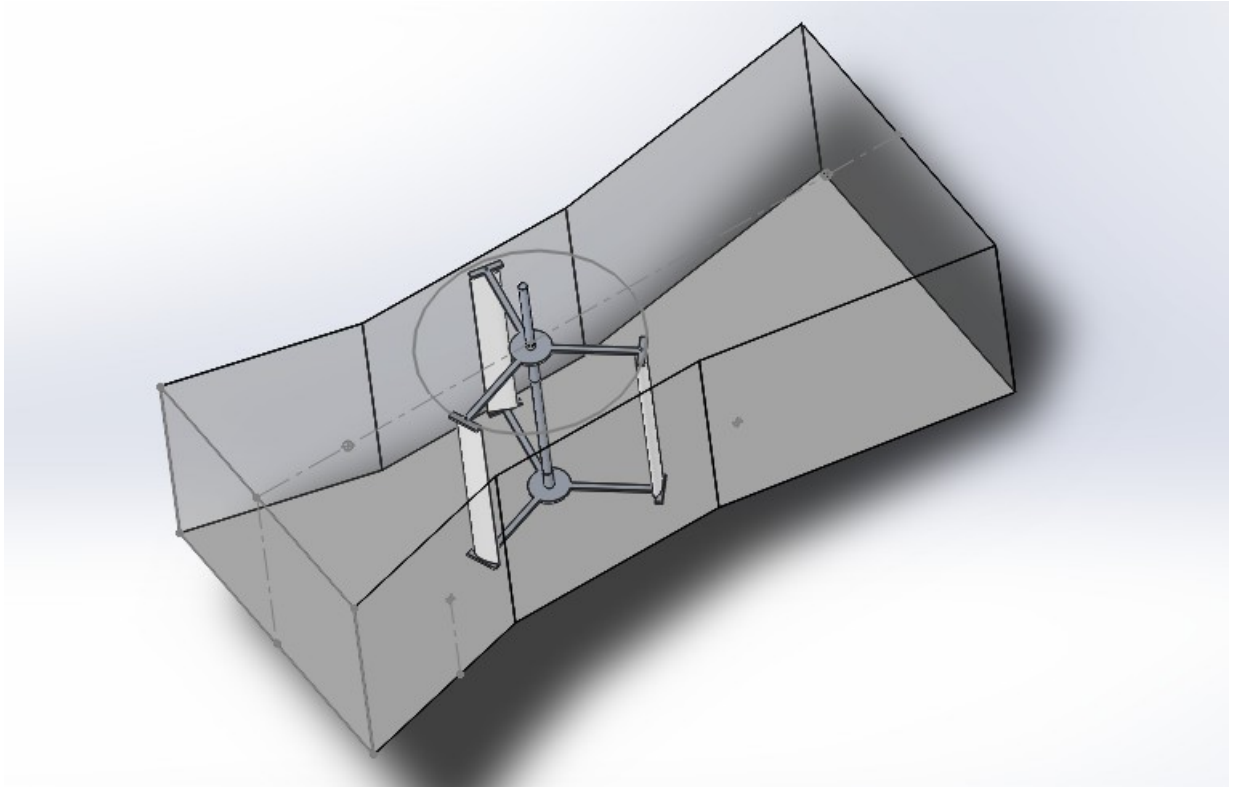
Χαρακτηριστικό μέγεθος	Τιμή	Μονάδες μετρήσεις
Συνολικό βάρος	3.443	kg
Ακτίνα ανεμογεννήτριας	0.26125	m
Ύψος πτερυγίων	0.5	m
Τύπος αεροτομής	NACA 5522	-



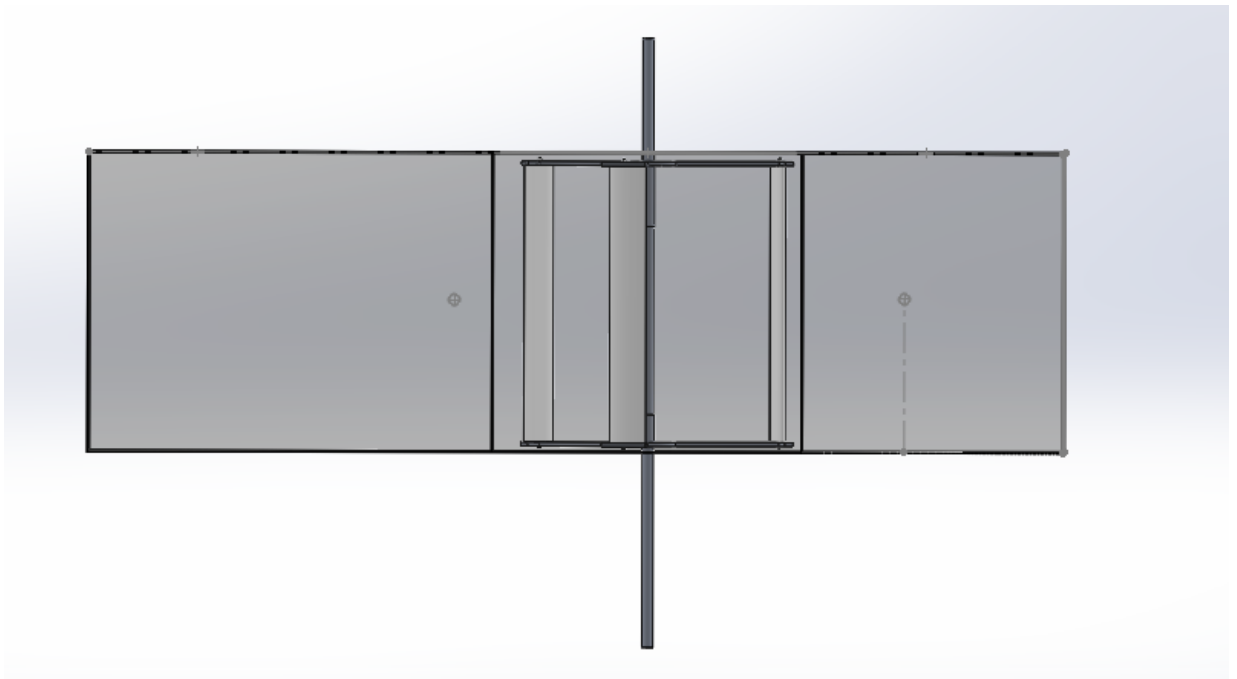
Σχήμα 4.13 Απεικόνιση της τελικής κατασκευής



