



ΔΙΕΘΝΕΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Σχεδίαση και Μοντελοποίηση Ανεμογεννήτριας Κατακόρυφου Άξονα»



Του φοιτητή
Αγγελου Αχιλλέα Καλογερόπουλου
Αρ. Μητρώου: 513064

Επιβλέπων
Ιορδάνης Κιοσκερίδης
Βαθμίδα Καθηγητής

Ημερομηνία 18/9/2020

Τίτλος Δ.Ε. Σχεδίαση και μοντελοποίηση ανεμογεννήτριας κατακόρυφου άξονα

Κωδικός Π.Ε. 19147

Όνοματεπώνυμο φοιτητή Καλογερόπουλος Άγγελος Αχιλλέας

Όνοματεπώνυμο εισηγητή Ιορδάνης Κιοσκερίδης

Ημερομηνία ανάληψης Π.Ε. 18/11/2019

Ημερομηνία περάτωσης Π.Ε. 18/8/2020

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως πτυχιακή εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Άγγελου Αχιλλέα Καλογερόπουλου που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

«Η Πτυχιακή αυτή αφιερώνεται στην αδελφή μου Λήδα για την ακλόνητη στήριξη της »

Πρόλογος

Η νομοθεσία της ΕΕ για την προώθηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχει εξελιχθεί σημαντικά κατά τα τελευταία έτη. Οι ηγέτες της ΕΕ όρισαν το 2009 ως στόχο, το ποσοστό της κατανάλωσης της ενέργειας της ΕΕ που προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές να προσεγγίζει το 20%. Το 2018, συμφωνήθηκε ο στόχος να φτάσει στο 32% το έτος 2030. Για την επίτευξη αυτών των στόχων, η ηλιακή, η υδροηλεκτρική και η αιολική ενέργεια αποτελούν βιώσιμες εναλλακτικές της εξόρυξης των ορυκτών καυσίμων. Από αυτές, η τελευταία αποτελεί την πιο πολλά υποσχόμενη μορφή εκμετάλλευσης των ενεργειακών πηγών που ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια έχει κεντρίσει τον ενδιαφέρον πολλών ερευνητών και μηχανικών. Και ενώ οι κλασικές-δανέζικου τύπου ανεμογεννήτριες γνωστές και ως οριζόντιου άξονα- έχουν εδραιωθεί στην αγορά, παρουσιάζουν μικρό περιθώριο εξέλιξης. Σε αυτό το πνεύμα, η σχεδίαση ανεμογεννητριών στρέφεται προς την ανάπτυξη ενός άλλου τύπου, πολύ διαφορετικού, τόσο στην σχεδίαση όσο και στον τρόπο λειτουργίας, αυτή του κάθετου άξονα. Οι ανεμογεννήτριες αυτές, ενώ παλιότερα θεωρούνταν λιγότερο αποδοτικές, θα έχουν την δυνατότητα με την σωστή σχεδίαση να εφαρμοστούν σε περιπτώσεις, όπου η εγκατάσταση των κλασικών γεννητριών είναι απαγορευτική.

Περίληψη

Σε αυτή την πτυχιακή εργασία θα αναπτυχθεί ο τρόπος λειτουργίας των ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα. Πιο συγκεκριμένα θα κάνουμε μια μικρή ιστορική αναφορά και θα μιλήσουμε για τα πλεονεκτήματα που μπορούν να προσφέρουν αυτού του είδους οι μηχανές καθώς και τον τρόπο λειτουργίας τους. Στην συνέχεια θα αναπτυχθούν σε βάθος παράγοντες όπως το σχετικό πάχος, η σχετική κυρτότητα, η τραχύτητα και οι παραποιήσεις των άκρων μιας αεροτομής NACA, τον συνολικό αριθμό τους και τέλος τις διαστάσεις σε κλίμακα που μπορούν να προσφέρουν την μέγιστη απόδοση. Εκτός από τις αεροτομές θα αναπτύξουμε τις μεταβολές που προκύπτουν από αλλαγές στην θέση των βραχιόνων στήριξης ως προς τις λεπίδες, την γεωμετρία τους και την διάταξη τους. Στα επόμενα κεφάλαια γίνεται αναφορά στον τρόπο λειτουργίας της γεννήτριας και την διαφοροποίηση επαγωγικών ή μαγνητικών μηχανών. Ο ελεγκτής φορτίου αποτελεί το τελευταίο κομμάτι της κατασκευής για τον οποίο θα γίνει λόγος. Κατά την διάρκεια της εκπόνηση κατασκευάστηκε ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα της αγοράς και έγιναν μετρήσεις έτσι ώστε να καθοριστεί ο συντελεστής ισχύος χρησιμοποιώντας φορτία 50Ω και 100Ω και αργότερα μπαταρίες 12V και 24V. Σημειώνεται ότι οι μετρήσεις λήφθηκαν με την χρήση μη αεροδυναμικά σχεδιασμένων αεροτομών. Με βάση αυτές τις μετρήσεις και τα συμπεράσματα που βγάλαμε σχεδιάστηκαν νέες αεροτομές με την βοήθεια των πηγών της NACA, κώδικα της MATLAB και πρόγραμμα σχεδίασης 3D solidworks τα οποία υπολογίζεται ότι θα είναι πιο αποδοτικά.

«Design and Modeling of Vertical Axis Wind Turbine»

« Angelos Acilleas Kalogeropoulos »

Abstract

In this thesis, the operation of the vertical axis wind turbines will be discussed. More specifically, we will make a brief historical report and talk about the way this type of machines operates and the advantages they can offer. Additionally, we will discuss factors such as the relative thickness, relative curvature, roughness and distortion of the edges of a NACA airfoil as well as their total number and their scale ratio of their dimensions and how changes on them can offer more efficient performance. Furthermore, we will take note of how changes in the position of the support arms in relation to the blades, their geometry and their layout can affect the power coefficient. The following chapters will refer to the operation of the generator and the differences between induction and magnetic machines. The load controller is the last piece of construction to be discussed and analyzed. During the methodology, a vertical axis wind turbine of the market was manufactured and measurements were taken in order to determine the power factor using loads of 50Ω and 100Ω and later 12V and 24V batteries. It is noted that the measurements were taken using non-aerodynamically designed spoilers. Based on these measurements and the conclusions we drew, new air vents were designed with the help of NACA sources, MATLAB code and 3D solidworks design program which are estimated to be more efficient.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που με στήριξε σε αυτό το εγχείρημα, τον κύριο Ιορδάνη Κιοσκερίδη που με βοήθησε τόσο με βιβλιογραφικό υλικό όσο και με εργαλεία και εξαρτήματα απαραίτητα για τις μετρήσεις και κυρίως τον πατέρα μου που πριν πολλά χρόνια παρότρυνε να ασχοληθώ με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας .

Περιεχόμενα

Πρόλογος	v
Περίληψη	vi
Abstract.....	vii
Ευχαριστίες.....	viii
Περιεχόμενα	ix
Κατάλογος Σχημάτων.....	xi
Κατάλογος Πινάκων.....	xii
Συνομογραφίες.....	xiii
Κεφάλαιο 1ο: Ανεμογεννήτριες.....	1
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Ιστορική αναδρομή.....	1
1.3 Τι είναι η ανεμογεννήτρια.....	2
1.4 Θεωρία λειτουργίας των ανεμογεννητριών.....	2
1.5 Τύποι ανεμογεννήτριας.....	2
1.6 Τα οφέλη και τα προβλήματα της αιολικής ενέργειας.....	3
1.7 Γενική περιγραφή ανεμογεννήτριας κατακόρυφου άξονα	4
1.8 Επίλογος.....	5
Κεφάλαιο 2ο: Αεροτομή και δρομέας.....	6
2.1 Αεροτομές NACA.....	6
2.1.1 Συμμετρικές Αεροτομές NACA00XX	7
2.1.2 Ασύμμετρες αεροτομές τεσσάρων ψηφίων NACA	8
2.1.3 Σειρά πενταψήφιων αεροτομών NACA:	8
2.2 Αεροδυναμικοί παράγοντες.....	9
2.2.1 TSR (tip speed ratio ή λ).....	9
2.2.2 Αριθμός Reynolds.....	10
2.2.3 Φαινόμενο Stall	11
2.3 Επιδράσεις του προφίλ αεροτομής.....	12
2.3.1 Επιδράσεις του πάχους.....	13
2.3.2 Επιδράσεις Κυρτότητας.....	14
2.3.3 Επιδράσεις στις αλλαγές πρόσθιου και ούριου άκρου.....	16
2.3.4 Επιδράσεις Τραχύτητας.....	17
2.4 Ρύθμιση Δρομέα.....	19

2.4.1	Solidity.....	19
2.4.2	Επιδράσεις του λόγου χορδής-ακτίνας CR	20
2.4.3	Επίδραση του αριθμού αεροτομών.....	22
2.4.4	Επιδράσεις τρισδιάστατου πεδίου ροών.....	24
2.4.5	Αποτελέσματα αεροδυναμικών επιφανειών στα άκρα των αεροτομών.....	26
2.5	Επιδράσεις της γωνίας πρόσπτωσης στην αεροτομή.....	28
2.6	Επιδράσεις της διάταξης των βραχιόνων υποστήριξης.....	30
2.7	Επιδράσεις των τμημάτων των βραχιόνων στήριξης.....	33
2.8	Επίλογος.....	34
Κεφάλαιο 3ο: Γεννήτρια και κύκλωμα ελέγχου		35
3.1	Γεννήτρια DC.....	35
3.1.1	Σύγχρονες γεννήτριες.....	35
3.1.2	Wounded Rotor Synchronous Generator	36
3.1.3	Permanent Magnet Synchronous Generators.....	36
3.2	Σύγχρονες μηχανές μόνιμου μαγνήτη	37
3.2.1	Ακτινωτή ή Αξονική ροή.....	37
3.2.2	Διαμήκη και εγκάρσια μηχανή	38
3.2.3	Εσωτερικός και εξωτερικός δρομέας.....	39
3.3	Ανάλυση Charge Controller.....	40
3.3.1	Έλεγχος τουρμπίνας ανεμογεννήτριας	41
3.3.2	Αρχή λειτουργίας του ελεγκτή.....	42
3.4	Επίλογος.....	43
Κεφάλαιο 4ο: Μετρήσεις και σχεδίαση πτερυγίων		44
4.1	Βάση και στήλη στήριξης.....	45
4.2	Γεννήτρια και ελεγκτής φορτίου.....	46
4.3	Αεροτομές.....	50
4.4	Βραχίονες στήριξης.....	59
4.5	Επίλογος.....	63
Κεφάλαιο 5ο: Συμπεράσματα		64
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		65
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....		69

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: (α) Ανεμογεννήτρια Οριζόντιου Άξονα (β) Ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα.....	3
Σχήμα 2.1: 1.Γραμμή μηδενικής ανύψωσης, 2. Μύτη, 3.Σημείο μέγιστου πάχους, 4.Κυρτότητα, 5.Ανωεπιφάνεια, 6.Πίσω άκρο, 7.Χορδή καμπύλης, 8.Κάτω επιφάνεια	7
Σχήμα 2.2: Γραμμές Προφίλ αεροτομής :1.Χορδή, 2.Κυρτότητα, 3.Μήκος, 4.Μέση γραμμή.....	7
Σχήμα 2.3: Λόγος ανύψωσης/οπισθέλκουσας σε συνάρτηση με Re.....	11
Σχήμα 2.4: Εικονική αναπαράσταση αποκόλλησης ροής ανέμου με την αύξηση της γωνίας πρόσκρουσης	12
Σχήμα 2.5: Καμπύλες αναλογίας ανύψωσης-οπισθέλκουσας συμμετρικών αεροτομών με σχετικό πάχος (PT).....	14
Σχήμα 2.6: : Καμπύλες αναλογίας ανύψωσης-οπισθέλκουσας συμμετρικής αεροτομής με διαφορετική κυρτότητα και πάχος	16
Σχήμα 2.7: Συγκριτική ανάλυση πειραματικών και υπολογιστικών καμπύλων ανύψωσης (a) και (b) πόλοι έλξης για την αεροτομή FB-3500-0050 με σχετικό πάχος πίσω άκρης 8.75%.....	17
Σχήμα 2.8: Μεταβολές συντελεστή ισχύος C_p με την κυκλική ταχύτητα ανεμογεννήτριας τριών λεπίδων για απαλή και τραχιά επιφάνεια αεροτομών	18
Σχήμα 2.9: Καμπύλες σχέσης μεταξύ ανυψωτικής και οπισθέλκουσας δύναμης για διάφορες γωνίες πρόπτωσης αεροτομής NACA0015.....	20
Σχήμα 2.10: Σχέση μεταξύ αποτελεσματικής γωνίας πρόσπτωσης, μειωμένης συχνότητας και TSR.....	21
Σχήμα 2.11: Κυρτότητα σε συνάρτηση με τον συντελεστή ισχύος και τον λόγο χορδής-ακτίνας.....	22
Σχήμα 2.12: Καμπύλες της σχέσης μεταξύ συντελεστή ισχύος και αριθμό αεροτομών	23
Σχήμα 2.13: Η σχέση μεταξύ ύψους της ανεμογεννήτριας και μέγιστου συντελεστή ισχύος.....	25
Σχήμα 2.14: Τύποι επιφανειών άκρων αεροτομών.....	26
Σχήμα 2.15: Συντελεστής ισχύος ανεμογεννητριών με και χωρίς endplates	28
Σχήμα 2.16: Καμπύλες συντελεστή ισχύος S-VAWT σε διάφορες γωνίες πρόσπτωσης.....	29
Σχήμα 2.17: Στιγμαίος συντελεστής ισχύος S-VAWT για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης.....	30
Σχήμα 3.1: Κατακόρυφη και οριζόντια διατομή του Ακτινωτού τύπου ροής PMSG.....	37
Σχήμα 3.2: Κατακόρυφη και αξονική διατομή αξονικού τύπου ροής PMSG.....	38
Σχήμα 3.3:Εσωτερικός δρομέας PMSG (αριστερά) και εξωτερικός δρομέας PMSG (δεξιά).....	39
Σχήμα 3.4: Καμπύλη ταχύτητας ανέμου-Ισχύς εξόδου.....	41
Σχήμα 3.5 Μπλοκ διάγραμμα συστήματος S-VAWT.....	42
Σχήμα 4.1: Εξαρτήματα και εργαλεία (1.πολύμετρο, 2.ανεμόμετρο, 3.βυδολόγος, 4.πένσα, 5.κατσαβίδι, 6.probe, 7.φορτίο 100Ω, 8.Μπαταρία 12V, 9.στροφόμετρο, 10.ελεγκτής φορτίου, 11.στήριγμα, 12.κλέμες, 13.βίδες, 14.καλώδιο με μπανάνες, 15.σχοινί, 16.καλώδιο με κροκοδειλάκι, 17. Καλώδιο)	44
Σχήμα 4.2: Εξαρτήματα λοιπά (1.γεννήτρια, 2.κουτί φορτίου 50Ω, 3.αεροτομές, 4.δίσκος στήριξης).....	45
Σχήμα 4.3: Βάση στήριξης ανεμογεννήτριας	46
Σχήμα 4.4 Κύκλωμα γεννήτριας με φορτίο 50Ω (αριστερά) και φορτίο 100Ω (δεξιά)	46
Σχήμα 4.5: Συνδεσμολογία γεννήτριας, ελεγκτή και μπαταρίας, (μια μπαταρία πάνω, δυο μπαταρίες κάτω).....	48
Σχήμα 4.6: Συνδεσμολογία γεννήτριας και ελεγκτή φορτίου.....	49
Σχήμα 4.7: Κάθετη και οριζόντια προβολή ανεμογεννήτριας με αεροτομές.....	51
Σχήμα 4.8: Σχεδίαση αεροτομής NACA-6418 από MatLab	52
Σχήμα 4.9: Εισαγωγή καμπύλης αεροτομής στο solidworks.....	53
Σχήμα 4.10: Επιλογή της εντολής new sketch στο front plane.....	53

Σχήμα 4.11: convert curve to entities.....	54
Σχήμα 4.12: Εικονίδιο επιλογής εντολής Centerline.....	54
Σχήμα 4.13: Γραμμή της χορδής και εφαπτόμενη σε αυτή ευθεία.....	55
Σχήμα 4.14: Χρήση της εντολής make Vertical.....	55
Σχήμα 4.15: Ρύθμιση του προφίλ με την χρήση του Smart Dimension στα 0.5m.....	55
Σχήμα 4.16: Ανάπτυξη της αεροτομής στο χώρο με την εντολή Extrude στα 3m.....	56
Σχήμα 4.17: Απεικόνιση των ιδιοτήτων της αεροτομής με πραγματικό υλικό.....	57
Σχήμα 4.18: Απεικόνιση νέου φτερού με πάχος 5mm χωρίς εσωτερικό.....	57
Σχήμα 4.19: Αεροτομή χωρίς αεροδυναμική σχεδίαση στο άκρο.....	58
Σχήμα 4.20: Αεροτομή με την ένταξη αεροδυναμικών καμπύλων στα άκρα του.....	58
Σχήμα 4.21: Σχεδίαση κύκλου περιστροφής αεροτομών.....	59
Σχήμα 4.22: Τοποθέτηση αεροτομής στην περίμετρο του κύκλου.....	60
Σχήμα 4.23: Εισαγωγή των υπολοίπων αεροτομών συμμετρικά του κύκλου.....	60
Σχήμα 4.24: Απεικόνιση τριών συμμετρικών αεροτομών.....	61
Σχήμα 4.25: Σχεδίαση βραχίονα πάνω στην αεροτομή.....	61
Σχήμα 4.26: Συμμετρική σχεδίαση των βραχιόνων (αριστερά) και ανάπτυξη στον χώρο (δεξιά).....	62
Σχήμα 4.27: Τελική διαμόρφωση βραχιόνων ανεμογεννήτριας.....	62
Σχήμα 4.28: Σχεδίαση δρομέα με χρώμα.....	63

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 4.1: Μετρήσεις RPM, ρεύματος φάσης, τάσης γεννήτριας σε συνάρτηση με την ταχύτητα του ανέμου και το φορτίο.....	47
Πίνακας 4.2: Μετρήσεις στις μπαταρίες και στον ελεγκτή σε συνάρτηση με την ταχύτητα του ανέμου με δύο διαφορετικά φορτία.....	50

Συντομογραφίες

ΔΙΠΑΕ	Διεθνές Πανεπιστήμιο Ελλάδος
Π.Ε.	Πτυχιακή Εργασία
N	Αριθμός λεπίδων
C	Μήκος χορδής λεπίδας
H	Ύψος λεπίδας
σ	Solidity
ω	Κυκλική ταχύτητα της τουρμπίνας (rad/s)
λ	Tip Speed Ratio (TSR)
C_p	Συντελεστής Ισχύος
θ	Γωνία στο αζιμούθιο
α	Γωνία πρόσπτωσης
C_l	Συντελεστής ανύψωσης
C_d	Συντελεστής οπισθέλκουσας
RT	Σχετικό πάχος
RC	Σχετική κυρτότητα
Re	Reynolds αριθμός
HAWT	Horizontal axis wind turbine (ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα)
VAWT	Vertical axis wind turbine (ανεμογεννήτρια κάθετου άξονα)
S-VAWT	Strait-blades Vertical axis wind turbine
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics

Κεφάλαιο 1ο: Ανεμογεννήτριες

1.1 Εισαγωγή

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελούν αναμφίβολα μια πολλά υποσχόμενη επιστήμη για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του πλανήτη. Δεδομένου ότι τα αποθέματα των συμβατικών καυσίμων είναι πλέον φανερό ότι έχουν ημερομηνία λήξης, η αξιοποίηση εναλλακτικών πηγών, όπως η αιολική και η ηλιακή μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλη ανεξαρτητοποίηση από την πεπατημένη πετρελαϊκή οδό. Επιπλέον κίνητρα για την εφαρμογή τους αποτελεί ο φιλικός προς το περιβάλλον χαρακτήρας τους, καθώς και η ανάπτυξη σύγχρονων τεχνολογιών για την μέγιστη αποδοτικότητά τους.

Η εργασία θα πραγματευτεί την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας, δηλαδή την μετατροπή του ανέμου σε κινητική, και κατ' επέκταση ηλεκτρική ενέργεια και πώς με την χρήση ανεμογεννητριών, έξυπνα σχεδιασμένων, μπορούμε να επιτύχουμε την μέγιστη απόδοση. Επιπλέον, θα γίνει λόγος και στα επιμέρους κομμάτια που απαρτίζουν την ανεμογεννήτρια, καθώς και στο πώς αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους.

Η κατανόηση του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής θα έχει πάντα ένα χαρακτήρα στοχαστικό. Έτσι, η απόδοση της ισχύος παρόλες τις στατιστικές μελέτες γίνεται μόνο όταν η φύση το επιτρέπει. Αυτό, σε συνδυασμό με τους κατασκευαστικούς περιορισμούς και το όριο το οποίο καθορίστηκε από τον Betz, το οποίο δηλώνει πως το μέγιστο ποσοστό της συνολικής ισχύος του ανέμου που μπορεί να συλλεχτεί μηχανικά είναι της τάξεως του 59%, δεν επιτρέπουν στην αιολική ενέργεια να καταστεί πρωτοπόρα τεχνολογία στον ενεργειακό τομέα.

1.2 Ιστορική αναδρομή

Από το πέρασμα ενός τυφώνα και από το μέγεθος των καταστροφών που επέρχονται είναι φανερό ότι η ισχύς του ανέμου μπορεί να είναι πολύ μεγάλη και καθοριστική. Πριν την ανακάλυψη των ατμομηχανών και μηχανών εσωτερικής καύσης οι άνθρωποι αξιοποίησαν αυτή την ισχύ για την διευκόλυνση της ζωής τους. Μερικές από τις σημαντικότερες εφαρμογές ήταν η κίνηση των πλοίων με την βοήθεια πανιών, η κίνηση ανεμόμυλων για την άλεση του σιταριού και για την άντληση νερού με σκοπό την ύδρευση. Αργότερα, κατά τον 20^ο αιώνα ξεκίνησε να χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρική ενέργειας και οι ανεμόμυλοι μετατράπηκαν σε ανεμογεννήτριες.

Καθώς τα πρώτα ηλεκτρικά δίκτυα αποτελούνταν από καλώδια χαμηλής τάσης συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος, οι τότε ανεμογεννήτριες παρουσίαζαν μεγάλες απώλειες. Συνεπώς η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έπρεπε να γίνεται κοντά στην περιοχή όπου θα καταναλωθεί, γεγονός που έκανε τις ανεμογεννήτριες ιδανικές για αγροτικές εκτάσεις. Σταδιακά όμως η εφαρμογή τους επισκιάστηκε από την χρήση μηχανών diesel και ατμομηχανές που ήταν οικονομικότερες στην εγκατάσταση και με μεγαλύτερη απόδοση. Κατά την διάρκεια του Β' Παγκόσμιου Πολέμου η αιολική ενέργεια άνησε καθώς η προμήθεια καυσίμου ήταν δύσκολη.

Μετά το τέλος του πολέμου, χώρες όπως η Γερμανία, η Γαλλία, η Αγγλία και η Δανία έκαναν σημαντικές προσπάθειες για την ανάπτυξη αποδοτικότερων ανεμογεννητριών ως μια προσπάθεια ανεξαρτητοποίησης από την ανάγκη ορυκτών καυσίμων. Με την Δανία πρωταγωνιστή, το 1950 ο Johannes Juul κατασκεύασε την διάσημη ανεμογεννήτρια Gedser και εισήγαγε αυτό που τώρα ονομάζουμε Δανικό πρότυπο ανεμογεννήτριας. Αυτή ήταν συνδεδεμένη σε μία ασύγχρονη γεννήτρια μη συνεχούς ρεύματος, το δρομέα που αποτελούνταν από τρία πτερύγια τα οποία ήταν προσανατολισμένα αντίθετα από την κατεύθυνση του ανέμου και κινούνταν με συνεχή ταχύτητα περιστροφής.

Αργότερα, με την πετρελαϊκή κρίση του 1973, πολλές χώρες προσανατολίστηκαν ξανά προς την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας και ξεκίνησαν διεθνή προγράμματα, με σκοπό την έρευνα

σχετικά με τις χρήσεις της. Κατασκευάστηκαν υπερμεγέθη πρωτότυπα για την αξιολόγηση των οικονομικών παραγόντων και για την μέτρηση των φορτίων.

Οι ετήσιες εισπράξεις των ανεμογεννητριών μετά την πετρελαϊκή κρίση κατά την δεκαετία του 1990 ξεπέρασαν τα 1 δις. δολάρια. Οι ανεμογεννήτριες γίνονται όλο και μεγαλύτερες και αποδοτικότερες και φαίνεται να αυξάνουν το ετήσιο εισόδημα τους περίπου 20% ανά έτος.

Τα τελευταία χρόνια, η εστίαση στην αιολική ενέργεια έχει αυξηθεί σημαντικά, λόγω της έλλειψης πόρων και της κλιματικής αλλαγής. Η Ευρωπαϊκή Ένωση είχε θέσει ως στόχο την μετατροπή του 20% των ενεργειακών της πόρων σε ανανεώσιμη και εκτιμάται ότι η αιολική ενέργεια θα μπορούσε να συνεισφέρει το ένα τρίτο αυτής. Ωστόσο, η αιολική ενέργεια πρόσφερε λιγότερο από 0,7% του 16% των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας το 2009, υποδηλώνοντας ότι υπήρχε αρκετός χώρος για την ανάπτυξη της.

1.3 Τι είναι η ανεμογεννήτρια

Η ανεμογεννήτρια είναι μια αιολική μηχανή που μετατρέπει τον άνεμο από κινητική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Η κατασκευή της αποτελείται από μία στήλη κάθετη προς το έδαφος και από μία τουρμπίνα στην κορυφή της. Μικρές ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούνται για διάφορες εφαρμογές όπως η φόρτιση μπαταριών, για συμπληρωματική ενέργεια σε σκάφη και τροχόσπιτα ή για τροφοδοσία ρεύματος σε πινακίδες. Μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούνται για παροχή ρεύματος σε σπίτια. Πλήθος τέτοιων ανεμογεννητριών συγκροτούν τα αιολικά πάρκα, που αποτελούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Πολλές χώρες έχουν κατασκευάσει αιολικά πάρκα, με σκοπό τη μείωση εκπομπής ρυπογόνων ουσιών και την απεξάρτησή τους από τα ορυκτά καύσιμα

1.4 Θεωρία λειτουργίας των ανεμογεννητριών

Η βασική αρχή λειτουργίας της ανεμογεννήτριας είναι απλή. Η κινητική ενέργεια του ανέμου μετατρέπεται σε μηχανική από τον δρομέα και στην συνέχεια σε ηλεκτρική από μία γεννήτρια. Την μέγιστη διαθέσιμη ισχύ P_{max} έχουμε όταν η ταχύτητα του ανέμου, εξερχόμενη από τον δρομέα, γίνεται μηδέν και δίνεται από την παρακάτω σχέση

$$P_{max} = \frac{1}{2} \dot{m} V_0^2 = \frac{1}{2} \rho A V_0^3, \quad (1.1)$$

Όπου \dot{m} η παροχή μάζας, V_0 η ταχύτητα του ανέμου, ρ η πυκνότητα του αέρα και A η επιφάνεια προσβολής. Η σχέση αυτή δείχνει ότι η μέγιστη διαθέσιμη ισχύς συνδέεται γραμμικά με την πυκνότητα και την επιφάνεια και είναι ανάλογη με την ταχύτητα του ανέμου στον κύβο.

Ο συντελεστής ισχύος C_p ορίζεται ως ο λόγος της πραγματικής ισχύος προς την μέγιστη γιατί στην πράξη η ελάττωση της ταχύτητας εξόδου του ανέμου στο μηδέν είναι φυσικά μη εφικτή. Ο μέγιστος θεωρητικός συντελεστής ισχύος $C_{p,0}$, ο οποίος είναι γνωστός και ως όριο του Betz, το οποίο είναι:

$$C_{p,max} = 16/27 = 0.593, \quad (1.2)$$

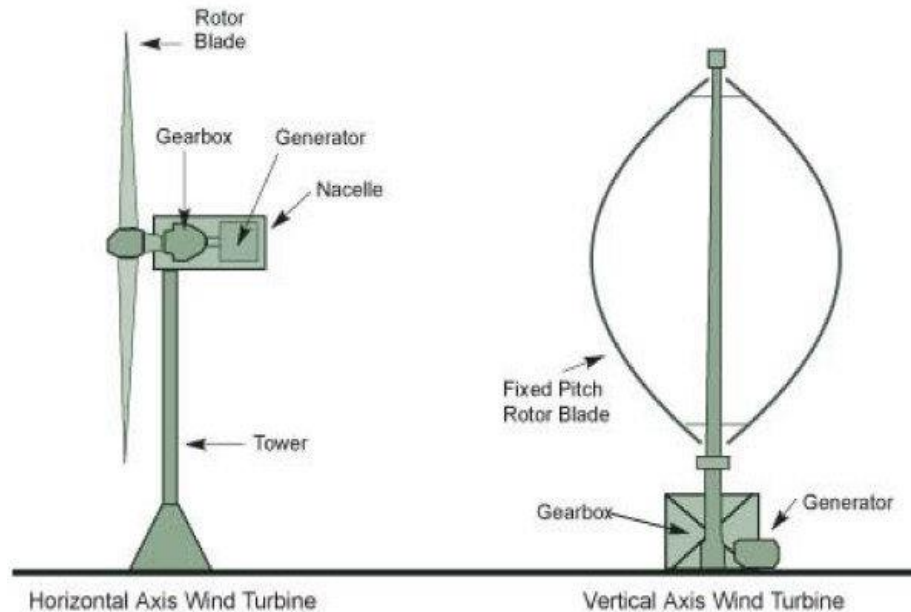
Πολλές ανεμογεννήτριες λειτουργούν κοντά σε αυτό το όριο με τιμές C_p περίπου μέχρι και 0.5. Ωστόσο η παραγόμενη ισχύς εξαρτάται και από την τοποθέτηση των ανεμογεννητριών. [2]

1.5 Τύποι ανεμογεννήτριας

Από την αρχαιότητα, είχε παρατηρηθεί, ότι για την ώθηση των πλοίων η άνωση έχει το πλεονέκτημα έναντι της δύναμης αντίστασης (οπισθέλκουσας) του ανέμου. Είναι εύκολο να αποδειχθεί θεωρητικά ότι η άνωση, η οποία έχει κατεύθυνση κάθετη στην ταχύτητα του ανέμου, είναι πιο αποδοτική στην χρήση της για την απομάστευση της ισχύος του ανέμου, παρά την αντίσταση, η οποία είναι παράλληλη με αυτόν. Συνεπώς, τα πτερύγια σε σχήμα προπέλας έχουν κυριαρχήσει σε όλες τις

σύγχρονες ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα (Horizontal Axis Wind Turbines – HAWT). (Σχήμα 1.1.α)

Υπάρχει και ένας δεύτερος τύπος ανεμογεννήτριας της οποίας τα φτερά είναι συνδεδεμένα σε άξονα κάθετο στην ροή του ανέμου, σε αντίθεση με του οριζόντιου άξονα που τα φτερά είναι σε άξονα παράλληλο με την ροή του ανέμου. Αυτός ο τύπος ανεμογεννήτριας ονομάζεται κατακόρυφου άξονα (Vertical Axis Wind Turbine - VAWT) (Σχήμα 1.1.β).



Σχήμα 1.1: (α) Ανεμογεννήτρια Οριζόντιου Άξονα (β) Ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα

1.6 Τα οφέλη και τα προβλήματα της αιολικής ενέργειας

Όταν χρησιμοποιούνται εναλλακτικές πηγές ενέργειας, όπως η αιολική, μια χώρα ή μια περιοχή γίνεται αυτόματα πιο αυτόνομη παρόλο που ενεργειακά βασίζεται στην εισαγωγή πετρελαίου. Επιπλέον, οι ανεμογεννήτριες δεν δημιουργούν ρύπους όπως CO_2 , επομένως δεν συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Η αιολική ενέργεια με την λειτουργία της δημιουργεί επιπρόσθετες νέες θέσεις εργασίας. Συνεχίζοντας, σε απομακρυσμένες περιοχές η αιολική ενέργεια σε συνδυασμό με μία μηχανή diesel (Υβριδικό Σύστημα) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την φόρτιση μπαταριών ή την απευθείας τροφοδότηση ενός αδύναμου ηλεκτρικού δικτύου.

Επιπλέον, σε ορισμένες περιοχές της Μέσης Ανατολής οι ανεμογεννήτριες έχουν εφαρμοστεί για αφαλάτωση του νερού, ενώ σε περιοχές με έντονους ανέμους το κόστος και η ποιότητα της ηλεκτρικής ενέργειας είναι πολύ καλύτερη σε σχέση με αυτήν που παράγεται με τις παραδοσιακούς ρυπογόνους μεθόδους.

Εν αντιθέσει, ένα από τα βασικά μειονεκτήματα των ανεμογεννητριών είναι ο θόρυβος. Οι κατασκευαστές κατάφεραν να μειώσουν το μηχανικό θόρυβο καθώς και τον θόρυβο κατά την περιστροφή των πτερυγίων κάνοντας τις πιο «φιλικές» για κατοικημένες περιοχές. Παρόλα αυτά υπάρχει αρκετός χώρος για βελτίωση.

Ένας άλλος αρνητικός παράγοντας όσον αφορά τις ανεμογεννήτριες είναι το κόστος κατασκευής τους. Παρόλο που ο προσανατολισμός έγγυται στη μείωση του κόστους της ίδιας της ανεμογεννήτριας, παράγοντες όπως τα επιτόκια, η αξία της γης και ο αναμενόμενος άνεμος στην

περιοχή εγκατάστασης καθιστούν την κατασκευή τους δύσκολη ή και μη βιώσιμη, ειδικά σε περιοχές όπου η φύση δεν το επιτρέπει.

Παρόλα αυτά εξαιτίας της μείωσης των ορυκτών ενεργειακών αποθεμάτων και την αναγκαία μείωση των ρύπων η χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, και κατά περίπτωση της αιολικής, είναι μια χρήσιμη προσθήκη στο ενεργειακό ισοζύγιο που ταλαντεύεται ανάμεσα στον σύγχρονο τρόπο ζωής και την ενεργειακή απομάστευση του πλανήτη.

1.7 Γενική περιγραφή ανεμογεννήτριας κατακόρυφου άξονα

Παρόλο που τα VAWT ήταν η πρώτη ανεμογεννήτρια που χρησιμοποιήθηκε για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας, οι ερευνητές έχασαν το ενδιαφέρον τους λόγω της αρχικής αντίληψης ότι οι VAWT ήταν λιγότερο αποδοτικές από τις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα. Έτσι, οι HAWT έλαβαν περισσότερη τεχνική και οικονομική υποστήριξη και κατέλαβαν το μεγαλύτερο μέρος της ενεργειακής υποδομής. Ευτυχώς, επιστημονικές έρευνες πάνω στις VAWT συνεχίστηκαν, αν και σε μικρότερη κλίμακα και επιστρέφουν τα τελευταία χρόνια. Με την εκκίνηση εκτεταμένων ερευνών, αποκτήθηκε μια καλύτερη κατανόηση του VAWT. Πραγματοποιήθηκε ανάλυση σύγκρισης των VAWT και HAWT και διαπιστώθηκε ότι η ανεμογεννήτρια κάθετου άξονα ευθείας λεπίδας προσφέρει μια εφικτή λύση για τη μορφή ανέμου μεγάλης κλίμακας. Εκ πρώτης όψεως, οι διαφορές μεταξύ HAWT και S-VAWT είναι η κατεύθυνση περιστροφής και οι προδιαγραφές της λεπίδας όπως και τοποθέτηση τους.

Έτσι, η περιεκτική ανάλυση του S-VAWT εισήχθη στο επόμενο τμήμα. Για το S-VAWT, ο άξονας περιστροφής είναι κάθετος προς την κατεύθυνση του ανέμου, ο οποίος έχει την ικανότητα να συλλέγει ανέμους από οποιαδήποτε κατεύθυνση χωρίς μηχανισμό εκτροπής. Επομένως, δεν υπάρχουν απώλειες ισχύος από το σύστημα εκτροπής για να ανταπεξέλθει στις προσωρινές αλλαγές της κατεύθυνση του ανέμου αλλά ούτε και απώλειες για την λειτουργία αυτού του μηχανισμού [4]. Επιπλέον, λόγω της πανκατευθυντικής της ικανότητας, οι S-VAWT μπορούν να εγκατασταθούν σε μέρη με πολύ ασταθή ροή ανέμου, όπως βουνά ή κορυφές κτιρίων [5]. Επιπλέον, η γεννήτρια άμεσης κίνησης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις S-VAWT, προσφέρει πολύ ταχύτερη απόκριση σε αλλαγές στον άνεμο και στα φορτία. Επιπλέον, λόγω του κατακόρυφου άξονα, μειώνουν τους περιορισμούς περιστροφής στον άξονα μετάδοσης που επιβάλλονται από ταλαντώσεις, που οδηγούν τελικά σε κατασκευή πιο λεπτών πύργων στήριξης [6]. Με πολύ χαμηλότερο κέντρο βάρους και τον εξοπλισμό παραγωγής ενέργειας κοντά στο έδαφος, οι S-VAWT μπορούν τελικά να αντέξουν πολύ υψηλότερες ταχύτητες ανέμου προσφέροντας έτσι τον κατάλληλο σχεδιασμό για ανεμογεννήτριες μεγάλης κλίμακας.

Σε σύγκριση με το HAWT, είναι προφανές ότι οι αεροτομές και οι βραχιόνες στήριξης είναι βασικές και σημαντικές παράμετροι για μια S-VAWT. Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η επιπλέον δομή και η μάζα που προστίθενται στην τουρμπίνα μέσω των βραχιόνων στήριξης οδηγεί σε μεγαλύτερη αεροδυναμική αντίσταση και ροπή αδράνειας. Έτσι ο σχεδιασμός των βραχιόνων στήριξης και των αεροτομών είναι μια ισορροπία ακαμψίας και αποτελεσματικότητας. Οι αεροτομές των S-VAWT υφίστανται στροβιλισμούς από την ανάντη και τις ροές εκκίνησης στα κατάντη, γεγονός που οδηγεί σε θεωρητικές αβεβαιότητες [7], και είναι πιθανόν ο κύριος λόγος για τον οποίο οι παγκόσμιες ερευνητικές προσπάθειες για τις ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα είχαν μειωθεί τις τελευταίες δεκαετίες. Περισσότερες λεπτομέρειες και για την σύγκριση των HAWT και S-VAWT συνοψίστηκαν στη βιβλιογραφία [4,8].

Πιστεύεται ευρέως ότι συνήθως οι S-VAWT ήταν λιγότερο αποδοτικές. Πρέπει ωστόσο να σημειωθεί ότι η εμπορική, οριζόντιου τύπου ανεμογεννήτρια έχει βελτιστοποιηθεί για πολλά χρόνια και ο μηχανισμός ελεγχόμενης κλήσης του φτερού χρησιμοποιείται ευρέως. Αντίθετα, η πλειονότητα των S-VAWT είναι σταθερές επομένως δεν θα πρέπει να είναι συγκρίσιμες. Επιστήμονες και μηχανικοί

ισχυρίστηκαν ότι οι HAWT έχουν φθάσει στο μέγιστο μέγεθος τους, σχετικά με τις τάσεις που δέχονται από τις κυκλικές δυνάμεις του δρομέα. Ως εκ τούτου δεν υπάρχει πλέον κανένα οικονομικό όφελος με πολύ μεγαλύτερο μέγεθος [9]. Με τις αυξανόμενες προσπάθειες που αφιερώνονται στις S-VAWT, οι θεμελιώδεις έρευνες της S-VAWT που διεξήχθησαν παρακάτω σε αυτό το έγγραφο για να παρέχουν κάποιες συμβουλές σε άλλους ερευνητές. Προτάθηκαν ορισμένα ζητήματα σχεδιασμού για τη βελτιστοποίηση της διαμόρφωσης του δρομέα, για καλύτερη ικανότητα αυτόματης εκκίνησης και υψηλότερο συντελεστή ισχύος.

