



# **Ολοκληρωμένος σχεδιασμός για την κατασκευή αυτοσχέδιας ανεμογεννήτριας μικρής κλίμακας με τη χρήση σύγχρονων υπολογιστικών εργαλείων**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

του

Τσολάκη Παναγιώτη

**Επιβλέπων:**

Δρ. Δημήτριος Ζαφειράκης

Επίκουρος Καθηγητής Πα.Δ.Α

**Συνεπίβλεψη:**

Χριστόπουλος Κων/νος

Αθήνα, Μάρτιος 2024



# Ολοκληρωμένος σχεδιασμός για την κατασκευή αυτοσχέδιας ανεμογεννήτριας μικρής κλίμακας με τη χρήση σύγχρονων υπολογιστικών εργαλείων

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

του

Τσολάκη Παναγιώτη

**Επιβλέπων:**

Δρ. Δημήτριος Ζαφειράκης

Επίκουρος Καθηγητής Πα.Δ.Α

**Συνεπίβλεψη:**

Χριστόπουλος Κων/νος

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 21<sup>η</sup> Μαρτίου 2024

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....  
Δρ Ζαφειράκης Δημήτριος  
Ε.Καθηγητής Πα.Δ.Α.

.....  
Δρ Καββαδιάς Κοσμάς  
Αν. Καθηγητής Πα.Δ.Α.

.....  
Δρ Σπυρόπουλος Γεώργιος  
Ε.ΔΙ.Π Πα.Δ.Α.

Αθήνα, Μάρτιος 2024

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται στον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.

### **ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Τσολάκης Παναγιώτης του Δημητρίου, με αριθμό μητρώου 46145899 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, της Σχολής Μηχανικών, του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

**Ο Δηλών  
(Υπογραφή)**

Τσολάκης Παναγιώτης



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

*Θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στον κύριο Δημήτρη Ζαφειράκη για την στήριξη στην ολοκλήρωση της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας μου. Οι συμβουλές, η εμπειρία και η ενθάρρυνση του σε όλο αυτό το διάστημα ήταν σημαντικές. Φυσικά, η στήριξη της οικογένειας μου, της αγαπημένης μου Ουρανίας και των φίλων μου ήταν καθοριστικής σημασίας για την ολοκλήρωση αυτού του στόχου!*

*Στον πατέρα μου*

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Επιδίωξη της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο ολοκληρωμένος σχεδιασμός μίας ανεμογεννήτριας μικρής κλίμακας χρησιμοποιώντας θεωρητικά μοντέλα και σύγχρονα υπολογιστικά εργαλεία, ώστε να καταστεί εφικτή η κατασκευή της με τη χρήση τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Το σημαντικότερο και πολυπλοκότερο τμήμα μίας ανεμογεννήτριας είναι τα πτερύγια. Για τον αρχικό σχεδιασμό της κατανομής του μήκους και της συστροφής τους χρησιμοποιήθηκε η θεωρία ορμής στοιχείων με περιστρεφόμενο απόρρευμα (BEM). Μέσω αυτής της θεωρίας το πτερύγιο διαιρείται και αναλύονται μεμονωμένα η ροπή και η ώση που αναπτύσσεται σε κάθε τμήμα του. Στη συνέχεια, για τη βελτιστοποίηση του αρχικού σχεδιασμού χρησιμοποιήθηκε μία επαναληπτική μέθοδος της οποίας τα αποτελέσματα αντλήθηκαν μέσω του λογισμικού Q-blade. Τέλος, με τη χρήση των λογισμικών SolidWorks και Orcaslicer έγινε η σχεδίαση και η διαμόρφωση για την τελική εκτύπωση τους.

**Λέξεις κλειδιά:** Μέθοδος BEM, Q-blade, SolidWorks, Orca Slicer, Τρισδιάστατη εκτύπωση.

## **Abstract**

The objective of this thesis is the integrated design of a small-scale wind turbine using theoretical models and modern computational tools, aiming to enable its construction through three-dimensional printing.

The most important and complex part of a wind turbine is the blades. For the initial design of their length and twist distribution, the Blade Element Momentum (BEM) theory was utilized. Through this theory, the blade is divided, and individual sections are analyzed for the torque and thrust developed in each segment. Subsequently, an iterative method was employed to optimize the initial design. The results of this optimization were obtained using the Q-blade software. Finally, utilizing SolidWorks and Orca Slicer software, the design and shaping for their final printing were achieved.

**Keywords:** BEM Method, Q-blade, SolidWorks, Orca Slicer, 3D printing.





## Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή .....	14
1.1 Γενικά.....	14
1.2 Δομή διπλωματικής εργασίας .....	14
<b>Κεφάλαιο 1. Αιολική ενέργεια και αεροδυναμικά χαρακτηριστικά αεροτομών .....</b>	<b>15</b>
Ενέργεια και ισχύς ανέμου.....	15
1.2 Δυνάμεις και Ροπές αεροτομών.....	16
1.3 Αεροδυναμικοί συντελεστές .....	18
i. Συντελεστής Πίεσης $C_p$ (“Pressure Coefficient”) .....	18
ii. Συντελεστής Άντωσης $C_l$ (“Lift Coefficient”) .....	19
iii. Συντελεστής Αντίστασης $C_d$ (“Drag Coefficient”) .....	20
iv. Συντελεστής Ροπής Πρόνευσης $C_m$ (“Pitching Moment Coefficient”).....	22
<b>Κεφάλαιο 2. Ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα .....</b>	<b>23</b>
2.1 Αρχή λειτουργίας.....	23
2.2 Διαφοροποίηση ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα .....	23
i. Πτερύγια και πύργος στήριξης .....	24
ii. Συστήματα μετάδοσης κίνησης.....	25
iii. Σύστημα προσανεμισμού (yaw system) .....	27
v. Σχεδιασμός $\lambda$ και $\sigma$ .....	28
vi. Πλήμνη.....	28
vii. Πύργος στήριξης .....	29
<b>Κεφάλαιο 3. Θεωρητικά μοντέλα υπολογισμού ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα.....</b>	<b>30</b>
3.1 Θεωρία αξονικής ορμής (Rankine- Froude) .....	30
i. Αρχή Διατήρησης Μάζας.....	32
ii. Αρχή Διατήρησης Γραμμικής Ορμής .....	32
iii. Ενεργειακός Ισολογισμός .....	32
3.1.2 Συντελεστής αξονικής επαγωγής (Axial interference factor) .....	33
3.1.3 Συντελεστής Ισχύος $CP$ (Power Coefficient) .....	34
3.2 Γενική θεωρία ορμής με περιστρεφόμενο απόρρευμα.....	36
<b>Κεφάλαιο 4. Θεωρία Ορμής Στοιχείων Πτερύγωσης (Blade Element Momentum Theory, BEM) .....</b>	<b>40</b>
4.1 Θεωρία Ορμής (Momentum Theory).....	41
4.2 Θεωρία Ορμής Στοιχείων Πτερύγωσης (Blade Element Theory) .....	41
4.3 Θεωρία Ορμής Στοιχείων Πτερύγωσης με περιστρεφόμενο απόρρευμα .....	44
4.4 Μέθοδοι επίλυσης .....	45
4.5 Συντελεστής ισχύος $CP$ .....	46

4.6 Απώλεια ακροπτερυγίου (Tip Loss).....	46
4.7 Συνθήκες εκτός σχεδιασμού.....	48
4.8 Απώλεια στήριξης (stall).....	48
4.9 Τυρβώδεις συνθήκες ανέμου.....	48
<b>Κεφάλαιο 5 Υπολογιστική σχεδίαση ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα.....</b>	<b>49</b>
5.1 Ταχύτητα σχεδίασης και ονομαστική ταχύτητα ανέμου.....	49
5.2 Σχεδιασμός ταχύτητας ρότορα και <i>TSR</i> .....	50
5.3 Σχεδιασμός αεροτομής και γωνίας προσβολής.....	51
5.4 Μέθοδος Viterna.....	53
5.5 Πρωταρχικός σχεδιασμός σχήματος πτερυγίου.....	55
5.6. Ανάλυση απόδοσης ανεμογεννήτριας.....	58
<b>Κεφάλαιο 6. Σχεδιασμός και κατασκευή με τρισδιάστατη εκτύπωση.....</b>	<b>62</b>
6.1 Τρισδιάστατη εκτύπωση.....	62
6.2 Πολυγαλακτικό οξύ PLA.....	63
6.3 Εκτυπωτής Adventurer 5M Pro.....	64
6.4 Σχεδιασμός πτερυγίων με τη χρήση λογισμικού SolidWorks.....	65
6.5 Λογισμικό Orca Slicer.....	66
6.6 Σχεδιαστικοί παράμετροι και περιορισμοί.....	67
<b>Κεφάλαιο 7. Συμπεράσματα και προτάσεις.....</b>	<b>69</b>
7.1 Συμπεράσματα.....	69
7.2 Προτάσεις.....	70
<b>Κεφάλαιο 8 Βιβλιογραφικές παραπομπές.....</b>	<b>71</b>

## Κατάλογος Εικόνων

<b>Εικόνα 2.1:</b> Προσήνεμη ανεμογεννήτρια.....	24
<b>Εικόνα 2.2:</b> Υπήνεμη ανεμογεννήτρια. ....	25
<b>Εικόνα 2.3:</b> Σχηματική αναπαράσταση γεννήτριας DC σε ανεμογεννήτρια.....	26
<b>Εικόνα 2.4:</b> Ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας με επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας (DFIG) ελεγχόμενη με μετατροπέα ισχύος μερικής κλίμακας.....	27
<b>Εικόνα 2.5:</b> Ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας με σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη (PMGS) ελεγχόμενη με μετατροπέα ισχύος πλήρους κλίμακας. ....	27
<b>Εικόνα 2.6:</b> Α) Προσήνεμη ανεμογεννήτρια με ενεργό σύστημα προσανεμισμού, Β) Προσήνεμη ανεμογεννήτρια με παθητικό σύστημα προσανεμισμού και Γ) Υπήνεμη ανεμογεννήτρια με παθητικό σύστημα προσανεμισμού. ....	28
<b>Εικόνα 2.7:</b> Μηχανισμός ταλάντευσης διπτέρυγης ανεμογεννήτριας. ....	29
<b>Εικόνα 2.8:</b> Αύξηση του ύψους ανεμογεννητριών από Το 1980 έως Το 2011.....	30
<b>Εικόνα 6.1:</b> Εκτυπωτής Flashforge Adventurer 5m Pro.....	64
<b>Εικόνα 6.2:</b> Τρισδιάστατη απεικόνιση πλήμνης με το λογισμικό Orca Slicer.....	68
<b>Εικόνα 6.3:</b> Τρισδιάστατη απεικόνιση πλήμνης με το λογισμικό Orca Slicer.....	68
<b>Εικόνα 6.4:</b> Εκτυπωμένο πτερύγιο και βάση στήριξης. ....	69

## Κατάλογος Διαγραμμάτων

<b>Διαγραμμα 1.1:</b> Συντελεστής πίεσης γύρω από την επιφάνεια αεροτομής.....	19
<b>Διαγραμμα 1.2:</b> Τυπική μεταβολή του συντελεστή $C_l$ συναρτήσει της γωνίας προσβολής ( $\alpha$ ). .....	20
<b>Διαγραμμα 1.3:</b> Μεταβολή του $C_d$ συναρτήσει της γωνίας προβολής ( $\alpha$ ). ....	21
<b>Διαγραμμα 1.4:</b> Παράδειγμα μεταβολής $C_d - C_l$ ("drag polar") σε μία αεροτομή.....	21
<b>Διαγραμμα 1.5:</b> Παράδειγμα μεταβολής του λόγου άντωσης και αντίστασης ( $l/d$ ) συναρτήσει της γωνίας προσβολής ( $\alpha$ )......	22
<b>Διαγραμμα 1.6:</b> Μεταβολή συντελεστή $C_m$ συναρτήσει της γωνίας προσβολής σε μη-συμμετρική αεροτομή.....	23
<b>Διαγραμμα 3.1:</b> Καμπύλη $C_p$ και $C_t$ συναρτήσει του $\alpha$ . ....	35
<b>Διαγραμμα 3.2:</b> Μέγιστος θεωρητικός $C_p$ ως συνάρτηση του $\lambda$ για ιδανική ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα με ή χωρίς απόρρευμα περιστροφής.....	40

<b>Διαγραμμα 4.1:</b> Μέθοδος γραφικής επίλυσης δύο διαστάσεων του συντελεστή άντωσης $C_l$ συναρτήσει της γωνίας προσβολής $\alpha$ .	45
<b>Διαγραμμα 4.2:</b> Καμπύλη συντελεστή $C_l$ συναρτήσει της γωνίας προσβολής $\alpha$ με πολλαπλές λύσεις.	48
<b>Διαγραμμα 4.3:</b> Μεταβολή του $C_t$ συναρτήσει των συνθηκών ανέμου.	48
<b>Διαγραμμα 5.1:</b> TSR συναρτήσει της ταχύτητας ανέμου $u$ .	50
<b>Διαγραμμα 5.2:</b> Μεταβολή συντελεστή $C_l$ συναρτήσει της γωνίας $\alpha$ για $re=100.000$ .	52
<b>Διαγραμμα 5.3:</b> Μεταβολή συντελεστή $C_d$ συναρτήσει της γωνίας $\alpha$ για $re=100.000$ .	52
<b>Διαγραμμα 5.4:</b> Μεταβολή του λόγου $C_l/C_d$ συναρτήσει της γωνίας $\alpha$ για $re=100.000$ .	53
<b>Διαγραμμα 5.5:</b> Συντελεστές $C_l$ και $C_d$ σε πλήρες εύρος $360^\circ$ γωνίας προσβολής με τη μέθοδο Viterna.	54
<b>Διαγραμμα 5.6:</b> Κατανομή μήκους χορδής αρχικής σχεδίασης.	56
<b>Διαγραμμα 5.7:</b> Κατανομή συστροφής πτερυγίου αρχικής σχεδίασης.	57
<b>Διαγραμμα 5.8:</b> Κατανομή μήκους με τη μέθοδο θεωρίας βέλτιστου ρότορα και με τη χρήση λογισμικού Q-blade.	60
<b>Διαγραμμα 5.9:</b> Κατανομή συστροφής με τη θεωρία βέλτιστου ρότορα και το λογισμικό Q-blade.	60
<b>Διαγραμμα 5.10:</b> Συντελεστής ισχύος $C_p$ συναρτήσει του λόγου ταχύτητας $\lambda$ .	61

## Κατάλογος Σχημάτων

<b>Σχημα 1.1:</b> Πιέσεις και διατμητικές τάσεις κατά μήκος της επιφάνειας της αεροτομής.	17
<b>Σχημα 1.2:</b> (α) Ισοδύναμη ανάλυση πίεσης ( $r$ ) και διατμητικής τάσης ( $m$ ), και (β) κάθετη ( $l$ ) και παράλληλη ( $d$ ) συνιστώσα της δύναμης $r$ .	17
<b>Σχημα 1.3:</b> Κατανομή πίεσης στην άνω και κάτω επιφάνεια της αεροτομής.	18
<b>Σχημα 2.1:</b> Κινήσεις πτερυγίου κατά το διαμήκη και παράλληλο άξονα του.	29
<b>Σχημα 3.1:</b> Πεδίο ροής ανεμογεννήτριας ( $\alpha$ ) και ( $\beta$ ) δίσκου ενέργειας.	31
<b>Σχημα 3.2:</b> Μοντέλο δίσκου ενέργειας ανεμογεννήτριας με μέση ταχύτητα ανέμου ( $u$ ).	31
<b>Σχημα 3.3:</b> Μοντέλο ροϊκού σωλήνα με δημιουργία απορρεύματος κατάντη του ρότορα.	36
<b>Σχημα 3.4:</b> Γεωμετρική ανάλυση ρότορα, όπου $u$ η ταχύτητα της αδιάταρακτης ροής, $\alpha$ ο συντελεστής αξονικής επαγωγής και $r$ η ακτίνα.	37
<b>Σχημα 4.1:</b> Σχηματική αναπαράσταση πτερυγίου χωρισμένου σε $n$ τμήματα.	42
<b>Σχημα 4.2:</b> Ανάλυση γεωμετρίας πτερυγίου ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα.	42
<b>Σχημα 5.1:</b> Αεροτομή ε387.	51

<b>Σχημα 5.2:</b> Απεικόνιση πτερυγίου μέσω του λογισμικού q-blade.....	61
<b>Σχημα 6.1:</b> Πλημνη ανεμογεννητριας. ....	65
<b>Σχημα 6.2:</b> Πτερυγιο ανεμογεννητριας.....	65
<b>Σχημα 6.3:</b> Τριδιαστατη απεικονιση ανεμογεννητριας με τη χρηση του λογισμικου solidworks.....	66

## Κατάλογος Πινάκων

<b>Πίνακας 5.1:</b> Σχεδιαστικές παράμετροι. ....	49
<b>Πίνακας 5.2:</b> Αριθμός Reynolds για διαφορετικές ταχύτητες λειτουργίας. ....	51
<b>Πίνακας 5.3:</b> Αρχικός σχεδιασμός πτερυγίου. ....	56
<b>Πίνακας 6.1:</b> Ιδιότητες υλικού PLA.....	63
<b>Πίνακας 6.2:</b> Τεχνικές προδιαγραφές του εκτυπωτή Flashforge 5m pro .....	64

# 1. Εισαγωγή

## 1.1 Γενικά

Μία από τις ταχύτερα αναπτυσσόμενες πηγές ανανεώσιμης ενέργειας στον κόσμο είναι η αιολική με τη ζήτηση της να αυξάνεται διαρκώς. Οι ανεμογεννήτριες ως μηχανές αξιοποίησης του αιολικού δυναμικού συμβάλλουν στην παραγωγή καθαρής και βιώσιμης ενέργειας. Η λειτουργία τους βασίζεται στην περιστροφή των πτερυγίων, τα οποία είναι κατάλληλα σχεδιασμένα για την μέγιστη δυνατή αξιοποίηση της κινητικής ενέργειας του ανέμου.

Για τον σχεδιασμό και την κατασκευή των ανεμογεννητριών πρέπει να ληφθούν υπόψη πολλοί παράγοντες, όπως είναι οι κλιματικές συνθήκες της περιοχής, η διαθεσιμότητα και η ισχύς του ανέμου, καθώς και η εργονομία και η απόδοση της ανεμογεννήτριας. Φυσικά, πρέπει να ληφθεί υπόψη η αντοχή των υλικών σε ακραίες συνθήκες και η διασφάλιση της προστασίας του περιβάλλοντος.

Η παρούσα εργασία έχει ως στόχο τον σχεδιασμό και την κατασκευή μίας ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα μικρής κλίμακας, χρησιμοποιώντας σύγχρονα υπολογιστικά εργαλεία και τεχνολογίες εκτύπωσης τρισδιάστατων αντικειμένων.

Για τον αρχικό σχεδιασμό χρησιμοποιήθηκε η Θεωρία Ορμής Στοιχείων (BEM), η οποία, εν συνεχεία, βελτιστοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού Q-blade. Ο σχεδιασμός και η τελική κατασκευή έγιναν με τη χρήση των λογισμικών SolidWorks και Orca Slicer.