Σχήμα 4.14 Απεικόνιση δρομέα ανεμογεννήτριας με αλλαγή της γωνίας των πτερυγίων



Σχήμα 4.15 Αποψη νέας πειραματικής διάταξης, προσαρμοσμένη στο κέλυφος



Σχήμα 4.16 Πλάγια όψη νέας πειραματικής διάταξης

#### 4.7 Μελέτη αντοχής της κατασκευής

Στη σύγχρονη εποχή πριν την υλοποίηση μιας οποιασδήποτε κατασκευής, προηγείται μια υπολογιστική προσομοίωση της σε συνθήκες λειτουργίας. Τα οφέλη από αυτή την διαδικασία είναι πολλαπλά. Αρχικά, γίνεται πρόβλεψη της λειτουργίας της κατασκευής σε συνθήκες που πρόκειται να αντιμετωπίσει ή σε ακραίες συνθήκες για μεγιστοποίηση του συντελεστή ασφάλειας της κατασκευής. Με αυτό τον τρόπο πέρα από την μείωση της πιθανότητας να συμβεί ένα μοιραίο γεγονός, έχει πολλά οικονομικά οφέλη για αυτούς που υλοποιούν την κατασκευή γιατί έχουν μια ολοκληρωμένη εικόνα και γνωρίζουν αν η κατασκευή θα πραγματοποιήσει αυτά για τα οποία υλοποιήθηκε με ασφάλεια, προτού ξεκινήσει η διαδικασία παραγωγής της, χωρίς να πραγματοποιούνται καταστροφικοί έλεγχοι οι οποίοι οδηγούν σε σπατάλη υλικού.

Έτσι, στην παρούσα διπλωματική εργασία διεξήχθη η στατική μελέτη της κατασκευής μέσω του προγράμματος Solidworks για να αποφευχθούν τα παραπάνω φαινόμενα. Αρχικά, ορίζονται οι συνθήκες, υπό το καθεστώς των οποίων προσομοιώνεται η λειτουργία της ανεμογεννήτριας. Για να αυξηθεί ο συντελεστής ασφαλείας έπρεπε να υποβληθεί σε συνθήκες λειτουργίας ενός ακραίου σεναρίου. Από τα αποτελέσματα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) της προηγούμενης διάταξης, τα οποία υπάρχουν σε παλαιότερη διπλωματική εργασία, παρατηρήθηκε ότι η μέγιστη στιγμιαία στατική πίεση η οποία μπορεί να ασκηθεί από το ρευστό στο πτερύγιο, ανέρχεται στα 600 Pa. Η πίεση αυτή, υφίσταται στο τέλος του ακροφυσίου, όπου η ροή έχει επιταχυνθεί πλήρως και συναντά το πτερύγιο, το οποίο λειτουργεί ως σημείο ανακοπής, μηδενίζοντας στιγμιαία την ταχύτητα δημιουργώντας την μέγιστη στατική πίεση. Για να επιτευχθεί το χειρότερο δυνατό σενάριο (worst case scenario), κατά την στατική μελέτη αντοχής της ανεμογεννήτριας, έγινε η υπόθεση ότι η μέγιστη στατική πίεση, η οποία στην πραγματικότητα ασκείται σε ένα πολύ μικρό μέρος του πτερυγίου, μεταφράζεται σε ένα ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο δύναμης (F), το οποίο ασκείται σε ολόκληρη την επιφάνεια του πτερυγίου. Είναι γνωστό ότι:

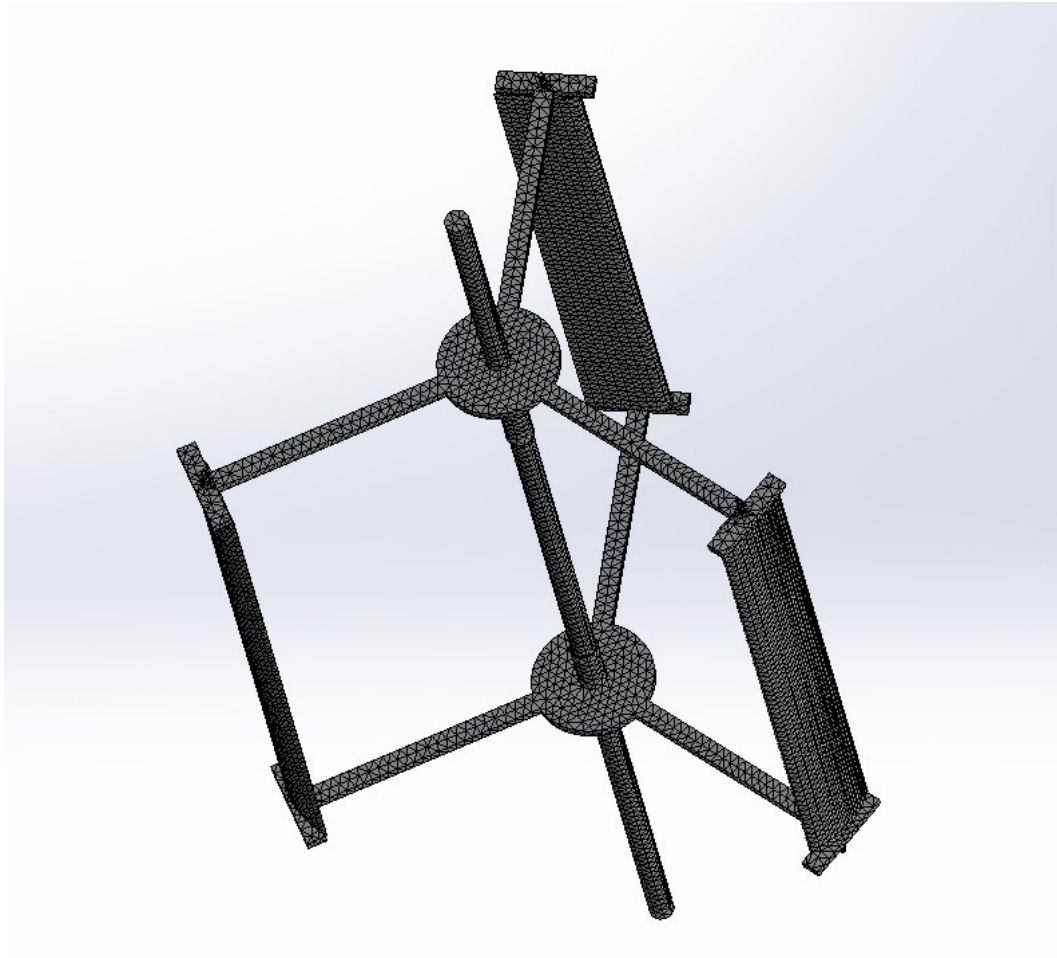
$$P = \frac{F}{A} \quad (4.1)$$

Αν συνυπολογιστεί ότι το πτερύγιο έχει ύψος (h) 500mm και χορδή (c) 70mm και ότι η επιφάνεια ορίζεται ως εξής:

$$A = h * c \quad (4.2)$$

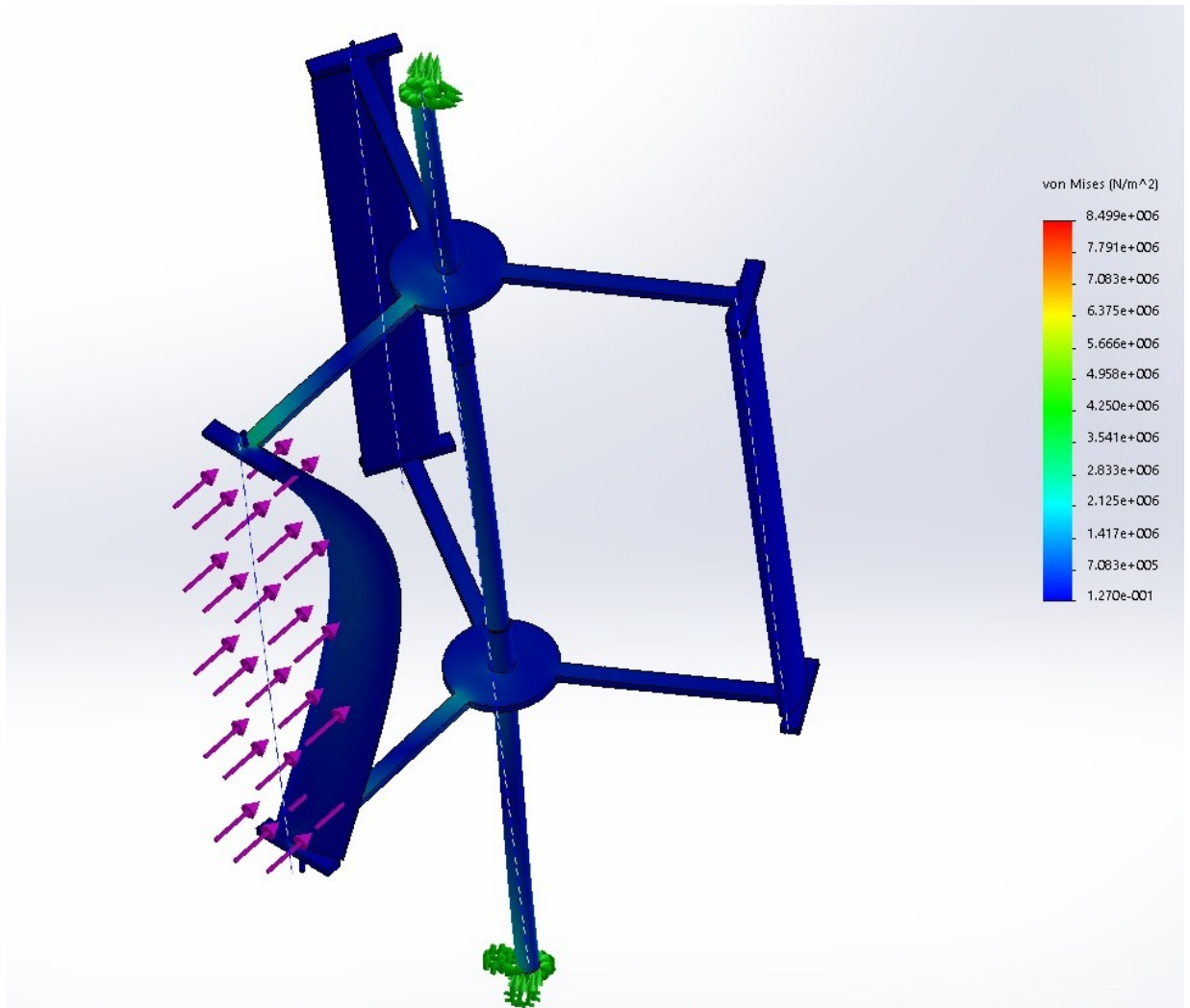
Τότε καταλήγουμε σε μια δύναμη  $F = 21N$

Για την στατική μελέτη, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων. Θεωρείται γνωστό ότι όσο πιο πυκνό πλέγμα δημιουργηθεί, τόσο πιο ακριβής θα είναι η πρόβλεψη της συμπεριφοράς της εκάστοτε κατασκευής στις συνθήκες λειτουργίας που υποβάλλεται. Για αυτό το λόγο η πυκνότητα πλέγματος που δημιουργήθηκε, ήταν η μέγιστη δυνατή του προγράμματος Solidworks (βλ.Σχ.4.15).