1.8 Επίλογος

Με το τέλος αυτού του κεφαλαίου έχουμε μια αποκτήσει μια επιφανειακή κατανόηση σχετικά με τις ανεμογεννήτριες. Γνωρίσαμε την βασική αρχή λειτουργίας τους καθώς και πώς εξελίχθηκαν ανα τους αιώνες. Είναι φανερό ότι έχουν πολλά πλεονεκτήματα έναντι των ορυκτών πηγών ενέργειας αλλά παρουσιάζουν και αυτές προβλήματα που πρέπει να λυθούν. Επίσης είδαμε ότι υπάρχουν δύο ειδών ανεμογεννήτριες και ότι αποφασίσαμε στην προκειμένη εργασία να ασχοληθούμε με τις ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα πάνω στις οποίες έχει γίνει και η μικρότερη μελέτη.

Κεφάλαιο 2ο: Αεροτομή και δρομέας

2.1 Αεροτομές NACA

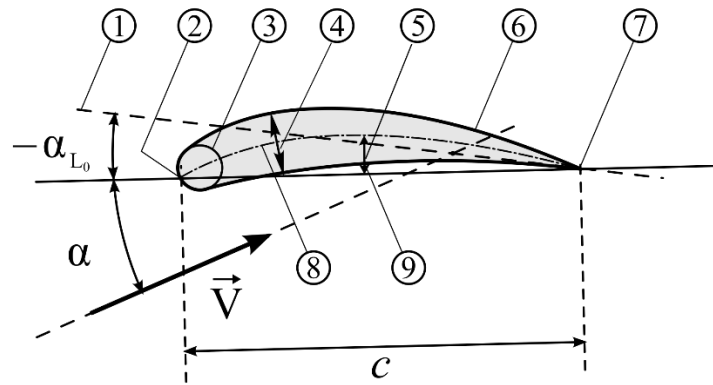
Οι αεροτομές NACA είναι σχήματα αεροτομών για φτερά αεροσκαφών που αναπτύχθηκαν από την Εθνική Συμβουλευτική Επιτροπή Αεροναυτικής (National Advisory Committee for Aeronautics). Το σχήμα των αεροτομών NACA περιγράφονται χρησιμοποιώντας μια σειρά ψηφίων ακολουθώντας τη λέξη "NACA". Τα ψηφία αυτά αντιστοιχούν σε παραμέτρους που μπορούν να εισαχθούν σε εξισώσεις για να δημιουργήσουν με ακρίβεια τη διατομή της αεροτομής και να υπολογιστούν οι ιδιότητές της.

Η NACA ανέπτυξε αρχικά το αριθμημένο σύστημα αεροτομών που βελτιώθηκε περαιτέρω από την Πολεμική Αεροπορία των Ηνωμένων Πολιτειών στο Κέντρο Έρευνας του Langley. Σύμφωνα με τον ιστότοπο της NASA: Στα τέλη της δεκαετίας του 1920 και στη δεκαετία του 1930, η NACA ανέπτυξε μια σειρά από διεξοδικά ελεγμένες αεροτομές και επινόησε μια αριθμητική ονομασία για κάθε αεροτομή - έναν τετραψήφιο αριθμό που αντιπροσωπεύει τις κρίσιμες γεωμετρικές ιδιότητες του. Μέχρι το 1929, ο Langley είχε αναπτύξει αυτό το σύστημα στο σημείο όπου το σύστημα αρίθμησης είχε συμπληρωθεί πλήρως από διάφορων κωδικών αεροτομές και ο πλήρης κατάλογος των 78 αεροτομών εμφανίστηκε στην ετήσια έκθεση της NACA για το 1933. Οι μηχανικοί μπορούσαν να δουν γρήγορα τις ιδιαιτερότητες κάθε σχήματος αεροτομής, και ο αριθμητικός κωδικός ("NACA 2415", για παράδειγμα) καθόριζε πλέον γραμμές κυρτότητας, μέγιστο πάχος και ειδικά χαρακτηριστικά του εμπρόσθιου και οπίσθιου άκρου. Αυτά τα νούμερα και σχήματα μετέδιδαν το είδος των πληροφοριών σε μηχανικούς που τους επέτρεψαν να επιλέξουν συγκεκριμένες αεροτομές με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά απόδοσης. [71]

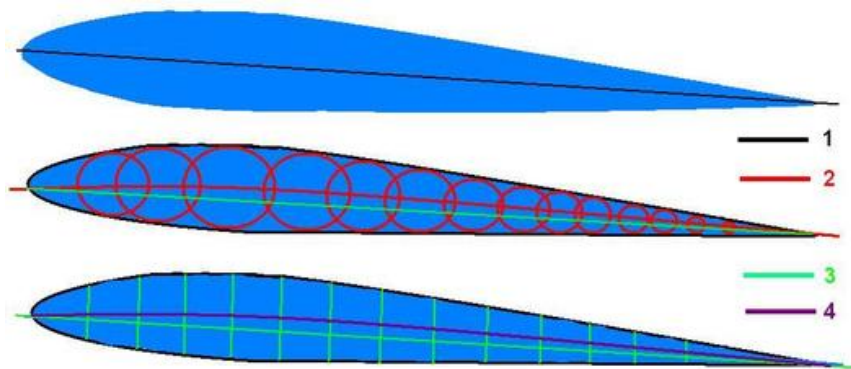
Οι τετραψήφιες αεροτομές NACA καθορίζουν το προφίλ της αεροτομής με τον εξής τρόπο[72]:

- Το πρώτο ψηφίο (M Max Camber) περιγράφει τη μέγιστη κυρτότητα ως ποσοστό της χορδής
- Το δεύτερο ψηφίο (P Chordwise position of M) περιγράφει την απόσταση της μέγιστης κυρτότητας από το μπροστινό άκρο της αεροτομής χωρισμένο σε δέκατα της χορδής
- Τα δύο τελευταία ψηφία (XX Max section Thickness) περιγράφουν το μέγιστο πάχος της αεροτομής ως ποσοστό της χορδής [73]

Για παράδειγμα η αεροτομή NACA 2412 έχει μέγιστη κυρτότητα 2% που βρίσκεται 40% (0,4 του μήκους της χορδής) από το μπροστινό άκρο και έχει μέγιστο πάχος 12% της χορδής. Η αεροτομή NACA 0015 είναι συμμετρική, τα 00 που βλέπουμε στην αρχή υποδηλώνουν ότι δεν υπάρχει κυρτότητα. Το 15 υποδηλώνει ότι η αεροτομή έχει λόγο πάχους προς μήκος της χορδής 15%. Έχει δηλαδή πάχος 15% του μήκους της.



Σχήμα 2.1: 1.Γραμμή μηδενικής ανύψωσης, 2. Μύτη, 3.Σημείο μέγιστου πάχους, 4.Κυρτότητα, 5.Άνωεπιφάνεια, 6.Πίσω άκρο, 7.Χορδή καμπύλης, 8.Κάτω επιφάνεια



Σχήμα 2.2: Γραμμές Προφίλ αεροτομής : 1 .Χορδή, 2.Κυρτότητα, 3.Μήκος, 4.Μέση γραμμή

2.1.1 Συμμετρικές Αεροτομές NACA00XX

Παρακάτω φαίνεται η εξίσωση για συμμετρικές τετραγήφιες NACA αεροτομές δηλαδή για αεροτομές με κωδικό NACA 00XX όπου το XX αντικαθίσταται από το ποσοστό του πάχους της χορδής: [74]

$$y_t = 5t[0.2969\sqrt{x} - 0.1260x - 0.3516x^2 + 0.2843x^3 - 0.1015x^4], \quad (2.1)$$

όπου x είναι η θέση κατά μήκος της χορδής από 0 έως 1,00 (0 έως 100%), y_t είναι το μισό πάχος σε μια δεδομένη τιμή x (κεντρική γραμμή προς επιφάνεια) και το t είναι το μέγιστο πάχος ως κλάσμα της χορδής (οπότε το t δίνει τα δύο τελευταία ψηφία στον τετραγήφιο κωδικό NACA διαιρούμενη με 100)

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι στην εξίσωση $\frac{x}{c} = 1$ (που αναφέρεται στο πίσω άκρο της αεροτομής), το πάχος δεν είναι ακριβώς μηδέν. Εάν απαιτείται ένα άκρο μηδενικού πάχους, για παράδειγμα για την υλοποίηση κάποιας εφαρμογής, ένας από τους συντελεστές θα πρέπει να τροποποιηθεί έτσι ώστε να είναι 0. Η τροποποίηση του τελευταίου συντελεστή (για παράδειγμα στο -0.1036) θα έχει ως αποτέλεσμα τη μικρότερη αλλαγή στο συνολικό σχήμα της αεροτομής. Το εμπρόσθιο άκρο προσεγγίζει έναν κύλινδρο με ακτίνα r όπου :

$$r = 1.1019 \frac{t^2}{c}, \quad (2.2)$$

Τώρα οι συντεταγμένες (x_u, y_u) της άνω επιφάνειας της αεροτομής και οι συντεταγμένες (x_L, y_L) της κάτω επιφάνειας είναι :

$$x_u = x_L = x, \quad (2.3)$$

$$y_u = +y_t, \quad y_L = -y_t, \quad (2.4)$$

Είναι δεδομένο ότι οι αεροτομές τετραψήφιου κωδικού έχουν προεπιλεγμένο μέγιστο πάχος 30% της χορδής από το μπροστινό άκρο.

2.1.2 Ασύμμετρες αεροτομές τεσσάρων ψηφίων NACA

Οι απλούστερες ασύμμετρες αεροτομές 4ψηφίων NACA χρησιμοποιούν την ίδια φόρμουλα με εκείνη των συμμετρικών αεροτομών 4^{ων} ψηφίων (NACA 00XX) με την διαφορά ότι η χορδή είναι ελαφρώς κυρτή. Ο τύπος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της κλίσης της χορδής φαίνεται παρακάτω:[74]

$$y_c = \begin{cases} \frac{m}{p^2} \left(2p \left(\frac{x}{c} \right) - \left(\frac{x}{c} \right)^2 \right), & 0 \leq x \leq pc \\ \frac{m}{(1-p)^2} \left((1-2p) + 2p \left(\frac{x}{c} \right) - \left(\frac{x}{c} \right)^2 \right), & pc \leq x \leq c \end{cases}, \quad (2.5)$$

Όπου:

- m είναι η μέγιστη κυρτότητα (m είναι το πρώτο από τα 4 ψηφία)
- p είναι το σημείο της μέγιστης κυρτότητας (p είναι το δεύτερο ψηφίο στον τετραψήφιο κωδικό NACAXXXX)

Για παράδειγμα η αεροτομή NACA 2412 παρουσιάζει μια κυρτότητα 2% (πρώτο ψηφίο) 40% κατά μήκος της χορδής της αντίστοιχης συμμετρικής αεροτομής 0012 με πάχος 12% του μήκους χορδής (τρίτο και τέταρτο ψηφίο)

Για αυτού του τύπου τις κυρτές αεροτομές επειδή το πάχος πρέπει να εφαρμόζεται κάθετα στην γραμμή της χορδής οι συντεταγμένες (x_u, y_u) και (x_L, y_L) της άνω και κάτω επιφάνειας της αεροτομής αντίστοιχα υπολογίζεται ως εξής :[80]

$$\begin{aligned} x_u &= x - y_t \sin \theta, & y_u &= y_c + y_t \cos \theta, \\ x_L &= x + y_t \sin \theta, & y_L &= y_c - y_t \cos \theta, \end{aligned} \quad (2.6)$$

Όπου :

$$\theta = \arctan \frac{dy_c}{dx}, \quad (2.7)$$

Και :

$$\frac{dy_c}{dx} = \begin{cases} \frac{2m}{p^2} \left(p - \frac{x}{c} \right), & 0 \leq x \leq pc, \\ \frac{2m}{(1-p)^2} \left(p - \frac{x}{c} \right), & pc \leq x \leq c \end{cases}, \quad (2.8)$$

2.1.3 Σειρά πενταψήφιων αεροτομών NACA:

Υπάρχουν και αεροτομές NACA 5 [81] ψηφίων που περιγράφουν πιο περίπλοκα σχήματα αεροτομής . Η μορφή τους είναι LPSTT, όπου :

- L: ένα μόνο ψηφίο που αντιπροσωπεύει τον θεωρητικό βέλτιστο συντελεστή ανύψωσης στην ιδανική γωνία προσβολής
- P: ένα μόνο ψηφίο για τη συντεταγμένη χ του σημείου της μέγιστης κυρτότητας
- S: ένα μόνο ψηφίο που δείχνει εάν η κυρτότητα είναι απλή ($S=0$) ή αντανακλαστική ($S=1$)
- TT: το μέγιστο πάχος σε ποσοστό χορδής, όπως και σε μια αεροτομή NACA τετραψήφιου κωδικού.

Με τις τελευταίες δεν θα ασχοληθούμε στην συγκεκριμένη εργασία καθώς η περιπλοκότητα τους τις καθιστά μη αποτελεσματικές για την συγκεκριμένη εφαρμογή.

2.2 Αεροδυναμικοί παράγοντες

Υπάρχουν ορισμένοι παράγοντες αεροδυναμικής για τους οποίους θα αναφερθούμε καθόλη την διάρκεια της πτυχιακής και θα πρέπει να έχουμε μια γενική κατανόηση τους, τι αντιπροσωπεύουν και πως οι μεταβολές που θα προκαλέσουμε στις αεροτομές, στους βραχίονες στήριξης και στον δρομέα επηρεάζουν αυτούς τους παράγοντες. Θα αναφερθούμε στο TSR (tip speed ratio), στον αριθμό Reynolds, και στο φαινόμενο Stall.

2.2.1 TSR (tip speed ratio ή λ)

Ο σχεδιασμός των ανεμογεννητριών πρέπει να είναι τέτοιος, έτσι ώστε να ταιριάζει τη γωνιακή ταχύτητα του δρομέα με την ταχύτητα ανέμου, έχοντας σαν στόχο τη βέλτιστη απόδοση, δηλαδή να εκμεταλλεύονται τη μέγιστη δυνατή ισχύ της ροής του αέρα. Αν ο δρομέας περιστρέφεται πολύ αργά, τότε ο περισσότερος αέρας περνάει μέσα από τα κενά των πτερυγίων και εκμεταλλεύεται πολύ μικρή ισχύ. Αντιθέτως, αν περιστρέφεται πολύ γρήγορα, τότε πτερύγια συμπεριφέρονται ως στερεά εμπόδια στην ροή του αέρα, με αποτέλεσμα να έχουμε μειωμένη εξαγωγή ισχύος. Επομένως, η εκλογή Tip Speed Ratio πρέπει να είναι τέτοια έτσι ώστε να έχουμε τη μέγιστη απόδοση. Το Tip Speed Ratio ορίζεται ως η ταχύτητα του άκρου του πτερυγίου προς την ταχύτητα του ανέμου ($\lambda = \frac{\omega r}{V}$) και εξαρτάται από τον ιδιαίτερο σχεδιασμό της τουρμπίνας, το προφίλ της αεροτομής και τον αριθμό των πτερυγίων. Το βέλτιστο λ εξαρτάται από τη σχέση του χρόνου t_w που χρειάζεται η διαταραγμένη ροή να επανακτηθεί, προς το χρόνο t_s που χρειάζεται ένα πτερύγιο με γωνιακή ταχύτητα ω να πάρει τη θέση του επόμενου. Έτσι έχουμε $t_s = \frac{2\pi}{n\omega}$ [sec] και $t_w = \frac{s}{V}$ [sec], όπου s είναι το μήκος του διαταραγμένου αέρα ανάντι και κατάντι του δρομέα. Όταν είναι $t_s > t_w$ τότε ένα μέρος του αέρα μένει ανεπηρέαστο, και αν $t_s < t_w$ τότε ένα μέρος του αέρα δεν περνάει μέσα από τον δρομέα. Οπότε, η μέγιστη εξαγωγή ισχύος γίνεται όταν οι δύο χρόνοι είναι σχεδόν ίσοι, δηλαδή για

$$\omega_{opt} \approx \frac{2\pi V}{ns}, \text{ και } \lambda_{opt} \approx \frac{\omega_{opt} r}{V} \approx \frac{2\pi}{n} \left(\frac{r}{s} \right), \quad (2.9)$$

Όπως φαίνεται από τον μαθηματικό τύπο, το Tip Speed Ratio εξαρτάται από τον αριθμό των πτερυγίων, και για μικρότερο αριθμό, θα πρέπει να έχουμε γρηγορότερη περιστροφή της τουρμπίνας. Εμπειρικά ισχύει ότι

$$\frac{s}{r} \approx \frac{1}{2} \text{ και } \lambda_{opt} \approx \frac{2\pi}{n} \left(\frac{r}{s} \right) \approx \frac{4\pi}{n}, \quad (2.10)$$

Αν η αεροτομή είναι σωστά σχεδιασμένη, τότε το βέλτιστο λ μπορεί να αυξηθεί κατά 25-30%, και με την αύξηση της περιστροφικής ταχύτητας έχουμε και αύξηση της παραγόμενης ισχύος. Όταν ένα πτερύγιο περνά από τη ροή αφήνει πίσω του ένα τυρβώδη απόρρου και αν το επόμενο πτερύγιο συναντήσει τον απόρρου ενώ είναι ακόμα τυρβώδης, τότε δεν θα είναι ικανό να αποδώσει

ικανοποιητικά και θα δεχτεί μεγάλες τάσεις ταλάντωσης. Αν όμως περιστρέφεται λίγο αργότερα, τότε τα πτερύγια δεν θα συναντούν τυρβώδη ροή. Έτσι, για πτερύγια που δεν είναι σωστά σχεδιασμένα, το λ είναι μικρό και η ανεμογεννήτρια θα τείνει να επιβραδύνει και να προκαλείται stall. Για μεγάλο λ , η τουρμπίνα θα έχει μειωμένη απόδοση και θα φορτίζεται με μεγάλες τάσεις, με κίνδυνο καταστροφής.

Ο συντελεστής ισχύος είναι:

$$C_p = \frac{P_t}{P} = \frac{P_t}{\frac{1}{2}\rho\pi R^2 V^3}, \quad (2.11)$$

όπου P_t είναι η ισχύς που εκμεταλλεύεται η τουρμπίνα και P είναι η διαθέσιμη ισχύς του αέρα. Η μέγιστη θεωρητική τιμή είναι 0.59 (όριο του Betz), ωστόσο στην πραγματικότητα είναι μικρότερη λόγω απωλειών.

2.2.2 Αριθμός Reynolds

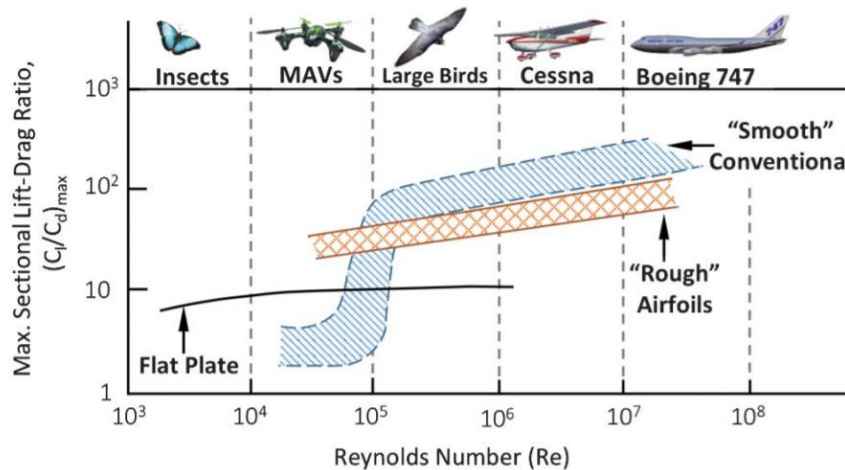
Ο αριθμός Reynolds είναι ένα αδιάστατο μέγεθος, το οποίο εκφράζει τη φύση της ροής, δηλαδή αν είναι στρωτή ή τυρβώδης. Λόγω των τριβών του ρευστού μπορούμε να θεωρήσουμε τον αριθμό Re σαν ένα λόγο της τάσης που δημιουργείται από στροβιλισμό προς την τάση που οφείλεται στο ιξώδες του ρευστού. Στη γενική μορφή του, ο αριθμός Re εκφράζεται ως:

$$Re = \frac{ul\rho}{\mu} = \frac{uL}{\nu}, \quad (2.12)$$

όπου u είναι μία χαρακτηριστική ταχύτητα, l ένα χαρακτηριστικό μήκος, ρ η πυκνότητα της μάζας και μ το ιξώδες του ρευστού, ωστόσο υπάρχουν και άλλες εκφράσεις του ανάλογα με τη ροή που μελετάμε. Στην περίπτωσή μας, για δρομέα εκφράζεται ως:

$$Re = \frac{R^2 \omega c}{\mu}, \quad (2.13)$$

με R την ακτίνα του δρομέα, ω τη γωνιακή ταχύτητα του δρομέα και c το μήκος χορδής του πτερυγίου. Από τον παραπάνω ορισμό μπορούμε να πούμε ότι ο αριθμός Re εξαρτάται άμεσα από τις διαστάσεις της ανεμογεννήτριας και σαφώς από την ταχύτητα περιστροφής της. Επομένως και εδώ καταλήγουμε ότι η εκλογή των διαστάσεων της ανεμογεννήτριας καθώς και ο σχεδιασμός του δρομέα είναι τα κύρια στοιχεία που καθορίζουν την τιμή του Re Num, όπως και του solidity. Άρα πρέπει να δίνεται μεγάλη έμφαση στο σχεδιασμό με βάση τις τιμές που επιθυμούμε για αυτά τα μεγέθη, αφού τελικώς είναι αυτά που επηρεάζουν το εύρος λειτουργίας της ανεμογεννήτριας και την απόδοσή της. Στο Σχήμα 2.3 φαίνεται η επίδραση του αριθμού Reynolds στη μέγιστη διατομή αεροτομής σε σχέση με τον λόγο ανύψωσης-οπισθέλκουσας.



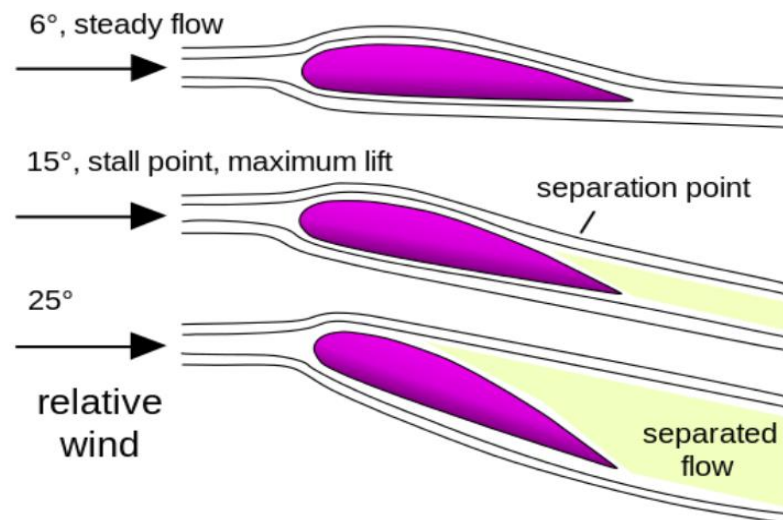
Σχήμα 2.3: Λόγος ανύψωσης/οπισθέλκουσας σε συνάρτηση με Re

2.2.3 Φαινόμενο Stall

Στην δυναμική των ρευστών, παρατηρείται ότι ο συντελεστής ανύψωσης που παράγεται από μια αεροτομή μικραίνει όσο η γωνία πρόσκρουσης αυξάνεται. Όταν η γωνία πρόσκρουσης ξεπεράσει μια κρίσιμη γωνία τότε παρουσιάζεται το φαινόμενο stall. Η κρίσιμη γωνία αυτή είναι συνήθως γύρω στις 15° σε σχέση με τον εισερχόμενο άνεμο, αλλά μπορεί να αλλάζει σημαντικά ανάλογα με το ρευστό, την αεροτομή και τον αριθμό Reynolds.

Stall είναι μια κατάσταση στην αεροδυναμική που προκαλείται από τον διαχωρισμό ροής από την αεροτομή ή το φτερό, ο οποίος με την σειρά του προκαλείται από τον αέρα που ρέει κόντρα σε μια συνεχόμενη αυξανόμενη αντίσταση (πίεση). Ο Whitford [5] τρεις τρόπους stall: τον διαχωρισμό στην ουρά (trailing-edge), διαχωρισμός στην μύτη (front-edge) και λεπτής αεροτομής (thin aerofoil), κάθε ένα με τα διακριτά τους χαρακτηριστικά $C_l - \alpha$.

Για το trailing-edge ο διαχωρισμός ξεκινά σε μικρές γωνίες πρόσκρουσης κοντά στο πίσω άκρο της αεροτομής ενώ η υπολειπόμενη ροή παραμένει προσκολλημένη στο φτερό. Καθώς αυξάνεται η γωνία πρόσκρουσης οι περιοχές διαχωρισμού στην αεροτομή αυξάνονται σε μέγεθος καθώς ο διαχωρισμός κινείται προς τα εμπρός, με αποτέλεσμα να εμποδίζεται η ικανότητα της αεροτομής να δημιουργεί ανυψωτική δύναμη. Αντίστοιχα παρατηρείται το φαινόμενο stall μύτης με την διαφορά ότι η αποκόλληση της ροής ξεκινάει από την μύτη της αεροτομής και προχωράει προς τα πίσω όσο αυξάνεται το μέγεθός της. Στο Σχήμα 2.4 φαίνεται η αποκόλληση της ροής όσο αυξάνεται η γωνία πρόσκρουσης του εισερχόμενου ανέμου σε σχέση με την αεροτομή.



Σχήμα 2.4: Εικονική αναπαράσταση αποκόλλησης ροής ανέμου με την αύξηση της γωνίας πρόσκρουσης

2.3 Επιδράσεις του προφίλ αεροτομής

Από μεγάλο αριθμό πηγών ο συντελεστής ισχύος μία S-VAWT μπορεί να εκφραστεί ως εξής (περισσότερες πληροφορίες στην βιβλιογραφία [13]):

$$C_p = \sigma \cdot \lambda_\infty \cdot \sum_{i=1}^m \frac{C_{\tau_i} \cdot (\lambda_\infty^2 + \kappa_{\theta_i}^2 + 2\lambda_\infty \kappa_{\theta_i} \cos\theta)}{m}, \quad (2.14)$$

Όπου m και κ_{θ} είναι οι αριθμοί των γραμμών ροής και του παράγοντα διόρθωσης κατά μήκος του δρομέα αντίστοιχα. Επιπλέον, C_{τ} είναι ο συντελεστής εφαπτομένης δύναμης στην ουρά των φτερών και ισχύει ότι:

$$C_{\tau} = C_l \sin\alpha_{\theta} - C_d \cos\alpha_{\theta}, \quad (2.15)$$

Είναι εμφανές ότι ο συντελεστής ισχύος είναι συνάρτηση της σταθερότητας και της εφαπτομένης δύναμης. Τα αποτελέσματα της σταθερότητας θα παρουσιαστούν στην ακόλουθη ενότητα και οι όροι που επηρεάζουν τον συντελεστή ανύψωσης και οπισθέλκουσας αναπτύσσονται αναλυτικά σε αυτήν την ενότητα. Διαπιστώθηκε ότι το προφίλ λεπίδας ήταν ζωτικής σημασίας για τη βελτίωση της αεροδυναμικής απόδοσης του S-VAWT, η επιλογή του οποίου ήταν μια από τις πιο συγκεχυμένες και παρεξηγημένες πτυχές για το σχεδιασμό της ανεμογεννήτριας. Επομένως, είχε μεγάλη σημασία να προσδιοριστούν τα απαιτούμενα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της λεπίδας. Διερευνήθηκαν οι γενικές επιδράσεις των γεωμετρικών χαρακτηριστικών στην απόδοση των 2D φτερών. Ιδιαίτερη σημασία δόθηκε στις διακυμάνσεις του πάχους, στην κυρτότητα, στο σχήμα εμπρόσθιας και πίσω ράχης όπως και στην προκαθορισμένη γωνία πρόσπτωσης του αέρα.

Η τάση για ανάπτυξη φτερών ειδικού σκοπού ξεκίνησε την δεκαετία του 1980 και περαιτέρω έρευνα σχετικά με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά αεροτομής διαδόθηκαν τη δεκαετία του 1990. Υπάρχουν μερικά αποδεκτά υποψήφια σχέδια φτερών για το S-VAWT, συμπεριλαμβανομένων των NACA0012, NACA0015, NACA4415, NACA0018, LS (1) -0417, GOE420, S1210 και NLF (1) -0416.

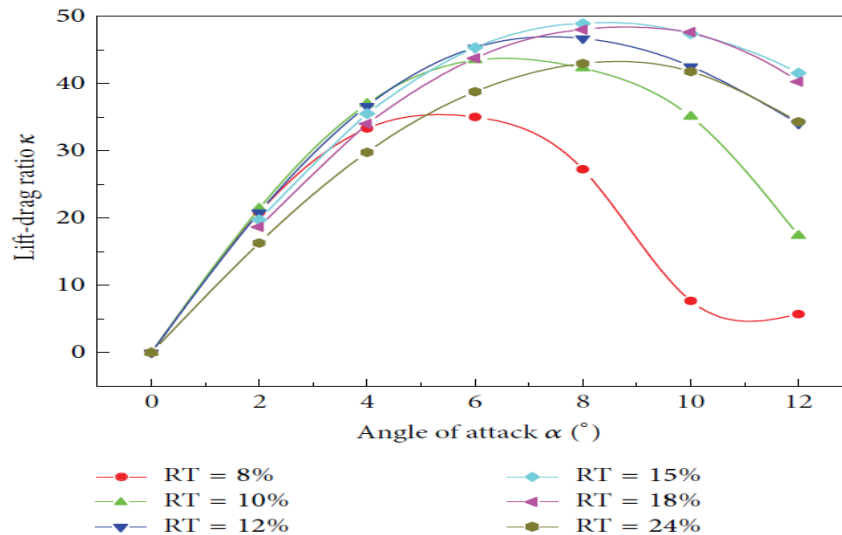
2.3.1 Επιδράσεις του πάχους

Οι επιδράσεις του πάχους της αεροτομής στην αεροδυναμική τους απόδοση είναι η πρώτη μας συζήτηση. Η πειραματική και αριθμητική προσομοίωση των αεροτομών και η επίδραση που έχει το πάχος στην αναλογία ανύψωσης-αντίστασης φαίνονται στο Σχήμα 2.5. Φαίνεται ότι στις συμμετρικές, οι αεροτομές οι οποίες έχουν σχετικό πάχος 15% έχουν την υψηλότερη αναλογία ανύψωσης-αντίστασης αλλά και μεγαλύτερο εύρος υψηλού λόγου ανύψωσης-αντίστασης. Εν τω μεταξύ η αεροτομή με σχετικό πλάτος 18% έρχεται δεύτερη και παρατηρούμε ότι με πολύ υψηλότερο πάχος από αυτό έχουμε μείωση των ακραίων τιμών. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5 υπάρχει μια μείωση της καμπύλης ανύψωσης που βρίσκεται στο γραμμικό εύρος και μια πολύ ταχύτερη μείωση της μη γραμμικής περιοχής η οποία οφείλεται στην οπισθέλκουσα που σχετίζεται με το αυξανόμενο πάχος. Ο πίνακας αυτός μας υποδεικνύει ότι προτιμώνται οι αεροτομές με σχετικό πάχος 15% ή 18%.

Διεξήχθησαν έρευνες σχετικά με τον μηχανισμό αυξανόμενου πάχους. Ο Shang Guanetal. [15] επεσήμανε ότι το stall των αεροτομών με σχετικό πάχος μικρότερο από 0,38 προκλήθηκε από διαχωρισμό στο μπροστινό άκρο ή από την επιφάνεια αναρρόφησης του ούριου άκρου, ενώ σε αεροτομές με μεγαλύτερο πλάτος προκλήθηκε από την περιφερειακή κίνηση στην επιφάνεια πίεσης. Έρευνες του Wangetal. [16] ανέφερε επίσης ότι: (i) για μικρού πάχους αεροτομές, τόσο το απαλό όσο και το βαθύ stall προκλήθηκαν από το διαχωρισμό στο μπροστινό άκρο, προκαλώντας δίνες οι οποίες δρουν στο πίσω άκρο. (ii) Στις αεροτομές μεγαλύτερου πάχους, ο διαχωρισμός διαμορφώθηκε αρχικά στο πίσω άκρο, και η δίνη διαχωρισμού μετακινήθηκε στο μπροστινό άκρο.

Επιπλέον, ανακαλύφθηκε ότι το μεγαλύτερο πάχος τείνει να αυξάνει τη ροπή εκκίνησης και περαιτέρω ο Dereng επεσήμανε ότι αεροτομή με πάχος χορδής 19% έδειξε επιθυμητά χαρακτηριστικά εκκίνησης και διατήρησης της ορμής τους [14]. Εν τω μεταξύ, η θεωρητική μελέτη της Healy προτείνει ότι το μεγαλύτερο πάχος, τουλάχιστον έως 18%, προσφέρει καλύτερη απόδοση σε χαμηλό αριθμό Reynolds [14]. Ο Γκορέλοφ [17] πίστευε ότι η μέγιστη τιμή του συντελεστή ισχύος επιτεύχθηκε στο 18% του πάχους αεροτομής, που συμπίπτει με το σχετικό πάχος της διάστασης του πτερυγίου των δελφινιών (18-20%). Επιπλέον, οι Kirke και Lazauskas [18] πρότειναν ότι η νεκρή ζώνη της αρνητικής ροπής των συμμετρικών λεπίδων NACA μειώθηκε με την αύξηση του πάχους μεταξύ 12% έως 21% αλλά απέτυχε να εξαλείψει τη ζώνη της αρνητικής ροπής.

Υπάρχουν πολλές έρευνες που δείχνουν ότι τα τμήματα λεπίδων με μεγαλύτερο πάχος είναι ευεργετικά για τη βελτίωση του αυτο-εκκίνησης και του συντελεστή ισχύος των S-VAWT. Ωστόσο, θα πρέπει επίσης να ληφθούν υπόψη τα αρνητικά αποτελέσματα του αυξανόμενου πάχους. Οι Kunz και Kroo [20] πίστευαν ότι υπήρχε μια αναμενόμενη ποινή έλξης για υψηλότερο πάχος και επίσης μια σημαντική μείωση στην κλίση της καμπύλης ανύψωσης, οι οποίες ήταν υπεύθυνες για την πρόσθετη αύξηση της ανάκτησης πίεσης και την προηγούμενη έναρξη του διαχωρισμού. Οι Sato και Sunada ισχυρίστηκαν ότι υπήρχε όριο στα οφέλη που μπορούν να αποκτηθούν με τη χρήση μεγάλου πάχους αεροτομής σε χαμηλό αριθμό Reynolds, επιμένοντας ότι αεροτομή με πάχος 28,5% μπορεί να αποτύχει να παράγει οποιαδήποτε χρήσιμη ανύψωση σε χαμηλό αριθμό Reynolds παρόλο που οι αεροτομές με μεγαλύτερο πάχος θα έχουν αναμφίβολα μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. [22] Επισημάνθηκε επίσης ότι οι αεροτομές με πάχος μεγαλύτερο από 20% προκάλεσαν τα φαινόμενα διακλάδωσης στις αεροελαστικές αποκρίσεις. Επιπλέον, όπως ανέφεραν οι Parchenetal. [23], ο ακτινοβολημένος θόρυβος μειώθηκε με ένα αυξανόμενο πάχος λεπίδας. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η λεπίδα με πάχος 18% προτιμάται για υψηλότερη απόδοση, υψηλότερη ικανότητα αυτόματης εκκίνησης και μεγαλύτερη ακαμψία λεπίδας.



Σχήμα 2.5: Καμπύλες αναλογίας ανύψωσης-οπισθέλκουσας συμμετρικών αεροτομών με σχετικό πάχος (PT)

2.3.2 Επιδράσεις Κυρτότητας

Έχει αποδειχθεί ότι οι S-VAWT με κυρτή αεροτομή μπορεί να ξεκινήσει αυτόματα πιο εύκολα συγκριτικά με αυτές που διαθέτουν συμμετρικές αεροτομές. Επιπλέον πιστεύεται ότι οι κυρτές αεροτομές αποκτούν υψηλότερο λόγο ανύψωσης-οπισθέλκουσας σε θετική γωνία εισροής και είχε χαμηλή απόδοση σε αρνητική. Επομένως, διερευνήθηκε περαιτέρω η ανάλυση αεροτομών και πραγματοποιήθηκε αριθμητική ανάλυση για να ληφθούν τα αποτελέσματα του θαλάμου στην αναλογία ανύψωσης-έλξης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6.

Από το Σχήμα 2.6, συμπεραίνουμε ότι ο λόγος ανύψωσης-αντίστασης είναι μη μηδενικός στο μηδέν για την ασύμμετρη αεροτομή, και η μεγαλύτερη τιμή κορυφής του λόγου ανύψωσης-αντίστασης λαμβάνεται στην κατάσταση σχετικού πάχους 10,4% και του σχετικής κυρτότητας 6,9%. Παρατηρείται επίσης ότι ανεξάρτητα από τη σχετική κυρτότητα, οι τιμές κορυφής μειώνονται με την αύξηση του σχετικού πάχους. Σε σύγκριση με την περίπτωση της υψηλότερης μέγιστης τιμής, οι γωνίες προσβολής που αντιστοιχούν στις κορυφαίες τιμές γίνονται μεγαλύτερες με τη μείωση της σχετικής κυρτότητας αλλά γίνονται μικρότερες με την αύξηση της, γεγονός που οφείλεται στο γεγονός ότι οι αποδοτικές γωνίες επίθεσης γίνονται μικρότερες με την μείωση της κυρτότητας, και το stall εμφανίζεται μόνο σε μεγαλύτερες γωνίες επίθεσης. Αντιθέτως, παρατηρείτε stall σε μικρότερη γωνία επίθεσης για τιμές αυξανόμενης κυρτότητας.