## 1.2 Δομή διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική αποτελείται από 7 κεφάλαια στα οποία αναπτύσσονται το θεωρητικό υπόβαθρο και τα μοντέλα εκείνα που προσομοιώνουν με μεγαλύτερη ακρίβεια τη συμπεριφορά μίας ανεμογεννήτριας.

Ειδικότερα, στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στο αιολικό δυναμικό και τα χαρακτηριστικά των αεροτομών, τα οποία είναι κρίσιμα για τη μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε ηλεκτρική.

Στο δεύτερο κεφάλαιο επισημαίνονται οι διαφοροποιήσεις στον σχεδιασμό και την τεχνολογία των ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα, ανάλογα με τις απαιτήσεις και τις συνθήκες λειτουργίας που απαιτούνται κάθε φορά.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύονται ορισμένα μοντέλα που πλησιάζουν με μεγαλύτερη ακρίβεια την πραγματική συμπεριφορά του ρότορα μίας ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα. Αυτά είναι η θεωρία γενικής ορμής και η θεωρία ορμής με περιστρεφόμενο απόρρευμα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση των αεροδυναμικών φορτίων στα πτερύγια μίας ανεμογεννήτριας ως συνάρτηση της γεωμετρίας τους, εφαρμόζοντας τη διατήρηση της γραμμικής και γωνιακής ορμής μέσα σε έναν όγκο ελέγχου με τη χρήση της θεωρίας ορμής στοιχείων πτερύγωσης (BEM). Η χρησιμότητα της BEM έγκειται στο γεγονός

ότι μπορεί να συσχετίσει τη γεωμετρία της διατομής του πτερυγίου με την ικανότητα του ρότορα να αντλεί ενέργεια από τον άνεμο.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, το οποίο είναι και το σημαντικότερο, γίνεται αξιοποίηση όλων των δεδομένων που αντλήθηκαν από τα κεφάλαια 3 και 4 με σκοπό τον σχεδιασμό των πτερυγίων μίας ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο γίνεται και η χρήση του λογισμικού *Q-blade* για τη βελτιστοποίηση του μήκους χορδής και συστροφής του πτερυγίου.

Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται μία σύντομη αναφορά στις υπάρχουσες τεχνολογίες προσθετική κατασκευής και στη συνέχεια σχεδιάζεται και κατασκευάζεται η πλήμνη και τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας με τη χρήση των λογισμικών *SolidWorks* και *Orca Slicer*.

Στο έβδομο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν κατά τον σχεδιασμό και τίθενται ορισμένες προτάσεις για μελλοντική ανάλυση του συγκεκριμένου σχεδιασμού.

## Κεφάλαιο 1. Αιολική ενέργεια και αεροδυναμικά χαρακτηριστικά αεροτομών

Η αιολική ενέργεια αναδεικνύεται ως σημαντικός πυλώνας στη μετάβαση προς μία βιώσιμη ενεργειακή παραγωγή και οι ανεμογεννήτριες αποτελούν βασικό εργαλείο σε αυτή την προσπάθεια. Το σπουδαιότερο τμήμα μίας ανεμογεννήτριας είναι τα πτερύγια και τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά τους είναι μείζονος σημασίας για την απόδοση του αιολικού συστήματος. Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει ανάλυση τόσο του αιολικού δυναμικού όσο και της αεροδυναμικής που αναπτύσσεται στις αεροτομές των πτερυγίων.

### Ενέργεια και ισχύς ανέμου

Η ενέργεια είναι η ικανότητα ενός συστήματος ή ενός αντικείμενου να πραγματοποιήσει ένα έργο ή να προκαλέσει μία μετατροπή. Είναι θεμελιώδης έννοια και συναντάται σε διάφορες μορφές, όπως η κινητική ενέργεια, η δυναμική ενέργεια, η θερμική ενέργεια, η ηλεκτρική ενέργεια κ.α. Αυτές οι μορφές μπορούν να μετατρέπονται από τη μία στην άλλη, σύμφωνα με τους θεμελιώδεις νόμους της Θερμοδυναμικής και της Διατήρησης της Ενέργειας.

Μία μορφή ενέργειας είναι και η αιολική η οποία εξαρτάται από τη μάζα και την ταχύτητά του ανέμου και ορίζεται ως εξής:

$$E_{\text{κινητική}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot U^2 \quad (1.1)$$

Η κινητική ενέργεια έχει μονάδες μέτρησης κατά το Διεθνές Σύστημα Μονάδων (S.I) το  $N \cdot m$ . Αντίστοιχα, το ποσό της ενέργειας που παράγεται ή καταναλώνεται στη μονάδα του χρόνου είναι η ισχύς, της οποίας η μονάδα μέτρησης στο (S.I) είναι το 1W (Watt):

$$1W = 1 \frac{joule}{second} \quad (1.2)$$

Αν η κινητική ενέργεια εξαρτάται από την ταχύτητα και τη μάζα, τότε όσο μεγαλύτερη είναι η μάζα ενός σώματος που κινείται με μία συγκεκριμένη ταχύτητα, τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η κινητική του ενέργεια. Αντίστοιχα, η κινητική ενέργεια είναι ανάλογη με το τετράγωνο της ταχύτητας του σώματος, που σημαίνει πως, εάν διπλασιαστεί η ταχύτητα ενός σώματος, η κινητική ενέργεια θα τετραπλασιαστεί.

Εάν θεωρήσουμε πως μία ροή αέρα ρέει μέσω ενός κυλινδρικού σωλήνα επιφάνειας  $A$  με μία συγκεκριμένη ταχύτητα κάθε δευτερόλεπτο, μπορούμε να υπολογίσουμε τη μάζα του αέρα ανά δευτερόλεπτο που διέρχεται μέσω αυτής της επιφάνειας:

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot U, \quad (1.3)$$

όπου με  $\dot{m}$  συμβολίζεται η μάζα του αέρα που ρέει από την επιφάνεια  $A$  κάθε δευτερόλεπτο. Επομένως, αντικαθιστώντας τη μάζα, η κινητική ενέργεια ανά δευτερόλεπτο θα είναι:

$$\dot{E} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot U^3 \quad (1.4)$$

Εφόσον και η ισχύς ορίζεται ως η ενέργεια ανά δευτερόλεπτο, προκύπτει η παρακάτω σχέση:

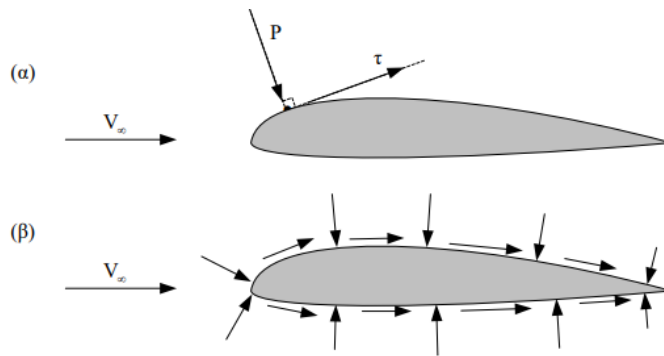
$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot U^3 \quad (1.5)$$

Συνεπώς, η ισχύς του ανέμου είναι ανάλογη τόσο της επιφάνειας που διαπερνά όσο και του κύβου της ταχύτητας. Επιπλέον, η παραπάνω σχέση αφορά την ισχύ του ανέμου και όχι την ισχύ που μπορεί να παραχθεί από τις αιολικές μηχανές ανέμου.[1]

## 1.2 Δυνάμεις και Ροπές αεροτομών

Η βελτίωση των σύγχρονων ανεμογεννητριών βασίζεται στην καλύτερη κατανόηση και μελέτη των δυνάμεων και των ροπών που επιδρούν σε αυτές. Στην ουσία είναι το αποτέλεσμα της πίεσης του αέρα και της τριβής που αναπτύσσεται στην επιφάνεια της αεροτομής. Η πίεση επενεργεί στην άνω και κάτω επιφάνεια της αεροτομής κάθετα, ενώ η διατμητική τάση είναι αποτέλεσμα της τριβής που ενεργεί εφαπτομενικά στην άνω και κάτω επιφάνεια.

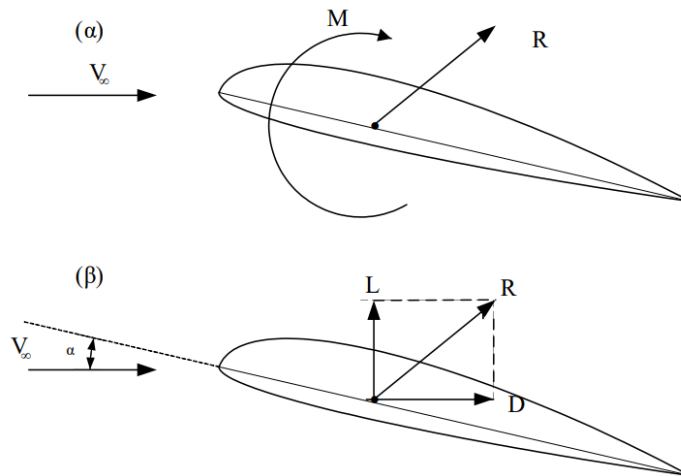




Σχήμα 1.1: Πιέσεις και διατμητικές τάσεις κατά μήκος της επιφάνειας της αεροτομής.

[2]

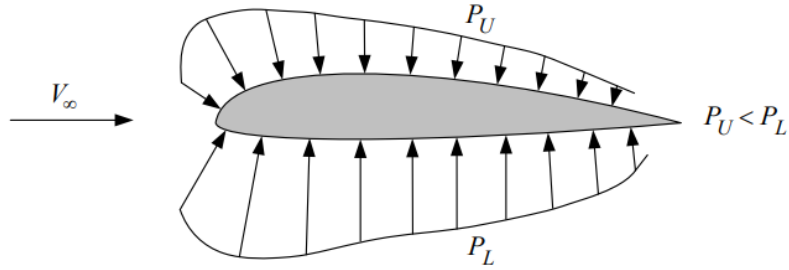
Κατά μήκος της αεροτομής τόσο η πίεση όσο και η διατμητική τάση μπορούν να αναλυθούν ισοδύναμα σε μία δύναμη  $R$  και μία ροπή  $M$ . Η δύναμη  $R$  μπορεί να αναλυθεί σε δύο συνιστώσες, μία που να βρίσκεται κάθετα στην ελεύθερη ροή του ρευστού και μία που να βρίσκεται παράλληλα σε αυτό. Έτσι προκύπτουν δύο μεγέθη, η άντωση (Lift) και η αντίσταση ή οπισθέλκουσα (Drag). [2]



Σχήμα 1.2: (α) Ισοδύναμη ανάλυση πίεσης ( $R$ ) και διατμητικής τάσης ( $M$ ), και (β) Κάθετη ( $L$ ) και παράλληλη ( $D$ ) συνιστώσα της δύναμης  $R$ .

[2]

Η άντωση είναι αποτέλεσμα της διαφοράς των πιέσεων στην άνω και κάτω επιφάνεια της αεροτομής. Αυτή η διαφορά προκύπτει από τον σχεδιασμό της καμπυλότητας της αεροτομής ή από τη γωνία προσβολής της ελεύθερης ροής,  $U_\infty$ , του αέρα. Με την καμπυλότητα διευκολύνεται η επιτάχυνση της ροής του ρευστού στην άνω επιφάνεια, με αποτέλεσμα τη μείωση της πίεσης. Το αντίθετο συμβαίνει στην κάτω επιφάνεια. [2]



Σχήμα 1.3: Κατανομή πίεσης στην άνω και κάτω επιφάνεια της αεροτομής.

[2]

Όσον αφορά τη ροπή πρόνευσης  $M$  έχει επικρατήσει να λαμβάνεται θετική όταν είναι δεξιόστροφη. Στο σχεδιασμό που θα γίνει στην υπό κατασκευή ανεμογεννήτρια η ροπή πρόνευσης θα βρίσκεται στο αεροδυναμικό κέντρο της διατομής του πτερυγίου. Φυσικά μπορούν να ληφθούν και άλλα σημεία, όπως είναι το χείλος προσβολής ή το ένα τέταρτο της χορδής της αεροτομής. [2]

### 1.3 Αεροδυναμικοί συντελεστές

Οι αδιάστατοι αεροδυναμικοί συντελεστές εκφράζουν την εξάρτηση των δυνάμεων και των ροπών από τις ροϊκές συνθήκες. Αυτοί είναι:

- i. Ο συντελεστής πίεσης  $C_p$
- ii. Ο συντελεστής άντωσης  $C_l$
- iii. Ο συντελεστής αντίστασης  $C_d$
- iv. Ο συντελεστής ροπής πρόνευσης  $C_m$

#### i. Συντελεστής Πίεσης $C_p$ (“Pressure Coefficient”)

Η αδιαστατοποίηση της πίεσης του πεδίου της ροής γίνεται με τη δυναμική πίεση η οποία ορίζεται ως:

$$\frac{1}{2} \rho_{\infty} U_{\infty}^2 \quad (1.6)$$

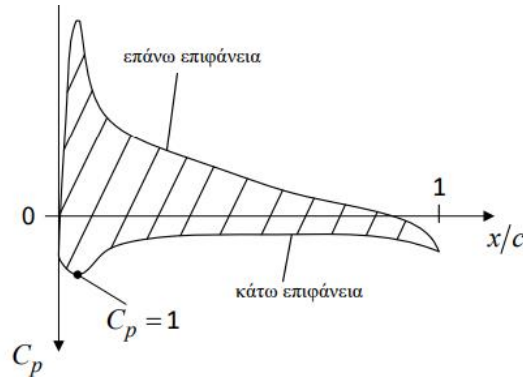
Η κατανομή της πίεσης στην επιφάνεια της αεροτομής εκφράζεται με το συντελεστή πίεσης ο οποίος ορίζεται ως:

$$C_p \equiv \frac{P - \rho_{\infty}}{\frac{1}{2} \rho_{\infty} U_{\infty}^2} \quad (1.7)$$

όπου  $P_{\infty}$ ,  $\rho_{\infty}$ ,  $U_{\infty}$  είναι η πίεση, η πυκνότητα και η ταχύτητα του ελεύθερου ρευστού. Η σύνδεση της κατάστασης της ελεύθερης ροής ( $P_{\infty}$ ,  $\rho_{\infty}$ ,  $U_{\infty}$ ) με το πεδίο σε οποιοδήποτε σημείο γύρω από την επιφάνεια της αεροτομής ( $P$ ,  $\rho$ ,  $U$ ) γίνεται με την εξίσωση του Bernoulli:

$$\rho_{\infty} + \frac{\rho}{2} U_{\infty}^2 = p + \frac{\rho}{2} U^2 \quad (1.8)$$

Το *διάγραμμα 1.1* δείχνει την κατανομή του συντελεστή πίεσης γύρω από μία επιφάνεια αεροτομής. Οι θετικές τιμές βρίσκονται στην κάτω επιφάνεια του σχήματος διότι ο συντελεστής πίεσης είναι χαμηλότερος στην πάνω επιφάνεια συγκριτικά με την κάτω. Παράλληλα, το εμβαδόν της κλειστής επιφάνειας εκφράζει την άντωση.



*Διάγραμμα 1.1: Συντελεστής πίεσης γύρω από την επιφάνεια αεροτομής.*

[2]

Σημαντικές παρατηρήσεις του παραπάνω σχήματος είναι πως η μέγιστη τιμή του συντελεστή  $C_p$  είναι 1 και βρίσκεται στο σημείο ανακοπής της ροής, δηλαδή όταν η ταχύτητα είναι  $U = 0$ . Επίσης, στο χείλος προσβολής παρατηρείται το μεγαλύτερο μέρος του χωρίου, γεγονός που δείχνει τη συνεισφορά του στην άντωση. [2]

## ii. Συντελεστής Άντωσης $C_l$ ("Lift Coefficient")

Ο συντελεστής άντωσης είναι ο λόγος της δύναμης της άντωσης ( $L$ ) προς τη δυναμική πίεση της ελεύθερης ροής ( $\frac{1}{2} \rho_{\infty} V_{\infty}^2$ ) και το μήκος της χορδής ( $c$ ). Ορίζεται ως:

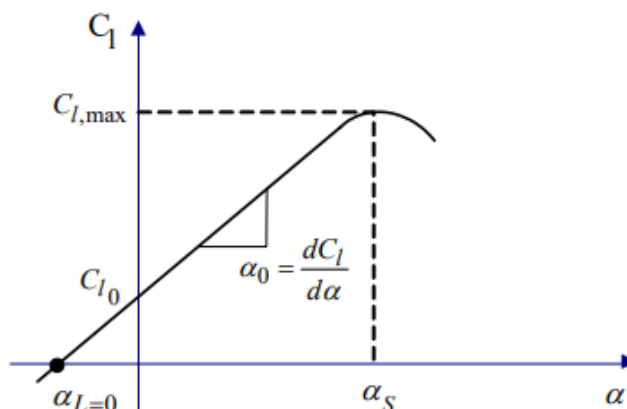
$$Cl \equiv \frac{L}{\frac{1}{2} \rho_{\infty} U_{\infty}^2 c} \quad (1.9)$$

Ο παραπάνω ορισμός θεωρεί μοναδιαίο μήκος εκπετάσματος της πτέρυγας η οποία σχηματίζεται κατά την παράλληλη μετατόπιση της αεροτομής στη διεύθυνση κάθετα στο επίπεδο της. Αναλύοντας τον συντελεστή άντωσης στις τρεις διαστάσεις του χώρου προκύπτει ο ορισμός:

$$Cl \equiv \frac{L}{\frac{1}{2} \rho_{\infty} U_{\infty}^2 S}, \quad (1.10)$$

όπου  $S$  είναι η επιφάνεια της κάτοψης της πτέρυγας.

Οι παράγοντες που καθορίζουν τον συντελεστή άντωσης είναι η γεωμετρία της αεροτομής, η γωνία προσβολής ( $\alpha$ ), η πυκνότητα του ρευστού, η ελεύθερη ροή και η τραχύτητα της επιφάνειας του σώματος.



Διάγραμμα 1.2: Τυπική μεταβολή του συντελεστή  $C_l$  συναρτήσει της γωνίας προσβολής ( $\alpha$ ).