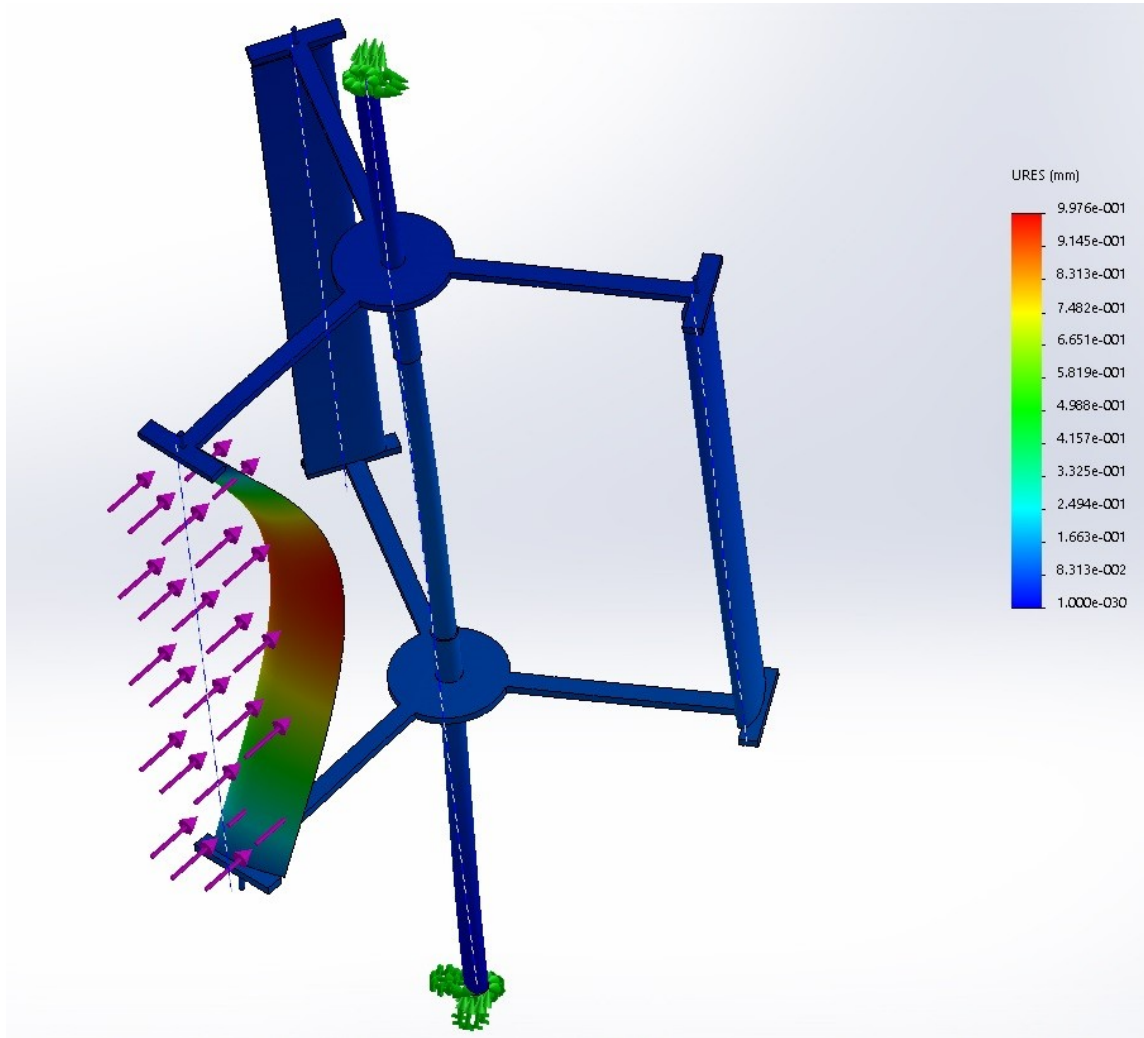
Σχήμα 4.17 Πλέγμα κατασκευής

Παρατηρήθηκε ότι οι τάσεις που δημιουργούνται στην κατασκευή (βλ.Σχ.4.16) και η μέγιστη παραμόρφωση των υλικών των τμημάτων της (βλ.Σχ.4.17) δεν είναι ικανές για να δημιουργήσουν οποιαδήποτε αστοχία του υλικού, ακόμα και αν η πειραματική διάταξη υποβληθεί στις παραπάνω ακραίες συνθήκες, αφού οι τάσεις δεν ξεπερνούν το όριο διαρροής του υλικού, ακόμα και αν πραγματοποιηθεί πάκτωση των δύο άκρων του άξονα. Έτσι, θεωρείται ότι η κατασκευή θα πραγματοποιήσει αυτά για τα οποία υλοποιήθηκε χωρίς να δημιουργηθεί κάποιο κατασκευαστικό πρόβλημα.