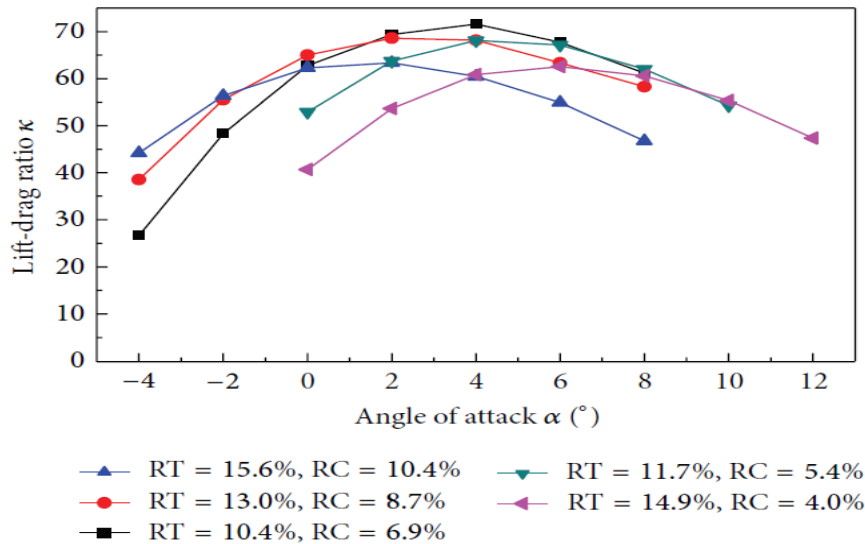
Παρόλα αυτά είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι προτιμώνται συμμετρικές αεροτομές. Αυτό συμβαίνει λόγω του γεγονότος ότι για να κινείτε η τουρμπίνα όσο το δυνατόν πιο ομαλά και σταθερά γίνεται, η συνολική ενέργεια που εξάγεται από τον άνεμο πρέπει να είναι περίπου ίση σε ανάντη και κατάντη ροή, δεδομένου ότι η συνολική ενέργεια που εξάγεται από τον άνεμο είναι περίπου η ίδια, ανεξάρτητα από την κυρτότητα της αεροτομής σύμφωνα με τους Loth και McCoy [24]. Επιπλέον, ο Healy [25] δήλωσε ότι «όσο πιο κοντά στην συμμετρία είναι η αεροτομή, τόσο πιο ικανοποιητική η ισχύς που παράγει». Ως εκ τούτου, χρησιμοποιούνται ευρέως συμμετρικές αεροτομές, οι οποίες έχουν σχεδιαστεί για υψηλό αριθμό Reynolds, συμπεριλαμβανομένων των NACA0012, NACA0015 και NACA0018. Με την έναρξη εκτεταμένων ερευνών, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα περισσότερα NACA δεν είναι κατάλληλα για το S-VAWT λόγω των επιρρεπή στο stall χαρακτηριστικών τους και την κακή απόδοσή του λόγω του φαινομένου τραχύτητας που προκύπτει από παρεμβολές στις αιχμές

[26]. Με άλλα λόγια, τα αεροπλάνα NACA είναι κατάλληλα κυρίως για υψηλό αριθμό Reynolds και σχετικά μικρές γωνίες επίθεσης.

Θα πρέπει να προστεθεί ότι, με βάση την κατεύθυνση της καμπυλότητας της γραμμής, υπάρχουν δύο τύποι κυρτών αεροτομών ανάλογα με την τοποθέτησή τους στους βραχίονες στήριξης: κοίλο-έξω και κοίλο-μέσα. Για τα S-VAWTs, οι γωνίες της επίθεσης αντιστρέφονται δύο φορές ανά περιστροφή και επομένως είναι αδύνατο να αποφευχθεί η αρνητική γωνία εισροής. Ο Kirke [27] δήλωσε ότι οι κυρτές αεροτομές ήταν πολύ ανώτερες σε θετική εισροές και όχι πολύ κατώτερα σε αρνητικές εισροές σε περιπτώσεις χαμηλού αριθμού Reynolds. Επιπλέον, το Ντάρεμπεργκ [28] ισχυρίστηκε ότι η ταχύτητα των κατάντη ήταν 0,55 φορές εκείνη των ανάντη και η αιολική ενέργεια ήταν ανάλογη με την κυβική ταχύτητα του ανέμου. Έτσι, η αιολική ενέργεια που εξήχθη από τα κατάντη ήταν πολύ μικρότερη από εκείνη των ανάντη. Σύμφωνα με τον Baker [29], περίπου 90% έως 95% της αιολικής ενέργειας εξήχθη στα ανάντη αλλά εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως η σταθερότητα και το TSR (tipspeedratio). Επομένως, οι κυρτές αεροτομές είναι πολλά υποσχόμενες εάν έχουν μια τοποθέτηση κοίλο-έξω ως προς τον βραχίονα στήριξης.

Πιστεύεται ότι η συνολική απόδοση των S-VAWTs με αεροτομές μεγαλύτερης κυρτότητας είναι υψηλότερη από εκείνων με αεροτομές σχετικά μικρότερης. Η προσθήκη κυρτότητας οδηγεί σε αύξηση της μηδενικής ανυψωτικής έλξης και ανοδικής μετατόπισης του πόλου προς υψηλότερους συντελεστές ανύψωσης [20]. Συστηματικές μελέτες είχαν διεξαχθεί για την σύνοψη των πλεονεκτημάτων κυρτών αεροτομών σε σχέση με τις συμμετρικές [14]. Συνάγεται το συμπέρασμα ότι οι αεροτομές με κυρτότητα είναι λιγότερο ευαίσθητες στην τραχύτητα και μπορούν να παράγουν μεγαλύτερη άνοση σε χαμηλό αριθμό Reynolds και θετική γωνία εισροής. Επιπλέον, η γωνία stall των κυρτών αεροτομών είναι υψηλότερη από τις συμμετρικές, δημιουργώντας μεγαλύτερη αρνητική ροπή στρέψης σε υψηλότερο εύρος TSR.

Περαιτέρω ανάλυση ολοκληρώθηκε για να βρεθούν τα πιθανά οφέλη από τη μεταβολή του μεγέθους και της κατανομής της κυρτότητας. Όπως ανέφεραν οι Kunz και Kroo [20], η πίσω μετατόπιση της μέγιστης κυρτότητας οδηγεί σε μια λιγότερο σοβαρή μείωση της ανύψωσης πέρα από το γραμμικό εύρος, υψηλότερους συντελεστές ανύψωσης και μεγαλύτερο λόγο ανύψωσης-οπισθέλκουσας. Επιπλέον, οι Kunz και Kroo δήλωσαν ότι τα πίσω τμήματα με καμπύλες εμφανίζουν διαχωρισμό σε χαμηλή γωνία προσβολής λόγω της απότομης αντίθεσης στην κλίση κοντά στο πίσω άκρο, αλλά η έκταση του διαχωρισμού αυξάνεται πολύ αργά όσο αυξάνεται η γωνία προσβολής [20]. Ωστόσο, δοκιμές σε αιολική σήραγγα του Baker [30] έδειξε ότι η ανωτερότητα των κυρτών αεροτομών γίνεται λιγότερο έντονη με την αύξηση αριθμών Reynolds ή της μεγαλύτερης κυρτότητας, λόγω της μεγάλης ελκτικής δύναμης που εμφανίζεται από το stall με αποτέλεσμα η ανεμογεννήτρια να μην μπορεί να ξεκινήσει την περιστροφή μόνη της. Συμπεραίνεται ότι οι κυρτές αεροτομές μπορούν να βελτιώσουν την ικανότητα αυτο-εκκίνησης υπό την προϋπόθεση ότι η κυρτότητα δεν είναι μεγάλου βαθμού. Επομένως απαιτούνται πολλές μελέτες για τη σωστή επιλογή της κυρτότητας.



Σχήμα 2.6: : Καμπύλες αναλογίας ανύψωσης-οπισθέλκουσας συμμετρικής αεροτομής με διαφορετική κυρτότητα και πάχος

2.3.3 Επιδράσεις στις αλλαγές πρόσθιου και ούριου άκρου

Μετά από πολλές έρευνες ανακαλύφθηκε ότι αλλαγές στο πρόσθιο και ούριο άκρο της αεροτομής μπορούν να προκαλέσουν μεγάλες επιπτώσεις στην αεροδυναμική απόδοση της αεροτομής. Υπάρχουν μερικές αποδείξεις που δείχνουν ότι προτιμάται η μεγαλύτερη ακτίνα πρόσθιου άκρου για το S-VAWT οι οποίες είναι οι εξής:

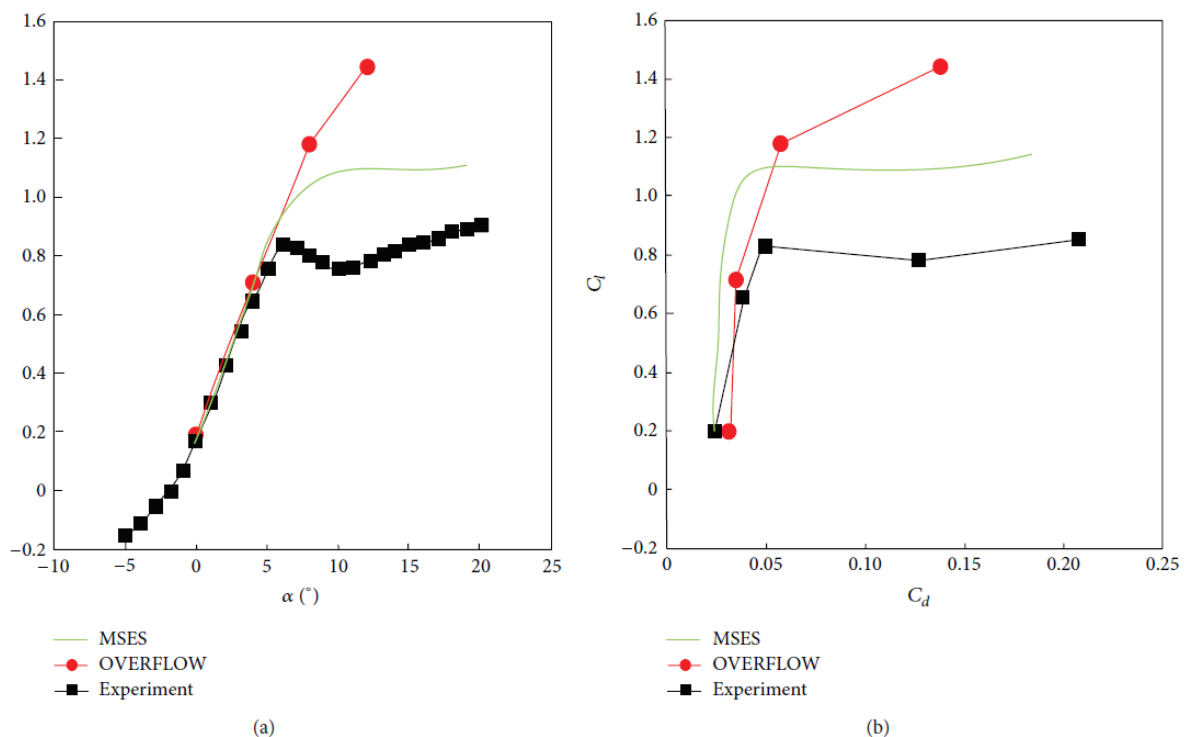
- (i) Μία μεγαλύτερη ακτίνα κορυφής είναι επιθυμητή επειδή είναι λιγότερο ευαίσθητη στην τραχύτητα, οδηγώντας σε βελτίωση της αιολικής ενέργειας υπό συνθήκες βρώμικης λεπίδας [31].
- (ii) Μεγαλύτερη ακτίνα πρόσθιου άκρου οδηγεί σε αύξηση του λόγου ανύψωσης-αντίστασης της αεροτομής σε μεγάλη γωνία προσβολής [14].
- (iii) Επηρεάζει τα χαρακτηριστικά των αεροτομών σε βαθύ stall.

Όπως αναφέρθηκε από το Εθνικό Εργαστήριο Sandia, ανακαλύφθηκε ότι ο ελάχιστος συντελεστής αντίστασης των αεροτομών μπορεί να μειωθεί με αιχμηρό ούριο άκρο [32] που είναι φυσικά επιθυμητό, αλλά πρέπει να επισημανθεί ότι η κατασκευή αιχμηρών ούριων άκρων είναι συχνά αρκετά δύσκολη και δαπανηρή διαδικασία. Επιπλέον, τα βασικά πλεονεκτήματα της διεύρυνσης του πάχους του πίσω άκρου είναι ότι επιτρέπει ένα μέρος της ανάκαμψης της πίεσης να πραγματοποιηθεί μετά την αεροτομή, μειώνοντας τη σοβαρότητα του βαθμού αντίθετης πίεσης στην πλευρά αναρρόφησης, μειώνοντας την πιθανότητα χαμηλού διαχωρισμού (stall) [26]. Σύμφωνα με τις μελέτες [33], ο συντελεστής ανύψωσης και αντίστασης αυξάνεται με την αύξηση του πάχους του πίσω άκρου μέσα σε ένα ορισμένο εύρος. Ωστόσο, [34] δηλώθηκε ότι η διεύρυνση των αεροτομών που ακολουθούν το πάχος του άκρου συμβάλλει ελάχιστα στη βελτίωση της αεροδυναμικής απόδοσης. Παρόλα αυτά είναι μια εφικτή λύση για τη διευκόλυνση της κατασκευής.

Ως εκ τούτου, χοντρά αμβλεία πίσω άκρα ή αεροτομές με επίπεδη πλάτη σχεδιάστηκαν για να προσφέρουν πλεονέκτημα τόσο στην δομική όσο και στην αεροδυναμική απόδοση [35 ανέφερε ότι η μέγιστη τιμή του συντελεστή ανύψωσης και η κλίση του αυξάνονται με τη χρήση αμβλύ τελικού

άκρου. Εν τω μεταξύ, το αμβλύ πίσω άκρο θα μειώσει την επίδραση της τραχύτητας του προπορευόμενου άκρου στην ιδιότητα ανύψωσης. Σύμφωνα με τους Bakeretal. [37], αυξάνεται ο συντελεστής ανύψωσης και μειώνεται η ευαισθησία στη μετάβαση του μπροστινού άκρου με το αυξανόμενο πάχος του άκρου. Επιπλέον, τα επίπεδα αεροστεγή αεροσκάφη επιτρέπουν μέρος της ανάκτησης πίεσης μετά το αεροσκάφος, μειώνοντας έτσι την αρνητική βαθμίδα πίεσης και μειώνοντας την ευαισθησία τραχύτητας στην κορυφή. Μία περίπτωση μεγέθυνσης του πάχους του άκρου του άκρου παρουσιάστηκε στο Σχήμα 2.7.

Όπως συζητήθηκε παραπάνω, μια μεγαλύτερη ακτίνα εμπρόσθιου άκρου και μια σωστή αύξηση του πάχους του ούριου άκρου είναι ευεργετικά για τη βελτίωση της απόδοσης της αεροτομής. Το χοντρό αμβλύ πίσω άκρο προτιμάται για αύξηση ανύψωσης και την ευκολία κατασκευής.



Σχήμα 2.7: Συγκριτική ανάλυση πειραματικών και υπολογιστικών καμπύλων ανύψωσης (a) και (b) πόλοι έλξης για την αεροτομή FB-3500-0050 με σχετικό πάχος πίσω άκρης 8.75%.

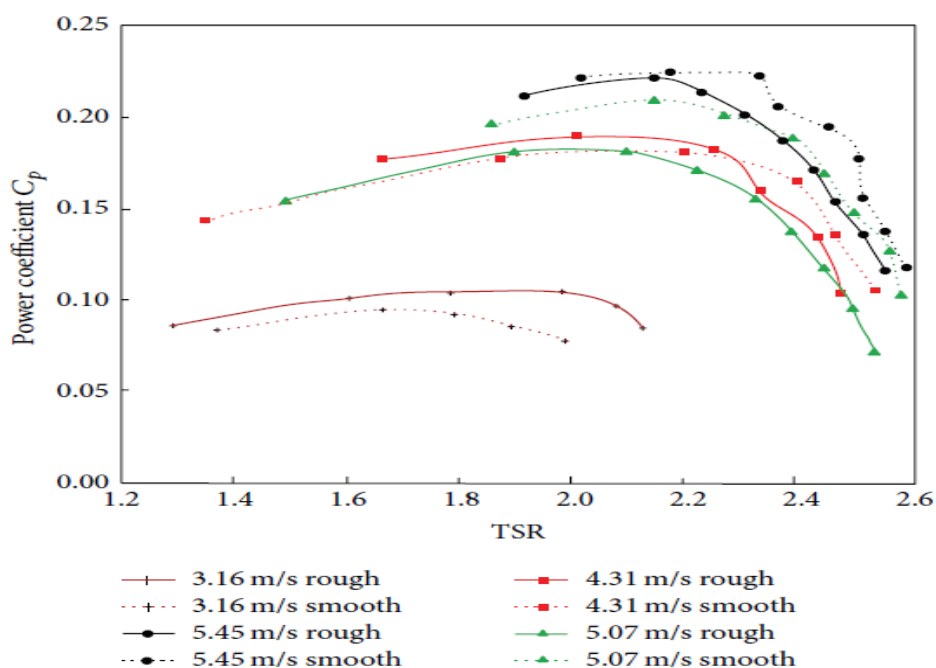
2.3.4 Επιδράσεις Τραχύτητας

Με το κατάλληλο επίπεδο τραχύτητας της επιφάνειας, είναι δυνατόν να αποφευχθεί ένα οριακό στρώμα από ομαλή έως τυρβώδη ροή σε χαμηλότερο αριθμό Reynolds. Επομένως, ένα άλλο χαρακτηριστικό που η ανάλυσή του είναι απαραίτητη για τις αεροτομές της S-VAWT είναι η ελαχιστοποίηση της ευαισθησίας του μέγιστου συντελεστή ανύψωσης στις επιρροές της τραχύτητας. Επισημάνθηκε ότι η τραχύτητα οδηγεί σε μείωση του μέγιστου συντελεστή ανύψωσης και αύξηση του συντελεστή μηδενικής ανύψωσης-αντίστασης. Επιπλέον, τα αποτελέσματα της τραχύτητας γίνονται πιο έντονα καθώς ο αριθμός των Reynolds αυξάνεται [40]. Ως εκ τούτου, η αεροτομή πρέπει να είναι όσο το δυνατό λιγότερο ευαίσθητη στην τραχύτητα.

Η ανάλυση σύγκρισης μεταξύ αεροτομών σειράς NACA και σειράς LS(1)-04XX πραγματοποιήθηκε από τον Lissaman [41]. Αυτός δήλωσε ότι η μέγιστη τιμή του συντελεστή ανύψωσης

των αεροτομών NACA230XX είναι εξαιρετικά ευαίσθητη στην επιφανειακή ρύπανση και η απόδοσή τους επιδεινώνεται με την αύξηση του σχετικού πάχους των λεπίδων πιο γρήγορα από εκείνη άλλων αεροτομών. Ωστόσο, οι αεροτομές της σειράς LS(1)-04XX σχεδιάστηκαν για να ανέχονται την επιφανειακή ρύπανση. Τόνισε περαιτέρω ότι ο συντελεστής μηδενικής ανύψωσης-αντίστασης του NACA0015 επηρεάζεται σοβαρά από την τραχύτητα. Επιπλέον, ανακαλύφθηκε ότι τα αεροσκάφη σειράς NACA 63-2XX έχουν δείξει τα καλύτερα χαρακτηριστικά απόδοσης στην οικογένεια των NACA [14], τα οποία παρέχουν σημαντική αντίσταση στις απώλειες τραχύτητας.

Είναι γνωστό ότι η ανεμογεννήτρια λειτουργεί σε διαφοροποιημένες κλιματολογικές συνθήκες, και η συντήρηση και η απόδοσή της επιδεινώνονται με την τραχύτητα της επιφάνειας. Σκόνη, βρωμιά, βροχή ή έντομα, μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα στο εμπρόσθιο άκρο της αεροτομής και κατ'επέκταση σε πρόωρη μεταβολή του επιφανειακού στρώματος και να μειώσει το $C_{l_{max}}$ όταν μολύνεται κατά αυτόν τον τρόπο. Ως εκ τούτου, ερευνήθηκαν οι επιπτώσεις της τραχύτητας του εμπρόσθιου άκρου. Ο Huoetal. [31] ισχυρίστηκε ότι υπήρξε μια μικρή αύξηση στην αναλογία λόγω ανύψωσης-αντίστασης ενισχύοντας την τοπική τραχύτητα των επιφανειών της αεροτομής. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των Bao και Ni [42], προτείνεται ότι οι επιρροές της τραχύτητας των κορυφαίων άκρων στην ικανότητα αυτο-εκκίνησης και η γωνία πρόσπτωσης εξαρτώνται από τα αεροτομή, η οποία δεν είναι ευαίσθητη στην τραχύτητα του προπορευόμενου άκρου πριν από το στάβλο και έχει σημαντικές επιπτώσεις στο συντελεστή ανύψωσης μετά το στάβλο. Επιπλέον, ο Ahmed [26] ανακάλυψε ότι η αρχική τραχύτητα πρόσθεσε πάχος στο οριακό στρώμα και μετατόπισε τη θέση της μετάβασης κοντά στο μπροστινό άκρο. Επομένως, μειώνει την περιοχή της στρωτής οριακής στιβάδας και αυξάνει εκείνη της στροβιλώδους οριακής στρώσης, οδηγώντας σε αύξηση της έλξης τριβής του δέρματος. Επιπλέον, το παχύτερο οριακό στρώμα που προκύπτει οδηγεί σε αυξημένη οπισθέλκουσα δύναμη, μείωση του αποτελεσματικού θαλάμου και πρόωρο stall λόγω της εξασθένησης του οριακού στρώματος [26].



Σχήμα 2.8: Μεταβολές συντελεστή ισχύος C_p με την κυκλική ταχύτητα ανεμογεννήτριας τριών λεπίδων για απαλή και τραχιά επιφάνεια αεροτομών

Η αλλαγή της τοπικής τραχύτητας στις επιφάνειες των λεπίδων είναι μια από τις πιθανές μεθόδους για την βελτίωση της απόδοσης της ανεμογεννήτριας. Έρευνες αεροδυναμικής σχετικά με τις επιδράσεις της τραχύτητας της λεπίδας που πραγματοποιήθηκαν από τους Howelletal. [38], φαίνονται στο Σχήμα 2.8. Παρατηρούμε ξεκάθαρα ότι σε χαμηλότερες ταχύτητες ανέμου, η εξομάλυνση της επιφάνειας των αεροτομών προκαλεί μείωση της απόδοσης σε σημαντικό βαθμό. Αντιθέτως Φαίνεται ότι μια αεροτομή με τραχύ μπροστινό άκρο είναι πιθανό να βοηθήσει στην καθυστέρηση της αποκόλλησης και κατ' επέκταση να καθυστερήσει το stall που είναι συχνό να συμβεί σε υψηλές γωνίες πρόσκρουσης του αέρα. Σύμφωνα με τα λεγόμενα του Howelletal. [38], αποδείχθηκε ότι όταν δημιουργείται μια ταραχώδη στρώση πάνω στην αεροτομή, αυτή παρουσιάζει μια πιο ανθεκτική συμπεριφορά στην αποκόλληση της ροής. Επομένως, είναι δυνατό να μειωθεί η οπισθέλκουσα με μια τυρβώδη ροή πάνω στην επιφάνεια της λεπίδας η οποία καθυστερεί τον διαχωρισμό με αποτέλεσμα να μειώνεται και η συνολική οπισθέλκουσα της αεροτομής.

2.4 Ρύθμιση Δρομέα

Με αυξανόμενες απαιτήσεις για βελτίωση της αεροδυναμικής απόδοσης των S-VAWT, οι ερευνητικές προσπάθειες που στοχεύουν στη μεγιστοποίηση της ισχύς έχουν αυξηθεί σημαντικά. Είναι ήδη γνωστό ότι η παράμετροι που επηρεάζουν την αεροδυναμική μοντελοποίηση των αεροτομών παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην υψηλή απόδοση της ανεμογεννήτριας. Εξίσου σημαντικό συστατικό όμως είναι και η σταθερότητα της κατασκευής. Λόγω του ότι η σταθερότητα έχει μεγάλες επιπτώσεις στον συντελεστή ισχύος, καταβλήθηκαν περισσότερες προσπάθειες στη διαμόρφωση του δρομέα από την πλευρά του αεροδυναμικού σχεδιασμού και της δομής τους. Η αναλογία χορδής-ακτίνας, ο αριθμός λεπίδας, το τρισδιάστατο πεδίο ροής, και ούτω καθεξής είναι παράμετροι που οδηγούν σε έναν πιο ολοκληρωμένο και κατανοητό σχεδιασμό της ανεμογεννήτριας. Σε αυτήν την ενότητα θα αναφερθούμε σε αυτές τις παραμέτρους θα τις αναλύσουμε και θα αναφερθούν κάποιες συμβουλές προς άλλους σχεδιαστές με στόχο την μείωση του κύκλου σχεδιασμού αλλά και την αύξηση της ισχύς της ανεμογεννήτριας κάθετου άξονα.

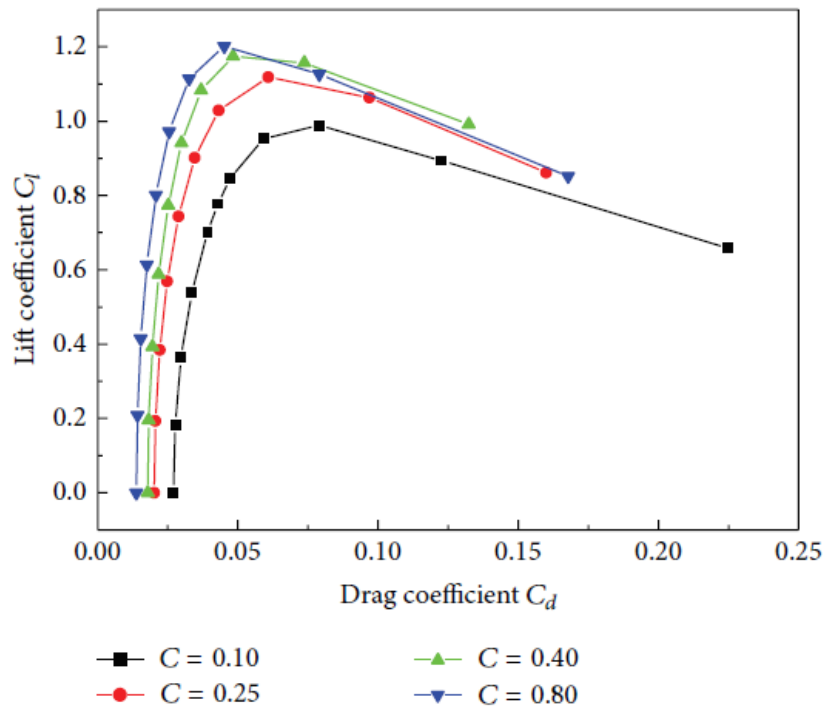
2.4.1 Solidity

Το solidity, που θα μπορούσαμε να το εκφράσουμε ως στερεότητα, είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας στο σχεδιασμό των ανεμογεννητριών. Εξαρτάται από τον αριθμό των πτερυγίων N , το μήκος χορδής c και την ακτίνα του δρομέα R , ενώ πλήρης ορισμός του είναι $\sigma = \frac{cN}{R_{rotor}}$. Ουσιαστικά περιγράφει το λόγο της συνολικής επιφάνειας των πτερυγίων του δρομέα προς την επιφάνεια του δίσκου μέσα στον οποίο περιστρέφεται.

Ένας μεγάλος αριθμός πειραματικών και αριθμητικών προσομοιώσεων που σχετίζονται με τις επιδράσεις της σταθερότητας στην αεροδυναμική έχουν πραγματοποιηθεί [38, 43-45]. Η ανάλυση του Wahl σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα του Templinέδειξαν ότι ένα υπάρχει μεγαλύτερο εύρος λειτουργίας όσον αφορά το TSR σε χαμηλότερες στερεότητες. Επιπλέον υποτιμάται ότι η υψηλότερη στερεότητα τείνει να παρέχει κάποια ροπή αυτό-εκκίνησης, αλλά με χαμηλότερη απόδοση και μικρότερο εύρος λειτουργίας. Τα αποτελέσματα της σταθερότητας παρουσιάζονται στο επόμενο μέρος.

2.4.2 Επιδράσεις του λόγου χορδής-ακτίνας (C/R).

Ο λόγος χορδής-ακτίνας καθορίζεται από το μήκος της χορδής της αεροτομής και την ακτίνα της γεννήτριας. Έτσι θα αναλυθούν οι επιδράσεις του μήκους χορδής της αεροτομής και της ακτίνας στην αεροδυναμική απόδοση.



Σχήμα 2.9: Καμπύλες σχέσης μεταξύ ανυψωτικής και οπισθέλκουσας δύναμης για διάφορες γωνίες πρόπτωσης αεροτομής NACA0015.

Παρατηρείται από το Σχήμα 2.9 ότι η μέγιστη αύξηση στον λόγο ανύψωσης-οπισθέλκουσας πραγματοποιείται στο μέγιστο μήκος της χορδής ενώ η γωνία stall αυξάνεται ελαφρώς. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο αυξανόμενος αριθμός Reynolds που προκαλείται από την αυξανόμενη χορδή καθυστερεί την εμφάνιση του stall. Μπορεί να φανεί στο Σχήμα 2.10 ότι η αύξηση του λόγου ανύψωσης-οπισθέλκουσας περιορίζεται από το μήκος της χορδής, ενώ ο λόγος μειώνεται. Συνάγεται λοιπόν το συμπέρασμα ότι το μεγαλύτερο μήκος χορδών (μέχρι κάποιο βαθμό) μπορεί να βελτιώσει την αεροδυναμική απόδοση της αεροτομής. Όσο για την ακτίνα του δρομέα, αξίζει να τονιστεί ότι δεν είναι σκόπιμο να αυξηθεί ο συντελεστής ισχύος αυξάνοντας την ακτίνα της γεννήτριας, διότι αυτό θα οδηγήσει σε απότομη αύξηση του κόστους κατασκευής και των φορτίων που ενεργούν στην τουρμπίνα, πράγμα μη επιθυμητό. Στη συνέχεια, θα εισαχθεί η επιλογή C/R .

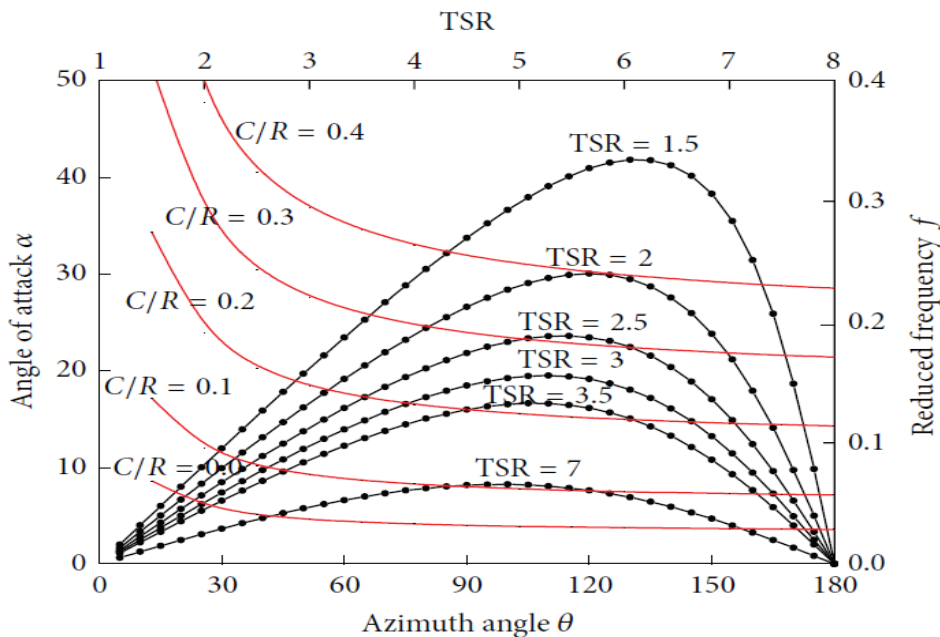
Για σταθερής κλίσης S-VAWT με γωνία πρόσπτωσης λεπίδας να είναι μηδέν, η στιγμιαία γωνία προσβολής κατά μήκος του δρομέα μπορεί να γραφτεί ως:

$$\alpha_{\theta} = \tan^{-1}\left(\frac{\sin\theta}{\lambda_{\theta} + \cos\theta}\right), \quad (2.16)$$

Όπου το λ_θ αντιπροσωπεύει την τοπική TSR. Στη συνέχεια, η μειωμένη συχνότητα, [47] ορίζεται από την μαθηματική εξίσωση:

$$F = \frac{C}{R} \frac{1}{2(\lambda_\theta - 1)\alpha_{\theta_{max}}} \quad (2.17)$$

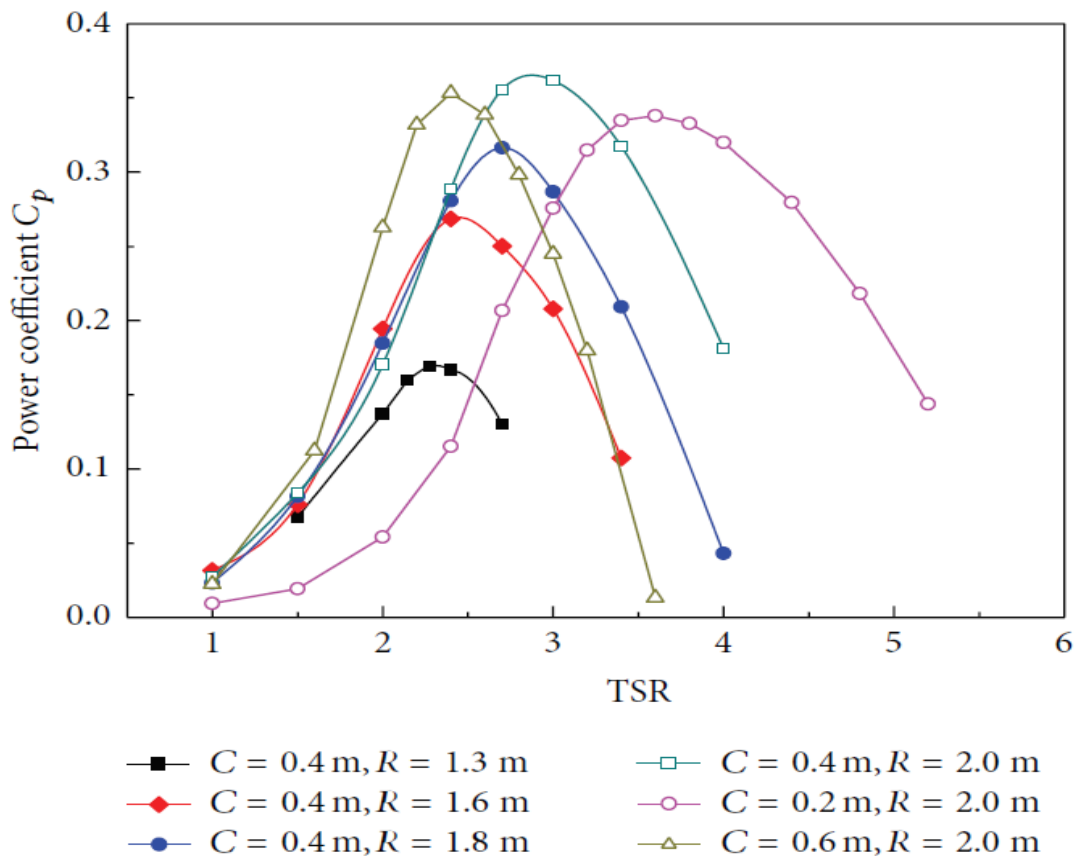
Όπως δηλώνει ο Ametetal. [47], υπό την προϋπόθεση ότι οι μειωμένες συχνότητες είναι μεγαλύτερες από 0,05, η αεροτομή είναι επιρρεπή σε ισχυρό δυναμικό stall εάν η γωνία επίθεσης υπερβαίνει τη στατική γωνία στάσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.10. Λαμβάνοντας για παράδειγμα την NACA0015, η γωνία στατικού stall είναι περίπου 12° , επομένως αναμένεται ισχυρό δυναμικό stall όταν $\frac{C}{R} > 0.1$. Σύμφωνα με πηγές [48] προτείνεται ότι το φαινόμενο κυρτής ροής των S-VAWT αυξάνεται με την αναλογία χορδής-ακτίνας, η οποία της περισσότερες περιπτώσεις έχει επιζήμια επίδραση στην αεροδυναμική απόδοση της λεπίδας. Επιπλέον, όπως αναφέρεται από τον Kirke από τα συλλεγμένα δεδομένα από δοκιμαστικές τουρμπίνες [38], ο μέγιστος συντελεστής ισχύος μπορεί να επιτευχθεί με TSR 3 έως 5. Επομένως, το επιτρεπόμενο εύρος λόγου χορδής-ακτίνας (C/R) είναι από 0,1 έως 0,4 για ένα ευρύτερο λειτουργικό εύρος.



Σχήμα 2.10: Σχέση μεταξύ αποτελεσματικής γωνίας πρόσπτωσης, μειωμένης συχνότητας και TSR

Μετά από αριθμητική ανάλυση του λόγου C/R , όπως φαίνεται και από το Σχήμα 2.11, ανακαλύφθηκε ότι ο συντελεστής ισχύος του ίδιου μήκους χορδής παραμένει σχεδόν ίδιος σε χαμηλότερα TSR, αλλά μπορούν να ληφθούν και πολύ μεγαλύτερες ακραίες τιμές του συντελεστή ισχύος για μεγάλο εύρος TSR [45]. Αυτό οφείλεται στη μείωση του λόγου C/R που προκαλείται από την αύξηση της ακτίνας και την μείωση της πιθανότητας δυναμικού stall. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι ο συντελεστής ισχύος αυξάνεται ελαφρώς με την αύξηση του μήκους της χορδής μέχρι κάποιο βαθμό. Συμπεραίνεται ότι οι επιδράσεις του λόγου χορδής-ακτίνας στον συνολικό συντελεστή ισχύος

είναι αρκετά περίπλοκες, αλλά υπάρχει ένα σίγουρο ότι το εύρος λειτουργίας των TSR αυξάνεται με τη μείωση του λόγου χορδής-ακτίνας.