[2]

Στο διάγραμμα 1.2 παρουσιάζεται μία τυπική μεταβολή του  $C_l$  για μια μη συμμετρική αεροτομή και προκύπτουν ορισμένα χαρακτηριστικά της καμπύλης τα οποία είναι:

- *Γωνία Μηδενικής Άντωσης* (“Zero Lift Angle”)  $\alpha_{L=0}$ : Είναι η γωνία προσβολής στην οποία η άντωση είναι μηδενική. Άντωση μπορεί να δημιουργηθεί και σε αρνητικές γωνίες  $\alpha$ .
- *Κλίση της Καμπύλης Άντωσης* (“Lift Curve Slope”)  $\alpha_0 = \frac{dC_l}{d\alpha}$ : Είναι η κλίση της καμπύλης του  $C_l$  συναρτήσει της γωνίας  $\alpha$ . Παρουσιάζει γραμμικότητα μέχρι ένα σημείο.
- *Μέγιστος Συντελεστής Άντωσης*  $C_{l,max}$ : Είναι η μέγιστη τιμή που μπορεί να λάβει ο συντελεστής  $C_l$ . Η γωνία προσβολής η οποία αντιστοιχεί στη μέγιστη άντωση ονομάζεται *Γωνία Απόλειας Στήριξης*  $\alpha_s$  (“Stall Angle”).
- *Συντελεστής Άντωσης*  $C_{l_0}$ : Είναι η τιμή του συντελεστή σε μηδενική γωνία προσβολής. [2]

### iii. Συντελεστής Αντίστασης $C_d$ (“Drag Coefficient”)

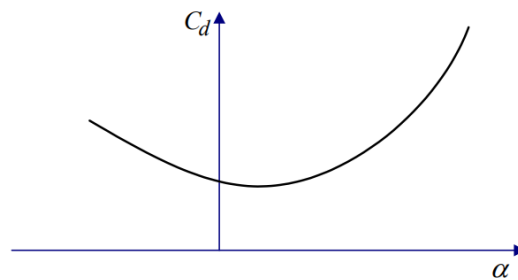
Ο συντελεστής αντίστασης είναι ο λόγος που προκύπτει από την δύναμη της αντίστασης προς τη δυναμική πίεση της ελεύθερης ροής και το μήκος της χορδής. Ορίζεται ως:

$$Cd \equiv \frac{D}{\frac{1}{2}\rho_{\infty}U_{\infty}^2 c} \quad (1.11)$$

Αντίστοιχα, και σε αυτή την περίπτωση η επιφάνεια που χρησιμοποιείται για την αδιαστατοποίηση της αντίστασης είναι η επιφάνεια κάτοψης του πτερυγίου και ορίζεται ως:

$$Cd \equiv \frac{D}{\frac{1}{2}\rho_{\infty}U_{\infty}^2 S} \quad (1.12)$$

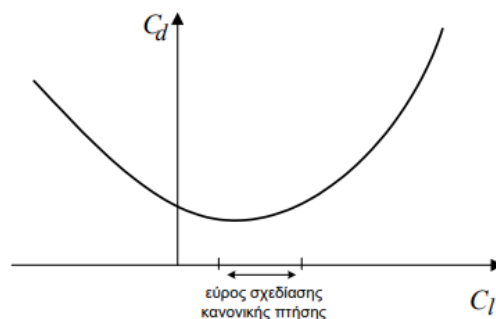
Στην *διάγραμμα 1.3* παριστάνεται η μεταβολή του συντελεστή αντίστασης συναρτήσει της προσβολής  $\alpha$  της αεροτομής. Αυτό που παρατηρείται είναι πως σε μικρές γωνίες προσβολής ο συντελεστής είναι χαμηλός και αυξάνεται όσο αυξάνεται η γωνία. Απόρροια του γεγονότος αυτού είναι πως η αντίσταση αυξάνεται απότομα και δημιουργείται μεγαλύτερη διαφορά πίεσης μεταξύ της πάνω και κάτω επιφάνειας.



*Διάγραμμα 1.3: Μεταβολή του Cd συναρτήσει της γωνίας προσβολής ( $\alpha$ ).*

[2]

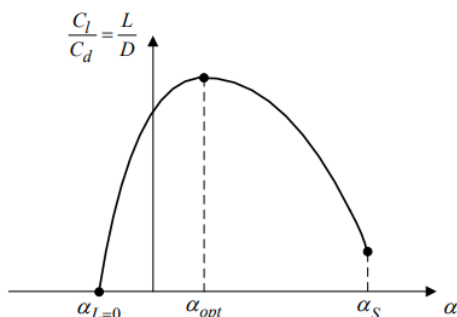
Οι συντελεστές άντωσης και αντίστασης μας επιτρέπουν να σχεδιάσουμε την αεροτομή με τέτοιον τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη τιμή της άντωσης και η όσο το δυνατόν ελάχιστη τιμή της αντίστασης. Οι δύο συντελεστές απεικονίζονται στο *Διάγραμμα 1.4*:



*Διάγραμμα 1.4: Παράδειγμα μεταβολής Cd - Cl ("Drag Polar") σε μία αεροτομή.*

[2]

Χρειάζεται να τονιστεί πως ένα σημαντικό μέτρο απόδοσης για τη βέλτιστη αεροδυναμική σχεδίαση είναι ο λόγος της άντωσης και της αντίστασης ( $L/D$ ) της αεροτομής συναρτήσει της γωνίας προσβολής ( $\alpha$ ). Παρουσιάζοντας στο *διάγραμμα 1.5* τη μεταβολή αυτή παρατηρείται πως η βέλτιστη γωνία ( $\alpha_{opt}$ ) είναι διαφορετική από τη γωνία απώλειας στήριξης ( $\alpha_s$ ). [2]



*Διάγραμμα 1.5:* Παράδειγμα μεταβολής του λόγου άντωσης και αντίστασης ( $L/D$ ) συναρτήσει της γωνίας προσβολής ( $\alpha$ ).

[2]

#### iv. Συντελεστής Ροπής Πρόνευσης $C_m$ (“Pitching Moment Coefficient”)

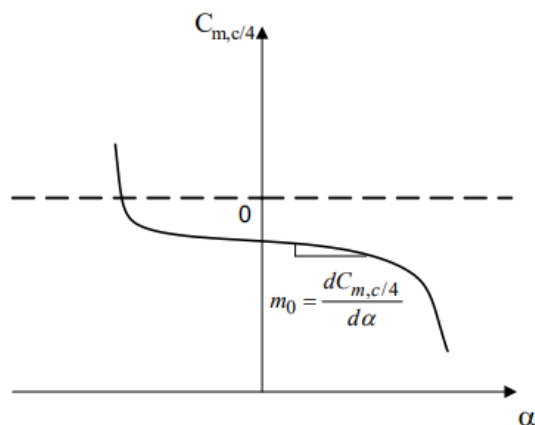
Ο συντελεστής πρόνευσης  $C_m$  είναι ο λόγος της ροπής πρόνευσης προς τη δυναμική πίεση της ελεύθερης ροής και το μήκος της χορδής. Ορίζεται ως:

$$C_m \equiv \frac{M}{\frac{1}{2} \rho_{\infty} U_{\infty}^2 c^2} \quad (1.13)$$

Αντίστοιχα, όπως και στους άλλους συντελεστές, στις τρεις διαστάσεις του χώρου η χαρακτηριστική επιφάνεια που χρησιμοποιείται για την αδιαστατοποίηση της δύναμης είναι η επιφάνεια της πτέρυγας από την κάτοψη και το χαρακτηριστικό μήκος για την αδιαστατοποίηση του μοχλοβραχίονα της ροπής είναι το μήκος της χορδής ( $c$ ). Συνεπώς, ο ορισμός σε αυτή την περίπτωση είναι:

$$C_m \equiv \frac{M}{\frac{1}{2} \rho_{\infty} U_{\infty}^2 S \cdot c} \quad (1.14)$$

Όπως έχει προαναφερθεί η ροπή πρόνευσης μεταβάλλεται επί της χορδής, συνεπώς ο συντελεστής πρόνευσης πρέπει να ορίζεται ως προς το δεδομένο σημείο. Στο *διάγραμμα 1.6* απεικονίζεται η μεταβολή του συντελεστή ροπής πρόνευσης συναρτήσει της γωνίας προσβολής μιας μη-συμμετρικής αεροτομής.



*Διάγραμμα 1.6: Μεταβολή συντελεστή  $C_m$  συναρτήσει της γωνίας προσβολής σε μη-συμμετρική αεροτομή.*

[2]

Το σημείο της ροπής πρόνευσης είναι στο  $1/4$  της χορδής της αεροτομής και ο συντελεστής  $C_m$  είναι αρνητικός σε μεγάλο εύρος γωνιών προσβολής. Αυτό σημαίνει πως η ροπή είναι αριστερόστροφη και έχει την τάση να μειώνει τη γωνία προσβολής. Αυτή η παρατήρηση είναι σημαντική γιατί μας δείχνει τη διατήρηση της ευστάθειας του πτερυγίου. Επιπλέον, μία άλλη παρατήρηση είναι η αύξηση του συντελεστή ροπής σχεδόν γραμμικά, όταν αυξάνεται η γωνία προβολής, γεγονός που οφείλεται στην απώλεια στήριξης του πτερυγίου. [2]

## Κεφάλαιο 2. Ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα

### 2.1 Αρχή λειτουργίας

Οι ανεμογεννήτριες ως αιολικές μηχανές μπορούν να περιστρέφονται γύρω από έναν οριζόντιο ή κατακόρυφο άξονα ώστε να αξιοποιούν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανική και κατά επέκταση σε ηλεκτρική.

Ειδικότερα, στις ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα, ο άνεμος διέρχεται και από τις δύο επιφάνειες του πτερυγίου, δημιουργώντας διαφορά πίεσης μεταξύ της άνω και κάτω επιφάνειας προκαλώντας αεροδυναμική άντωση, η οποία οδηγεί σε περιστροφή των πτερυγίων γύρω από τον άξονα.

Οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα διαφοροποιούνται ανάλογα με τις απαιτήσεις και τις συνθήκες λειτουργίας που ορίζονται κάθε φορά. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα βασικότερα μέρη διαφοροποίησης των ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα.

### 2.2 Διαφοροποίηση ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα

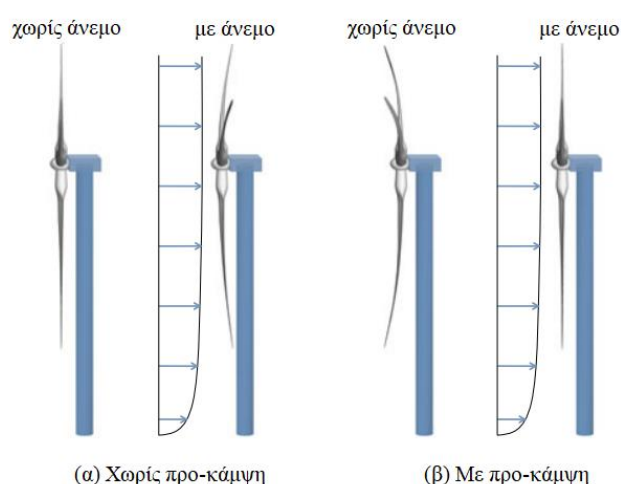
### i. Πτερύγια και πύργος στήριξης

Ο αριθμός των πτερυγίων διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη συνολική απόδοση και αντοχή ενός αιολικού συστήματος.

Ειδικότερα, ανεμογεννήτριες με διάταξη ενός πτερυγίου θεωρούνται ιδανικές όσον αφορά την απόδοση ενέργειας. Ένα πτερόγιο, ωστόσο, μπορεί να προκαλέσει αστάθεια στο ρότορα, μία συνθήκη που πρέπει να αποφεύγεται κατά το δυνατόν. Ομοίως, οι διπτέρυγες ανεμογεννήτριες έχουν μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση σε σχέση με τις τριπτέρυγες, αλλά είναι επιρρεπείς σε ένα φαινόμενο γνωστό ως Γυροσκοπική Μετάπτωση, που οδηγεί σε ταλάντωση με περαιτέρω ζητήματα κατασκευαστικής σταθερότητας. Τέλος, οποιοσδήποτε αριθμός πτερυγίων άνω των 3 δημιουργεί μεγαλύτερη αντίσταση στη ροή του αέρα, οδηγώντας σε επιβράδυνση με μείωση της συνολικής παραγωγής ενέργειας. Συνεπώς, οι τριπτέρυγες ανεμογεννήτριες εξισορροπούν ανάμεσα στην υψηλή ενεργειακή απόδοση, τη συνολική σταθερότητα και ανθεκτικότητά του συστήματος. [3]

Ένα άλλο βασικό γνώρισμα των ανεμογεννητριών είναι η τοποθέτηση των πτερυγίων σε σχέση με τον πύργο στήριξης.

Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες είναι σχεδιασμένες προσήνεμα (upwind), δηλαδή η ροή του ανέμου να συναντάει πρώτα τα πτερύγια και μετά τον πύλονα στήριξης. [4] Βασικό πλεονέκτημα αυτού του σχεδιασμού είναι η αποφυγή του απορρεύματος που δημιουργείται πίσω από τον πύργο στήριξης. Από την άλλη, το κύριο μειονέκτημα τους είναι πως σε ακραίες καιρικές συνθήκες τα πτερύγια μπορούν να χτυπήσουν τον πύργο προκαλώντας σοβαρές επιπτώσεις. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος η πλήμνη μπορεί να τοποθετηθεί μακρύτερα από τον πύργο στήριξης ή να μεγαλώσει η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του πύργου στήριξης και των πτερυγίων. Μία άλλη μέθοδος είναι η μόνιμη κάμψη των πτερυγίων η οποία τα «ισιώνει» σε μεγάλες ταχύτητες ανέμου. Τέλος, οι προσήνεμες ανεμογεννήτριες χρειάζονται σύστημα εκτροπής για την αλλαγή διεύθυνσης τους.

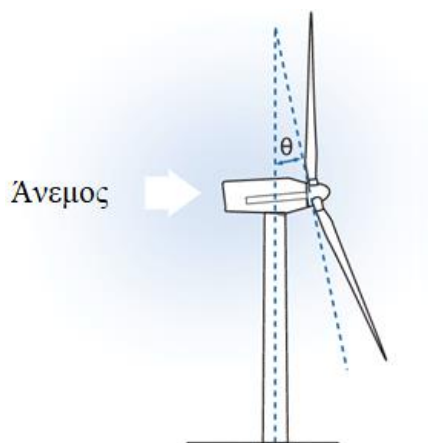


Εικόνα 2.1: Προσήνεμη ανεμογεννήτρια.

[5]



Μία άλλη κατηγορία ανεμογεννητριών είναι οι υπήνεμες (downwind) στις οποίες ο πύργος βρίσκεται μπροστά από τα πτερύγια και ο άνεμος τον συναντάει πρώτο. Βασικό πλεονέκτημα αυτού του σχεδιασμού είναι πως όσο και να καμφθούν τα πτερύγια δεν πρόκειται ποτέ να συγκρουστούν με τον πύργο. Επίσης, ο σχεδιασμός των πτερυγίων μπορεί να γίνει πιο εύκαμπτος, γεγονός που οδηγεί σε πιο ελαφριές κατασκευές με χαμηλότερο κόστος, συγκριτικά με τα πτερύγια που απαιτούνται στις προσήνεμες. Ακόμη, για την αλλαγή προσανατολισμού δεν χρειάζεται σύστημα εκτροπής, καθώς ο άνεμος στρέφει το ρότορα μακριά από αυτόν. Ωστόσο, σημαντικό μειονέκτημά είναι το απόρρευμα που δημιουργεί ο πύργος και η διακύμανση της αιολικής ενέργειας, λόγω της ίδιας διεύθυνσης ανέμου και ρότορα.[4]



Εικόνα 2.2: Υπήνεμη ανεμογεννήτρια.

[6]

## ii. Συστήματα μετάδοσης κίνησης

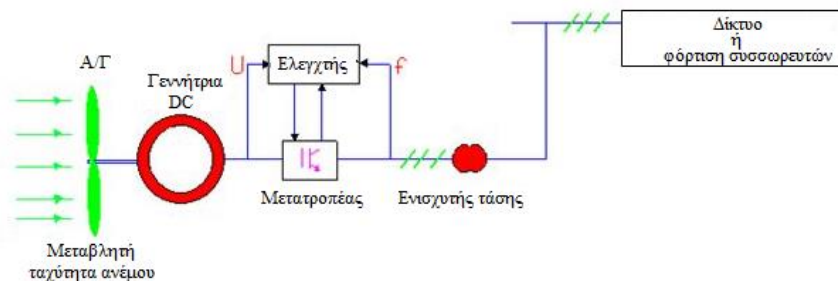
Σε μία τυπική σχεδίαση ανεμογεννήτριας τα πτερύγια περιστρέφουν έναν άξονα περιστροφής που είναι συνδεδεμένος με ένα κιβώτιο ταχυτήτων χαμηλών στροφών. Αυτό το κιβώτιο συνδέεται με έναν άλλο άξονα υψηλών ταχυτήτων ο οποίος καταλήγει σε μία γεννήτρια. Τα κιβώτια που είναι συνδεδεμένα με τις ανεμογεννήτριες μπορούν να είναι παράλληλου άξονα ή πλανητικά. Για ανεμογεννήτριες με ισχύ μεγαλύτερη από τα 500kW τα πλανητικά κιβώτια υπερτερούν ως προς το μέγεθος και τη μάζα τους. Από την άλλη, πολλές ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούν πολλαπλές γεννήτριες και συνδέονται με ένα κιβώτιο ταχυτήτων το οποίο έχει περισσότερους από έναν άξονες, ενώ άλλες που λειτουργούν σε πιο χαμηλές στροφές δεν χρειάζονται κιβώτιο ταχυτήτων.[7]

Στις γεννήτριες υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες και δεν μπορεί να δοθεί μία σαφή απάντηση όσον αφορά την ιδανική. Έτσι, λοιπόν, διακρίνονται τρεις κύριοι τύποι γεννητριών οι οποίοι μπορούν να λειτουργούν σε μεταβαλλόμενη ή σταθερή ταχύτητα σχεδίασης:

- Οι γεννήτριες συνεχούς ρεύματος (DC generators)
- Οι γεννήτριες σύγχρονου εναλλασσόμενου ρεύματος (AC generators)
- Οι γεννήτριες ασύγχρονου εναλλασσόμενου ρεύματος (AC generators)

Λόγω των διακυμάνσεων του ανέμου είναι ορθή η λειτουργία των γεννητριών σε μεταβλητές ταχύτητες, καθώς μειώνονται οι φυσικές καταπονήσεις στα πτερύγια και στα συστήματα μετάδοσης κίνησης, βελτιώνοντας με αυτό τον τρόπο την αεροδυναμική απόδοση και τις μεταβάσεις της ροπής.[7]

Οι γεννήτριες συνεχούς ρεύματος αποτελούνται από έναν ρότορα και έναν στάτορα/μόνιμο μαγνήτη. Ο ρότορας είναι συνδεδεμένος με τον άξονα της ανεμογεννήτριας, ο οποίος περιστρέφεται δημιουργώντας μαγνητικό πεδίο. Ο στάτορας είναι ακίνητος και αποτελείται από περιελίξεις πηνίων που συνδέονται με την έξοδο ισχύος. Κατά την περιστροφή του ρότορα, δημιουργείται ηλεκτρομαγνητική επαγωγή, λόγω διαφοράς δυναμικού, η οποία παράγει μία έξοδο συνεχούς ρεύματος. Γενικά, οι γεννήτριες DC δεν συνηθίζονται σε εφαρμογές ανεμογεννητριών, παρά μόνο εάν υπάρχει χαμηλή ζήτηση ισχύος και το φορτίο βρίσκεται κοντά σε αυτές (θέρμανση, φόρτιση μπαταριών).

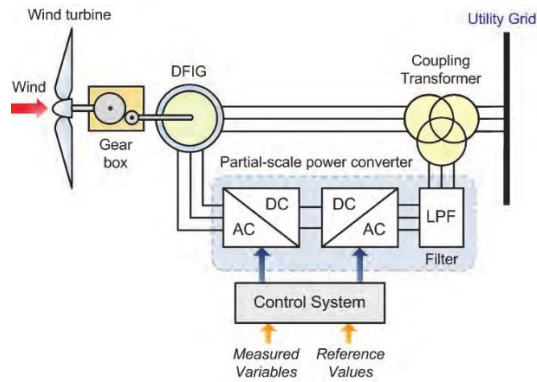


Εικόνα 2.3: Σχηματική αναπαράσταση γεννήτριας DC σε ανεμογεννήτρια.