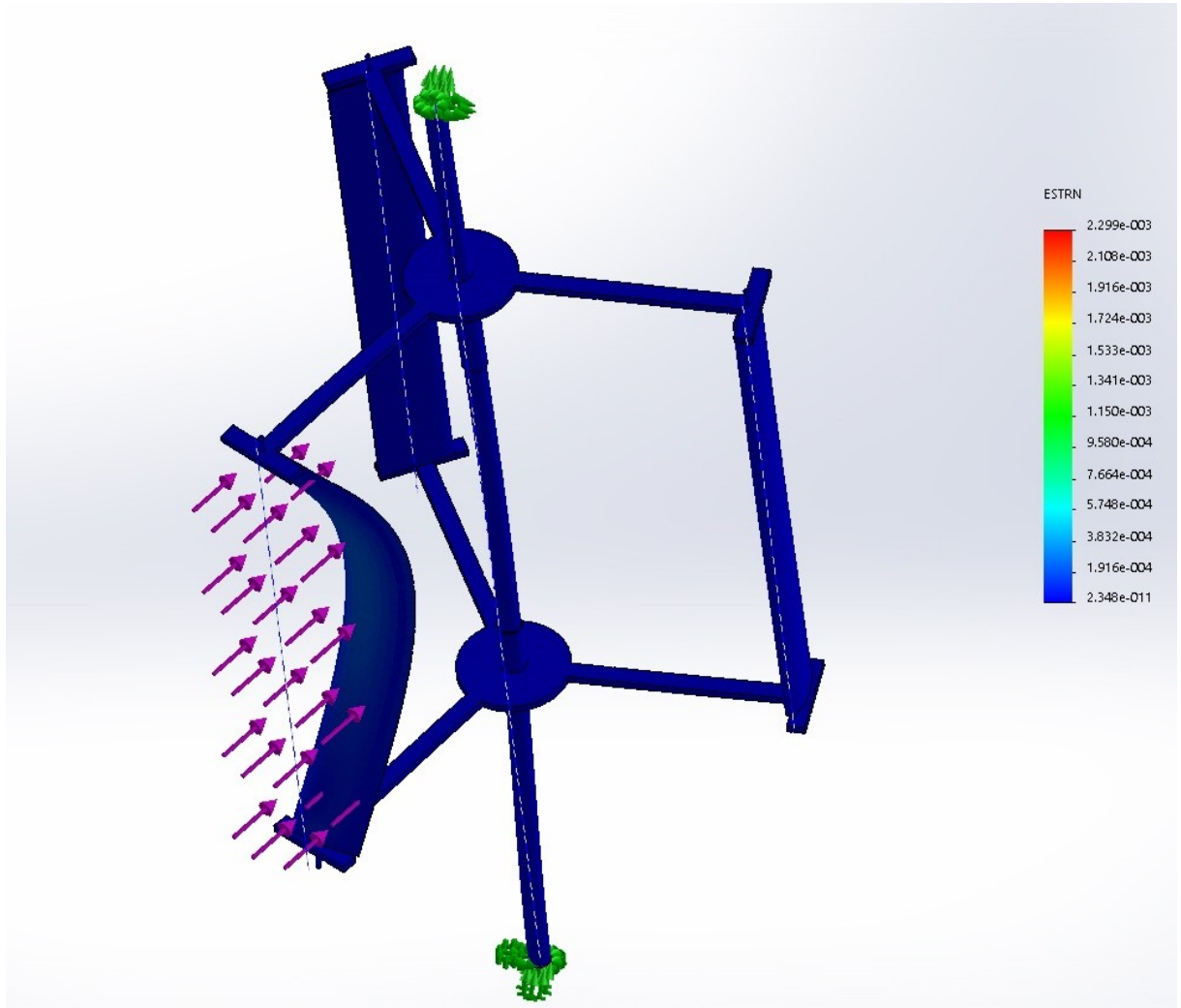


Σχήμα 4.18 Τάσεις Von Mises που αναπτύσσονται στην κατασκευή





Σχήμα 4.19 Μετατόπιση υλικού κατασκευής



Σχήμα 4.20 Ποσοστιαία παραμόρφωση υλικού

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο Συμπεράσματα-Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, πραγματοποιήθηκε η πειραματική μελέτη της υπάρχουσας τριπτέρυγης ανεμογεννήτριας τύπου Darrieus-H rotor, στο εργαστήριο "Μηχανικής Ρευστών και Στροβίλομηχανών". Η έρευνα που έλαβε χώρα, απέδειξε πειραματικά ότι η τοποθέτηση μιας ανεμογεννήτριας μέσα σε ένα ειδικά διαμορφωμένο κελύφος επιτυγχάνει σημαντική βελτίωση της απόδοσής της, αποδεικνύοντας με αυτό τον τρόπο ότι τα αποτελέσματα της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD), τα οποία είναι δημοσιευμένα στην διεθνή και εγχώρια επιστημονική κοινότητα, ισχύουν και στην πράξη. Πιο συγκεκριμένα, όπως έχει ήδη αναφερθεί στο Κεφάλαιο 3 ο συντελεστής ισχύος της ανεμογεννήτριας όταν αυτή λειτουργούσε απουσία κελύφους, ήταν μηδενικός για οποιαδήποτε ταχύτητα εισαγωγής του αέρα ήταν δυνατόν να δημιουργήσει η αεροδυναμική σήραγγα του εργαστηρίου. Αντίθετα, παρουσία κελύφους και ταχύτητα εισαγωγής του αέρα  $3 \frac{m}{s}$  παρατηρήθηκε ένας αρκετά υψηλός συντελεστής ισχύος της ανεμογεννήτριας  $C_p = 0.571$ , τιμή η οποία πλησιάζει το όριο του Betz. Ακόμα, παρατηρήθηκε ότι οι βέλτιστες τιμές συντελεστή ισχύος, για διάφορες τιμές ταχύτητας ανέμου εισαγωγής, επιτεύχθηκαν για τιμές της αδιάστατης ταχύτητας ακροπτερυγίου στην περιοχή του 0.8. Τέλος, η διάνοιξη του κελύφους στην περιοχή της στένωσης του, δεν οδήγησε σε ακόμα μεγαλύτερο συντελεστή ισχύος, όπως αναμενόταν λόγω της αύξησης της παροχής του ανέμου.

Αυτή η αύξηση της απόδοσης των ανεμογεννητριών καθέτου άξονα, αν συνυπολογιστεί με τα πλεονεκτήματά τους, συγκριτικά με άλλους τύπους ανεμογεννητριών, όπως ότι μπορούν να λειτουργήσουν απουσία συστήματος προσανατολισμού ως προς την κατεύθυνση πνοής του ανέμου, καθιστά την σχεδίαση και την κατασκευή τέτοιου είδους ανεμογεννητριών βιώσιμη.

Ακόμα ένα συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί από την παραπάνω πειραματική διαδικασία είναι, ότι η αύξηση της ταχύτητας εισαγωγής του αέρα προκαλούσε μείωση του μέγιστη συντελεστή ισχύος.

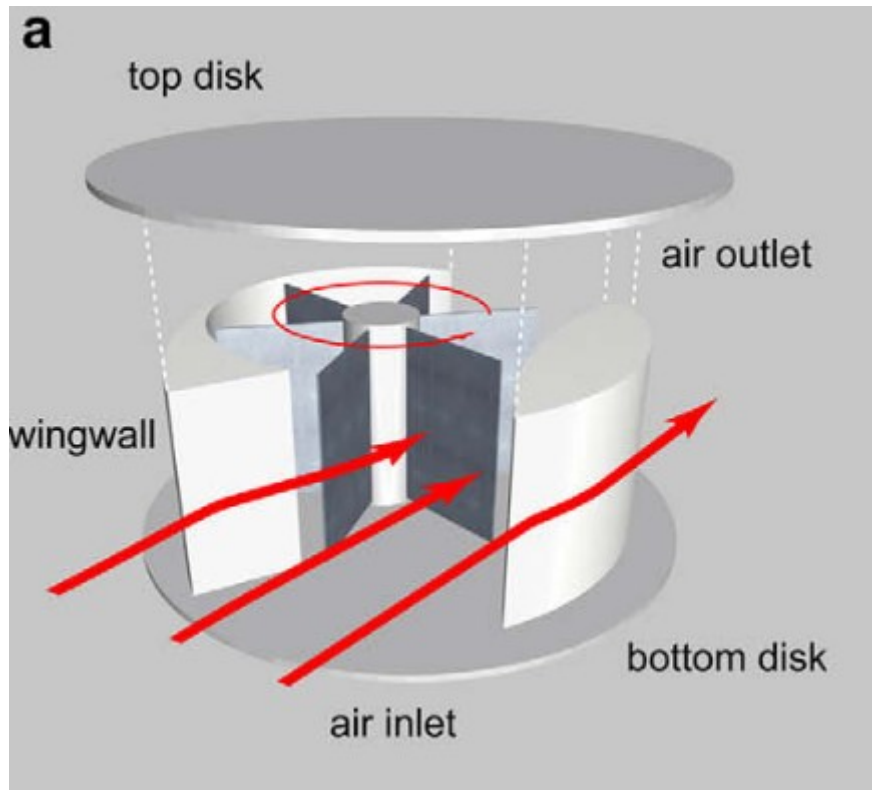
Ο σχεδιασμός και ο τρόπος εφαρμογή τους στον αστικό ιστό, αποτελεί μια από τις σύγχρονες προκλήσεις της επιστημονικής κοινότητας. Έτσι, το δεύτερο μέρος της παρούσας διπλωματικής εργασίας στράφηκε προς αυτό το επιστημονικό πεδίο με τον σχεδιασμό νέας ανεμογεννήτριας με μειωμένο βάρος, μη συμμετρικές αεροτομές, χειροκίνητο μηχανισμό αλλαγής της γωνίας τοποθέτησης των πτερυγίων και πρωτοποριακό σχεδιασμό έτσι ώστε να καταστρέφεται ένα μεγάλο μέρος των δινών κορυφής.