Σχήμα 2.11: Κυρτότητα σε συνάρτηση με τον συντελεστή ισχύος και τον λόγο χορδής-ακτίνας

2.4.3 Επίδραση του αριθμού αεροτομών

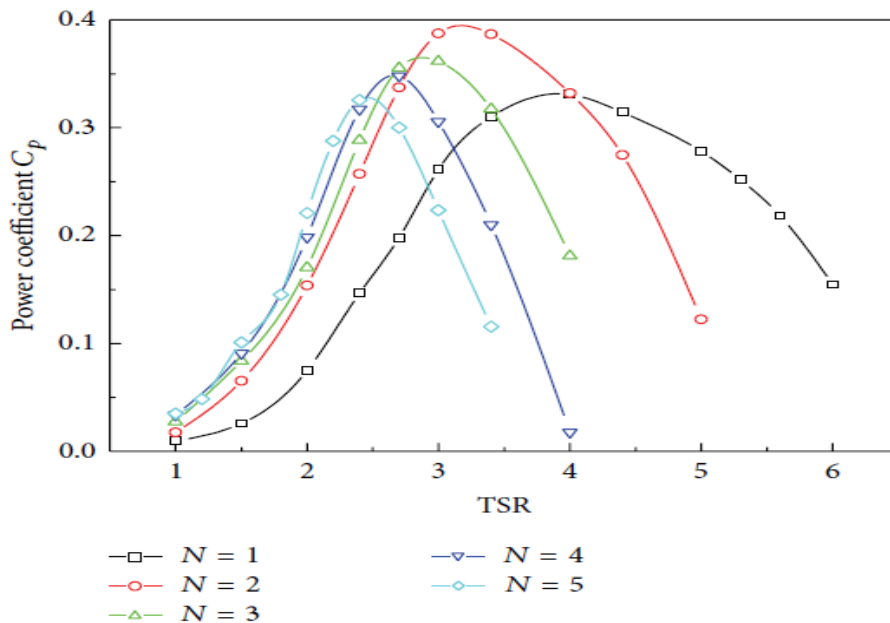
Υπάρχει μία άλλη πρόκληση στην δομή και τον σχεδιασμό μιας ανεμογεννήτριας κατακόρυφου άξονα που είναι ο αριθμός των αεροτομών. Είναι προφανές ότι ο αριθμός αυτός θα πρέπει να είναι μια ισορροπία μεταξύ της αεροδυναμικής απόδοσης, που προσφέρει η κάθε αεροτομή, σε σχέση με την αδράνεια και το βάρος που επιβάλλει στην τουρμπίνα. Για δεδομένη ακτίνα και πάχος αεροτομής, οι αύξηση του αριθμού των αεροτομών θυσιάζει αδράνεια για πολύ μικρή αύξηση στην αεροδυναμική απόδοση [49]. Υπάρχουν βέβαια ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα με μια, δύο, τρεις ή και περισσότερες αεροτομές αλλά Σε γενικές γραμμές οι γεννήτριες παραγωγής ενέργειας χρησιμοποιούν 3 με 4 αεροτομές. Οι λόγοι που δεν προτιμώνται λιγότερες από 3 αναγράφονται παρακάτω:

- Μια αεροτομή: Τεχνικά είναι εφικτός ο σχεδιασμός S-VAWT με μία λεπίδα. Ωστόσο, σε αυτή την περίπτωση απαιτείται αντίβαρο για την εξισορρόπηση της μάζας της μονής λεπίδας. Αυτό το αντίβαρο μπορεί να προκαλέσει παρασιτική οπισθέλκουσα με αποτέλεσμα η ανεμογεννήτρια να μην μπορεί να ξεκινήσει από μόνη της.
- Δύο αεροτομές: Οι ρότορες με δύο λεπίδες, όπως και αυτοί με μία, τείνουν να έχουν χαμηλότερη στερεότητα (solidity) και μεγαλύτερο TSR (λ) σε σχέση με τους ρότορες τριών αεροτομών. Επίσης τείνουν να είναι πιο ευαίσθητη σε δονήσεις που

προκαλούνται από την ανισορροπία της μάζας που έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερο λειτουργικό κόστος και κόστος συντήρησης από ανεμογεννήτριες 3 λεπίδων. Επιπλέον, ο Tangler[49] ισχυρίστηκε ότι ο θόρυβος και η αισθητική υποστηρίζουν τη επιλογή 3 λεπίδων αντί για δυο ή μια.

Στο Σχήμα 2.12 φαίνονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης της σχέσης συντελεστή ισχύος και αριθμού λεπίδας.

Όπως φαίνεται και από το σχήμα η κορυφή του συντελεστή ισχύος μειώνεται και πέφτει προς χαμηλότερες TSR όσο αυξάνεται ο αριθμός των αεροτομών (εκτός από την περίπτωση της μίας αεροτομής). Φαίνεται επίσης ότι το εύρος του συντελεστή ισχύος μειώνεται με την αύξηση των αεροτομών, υποδηλώνοντας ότι χαμηλότερη στερεότητα (solidity) είναι κατάλληλη για συνθήκες υψηλού TSR και υψηλότερη στερεότητα είναι καταλληλότερη για συνθήκες χαμηλού TSR. Σύμφωνα με τον Zhangetal. [50], ο συντελεστής μέσης ισχύος της S-VAWT είναι περιοδικός με εμφάνιση $360/N$ μοίρες. Για παράδειγμα στην περίπτωση τριών αεροτομών η εμφάνιση του συντελεστή αυτού είναι $360/N = 120^\circ$.



Σχήμα 2.12: Καμπύλες της σχέσης μεταξύ συντελεστή ισχύος και αριθμού αεροτομών

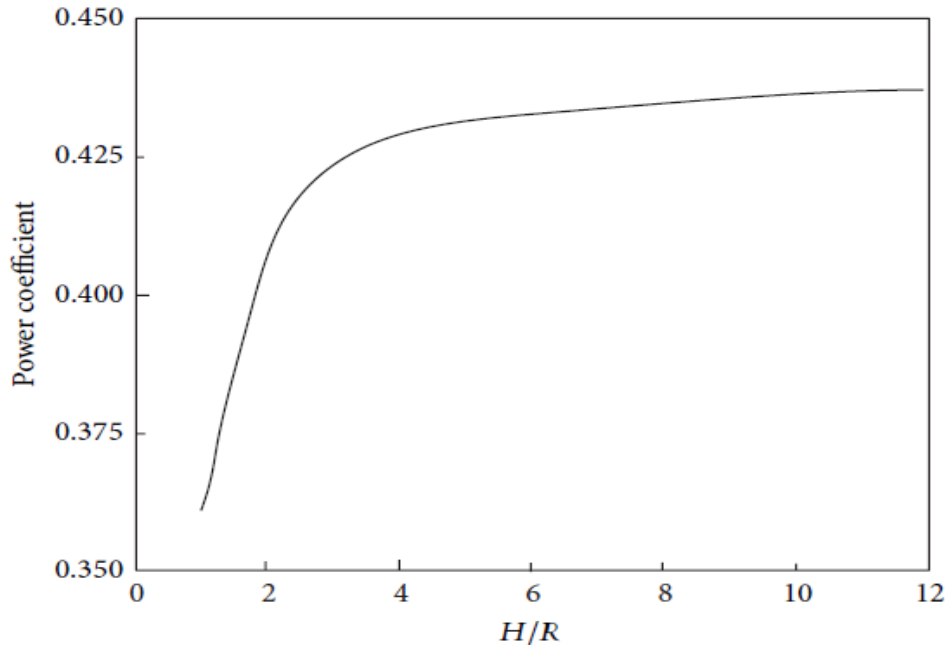
Σύμφωνα με αναφορές [51] ένα από τα μεγαλύτερα μειονεκτήματα των ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα είναι οι δονήσεις που προκαλούνται από την κυκλική μεταβολή της γωνίας επίθεσης του αέρα. Οι βραχίονες υποστήριξης μπορεί να καταστραφούν στην περίπτωση που η συχνότητα της κυκλικής μεταβολής συντονιστεί με την φυσική συχνότητα των βραχιόνων στήριξης. Έχει αποδειχτεί ότι η κυματική μεταβολή της ροπής είναι μια εγγενής ιδιότητα των ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα [52,53] και για τον λόγο αυτό, ένας έξυπνος τρόπος επίλυσης αυτού του προβλήματος είναι η αύξηση των αεροτομών. Πειραματική ανάλυση [45] έδειξε ότι η ισχύς εξόδου ήταν πιο σταθερή για ανεμογεννήτριες με μεγαλύτερο αριθμό αεροτομών ακόμα με την ίδια solidity.

Αυτό σημαίνει ότι οι δυνάμεις που προκαλούν κυκλικές μεταβολές στην ροπή και σε καθαρή δύναμη είναι αρκετά μειωμένη στις ανεμογεννήτριες με τρεις αεροτομές σε σχέση με αυτές μόνο δύο ή μίας αεροτομής. Επιπλέον με την εγκατάσταση τριών αεροτομών παρατηρείται μεγαλύτερη ικανότητα αυτοέκκινησης της ανεμογεννήτριας σε σχέση με αυτές δύο αεροτομών στις οποίες η αυτοεκκίνηση της εξαρτάται από τον αρχικό προσανατολισμό της [54]. Αυτή την άποψη έρχεται να υποστηρίξει και η Paraschiniou η οποία υποστηρίζει ότι οι ανεμογεννήτριες τριών αεροτομών S-VAWT είναι μη κατευθυντική που προσφέρει την επιθυμητή άμεση ανταπόκριση στις αλλαγές του εισερχόμενου αέρα, πράγμα που δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί σε ανεμογεννήτριες μικρότερου αριθμού λεπίδων. Εκτός αυτού οι VAWT με τρεις λεπίδες προσφέρουν καλύτερες τεχνικές κατασκευής και καλύτερη κατασκευαστική δυναμική. Συμπερασματικά, οι ανεμογεννήτριες με τρεις αεροτομές παρουσιάζουν την βέλτιστη λύση στις ανεμογεννήτριες S-VAWT τόσο σε απόδοση ισχύος, όσο και κατασκευαστικά.

2.4.4 Επιδράσεις τρισδιάστατου πεδίου ροών

Για τις S-VAWT δεδομένης ονομαστικής ισχύος εξόδου, ισχύει ότι όσο αυξάνεται η αναλογία διαστάσεων (λόγος C/R , χορδή αεροτομής προς ακτίνα) μειώνεται η ακτίνα περιστροφής έτσι ώστε να μείνει σταθερή η επιφάνεια σάρωσης. Ως εκ τούτου η ανεμογεννήτρια μπορεί να γίνει πολύ πιο λεπτή με στόχο την μείωση του κόστους παραγωγής των βραχιόνων στήριξης και την μείωση των παρασιτικών οπισθελκουσών δυνάμεων. Παράλληλα οι βραχίονες στήριξης πρέπει να είναι αρκετά σταθερή για να υποστηρίζουν το βάρος των αεροτομών. Δυστυχώς αυτή είναι μια παράμετρος που δεν έχει δοθεί αρκετή προσοχή μέχρι τώρα.

Έχει παρατηρηθεί, ότι η πεπερασμένη αναλογία διαστάσεων έχει σημαντική επίδραση στην αναλογία ανύψωσης-οπισθέλκουσας, και περιορίζει σε μεγάλο βαθμό τις εφαιπόμενες δυνάμεις που μειώνουν την ισχύς εξόδου [46]. Ανακαλύφθηκε ότι η δύναμη ανύψωσης που δρα πάνω στην λεπίδα είναι άμεσα ανάλογη των διαστάσεων, ενώ η επαγόμενη οπισθέλκουσα δύναμη είναι αντιστρόφως ανάλογη των διαστάσεων [55]. Με στόχο την μεγιστοποίηση του συντελεστή ισχύος μια αναλογία διαστάσεων με μικρή αεροτομή θα πρέπει να αποφευχθεί και σύμφωνα με μελέτες του Kirke [27] η αναλογία θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 7.5 ή μεγαλύτερη. Περεταίρω μελέτες για την σχέση μεταξύ ύψους αεροτομής και μέγιστου συντελεστή ισχύος πραγματοποιήθηκαν από τους Lika και Calisal [39] με τα αποτελέσματά τους να φαίνονται στο Σχήμα 2.13. Είναι σαφές ότι τρισδιάστατες επιδράσεις είναι σημαντικές όταν το ύψος των αεροτομών είναι μικρότερο από δύο φορές την ακτίνα του δρομέα, αλλά μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες όταν το ύψος των αεροτομών είναι πάνω από 7 φορές η ακτίνα του.



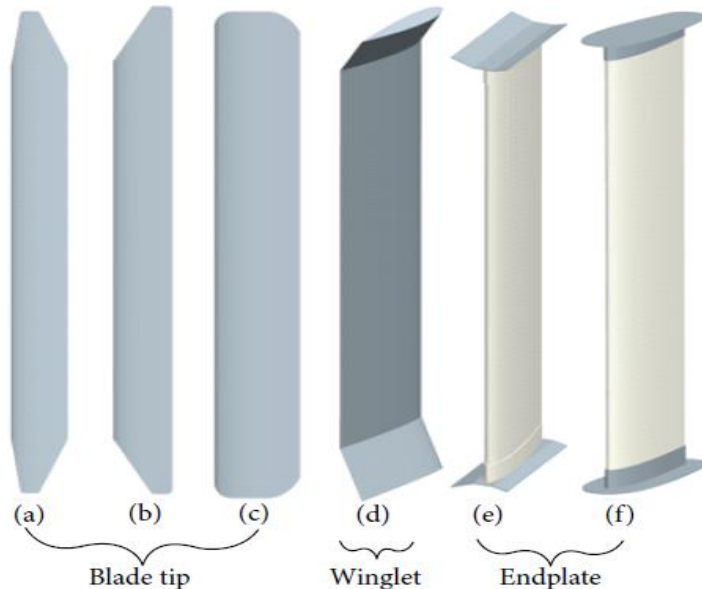
Σχήμα 2.13: Η σχέση μεταξύ ύψους της ανεμογεννήτριας και μέγιστου συντελεστή ισχύος

Είναι σημαντικό επίσης να αναφέρουμε ότι η διαμόρφωση της λεπίδας κατά μήκος της διεύθυνσης του (συμπεριλαμβανομένων της ευθείας, κυρτής και ελικοειδούς αεροτομής) έχει σημαντικές επιπτώσεις στην αεροδυναμική απόδοση και η μηχανική ιδιότητα του S-VAWT. Τα αποτελέσματα των Castellika και Benini [56] έδειξαν ότι ο συντελεστής ισχύος μιας ανεμογεννήτριας κάθετου άξονα με μία ελικοειδή λεπίδα, με σταθερή λεπίδα είναι ελαφρώς μικρότερος από τις ανεμογεννήτριες με μη. Επιπροσθέτως μια συστηματική μελέτη από τον Scheurich [53] επισήμανε ότι η ανεμογεννήτρια με ελικοειδή ή στριμμένη λεπίδα δείχνει έναν σχετικά πιο σταθερό συντελεστή ισχύος μόνο στην περίπτωση που η κυρτότητα της λεπίδας και η ελικοειδής περιστροφή έχουν ταιριάζει σωστά. Επιπλέον ανακαλύφθηκε ότι μια κυρτή και ελικοειδώς στριμμένη διαρρυθμισμένη παράγει έναν υψηλότερο συντελεστή ισχύος από μια διαμόρφωση ευθείων αεροτομών σχεδόν σε όλο το εύρος της λειτουργίας της ανεμογεννήτριας. Οι μεγαλύτερες μεταβολές στον συντελεστή ισχύος είναι πιο έντονοι σε υψηλά TSR.

Επιπροσθέτως έγινε ανάλυση των επιδράσεων των συνθηκών λειτουργίας της απόδοσης της ανεμογεννήτριας από τον Scheurich. Σύμφωνα με τις μελέτες του [53] μία ανεμογεννήτρια χαμηλής αναλογίας ύψους-ακτίνας ενώ παρουσιάζει μια χαμηλή αεροδυναμική απόδοση, παράγει σημαντικά υψηλότερο συντελεστή ισχύος σε λοξή ροή, αλλά μόνο για υψηλά TSR. Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με την λοξή ροή μπορεί να βρεθεί στην λογοτεχνία [57-59].

2.4.5 Αποτελέσματα αεροδυναμικών επιφανειών στα άκρα των αεροτομών.

Ο Scheurich [53] δήλωσε ότι οι δυνάμεις που παράγονται στο άνω και κάτω άκρο μίας ευθείας αεροτομής είναι ελαφρώς μικρότερες από αυτές που παράγονται στο μέσο της και προκαλούνται από το πεπερασμένο εύρος της αεροτομής. Επιπλέον έχει αποδειχθεί ότι στα εν λόγω άκρα της λεπίδας οι στρόβιλοι που παράγονται, έχουν ευθύνη στην μείωση της ισχύος εξόδου, του αυξημένου θορύβου, και τα φορτία κόπωσης. Υπάρχει μια έξυπνη αντιμετώπιση στην αεροδυναμική βελτίωση και απόδοση της ανεμογεννήτριας και κατ' επέκταση την επίλυση των παραπάνω προβλημάτων.



Σχήμα 2.14: Τύποι επιφανειών άκρων αεροτομών

Θεωρητική και πειραματική μελέτη έδειξε ότι η χρήση επιφανειών που παράγουν δυνάμεις κάθετης άνωσης τοποθετημένα στα άκρα των αεροτομών, προσφέρουν μια ευεργετική επίδραση στα χαρακτηριστικά ανύψωσης και οπισθέλκουσας με αντάλλαγμα βέβαια μια αύξηση στις ροπές κάμψης της αεροτομής [46]. Οι επιφάνειες αυτές μπορούν να χαρακτηριστούν ως flaps και αποτελούν μια ελκυστική λύση στην αύξηση της αεροδυναμικής απόδοσης. Οι κυρίαρχη λειτουργία τους είναι διαχέουν τους δυνατούς στρόβιλους που παράγονται στα άκρα της λεπίδας και να βελτιστοποιήσουν την κατανομή των δυνάμεων άνωσης σε όλο το μήκος της αεροτομής διατηρώντας τις ροπές μέχρι ένα συγκεκριμένο όριο. Υπάρχουν αρκετές γεωμετρίες flaps που διερευνήθηκαν και εφαρμόστηκαν για την βελτίωση της αεροδυναμικής απόδοσης. Αυτοί οι τύποι flaps φαίνονται στην Σχήμα 2.14.

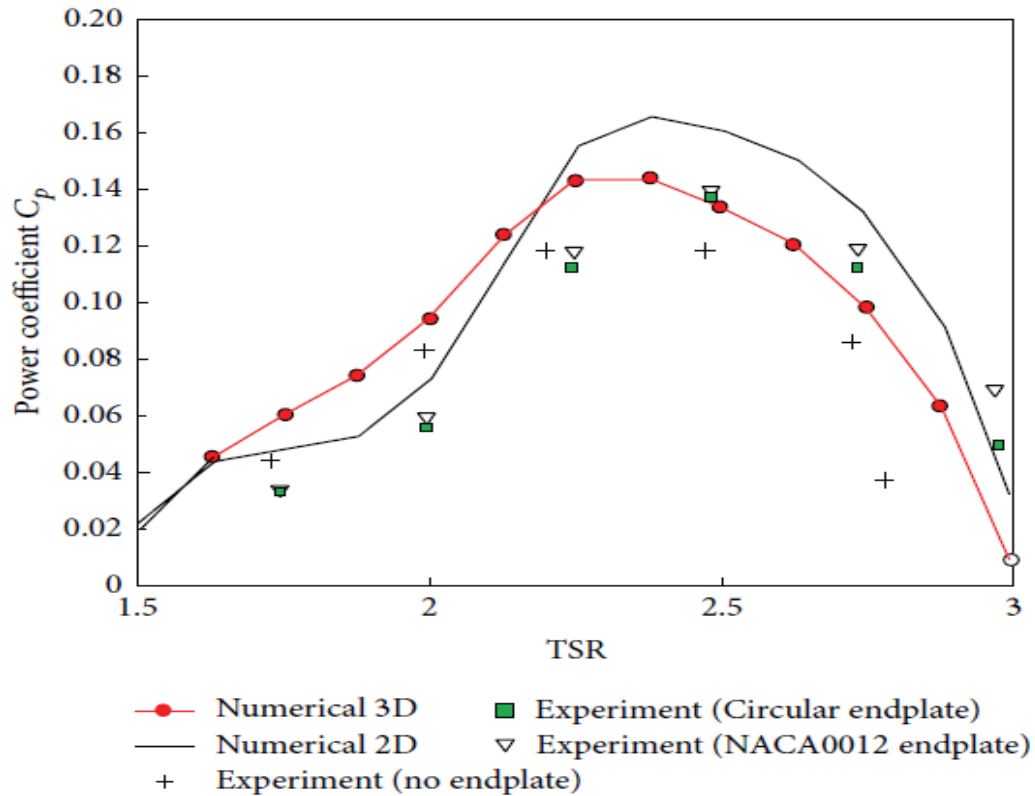
Σε έρευνες που διεξήχθησαν από τους Johansen και Sorensen [60], παρατηρείται ότι η τυπική άκρη (Σχήμα 2.14 (c)) παρουσίασε μια ελαφρώς μεγαλύτερη γωνία επίθεσης σε σχέση με αυτήν που έχει άκρα υπό γωνία (Σχήμα 2.14 (b)) ή από αυτή με κωνικό άκρο (Σχήμα 2.14 (a)). Επιπλέον, στην περίπτωση του τυπικού άκρου, ο συντελεστής ανύψωσης μειώνεται πλησιάζοντας τα άκρα, ενώ στην περίπτωση κωνικών άκρων ο συντελεστής παραμένει σε σταθερός. Εν τω μεταξύ, ο συντελεστής οπισθέλκουσας μειώθηκε στις περιπτώσεις των κωνικών άκρων και μάλιστα στην περίπτωση των άκρων υπό γωνία γίνεται μέχρι και αρνητικός [60]. Ομοίως, υλοποιήθηκαν έρευνες από τους Ferreira και Munduate [61] που αποδεικνύεται ότι τα άκρα αεροτομών με άξονα κλήσης (παρόμοιο με τις κωνικές

άκρες) είναι οι καλύτερες. Επίσης η μικρότερη επιρροή της οπισθέλκουσας μπορεί να εμφανιστεί σε όλο το μήκος της λεπίδας όταν η διανομή των δυνάμεων ανύψωσης είναι ελλειπτική. Ως εκ τούτου η επαγόμενη οπισθέλκουσα δύναμη μπορεί να μειωθεί με την παραγωγή αεροτομών ελλειπτικού σχήματος, η οποία απαιτεί την σμίκρυνση της χορδής της αεροτομής έτσι ώστε να διατηρηθεί η ισορροπία των εκροών σε ολόκληρη την λεπίδα. Παρόλα αυτά, το βασικό εμπόδιο στην κατασκευή flapελλειπτικού τύπου ή περίπλοκων γωνιών είναι πολύ δύσκολες και ακριβές στην παραγωγή τους σε σχέση με αεροτομές αντίστοιχης χορδής.

Μία δεύτερη μέθοδος είναι τα μικρά φτερά (winglets) στα άκρα των αεροτομών όπως φαίνεται στην Σχήμα 2.14(d). Τα φτερά αποτελούν έναν από τους πιο αποτελεσματικούς τρόπους αντιμετώπισης της οπισθέλκουσας δύναμης που εμφανίζεται, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν ευρέως σε αεροτομές αεροπλάνων και ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα. Αυτά ήταν τοποθετημένα συνήθως στο πίσω μέρος του φτερού (περιοχή χαμηλότερης πίεσης) για να ελαχιστοποιήσει τις παρεμβολές των ανέμων [46]. Τα φτερά χρησιμοποιήθηκαν έτσι ώστε να περιοριστεί η οπισθέλκουσα αλλά και για να υπάρχει μεγαλύτερη άνοση. Η μείωση της οπισθέλκουσας με τα winglets ήταν της τάξης του 5% [46] με επιπρόσθετο πλεονέκτημα στην περίπτωση χρήσης wingletsσε μία διαμόρφωση που επέτρεπε την ομαλή κατανομή των δυνάμεων σε όλο το μήκος, από την χορδή προς τα άκρα της αεροτομής. Έτσι έχουμε ως αποτέλεσμα την βελτιστοποίηση της κατανομής των δυνάμεων ανύψωσης σε όλο το μήκος της αεροτομής και την ελαχιστοποίηση της αεροδυναμικής παρεμβολής και του διαχωρισμού των ροών. Ο Johansen και Sorensen [62] διεξήγαγαν μια μελέτη παραμέτρων από το CFD έτσι ώστε να περιγράψουν διάφορα αποτελέσματα που προκαλούνται από τις 4 βασικές παραμέτρους που περιγράφουν ένα winglet.

Η τρίτη και τελευταία μέθοδος είναι τα endplates, πλάκες κάθετα τοποθετημένες στα άκρα των αεροτομών που είχαν την ικανότητα να αναδιανέμουν τις δυνάμεις άνοσης σε όλο το μήκος της λεπίδας με αποτέλεσμα να παρουσιάζεται πολύ μεγαλύτερος συντελεστής ανύψωσης και να μειώνεται ο συντελεστής οπισθέλκουσας σημαντικά [46]. Τα endplates γενικά αναγνωρίζονται ως μια πιο απλή μηχανική λύση σε σχέση με τα winglets, τα οποία χρησιμοποιούνται γενικά σε πειραματικές εφαρμογές για την εξάλειψη των απωλειών στα άκρα της λεπίδας. Η χρήση των endplates, έχει ως αποτέλεσμα την σημαντική βελτιστοποίηση της αεροτομής, αφού μπορεί να θεωρηθεί ότι συμπεριφέρονται σαν δισδιάστατη αεροτομή. Επιπλέον εκτεταμένες έρευνες διεξήχθησαν για την βελτιστοποίηση του γεωμετρικού σχήματος των endplates [63-66].

Ανάμεσα στις παραπάνω τεχνικές, τα winglets και τα endplates είναι οι πιο ελκυστικές υποψήφιες για τις S-VAWT λόγω της γεωμετρικής τους απλότητας, της αποτελεσματικότητάς τους και την ευκολία ανάπτυξής τους. Πρέπει να πούμε ότι από τις δύο, τα endplates φαίνεται να προτιμώνται από τους μηχανικούς. Τα αποτελέσματα των endplates από έρευνες για την αποδοτικότητά τους παρουσιάστηκαν από τους Lika και Calisal [39] και φαίνονται στο Σχήμα 2.15. Σύμφωνα με αυτόν είναι προφανές ότι η συγκεκριμένη τεχνική είναι η πιο αποτελεσματική στην βελτιστοποίηση των S-VAWT.



Σχήμα 2.15: Συντελεστής ισχύος ανεμογεννητριών με και χωρίς endplates

2.5 Επιδράσεις της γωνίας πρόσπτωσης στην αεροτομή.

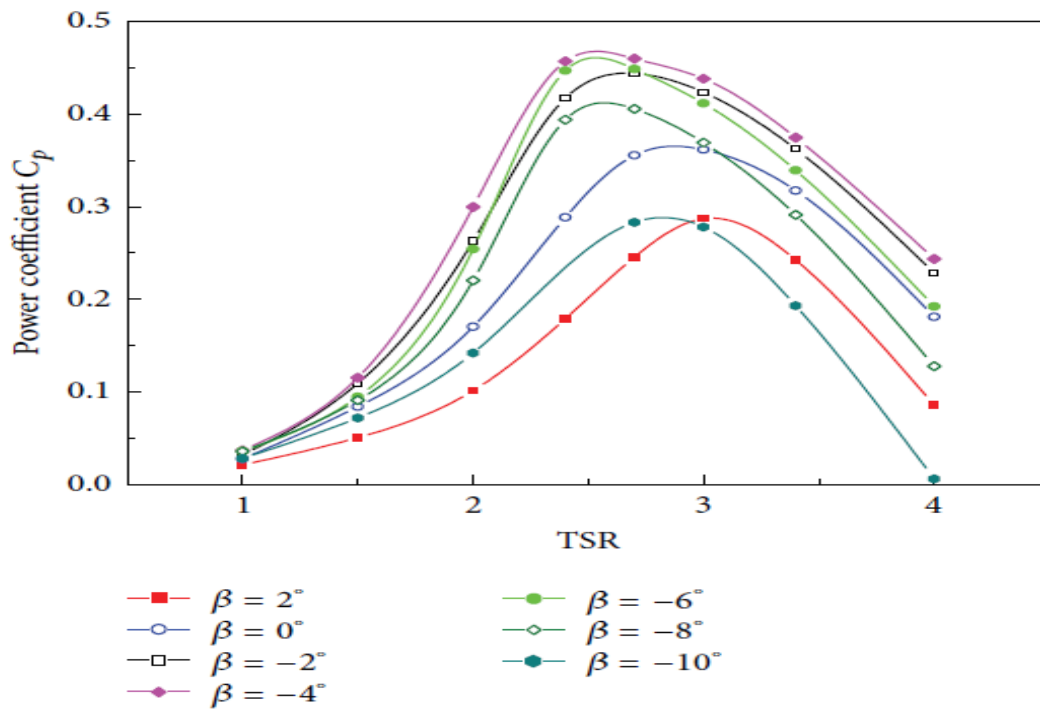
Η σχέση μεταξύ την γωνίας πρόσπτωσης της αεροτομής σε σχέση με την τοπική γωνία επίθεσης μπορεί να εκφραστεί μαθηματικά ως εξής:

$$\alpha_{\theta} = \gamma_{\theta} - \beta_{preset}, \quad (2.18)$$

Όπου γ_{θ} είναι η τοπική γωνία επίθεσης των εισροών και προκύπτει από :

$$\tan \gamma_{\theta} = \frac{\sin \theta}{(\lambda_{\theta} + \cos \theta)}, \quad (2.19)$$

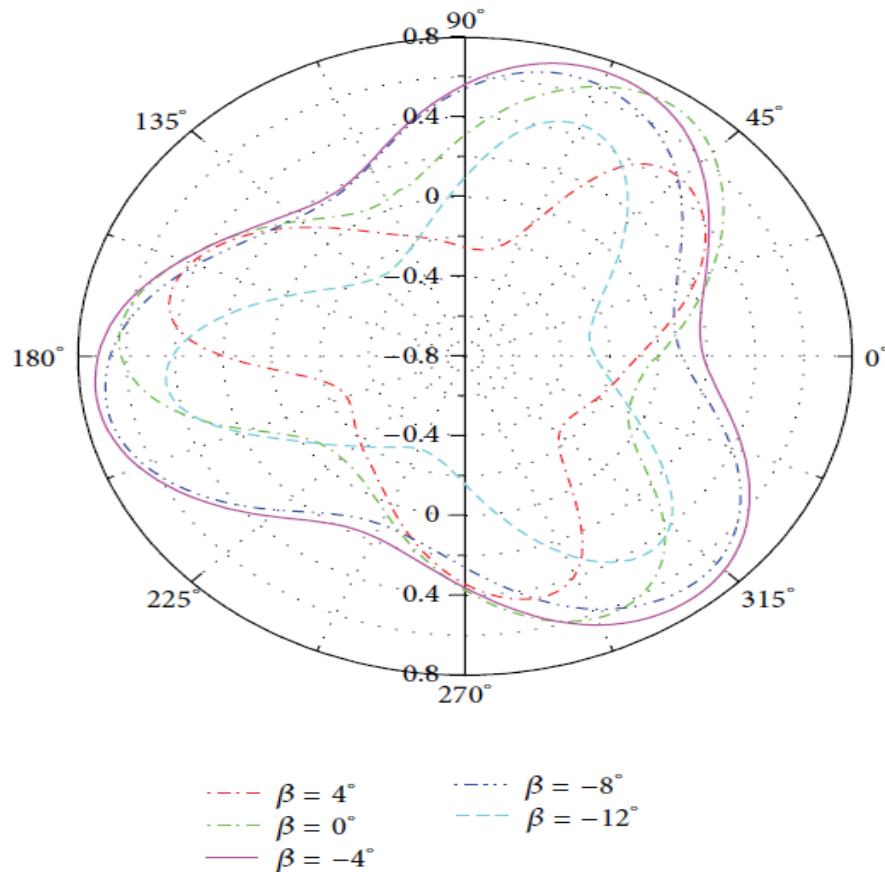
Η γωνία πρόσπτωσης που ρυθμίζεται εξ αρχής η αεροτομή β_{preset} είναι ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες στην απόδοση της ανεμογεννήτριας και μπορεί να την βελτιστοποιήσει σε μεγάλο βαθμό. Μεγάλος αριθμός ερευνών πραγματοποιήθηκαν από τους Klimaskai Worstell [67] όσον αφορά την σχέση μεταξύ της γωνίας πρόσπτωσης της αεροτομής και τον συντελεστή ισχύος [32, 67-69], οι οποίοι δήλωσαν ότι η απόδοση θα βελτιωθεί όταν οι αεροτομές ρυθμιστούν σε out-offset γωνία πρόσπτωσης (αρνητική γωνία) από 0 έως 4 μοίρες, ενώ αντιθέτως σε offset γωνία πρόσπτωσης (θετική γωνία) έχει αρνητικές επιπτώσεις στην αεροδυναμική απόδοση. Οι επιρροές της γωνίας πρόσπτωσης στην λεπίδα και η γενικότερη απόδοση και οι μηχανικές ιδιότητες μελετήθηκαν από τους Wang [70] και Zhang et al. [71]. Οι αριθμητικές αναλύσεις τους σχετικά με τις επιδράσεις της λεπίδας σε διάφορες γωνίες πρόσπτωσης φαίνονται στο Σχήμα 2.15 και 2.16.



Σχήμα 2.16: Καμπύλες συντελεστή ισχύος S-VAWT σε διάφορες γωνίες πρόσπτωσης.

Στο Σχήμα 2.16 βλέπουμε τις διαφορετικές καμπύλες του συντελεστή ισχύος που προκύπτουν από την μεταβολή της ρύθμισης της αρχικής γωνίας πρόσπτωσης. Βρέθηκε ότι ο μέγιστος συντελεστής ισχύος επιτυγχάνεται σε γωνία -4 μοιρών, και περαιτέρω ανάλυση υποδηλώνει ότι μεγαλύτερη out-offset γωνία πρόσπτωσης μπορεί να διευρύνει το λειτουργικό εύρος του TSR. Ως εκ τούτου έχουμε και την μεγέθυνση του μέγιστου συντελεστή ισχύος.

Όπως αναφέραμε και παραπάνω η γωνία πρόσπτωσης της αεροτομής μπορεί να επηρεάσει το εύρος λειτουργίας του TSR με μεγαλύτερο συντελεστή ισχύος, μεγαλύτερες ακραίες τιμές και τις αντίστοιχες γωνίες στο αζιμούθιο. Είναι εμφανές από το Σχήμα 2.17 ότι η μεγαλύτερος συντελεστής ισχύος παρουσιάζεται στις -4 μοίρες και μάλιστα αυτό το μέγιστο είναι πολύ μεγαλύτερο στις περιπτώσεις out-offset σε σχέση με αυτές που είναι in-offset. Εν τω μεταξύ οι αντίστοιχες μέγιστες τιμές των γωνιών σε αζιμούθιο είναι πολύ μεγαλύτερες που οφείλονται στο γεγονός ότι στην περίπτωση της in-offset γωνίας πρόσπτωσης υπερβαίνει εκ των προτέρων την δυναμική γωνία stall και φτάνει σε στην ακραία τιμή σε αρκετά χαμηλή γωνία αζιμούθιο, ενώ στην περίπτωση της out-offset γωνίας πρόσπτωσης η αεροτομή καθυστερεί να φτάσει στην δυναμική γωνία stall και κατ' επέκταση η ακραία τιμή βρίσκεται σε αρκετά μεγαλύτερη γωνία αζιμούθιο. Επομένως βγάζουμε το συμπέρασμα ότι το λειτουργικό εύρος μπορεί να επεκταθεί με την τον προκαθορισμό της αεροτομής σε in-offset γωνία πρόσπτωσης ή μικρότερου πλάτους αεροτομής σε προκαθορισμό out-offset μπορούν να επιτύχουν υψηλότερο συντελεστή ισχύος όσο το δυνατόν συντομότερο στον χρόνο λειτουργίας. Η γωνία out-offset πρόσπτωσης χρησιμοποιούνται σε ένα μεγαλύτερο εύρος λειτουργίας αλλά και σε αυτή την περίπτωση μπορούν να βελτιώσουν την απόδοσή τους μέχρι έναν βαθμό αλλά και την ικανότητα αυτοεκκίνησης της ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 2.17: Στιγμαίος συντελεστής ισχύος S-VAWT για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης

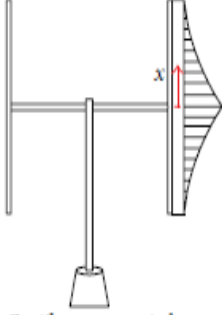
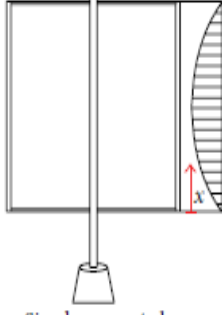
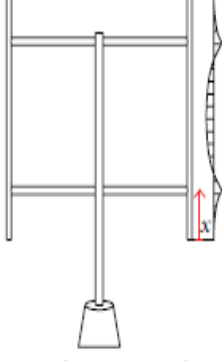
2.6 Επιδράσεις της διάταξης των βραχιόνων υποστήριξης.

Καθ' όλη την ιστορία των ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα έχουν εμφανιστεί μόνο τρία μοτίβα στήριξης αεροτομών τα οποία διακρίνονται σε cantilever-supported, simple-supported και overhang-supported. Τα τρία αυτά μοτίβα φαίνονται ξεκάθαρα στον παρακάτω πίνακα. Για την πρώτη περίπτωση (cantilever-supported) ο βραχίονας στήριξης είναι τοποθετημένος στο κέντρο της αεροτομής χωρίζοντάς την έτσι σε 2 ίσα κομμάτια (και τα 2 κομμάτια αναγνωρίζονται ως cantilever). Στην δεύτερη περίπτωση της απλής στήριξης (simple supported) εμφανίζονται δύο βραχίονες σε κάθε αεροτομή οι οποίοι βρίσκονται στα άνω και κάτω άκρα της λεπίδας. Στην τελευταία περίπτωση (overhang-supported) και πάλι διακρίνουμε 2 βραχίονες σε κάθε αεροτομή αλλά αυτή την φορά το σημείο επαφής τους μετράει το ένα πέμπτο του συνολικού μήκους της λεπίδας. Διεξήχθησαν έρευνες για τον υπολογισμό του σημείου κάμψης και της εκτροπής της λεπίδας για την εύρεση ενός καλύτερο μοτίβου υποστήριξης.

Προκειμένου να απλοποιηθεί το μοντέλο θεωρείται ότι η αναλογία μήκους λεπίδας και ύψος διατομής είναι πολύ μεγαλύτερη από 10. Επομένως οι συνθήκες μπορούν να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας την θεωρία απλής δέσμης. Επιπλέον με την υπόθεση ότι οι βραχίονες στήριξης πληρούν της απαραίτητες συνθήκες ακαμψίας και αντοχής, ασχολούμαστε μόνο με την παραμόρφωση της αεροτομής και αγνοούμε τις πιθανές παραμορφώσεις στους βραχίονες στήριξης. Υπό συνθήκες ομοιόμορφα καταναμημένων φορτίων q , οι εξισώσεις του σημείου κάμψης και απόκλισης της λεπίδας

αναγράφονται στον παρακάτω πίνακα. Στους παρακάτω τύπους σημειώνουμε ότι H είναι το συνολικό μήκος της λεπίδας και EI είναι η αδράνεια κάμψης.

TABLE 1: Three different supporting patterns and their corresponding bending moment and deflection.