[7]

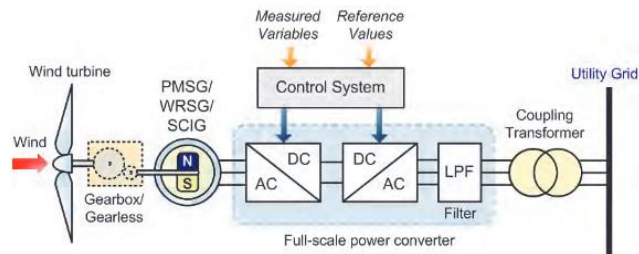
Οι γεννήτριες σύγχρονου εναλλασσόμενου ρεύματος έχουν τη δυνατότητα να λαμβάνουν σταθερές ή συνεχείς διεγέρσεις είτε από μόνιμους μαγνήτες (PMSGs) είτε από ηλεκτρομαγνήτες (EESGs). Όταν ο ρότορας κινείται από την ανεμογεννήτρια, παράγεται τριφασική ισχύς στις περιελίξεις του στάτορα, οι οποίες συνδέονται με το δίκτυο μέσω μετασχηματιστών και μετατροπέων ισχύος. Για σύγχρονες γεννήτριες σταθερής ταχύτητας, η ταχύτητα του δρομέα πρέπει να είναι ίδια με τη σύγχρονη ταχύτητα, ειδάλλως, χάνεται ο συγχρονισμός. Επίσης, σε αυτές τις γεννήτριες οι τυχαίες διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου και οι περιοδικές διαταραχές περνούν στο δίκτυο. [7]

Τέλος, οι γεννήτριες ασύγχρονου εναλλασσόμενου ρεύματος χρησιμοποιούνται εκτενώς στα σύγχρονα αιολικά συστήματα. Αυτές οι επαγωγικές γεννήτριες διακρίνονται σε γεννήτριες επαγωγής με σταθερή ταχύτητα (FSIGs) και γεννήτριες επαγωγής διπλής τροφοδοσίας (DFIGs), οι οποίες και χρησιμοποιούνται κατά κόρον στα αιολικά συστήματα. Γενικά οι επαγωγικές γεννήτριες είναι απλοϊκές, αξιόπιστες, φθηνές και καλά ανεπτυγμένες σχεδιαστικά. Ωστόσο, ένα σημαντικό μειονέκτημα τους είναι πως αντλούν άεργο ισχύ από το δίκτυο και γι' αυτό το λόγο απαιτείται η χρήση πυκνωτών ή μετατροπέων ισχύος.[7]



*Εικόνα 2.4: Ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας με επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας (DFIG) ελεγχόμενη με μετατροπέα ισχύος μερικής κλίμακας.*

[8]



*Εικόνα 2.5: Ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας με σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη (PMSG) ελεγχόμενη με μετατροπέα ισχύος πλήρους κλίμακας.*

[8]

### iii. Σύστημα προσανεμισμού (yaw system)

Η διεύθυνση του ανέμου είναι μία σημαντική παράμετρος ,καθώς μεταβάλλεται διαρκώς. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητος ένας μηχανισμός προσανατολισμού της ανεμογεννήτριας προς τον άνεμο. Οι ανεμογεννήτριες διαθέτουν δύο διαφορετικά συστήματα προσανατολισμού, το ενεργό (active yaw) και το παθητικό (passive yaw) σύστημα προσανεμισμού.

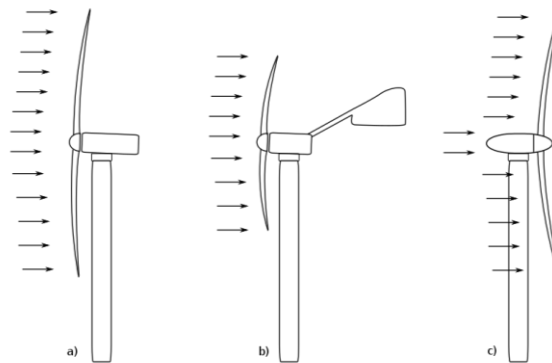
Τα ενεργά συστήματα προσανεμισμού διαθέτουν συσκευές που προκαλούν ροπή ικανή να περιστρέψει την άτρακτο προς τη διεύθυνση του ανέμου. Η περιστροφή γίνεται είτε μέσω σημάτων που λαμβάνονται από αισθητήρες διεύθυνσης ανέμου είτε χειροκίνητα, παρακάμπτοντάς το σύστημα, για λόγους συντήρησης, βλάβης κ.α. Οι πιο συνηθισμένοι τύποι ενεργών συστημάτων είναι:

- α) Προσανεμισμός με έδρανο κύλισης ή ολίσθησης ηλεκτρικά κινούμενη και
- β) Προσανεμισμός με έδρανο κύλισης ή ολίσθησης υδραυλικά κινούμενη.[9]

Τα παθητικά συστήματα προσανεμισμού αξιοποιούν τη δύναμη του ανέμου για να προσανατολίσουν την άτρακτο. Ωστόσο, κατά το σχεδιασμό τους πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η αποφυγή περιστροφικών φορτίων, λόγω των ξαφνικών αλλαγών στην κατεύθυνσή του ανέμου. Τα παθητικά συστήματα διακρίνονται σε:

- α) Ελεύθερα συστήματα προσανεμισμού με έδρανα κύλισης,

- β) ημι-ενεργά συστήματα προσανεμισμού με έδρανα κύλισης και πέδηση,  
 γ) παθητικά συστήματα προσανεμισμού με έδρανα ολίσθησης και πέδηση.[9]



*Εικόνα 2.6: α) Προσήμεμη ανεμογεννήτρια με ενεργό σύστημα προσανεμισμού, β) προσήμεμη ανεμογεννήτρια με παθητικό σύστημα προσανεμισμού και γ) υπήμεμη ανεμογεννήτρια με παθητικό σύστημα προσανεμισμού.*

#### v. Σχεδιασμός $\lambda$ και $\sigma$

Κατά τον σχεδιασμό μίας ανεμογεννήτριας μία σημαντική παράμετρος είναι και ο λόγος ταχύτητας του πτερυγίου προς την ταχύτητα του ανέμου (Tip Speed Ratio). Ο μέγιστος συντελεστής ισχύος καθορίζεται από το  $TSR$  σχεδιασμού. Ταυτόχρονα, το  $TSR$  συνδέεται άμεσα με την επιφάνεια στιβαρότητας  $\sigma$  (solidity) των πτερυγίων στον ρότορα.

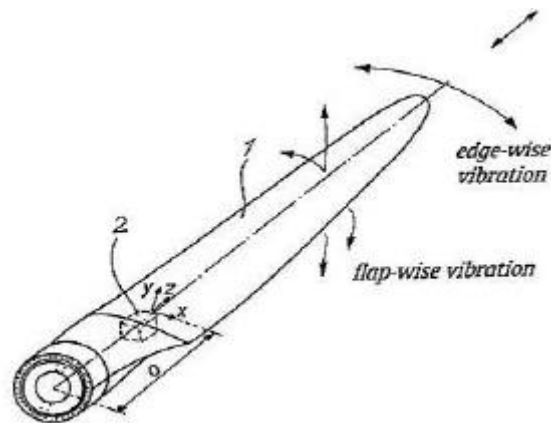
Ανεμογεννήτριες με υψηλή ταχύτητα περιστροφής έχουν μικρή επιφάνεια πτερυγίων συγκριτικά με αυτές που περιστρέφονται πιο αργά. Έτσι για σταθερό αριθμό πτερυγίων, το μήκος χορδής, η πυκνότητα και η στιβαρότητα μειώνονται. Όμως, λόγω κατασκευαστικών περιορισμών το πάχος της χορδής δεν μπορεί να είναι υπερβολικά λεπτό.

Για την επίτευξη υψηλού  $TSR$  μπορεί να μειωθεί είτε ο αριθμός των πτερυγίων είτε η μάζα τους. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνονται χαμηλές ροπές για ένα δεδομένο επίπεδο ισχύος το οποίο επιτρέπει στα συστήματα μετάδοσης κίνησης να είναι σχετικά ελαφρύτερα. Επιπλέον, τα πτερύγια είναι περισσότερο εύκαμπτα σε σχέση με τις ανεμογεννήτριες που έχουν χαμηλό  $TSR$ . Ένα μειονέκτημα που εμφανίζουν οι ανεμογεννήτριες με υψηλό  $TSR$  είναι η παραγωγή ηχορρύπανσης.[10]

#### vi. Πλήμνη

Η πλήμνη στις ανεμογεννήτριες είναι ένα ακόμη σημαντικό συστατικό για τη συναρμογή των πτερυγίων. Οι πλήμνες μπορεί να είναι άκαμπτες, ταλαντευόμενες ή αρθρωτές, ανάλογα με την κατασκευή.

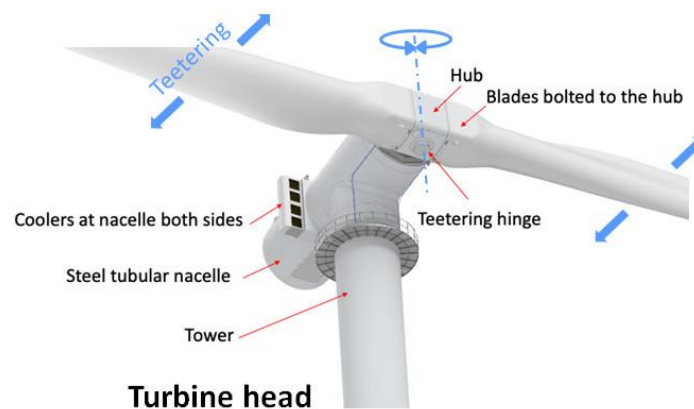
Οι ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας και βήματος συστροφής είναι άκαμπτες. Αυτό σημαίνει πως τα πτερύγια δεν μπορούν να κινηθούν προς την κατεύθυνση των πτερυγίων (flapwise) και των άκρων (edgewise).



Σχήμα 2.1: Κινήσεις πτερυγίου κατά το διαμήκη και παράλληλο άξονα του.

[11]

Στις διπτέρυγες ανεμογεννήτριες τα πτερύγια συνήθως ταλαντεύονται. Αυτό σημαίνει πως η πλήμνη είναι τοποθετημένη σε ρουλεμάν και μπορεί να ταλαντεύεται μπρος και πίσω ή μέσα και έξω από το επίπεδο περιστροφής. Οι λεπίδες με τη σειρά τους συνδέονται άκαμπτα με την πλήμνη, έτσι κατά την ταλάντευση το ένα πτερύγιο κινείται προς την αντίθετη κατεύθυνση του ανέμου, ενώ το άλλο προς τον άνεμο. Αρκετά μεγάλο πλεονέκτημα είναι πως η ροπή κάμψης είναι χαμηλή σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας.



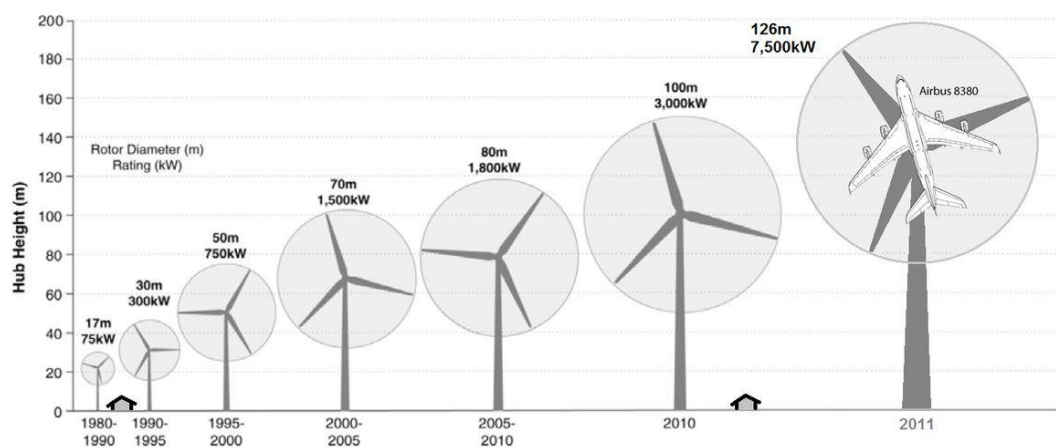
Εικόνα 2.7: Μηχανισμός ταλάντευσης διπτέρυγης ανεμογεννήτριας.

[12]

### vii. Πύργος στήριξης

Ο πύργος μιας ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα υπόκειται σε διάφορες παραμέτρους σχεδίασης και κατασκευής, καθώς οι απαιτήσεις διαφέρουν ανάλογα με

τις συνθήκες του έργου κάθε φορά. Το ύψος του πύργου πρέπει να υπερβαίνει την ακτίνα των πτερυγίων και συνήθως κυμαίνεται από 70 έως 120 μέτρα. Το σχήμα του πύργου είναι συνήθως σωληνοειδές και κατασκευάζεται κυρίως από χάλυβα. Η συναρμολόγησή του γίνεται τμηματικά, συνήθως σε 3 τμήματα. Επίσης, όσο πιο ψηλός είναι ο πύργος, τόσο μεγαλύτερη ενέργεια μπορεί να παραχθεί από την ανεμογεννήτρια.



Εικόνα 2.8: Αύξηση του ύψους ανεμογεννητριών από το 1980 έως το 2011.

[13]

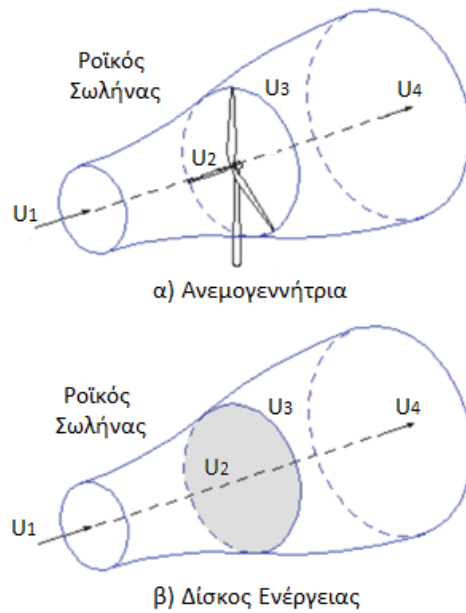
### Κεφάλαιο 3. Θεωρητικά μοντέλα υπολογισμού ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα

Η ανεμογεννήτρια, όπως έχει αναφερθεί στα προηγούμενα κεφάλαια, είναι ένας μηχανισμός αξιοποίησης της κινητικής ενέργειας της ελεύθερης ροής του ανέμου που περνάει μέσω αυτής. Για τη μελέτη της αεροδυναμικής συμπεριφοράς της έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα. Ορισμένα εξ αυτών προσεγγίζουν με ικανοποιητική ακρίβεια την πραγματική συμπεριφορά του ρότορα στο περιβάλλον λειτουργίας του, ενώ κάποια άλλα είναι λιγότερο ακριβή. Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλυθούν τα μοντέλα εκείνα που πλησιάζουν με μεγαλύτερη ακρίβεια την πραγματική συμπεριφορά του ρότορα μίας ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα.

#### 3.1 Θεωρία αξονικής ορμής (Rankine- Froude)

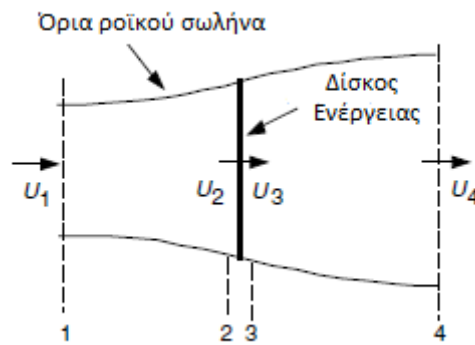
Εάν θεωρήσουμε έναν ροϊκό σωλήνα όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.1, όπου η επιφάνεια του ρότορα της ανεμογεννήτριας χαρακτηρίζεται ως ένας δίσκος, τότε αυτό που παρατηρούμε είναι πως ανάντη του δίσκου το εμβαδόν διατομής του σωλήνα θα είναι μικρότερο και κατάντη του δίσκου το εμβαδόν διατομής θα είναι μεγαλύτερο. Για την μελέτη αυτού το φαινομένου θα πρέπει να εφαρμοστούν ορισμένοι νόμοι που επικρατούν στη μηχανική των ρευστών και πιο συγκεκριμένα:

- i. Η αρχή διατήρησης της μάζας
- ii. Η αρχή διατήρησης της ορμής
- iii. Ο ενεργειακός ισολογισμός [14]



Σχήμα 3.1: Πεδίο ροής ανεμογεννήτριας (α) και (β) δίσκου ενέργειας.

[15]



Σχήμα 3.2: Μοντέλο δίσκου ενέργειας ανεμογεννήτριας με μέση ταχύτητα ανέμου ( $U$ ).

[10]

Παράλληλα, με μία πρώτη προσέγγιση επίλυσης του φαινομένου χρειάζονται κάποιες παραδοχές οι οποίες είναι:

1. Εμφάνιση μη απωλειών μεταξύ του ελεύθερου ρευστού και του δίσκου
2. Ομοιόμορφη κατανομή της ταχύτητας στον δίσκο
3. Σταθερή διαφορά πίεσης ανάντη και κατόντη σε ολόκληρο το δίσκο
4. Σταθερός αέρας, ομοιογενής και σταθερής κατεύθυνσης

5. Ομοιόμορφη ώση ( $T$ ) πάνω στον ρότορα
6. Στατική πίεση ίση με την ατμοσφαιρική αρκετά μακριά από την επιφάνεια ανάντι και κατάντη του ρότορα.
7. Μη πρόκληση περιστροφής στη φλέβα ροής από τον δίσκο
8. Άπειρος αριθμός πτερυγίων [14]

#### i. Αρχή Διατήρησης Μάζας

Σύμφωνα με την Αρχή Διατήρησης της Μάζας ο ρυθμός ροής της μάζας ενός ρευστού πρέπει να είναι σταθερός και ίσος με:

$$\dot{m} = \rho \cdot A_{\delta} \cdot U_{2-3} = \rho \cdot (\pi \cdot R^2) \cdot U_{2-3}, \quad (3.1)$$

όπου  $A_{\delta}$  είναι η διατομή του ροϊκού σωλήνα και  $U_{2-3}$  είναι η ταχύτητα του ρευστού διαμέσου του δίσκου.