Η δουλειά που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας μπορεί να επεκταθεί περαιτέρω ώστε να παρέχει μια περισσότερο

ολοκληρωμένη εικόνα για την συμπεριφορά των ανεμογεννητριών καθέτου άξονα εντός κελύφους. Αυτό θα επιτευχθεί με τους παρακάτω τρόπους:

- Μόλις η νέα διάταξη που σχεδιάστηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία υλοποιηθεί στο μηχανουργείο και εγκατασταθεί στο εργαστήριο "Μηχανικής ρευστών και Στροβιλομηχανών" θα πρέπει να μελετηθεί πειραματικά, όπως ακριβώς συνέβη με την ήδη υπάρχουσα, δηλαδή θα πρέπει να παρθούν λεπτομερείς μετρήσεις του πεδίου ταχύτητας και πιέσεων και μετρήσεις ροπής και στροφών για την αξιολόγηση της αεροδυναμικής συμπεριφοράς της νέας ανεμογεννήτριας. Στην συνέχεια είναι σημαντικό να εξαχθούν οι χαρακτηριστικές καμπύλες απόδοσης για να είναι δυνατή η σύγκριση της απόδοσης των δύο ανεμογεννητριών για τις ίδιες συνθήκες λειτουργίας.
- Εκτός των πειραματικών μετρήσεων θα πρέπει να πραγματοποιηθεί και ανάλυση υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) με χρήση διαφορετικών μοντέλων τύρβης για την προσομοίωση των πολύπλοκων ροϊκών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα γύρω από τα πτερύγια της νέας ανεμογεννήτριας, εντός του κελύφους και του ομόρρου. Έτσι, θα υπάρχουν εκτενή συμπεράσματα και θα είναι δυνατή η επαλήθευση των πειραματικών αποτελεσμάτων
- Η τροποποίηση του κελύφους έτσι ώστε να γίνεται εκμετάλλευση του προτερήματος των ανεμογεννητριών καθέτου άξονα να μην προσανατολίζονται προς την κατεύθυνση πνοής του ανέμου. Θα πρέπει να είναι ένα κέλυφος τα μέρη του οποίου να συμπεριφέρονται σαν οδηγητικά πτερύγια (βλ.Σχ.5.1) όπου θα οδηγούν κατάλληλα τον αέρα, ο οποίος θα φθάνει από διάφορες διευθύνσεις, πάνω στον δρομέα.
- Πραγματοποίηση μετρήσεων χρονικά μεταβαλλόμενου πεδίου ροής, με χρήση ανεμομετρίας θερμού νήματος (hot wire), ώστε να παραχθούν περισσότερο ακριβή αποτελέσματα σχετικά με την ταχύτητα του ροϊκού πεδίου.

Βέβαια, στις παραπάνω προτάσεις μπορεί να προστεθούν ορισμένες τροποποιήσεις στην νέα κατασκευή, όπως ένας νέος ηλεκτρονικός μηχανισμός αλλαγής τοποθέτησης της γωνίας των πτερυγίων ώστε αυτή η διαδικασία να επιτυγχάνεται γρηγορότερα και με μεγαλύτερη ακρίβεια.



Σχήμα 5.1 Κέλυφος ανεμογεννήτρια που λειτουργεί σαν οδηγητικά πτερύγια [14]



## Βιβλιογραφία

- [1] invonio, [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://medilab.pme.duth.gr/invonio/history.html>.
- [2] [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://home.frognet.net/~ejcov/brush10.html>.
- [3] «Danish Wind Industry Association,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://ele.aut.ac.ir/~wind/en/pictures/juul.htm>.
- [4] «Wind Of Change,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.windsofchange.dk/WOC-usastat.php>.
- [5] «BRIGHT HUB,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.brighthub.com/environment/renewable-energy/articles/92978.aspx>.
- [6] K. S. A. C. A. N. .-G.W.T: Chong, «Performance investigation of a power augmented vertical axis wind turbine for urban high-rise application,» *Renewable Energy*, 7 September 2012.
- [7] H. D. & V. C. Ion Mălăeș, «Noumerical Simulation of Vertical Axis Wind Turbine at Low Speed Ratios,» *GLOBAL JOURNAL OF RESEARCHES IN ENGINEERING*, Volume 14 Issue 1 Version 1.0 2014.
- [8] Γ.ΜΠΕΡΓΕΛΕΣ, ΑΝΕΜΟΚΙΝΗΤΗΤΡΕΣ, ΑΘΗΝΑ: ΣΥΜΕΩΝ, 2005.
- [9] Y. Y. Habtamu Beri, «Double Multiple Stream Tube Model and Numerical Analysis of Vertical Axis Wind Turbine,» *Energy and Power Engineering*, July 2011.
- [10] G. Z. K. G. W. J. Xin Jin, «Darrieus vertical axis wind turbine: Basic research,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014.
- [11] M. R. C. E. B. Gabriele Bedon, «Optimization of a Darrieus vertical-axis wind turbine using blade element-momentum theory and evolutionary algorithm,» *Renewable Energy*, April 2013.
- [12] H. A. A. S. Mohamed A.Sayed, «Aerodynamic analysis of different wind-turbine-blades profiles using finite-volume method,» *Energy Generation and Managment*, September 2012.
- [13] «Dwyer Instruments International,» Dwyer Manufacturing Excellence, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.dwyer-inst.com/Products/AirVelocityIntroduction.cfm>.
- [14] M. F. E. S. Gerald Müller, «Vertical axis resistance type wind turbines for use in

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΚΑΘΕΤΟΥ  
ΑΞΟΝΑ ΜΕ ΚΕΛΥΦΟΣ(SHROUD)

---

buildings,» *Renewable Energy*, 4 October 2008.



## Παραρτήματα

Να σημειωθεί ότι στους πίνακες, τα μεγέθη της ταχύτητας, δυναμικής πίεσης καθώς και θερμοκρασίας αναφέρονται ως V,P,T αντίστοιχα. Τα γράμματα Α,Β,Γ,Δ,Ε,Ζ αναφέρονται στις αντίστοιχες οπές. Οι μονάδες μέτρησης για τις ταχύτητες είναι  $\frac{m}{s}$ , για την θερμοκρασία °C ενώ για την πίεση Pa.

### Παράτημα Α: Μετρήσεις ροϊκού πεδίου ταχυτήτων και δυναμικών πιέσεων για $V_{ait} = 3 \text{ m/s}$ και $N=119 \text{ rpm}$

Πλάτος [cm]	T(Δ)	V(Γ)	P(Γ)	V(Γ)	T(Z)	P(Z)	V(E)	T(E)	P(E)	V(Δ)
0	20.32	10.9	101.2	10.36	20.67	91.27	8.97	21.19	68.34	12.84
5.25	21.07	10.75	98.2	11.49	21.23	121.1	8.2	21.14	57.21	12.68
10.5	21.4	10.78	98.68	10.71	21.27	97.61	9.49	21.2	76.61	13.07
15.75	21.55	10.78	98.58	11.48	21.1	112.2	8.83	21.2	66.58	13.85
21	21.36	10.66	96.56	11.08	21.54	104.02	9.57	21.23	78.39	14.97
26.25	21.62	10.78	98.6				9.35	21.28	74.29	13.41
31.5							7.95	21.22	53.78	