Supporting patterns and moment diagram	Bending moment and its maximum moment	Deflection equation and its maximum deflection
 <p>Cantilever-supported</p>	<p>The moment when $0 \leq x \leq H/2$:</p> $M_x = q \left(\frac{H}{2} \right) x - \frac{q}{2} x^2 - \frac{q}{2} \left(\frac{H}{2} \right)^2$ <p>The maximum moment:</p> $M_{\max} \Big _{x=0} = \frac{q}{2} \left(\frac{H}{2} \right)^2$	<p>The deflection equation when $0 \leq x \leq H/2$:</p> $v_x = -\frac{qx^2}{24EI} \left(x^2 - 4x \left(\frac{H}{2} \right) + 6 \left(\frac{H}{2} \right)^2 \right)$ <p>The maximum deflection:</p> $v_{\max} = \frac{q}{8EI} \left(\frac{H}{2} \right)^4$
 <p>Simple-supported</p>	<p>The moment when $0 \leq x \leq H$:</p> $M_x = \frac{q}{2} Hx - \frac{q}{2} x^2$ <p>The maximum moment:</p> $M_{\max} \Big _{x=0} = \frac{q}{8} H^2$	<p>The deflection equation when $0 \leq x \leq H$:</p> $v_x = -\frac{qx}{24EI} (x^3 - 2Hx^2 + H^3)$ <p>The maximum deflection:</p> $v_{\max} = \frac{5q}{384EI} H^4$
 <p>Overhang-supported</p>	<p>The moment when $0 \leq x \leq H/5$:</p> $M_x = -\frac{q}{2} x^2$ <p>The moment when $H/5 < x \leq 4H/5$:</p> $M_x = -\frac{q}{2} x(x-H) - \frac{q}{10} H^2$ <p>The moment when $4H/5 < x \leq H$:</p> $M_x = -\frac{q}{2} (H-x)^2$ <p>The maximum moment:</p> $M_{\max} \Big _{x=0} = \frac{q}{40} H^2$	<p>The deflection equation when $0 \leq x \leq H$:</p> $v_x = -\frac{q}{EI} \left(\frac{1}{24} x^4 + \frac{H^3}{600} x - \frac{H^4}{2500} \right)$ <p>The deflection equation when $H/5 < x \leq 4H/5$:</p> $v_x = -\frac{q}{EI} \left(\frac{1}{24} x^4 - \frac{H}{12} x^3 + \frac{H^2}{20} x^2 - \frac{H^3}{120} x + \frac{H^4}{3750} \right)$ <p>The deflection equation when $4H/5 < x \leq H$:</p> $v_x = -\frac{q}{EI} \left(\frac{1}{24} x^4 - \frac{H}{6} x^3 + \frac{H^2}{4} x^2 - \frac{101}{600} H^3 x + \frac{161}{3750} H^4 \right)$ <p>The maximum deflection:</p> $v_{\max} = \frac{63q}{80000EI} H^4$

Συγκριτική ανάλυση μεταξύ των 2 πρώτων μοτίβων στήριξης (cantilever-supported και simple-supported) έδειξε ότι το μέγιστο σημείο κάμψης είναι το ίδιο και στις δύο περιπτώσεις και τα αντίστοιχα σημεία κάμψης τους εμφανίζονται στο κέντρο της λεπίδας με την ροπή κάμψης συμμετρική ως προς αυτά. Η βασική διαφορά μεταξύ των παραπάνω περιπτώσεων είναι η αλλαγή στην αναλογία του σημείου κάμψης. Στο πρώτο μοτίβο, αυτό της cantilever-supported, η αλλαγή της αναλογίας του σημείου κάμψης είναι χαμηλή όταν βρίσκεται αυτό το σημείο βρίσκεται μακριά από το μέσο της αεροτομής και αντίστροφα αυξάνεται αρκετά όταν πλησιάζει σε αυτό. Ωστόσο στην περίπτωση της

απλής στήριξης (simple-supported) η αύξηση της αναλογίας μεγαλώνει όσο το σημείο κάμψης πλησιάζει τα άκρα της αεροτομής και αντίστροφα. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι η μέγιστη εκτροπή της cantilever-supported είναι μικρότερη από αυτή της απλής στήριξης. Καταλαβαίνουμε λοιπόν προς το παρόν ότι η cantilever-supported αποτελεί μια πιο ελκυστική μέθοδο.

Επιπλέον, έρευνες σχετικά με την συμπεριφορά της δόνησης κάθε βραχίονα πραγματοποιήθηκαν όπου η συνολική μάζα της αεροτομής είναι M_b και θεωρείται άκαμπτη. Επομένως η εκτροπή του ελεύθερου άκρου και της ιδιοσυχνότητας του συστήματος αεροτομών και βραχιόνων στήριξης μπορεί να εκφραστεί μαθηματικά ως εξής:

Η εκτροπή του ελεύθερου άκρου της cantilever-supported υπόθεσης είναι :

$$\delta_{cant} = \frac{M_b g R^3}{3EI_{cant}}, \quad (2.20)$$

Με την ιδιοσυχνότητα να είναι:

$$f_{cant} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3EI_{cant}}{M_b R^3}}, \quad (2.21)$$

Ενώ για την απλή στήριξη η εκτροπή μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\delta_{simp} = \frac{M_b g R^3}{24EI_{simp}}, \quad (2.22)$$

Έτσι η ιδιοσυχνότητα του συστήματος προκύπτει από τον εξής τύπο :

$$f_{simp} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{24EI_{simp}}{M_b R^3}}, \quad (2.23)$$

Σύμφωνα με τους τύπους (2.29) και (2.23), προκύπτει ότι η εκτροπή είναι πολύ μικρότερη στην περίπτωση της απλής στήριξης σε σχέση με την περίπτωση της cantilever-supported όταν η αντοχή κάμψης της απλής στήριξης EI_{simp} είναι ίση με αυτή της cantilever-supported EI_{cant} . Εν τω μεταξύ η φυσική ιδιοσυχνότητα f_{simp} είναι μεγαλύτερη σε σχέση με αυτή της cantilever-supported περίπτωσης f_{cant} , με αποτέλεσμα να έχουμε πολύ μικρότερη πιθανότητα συντονισμού στην απλή στήριξη. Με άλλα λόγια λεπτοί βραχίονες στήριξης μπορούν να χρησιμοποιηθούν όταν η εκτροπή των δυο περιπτώσεων είναι ίδια, αλλά για την απλή στήριξη η οποία αποτελείται από έναν μόνο βραχίονα κερδίζουμε σημαντική μείωση της μάζας που επιβαρύνει την τουρμπίνα και το κόστος. Από αυτή την άποψη η μέθοδος απλή στήριξη φαίνεται να είναι και η καλύτερη.

Αν εμβαθύνουμε στην μέθοδο της απλής στήριξης, οι επιδράσεις του αεροδυναμικού φορτίου και της αδρανειακής φυγοκεντρικής δύναμης προκαλούν παραμόρφωση που εμφανίζεται κατά το μήκος της λεπίδας με αποτέλεσμα η αεροτομή να αποκτάει μία κυρτότητα. Το ενδιαφέρον είναι ότι σύμφωνα και με τον Scheurich [53] η συνολική απόδοση της ανεμογεννήτριας με κυρτή λεπίδα είναι καλύτερη από αυτές με ίσιες αεροτομές. Τόνισε επίσης ότι οι επαγόμενες δυνάμεις κοντά στο άκρο της λεπίδας είναι πολύ μεγαλύτερες και οι κανονικές δυνάμεις που δρουν στο μέσο της λεπίδας είναι πολύ μικρότερες. Φαίνεται λοιπόν να υποστηρίζεται ότι η παραμόρφωση της λεπίδας στην περίπτωση της απλής στήριξης παίζει ενεργό ρόλο στην βελτίωση της αεροδυναμικής απόδοσης της S-VAWT. Θα

πρέπει επίσης σε αυτό το σημείο να αναφερθεί ότι υπάρχουν πολύ λίγες βιβλιογραφικές πηγές σχετικά με την δομή των βραχιόνων στήριξης, την παραμόρφωση που προκαλούν και την αεροδυναμική τους απόδοση. Ως εκ τούτου θα πρέπει να αφιερωθούν αρκετές έρευνες σχετικά με την ζεύξη στερεού και υγρού στο μέλλον.

Προκειμένου να βελτιωθούν οι τάσεις και οι συνθήκες παραμόρφωσης που προκαλούνται από την μέθοδο απλής στήριξης μετακινήθηκαν οι βραχίονες στήριξης από τα άκρα προς το κέντρο της αεροτομής κατά το $1/5$ της συνολικού μήκους της φτάνοντας έτσι στην τρίτη μέθοδο που αναφέραμε και πιο πάνω αυτή της overhang-supported. Όπως φαίνεται και στον πίνακα 1 το μέγιστο σημείο κάμψης και η μέγιστη απόκλιση είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με τις άλλες δύο περιπτώσεις στήριξης όπου το μέγιστο σημείο κάμψης είναι μόνο το $1/5$ της και η μέγιστη εκτροπή είναι περίπου το $1/10$ από αυτό της περίπτωσης cantilever-supported. Σύμφωνα με αναλύσεις [46], η μέθοδος cantilever-supported προτιμάται για την ελαχιστοποίηση της παρασιτικής οπισθέλκουσας αλλά είναι επιθυμητό να χρησιμοποιηθούν μακριές και λεπτές αεροτομές με υψηλή αναλογία διαστάσεων για καλύτερη απόδοση, η οποίες όμως απαιτούν δύο βραχίονες στήριξης για λόγους δομικής σταθερότητας [27]. Εν κατακλείδι η μέθοδος overhang-supported είναι η καλύτερη.

2.7 Επιδράσεις των τμημάτων των βραχιόνων στήριξης.

Όπως αναφέραμε και παραπάνω οι βραχίονες στήριξης είναι αναπόσπαστο κομμάτι των S-VAWT εκτός από τις μεθόδους που είδαμε, θα πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχουν μερικές ειδικού τύπου ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα με εξιδεικευμένους βραχίονες, όπως η ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα που σχεδιάστηκε από τον Gorelon [17]. Οι βραχίονες στήριξης έχουν μεγάλη επίδραση στην απόδοση της S-VAWT από την άποψη ότι επηρεάζουν τόσο την δομή όσο και τις ροές του συστήματος. Δυστυχώς οι επιδράσεις που προκαλούν οι βραχίονες λείπουν από τις περισσότερες μελέτες και προσομοιώσεις. Για αυτό το λόγο πραγματοποιήθηκαν έρευνες για την ανάλυση των αεροδυναμικών φορτίων που δέχονται και παρουσιάζουν, ειδικά όσων αφορά την οπισθέλκουσα.

Οι βραχίονες στήριξης χρησιμοποιούνται κυρίως για να μεταφέρουν την ροπή από τις αεροτομές στον κεντρικό αγωγό που είναι συνδεδεμένος με την ηλεκτρογεννήτρια. Ταυτόχρονα μειώνουν την κόπωση και την φθορά των αεροτομών και επηρεάζουν την ιδιοσυχνότητα του δρομέα. Το πρόβλημα είναι ότι σαν αντάλλαγμα δημιουργούν μεγαλύτερες οπισθέλκουσες δυνάμεις και μειώνουν την καθαρή ισχύ εξόδου της ανεμογεννήτριας προσθέτοντας βάρος και κόστος στην κατασκευή. Επιστήμονες [46] διεξήγαγαν έρευνες πάνω στον σχεδιασμό των βραχιόνων στήριξης με κριτήριο την ιδανική ισορροπία ανάμεσα στην αεροδυναμική απόδοση και της δομικές απαιτήσεις. Υπάρχουν ορισμένες διατομές βραχιόνων υποστήριξης που χρησιμοποιούνται ευρέως συμπεριλαμβάνοντας σχήματα όπως κυκλικά, ορθογώνια, πολύγωνα, ελλειπτικά και σε μορφή αεροτομής.

Βρέθηκε ότι η λαμβανόμενη ισχύς επηρεάζεται προσθέτοντας επιπλέον αεροδυναμική οπισθέλκουσα δύναμη παραγόμενη από τους βραχίονες στήριξης και της αεροδυναμικές ανάμεσα στα ίδια τον αγωγό και τις αεροτομές. Ο Li και η Calisal [39] διεκπεραίωσαν μία σειρά από πειραματικές δοκιμές σε ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα με διαφορετικού σχήματος και ιδιοτήτων βραχίονες και υπολόγισαν την μαθηματική έκφραση του συντελεστή ισχύος που συνεισφέρουν οι βραχίονες στον άξονα περιστροφής βασιζόμενοι στην θεωρία διαταραχών όπως φαίνεται παρακάτω (2.20). Τα αποτελέσματα των μαθηματικών μοντέλων διόρθωσης των βραχιόνων φάνηκαν να συμφωνούν με τα αποτελέσματα των πειραματικών δεδομένων με μία μικρή απόκλιση στα πειραματικά δεδομένα που

έδειχναν ελαφρώς μεγαλύτερη απόδοση. Κατέληξαν βέβαια στο συμπέρασμα ότι οι επιδράσεις του βραχίονα είναι μάλλον ασήμαντες ή τουλάχιστον αμελητέες :

$$C_{p,AS} = \frac{\left(\frac{1}{T}\right) \int_0^T \int_0^R C_d(r\omega + V_\infty \sin\omega t + U_{induced})^2 r\omega dr dt}{\frac{1}{2}\rho R V_\infty^3}, \quad (2.24)$$

Όπου $U_{induced}$ είναι η προβολή της επαγόμενης ταχύτητας που έρχεται παράλληλα στην χορδή του βραχίονα. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η μελέτη αυτού του τομέα της ανεμογεννήτριας είναι ακόμα περιορισμένη και θα πρέπει να καταβληθούν περισσότερες προσπάθειες για την ανάλυση των αποτελεσμάτων και των επιδράσεων των βραχιόνων στήριξης κυρίως με τρόπο που θα βοηθήσει στην βελτιστοποίηση πτυχών δομικής αντοχής και αεροδυναμικής απόδοσης.

2.8 Επίλογος

Σε αυτό το κεφάλαιο αναπτύξαμε ένα μεγάλο κομμάτι της αεροδυναμικής και στατικής μελέτης που υποβάλλονται οι αεροτομές και οι βραχιόνες στήριξης μίας ανεμογεννήτριας κατακόρυφου άξονα. Αναπτύξαμε αεροδυναμικούς παράγοντες όπως το stall και το TSR και αναπτύξαμε τον τρόπο που σχεδιάζονται όλα τα προφίλ NACA. Αναπτύχθηκε επίσης πώς αλλάζοντας γεωμετρικές πτυχές του προφίλ μιας αεροτομής όπως την κυρτότητα, το μήκος της χορδής και το πάχος της μπορεί να επηρεάσει την αεροδυναμική της. Εκτός αυτού αναφαιρήκαμε στην σχεδίαση του δρομέα και των βραχιόνων στήριξης που όπως είδαμε είναι παράγοντες εξήσου σημαντική για βελτιστοποίηση της VAWT αλλά συχνά μένουν στο παρασκήνιο των ερευνών.

Κεφάλαιο 3ο: Γεννήτρια και κύκλωμα ελέγχου

3.1 Γεννήτρια DC

Η εφαρμογή της γεννήτριας DC στα συστήματα αιολικής ενέργειας δεν είναι ευρέως διαδεδομένη, κυρίως λόγω των υψηλών απαιτήσεων στην συντήρησή τους και την ανάγκη ενός μετατροπέα πλήρους κλίμακας που θα μετατρέπει την DC τάση της γεννήτριας σε εναλλασσόμενο AC για να μπορεί να συνδεθεί στο ηλεκτρικό δίκτυο. Για τον λόγο αυτό οι γεννήτριες DC περιορίζονται σε συστήματα αιολικής ενέργειας που δεν συνδέονται σε αυτό αλλά χρησιμοποιούνται για την φόρτιση μπαταριών, δηλαδή μικρά φορτία DC τάσης [2].

Υπάρχουν πολλών ειδών γεννήτριες συνεχούς τάσης οι οποίες έχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, για αυτό και δεν είναι όλες κατάλληλες για κάθε εφαρμογή. Επιγραμματικά συναντάμε τις επαγωγικές γεννήτριες οι οποίες χρησιμοποιούν πυκνωτές και συμπυκνωτές αλλά δεν παρουσιάζουν υψηλό συντελεστή ισχύος για αυτό και δεν θα ασχοληθούμε σε αυτή την εργασία. Οι γεννήτριες που χρησιμοποιούνται κυρίως για την εφαρμογή μας είναι οι σύγχρονες γεννήτριες και παρακάτω θα αναπτύξουμε τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν σε σχέση με τις επαγωγικές.

3.1.1 Σύγχρονες γεννήτριες

Οι σύγχρονες γεννήτριες έχουν πολλά πλεονεκτήματα έναντι των επαγωγικών. Ένας από τους λόγους είναι η μεγαλύτερη απόδοση τους, που ευθύνεται στο μαγνητικό ρεύμα, δηλαδή το συνολικό ρεύμα που διαρρέει τον μετασχηματιστή όταν ενεργοποιείται που δεν είναι μέρος του ρεύματος του στάτορα. Στις επαγωγικές γεννήτριες η ισχύς που απαιτείται για την διέγερση του δρομέα παράγεται από την περιέλιξη του στάτορα η οποία στην συνέχεια μετατρέπεται σε ωφέλιμη ισχύ. Αναλόγως στις σύγχρονες γεννήτριες βλέπουμε καλύτερη απόδοση και καλύτερο συντελεστή ισχύος. Σε διάφορες ταχύτητες ανέμου και με διαφορετικά συστήματα συνήθως οι σύγχρονες γεννήτριες συνδέονται με το ηλεκτρικό δίκτυο μέσω μετατροπέα ισχύος. Το ποσό της ωφέλιμης παραδοτέας ενέργειας από την σύγχρονη γεννήτρια (SG) εξαρτάται από την βαθμολογία του μετατροπέα τάσης-ρεύματος και του συντελεστή ισχύος της SG.

Επιπλέον, η ταχύτητα του δρομέα δεν εξαρτάται από τις συνθήκες ηλεκτρικού φορτίου. Στα αιολικά συστήματα είναι πιο βολικό να ελέγχετε η ταχύτητα του δρομέα μόνο με βάση την ταχύτητα του ανέμου. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ότι μπορούν να λειτουργήσουν με μεγαλύτερα κενά αέρα σε σύγκριση με τις επαγωγικές. Στις επαγωγικές το κενό αέρα πρέπει να κρατιέται μικρό προς αποφυγή της αύξησης του μαγνητικού ρεύματος και την βελτίωση του συντελεστή ισχύος [15]. Από την άλλη πλευρά στις σύγχρονες γεννήτριες είναι επιθυμητό να υπάρχουν μεγαλύτερα κενά αέρος καθώς αυτό βοηθά στην μείωση της αντίδρασης του οπλισμού και της αντίδρασης των SG που φαίνεται να βελτιώνει στην σταθερότητα.

Η σημασία της μεταβλητής ταχύτητας σε αιολικά συστήματα με SG έγκειται στην ικανότητα τους να ικανοποιούν τις αεροδυναμικές απαιτήσεις σε ένα μεγάλο εύρος ταχυτήτων ανέμου και να διατηρείτε το TSR στο βέλτιστο, ανεξάρτητα από την ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας και την αντίστοιχη ταχύτητα του ανέμου. Αυτό σε αντίθεση με τις IG επιτρέπει στον δρομέα να φτάσει ταχύτητες ανεξάρτητα από τις συνθήκες του φορτίου. Μεγάλο εύρος ταχύτητας λειτουργίας, από 0 έως την ονομαστική ταχύτητα είναι ευεργετική για λόγους ελέγχου.

Λειτουργικά τα πλεονεκτήματα μιας SG με μετατροπέα ισχύος είναι πολλά, όπως για παράδειγμα την ρύθμιση της τάσης που την χειρίζεται ο μετατροπέας από την πλευρά του δικτύου. Επιπλέον πλεονέκτημα είναι οι δυναμικές διαταραχές του δικτύου και της ανεμογεννήτριας απομονώνονται η μία από την άλλη και η SG δεν διατρέχει το κίνδυνο να χάσει τον συγχρονισμό της. Συνεχίζοντας, εξοπλισμός εκκίνησης και συγχρονισμού δεν είναι απαραίτητος, καθώς αυτό γίνεται με την βοήθεια ηλεκτρικών μετατροπέων. Το μόνο πλεονέκτημα των IG έναντι των SG είναι ότι ο μετατροπέας δεν έχει τις κατάλληλες διαστάσεις για την εκμετάλλευση πλήρους ισχύος. Ωστόσο, με την πρόσφατη μείωση κόστους των ηλεκτρικών εξαρτημάτων ισχύος, δεν αποτελεί πλέον ανησυχία. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι σύγχρονες γεννήτριες μπορούν να χωριστούν σε 2 κατηγορίες τις Wounded Rotor Synchronous Generators (WRSG) και τις Permanent Magnet Synchronous Machines (PMSG).

3.1.2 Wounded Rotor Synchronous Generator

Wounded Rotor Synchronous Generator (WRSG) είναι το αντικείμενο έρευνας για πολλά χρόνια. Το κύριο πλεονέκτημα του WRSG έναντι του PMSG είναι ότι μπορεί εγγενώς να παράγει άεργη ισχύ και συνεπώς να ρυθμίζει την τάση. Έτσι είναι δυνατό να γίνει έλεγχος του συντελεστή ισχύος σύμφωνα με τις συνθήκες του ηλεκτρικού φορτίου. Στην παραγωγή ισχύος το WRSG εισάγει την άεργη ισχύ για να αντισταθμίσει την άεργη κατανάλωση φορτίων.

Ωστόσο, οι WRSG δεν έχει αποκτήσει δημοτικότητα μεταξύ των κατασκευαστών ανεμογεννητριών, κυρίως λόγω των υψηλών απαιτήσεων συντήρησης. Η μηχανική ευπάθεια των περιελίξεων του δρομέα που προκαλείται από τα περιστροφικά φορτία οδηγούν στην ζημιά της μόνωσης των περιελίξεων αυτών.

3.1.3 Permanent Magnet Synchronous Generators

Συγκριτικά με τους WRSG οι γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη, PMSG, όπως αναφέρονται είναι πολύ πιο αποτελεσματικές. Ξεκινώντας από την ικανότητα αυτοεκκίνησης που προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα και την έλλειψη απωλειών του δρομέα του χαλκού. Επιπλέον η συντήρηση είναι μηδαμινή καθώς δεν έχουμε εξαρτήματα που προκαλούν φθορές στο εσωτερικό της, όπως βούρτσες, δακτύλιοι ολίσθησης και περιελίξεις δρομέα.

Ένα από τα βασικά προβλήματα των WRSG είναι η σχέση μεταξύ της επαγωγικής συχνότητας και της μηχανικής κυκλικής ταχύτητας του δρομέα. Όταν η ταχύτητα του ανέμου αλλάζει, αλλάζει και η ταχύτητα περιστροφής τους δρομέα και επομένως και η συχνότητα που επάγεται από τις αλλαγές της τάσης που παράγεται. Αντιθέτως σε εφαρμογές μεταβαλλόμενου ανέμου με τις PMSG αυτό δεν παρουσιάζεται συχνά σαν πρόβλημα. Εξάλλου, με μικρότερες ανάγκες συντήρησης, αυτού του τύπου οι γεννήτριες έχουν και μικρότερο κόστος και αποτελούν άλλον έναν λόγο που οι PMSG είναι ιδανικές για εφαρμογές μεταβαλλόμενου αέρα.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί είναι το πρόβλημα του απομαγνητισμού λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας. Οι μαγνήτες μπορούν να απομαγνητιστούν μερικώς ή και εξολοκλήρου. Στον μερικό απομαγνητισμό τότε οι ιδιότητες αποδυναμώνονται. Στον πλήρη απομαγνητισμό οι ιδιότητες του μαγνήτη έχουν εξαφανιστεί και απαιτούνται κουραστικές διαδικασίες για τον επαναμαγνητισμό τους, ή σε ορισμένες περιπτώσεις που είναι αδύνατο να επαναμαγνητιστούν που σε εκείνη την περίπτωση, απαιτείτε νέα γεννήτρια.

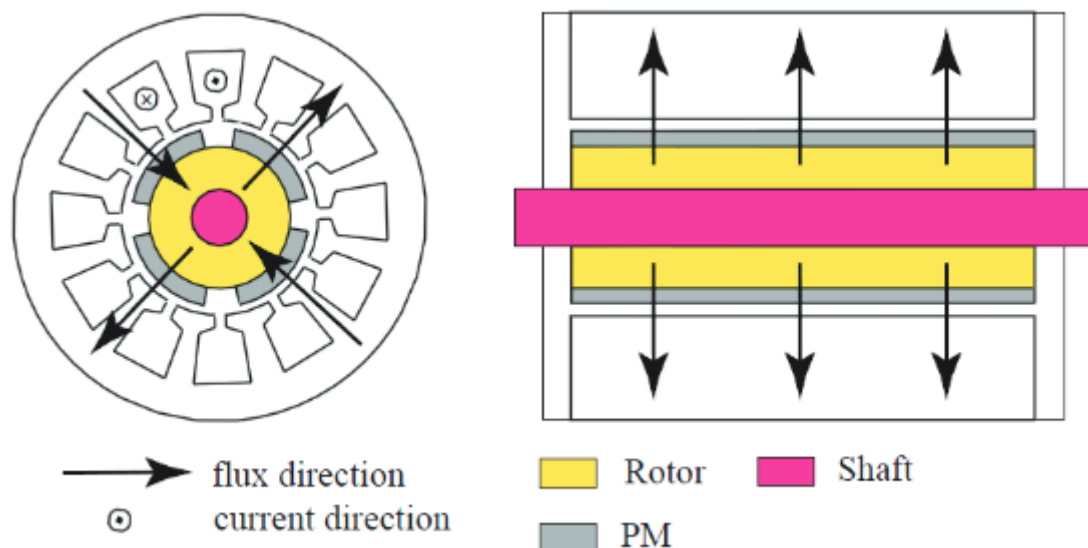
3.2 Σύγχρονες μηχανές μόνιμου μαγνήτη

Σε ένα σύστημα αιολικής ενέργειας άμεσης κίνησης δεν μπορεί να γίνει εφαρμογή μιας υψηλής ταχύτητας (και χαμηλής ροπής) ηλεκτρική μηχανή. Ο Hartkopf [17] έχει δείξει ότι το μέγεθος και το βάρος της γεννήτριας μεγαλώνει όταν μεγαλώνει και ο δείκτης ροπής κρατώντας τον ίδιο συντελεστή ισχύος. Για τον λόγο αυτό είναι απαραίτητο ο σχεδιαστής να συνυπολογίσει στον σχεδιασμό της γεννήτριας μια υψηλή δύναμη ροπής με το μικρότερο δυνατό μέγεθος και βάρος. Από μελέτες φαίνεται ότι οι PMSM έχουν μεγάλες ροπές σε σύγκριση με τις επαγωγικές γεννήτρες ή άλλου τύπου. Επομένως οι PMSG αποτελούν τι πιο ελκυστικές επιλογές για την συγκεκριμένη εφαρμογή. Καθώς το κόστος είναι σημαντικός παράγοντας, θα πρέπει να επιλεγθούν οικονομικές κατασκευές. Υπάρχουν πολλών ειδών μορφολογίες των PMSG και κάποιες από αυτές μπορούν να είναι ιδανικές για την περίπτωση μας ειδικά από την τεχνική πλευρά, ενώ υπάρχουν κάποιες τελευταίας τεχνολογίας, που η πολυπλοκότητα κατασκευής τους, τις κάνει μη βιώσιμες.

Το σχήμα, το μέγεθος, η τοποθεσία και ο προσανατολισμός των μαγνητών μπορούν να διαφέρουν με πολλούς τρόπους και να προσφέρουν λύσεις σε διάφορα προβλήματα. Παρακάτω θα αναφερθούν ορισμένες δομές όπως ακτινωτή ή αξονική ροή, διαμήκη ή εγκάρσια, εσωτερικού ή εξωτερικού δρομέα και εσωτερικού ή εξωτερικού μαγνήτη.

3.2.1 Ακτινωτή ή Αξονική ροή

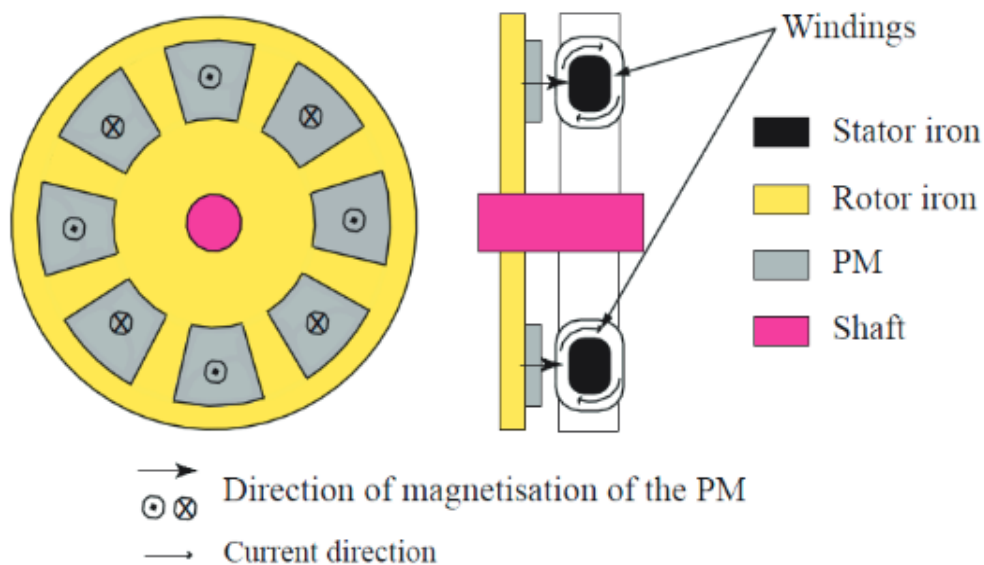
Ο προσανατολισμός της ροής μπορεί να διακριθεί σε 2 ομάδες. Ας υποθέσουμε σαν ένα απλό διάνυσμα την κατεύθυνση της ροής και ο άξονας κατά μήκος της μηχανής είναι σε ένα σύστημα κυλινδρικών συντεταγμένων. Η σχέση του διανύσματος με τον άξονα της μηχανής καθορίζει το αν είναι ακτινωτού ή αξονικού τύπου. Αν το διάνυσμα είναι κάθετο στον άξονα τότε η μηχανή ονομάζεται ακτινωτή, ενώ αν είναι παράλληλο στον άξονα τότε χαρακτηρίζεται ως αξονική.



Σχήμα 3.1: Κατακόρυφη και οριζόντια διατομή του Ακτινωτού τύπου ροής PMSG.

Οι ακτινωτού τύπου ροής PMSG είναι οι συμβατικοί τύποι. Η τεχνολογία κατασκευής τους είναι ευρέως διαδεδομένη και αυτό τις κάνει οικονομικότερες σε σχέση με αυτές αξονικού τύπου. Επιπλέον παρουσιάζουν μεγαλύτερη στην κλιμάκωση καθώς για μεγαλύτερη βαθμίδα ισχύος απαιτείται μόνο η αύξηση του μήκους της και όχι εντελώς νέα γεωμετρία. Χρησιμοποιούνται εκτενώς σε συστήματα προώθησης πλοίων, στην ρομποτική και στα αεροκίνητα συστήματα.

Από την άλλη πλευρά οι PMSG αξονικού τύπου παρουσιάζουν μικρότερο μέγεθος σε σύγκρισή με του ακτινωτού. Το βασικό τους πλεονέκτημα είναι ότι παρουσιάζουν μεγαλύτερη πυκνότητα ροπής πράγμα που τις κάνει ιδανικές για εφαρμογές μικρότερων σε μέγεθος εγχειρημάτων. Έχουν βρει εφαρμογή σε ανελευστήρες χωρίς ταχύτητες και σπάνια τους συναντάμε σε συστήματα προώθησης. Το βασικό τους μειονέκτημα είναι δεν είναι κατασκευασμένες με μία δομή ενός δρομέα και ενός στάτορα. Συνήθως για την καλύτερη απόδοση τους, ο δρομέας τοποθετείται ανάμεσα σε δύο στάτορες ή το αντίστροφο και αυτό προκαλεί μεγάλες δυσκολίες στην κατασκευή του. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι η κλιμάκωση στην ισχύ που παρουσιάζουν. Σε αντίθεση με τις ακτινωτού τύπου για την αύξηση της βαθμίδας ισχύος απαιτείται νέος σχεδιασμός και νέα γεωμετρία στην κατασκευή της.



Σχήμα 3.2: Κατακόρυφη και αξονική διατομή αξονικού τύπου ροής PMSG

3.2.2 Διαμήκη και εγκάρσια μηχανή

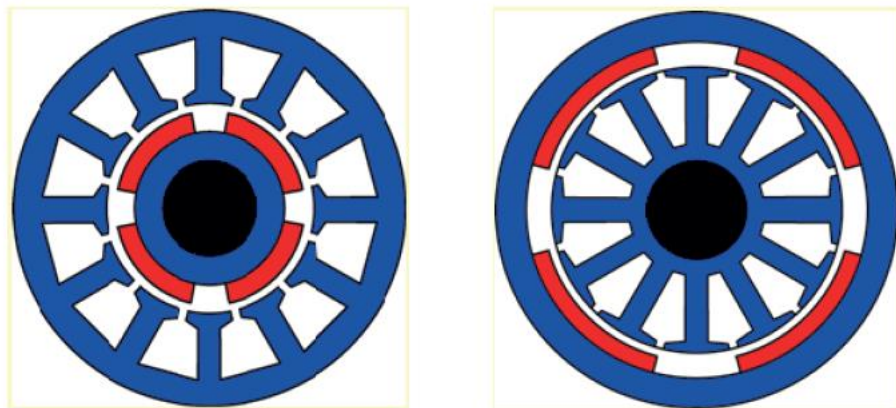
Στις Εγκάρσιες μηχανές, το πεδίο ροής είναι παράλληλο στην κατεύθυνση κίνησης του δρομέα και η χρήση αυτών των μηχανών είναι ιδανική σε εφαρμογές που απαιτείται μεγάλη πυκνότητα ροπής. Ένα δυνατό σημείο αυτού του τύπου είναι ότι φορτίο του ρεύματος και το φορτίο των μαγνητών μπορεί να ρυθμιστεί ανεξάρτητα η μία από την άλλη και χρησιμοποιούνται ευρέως σε αεροκίνητα συστήματα. Σημειώνεται ότι τα Σχήματα 3.1 και 3.2 αναφέρονται σε διαμήκη τύπου μηχανή.

Ένα από τα μειονεκτήματα των εγκάρσιων PMSG είναι ότι παρουσιάζουν μεγάλες διαρροές με αποτέλεσμα να έχουν μικρό συντελεστή ισχύος. Για να επιτευχθεί μικρότερη διαρροή, πρέπει να μειωθεί ο αριθμός των πόλων, αλλά αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της πυκνότητας της ροπής. Ο στόχος του σχεδιαστή θα πρέπει να είναι βρίσκει μια ισορροπία ανάμεσα στην διαρροή και την ροπή της μηχανής. Φυσικά με την πολυπλοκότητα κατασκευής αυτού του τύπου μηχανής αυξάνεται το κόστος τους και επειδή υπάρχουν αρκετά κινούμενα μέρη παρουσιάζεται αδυναμία μηχανικής κατασκευής.

3.2.3 Εσωτερικός και εξωτερικός δρομέας

Ο δρομέας περιστρέφεται γύρω από τον στάτορα στις μηχανές εξωτερικού τύπου. Σε αυτού του τύπου τις μηχανές οι μαγνήτες συνήθως βρίσκονται στην εσωτερική περιφέρεια του δρομέα. Πρέπει να σημειωθεί ότι για το ίδιο μήκος διαμέτρου, ο εξωτερικός δρομέας έχει μεγαλύτερη ακτίνα σε σχέση με τον στάτορα και μπορεί να εγκατασταθεί μεγαλύτερος αριθμός πόλων. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ότι παρά την φυγοκεντρική δύναμη που δέχονται, οι μαγνήτες είναι πολύ καλά σταθεροποιημένοι. Οι μηχανές εξωτερικού τύπου χρησιμοποιούνται ευρέως σε μικρές HAWT που τις περισσότερες φορές οι λεπίδες είναι απευθείας συνδεδεμένες με τον δρομέα της γεννήτριας.

Ωστόσο οι μηχανές εσωτερικού δρομέα εμφανίζονται πιο συχνά σε εφαρμογές τις αγορές σήμερα. Σε μικρές μηχανές, οι μεγαλύτερες απώλειες εμφανίζονται στον χαλκό συνεπώς και η περιέλιξη του στάτορα παρουσιάζει και την μεγαλύτερη αύξηση θερμοκρασίας της μηχανής. Καθώς όμως στον στάτορα παρουσιάζονται και οι καλύτερες συνθήκες ψύξης προτιμάτε αυτή η δομή, έναντι της περιέλιξης των μαγνητών. Έτσι έχουμε και μικρότερη αύξηση της θερμοκρασίας για τις ίδιες απώλειες. Στο Σχήμα 3.3 φαίνεται η διατομή του εσωτερικού και εξωτερικού δρομέα των PMSG.



Σχήμα 3.3: Εσωτερικός δρομέας PMSG (αριστερά) και εξωτερικός δρομέας PMSG (δεξιά)

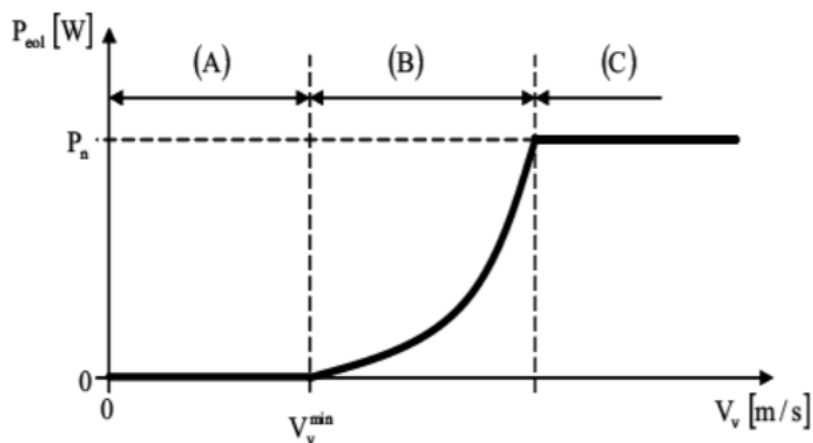
3.3 Ανάλυση Charge Controller

Σε αυτό το κομμάτι την εργασίας θα μιλήσουμε για ανάπτυξη κυκλώματος φόρτισης για ανεμογεννήτρια 400W. Όπως είναι γνωστό οι πηγές ενέργειας μπορούν χοντρικά να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τις ανανεώσιμες και μη. Στις ανανεώσιμες πηγές ανήκουν ο άνεμος, η ηλιακή ενέργεια και η υδροηλεκτρική. Όλες οι τεχνολογίες που εκμεταλλεύονται αυτού του είδους τις δυνάμεις και μετατρέπουν την εκάστοτε δύναμη σε ηλεκτρική χρειάζονται την βοήθεια ενός ελεγκτή πριν ξεκινήσει η τροφοδοσία σε κάποιο δίκτυο ή συσκευή. Ο ρόλος αυτού του ελεγκτή είναι να ελέγχει την παραγόμενη ισχύ της ανεμογεννήτριας στην προκειμένη περίπτωση και να την σταθεροποιεί προτού διανεμηθεί σε μπαταρίες για αποθήκευση ή στην τροφοδοσία κάποιου δικτύου. Αυτόν τον έλεγχο τον πραγματοποιεί ένα κύκλωμα, που ονομάζεται charge controller (κύκλωμα φορτίου). Αυτού του τύπου controllers χρησιμοποιούν ηλεκτρονικά εξαρτήματα για να ρυθμίσουν την εισερχόμενη από την γεννήτρια ισχύ και εφαρμόζουν την σωστή τάση φόρτισης ανάλογα με την μπαταρία που έχει εγκατασταθεί. Ο ιδανικός ελεγκτής μπορεί να ελέγχει την τάση της μπαταρίας και του συστήματος και να παρέχει αρκετό φορτίο για την φόρτιση της μπαταρίας. Μόλις φορτίσουν οι μπαταρίες στη μέγιστη χωρητικότητά τους ο charge controller η υπολειπόμενη τάση που παράγεται εξάγεται από το σύστημα σε μορφή θέρμανσης μέσω του dump load μέσω συσκευής MOSFET. Αυτή η περίσσια τάση μπορεί να χρησιμοποιηθεί με άλλους τρόπους όπως την φόρτιση οικιακών συσκευών, την άντληση άρδευσης κλπ.