Με βάση, λοιπόν, την παραπάνω εξίσωση προκύπτει ότι η ροή ανάντη ( $\rho \cdot A_{-\infty} \cdot U_1$ ) του δίσκου, μέσα σε αυτόν ( $\rho \cdot A_{\delta} \cdot U_{2-3}$ ) και κατάντη αυτού ( $\rho \cdot A_{+\infty} \cdot U_4$ ) είναι ίδια και ίση με:[14]

$$\rho \cdot A_{-\infty} \cdot U_1 = \rho \cdot A_{\delta} \cdot U_{2-3} = \rho \cdot A_{+\infty} \cdot U_4 = \dot{m}_{-\infty} = \dot{m}_{\delta} = \dot{m}_{+\infty} \quad (3.2)$$

#### ii. Αρχή Διατήρησης Γραμμικής Ορμής

Εφαρμόζοντας την Αρχή Διατήρησης της Γραμμικής Ορμής στον όγκο ελέγχου της *Εικόνας 3.2* είναι δυνατόν να βρούμε την καθαρή δύναμη σε αυτόν. Η δύναμη αυτή είναι ίση και αντίθετη από την ώση ( $T$ ). Επομένως, για μονοδιάστατη, ασυμπίεστη και χρονικά αμετάβλητη ροή, η ώση είναι ίση και αντίθετη με το ρυθμό μεταβολής της ορμής του ρεύματος αέρα και ορίζεται ως:

$$T = U_1 (\rho \cdot A \cdot U) - U_4 (\rho \cdot A \cdot U), \quad (3.3)$$

και εφόσον ο ρυθμός ροής της μάζας είναι σταθερός, η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφτεί και ως:[14]

$$T = \dot{m}(U_1 - U_4) \quad (3.4)$$

#### iii. Ενεργειακός Ισολογισμός

Με την υπόθεση μη εμφάνισης συστρωφής ανάντη και κατάντη του δίσκου προκύπτει ότι στους δύο υποχώρους υπάρχει διατήρηση ενέργειας του ρευστού (εξίσωση Bernoulli), όχι όμως στην αρχή και το τέλος του δίσκου ενέργειας, καθώς αυτός αφαιρεί ενέργεια από το ρευστό, όταν έρχεται σε επαφή. Συνεπώς για τον υποχώρο ανάντη του δίσκου ισχύει:

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho U_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho U_2^2, \quad (3.5)$$



ενώ αντίστοιχα για τον υποχώρο κατάντη του δίσκου ισχύει:

$$p_3 + \frac{1}{2}\rho U_3^2 = p_4 + \frac{1}{2}\rho U_4^2, \quad (3.6)$$

Αφαιρώντας τις δύο σχέσεις κατά μέλη προκύπτει:

$$p^- - p^+ = \frac{1}{2}\rho (U_1^2 - U_4^2) \quad (3.7)$$

Ο δίσκος ασκεί ώση αντίθετη από τη διεύθυνση του ανέμου. Αν υποθέσουμε πως η πίεση δεν είναι μία συνάρτηση εξαρτώμενη από το χρόνο, τότε δεν υπάρχει και περιοδικότητα στην ταχύτητα ροής στο επίπεδο του δίσκου. Εάν θεωρήσουμε, επίσης, πως οι πιέσεις ανάντη και κατάντη του ροϊκού σωλήνα είναι ίσες και η ταχύτητα κατά μήκος του δίσκου παραμένει ίδια ( $U_2 = U_3$ ) τότε και η ώθηση μπορεί να εκφραστεί ως το καθαρό άθροισμα των πιέσεων που ασκούνται σε κάθε πλευρά του δίσκου, πολλαπλασιασμένων με το εμβαδόν επιφάνειας του:

$$T = A_2(p_2 - p_3), \quad (3.8)$$

Εάν επιλύσουμε για  $(p_2 - p_3)$  χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (3.5), (3.6) και αντικαταστήσουμε στην *Εξίσωση 3.8* προκύπτει:

$$T = \frac{1}{2}\rho A_2(U_1^2 - U_4^2) \quad (3.9)$$

Εξισώνοντας τις τιμές της ώσης από τις *Εξισώσεις (3.4), (3.9)* και γνωρίζοντας ότι η ροή της μάζας είναι  $(P \cdot A_2 \cdot U_2)$  προκύπτει:

$$U_2 = \frac{U_1 + U_4}{2} \quad (3.10)$$

Κατά συνέπεια, χρησιμοποιώντας αυτό το μοντέλο, η ταχύτητα του ανέμου στο επίπεδο του δίσκου θα είναι ο μέσος όρος των ταχυτήτων ανάντη και κατάντη αυτού. [14]

### 3.1.2 Συντελεστής αξονικής επαγωγής (Axial interference factor)

Για την εύρεση της ποσοστιαίας επιβράδυνσης του αέρα στο δίσκο χρησιμοποιείται ο συντελεστής αξονικής επαγωγής  $\alpha$  ο οποίος ορίζεται ως:

$$\alpha = \frac{U_1 - U_2}{U_1}, \quad (3.11)$$

και η ταχύτητα στον δίσκο:

$$U_2 = U_1(1 - \alpha) \quad (3.12)$$

Τέλος, η ταχύτητα κατάντη του δίσκου:

$$U_4 = U_1(1 - 2\alpha) \quad (3.13)$$

Η τελευταία σχέση δηλώνει ότι η επιβράδυνση μακριά κατάντη του δίσκου είναι διπλάσια της ποσοστιαίας επιβράδυνσης του ρευστού στο επίπεδο του δίσκου.

Η ποσότητα  $(U_1 \cdot a)$  είναι η επαγόμενη ταχύτητα στο δίσκο, επομένως η ταχύτητα του ανέμου στον ρότορα είναι ένας συνδυασμός της ταχύτητας της ελεύθερης ροής του ρευστού και της επαγόμενης ταχύτητας του ανέμου.

Είναι πολύ σημαντικό να τονιστεί πως η θεωρία του δίσκου ενέργειας παύει να ισχύει, όταν η επαγόμενη ταχύτητα φτάσει στο  $1/2$  διότι η ταχύτητα κατάντη το δίσκου θα έχει επιβραδυνθεί σε τέτοιο βαθμό που θα έχει γίνει μηδενική.[10]

### 3.1.3 Συντελεστής Ισχύος $C_p$ (Power Coefficient)

Η ισχύς εξόδου είναι ίση με την ώθηση επί την ταχύτητα στο δίσκο:

$$P = \frac{1}{2} \rho A_2 (U_1^2 - U_4^2) U_2 = \frac{1}{2} \rho A_2 U_2 (U_1 + U_4)(U_1 - U_4)$$

Αντικαθιστώντας τις ταχύτητες  $U_2, U_4$  από τις Εξισώσεις (3.12), (3.13) προκύπτει:

$$P = \frac{1}{2} \rho A U^3 4a(1-a)^2 \quad (3.14)$$

Όπου η περιοχή όγκου ελέγχου στο δίσκο αντικαθίσταται με το  $A$  και η ελεύθερη ταχύτητα ροής  $U_1$  με το  $U$ . [10]

Η απόδοση του ρότορα της ανεμογεννήτριας χαρακτηρίζεται από τον συντελεστή ισχύος ο οποίος είναι:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A U^3} = \frac{\text{Ισχύς Ρότορα}}{\text{Ισχύς Ανέμου}} \quad (3.15)$$

Ο μη-διαστατικός συντελεστής ισχύος αντιπροσωπεύει το κλάσμα της ισχύος του ανέμου που εξάγεται από τον ρότορα. Από την Εξίσωση 3.14 ο συντελεστής ισχύος είναι:

$$C_p = 4a(1-a)^2 \quad (3.16)$$

Ο μέγιστος  $C_p$  προσδιορίζεται λαμβάνοντας την παράγωγο του συντελεστή ισχύος της Εξίσωσης 3.16 ως προς το  $a$  και μηδενίζοντας το δίνοντας  $a = 1/3$ . Έτσι:

$$C_{p_{max}} = \frac{16}{27} = 0,5926 = 59,26\% \quad (3.17)$$

Η μέγιστη αυτή τιμή καλείται όριο του *Betz*, από το Γερμανό *Albert Betz*, και δηλώνει πως ακόμα και αν σχεδιαζόταν ένας ρότορας με τη βέλτιστη αεροδυναμική δεν θα μπορούσε να δεσμεύσει ισχύ ανέμου μεγαλύτερη αυτού του ορίου. Συνεπώς, αυτό το όριο μπορεί να θεωρηθεί και ο μέγιστος βαθμός απόδοσης του συστήματος μίας ανεμογεννήτριας.[10]

Με βάση, λοιπόν, όλα τα παραπάνω στην περίπτωση της βέλτιστης λειτουργίας η ταχύτητα  $U$  του ανέμου μειώνεται στα  $2/3$  πάνω στον δίσκο ενέργειας και στο  $1/3$  πολύ μακριά κατάντη αυτού[10]. Δηλαδή είναι:

$$U_2 = \left(\frac{2}{3}\right) \cdot U, \quad (3.18)$$

και

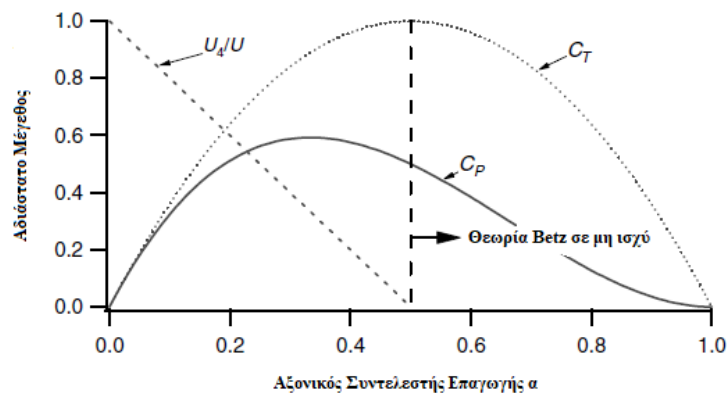
$$U_4 = \left(\frac{1}{3}\right) \cdot U \quad (3.19)$$

Από τις εξισώσεις (3.9), (3.12) και (3.13) η αξονική ώση στο δίσκο θα είναι:

$$T = \frac{1}{2} AU^2 [4a(1-a)] \quad (3.20)$$

Παρόμοια με την ισχύ, η ώθηση σε μία ανεμογεννήτρια μπορεί να χαρακτηριστεί από έναν μη-διαστατικό συντελεστή ώθησης:

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho AU^2} = \frac{\text{Δύναμη ώσης}}{\text{Δυναμική δύναμη}} \quad (3.21)$$



Διάγραμμα 3.1: Καμπύλη  $C_p$  και  $C_T$  συναρτήσει του  $a$ .

[10]

Από το διάγραμμα 3.1 παρατηρούμε ότι ο συντελεστής ώσης για μία ιδανική ανεμογεννήτρια είναι ίσος με  $4a(1-a)$ . Η μέγιστη τιμή του είναι 1.0 όταν ο συντελεστής επαγωγής  $a$  είναι 0.5 και η ταχύτητα κατάντη είναι μηδέν. Αντίστοιχα, στη μέγιστη ισχύ εξόδου ( $a = 1/3$ ) ο συντελεστής ώσης  $C_T$  έχει τιμή 8/9.[10]

Το όριο *Betz* είναι η μέγιστη θεωρητικά ισχύ που μπορεί να φθάσει μία ανεμογεννήτρια. Στην πράξη, τρεις παράμετροι οδηγούν σε μείωση της μέγιστης ισχύος που μπορεί να επιτευχθεί:

1. Περιστροφή του κύματος αέρα που δημιουργείται πίσω από το ρότορα
2. Πεπερασμένος αριθμός λεπίδων και οι σχετικές απώλειες αυτών (tip losses)
3. Μη-μηδενική αεροδυναμική αντίσταση

Να σημειωθεί πως η συνολική απόδοση της ανεμογεννήτριας είναι συνάρτηση τόσο του συντελεστή ισχύος  $C_p$  όσο και της απόδοσης των μηχανικών και ηλεκτρικών μερών. Έτσι προκύπτει:

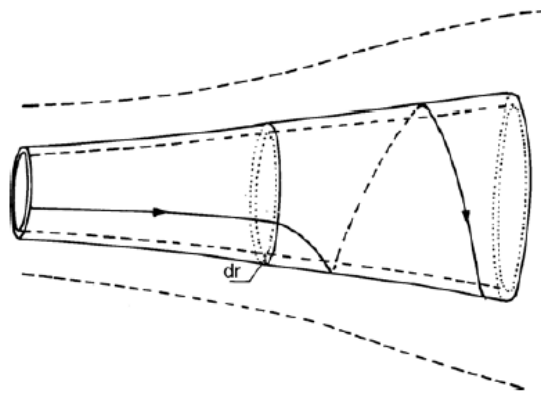
$$n_{ολικό} = \frac{P_{out}}{\frac{1}{2}\rho AU^3} = n_{mech} \cdot n_{el} \cdot C_p \quad (3.22)$$

Συνεπώς:

$$P_{out} = \frac{1}{2}\rho AU^3(n_{mech} \cdot n_{el} \cdot C_p) \quad (3.23)$$

### 3.2 Γενική θεωρία ορμής με περιστρεφόμενο απόρρευμα

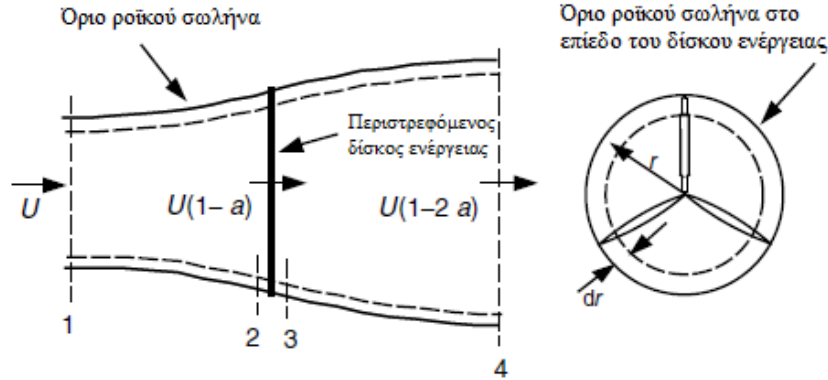
Στην ανάλυση της αξονικής ορμής θεωρήθηκε πως δεν υπήρχε περιστρεφόμενο απόρρευμα κατάντη του ρότορα. Ωστόσο, σε πραγματικές συνθήκες, η ενέργεια του ρευστού μέσου διοχετεύεται στο ρότορα και κατά επέκταση στον άξονα περιστροφής του, δημιουργώντας ένα απόρρευμα το οποίο περιστρέφεται με αντίθετη φορά από αυτή του ρότορα. Λόγω του γεγονότος ότι υπάρχει και περιστροφική κινητική ενέργεια στο απόρρευμα σε συνδυασμό με την μεταφορική κινητική ενέργεια του ρευστού, αναμένεται λιγότερη αποσπώμενη ισχύ σε σχέση με εκείνη που θα προέκυπτε μόνο από τη μεταφορική κινητική ενέργεια.[16]



Σχήμα 3.3: Μοντέλο ροϊκού σωλήνα με δημιουργία απορρεύματος κατάντη του ρότορα.

[10]

Γενικά, η επιπλέον κινητική ενέργεια του απορρεύματος μεγαλώνει όσο μεγαλώνει και η παραγόμενη ροπή του συστήματος. Συνεπώς, ανεμογεννήτριες με χαμηλή ταχύτητα περιστροφής και υψηλή ροπή παρουσιάζουν μεγαλύτερες απώλειες απορρεύματος συγκριτικά με αυτές που έχουν χαμηλότερη ροπή. Στο σχήμα 3.4 παρατηρούμε τις παραμέτρους που σχετίζονται στην ανάλυση αυτού του μοντέλου:



Σχήμα 3.4: Γεωμετρική ανάλυση ρότορα, όπου  $U$  η ταχύτητα της αδιατάρακτης ροής,  $a$  ο συντελεστής αξονικής επαγωγής και  $r$  η ακτίνα.

[10]

Αν υποθέσουμε ότι η γωνιακή ταχύτητα που προσδίδεται στο ρεύμα ροής  $\omega$ , είναι μικρή συγκριτικά με τη γωνιακή ταχύτητα,  $\Omega$ , της ανεμογεννήτριας, τότε μπορεί να υποτεθεί ότι και η πίεση μακριά από το απόρρευμα είναι ίση με την πίεση της ελεύθερης ροής. Η ανάλυση που ακολουθεί βασίζεται στη χρήση του δακτυλιοειδούς σωλήνα ροής με ακτίνα  $r$  και πάχος  $dr$ , με αποτέλεσμα να υπάρχει μία επιφάνεια δακτυλίου ίση με  $(2 \cdot \pi r \cdot dr)$ . Χρειάζεται να τονιστεί πως οι πιέσεις, το περιστρεφόμενο απόρρευμα και οι συντελεστές επαγωγής ( $a$  και  $a'$ ) είναι συναρτήσεις της ακτίνας.

Εάν χρησιμοποιήσουμε τον όγκο ελέγχου που κινείται με τη γωνιακή ταχύτητα των πτερυγίων, η εξίσωση ενέργειας μπορεί να εφαρμοστεί στα σημεία πριν και μετά του πτερυγίου, ώστε να εξαχθεί μία έκφραση για τη διαφορά πίεσης μεταξύ των λεπίδων.