**Παράρτημα Β: Μετρήσεις ροϊκού πεδίου ταχυτήτων και δυναμικών πιέσεων για  $V_{air} = 3 \text{ m/s}$  και  $N=155\text{rpm}$**

Πλάτος [cm]	V(Z)	T(Z)	P(Z)	V(E)	T(E)	P(E)
0	8.44	22.77	60.18	10.59	23.14	94.77
5.25	9.83	22.85	81.62	11.4	23.21	109.6
10.5	9	22.87	60.18	11.25	23.19	94.77
15.75	9.43	22.82	81.62	11.97	23.27	109.6
21	9.57	22.86	60.18	12.09	23.26	94.77
26.25	10.36	22.95	81.62	11.89	23.19	109.6
31.5	8.48	22.99	60.18			

V(Γ)	T(Γ)	P(Γ)	T(Δ)	P(Δ)	V(Δ)
11.94	23.39	114.3	22.17	98.74	13.47
12.19	23.48	115.2	22.72	104.6	13.61
12.02	23.44	114.3	22.72	98.74	13.29
11.95	23.45	115.2	22.3	104.6	14.77
12.16	23.43	114.3	23.17	98.74	15.43
12.54	23.47	115.2	23.1	104.6	

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΚΑΘΕΤΟΥ  
ΑΞΟΝΑ ΜΕ ΚΕΛΥΦΟΣ(SHROUD)

N=	155	RPM
$\Omega$ =	16.231562	1/s
R=	0.26125	m
F=	2.6	N
Torque=	0.026	Nm
V <sub>air</sub> =	3	m/s
$\lambda$ =	1.4134985	
Pair=	3.61125	W
C <sub>p</sub>	0.1168628	

**Παράρτημα Γ: Μετρήσεις ροϊκού πεδίου ταχυτήτων και δυναμικών  
πιέσεων για V<sub>air</sub> =3.2 m/s και N=188rpm**

Πλάτος [cm]	T(Γ)	P(Γ)	V(Γ)	V(Δ)	T(Δ)	P(Δ)
0	23.34	109.4	12.01	13.53	24.24	121.2
5.25	23.47	112.8	12.22	13.81	24.64	125.5
10.5	23.49	117.9	12.75	14.99	24.85	136.5
15.75	23.41	114.4	12.83	15.75	24.72	138.3
21	23.7	114	13	15.98	24.63	141.9
26.25	23.43	113.9	13.05	14.09	24.87	142.9
31.5	23.21	114.7				

V(E)	P(E)	T(E)	V(Z)	P(Z)	T(Z)
11.8	117	24.24	9.11	69.59	25.3
12.44	130.2	24.01	9.14	69.95	25.61
12.8	137.8	24.22	9.78	80.29	24.67
12.32	127.6	24.15	9.32	72.79	25.13
12.33	127.9	24.16	9.32	72.79	25.29
13.17	145.8	24.52	10.05	92.37	25.2
			7.94	52.93	24.69

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΚΑΘΕΤΟΥ  
ΑΞΟΝΑ ΜΕ ΚΕΛΥΦΟΣ(SHROUD)

---

N=	188	RPM
$\Omega$ =	19.687314	1/s
Vair=	3.2	m/s
$\lambda$ =	1.60728462	
Pair=	4.38272	WATT
rho=	1.07	Kg/m <sup>3</sup>
F=	2.9	N
RADIUS=	0.01	m
Torque=	0.029	Nm
Pt=	0.5709321	WATT
Cp=	0.1302689	

**Παράρτημα Δ: Μετρήσεις για την εξαγωγή της καμπύλης  $C_p - \lambda$ ,  
παρουσία κελύφους**

N=	175	rpm		N=	170.5	rpm		N=	160	rpm
$\Omega$ =	18.32596	1/s		$\Omega$ =	17.85472	1/s		$\Omega$ =	16.75516	1/s
V=	3	m/s		V=	3	m/s		V=	3	m/s
$\lambda$ =	1.595885			$\lambda$ =	1.554848			$\lambda$ =	1.459095	
Pair=	3.61125	W		Pair=	3.61125	W		Pair=	3.61125	W
rho=	1.07	kg/m <sup>3</sup>		rho=	1.07	kg/m <sup>3</sup>		rho=	1.07	kg/m <sup>3</sup>
F=	0.6	N		F=	1.4	N		F=	3	N
T=	0.006	Nm		T=	0.014	Nm		T=	0.03	Nm
$C_p$ =	0.030448			$C_p$ =	0.069219			$C_p$ =	0.139191	
N=	113.1	rpm		N=	92.8	rpm		N=	118	RPM
$\Omega$ =	11.8438	1/s		$\Omega$ =	9.717993	1/s		F=	15.4	N
V=	3	m/s		V=	3	m/s		$\Omega$ =	12.35693	1/s
$\lambda$ =	1.031398			$\lambda$ =	0.846275			Torque=	0.154	Nm
Pair=	3.61125	W		Pair=	3.61125	W		Vair=	3	m/s
rho=	1.07	kg/m <sup>3</sup>		rho=	1.07	kg/m <sup>3</sup>		$\lambda$ =	1.076083	
F=	14.5	N		F=	21.2	N		Pair=	3.61125	W
T=	0.145	Nm		T=	0.212	Nm		rho=	1.07	kg/m <sup>3</sup>
$C_p$ =	0.475556			$C_p$ =	0.570499			$C_p$ =	0.526955	

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΚΑΘΕΤΟΥ  
ΑΞΟΝΑ ΜΕ ΚΕΛΥΦΟΣ(SHROUD)

N=	137	rpm		N=	135	rpm		N=	28.7	1/s
Ω=	14.34661	1/s		Ω=	14.13717	1/s		Ω=	3.005457	rpm
V=	3	m/s		V=	3	m/s		V=	3	m/s
λ=	1.24935			λ=	1.231112			λ=	0.261725	
Pair=	3.61125	W		Pair=	3.61125	W		Pair=	3.61125	W
rho=	1.07	kg/m <sup>3</sup>		rho=	1.07	kg/m <sup>3</sup>		rho=	1.07	kg/m <sup>3</sup>
F=	7.2	N		F=	10.8	N		F=	40	N
T=	0.072	Nm		T=	0.108	Nm		T=	0.4	Nm
Cp=	0.286038			Cp=	0.422794			Cp=	0.332899	
N=	155	RPM		N=	172.3	RPM		N=	28.7	rpm
Ω=	16.23156	1/s		Ω=	18.04321	1/s		Ω=	3.005457	1/s
F=	2.6	N		V=	3	m/s		V=	3	m/s
Torque=	0.026	Nm		λ=	1.571263			λ=	0.261725	
V=	3	m/s		Pair=	3.61125	W		Pair=	3.61125	W
λ=	1.413499			rho=	1.07	Kg/m <sup>3</sup>		rho=	1.07	kg/m <sup>3</sup>
Pair=	3.61125	W		F=	2.9	N		F=	40	N
rho=	1.07	kg/m <sup>3</sup>		Torque=	0.029	Nm		T=	0.4	Nm
Cp	0.116863			Cp=	0.144895			Cp=	0.332899	