Στο Σχήμα 3.5 παρακάτω φαίνεται όλο το σύστημα αιολικής ενέργειας το οποίο ενσωματώνει την S-VAWT που μετατρέπει την αιολική ενέργεια σε κινητική. Επίσης φαίνεται η τριφασική γεννήτρια που με την περιστροφή, η κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική, παράγοντας τριφασική έξοδο [72]. Από την ανεμογεννήτρια η τριφασική έξοδος AC τροφοδοτείται στον ελεγκτή φόρτισης ο οποίος περιέχει πλήρους κύματος ανορθωτές μετατρέποντας έτσι την εναλλασσόμενη AC τάση της τουρμπίνας σε DC συνεχή τάση κατάλληλη για την φόρτιση μπαταρίας (12-24 V). Ο ελεγκτής επίσης ανιχνεύει το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας και δίνει ένδειξη με την μορφή LED που αναβοσβήνει. Εάν η μπαταρία υπερφορτιστεί σε βαθμό πάνω από 20%, δηλαδή από 14.4 μέχρι 28.8 V ανάλογα με την μπαταρία που έχει συνδεθεί στο κύκλωμα, τότε το ρεύμα φόρτισης και η τάση θα πρέπει να εκτραπούν έτσι ώστε να αποφευχθεί ζημιά στην μπαταρία. Επομένως ο charge controller μεταφέρει την περίσσια ισχύ σε ένα Dump load. Η αποθηκευμένη ενέργεια στην συνέχεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας σε συσκευές συνεχούς ρεύματος (π.χ. DC κινητήρες) ή μπορεί να συνδεθεί η έξοδος της μπαταρίας σε έναν inverter (μετατροπέα DC to AC) και να χρησιμοποιηθεί σε φορτία εναλλασσόμενου ρεύματος όπως τηλεοράσεις, ραδιόφωνα κτλ. Βέβαια είναι σημαντικό να πούμε ότι για να αποθηκευτεί σωστά η ενέργεια που παράγεται από την ανεμογεννήτρια στην μπαταρία, ο ελεγκτής πρέπει να φέρει εις πέρας άλλη μία διαδικασία, την εξίσωση της τάσης εξόδου της γεννήτριας με αυτή της μπαταρίας. Η εναλλασσόμενη τάση που παράγεται από την ανεμογεννήτρια είναι σε μορφή φάσης, εναλλασσόμενη δηλαδή, ενώ η μπαταρία δέχεται και παράγει τάση συνεχούς ρεύματος. Έτσι λοιπόν ο ελεγκτής φορτίου είναι απαραίτητο να περιλαμβάνει και ένα κύκλωμα μετατροπέα (ανορθωτής γέφυρας) έτσι ώστε να πραγματοποιείται η μετατροπή AC της τουρμπίνας σε DC.

Είναι σημαντικό βέβαια να σημειωθεί ότι είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια την συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας και τις παραμέτρους ανάλογα με τον άνεμο. Στον παρακάτω Σχήμα 3.4 φαίνεται η καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας συναρτήσει του ανέμου. Στο πρώτο τμήμα (A) η ανεμογεννήτρια παράγει μηδενική ισχύ καθώς δεν μπορεί να επιτευχθεί περιστροφή για ταχύτητες χαμηλότερες από την V_{min} . Αν η ανεμογεννήτρια εξάγει την μέγιστη ισχύ για κάθε μεταβολή ταχύτητας ανέμου, επιτυγχάνεται κυβική αύξηση της ισχύος όπως φαίνεται στο τμήμα (B). Βέβαια μετά από ένα συγκεκριμένο όριο ταχύτητας ανέμου, επιτυγχάνεται η

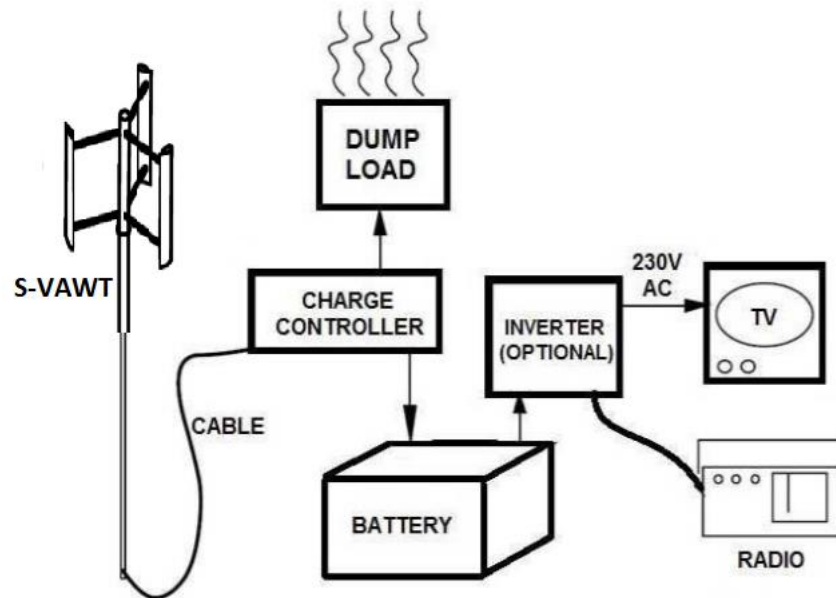
ονομαστική ισχύς της ανεμογεννήτριας (C). Πέρα από αυτό το σημείο η επιτάχυνση της περιστροφικής ταχύτητας της ανεμογεννήτριας πρέπει να σταματήσει.



Σχήμα 3.4: Καμπύλη ταχύτητας ανέμου-Ισχύς εξόδου

3.3.1 Έλεγχος τουρμπίνας ανεμογεννήτριας

Υπάρχουν περιστασιακές περιόδους δυνατού ανέμου που προκαλούν μηχανικούς περιορισμούς στα περιστρεφόμενα μέρη της ανεμογεννήτριας. Προς αποφυγή αυτής της καταστροφής, όταν οι άνεμοι είναι υψηλής έντασης, όταν οι άνεμοι έχουν δυνατή ένταση η ανεμογεννήτρια πρέπει να είναι εξοπλισμένη με ένα κύκλωμα ελέγχου. Αυτό το κύκλωμα είναι υπεύθυνο για την διαχείριση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από την ανεμογεννήτρια και φορτίζει τις μπαταρίες. Η τάση που παράγεται από την ανεμογεννήτρια είναι τριφασική για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται κύκλωμα με μία γέφυρα διόδων έτσι ώστε να έχουμε ποιοτική μετατροπή της εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή. Όταν οι μπαταρίες φορτίζονται επαρκώς η περίσσεια ενέργεια πρέπει να καταναλώνεται, προκειμένου να αποφευχθεί η καταστροφή της ανεμογεννήτριας. Το Σχήμα 3.5 δείχνει την πορεία της ηλεκτρικής ενέργειας από την ανεμογεννήτρια μέχρι την μπαταρία.



Σχήμα 3.5 Μπλοκ διάγραμμα συστήματος S-VAWT

3.3.2 Αρχή λειτουργίας του ελεγκτή

Η κυρίαρχη λειτουργία του charge controller είναι να επιτρέπει την φόρτιση της μπαταρίας ενώ παράλληλα να εμποδίζει την υπερθέρμανσή της. Μάλιστα η μπαταρία έχει ένα μέγιστο όριο φορτίου που μπορεί να δεχτεί, ορισμένο από τον κατασκευαστή. Αν η τάση της μπαταρίας ξεπεράσει αυτό το όριο, για μεγάλη χρονική διάρκεια, μπορεί να προκληθεί η καταστροφή της. Η αρχή με την οποία ο charge controller δουλεύει λοιπόν είναι η εξής: Η τάση που μετριέται στην μπαταρία ελέγχεται συνεχώς. Στην περίπτωση που η τάση ξεπεράσει το ανώτατο όριο που έχει οριστεί, υπάρχει μια αντίσταση συνδεδεμένη παράλληλα με την μπαταρία έτσι ώστε να απορροφήσει την επιπλέον ενέργεια που παράγεται από την ανεμογεννήτρια. Η αντίσταση αυτή θα πρέπει φυσικά να μπορεί να μεταβάλει την τιμή της έτσι ώστε να προσφέρει προσαρμοστικότητα και ανάμεσα στα φορτία που θα δέχεται και μεταξύ αεροτομών διαφορετικής παραγωγής.

Μία δεύτερη λειτουργία του είναι να επιτρέπει την αποφόρτιση της μπαταρίας, χωρίς όμως να επιτρέψει την ολική αποφόρτισή της. Κατά την ίδια λογική οι κατασκευαστές μπαταριών ορίζουν ένα χαμηλό κατώφλι, στο οποίο η αποφόρτιση της μπαταρίας δεν πρέπει να ξεπεράσει καθώς αν γίνει αυτό για μεγάλο χρονικό διάστημα θα προκληθεί η καταστροφή της. Ο τρόπος με τον οποίο ο charge controller εμποδίζει την αποφόρτιση να πέσει κάτω από το κατώφλι είναι ο εξής: Και σε αυτήν την περίπτωση η τάση της μπαταρίας μετριέται συνεχώς και στην περίπτωση που αυτή πέσει κάτω από το ορισμένο όριο τότε αποσυνδέεται το φορτίο από την μπαταρία.

Μία επιπλέον λειτουργία του ελεγκτή είναι να ενημερώνει τον χρήστη για τα επίπεδα φόρτισης της μπαταρία σε πραγματικό χρόνο. Αυτή η πληροφορία δίνεται συνήθως με την χρήση τριών LED: πράσινο, κίτρινο και κόκκινο. Εξάλλου εκτός από το ανώτατο όριο και χαμηλό κατώφλι, ορίζεται ένα εύρος ανάμεσα τους που αποτελεί την φυσική λειτουργία της μπαταρίας. Ο τρόπος με τον οποίο επιτυγχάνεται αυτό έχει ως εξής: Όπως έχουμε πει ήδη η τάση της μπαταρίας μετριέται συνέχεια. Στην περίπτωση που η τάση της φτάσει κοντά στο χαμηλό κατώφλι τότε ανάβει το κόκκινο LED. Αυτό αντιστοιχεί στην κατάσταση βαθιάς αποφόρτισης και όλα τα φορτία της αποσυνδέονται. Στην

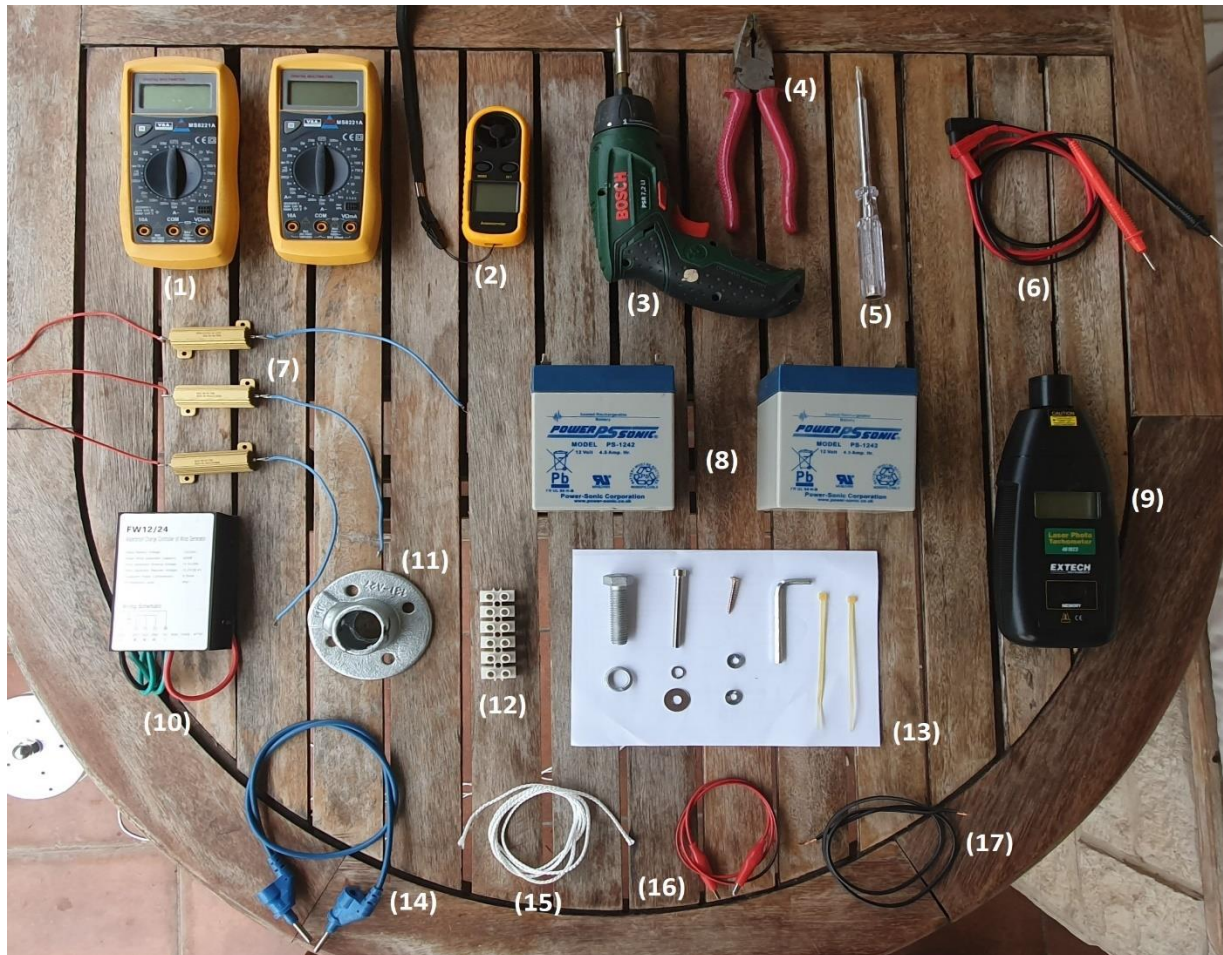
περίπτωση που η τάση είναι κοντά στο άνω όριο τότε ανάβει το πράσινο LED, αυτή θεωρείται και η φυσιολογική κατάσταση της μπαταρίας και μπορούν να συνδεθούν φορτία πάνω στην μπαταρία. Το κίτρινο LED ανάβει όταν η τάση έχει είτε ξεπεράσει το ανώτατο όριο ή έχει πέσει κάτω από το χαμηλό κατώφλι και έχει ως στόχο την ενημέρωση του χρήστη για πιθανή δυσλειτουργία.

3.4 Επίλογος

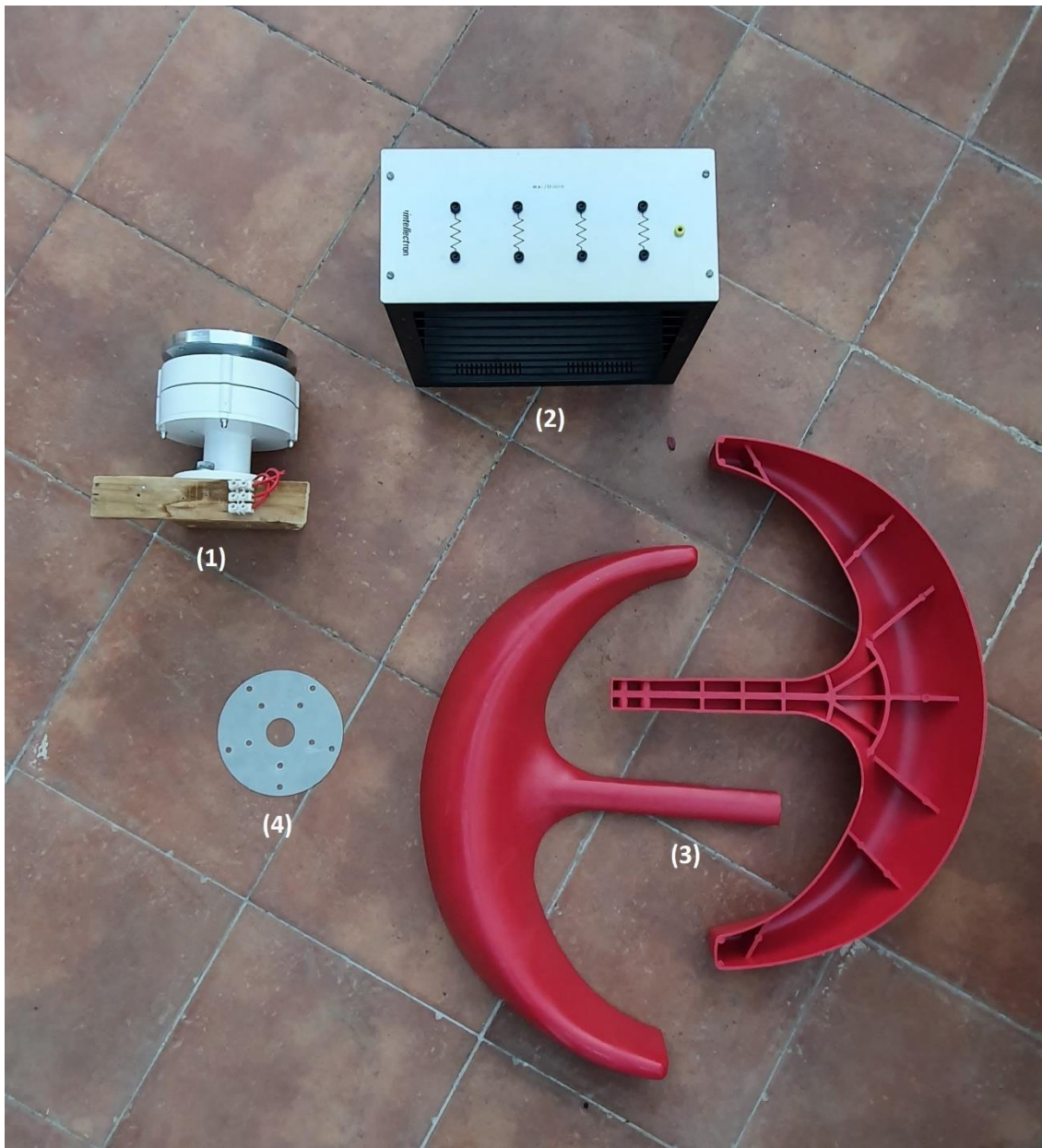
Σε αυτό το κεφάλαιο αναφερθήκαμε στην λειτουργία μια γεννήτριας και είδαμε ότι υπάρχουν δύο είδη οι επαγωγικές και οι μαγνητικές γεννήτριες. Συμπεράναμε ότι οι γεννήτριες στατικού μαγνήτη αποτελούν τις βέλτιστες για την συγκεκριμένη εφαρμογή καθώς έχουν μικρότερο κόστος κατασκευής και συντήρησης. Στην συνέχεια αναπτύξαμε τον τρόπο λειτουργίας του ελεγκτή φορτίου που είναι απαραίτητος για την κατασκευή ανεμογεννητριών καθώς προσφέρουν την δυνατότητα να μετατρέπουν την επιπλέον ενέργεια σε θερμότητα χωρίς να προκαλείται ζημιά στις μπαταρίες του συστήματος μας.

Κεφάλαιο 4ο: Μετρήσεις και σχεδίαση πτερυγίων

Εφόσον έχουμε καλύψει το βιβλιογραφικό κομμάτι της εργασίας και έχουμε αποκτήσει μια κατανόηση πάνω στον τρόπο λειτουργίας της ανεμογεννήτριας κατακόρυφου άξονα και τις έννοιες που την επηρεάζουν θα τις χρησιμοποιήσουμε για την βέλτιστη σχεδίαση και κατασκευή VAWT. Μπορούμε να χωρίσουμε την κατασκευή σε τρία κομμάτια: την βάση και στήλη στήριξης, την γεννήτρια τον ελεγκτή φορτίου και τις μπαταρίες και τέλος της αεροτομές και τους βραχίονες στήριξης. Στο τρίτο κομμάτι είναι που έγινε και η μεγαλύτερη έρευνα και σχεδιασμός καθώς αυτό είναι που επηρεάζει την βελτιστοποίηση της S-VAWT αλλά και το κομμάτι όπου απαιτείται η μεγαλύτερη προσοχή. Οι εικόνες 4.1 και 4.2 δείχνουν όλα τα εξαρτήματα και τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν.



Σχήμα 4.1: Εξαρτήματα και εργαλεία (1. πολύμετρο, 2. ανεμόμετρο, 3. βυδολόγος, 4. πένσα, 5. κατσαβίδι, 6. probe, 7. φορτίο 100Ω, 8. Μπαταρία 12V, 9. στροφόμετρο, 10. ελεγκτής φορτίου, 11. στήριγμα, 12. κλέμες, 13. βίδες, 14. καλώδιο με μπανάνες, 15. σχοινί, 16. καλώδιο με κροκοδειλάκι, 17. Καλώδιο)



Σχήμα 4.2: Εξαρτήματα λοιπά (1.γεννήτρια, 2.κουτί φορτίου 50Ω, 3.αεροτομές, 4.δίσκος στήριξης)

4.1 Βάση και στήλη στήριξης.

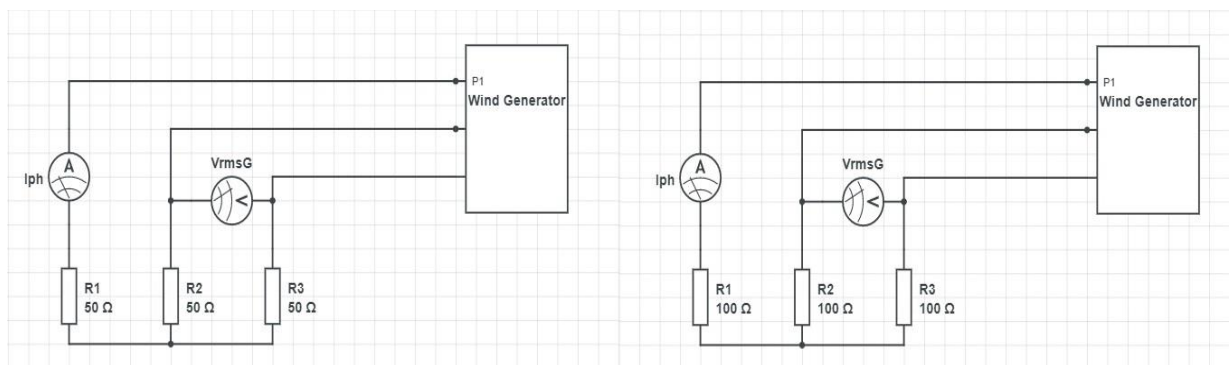
Το πρώτο βήμα ήταν η κατασκευή της βάσης στην οποία θα στηθεί η ανεμογεννήτρια. Χρησιμοποιήθηκε ξύλινη βάση και μεταλλικά στηρίγματα για την σταθερότητα της αφού η κατασκευή θα πρέπει να είναι σε θέση να αντέξει ισχυρές δυνάμεις ανέμου χωρίς να κουνιέται ή να γέρνει.. Κρίθηκε απαραίτητο να εγκατασταθούν ξάρτια έτσι ώστε να αυξηθεί η σταθερότητα της. Η βάση είναι ένα κομμάτι ξύλου 65*65 εκ. στο κέντρο του οποίου έχει τοποθετηθεί μεταλλικός σύνδεσμος. Στην βάση έχουν τοποθετηθεί δύο μπαταρίες μολυβδού 12 V συνδεδεμένες σε σειρά έτσι ώστε να έχουμε συνολικό φορτίο 24V. Τέλος στις 4 γωνίες της βάσης έχουν τοποθετηθεί βίδες τύπου Γ στις οποίες δένονται τα ξάρτια με ευκολία. Στον μεταλλικό σύνδεσμο τοποθετείται η μεταλλική στήλη στην κορυφή του οποίου θα τοποθετηθεί η γεννήτρια. Στην Σχήμα 4.3 φαίνεται πώς πραγματοποιήθηκαν οι παραπάνω διεργασίες και φαίνεται το αποτέλεσμα της κατασκευής.



Σχήμα 4.3: Βάση στήριξης ανεμογεννήτριας

4.2 Γεννήτρια και ελεγκτής φορτίου

Η γεννήτρια που επιλέχθηκε για την εφαρμογή είναι μια σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη τριών φάσεων. Πρόκειται για γεννήτρια εσωτερικού δρομέα. Για να υπολογισθεί η ισχύς της γεννήτριας τοποθετήθηκαν αντιστάσεις 50Ω/100Ω σε κάθε φάση και μετρήθηκε το ρεύμα I_{ph} σε κάθε φάση και η ενεργός τιμή της τάσης V_{rmsG} με την χρήση πολυμέτρων όπως φαίνεται στην Σχήμα 4.4 παρακάτω.



Σχήμα 4.4 Κύκλωμα γεννήτριας με φορτίο 50Ω (αριστερά) και φορτίο 100Ω (δεξιά)

Πιο συγκεκριμένα για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε ένα πολύμετρο του οποίου το θετικό άκρο ήταν συνδεδεμένο με την πρώτη φάση και το αρνητικό άκρο ήταν συνδεδεμένο με την άκρη μίας αντίστασης όπως στο παραπάνω σχήμα. Αυτό το πολύμετρο μας δίνει το ρεύμα I_{ph} της πρώτης φάσης. Αντίστοιχα με τον ίδιο τρόπο μπορούμε να το συνδέσουμε σε οποιαδήποτε άλλη φάση χωρίς να αλλάξουν τα δεδομένα καθώς και οι τρεις φάσεις παράγουν το ίδιο ρεύμα. Στην συνέχεια με την χρήση κλέμας συνδέθηκε η δεύτερη και η τρίτη αντίσταση με τις υπολειπόμενες φάσεις της γεννήτριας. Οι ελεύθερες άκρες των τριών αντιστάσεων συνδέθηκαν μεταξύ τους με την χρήση ακροδεκτών έτσι ώστε να έχουμε σύνδεση αστέρα μεταξύ τους. Ένα δεύτερο πολύμετρο χρησιμοποιήθηκε αυτή την φορά

συνδεδεμένο παράλληλα με τα θετικά άκρα των αντιστάσεων όπως φαίνεται για να μας μετρήσει την ενεργό τιμή της τάσης V_{rmsG} της γεννήτριας.

Αφού έχουν πραγματοποιηθεί οι κατάλληλες συνδέσεις τώρα θα πρέπει να μετρήσουμε την ταχύτητα του ανέμου και την στροφές ανά λεπτό της ανεμογεννήτριας. Αυτές πραγματοποιήθηκαν με την χρήση ανεμόμετρου και στροφόμετρου αντίστοιχα.

Το επόμενο βήμα είναι να αλλάξουμε τις αντιστάσεις από 50Ω , την κάθε μία αντίσταση σε 100Ω για να δούμε τι διαφορές προκύπτουν. Τέλος αφού έχουν πραγματοποιηθεί όλες οι μετρήσεις, ο τύπος που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της ισχύος είναι :

$$P = \sqrt{3} \cdot V \cdot I, \quad (4.1)$$

Και το σύνολο των μετρήσεων φαίνεται στο πίνακα 4.1

Φορτία						
	50Ω			100Ω		
V_{wind} (m/s)	RPM	I_{ph} (mA)	V_{rmsG} (V)	RPM	I_{ph} (mA)	V_{rmsG} (V)
<2,2	~	~	~	~	~	~
2,9	40-43	~	~	46-58	~	~
4,6	63-65	54,3	3,8	67-75	30,3	5,8
7,1	96-101	82,3	7,2	99-114	51,6	8,3

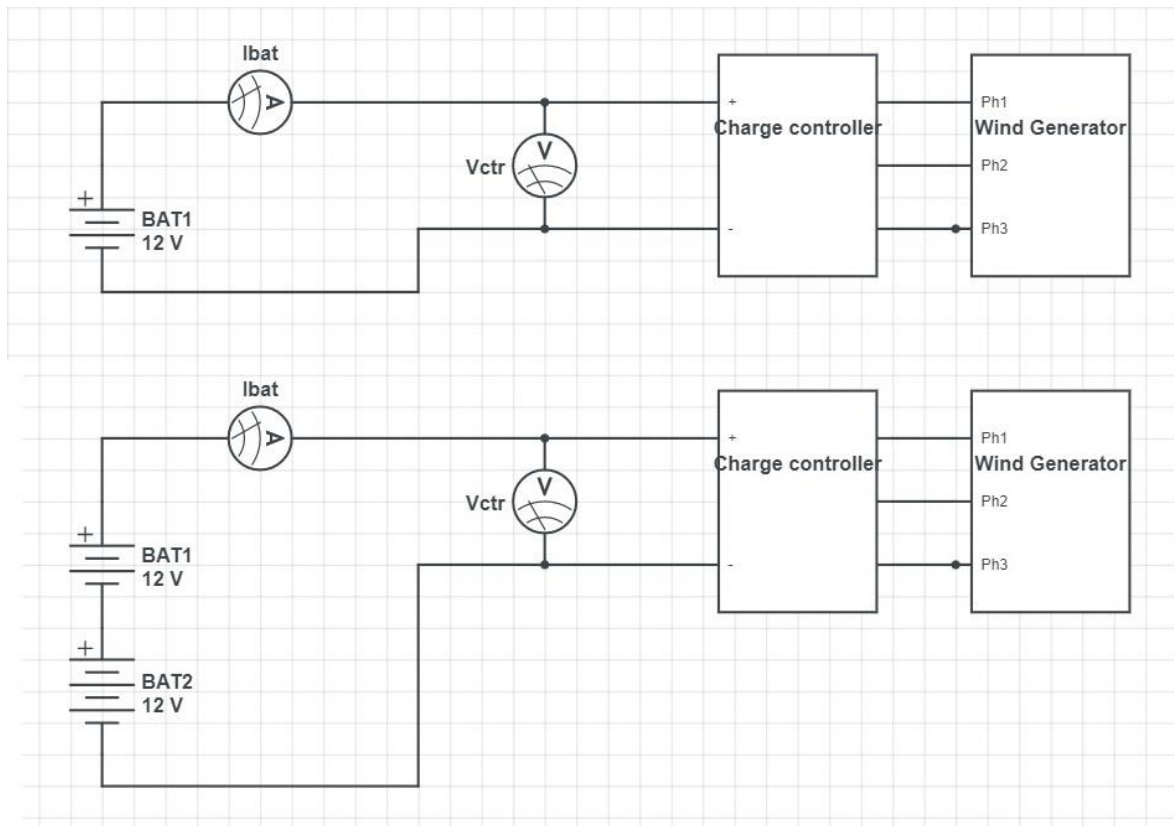
Πίνακας 4.1: Μετρήσεις RPM, ρεύματος φάσης, τάσης γεννήτριας σε συνάρτηση με την ταχύτητα του ανέμου και το φορτίο

Έχοντας πλέον τα δεδομένα από τις μετρήσεις μπορούμε να βγάλουμε τις εξής παρατηρήσεις. Υπολογίζοντας την ισχύ της γεννήτριας από τον τύπο 4.1 μπορούμε να πούμε ότι η γεννήτρια παράγει $P = 332 \text{ mW}$ με $P = 1.26 \text{ W}$ ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου. Επίσης σχετικά με την ισχύ της γεννήτριας παρατηρείτε ότι δεν παίζει ρόλο το φορτίο αφού με χαμηλότερο φορτίο έχουμε υψηλότερο ρεύμα αλλά μικρότερη τάση και αντίστροφα. Βέβαια η μεταβολή του φορτίου προκαλεί μια άλλη μεταβολή στο σύστημα, και αυτή είναι τα RPM. Παρατηρούμε ότι με μεγαλύτερο φορτίο η γεννήτρια μπορεί να περιστραφεί πιο γρήγορα που σημαίνει ότι ένα μικρότερο μπορεί να προκαλέσει μεγαλύτερη αντίσταση στην γεννήτρια και να επιβραδύνει την κυκλική της ταχύτητα. Επίσης είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι ανεξάρτητα από το φορτίο που συνδέουμε η γεννήτρια δεν μπορεί να ξεκινήσει την περιστροφή της αν δεν υπάρχει άνεμος μεγαλύτερος των $2,2 \text{ m/s}$. Βέβαια ακόμα και με ελαφρώς ταχύτερο άνεμο στα $2,9 \text{ m/s}$ το ρεύμα δεν μπορούσε να μετρηθεί με ακρίβεια και η τάση ήταν πολύ μικρή για να μετρηθεί.

Στην συνέχεια συνδέθηκε ο ελεγκτής φορτίου ο οποίος όπως αναφέραμε και στο αντίστοιχο κεφάλαιο έχει την δυνατότητα να λαμβάνει την AC τάση της γεννήτριας και να την μετατρέπει σε DC ανάλογα με το φορτίο που είναι συνδεδεμένο πάνω του. Έχει την ιδιότητα να παράγει από 12 V μέχρι 24 V και για αυτόν τον λόγο επιλέχθηκαν δύο μπαταρίες μόλυβδου $12 \text{ V}/4.5 \text{ A}$ οι οποίες μπορούν να συνδεθούν σε σειρά για να μας δώσουν 24 V .

Συγκεκριμένα οι τρεις φάσης (κόκκινα καλώδια), συνδέονται με την χρήση κλέμας με τις τρεις εισόδους του ελεγκτή (πράσινα καλώδια). Ο ελεγκτής έχει σαν έξοδο ένα κόκκινο και ένα μαύρο

καλώδιο τα οποία αντιστοιχούν στην θετική και αρνητική έξοδο του κυκλώματος, Στο θετικό άκρο θα συνδεθεί ο θετικός ακροδέκτης του πολύμετρου. Ο αρνητικός ακροδέκτης θα συνδεθεί με τον θετικό πόλο της μπαταρίας έτσι ώστε να μπορούμε να μετρήσουμε το ρεύμα της μπαταρίας. Το μαύρο καλώδιο (αρνητικό) του ελεγκτή θα συνδεθεί με τον αρνητικό πόλο της μπαταρίας για να ολοκληρωθεί το κύκλωμα. Τέλος στην κλέμα εξόδου του ελεγκτή μπορούμε να συνδέσουμε παράλληλα ένα δεύτερο πολύμετρο για να μετράμε την τάση της μπαταρίας. Η συνδεσμολογία φαίνεται στην Σχήμα 4.5, ενώ η Σχήμα 4.6 φαίνεται η πραγματική σύνδεση που πραγματοποιήθηκε.



Σχήμα 4.5: Συνδεσμολογία γεννήτριας, ελεγκτή και μπαταρίας, (μια μπαταρία πάνω, δυο μπαταρίες κάτω)



Σχήμα 4.6: Συνδεσμολογία γεννήτριας και ελεγκτή φορτίου

Όπως και πριν, αφού έχει ολοκληρωθεί η συνδεσμολογία μπορούμε να αρχίσουμε να μετράμε την ταχύτητα του ανέμου με τον ανεμόμετρο και να παρακολουθούμε της στροφές της ανεμογεννήτριας με το στροφόμετρο.

Για να έχουμε μια πιο ολοκληρωμένη Σχήμα επιλέξαμε να συνδέσουμε και μία δεύτερη μπαταρία ίδια με την πρώτη σε σειρά. Η συνδεσμολογία του κυκλώματος παραμένει ίδια με την μόνη διαφορά ότι το μαύρο καλώδιο (αρνητικό) του ελεγκτή θα συνδεθεί με τον αρνητικό πόλο της δεύτερης μπαταρίας, ενώ ο αρνητικός πόλος της πρώτης μπαταρίας θα συνδεθεί με τον θετικό πόλο της δεύτερης. Οι μετρήσεις που θα πάρουμε πλέον θα αφορούν την συνδεσμολογία με δύο μπαταρίες. Παρακάτω φαίνεται ο πίνακας των μετρήσεων που λάβαμε από την χρήση της ανεμογεννήτριας.

Μπαταρίες και ελεγκτής φορτίου						
	12V			24V		
V_{wind} (m/s)	RPM	I_{bat} (A)	V_{ctr} (V)	RPM	I_{bat} (mA)	V_{ctr} (V)
2,9-3,1	88,3	0,2	12,5	123	-21,5	25,1
4,6-5,3	143,1	1,02	12,6	173	1,4	25,2
>6	172	1,8	12,7	204	48	25,4

Πίνακας 4.2: Μετρήσεις στις μπαταρίες και στον ελεγκτή σε συνάρτηση με την ταχύτητα του ανέμου με δύο διαφορετικά φορτία.

Σύμφωνα με τις παραπάνω μετρήσεις μπορούν να βγουν τα εξής αποτελέσματα. Αρχικά όπως και στην σχεδίαση με τα φορτία, όταν έχουμε μόνο μία μπαταρία δηλαδή μικρότερο φορτίο έχουμε παρόμοιες παρατηρήσεις, δηλαδή χαμηλότερο αριθμό RPM στην ίδια ταχύτητα ανέμου, υψηλότερο ρεύμα και χαμηλότερη τάση. Από την άλλη πλευρά όταν εισάγεται και η δεύτερη μπαταρία στην σειρά τότε παρατηρούμε μεγαλύτερη κυκλική ταχύτητα δηλαδή περισσότερα RPM χαμηλότερο ρεύμα και φυσικά υψηλότερη τάση αφού οι μπαταρίες ήταν συνδεδεμένες σε σειρά.

Θα πρέπει βέβαια να αναφερθεί ότι όταν συνδέθηκε και η δεύτερη μπαταρία βλέπουμε ότι για χαμηλά rpm το ρεύμα είναι αρνητικό, που σημαίνει ότι όταν η ανεμογεννήτρια μας δεν περιστρέφεται με αρκετά μεγάλη ταχύτητα ο ελεγκτής αποφορτίζει τις μπαταρίες πράγμα μη επιθυμητό.

Είναι σημαντικό να πούμε ότι αυτές οι μετρήσεις προέκυψαν με την χρήση αεροτομών μηδενικής αεροδυναμικής μελέτης. Επρόκειτο για φτερά μεγάλο βάρους και μικρής επιφάνειας τα οποία δεν βασίζονται στο φαινόμενο του Bernoulli για την παραγωγή κινητικής ενέργειας άλλα στην απομάστευση του ανέμου που όπως έχουμε αναφέρει και στην αρχή της εργασίας δεν είναι ο πιο αποδοτικός τρόπος να εκμεταλλευτείς την αιολική ενέργεια. Στο επόμενο κεφάλαιο γίνεται λόγος και σχεδιάζεται μια αεροτομή η οποία μπορεί να εκμεταλλευτεί την ενέργεια του ανέμου σε μεγαλύτερο βαθμό και ο τρόπος επιλογής της βασίζεται στις μελέτες που έχουμε αναφέρει πιο πάνω.