Να σημειωθεί πως σε όλη την επιφάνεια του δίσκου ροής, η γωνιακή ταχύτητα του αέρα αυξάνεται όσο απομακρυνόμαστε από τη βάση του πτερυγίου προς την κορυφή του, ενώ αντίθετα, η αξονική συνιστώσα της ταχύτητας παραμένει σταθερή. Έτσι η διαφορά πίεσης πριν και μετά το πτερύγιο θα είναι:

$$p_2 - p_3 = \rho \left( \Omega + \frac{1}{2} \omega \right) \omega r^2 \quad (3.24)$$

Η προκύπτουσα ώση σε ένα δακτυλιοειδές στοιχείο,  $dT$ , θα είναι:

$$dT = (p_2 - p_3) dA = \left[ \rho \left( \Omega + \frac{1}{2} \omega \right) \omega r^2 \right] 2\pi r dr \quad (3.25)$$

Ένας γωνιακός συντελεστής επαγωγής  $a'$  προκύπτει και ορίζεται ως:

$$a' = \frac{\omega}{2\Omega} \quad (3.26)$$

Όταν η περιστροφή του απορρεύματος περιλαμβάνεται στην ανάλυση, η επαγόμενη ταχύτητα στον ρότορα αποτελείται τόσο από την αξονική συνιστώσα,  $U \cdot a$  όσο και από

το κάθε στοιχείο στο επίπεδο του ρότορα ( $r \cdot \Omega \cdot a'$ ). Συνεπώς, η έκφραση της ώσης θα γίνει:

$$dT = 4a'(1 + a') \frac{1}{2} \rho \Omega^2 r^2 2\pi r dr \quad (3.27)$$

Αν ακολουθήσουμε την προηγούμενη ανάλυση της γραμμικής ορμής, η ώση σε μία δακτυλιοειδή διατομή μπορεί επίσης να προσδιοριστεί με την ακόλουθη έκφραση που χρησιμοποιεί τον παράγοντα της αξονικής επαγωγής  $\alpha$ :

$$dT = 4\alpha(1 - \alpha) \frac{1}{2} \rho U^2 2\pi r dr, \quad (3.28)$$

και εξισώνοντας τις δύο εκφράσεις για την ώση, προκύπτει:

$$\frac{\alpha(1 - \alpha)}{a'(1 + a')} = \frac{\Omega^2 r^2}{U^2} = \lambda_r^2, \quad (3.29)$$

όπου  $\lambda_r$  ο τοπικός λόγος ταχύτητας και ορίζεται ως:

$$\lambda_r = \frac{\Omega r}{U} \quad (3.30)$$

Αντίστοιχα, με  $\lambda$  συμβολίζεται ο λόγος ταχύτητας αιχμής που εμφανίζεται στην άκρη του δίσκου, δηλαδή όταν  $r = R$ :

$$\lambda = \frac{\Omega R}{U} \quad (3.31)$$

Η αναλογία που θα πρέπει να επιτευχθεί μεταξύ ταχύτητας πτερυγίων και ταχύτητας ανέμου καθορίζει την τελική ισχύ που παράγει το σύστημα.[17]

Για το λόγο αυτό για να διατηρήσουμε τη μέγιστη ισχύ της ανεμογεννήτριας επιδιώκεται ο βέλτιστος λόγος ταχύτητας (Optimal TSR), δηλαδή ο χρόνος επανάκτησης του τυρβώδη ανέμου,  $t_{wind}$ , που προκλήθηκε από το περιστρεφόμενο πτερύγιο, να ισούται με το χρόνο που απαιτείται έως ότου το επόμενο πτερύγιο φτάσει στην προηγούμενη θέση,  $t_{blade}$ .[18]

$$t_{wind} \approx t_{blade}$$

Εάν ο ρότορας περιστρέφεται πολύ αργά, το μεγαλύτερο μέρος της ελεύθερης ροής του αέρα θα περνάει μέσα από το κενό των πτερυγίων και δεν θα δεσμεύεται η κινητική ενέργεια του. Αντίθετα, εάν ο ρότορας περιστρέφεται πολύ γρήγορα, τα πτερύγια θα λειτουργούν σαν ένα συμπαγές τοίχωμα που δεν θα επιτρέπει στον άνεμο να περάσει μέσω αυτών.[18]

$$t_{wind} > t_{blade}$$

και

$$t_{wind} < t_{blade}$$

Ένα σημαντικό μέγεθος που εξάγεται κατά τον υπολογισμό αυτής της μεθόδου είναι η ροπή στον ρότορα η οποία εξάγεται με την εφαρμογή της διατήρησης της στροφορμής. Συνεπώς, η ροπή  $Q$  που ασκείται στον ρότορα πρέπει να ισούται με την

αλλαγή στη γωνιακή ορμή του απορρεύματος. Έτσι η ροπή που θα αναπτύσσεται σε κάποιο σημείο του δακτυλιοειδούς εμβαδού θα είναι:

$$dQ = d\dot{m}(\omega r)(r) = (\rho U_2 2\pi r dr)(\omega r)(r) \quad (3.32)$$

Εφόσον το  $U_2 = U(1 - a)$  και  $\alpha' = \frac{\omega}{2\Omega}$  η παραπάνω έκφραση μπορεί να γραφτεί:

$$dQ = 4\alpha'(1 - \alpha) \frac{1}{2} \rho U \Omega r^2 2\pi r dr, \quad (3.33)$$

και η ισχύς που παράγεται σε κάθε σημείο είναι:

$$dP = \Omega dQ \quad (3.34)$$

Αν αντικαταστήσουμε το  $dQ$  και χρησιμοποιήσουμε το  $\lambda_r$  η έκφραση της ισχύος θα γίνει:

$$dP = \frac{1}{2} \rho A U^3 \left[ \frac{8}{\lambda^2} \alpha' (1 - \alpha) \lambda_r^3 d\lambda_r \right] \quad (3.35)$$

Αυτό που παρατηρούμε είναι πως η ισχύς σε οποιοδήποτε δακτυλιοειδές σημείο είναι συνάρτηση του  $\alpha$ ,  $\alpha'$  και του  $\lambda$ . Οι συντελεστές  $\alpha$  και  $\alpha'$  καθορίζουν το μέγεθος και την κατεύθυνσή της ροής του αέρα στο επίπεδο του δίσκου.

Η σταδιακά αυξανόμενη συμβολή στον συντελεστή ισχύος  $dC_p$  από κάθε δακτυλιοειδές δακτύλιο δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$dC_p = \frac{dP}{\frac{1}{2} \rho A U^3}, \quad (3.36)$$

και ο συντελεστής ισχύος είναι:

$$C_p = \frac{8}{\lambda^2} \int_0^\lambda \alpha' (1 - \alpha) \lambda_r^3 d\lambda_r \quad (3.37)$$

Για την ενσωμάτωση της παραπάνω έκφρασης, χρειάζεται ο συσχετισμός των μεταβλητών  $\alpha$ ,  $\alpha'$  και  $\lambda_r$ . Επιλύοντας την Εξίσωση 3.25 για να εκφράσουμε το  $\alpha'$  σε όρους  $\alpha$ , προκύπτει:

$$\alpha' = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{\left[1 + \frac{4}{\lambda_r^2} \alpha(1 - \alpha)\right]} \quad (3.38)$$

Όταν ο όρος  $\alpha'(1 - \alpha)$  είναι στη μέγιστη δυνατή τιμή, τότε επιτυγχάνεται και η μέγιστη δυνατή παραγωγή. Με την αντικατάσταση της τιμής  $\alpha'$  από την παραπάνω εξίσωση σε  $\alpha'(1 - \alpha)$  και μηδενίζοντας την παράγωγο ως προς το  $\alpha$  παίρνουμε:

$$\lambda_r^2 = \frac{(1 - \alpha)(4\alpha - 1)^2}{1 - 3\alpha} \quad (3.39)$$

Η παραπάνω εξίσωση ορίζει τον συντελεστή  $\alpha$  για τη μέγιστη ισχύ ως συνάρτηση του  $\lambda_r$  σε κάθε δακτυλιοειδή δακτύλιο. Αντικαθιστώντας την εξίσωση 3.25 προκύπτει ότι η μέγιστη παραγωγή ισχύος σε κάθε δακτυλιοειδές δακτύλιο είναι:

$$\alpha' = \frac{1 - 3\alpha}{4\alpha - 1} \quad (3.40)$$

Εάν παραγωγίσουμε την σχέση 3 ως προς το  $\alpha$ , προκύπτει μία σχέση μεταξύ  $d\lambda_r$  και  $d\alpha$  στις συνθήκες που έχουν ως αποτέλεσμα τη μέγιστη παραγωγή ισχύος:

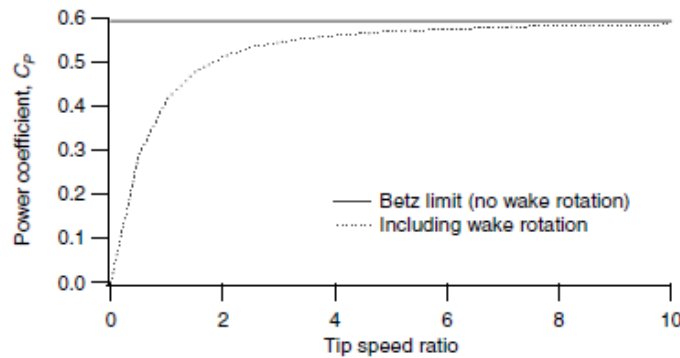
$$2\lambda_r d\lambda_r = \left[ \frac{6(4\alpha - 1)(1 - 2\alpha)^2}{(1 - 3\alpha)^2} \right] d\alpha \quad (3.41)$$

Στη συνέχεια, αν αντικαταστήσουμε τις εξισώσεις (3) και (5) στη σχέση του συντελεστή ισχύος (1) θα προκύψει:

$$C_{Pmax} = \frac{24}{\lambda^2} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \left[ \frac{(1 - \alpha)(1 - 2\alpha)(1 - 4\alpha)}{(1 - 3\alpha)} \right]^2 d\alpha \quad (3.42)$$

Στην παραπάνω σχέση το κατώτερο όριο της ολοκλήρωσης  $\alpha_1$  αντιστοιχεί στον αξονικό συντελεστή επαγωγής για  $\lambda_r = 0$  και το ανώτερο όριο  $\alpha_2$  αντιστοιχεί για  $\lambda_r = \lambda$ . Επιπλέον από την Εξίσωση 3 προκύπτει:

$$\lambda^2 = \frac{(1 - \alpha_2)(1 - 4\alpha_2)^2}{(1 - 3\alpha_2)} \quad (3.43)$$



*Διάγραμμα 3.2: Μέγιστος θεωρητικός  $C_p$  ως συνάρτηση του  $\lambda$  για ιδανική ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα με ή χωρίς απόρρευμα περιστροφής.*

[10]

## Κεφάλαιο 4. Θεωρία Ορμής Στοιχείων Πτερύγωσης (Blade Element Momentum Theory, BEM)

Στο προηγούμενο κεφάλαιο καθορίστηκε το πεδίο ροής γύρω από έναν ρότορα ο οποίος χαρακτηρίζεται ως δίσκος ενέργειας και αναλύθηκε με τη χρήση διατήρησης της γραμμικής και γωνιακής ορμής.

Στο παρόν κεφάλαιο θα χρησιμοποιηθεί η θεωρία ορμής στοιχείων (BEM) η οποία είναι ένας συνδυασμός της θεωρίας ορμής (Momentum Theory) και της θεωρίας στοιχείων πτερυγίου (Blade Element Theory). Η θεωρία ορμής στοιχείων, για λόγους



ευκολίας θα ορίζεται ως BEM, αναλύει τα αεροδυναμικά φορτία των πτερυγίων μίας ανεμογεννήτριας ως συνάρτηση της γεωμετρίας τους εφαρμόζοντας τη διατήρηση της γραμμικής και γωνιακής ορμής μέσα σε έναν όγκο ελέγχου. Η χρησιμότητα της BEM έγκειται στο γεγονός ότι μπορεί να συσχετίσει τη γεωμετρία της διατομής του πτερυγίου με την ικανότητα του ρότορα να αντλεί ενέργεια από τον άνεμο.

#### 4.1 Θεωρία Ορμής (Momentum Theory)

Σε αυτή τη θεωρία η δύναμη που αναπτύσσεται σε ένα πτερύγιο επιδρά αποκλειστικά στη μεταβολή της ορμής του αέρα που διέρχεται μέσω του δίσκου που σαρώνεται από τις πτερωτές [19].

Τα αποτελέσματα από τη γενική θεωρία ορμής με περιστρεφόμενο απόρρευμα, εφαρμόζοντας τη Διατήρηση της Γραμμικής Ορμής σε έναν όγκο ελέγχου με ακτίνα  $r$  και πάχος  $dr$  είναι μία έκφραση για τη διαφορική συνεισφορά στην ώση:

$$dT = \rho U^2 4a(1 - a)\pi r dr \quad (4.1)$$

Αντίστοιχα, από την εξίσωση της διατήρησης της γωνιακής ορμής η διαφορική ροπή  $Q$  που μεταφέρεται σε κάθε σημείο του πτερυγίου είναι:

$$dQ = 4a'(1 - a)\rho U \pi r^3 \Omega dr \quad (4.2)$$

Συνεπώς, οι όροι  $dT$  και  $dQ$  εκφράζουν την ώση και τη ροπή ενός δακτυλιοειδούς σωλήνα με πλάτος  $dr$  ως συναρτήσεις των συντελεστών  $a$  και  $a'$ .

#### 4.2 Θεωρία Ορμής Στοιχείων Πτερύγωσης (Blade Element Theory)

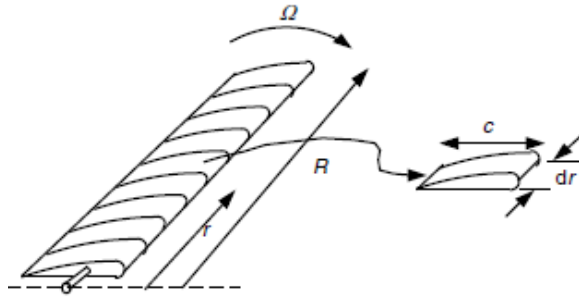
Με τη θεωρία ορμής στοιχείων πτερύγωσης οι δυνάμεις στα πτερύγια μπορούν να εκφραστούν και ως συναρτήσεις των συντελεστών άντωσης  $C_f$  και αντίστασης  $C_d$  σε σχέση με τη γωνία προσβολής  $\alpha$ .

Για την ανάλυση των Στοιχείων Πτερύγωσης θα πρέπει το πτερύγιο να χωριστεί σε  $N$  ίσα τμήματα και να ισχύουν οι παρακάτω παραδοχές:

- Κάθε τμήμα να είναι ανεξάρτητο αεροδυναμικά από τα υπόλοιπα, ώστε να μην αναπτύσσεται ακτινική ροή
- Οι δυνάμεις στα πτερύγια να καθορίζονται αποκλειστικά από τα χαρακτηριστικά των συντελεστών  $C_f$  και  $C_d$  που προκύπτουν από το σχήμα της κάθε διατομής.

Ταυτόχρονα, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι κατά την ανάλυση των δυνάμεων σε κάθε τμήμα, οι δυνάμεις άντωσης και αντίστασης είναι κάθετες και παράλληλες στο σχετικό άνεμο, ο οποίος είναι το διανυσματικό άθροισμα της ταχύτητας του ρότορα  $U(1 - a)$ , και της ταχύτητας του ανέμου, λόγω περιστροφής του πτερυγίου. Αυτή η περιστροφική συνιστώσα είναι το διανυσματικό άθροισμα της ταχύτητας του τμήματος του πτερυγίου  $\Omega r$  και η επαγόμενη γωνιακή ταχύτητα στα πτερύγια που προκύπτει από τη διατήρηση της γωνιακής ορμής η οποία είναι:

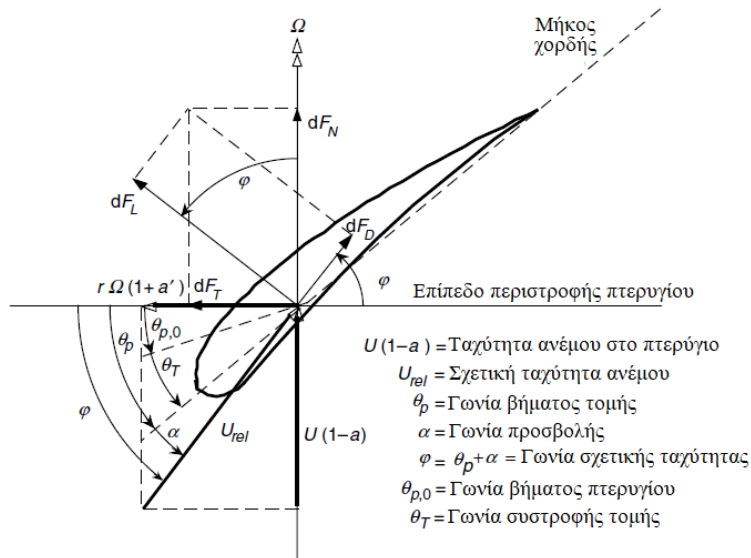
$$\frac{\Omega r}{2} \text{ ή } \Omega r + \left(\frac{\omega}{2}\right)r = \Omega r + \Omega a' r = \Omega r(1 + a') \quad (4.3)$$



Σχήμα 4.1: Σχηματική αναπαράσταση πτερυγίου χωρισμένου σε N τμήματα.

[10]

Στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε ένα πτερόγιο μίας ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα όπου είναι χωρισμένο σε N ίσα μέρη. Το  $c$  συμβολίζει το μήκος χορδής της διατομής, το  $dr$  το ακτινικό μήκος του τμήματος, το  $R$  την ακτίνα του ρότορα, το  $r$  την ακτίνα κατά μήκος κάθε τμήματος και το  $\Omega$  τη γωνιακή ταχύτητα του ρότορα.



Σχήμα 4.2: Ανάλυση γεωμετρίας πτερυγίου ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα.

[10]

Η γωνία  $\varphi$  του σχετικού ανέμου είναι το άθροισμα της γωνίας βήματος της τομής και της γωνίας προσβολής, δηλαδή:

$$\varphi = \theta_p + \alpha, \quad (4.4)$$

και η εφαπτομένη της γωνίας  $\varphi$  είναι:

$$\tan\varphi = \frac{U(1-a)}{\Omega r(1+a')} = \frac{1-a}{(1+a')\lambda_r} \quad (4.5)$$

Η σχετική ταχύτητα του ανέμου είναι:

$$U_{rel} = \frac{U(1-a)}{\sin\varphi} \quad (4.6)$$

Η δύναμη άντωσης κατά μήκος του κάθε πτερυγίου  $dr$  εγκάρσια στη διεύθυνση του  $U_{rel}$  είναι:

$$dF_L = C_l \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 c dr \quad (4.7)$$

Η οπισθέλκουσα δύναμη η οποία είναι παράλληλη στο  $U_{rel}$  είναι:

$$dF_D = C_d \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 c dr \quad (4.8)$$

Η δύναμη που αναπτύσσεται κάθετα στο επίπεδο περιστροφής, που συμβάλλει στην ώση είναι:

$$dF_N = dF_L \cos\varphi + dF_D \sin\varphi \quad (4.9)$$

Η δύναμη που αναπτύσσεται εφαπτομενικά στον κύκλο που σαρώνει ο ρότορας και δημιουργεί ωφέλιμη ροπή είναι:

$$dF_T = dF_L \sin\varphi - dF_D \cos\varphi \quad (4.10)$$

Εάν ο ρότορας έχει  $B$  αριθμό πτερυγίων, τότε η συνολική δύναμη που ασκείται σε κάθε τομή με απόσταση  $r$  από το κέντρο του ρότορα είναι:

$$dF_N = B \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 (C_l \cos\varphi + C_d \sin\varphi) c dr \quad (4.11)$$

Η διαφορική ροπή λόγω της εφαπτομενικής δύναμης που επενεργεί σε απόσταση  $r$  από το κέντρο είναι:

$$dQ = Br dF_T \quad (4.12)$$

Επομένως, η αναπτυσσόμενη ροπή από τα πτερύγια εύρους  $dr$  είναι:

$$dQ = B \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 (C_l \sin\varphi - C_d \cos\varphi) c r dr \quad (4.13)$$

Ως αποτέλεσμα όλων των παραπάνω είναι πως η επίδραση της οπισθέλκουσας είναι η μείωση της ροπής και η αύξηση της ώσης. Έτσι, λοιπόν οι εξισώσεις (4.11) και (4.13) ορίζουν την ώση και την εφαπτομενική ροπή στο δακτυλιοειδές τμήμα του ρότορα ως συνάρτηση των γωνιών και των χαρακτηριστικών της αεροτομής.

### 4.3 Θεωρία Ορμής Στοιχείων Πτερύγωσης με περιστρεφόμενο απόρρευμα

Χρησιμοποιώντας τη θεωρία ορμής και τη θεωρία ορμής στοιχείων πτερύγωσης συνεχίζουμε την ανάλυση και εξετάζουμε το μη γραμμικό εύρος του συντελεστή  $C_l$  συναρτήσει της γωνίας προσβολής στην απώλεια στήριξης.

Σε αυτή την ανάλυση υποθέτουμε ότι η κατανομή του μήκους της χορδής  $c$  και η συστροφή του πτερυγίου είναι γνωστά. Γνωστή δεν είναι η γωνία προσβολής  $\alpha$ , η οποία όμως βρίσκεται με επιπλέον σχέσεις που καθορίζουν και την τελική απόδοση της ανεμογεννήτριας.