N=	205	rpm		N=	160	rpm		N=	110	rpm
Ω=	21.46755	1/s		Ω=	16.75516	1/s		Ω=	11.51917	1/s
V=	4	m/s		V=	4	m/s		V=	4	m/s
λ=	1.402099			λ=	1.094321			λ=	0.752346	
Pair=	8.56	W		Pair=	8.56	W		Pair=	8.56	W
rho=	1.07	kg/m <sup>3</sup>		rho=	1.07	kg/m <sup>3</sup>		rho=	1.07	kg/m <sup>3</sup>
F=	5.6	N		F=	14.2	N		F=	26.8	N
T=	0.056	Nm		T=	0.142	Nm		T=	0.268	Nm
Cp=	0.140442			Cp=	0.277948			Cp=	0.360647	
N=	244	rpm		N=	174	rpm		N=	138	rpm
Ω=	25.55162	1/s		Ω=	18.22124	1/s		Ω=	14.45133	1/s
V=	4	m/s		V=	4	m/s		V=	4	m/s
λ=	1.66884			λ=	1.190075			λ=	0.943852	
Pair=	8.56	W		Pair=	8.56	W		Pair=	8.56	W
rho=	1.07	kg/m <sup>3</sup>		rho=	1.07	kg/m <sup>3</sup>		rho=	1.07	kg/m <sup>3</sup>
F=	4	N		F=	12.4	N		F=	22	N
T=	0.04	Nm		T=	0.124	Nm		T=	0.22	Nm
Cp=	0.1194			Cp=	0.263953			Cp=	0.371413	

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΚΑΘΕΤΟΥ  
ΑΞΟΝΑ ΜΕ ΚΕΛΥΦΟΣ(SHROUD)

N=	190	rpm		N=	115	rpm
$\Omega$ =	19.89675	1/s		$\Omega$ =	12.04277	1/s
V=	4	m/s		V=	4	m/s
$\lambda$ =	1.299507			$\lambda$ =	0.786544	
Pair=	8.56	W		Pair=	8.56	W
rho=	1.07	kg/m <sup>3</sup>		rho=	1.07	kg/m <sup>3</sup>
F=	9.6	N		F=	29.8	N
T=	0.096	Nm		T=	0.298	Nm
Cp=	0.223141			Cp=	0.419246	
N=	148	rpm		N=	200	rpm
$\Omega$ =	15.49852	1/s		$\Omega$ =	20.94395	1/s
V=	4	m/s		V=	4	m/s
$\lambda$ =	1.012247			$\lambda$ =	1.367902	
Pair=	8.56	W		Pair=	8.56	W
rho=	1.07	kg/m <sup>3</sup>		rho=	1.07	kg/m <sup>3</sup>
F=	19	N		F=	8	N
T=	0.19	Nm		T=	0.08	Nm
Cp=	0.344009			Cp=	0.195738	

**Παράρτημα Ε: Μετρήσεις για την εξαγωγή της καμπύλης  $C_p - \lambda$ , με διάνοιξη του κελύφους**

v=	3	m/s		v=	3	m/s		v=	3	m/s
N=	116	RPM		N=	86	RPM		N=	74.9	RPM
$\omega$ =	12.14749	1/s		$\omega$ =	9.005899	1/s		$\omega$ =	7.84351	1/s
F=	9.6	N		F=	20.4	N		F=	24.8	N
Pair	3.61125	W		Pair	3.61125	W		Pair	3.61125	W
$\lambda$ =	1.057844			$\lambda$ =	0.784264			$\lambda$ =	0.683039	
$C_p$ =	0.322924			$C_p$ =	0.508744			$C_p$ =	0.538647	
v=	3	m/s		v=	3	m/s		v=	3	m/s
N=	98	RPM		N=	106	RPM		N=	193.1	RPM
$\omega$ =	10.26254	1/s		$\omega$ =	11.10029	1/s		$\omega$ =	20.22138	1/s
F=	13.2	N		F=	11.2	N		F=	1.6	N
Pair	3.61125	W		Pair	3.61125	W		Pair	3.61125	W
$\lambda$ =	0.893696			$\lambda$ =	0.966651			$\lambda$ =	1.760946	
$C_p$ =	0.375121			$C_p$ =	0.344267			$C_p$ =	0.089593	

v=	3	m/s
N=	32	RPM
$\omega$ =	3.349333	1/s
F=	34.2	N
Pair	3.61125	W
$\lambda$ =	0.291671	
$C_p$ =	0.094704	



**Παράρτημα Ζ: Κατακόρυφες μετρήσεις ροϊκού πεδίου, για ταχύτητες και δυναμικές πιέσεις.**

N=	255	rpm		v=	3	m/s
y	V(A)	P(A)	T(A)	V(B)	P(B)	T(B)
3	0	11.24	22.65	13.87	162.4	23.08
13	15.06	191.6	22.69	12.96	141.7	23.15
23	14.37	174.5	22.73	10.29	162.4	23.16
33	14.32	173.3	22.75	11.82	141.7	23.1
43	16.04	217.4	22.86	11.28	162.4	23.13
52	0	9.55	22.9	14.85	141.7	23.86

**Παράρτημα Η: Κατακόρυφες μετρήσεις ροϊκού πεδίου, για βέλτιστο  $C_p$**

ΥΨΟΣ ΚΕΛΥΦΟΥΣ [cm]	P(A)	P(B)
3	-1.54	-65.22
13	1.51	-126.5
23	-1.04	-122
33	0.87	-131.6
43	-7.04	-98.58
52	-16.7	-72.03

**Παράρτημα Θ: Οριζόντιες μετρήσεις ροϊκού πεδίου, για βέλτιστο  $C_p$**

ΠΛΑΤΟΣ ΚΕΛΥΦΟΥΣ [cm]	P(Z)	P(E)	P( $\Delta$ )	P( $\Gamma$ )
0	-101.3	-159.7	-2.13	1.02
5.25	-116.9	-167.3	-1.61	1.65
10.5	-92.73	-130.6	-2.04	1.03
15.75	-94.61	-89.99	-3.62	0
21	-71.12	-105.3	-10.9	1.51
26.25	-75.23	-58.64	-7.04	0