4.3 Αεροτομές

Οι αεροτομές που χρησιμοποιήθηκαν για τις παραπάνω μετρήσεις φαίνονται στην Σχήμα 4.2(3) και όπως είναι ξεκάθαρο δεν έχουν καμία αεροδυναμική μελέτη ή σχεδιασμό για την βελτιστοποίηση της ανεμογεννήτριας. Για την προκειμένη εφαρμογή χρησιμοποιήθηκαν πέντε φτερά τα οποία είναι δεμένα πάνω στην γεννήτρια με την χρήση δύο βιδών όπως φαίνεται στην Σχήμα 4.7. Ένας δίσκος (Σχήμα 4.2(4)) έχει τοποθετηθεί στην πάνω πλευρά τους έτσι ώστε να προσφέρει κράτημα και να εμποδίζει τα φτερά από το να αποκτάνε κλίση. Από τις παραπάνω μετρήσεις μπορούμε να συμπεράνουμε ότι αυτά τα φτερά δεν είναι τα πιο αποδοτικά και θα πρέπει να σχεδιαστούν καλύτερου τύπου. Αυτή ακριβώς την διεργασία αναπτύσσουμε παρακάτω

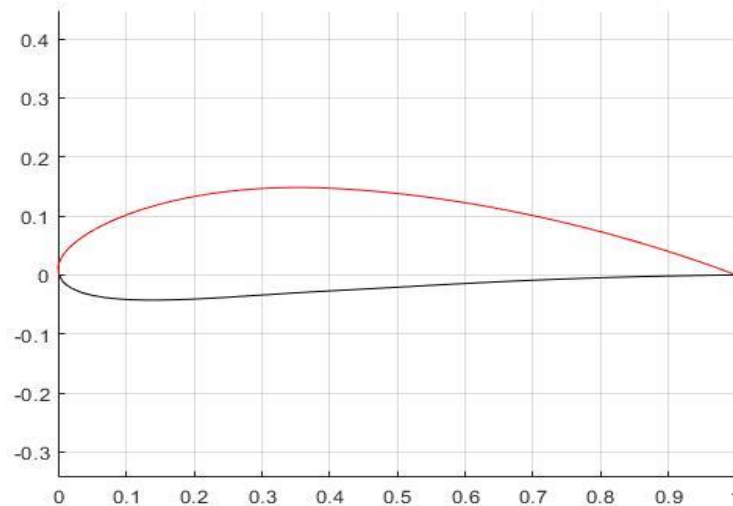


Σχήμα 4.7: Κάθετη και οριζόντια προβολή ανεμογεννήτριας με αεροτομές

Μπορούμε να συνοψίσουμε από τις πηγές μας ότι μια αεροτομή με σχετικό πάχος 18% είναι ιδανικό και προσφέρει τον μέγιστο συντελεστή ισχύος και την μεγαλύτερη δυνατότητα αυτοεκκίνησης και αποδεικνύεται επίσης ότι μια κυρτή αεροτομή με σχετική κυρτότητα 6.9% με τα κοίλα προς τα έξω με την μέγιστη κυρτότητα να βρίσκεται στο 40% του μήκους της χορδής μπορεί να επίσης να αυξήσει σημαντικά την αποδοτικότητα της S-VAWT. Επιπλέον μεγαλύτερη ακτίνα της εμπρόσθιου άκρου και σωστή σχεδίαση του πάχους του οπίσθιου άκρου βελτιστοποιούν την αποδοτικότητα της λεπίδας. Τέλος η σχετική τραχύτητα της επιφάνειας της αεροτομής παίζει σημαντικό ρόλο και μπορεί να συνεισφέρει στο δυναμικό stall.

Έχοντας αυτά στο μυαλό μας ο πιο εύκολος τρόπος να βρούμε την σωστή γεωμετρία της αεροτομής είναι να εκμεταλλευτούμε την βάση δεδομένων της NACA και θα επιλέξουμε την τετραψήφια αεροτομή NACA 6418. Το επόμενο βήμα είναι με την βοήθεια αυτού του κωδικού να υπολογίσουμε τα σημεία συντεταγμένων σε δύο διαστάσεις έτσι ώστε να σχεδιάσουμε με ακρίβεια το προφίλ της αεροτομής πριν μεταβούμε σε ειδικό λογισμικό πρόγραμμα για την σχεδίαση του τρισδιάστατου φτερού.

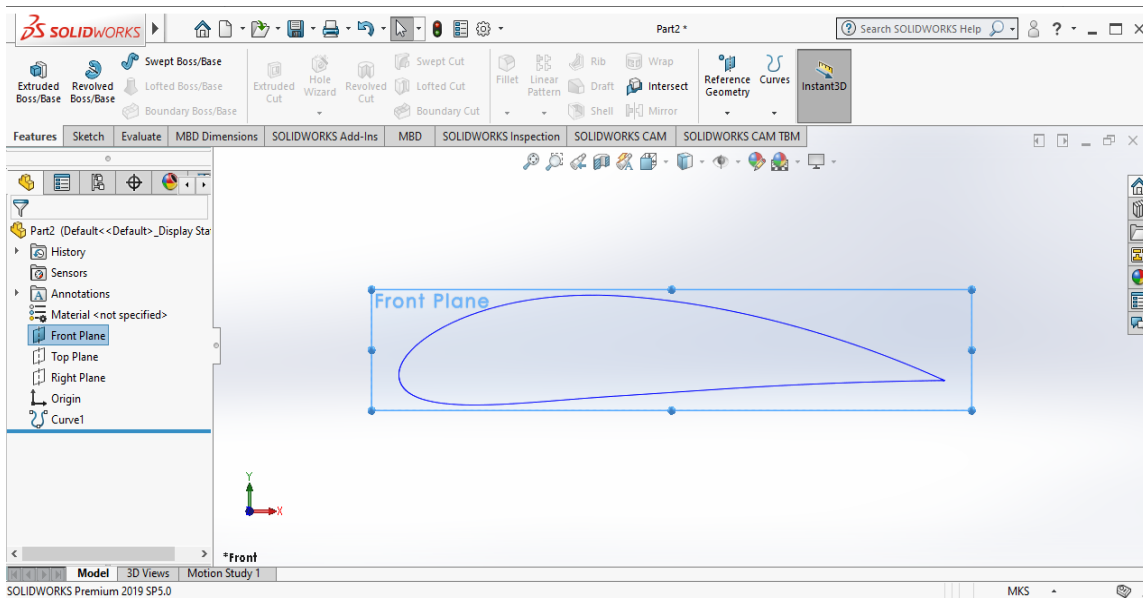
Με βάση τους τύπους που έχουμε αναφέρει στο ενότητα 2.1.2 περί μη συμμετρικών αεροτομών μπορούμε να γράψουμε ένα κώδικα ο οποίος θα μας βοηθήσει να σχεδιάσουμε με ευκολία το επιθυμητό προφίλ. Σημειώνεται ότι ο κώδικας αυτός μπορεί να σχεδιάσει το προφίλ οποιασδήποτε αεροτομής NACA τεσσάρων ψηφίων αλλάζοντας απλά τον κωδικό της στο αντίστοιχο σημείο. Ο κώδικας γράφτηκε σε MATLAB.



Σχήμα 4.8: Σχεδίαση αεροτομής NACA-6418 από MatLab

Αφού έχουμε το προφίλ της αεροτομής τώρα μπορούμε να το μεταφέρουμε στο πρόγραμμα σχεδίασης SolidWorks και να πραγματοποιηθεί η σχεδίαση της σε 3 διαστάσεις. Για να γίνει αυτό όμως με ακρίβεια θα πρέπει να μεταφέρουμε όλα τα σημεία του προφίλ υπό μορφή συντεταγμένων και αυτό γίνεται με την βοήθεια του Excel με το οποίο μπορούμε να μετατρέψουμε τις συντεταγμένες σε πίνακα. Ο πίνακας με όλες τις συντεταγμένες φαίνεται στο παράρτημα.

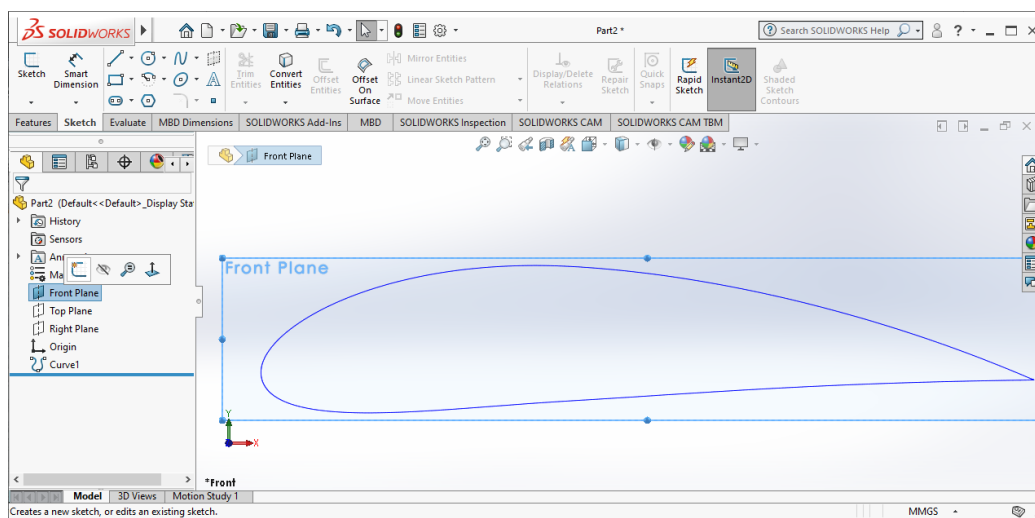
Μέσο του excel μπορούμε να μετατρέψουμε τα δεδομένα σε αριθμούς έτσι ώστε το solidworks να μπορεί να καταλάβει ότι πρόκειται για κάποια τιμή. Είναι επίσης σημαντικό να πούμε, ότι θα πρέπει να ορίσουμε το μέγεθος της αεροτομής πριν περάσουμε στο πρόγραμμα σχεδίασης. Σύμφωνα με τα συμπεράσματα που βγάλαμε από το ενότητα 2.4.2 ο κύριος παράγοντας που επηρεάζει την επιλογή της χορδής είναι ο λόγος C/R ο οποίος συμπεράναμε ότι θα πρέπει να είναι ανάμεσα στο 0,1 και 0,4, , μία μέση τιμή που μας επιτρέπει τον σχεδιασμό σχετικά μικρού μεγέθους αεροτομής. Συνεχίζοντας θα πρέπει να ορίσουμε το μήκος της ακτίνας η οποία επιλέχθηκε να είναι στο 1.5m. Έχοντας επιλέξει αυτές τις παραμέτρους μπορούμε να υπολογίσουμε ότι η χορδή θα πρέπει να έχει μήκος 0.5m.



Σχήμα 4.9: Εισαγωγή καμπύλης αεροτομής στο solidworks

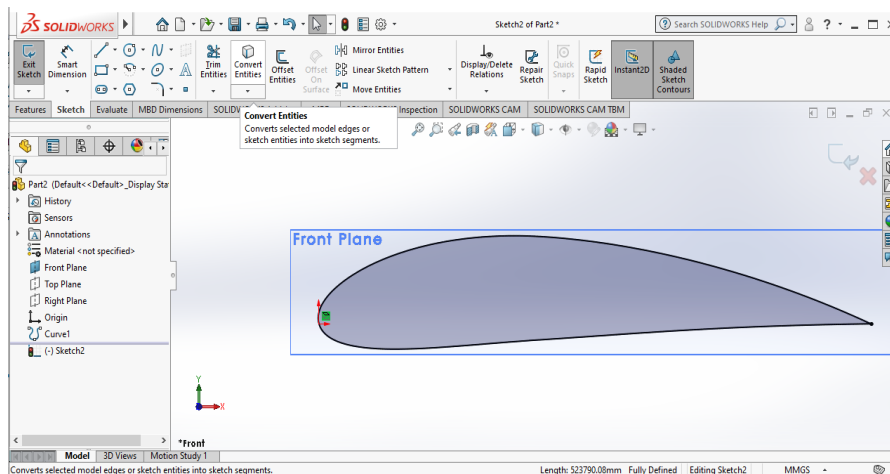
Το επόμενο βήμα είναι να μεταφέρουμε τα νέα δεδομένα στο πρόγραμμα σχεδίασης. Το solidworks έχει την δυνατότητα σχεδίασης καμπύλης εισάγοντας πίνακα συντεταγμένων XYZ. Φυσικά αφού σε αυτό το σημείο θέλουμε να σχεδιάσουμε μόνο το προφίλ της αεροτομής τα στοιχεία της στήλης Z θα είναι όλα 0. Μόλις εισάγουμε λοιπόν τον πίνακα που δημιουργήσαμε από το excel θα δούμε το ίδιο προφίλ που είδαμε και από την Matlab και φαίνεται στην Σχήμα 4.9.

Αφού έχουμε πλέον το επιθυμητό προφίλ πρέπει να σιγουρευτούμε ότι η χορδή της αεροτομής έχει μήκος 0.5m. Για να το κάνουμε αυτό θα δημιουργήσουμε ένα νέο sketch στο front plane του solidworks, όπως φαίνεται στην Σχήμα 4.10.

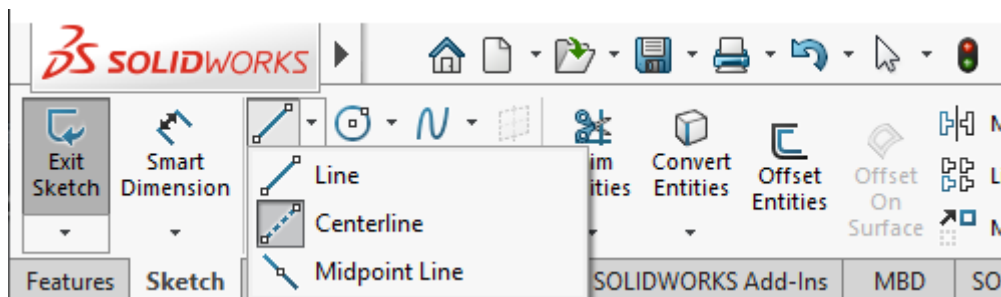


Σχήμα 4.10: Επιλογή της εντολής new sketch στο front plane

Στην συνέχεια επιλέξουμε την καμπύλη της αεροτομής και θα επιλέξουμε την εντολή convert entities η οποία θα μετατρέψει την καμπύλη σε σχήμα. Επιλέγοντας το σχήμα θα δούμε ότι υπάρχει ένας περιορισμός ο οποίος πρέπει να διαγραφεί. Στην συνέχεια θα επιλέξουμε την εντολή center line και ξεκινώντας από το πίσω άκρο φτάνουμε σε ένα σημείο στην καμπύλη που είναι κοντά αλλά όχι πάνω στο εμπρόσθιο άκρο. Στην συνέχεια σχεδιάζουμε άλλη μία γραμμή η οποία θα ξεκινάει από το δεύτερο σημείο που θα είναι εφαπτομενική στην αεροτομή. Θα παρατηρήσουμε ότι έχει δημιουργηθεί αυτόματα ένας νέος περιορισμός.

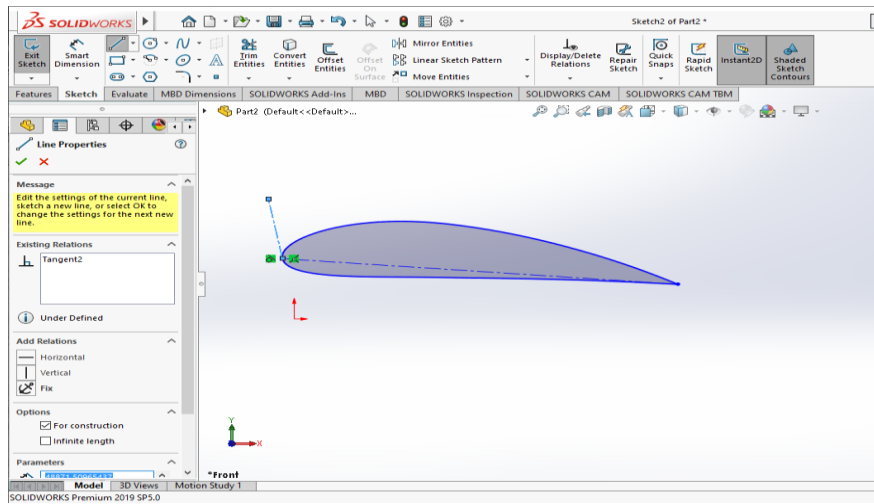


Σχήμα 4.11 : convert curve to entities

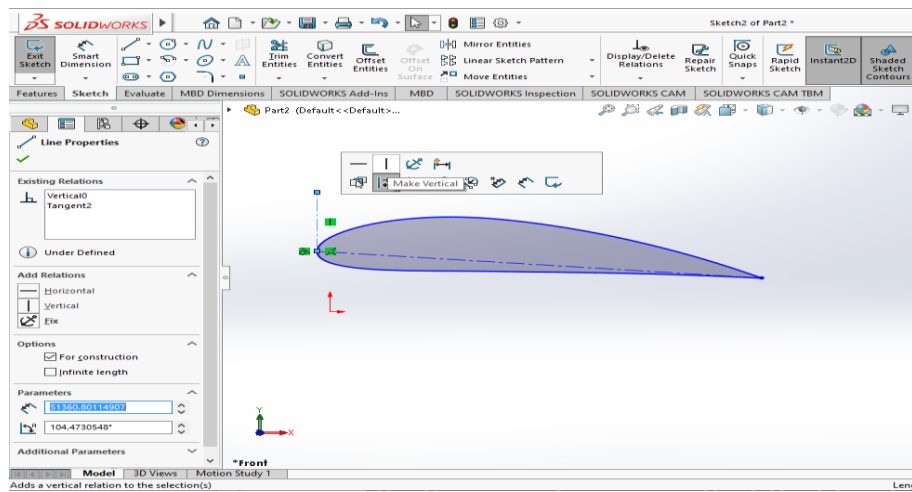


Σχήμα 4.12: Εικονίδιο επιλογής εντολής Centerline

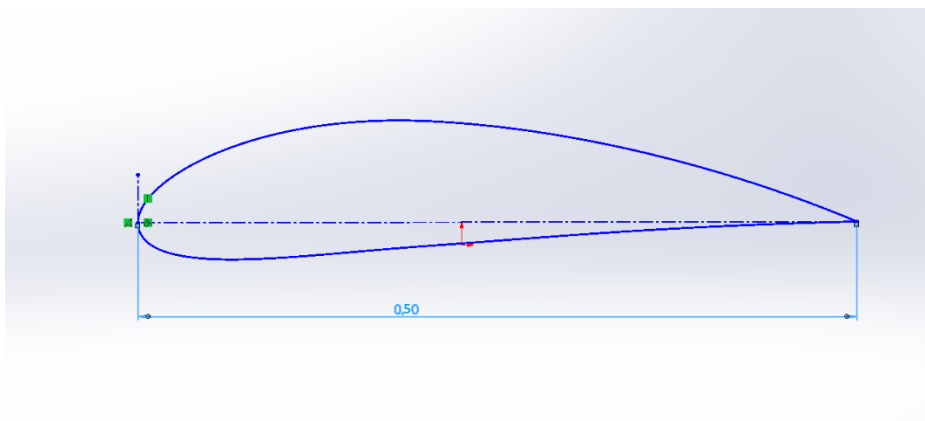
Αμέσως μετά οι δύο γραμμές που σχεδιάσαμε θα γίνουν κάθετες μεταξύ τους διαλέγοντας την επιλογή make vertical έτσι ώστε να είμαστε σίγουροι ότι το εμπρόσθιο άκρο και το πίσω άκρο συνδέονται με μία γραμμή η οποία θα μας δώσει και το μήκος της χορδής μας. Καθώς το μήκος αυτό πρέπει να είναι σταθερό καθ' όλη την διάρκεια της σχεδίασης χρησιμοποιώντας την εντολή smart dimension μπορούμε να επιλέξουμε τα άκρα της χορδής που σχεδιάσαμε και να την ρυθμίσουμε στα 0.5m



Σχήμα 4.13: Γραμμή της χορδής και εφαπτόμενη σε αυτή ευθεία

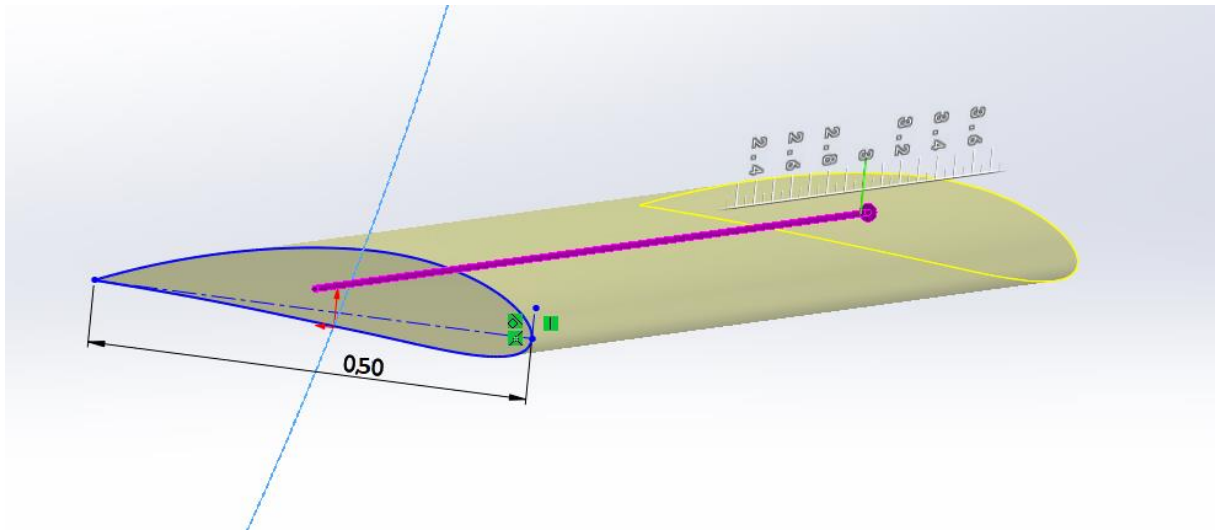


Σχήμα 4.14: Χρήση της εντολής make Vertical



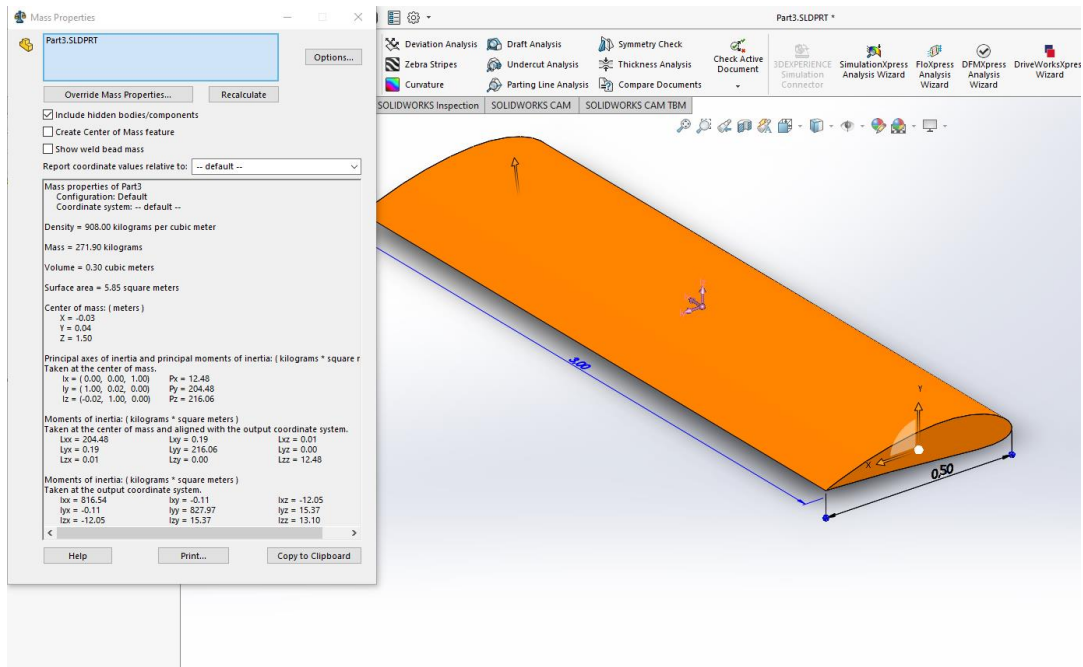
Σχήμα 4.15: Ρύθμιση του προφίλ με την χρήση του Smart Dimension στα 0.5m

Εφόσον έχει σχεδιαστεί πλήρως το προφίλ της αεροτομής βρισκόμαστε στο σημείο όπου θα το αναπτύξουμε στον τρισδιάστατο χώρο. Για να πραγματοποιηθεί αυτό το solidworks έχει την εντολή Extrude με την οποία μπορούμε να εξωθήσουμε το προφίλ σε κάτι που θυμίζει περισσότερο μία αεροτομή. Σύμφωνα με αυτά που συμπεράναμε από το ενότητα 2.4.4 το ύψος λεπίδας εξαρτάται από την ακτίνα που έχουμε ορίσει και το ιδανικό είναι να είναι 7.5 φορές μεγαλύτερη. Η ακτίνα όπως είπαμε και παραπάνω θα είναι 1.5m οπότε ιδανικά το ύψος της αεροτομής θα πρέπει να είναι περίπου 10m πράγμα αδύνατο για εφαρμογή μιας ανεμογεννήτριας μικρής κλίμακας. Έτσι επιλέχθηκε το ύψος του φτερού να είναι στα 3m. Θα προκύψει λοιπόν το εξής φτερό που φαίνεται στην Σχήμα 8:



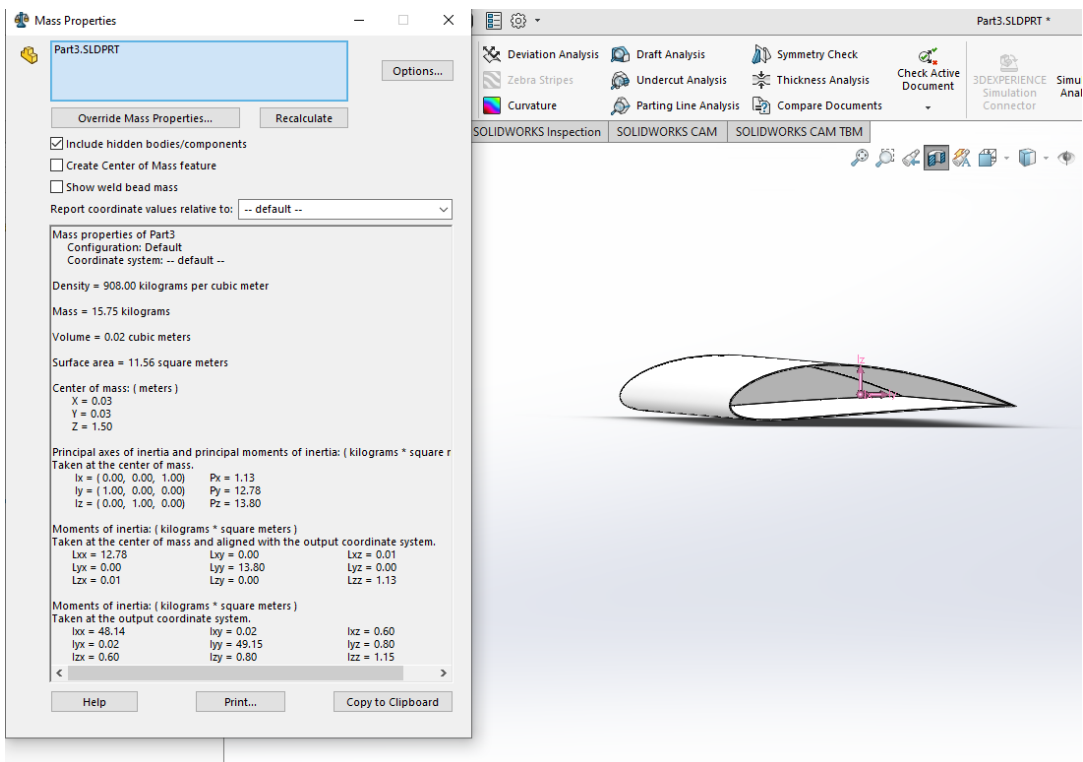
Σχήμα 4.16: Ανάπτυξη της αεροτομής στο χώρο με την εντολή Extrude στα 3m

Καθώς το βάρος παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην αδράνεια της γεννήτριας και όπως έχουμε αναφέρει και παραπάνω θέλουμε να είναι όσο το δυνατόν ελαφρύτερο. Το πρώτο πράγμα που μπορούμε να ορίσουμε είναι το είδος του υλικού. Το solidworks διαθέτει μια τεράστια λίστα από υλικά που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για την κατασκευή της αεροτομής. Υπό κανονικές συνθήκες οι αεροτομές κατασκευάζονται από composite materials τα οποία είναι πολύ ελαφριά και μπορούν να αντέξουν μεγάλες τάσεις χωρίς να παραμορφωθούν ή να καταστραφούν. Εμείς επιλέξαμε έναν τύπο πλαστικού που ονομάζεται PP film με πυκνότητα μάζας 908 kg/m^3 . Ακόμα και με ένα τόσο ελαφρύ υλικό σαν το PP film το συνολικό βάρος της αεροτομής είναι απαγορευτικό όπως φαίνεται και στην Σχήμα 4.17:



Σχήμα 4.17: Απεικόνιση των ιδιοτήτων της αεροτομής με πραγματικό υλικό

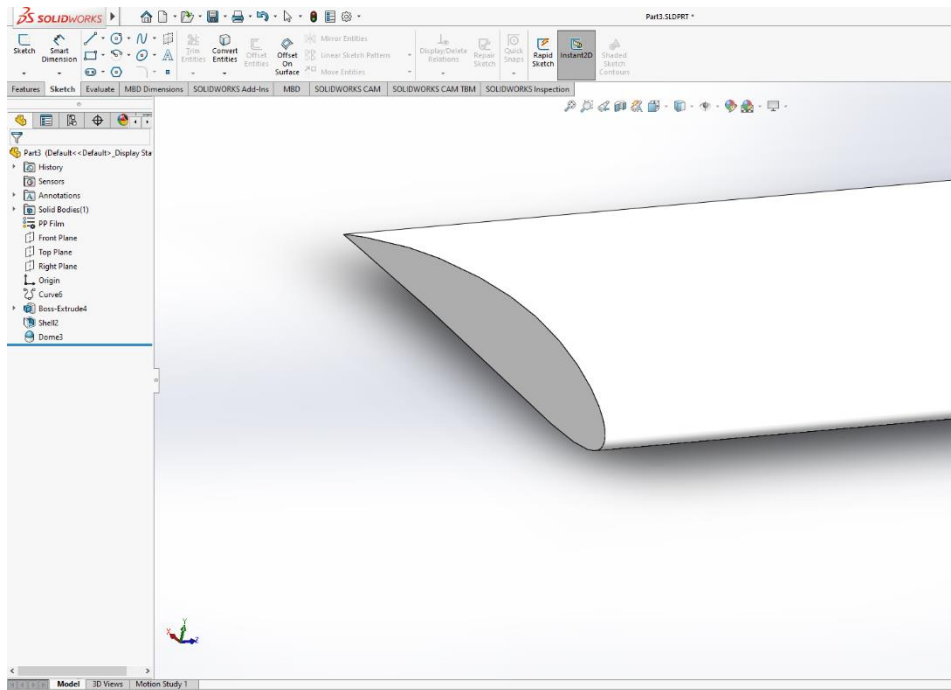
Υπάρχει όμως ένας τρόπος να το διορθώσουμε αυτό. Μπορούμε να αφαιρέσουμε υλικό από το εσωτερικό του φτερού και αυτό πραγματοποιείται με την εντολή shell. Έτσι μπορούμε να δούμε ότι τώρα το εσωτερικό της αεροτομής είναι άδειο και το βάρος της έχει μειωθεί σημαντικά και μπορούμε να το δούμε και στην Σχήμα 4.18:



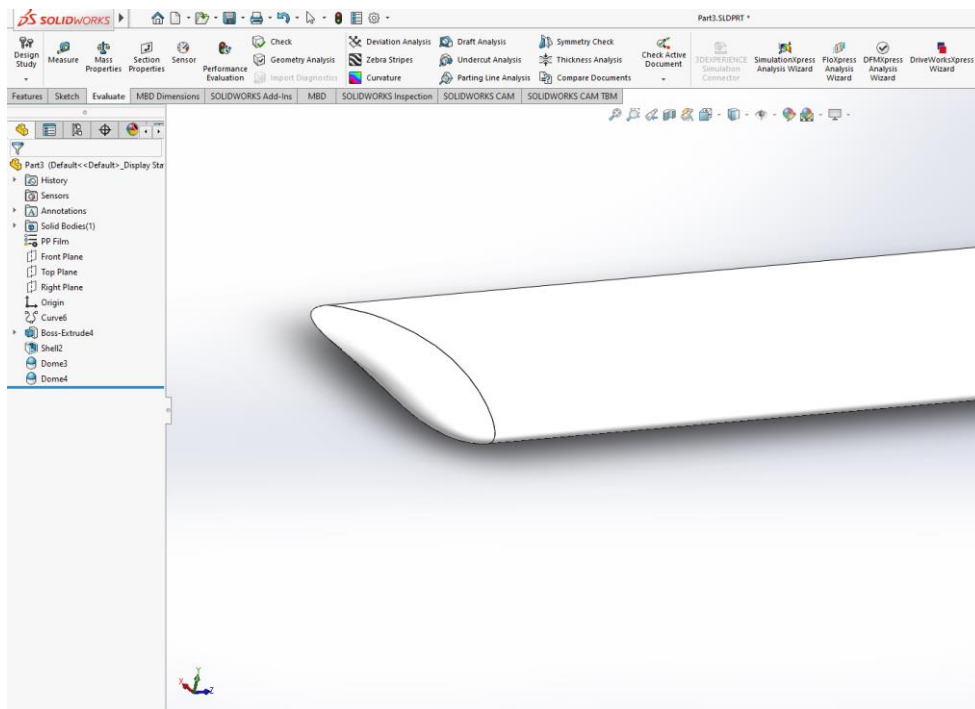
Σχήμα 4.18: Απεικόνιση νέου φτερού με πάχος 5mm χωρίς εσωτερικό.

Κεφάλαιο 4ο

Το τελευταίο κομμάτι για τον σχεδιασμό της αεροτομής είναι τα άκρα του. Αυτή την στιγμή τα άνω και κάτω άκρα δεν έχουν κανένα αεροδυναμικό σχεδιασμό όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.19. Για να το αλλάξουμε αυτό θα χρησιμοποιήσουμε μία άλλη δυνατότητα που μας δίνει το πρόγραμμα σχεδίασής μας η οποία μας επιτρέπει να κατασκευάσουμε ένα θόλο στην γεωμετρία του προφίλ της αεροτομής μας. Εισάγουμε λοιπόν το feature dome και το ρυθμίζουμε στα 0.18m και στις δύο όψεις της αεροτομής και προκύπτει η αεροτομή που φαίνεται στο σχήμα 4.20.



Σχήμα 4.19: Αεροτομή χωρίς αεροδυναμική σχεδίαση στο άκρο

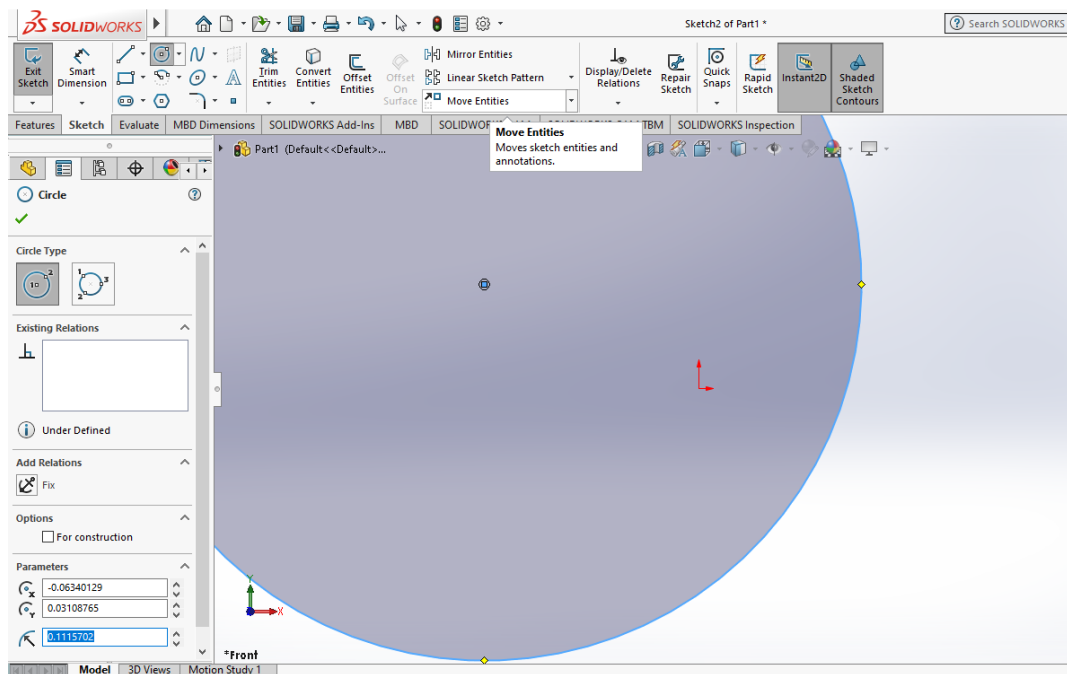


Σχήμα 4.20: Αεροτομή με την ένταξη αεροδυναμικών καμπύλων στα άκρα του

4.4 Βραχίονες στήριξης

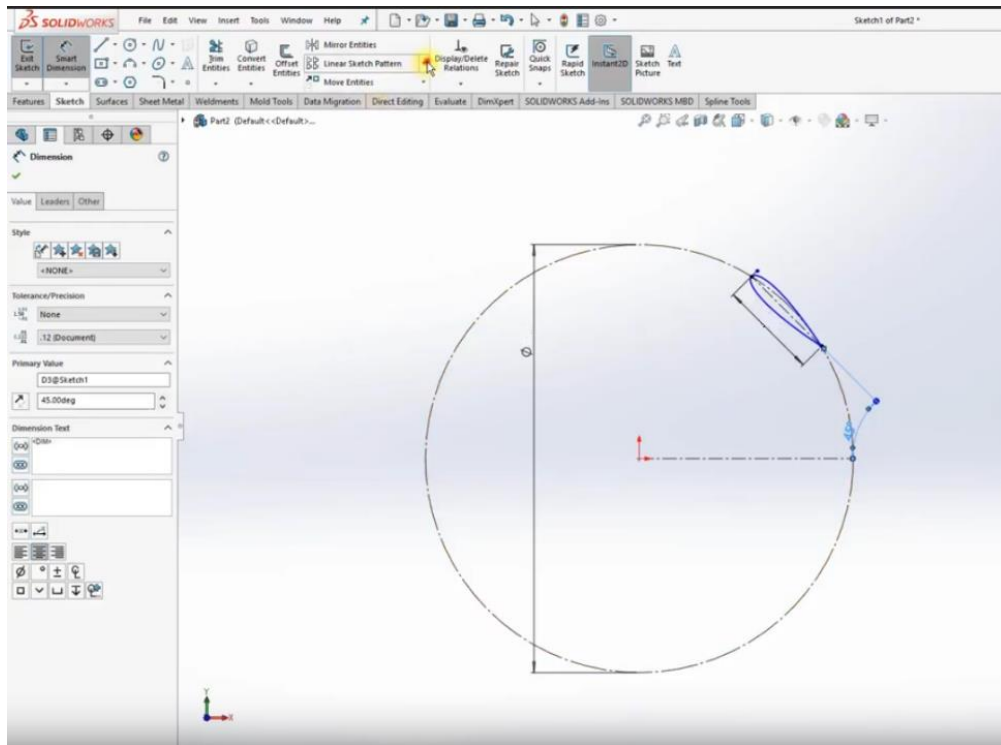
Οι βραχίονες στήριξης είναι άλλο ένα κομμάτι που θα πρέπει να σχεδιαστεί. Όπως αναφέραμε εκτενώς σε παραπάνω κεφάλαια η γεωμετρία, το μέγεθός τους, η τοποθέτησή τους σε σχέση με τα φτερά και το βάρος τους παίζουν σημαντικό ρόλο στην βελτιστοποίηση της ανεμογεννήτριας.