Οι δυνάμεις και οι ροπές που προέρχονται από τις δύο προηγούμενες θεωρίες πρέπει να εξισωθούν, ώστε να εξαχθεί η συνθήκη ροής για τον σχεδιασμό της ανεμογεννήτριας.

Οι εξισώσεις (4.11) και (4.13) μπορούν να γραφούν:

$$dF_N = \sigma' \pi r \frac{U^2(1-\alpha)^2}{\sin^2 \varphi} (C_l \cos \varphi + C_d \sin \varphi) r dr \quad (4.14)$$

$$dQ = \sigma' \pi r \frac{U^2(1-\alpha)^2}{\sin^2 \varphi} (C_l \sin \varphi - C_d \cos \varphi) r^2 dr \quad (4.15)$$

Όπου το  $\sigma'$  ορίζεται ως τοπικός παράγοντας στιβαρότητας και είναι το κλάσμα της δακτυλιοειδούς επιφάνειας του όγκου ελέγχου που καλύπτεται από τα πτερύγια και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\sigma'(r) = \frac{c(r)B}{2\pi r} \quad (4.16)$$

Είναι χρήσιμο να τονιστεί πως κατά τον υπολογισμό των συντελεστών  $\alpha$  και  $\alpha'$ , είναι ορθό ο συντελεστής οπισθέλκουσας  $C_d$  να ορίζεται ίσος με το μηδέν. Έτσι, όταν οι εξισώσεις (4.2) και (4.15) εξισώνονται για  $C_d = 0$  προκύπτει:

$$\frac{\alpha'}{(1-\alpha)} = \frac{\sigma' C_l}{(4\lambda_r \sin \varphi)} \quad (4.17)$$

Εξισώνοντας τις εξισώσεις (4.1) και (4.14) προκύπτει:

$$\frac{\alpha}{(1-\alpha)} = \frac{\sigma' C_l \cos \varphi}{(4 \sin^2 \varphi)} \quad (4.18)$$

Από την Εξίσωση (4.5) που συσχετίζει τους συντελεστές  $\alpha$ ,  $\alpha'$  και το  $\lambda_r$ , και τις εξισώσεις (4.1) και (4.14) προκύπτουν οι παρακάτω χρήσιμες σχέσεις:

$$C_l = 4 \sin \varphi \frac{(\cos \varphi - \lambda_r \sin \varphi)}{\sigma' (\sin \varphi + \lambda_r \cos \varphi)}, \quad (4.19)$$

και

$$\frac{\alpha'}{(1+\alpha')} = \frac{\sigma' C_l}{(4 \cos \varphi)}, \quad (4.20)$$

$$\frac{\alpha}{\alpha'} = \frac{\lambda_r}{\tan \varphi}, \quad (4.21)$$

$$\alpha = \frac{1}{[(1 + 4 \sin^2 \varphi) / (\sigma' C_l \cos \varphi)]}, \quad (4.22)$$

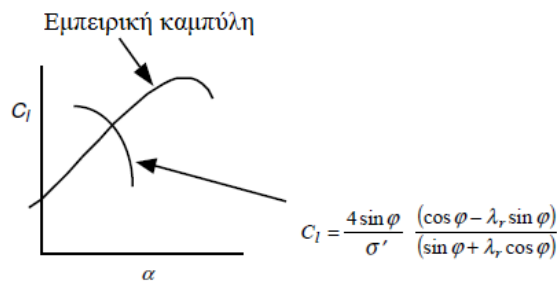
$$\alpha' = \frac{1}{\left[ \left( \frac{4 \cos \varphi}{\sigma' C_l} \right) - 1 \right]} \quad (4.23)$$

#### 4.4 Μέθοδοι επίλυσης

Για τον προσδιορισμό των συνθηκών ροής και των δυνάμεων που αναπτύσσονται σε κάθε τομή του πτερυγίου προτείνονται δύο μέθοδοι επίλυσης.

Η πρώτη μέθοδος χρησιμοποιεί τα μετρούμενα χαρακτηριστικά της αεροτομής και τις εξισώσεις *BEM* για άμεση επίλυση του  $C_l$  και του  $\alpha$ . Η μέθοδος αυτή επιλύεται αριθμητικά αλλά προσφέρεται περισσότερο για γραφική λύση που δείχνει επακριβώς τις συνθήκες ροής που αναπτύσσονται γύρω από το πτερύγιο και την ύπαρξη πολλαπλών λύσεων.

Ειδικότερα, εφόσον η γωνία  $\varphi$  της σχετικής ταχύτητας ισούται με το άθροισμα της γωνίας προσβολής  $\alpha$  και της γωνίας βήματος  $\theta_p$  που σχηματίζεται από τη διατομή του εκάστοτε πτερυγίου, προκύπτουν δύο άγνωστοι, ο συντελεστής άντωσης  $C_l$  και η γωνία προσβολής  $\alpha$  για κάθε σημείο. Αντλώντας εμπειρικά δεδομένα για τη συμπεριφορά της εκάστοτε αεροτομής, βρίσκονται οι δύο άγνωστοι και στη συνέχεια καθορίζονται οι συντελεστές  $\alpha$  και  $\alpha'$  από τις εξισώσεις (4.20) και (4.23). Για τη διασφάλιση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν, ο συντελεστής  $\alpha$  στο σημείο τομής των καμπυλών θα πρέπει να είναι μικρότερος από 0.5, όπως φαίνεται στο *διάγραμμα 4.1*.



*Διάγραμμα 4.1:* Μέθοδος γραφικής επίλυσης δύο διαστάσεων του συντελεστή άντωσης  $C_l$  συναρτήσει της γωνίας προσβολής  $\alpha$ .

[10]

Αντίστοιχα, η δεύτερη μέθοδος ξεκινά υποθέτοντας αρχικές τιμές για το  $\alpha$  και το  $\alpha'$  με σκοπό να υπολογισθεί η γωνία προσβολής της σχετικής ταχύτητας από την *εξίσωση 4.5*. Στη συνέχεια υπολογίζεται η γωνία προσβολής από τη σχέση  $\theta = \alpha + \theta_p$  και έπειτα το  $C_l$  και  $C_d$ . Τέλος, η διαδικασία επαναλαμβάνεται με τις καινούριες τιμές που έχουν προκύψει για το  $\alpha$  και  $\alpha'$  και ολοκληρώνεται, όταν οι τιμές των συντελεστών είναι μέσα

στα επιθυμητά όρια ανοχών που έχουν τεθεί. Ως μεθοδολογία είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για συνθήκες ροής με υψηλά φορτία

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα αναπτυχθεί η δεύτερη μέθοδος με τη βοήθεια του λογισμικού Q-blade, το οποίο θα αναφερθεί εκτενώς στα επόμενα κεφάλαια.

#### 4.5 Συντελεστής ισχύος $C_p$

Για την εύρεση του συνολικού συντελεστή ισχύος χρειάζεται ο συντελεστής αξονικής επαγωγής  $a$  σε κάθε τομή που έχει δημιουργηθεί στο πτερύγιο. Έτσι, λοιπόν, γνωρίζοντας το  $a$  ο συντελεστής ισχύος θα είναι:

$$C_p = \left(\frac{8}{\lambda^2}\right) \int_{\lambda_h}^{\lambda} \lambda_h^3 a'(1-a) \left[1 - \left(\frac{C_d}{C_l}\right) \cos\varphi\right] d\lambda_r \quad (4.24)$$

όπου, το  $\lambda_h$  είναι ο τοπικός λόγος ταχύτητας στην πλήμνη της ανεμογεννήτριας.

Παρόλο που ο αξονικός συντελεστής  $a$  προσδιορίστηκε θεωρώντας το συντελεστή οπισθέλκουσας  $C_d = 0$ , η οπισθέλκουσα δύναμη συμπεριλαμβάνεται στον υπολογισμό της Εξίσωσης (4.23).

Η συνεισφορά ισχύος για κάθε δακτύλιο είναι:

$$dP = \Omega dQ, \quad (4.25)$$

και η συνολική ισχύς του ρότορα είναι:

$$P = \int_{r_h}^R dP = \int_{r_h}^R \Omega dQ \quad (4.26)$$

Συνεπώς, και ο συντελεστής ισχύος μπορεί να γραφτεί:

$$C_p = \frac{P}{P_{wind}} = \frac{\int_{r_h}^R \Omega dQ}{\frac{1}{2} \rho \pi R^2 U^3} \quad (4.27)$$

#### 4.6 Απώλεια ακροπτερυγίου (Tip Loss)

Το σύστημα των στροβίλων στο απόρρευμα διαφέρει όταν ο αριθμός των πτερυγίων είναι πεπερασμένος και όχι άπειρος, όπως θεωρήθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια. Λόγω αυτού του γεγονότος, δημιουργούνται απώλειες στην άκρη των πτερυγίων οι οποίες θα πρέπει να ληφθούν υπόψη για τον ακριβή υπολογισμό της ισχύος. Αυτές οι απώλειες είναι, κατ' ουσίαν, η διαφορά πίεσης ανάντη και κατόντη του ρότορα η οποία μειώνει την άντωση και, κατά επέκταση, την παραγωγή ισχύος στην άκρη του πτερυγίου. Αυτό το φαινόμενο παρατηρείται περισσότερο σε μικρό αριθμό πτερυγίων ή σε πτερύγια μεγαλύτερης επιφάνειας.

Για τον υπολογισμό αυτών των απωλειών η πιο απλή μέθοδος είναι του *Prandtl* όπου εισάγει έναν συντελεστή διόρθωσης  $F$  στις εξισώσεις που έχουν αναφερθεί στα προηγούμενα κεφάλαια και ορίζεται ως:

$$F = \left(\frac{2}{\pi}\right) \cos^{-1}[\exp(-\left\{\frac{\left(\frac{B}{2}\right)\left[1-\left(\frac{r}{R}\right)\right]}{\left(\frac{r}{R}\right)\sin\varphi}\right\})] \quad (4.28)$$

Η παραπάνω σχέση είναι συνάρτηση του αριθμού  $B$  των πτερυγίων, της γωνίας  $\varphi$  της σχετικής ταχύτητας του ανέμου και της θέσης  $r$  του πτερυγίου. Επιπλέον, η γωνία που προκύπτει από το τόξο συνημίτονου είναι σε ακτίνια. Εάν το τόξο συνημίτονου είναι σε μοίρες τότε ο παράγοντας  $\left(\frac{2}{\pi}\right)$  αντικαθίσταται από το  $\frac{1}{90}$ . Χρειάζεται να επισημανθεί πως ο συντελεστής  $F$  κυμαίνεται από 0 έως 1.

Οι σχέσεις (4.1), (4.2) που προκύπτουν από τη θεωρία ορμής γίνονται:

$$dT = F\rho U^2 4a(1-a)\pi r dr, \quad (4.1a)$$

και

$$dQ = 4Fa'(1-a)\rho U\pi r^3 \Omega dr \quad (4.2a)$$

Ο συντελεστής απώλειας ακροπτερυγίου προστίθεται και στις παρακάτω εξισώσεις:

$$\frac{\alpha'}{(1-\alpha)} = \frac{\sigma' C_l}{(4F\lambda_r \sin\varphi)}, \quad (4.17a)$$

$$\frac{\alpha}{(1-\alpha)} = \frac{\sigma' C_l \cos\varphi}{(4F \sin^2 \varphi)}, \quad (4.18a)$$

$$C_l = 4F \sin\varphi \frac{(\cos\varphi - \lambda_r \sin\varphi)}{\sigma'(\sin\varphi + \lambda_r \cos\varphi)}, \quad (4.19a)$$

$$\frac{\alpha'}{(1+\alpha')} = \frac{\sigma' C_l}{(4F \cos\varphi)}, \quad (4.20a)$$

$$\alpha = \frac{1}{[(1+4F \sin^2 \varphi)/(\sigma' C_l \cos\varphi)]}, \quad (4.22a)$$

$$\alpha' = \frac{1}{\left[\left(\frac{4F \cos\varphi}{\sigma' C_l}\right) - 1\right]}, \quad (4.23a)$$

$$U_{rel} = \frac{U(1-\alpha)}{\sin\varphi} = \frac{U}{\left(\frac{\sigma' C_l}{4F}\right) \cos\varphi + \sin\varphi}, \quad (4.28)$$

Η Εξίσωση (4.21) δεν αλλάζει. Ο συντελεστής ισχύος θα γίνει:

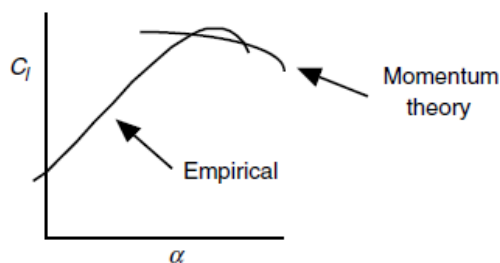
$$C_P = \left(\frac{8}{\lambda^2}\right) \int_{\lambda_h}^{\lambda} F \lambda_h^3 a'(1-a) \left[1 - \left(\frac{C_d}{C_l}\right) \cot\varphi\right] d\lambda_r \quad (4.24a)$$

#### 4.7 Συνθήκες εκτός σχεδιασμού

Μέχρι τώρα η ανάλυση της αεροδυναμικής συμπεριφοράς μίας ανεμογεννήτριας βασίστηκε στα πλαίσια φυσιολογικών και ελεγχόμενων συνθηκών σχεδιασμού. Ωστόσο, στην πραγματικότητα, οι συνθήκες είναι πολύ διαφορετικές και επηρεάζουν την τελική ανάλυση του συστήματος.

#### 4.8 Απώλεια στήριξης (stall)

Η απώλεια στήριξης δημιουργείται μετά από κάποιες μοίρες της γωνίας προσβολής  $\alpha$  και προκαλεί απώλεια στη δύναμη άντωσης με συνέπεια την αλλαγή της αεροδυναμικής κατάστασης του πτερυγίου. Στο εύρος γωνιών όπου επικρατεί η απώλεια στήριξης υπάρχουν διαφορετικές λύσεις οι οποίες όμως πρέπει να διατηρούν τη γωνία προσβολής  $\alpha$  κατά μήκος του πτερυγίου.

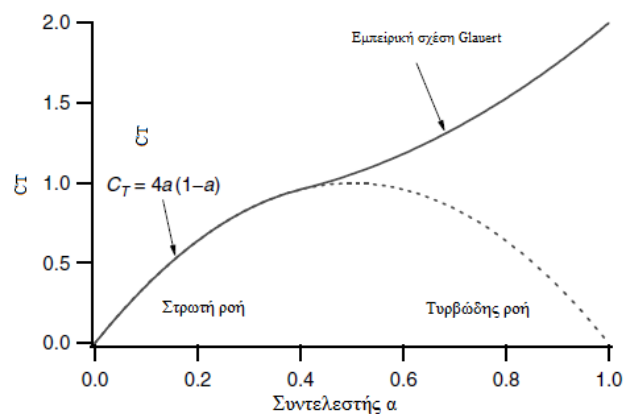


Διάγραμμα 4.2: Καμπύλη συντελεστή  $C_l$  συναρτήσει της γωνίας προσβολής  $\alpha$  με πολλαπλές λύσεις.

[10]

#### 4.9 Τυρβώδεις συνθήκες ανέμου

Σε συνθήκες ανέμου όπου επικρατεί η τυρβώδης κατάσταση και ο συντελεστής  $\alpha$  είναι μεγαλύτερος από 0.5 από μετρητικά δεδομένα φαίνεται ότι ο συντελεστής ώσης  $C_T$  αυξάνεται περίπου μέχρι 2, όταν ο συντελεστής  $\alpha$  είναι ίσος με 1. Σε αυτή τη συνθήκη το ρεύμα ανακοπής αυξάνεται και επικρατεί τυρβώδης ανακυκλοφορία του αέρα πίσω από τον ρότορα. Για τη μελέτη σε αυτή τη συνθήκη χρησιμοποιούνται εμπειρικές σχέσεις που αναλύουν τη σχέση του  $C_T$  και του  $\alpha$  ώστε να προβλεφθεί η συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας.



Διάγραμμα 4.3: Μεταβολή του  $C_T$  συναρτήσει των συνθηκών ανέμου.



Στην τυρβώδη κατάσταση η εμπειρική σχέση του *Glauert* συνδέει τον αξονικό συντελεστή επαγωγής  $\alpha$  με τον συνολικό συντελεστή ώσης  $C_T$  σε συνδυασμό με τη θεωρία *BEM*, συμπεριλαμβανομένων και των απωλειών:

$$\alpha = \left(\frac{1}{F}\right) [0.143 + \sqrt{0.0203 - 0.6427)0.889 - C_T}] \quad (4.29)$$

Η παραπάνω εξίσωση είναι ορθή, όταν το  $\alpha > 0.4$  ή, αντίστοιχα, όταν το  $C_T > 0.96$ .

Για τον τοπικό συντελεστή ώσης  $C_{Tr}$  που εμφανίζεται σε κάθε σημείο του πτερυγίου χρησιμοποιείται η παρακάτω σχέση:

$$C_{Tr} = \frac{dF_N}{\frac{1}{2}\rho U^2 2\pi r dr} \quad (4.30)$$

## Κεφάλαιο 5 Υπολογιστική σχεδίαση ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει γενικευμένη υπολογιστική σχεδίαση μικρής κλίμακας ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα με απόρρευμα περιστροφής. Στην τελική σχεδίαση θα ληφθούν υπόψη οι αντιστάσεις και οι απώλειες στην άκρη των πτερυγίων ώστε να καταστεί εφικτή η κατασκευή της .

Παράμετροι	
Τύπος ανεμογεννήτριας	Οριζοντίου άξονα FPFS
Αριθμός πτερυγίων	3
Διάμετρος ρότορα	0,6 m
Διάμετρος πλήμνης	0,13m
TSR	5,3
Ταχύτητα σχεδιασμού	8 m/s

Πίνακας 5.1: Σχεδιαστικές παράμετροι.