Το solidworks θα μας βοηθήσει να σχεδιάσουμε αυτούς τους βραχίονες με τα κριτήρια που εμείς επιλέγουμε. Ξεκινώντας από την εισαγωγή της καμπύλης όπως και πριν θα ακολουθήσουμε τα ίδια βήματα μέχρι να έχουμε το προφίλ της αεροτομής στις διαστάσεις της επιλογής μας. Στην συνέχεια από τα σχήματα που μας προσφέρει το πρόγραμμα θα επιλέξουμε τον κύκλο και θα σχεδιάσουμε έναν με την επιθυμητή ακτίνα, στην προκειμένη περίπτωση 1.5m. Είναι σημαντικό να διαλέξουμε την επιλογή for construction καθώς ο κύκλος αποτελεί απλά το σχέδιο πάνω στο οποίο θα εναποθέσουμε τις αεροτομές μας.

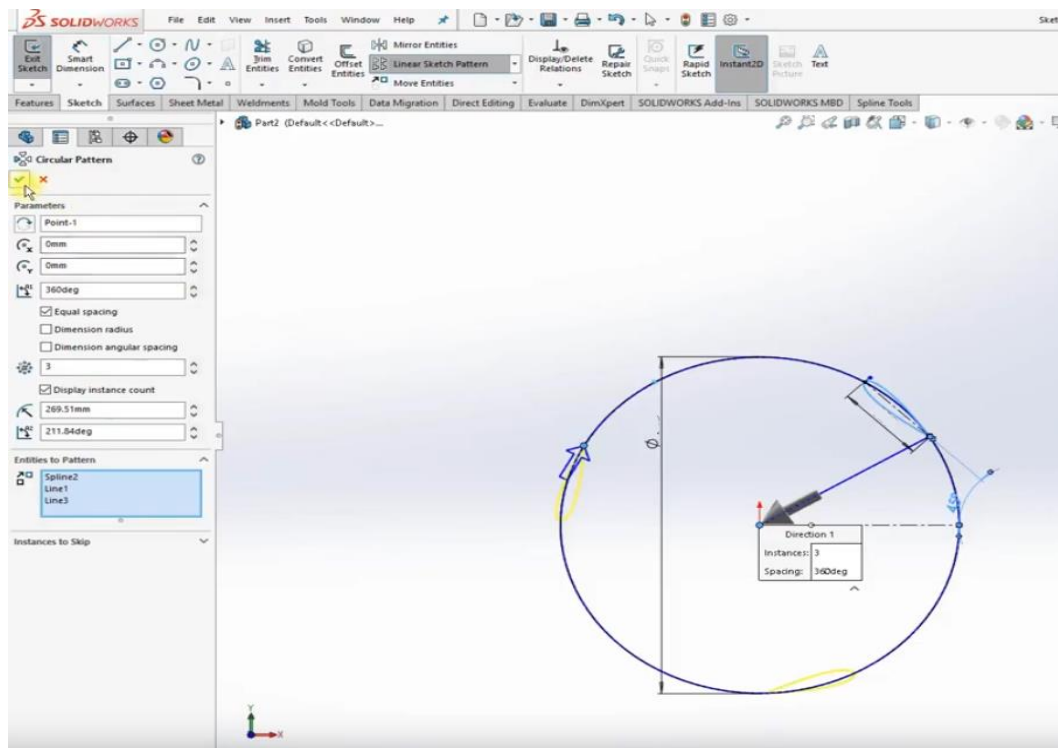


Σχήμα 4.21: Σχεδίαση κύκλου περιστροφής αεροτομών

Αφού έχουμε πλέον το προφίλ της αεροτομής και το κύκλο μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την εντολή make Coincident έτσι ώστε να το πίσω άκρο να ακουμπήσει στον κύκλο. Αντίστοιχα θα πραγματοποιηθεί και για τον εμπρόσθιο άκρο του προφίλ έτσι ώστε να έχουμε το σχέδιο της Σχήμα 4.21. Σε αυτό το σημείο μπορούμε να ρυθμίσουμε και την γωνία, ξανά με την βοήθεια του smart measurements η οποία θα είναι 45° όπως φαίνεται και στην Σχήμα 13.

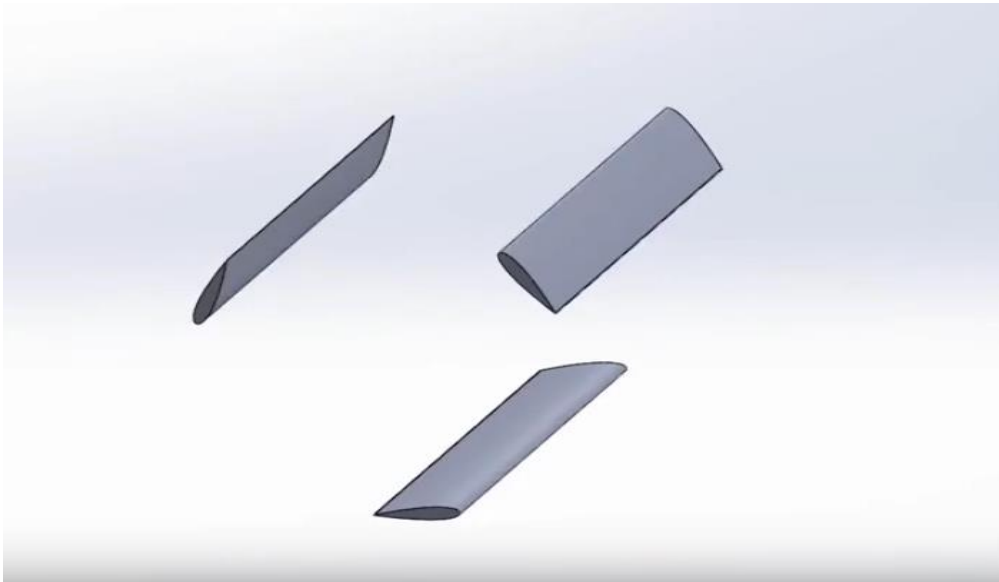


Σχήμα 4.22: Τοποθέτηση αεροτομής στην περίμετρο του κύκλου



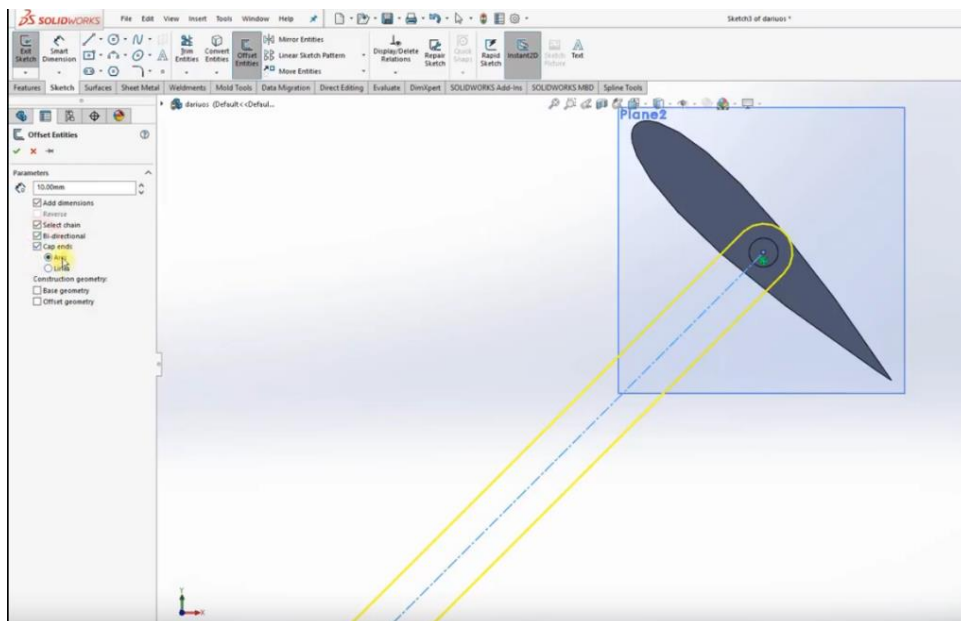
Σχήμα 4.23: Εισαγωγή των υπολοίπων αεροτομών συμμετρικά του κύκλου

Το επόμενο βήμα είναι να φτιάξουμε τις υπόλοιπες αεροτομές. Σύμφωνα με τα συμπεράσματα του ενότητα 2.4.3 περί αριθμό αεροτομών επιλέχθηκε ο αριθμός N των αεροτομών να είναι 3. Το πρόγραμμα μας δίνει την δυνατότητα να δημιουργήσουμε τις άλλες δύο αεροτομές πολύ εύκολα και με μεγάλη ακρίβεια στην τοποθέτησή τους. Αυτό πραγματοποιείται με την εντολή Linear Sketch Pattern, επιλέγοντας την αεροτομή και ρυθμίζοντας τον αριθμό των κλώνων σε 3. Έτσι με την επιλογή του extrude για τα 3 πλέον προφίλ καταλήγουμε σε ένα σχήμα όπως φαίνεται στην Σχήμα 4.23.



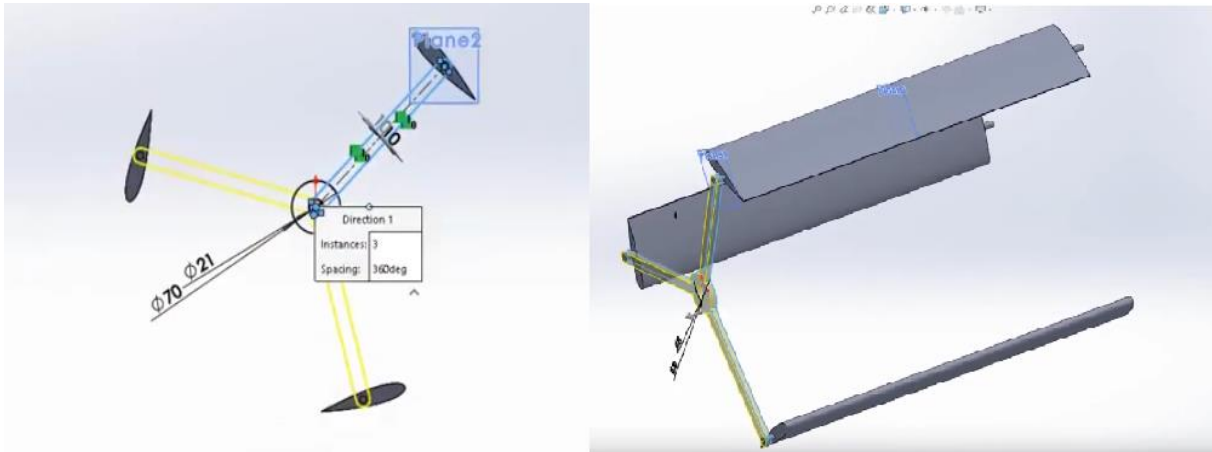
Σχήμα 4.24: Απεικόνιση τριών συμμετρικών αεροτομών

Αφού πλέον έχουμε τοποθετήσει τις 3 λεπίδες στην σωστή τους θέση πάνω στον κύκλο μπορούμε να χαράξουμε γραμμές προς το κέντρο του έτσι ώστε να σχεδιαστούν και οι βραχίονες. Πρώτα χρησιμοποιούμε centerlines για να ορίσουμε την πορεία που θα έχουν οι βραχίονες και στην συνέχεια διαλέγουμε την επιλογή offset entities και διαλέγουμε την επιλογή bi-directional και cap ends έτσι ώστε δημιουργηθεί ένα σκίτσο του βραχίονα και φαίνεται Σχήμα 4.24.



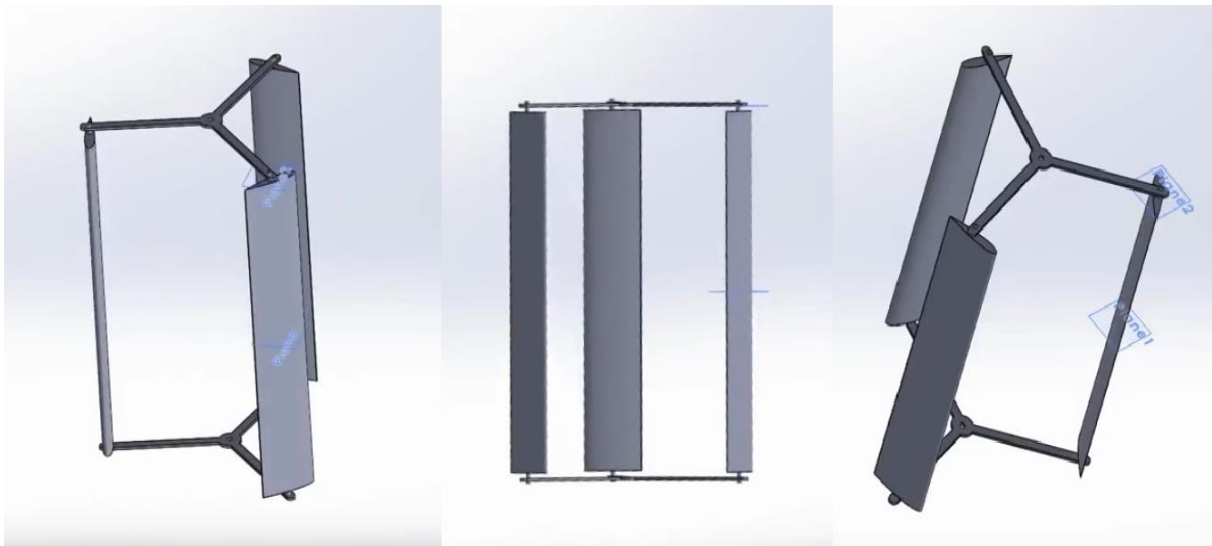
Σχήμα 4.25: Σχεδίαση βραχίονα πάνω στην αεροτομή

Φυσικά με αυτόν τον τρόπο σχεδιάζεται μόνο ένας άξονας οπότε αν επαναλάβουμε την εντολή Linear Sketch Pattern θα σχεδιαστούν τρεις βραχίονες. Τέλος όπως και σε κάθε άλλο σκίτσο το τελευταίο βήμα είναι το extrude έτσι ώστε να αναπτυχθεί σε 3 διαστάσεις.



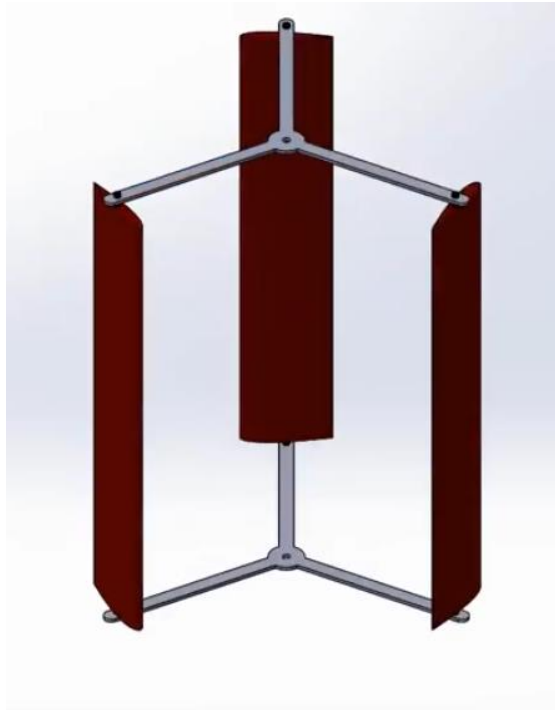
Σχήμα 4.26: Συμμετρική σχεδίαση των βραχιόνων (αριστερά) και ανάπτυξη στον χώρο (δεξιά)

Το τελευταίο βήμα είναι να κατασκευαστεί και άλλη μία σειρά βραχιόνων στήριξης που μπορεί πολύ εύκολα να γίνει επιλέγοντας την εντολή mirror που διαθέτει το solidworks έχοντας έτσι ένα τελικό αποτέλεσμα των αεροτομών με τους βραχίονες να μοιάζει κάπως έτσι Σχήμα 4.27.



Σχήμα 4.27: Τελική διαμόρφωση βραχιόνων ανεμογεννήτριας

Μέσο το solidworks μπορούμε να προχωρήσουμε άλλο ένα βήμα και να διαμορφώσουμε τον δρομέα με χρώματα έτσι ώστε να ξεχωρίζουν καλύτερα τα επιμέρους κομμάτια του όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.28



Σχήμα 4.28: Σχεδίαση δρομέα με χρώμα

4.5 Επίλογος

Το κεφάλαιο αυτό ήταν και το κομμάτι στο οποίο εφαρμόστηκε όλη η θεωρητική γνώση που συλλέξαμε και την διάρκεια της εργασίας κατασκευάστηκε ανεμογεννήτρια από υλικά μαζικής παραγωγής του εμπορίου και πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε πραγματικές συνθήκες για να δούμε την αποδοτικότητα της. Στην συνέχεια σχεδιάστηκαν νέες αεροτομές και νέος δρομέα/βραχίονες στήριξης με την χρήση λογισμικού (solidworks) οι οποίες θεωρητικά θα μπορούν να προσφέρουν την ίδια ή και μεγαλύτερη ισχύ με πολύ μικρότερο απαιτούμενο εισερχόμενο άνεμο.

Κεφάλαιο 5ο: Συμπεράσματα

Ο στόχος της προκειμένης πτυχιακής εργασίας ήταν να μελετήσουμε τον τρόπο λειτουργίας μιας ανεμογεννήτριας κατακόρυφου άξονα, καθώς και τους επιμέρους παράγοντες που παίζουν πρωταγωνιστικό ρόλο. Έγινε αγορά μιας κοινής ανεμογεννήτριας κατακόρυφου τύπου από το εμπόριο με στόχο την βελτιστοποίηση της χρησιμοποιώντας τις παραπάνω μελέτες. Για την ευκολότερη υλοποίηση του παραπάνω στόχου χωρίσαμε την κατασκευή στις αεροτομές, τον δρομέα, τους βραχίονες στήριξης, την γεννήτρια και τον ελεγκτή φορτίου. Ξεκινήσαμε με ανάλυση των αεροτομών πάνω στις οποίες πραγματοποιήθηκαν συγκριτική ανάλυση και μελετηθήκαν έρευνες που βοηθούν στην πρόβλεψη της συμπεριφοράς της. Αντίστοιχα αναπτύξαμε πτυχές των βραχιόνων στήριξης οι οποίοι δεν λαμβάνουν την απαραίτητη προσοχή παρά τον σοβαρό τους ρόλο. Έπειτα έγινε αναφορά στον βασικό τρόπο λειτουργίας της γεννήτριας και του κυκλώματος ελέγχου.

Κατά την μεθοδολογία κατασκευάσαμε την ανεμογεννήτρια και πραγματοποιήθηκαν τεστ σε πραγματικές συνθήκες με όργανα ακριβείας για ορίσουμε το εύρος της λειτουργίας της και τον βαθμό αποδοτικότητας της. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων έδειξαν ότι ενώ η γεννήτρια έχει την δυνατότητα να παράγει ικανοποιητικό ρεύμα για την φόρτιση 12V/24V, δυσκολεύτε όταν ο άνεμος δεν έχει μια σταθερή σχετική ταχύτητα μεγαλύτερη των 2.5m/s. Συμπεράναμε ότι ο κύριος λόγος αυτής της δυσκολίας ήταν η έλλειψη αεροδυναμικής σχεδίασης των αεροτομών, αλλά και το μεγάλο βάρος τους που επιβάρυναν την ικανότητα αυτοεκκίνησης της γεννήτριας.

Έτσι λοιπόν συνοψίζοντας όλα τις πηγές και τις μελέτες που έχουμε αναφέρει κατά την διάρκεια της εργασίας σχεδιάσαμε σε λογισμικό πρόγραμμα σχεδίασης (solidworks) ένα νέο σετ αεροτομών. Οι αεροτομές αυτές σχεδιάστηκαν σύμφωνα με τα πρότυπα NACA με κωδικό NACA6418 η οποία θα αποτελούσε το βέλτιστο προφίλ για την εφαρμογή. Συνεχίζοντας αναπτύχθηκε στο χώρο σε διαστάσεις μεγαλύτερης κλίμακας. Ενώ το αρχικό σχέδιο ήταν να χρησιμοποιηθεί 3D εκτυπωτής για την δημιουργία τους και στην συνέχεια να εγκατασταθούν έτσι ώστε να γίνει συγκριτική ανάλυση, το κόστος παραγωγής τους ήταν υπερβολικά μεγάλο.

Ο στόχος που επιτεύχθηκε με την εκπόνηση αυτής της εργασίας ήταν να πραγματοποιηθεί μια εκτεταμένη ανάλυση των χαρακτηριστικών μιας ανεμογεννήτριας κατακόρυφου άξονα έτσι ώστε να μειωθεί ο χρόνος σχεδίασης αεροτομών στο μέλλον από συναδέλφους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] R. Saidur, M. R. Islam, N. A. Rahim, and K. H. Solangi, “A review on global wind energy policy,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 7, pp. 1744–1762, 2010.
- [2] S. C. Pryor and R. J. Barthelmie, “Climate change impacts on wind energy: a review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 1, pp. 430–437, 2010.
- [3] S. Jaber, A. Amin, C. Clini et al., *Renewables 2011 Global Status Report*, REN21 Renewable Energy Policy Network, World watch Institute, Washington, DC, USA, 2011.
- [4] S. Eriksson, H. Bernhoff, and M. Leijon, “Evaluation of different turbine concepts for wind power,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, no. 5, pp. 1419–1434, 2008.
- [5] F. Balduzzi, A. Bianchini, E. A. Carnevale, L. Ferrari, and S. Magnani, “Feasibility analysis of a Darrieus vertical-axis wind turbine installation in the rooftop of a building,” *Applied Energy*, vol. 97, pp. 921–929, 2011.
- [6] S. Eriksson and H. Bernhoff, “Generator-damped torsional vibrations of a vertical axis wind turbine,” *Wind Engineering*, vol. 29, no. 5, pp. 449–462, 2005.
- [7] P. Deglaire, S. Engblom, O. Agren, and H. Bernhoff, “Analytical solutions for a single blade in vertical axis turbine motion in two-dimensions,” *European Journal of Mechanics B/Fluids*, vol. 28, no. 4, pp. 506–520, 2009.
- [8] T. S. Bhatti and D. P. Kothari, “Early development of modern vertical and horizontal axis wind turbines: a review,” *Wind Engineering*, vol. 29, no. 3, pp. 287–300, 2005.
- [9] S. Peace, “Wind alternatives: why not vertical axis?” *Refocus*, vol. 4, no. 3, pp. 30–33, 2003.
- [10] H. Beri and Y. Yao, “Double multiple stream tube model and numerical analysis of vertical axis wind turbine,” *Energy and Power Engineering*, vol. 3, no. 3, pp. 262–270, 2011.
- [11] I. Paraschivoiu, “Double-multiple streamtube model for Darrieus in turbines,” in *Proceedings of the 2nd DOE/NASA Wind Turbines Dynamic Workshop*, NASACP-2185, pp. 19–25, Cleveland, Ohio, USA, 1981.
- [12] D. E. Berg, “Improved double-multiple streamtube model for the Darrieus-type vertical axis wind turbine,” in *Proceedings of 6th Biennial Wind Energy Conference and Workshop*, pp. 231–238, Minneapolis, Minn, USA, 1983.
- [13] L. X. Zhang, Y. B. Liang, X. H. Liu, and J. Guo, “Effect of blade pitch angle on aerodynamic performance of straight-bladed vertical axis wind turbine,” *Journal of Central South University*, vol. 21, no. 4, pp. 1417–1427, 2014.
- [14] M. Islam, D. S.-K. Ting, and A. Fartaj, “Desirable airfoil features for smaller-capacity straight-bladed VAWT,” *Wind Engineering*, vol. 31, no. 3, pp. 165–196, 2007.
- [15] Y. X. Shang Guan, R. X. Zhou, Y. W. Gao, C. S. Xiao, and Z. X. Hao, “The effect of relative thickness of airfoil on stall separate character,” *Acta Aerodynamica Sinica*, vol. 18, supplement 1, pp. 21–26, 2000.
- [16] Y. Wang, C. Yan, and T. Zhou, “Numerical investigation of dynamic stall vortex movement of different-thickness airfoils,” *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, vol. 32, no. 2, pp. 153–157, 2006.
- [17] D. N. Gorelov, “Analogy between a flapping wing and a wind turbine with a vertical axis of revolution,” *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, vol. 50, no. 2, pp. 297–299, 2009.
- [18] B. K. Kirke and L. Lazauskas, “Enhancing the performance of vertical axis wind turbine using a simple variable pitch system,” *Wind Engineering*, vol. 15, no. 4, pp. 187–195, 1991.
- [19] M. Claessens, *The design and testing of airfoils for application in small vertical axis wind turbines* [M.S. thesis], Faculty of Aerospace Engineering, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 2006.

- [20] P. Kunz and I. Kroo, “Analysis, design, and testing of airfoils for use at ultra-low Reynolds numbers,” in *Proceedings of the Fixed and Flapping Flight at Low Reynolds Numbers*, Notre Dame, Ind, USA, 2000.
- [21] J. Sato and Y. Sunada, “Experimental research on blunt trailing-edge airfoil sections at low Reynolds numbers,” *AIAA Journal*, vol. 33, no. 11, pp. 2001–2005, 1995.
- [22] Z. Ye, Y. Jiang, and J. Wu, “Bifurcation analysis of the vibrating airfoils with large thickness at high incidences,” *Journal of Vibration Engineering*, vol. 23, no. 5, pp. 487–493, 2010.
- [23] R. Parchen, J. Bruggeman, and A. Dassen, *The Effect of Blade Thickness of Wind Turbine Blades on the Noise due to Inflow Turbulence*, Noise and Vibration Bulletin, 1997.
- [24] J. L. Loth and H. McCoy, “Optimization of Darrieus turbines with an upwind and downwind momentum model,” *Journal of Energy*, vol. 7, no. 4, pp. 313–318, 1983.
- [25] J. V. Healy, “The influence of blade camber on the output of vertical-axis wind turbines,” *Wind Engineering*, vol. 2, no. 3, pp. 146–155, 1978.
- [26] M. R. Ahmed, “Blade sections for wind turbine and tidal current turbine applications-current status and future challenges,” *International Journal of Energy Research*, vol. 36, no. 7, pp. 829–844, 2012.
- [27] B. K. Kirke, *Evaluation of self-starting vertical axis wind turbines for stand-alone applications [Ph.D. thesis]*, School of Engineering, Griffith University, Nathan, Australia, 1998.
- [28] C. Duremberg, “Unsteady aerodynamics of vertical axis wind turbines,” in *Proceedings of the 1st British Wind Energy Association Workshop*, 1979.
- [29] J. R. Baker, “Features to aid or enable self starting of fixed pitch low solidity vertical axis wind turbines,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 15, no. 1–3, pp. 369–380, 1983.
- [30] M. S. Selig, J. J. Guglielmo, A. P. Broern, and P. Giguere, “Experiments on airfoils at low Reynolds numbers,” in *Proceedings of the 34th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, Nev, USA, 1996.
- [31] F. P. Huo, Y. H. Li, and Z. Y. Chen, “Suggestions for improving wind turbines blade characteristics,” *Wind Engineering*, vol. 25, no. 2, pp. 105–113, 2001.
- [32] I. Paraschivoiu, *Wind Turbine Design: With Emphasis on Darrieus Concept*, Polytechnique International Presses, Montreal, Canada, 2002.
- [33] L. Ma, J. Chen, G. Du, and R. Cao, “Parametric research on influence of trailing edge's thickness to aerodynamic performance for wind turbine airfoils,” *Acta Energetica Solaris Sinica*, vol. 31, no. 8, pp. 1060–1067, 2010.
- [34] X. Liu, Y. Chen, and Z. Ye, “Analysis on the influence of aerodynamic performance enlarging the airfoil trailing edge thickness,” *Acta Energetica Solaris Sinica*, vol. 27, no. 5, pp. 489–495, 2006.
- [35] K. J. Standish and C. P. van Dam, “Aerodynamic analysis of blunt trailing edge airfoils,” *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 125, no. 4, pp. 479–487, 2003.
- [36] R. Yang, R. Li, S. Zhang, and D. Li, “Computational analyses on aerodynamic characteristics of flatback wind turbine airfoils,” *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 46, no. 2, pp. 106–110, 2010.
- [37] J. P. Baker, E. A. Mayda, and C. P. van Dam, “Experimental analysis of thick blunt trailing-edge wind turbine airfoils,” *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 128, no. 4, pp. 422–431, 2006.
- [38] R. Howell, N. Qin, J. Edwards, and N. Durrani, “Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine,” *Renewable Energy*, vol. 35, no. 2, pp. 412–422, 2010.
- [39] Y. Li and S. M. Calisal, “Three-dimensional effects and arm effects on modeling a vertical axis tidal current turbine,” *Renewable Energy*, vol. 35, no. 10, pp. 2325–2334, 2010.
- [40] S. J. Miley and A. Texas, *A Catalog of Low Reynolds Number Airfoil Data for Wind Turbine Applications*, Department of Aerospace Engineering, Texas A&M University, College Station, Tex, USA, 1982.

- [41] P. B. S. Lissaman, “Wind turbine airfoils and rotor wakes,” in *Wind Turbine Technology*, pp. 283–323, ASME Press, New York, NY, USA, 1994.
- [42] N. Bao and W. Ni, “Influence of additional rough strap of wind turbine airfoil leading edge surface on aerodynamic performance,” *Acta Energetica Sinica*, vol. 29, no. 12, pp. 1465–1470, 2008.
- [43] V. Kumar, M. Paraschivoiu, and I. Paraschivoiu, “Low reynoldsnumber vertical axis wind turbine for mars,” *Wind Engineering*, vol. 34, no. 4, pp. 461–476, 2010.
- [44] M. Takao, T. Maeda, Y. Kamada, M. Oki, and H. Kuma, “A straight-bladed vertical axis wind turbine with a directed guidevane row,” *Journal of Fluid Science and Technology*, vol. 3, no. 3, pp. 379–386, 2007.
- [45] L. Zhang, Y. Liang, E. Li, Y. Wei, Y. Yang, and J. Guo, “Effects analysis of solidity on aerodynamic performance of straight-bladed vertical axis wind turbine,” *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, vol. 44, no. 5, pp. 168–174, 2013.
- [46] M. Islam, A. Fartaj, and R. Carriveau, “Analysis of the design parameters related to a fixed-pitch straight-bladed vertical axis wind turbine,” *Wind Engineering*, vol. 32, no. 5, pp. 491–507, 2008.
- [47] E. Amet, T. Maître, C. Pellone, and J.-L. Achard, “2D numerical simulations of blade-vortex interaction in a darrieus turbine,” *Journal of Fluids Engineering*, vol. 131, no. 11, Article ID 111103, 15 pages, 2009.
- [48] P. G. Migliore, W. P. Wolfe, and J. B. Fanucci, “Flow curvature effects on Darrieus turbine blade aerodynamics,” *Journal of Energy*, vol. 4, no. 2, pp. 49–55, 2012.
- [49] J. L. Tangler, “The evolution of rotor and blade design,” *Tech. Rep. NREL/CP-500-28410*, 2000.
- [50] L. X. Zhang, Y. B. Liang, X. H. Liu, Q. F. Jiao, and J. Guo, “Aero-dynamic performance prediction of straight-bladed vertical axis wind turbine based on CFD,” *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 2013, Article ID 905379, 11 pages, 2013.
- [51] B. Kirke and L. Lazauskas, “Variable pitch Darrieus water turbines,” *Journal of Fluid Science and Technology*, vol. 3, no. 3, pp. 430–438, 2008.
- [52] R. C. Reuter and M. H. Worstell, “Torque ripple in a vertical axis wind turbine,” *Tech. Rep. SAND78-0577*, 1978.
- [53] F. Scheurich, *Modelling the aerodynamics of vertical-axis wind turbines [Ph.D. thesis]*, School of Engineering College of Science and Engineering, University of Glasgow, Glasgow, UK, 2011.
- [54] R. G. Dominy, P. Lunt, A. Bickerdyke, and J. Dominy, “Self-starting capability of a Darrieus turbine,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers A: Journal of Power and Energy*, vol. 221, no. 1, pp. 111–120, 2007.
- [55] J. J. Bertin and M. L. Smith, *Aerodynamics for Engineers*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA, 1989.
- [56] M. R. Castelli and E. Benini, “Effect of blade inclination angle on a darrieus wind turbine,” in *Proceedings of the ASME TurboExpo 2010: Power for Land, Sea, and Air (GT '10)*, pp. 857–869, Glasgow, UK, June 2010.
- [57] S. Mertens, G. van Kuik, and G. van Bussel, “Performance of an H-Darrieus in the skewed flow on a roof,” *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 125, no. 4, pp. 433–440, 2003.
- [58] X. Wang and K. F. McNamara, “Evaluation of CFD simulation using RANS turbulence models for building effects on pollutant dispersion,” *Environmental Fluid Mechanics*, vol. 6, no. 2, pp. 181–202, 2006.
- [59] A. Bianchini, G. Ferrara, L. Ferrari, and S. Magnani, “An improved model for the performance estimation of an H-darrieus wind turbine in skewed flow,” *Wind Engineering*, vol. 36, no. 6, pp. 667–686, 2012.
- [60] J. Johansen and N. N. Sørensen, “Numerical investigation of three Wind turbine blade tips,” *Tech. Rep. Risø-R-1353(EN)*, 2002.

- [61] E. Ferrer and X. Munduate, “Wind turbine blade tip comparison using CFD,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 75, no. 1, Article ID 012005, 2007.
- [62] J. Johansen and N. N. Sørensen, “Numerical analysis of winglet on wind turbine blades using CFD,” in *Proceedings of the European Wind Energy Conference and Exhibition (EWEC '07)*, pp. 1184–1189, Milan, Italy, May 2007.
- [63] Y. Shimizu, E. Ismaili, Y. Kamada, and T. Maeda, “Power augmentation of a HAWT by Mie-type tip vanes, considering wind tunnel flow visualisation, blade-aspect ratios and Reynolds number,” *Wind Engineering*, vol. 27, no. 3, pp. 183–194, 2003.
- [64] J. Wang, R. Jia, and K. Wu, “Numerical simulation on effect of pressure distribution of wind turbine blade with a tip vane,” *Journal of Thermal Science*, vol. 16, no. 3, pp. 203–207, 2007.
- [65] L. Zhang, J. Wang, H. Yu, Z. You, and Z. Gao, “Research on characteristics of the flow field of wind turbine with the S-type tip vane,” *Journal of Engineering Thermophysics*, vol. 33, no. 5, pp. 788–791, 2012.
- [66] J. Wang, R. Jia, and K. Wu, “Research on numerical simulation of power augmentation of a horizontal axis wind turbine with a tip vane,” *Acta Energetica Solaris Sinica*, vol. 28, no. 1, pp. 55–61, 2007.
- [67] P. C. Klimas and M. H. Worstell, *Effects of Blade Preset Pitch/Offset on Curved-Blade Darrieus Vertical Axis Wind Turbine Performance*, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, USA, 1981.
- [68] A. J. Fiedler and S. Tullis, “Blade offset and pitch effects on a high solidity vertical axis wind turbine,” *Wind Engineering*, vol. 33, no. 3, pp. 237–246, 2009.
- [69] Z. Li, K. Sun, F. Jing, and L. Zhang, “Study on the blade preset pitch of a fixed pitch vertical axis tidal turbine,” *Journal of Harbin Engineering University*, vol. 32, no. 7, pp. 853–857, 2011.
- [70] L. B. Wang, *Theoretical and experimental study on hydrodynamic performances of vertical axis Tidal turbine* [Ph.D. thesis], School of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, China, 2006.
- [71] L. Zhang, Y. Liang, Y. Wei, E. Li, and Y. Yang, “Active variable-pitch control laws for vertical axis wind turbine,” *Journal of Central South University (Science and Technology)*, vol. 44, no. 6, pp. 2561–2568, 2013.
- [72] Anthony M Gee, “Design and Assessment of battery-supercapacitor hybrid energy storage system for remote area wind power system,” Ph.D. dissertation, University of Bath, August 10th 2012.
- [73] Allen, Bob. [“NACA Airfoils”](https://naca.airfoils.org/). nasa.gov. NASA. Retrieved 27 July 2020.
- [74] E. N. Jacobs, K. E. Ward, & R. M. Pinkerton. [NACA Report No. 460, “The characteristics of 78 related airfoil sections from tests in the variable-density wind tunnel”](#). NACA, 1933.
- [75] “Fundamentals of aerodynamics”, John D. Anderson, Jr., third ed., ch. 4.
- [76] Moran, Jack (2003). [“An introduction to theoretical and computational aerodynamics”](#). Dover. p. 7. ISBN 0-486-42879-6.
- [77] [Aerospaceweb.org | Ask Us - NACA Airfoil Series](https://aerospaceweb.org/ask-us/naca-airfoil-series/)
- [78] Payne, Greg (8 Jul 1994), [“NACA 6, 7, and 8 series”](#), archived from [the original](#) on April 27, 2009
- [79] Gordon J. Leishman. *Principles of Helicopter Aerodynamics*. p. 361.
- [80] Marzocca, Pier. [“The NACA airfoil series”](#) (PDF). Clarkson University. Retrieved July 5, 2016.
- [81] E. N. Jacobs & R. M. Pinkerton 1936 Test in the variable-density wind tunnel of related airfoils having the maximum camber unusually far forward, [NACA Report No. 537](#).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Κώδικας παραγωγής προφίλ αεροτομής NACAXXXX

```
clear all;
clc;

%% Type of airfoil
typeNACA = '6418'

% Extract values from type of airfoil string
Minit = str2double(typeNACA(1));
Pinit = str2double(typeNACA(2));
Tinit = str2double(typeNACA(3:4));

% Number of grid points
gridPts = 500;

% constants
a0 = 0.2969;
a1 = -0.1260;
a2 = -0.3516;
a3 = 0.2843;
a4 = -0.1036 % closing trailing edge

%% Calculations

% Actual percentage values of airfoil properties
M = Minit/100;
P = Pinit/10;
T = Tinit/100;

% airfoil grid
x = linspace(0,1,gridPts)';

% camber and gradient
yc = ones (gridPts,1);
dyc_dx = ones(gridPts,1);
theta = ones(gridPts,1);

for i = 1:1:gridPts
    if (x(i) >= 0 && x(i) < P)

        yc(i)      = (M/P^2)*((2*P*x(i))-x(i)^2);
        dyc_dx(i) = ((2*M)/(P^2))*(P-x(i));

    elseif (x(i) >= P && x(i) < -1)

        yc(i)      = (M/(1-P)^2)*(1-(2*P)+(2*P*x(i))-(x(i)^2));
        dyc_dx(i) = ((2*M)/((1-P)^2))*(P-x(i));
    end
    theta(i) = atan(dyc_dx(i));
end
```

```

% Thickness distribution
yt = ones(gridPts,1);
for i= 1:1:gridPts
    term0 = a0*sqrt(x(i));
    term1 = a1*x(i);
    term2 = a2*x(i)^2;
    term3 = a3*x(i)^3;
    term4 = a4*x(i)^4;

    yt(i) = 5*T*(term0+term1+term2+term3+term4);
end

% Upper surface points
xu    = ones (gridPts,1);
yl    = ones (gridPts,1);

for I  = 1:1:gridPts
    xu(i) = x(i) - yt(i)*sin(theta(i));
    yu(i) = yc(i) + yt(i)*cos(theta(i));
end

% Lower surface points
xl    = ones (gridPts,1);
yl    = ones (gridPts,1);

for i = 1:1:gridPts
    xl(i) = x(i) + yt(i)*sin(theta(i));
    yl(i) = yc(i) - yt(i)*cos(theta(i));

% Plot the airfoil (with lines)
f1 = figure(1);
hold on; grid on;
axis equal;
plot(xu,yu,'r-');
plot(xl,yl,'k-')

```