### 5.1 Ταχύτητα σχεδίασης και ονομαστική ταχύτητα ανέμου

Σε αντίθεση με τις ανεμογεννήτριες μεταβαλλόμενης ταχύτητας *FPVS*, για τις ανεμογεννήτριες με σταθερό βήμα και σταθερή ταχύτητα *FPFS* πρέπει να ληφθούν

υπόψη δύο διαφορετικές ταχύτητες, η ταχύτητα σχεδίασης  $U_{design}$  και η ονομαστική ταχύτητα  $U_{rated}$ . Στην ταχύτητα σχεδίασης, ο συντελεστής ισχύος  $C_p$  φτάνει στη μέγιστη ισχύ του. Αντίθετα, στην ονομαστική ταχύτητα, ο ρότορας φτάνει στην ονομαστική ισχύ εξόδου,  $P_{rotor}$ , που αντιστοιχεί στην ονομαστική ισχύ εξόδου της γεννήτριας, λαμβάνοντας υπόψη τη συνολική απόδοση μετάδοσης.[20]

## 5.2 Σχεδιασμός ταχύτητας ρότορα και $TSR$

Ο λόγος ταχύτητας ρότορα για ανεμογεννήτρια με 3 περύγια κινείται στο εύρος 6 – 8. Στην προς σχεδίαση ανεμογεννήτρια ο βέλτιστος λόγος, από εμπειρικές παρατηρήσεις θα είναι:[17]

$$\lambda_{opt} \approx \frac{4\pi}{n} \approx \frac{4\pi}{3}(1,25 - 1,30) \approx 5,24 - 5,45 \quad (5.1)$$

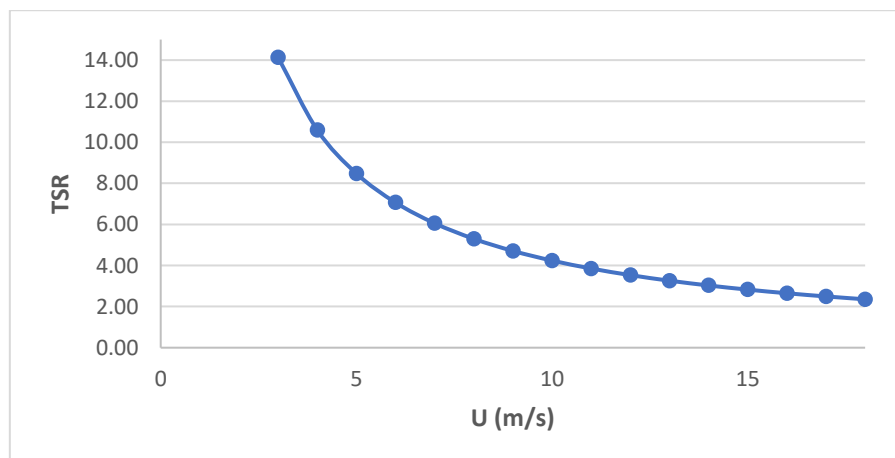
και η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του ρότορα θα είναι:

$$\Omega = \frac{\lambda \cdot U}{R} = \frac{5,3 \cdot 8m/s}{0,6m} = 70,66 \text{ rad/sec} \quad (5.2)$$

Εάν λάβουμε υπόψη ότι η ταχύτητα εκκίνησης θα είναι στα  $3m/s$  και η ταχύτητα διακοπής θα είναι στα  $18m/s$ , το  $TSR$  θα είναι:

$$\lambda_{min} = \frac{\Omega \cdot R}{U} = \frac{70,66 \text{ rad/sec} \cdot 0,6m}{18m/sec} = 2,35 \quad (5.3)$$

$$\lambda_{max} = \frac{\Omega \cdot R}{U} = \frac{70,66 \text{ rad/sec} \cdot 0,6m}{3m/sec} = 14,13 \quad (5.4)$$



Διάγραμμα 5.1:  $TSR$  συναρτήσεως της ταχύτητας ανέμου  $U$ .

### 5.3 Σχεδιασμός αεροτομής και γωνίας προσβολής

Η αεροδυναμική συμπεριφορά των αεροτομών εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds ( $Re$ ) ο οποίος ορίζεται ως:

$$Re = \frac{\rho \cdot U_{rel} \cdot c}{\mu} = \frac{\text{Αδρανειακή δύναμη}}{\text{Δυναμικό ιξώδες}}, \quad (5.5)$$

όπου για την αεροτομή το  $\mu$  είναι το ιξώδες αέρα, το  $U_{rel}$  είναι η σχετική ταχύτητα του ανέμου στην αεροτομή και το  $c$  είναι το μήκος χορδής του πτερυγίου.

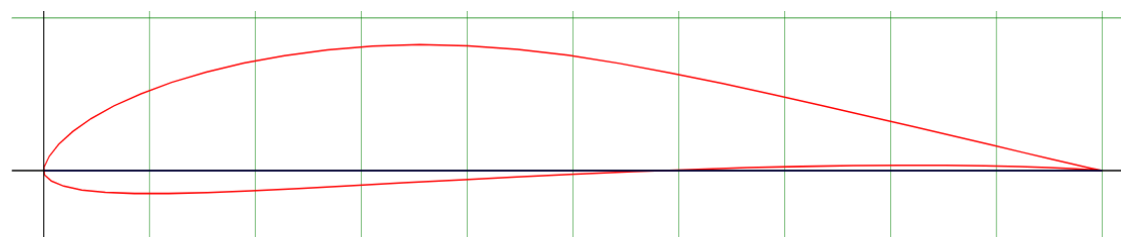
Το εύρος τιμών του αριθμού *Reynolds* προκύπτει από τη σχετική ταχύτητα, η οποία υπολογίζεται από τρίγωνο που σχηματίζεται στο μέσο του πτερυγίου, στο οποίο εκτιμούμε ότι το μήκος χορδής θα είναι  $c = 0,06m$ . Επομένως το εύρος του αριθμού  $Re$  για διαφορετικές ταχύτητες λειτουργίας είναι:

$U(m/s)$	$U_{tan}(m/s)$	$U_{rel}(m/s)$	$Re$
3	21,2	21,41	95.550
6	21,2	22,03	98.324
9	21,2	23,03	102.780
12	21,2	24,36	108.713
15	21,2	25,97	115.895
18	21,2	27,81	124.110

Πίνακας 5.2: Αριθμός Reynolds για διαφορετικές ταχύτητες λειτουργίας.

Όπως παρατηρούμε στον πίνακα 5.2 ο αριθμός  $Re$  δεν μεταβάλλεται σημαντικά για ταχύτητες λειτουργίας από 3 – 18 m/s. Για απλοποίηση του σχεδιασμού, θα επιλεχθεί ο αριθμός  $Re = 100.000$ . Χρειάζεται να επισημανθεί πως η απλοποίηση δεν γίνεται σε περιπτώσεις όπου υπάρχει μεγάλη μεταβολή του  $Re$ , όπως συμβαίνει στις ανεμογεννήτριες μεγάλης κλίμακας με μεταβλητή ταχύτητα.

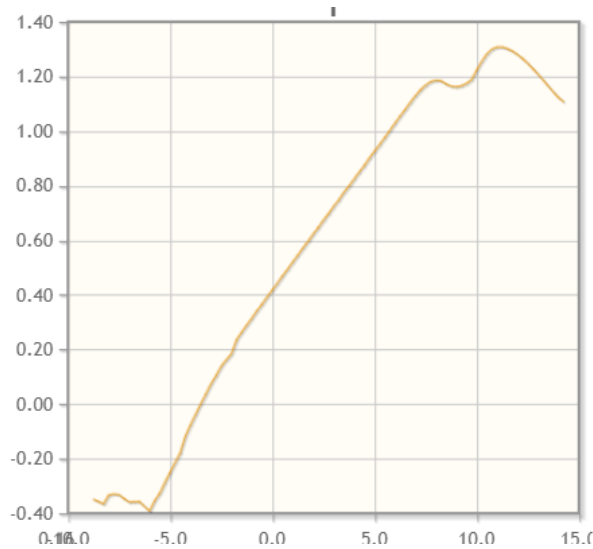
Η αεροτομή που θα επιλεχθεί είναι η E387 της οποίας τα δεδομένα αντλήθηκαν από το XFOIL, ένα πρόγραμμα που χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό και τη διαδιάστατη ανάλυση της κατανομής πίεσης υποηχητικών απομονωμένων αεροτομών.[21]



Name = E387  
Chord = 100mm Radius = 0mm Thickness = 100% Origin = 0% Pitch = 0°

Σχήμα 5.1: Αεροτομή E387.

[22]



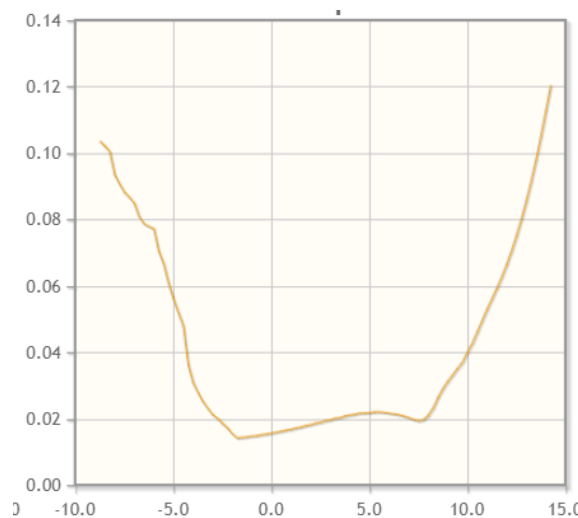
Διάγραμμα 5.2: Μεταβολή συντελεστή  $C_l$  συναρτήσει της γωνίας  $\alpha$  για  $Re=100.000$ .

[22]

Στο διάγραμμα 5.2 παρατηρούμε πως ο μέγιστος συντελεστής άντωσης για τη συγκεκριμένη αεροτομή είναι  $C_l = 1,19$  με γωνία προσβολής  $7,5^\circ$ . Παράλληλα, ο μηδενικός συντελεστής άντωσης  $C_{l0}$  βρίσκεται σε γωνία προσβολής  $\alpha = 1,25^\circ$ .

Αντίστοιχα, η μεταβολή του  $C_l$  συναρτήσει του  $\alpha$  είναι γραμμική στο εύρος γωνιών από τις  $-6^\circ$  έως τις  $7,5^\circ$ . Συνεπώς, σε αυτό το εύρος ο συντελεστής αντίστασης είναι σχεδόν μηδενικός και μπορούμε να εξασφαλίσουμε την κατάλληλη γωνία προσβολής για κάθε τμήμα του πτερυγίου.

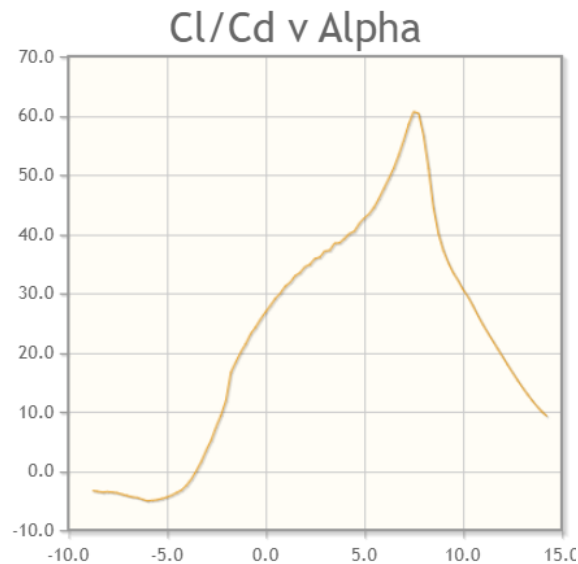
Σημαντικό να αναφερθεί είναι το γεγονός ότι μετά τις  $7,5^\circ$  παρουσιάζεται μία απότομη καμπύλη η οποία οφείλεται στην αποκόλληση του οριακού στρώματος από το πτερύγιο και οδηγεί σε απώλεια στήριξης (stall) του συστήματος.



Διάγραμμα 5.3: Μεταβολή συντελεστή  $C_d$  συναρτήσει της γωνίας  $\alpha$  για  $Re=100.000$ .

[22]

Συμπληρωματικά, στο παραπάνω γράφημα παρατηρούμε τη μεταβολή του συντελεστή οπισθέλκουσας συναρτήσει της γωνίας προσβολής. Είναι εμφανές πως στο εύρος γωνιών  $-2^\circ - 7,5^\circ$  ο συντελεστής βρίσκεται στις χαμηλότερες τιμές του που κυμαίνονται από 0,015 έως 0,020.



Διάγραμμα 5.4: Μεταβολή του λόγου  $C_l/C_d$  συναρτήσει της γωνίας  $\alpha$  για  $Re=100.000$ .

[22]

Στο διάγραμμα 5.4 η μέγιστη τιμή του λόγου  $C_l/C_d$  είναι  $60^\circ$  για γωνία προσβολής ίση με  $7,5^\circ$ . Ωστόσο, στα παραπάνω 3 γραφήματα ο έλεγχος της αεροτομής έγινε για γωνία προσβολής από  $-10^\circ$  έως  $15^\circ$ . Στις ανεμογεννήτριες σταθερού βήματος και σταθερής ταχύτητας, όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα σχεδιασμού, τα πτερύγια λειτουργούν σε υψηλότερες γωνίες προσβολής. Επομένως, για καλύτερη προσέγγιση της αεροδυναμικής συμπεριφοράς της, οι γωνίες προσβολής επεκτείνονται στις  $360^\circ$ . Η επέκταση αυτή μπορεί να γίνει είτε με τη μέθοδο Montgomerie είτε με τη μέθοδο Viterna. Στην παρούσα ανάλυση, θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος Viterna.

#### 5.4 Μέθοδος Viterna

Η μέθοδος Viterna είναι από τις πιο γνωστές μεθόδους προέκτασης των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών μίας αεροτομής. Η προέκταση από τη γωνία προσβολής που δημιουργεί απώλεια στήριξης  $\alpha_{stall}$  έως τις  $90^\circ$  διενεργείται χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$C_l = A_1 \sin 2a + A_2 \frac{\cos^2 a}{\sin a} \quad (5.6)$$

$$C_d = B_1 \sin^2 a + B_2 \cos a \quad (5.7)$$

όπου

$$C_{dmax} \approx 1,11 + 0,018 \cdot AR \quad (5.8)$$

$$A_1 = \frac{C_{dmax}}{2} \quad (5.9)$$

$$B_1 = C_{dmax} \quad (5.10)$$

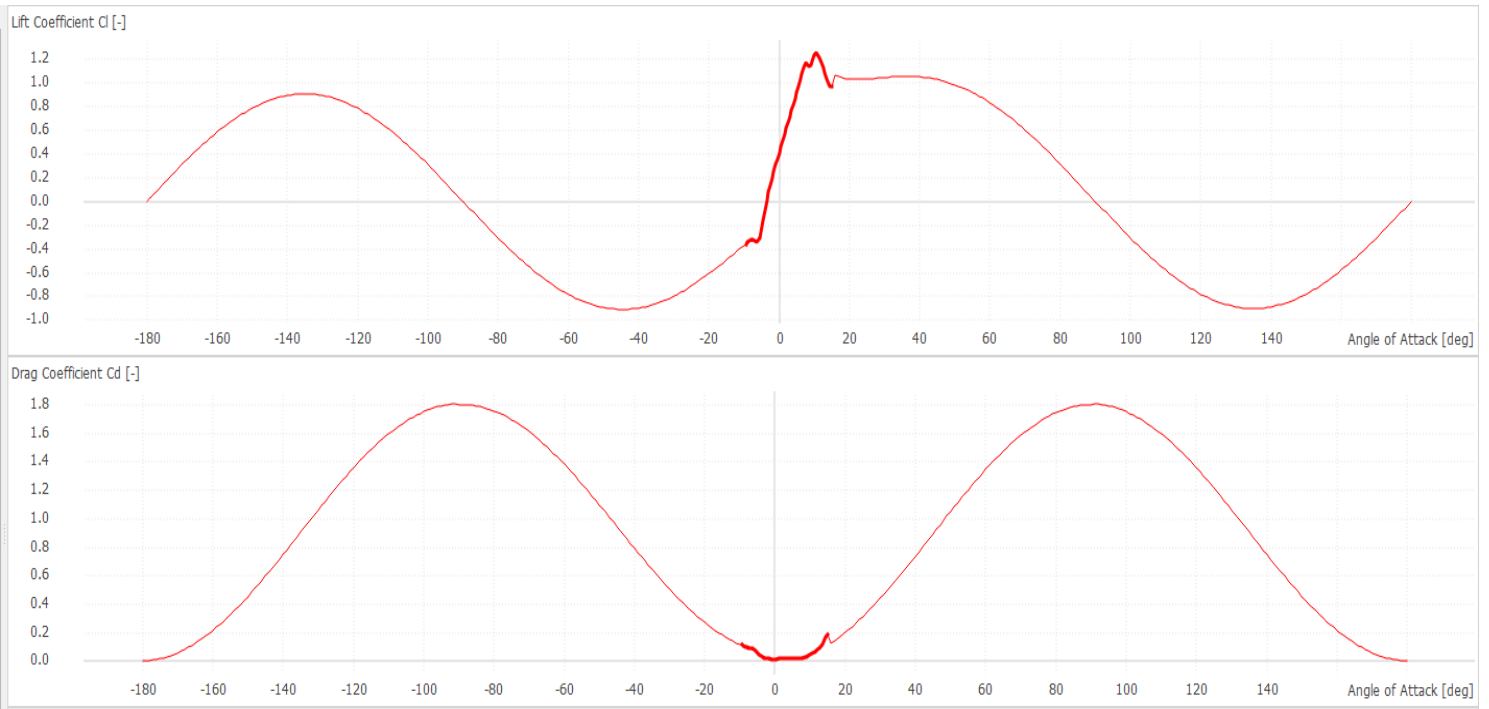
$$A_2 = (C_{l\,stall} - C_{dmax} \sin a_{stall} \cos a_{stall}) \frac{\sin a_{stall}}{\cos^2 a_{stall}} \quad (5.11)$$

$$B_2 = \frac{C_{d\,stall} - C_{dmax} \sin^2 a_{stall}}{\cos a_{stall}} \quad (5.12)$$

Το σύμβολο  $AR$  (Aspect Ratio) είναι ο λόγος διαστάσεων που προκύπτει από τη μέθοδο  $BEM$  και ορίζεται ως:

$$AR = \frac{\text{Ύψος Πτερυγίου}}{\text{Μέσο μήκος χορδής}} = \frac{R}{\frac{\sum_{i=1}^N (c)}{16}} = 9,38 \quad (5.13)$$

Η μέθοδος Viterna δεν λαμβάνει υπόψη την επίλυση κατανομής των δυνάμεων πίεσης ή τριβής που ασκούνται στα πτερύγια όταν περνάει ο αέρας μέσω αυτών. Επιπρόσθετα, παρόλο που τα αποτελέσματα της μεθόδου δεν παρέχουν μία ακριβή αναπαράσταση των φυσικών συνθηκών που επικρατούν, ωστόσο μπορεί να προσφέρει μία λογική εκτίμηση για τον αρχικό σχεδιασμό. Στα παρακάτω γραφήματα με τη βοήθεια του λογισμικού  $Q-blade$  απεικονίζεται η προέκταση της γωνίας προσβολής από τις  $-180^\circ$  έως τις  $180^\circ$ :



Διάγραμμα 5.5: Συντελεστές  $C_l$  και  $C_d$  σε πλήρες εύρος  $360^\circ$  γωνίας προσβολής με τη μέθοδο Viterna.

## 5.5 Πρωταρχικός σχεδιασμός σχήματος πτερυγίου

Γνωρίζοντας τις συνθήκες όπου η αεροτομή *E387* παρουσιάζει τη βέλτιστη αεροδυναμική συμπεριφορά της και έχοντας ορίσει την ταχύτητα σχεδιασμού ίση με  $8 \text{ m/s}$ , το βέλτιστο λόγο ταχύτητας  $\lambda_{opt} = 5,3$  και την ακτίνα του ρότορα  $R = 0,6$  θα προχωρήσουμε στη διαίρεση του μήκους του πτερυγίου σε  $N = 16$  τομές με κέντρο ακτίνας το  $r_i$ . Έτσι, λοιπόν, στον πίνακα 5.3 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του πτερυγίου, τα οποία υπολογίστηκαν σύμφωνα με τη θεωρία βέλτιστου ρότορα η οποία συνοψίζεται στις παρακάτω εξισώσεις:

$$\lambda_{r,i} = \lambda \left( \frac{r_i}{R} \right) = \quad (5.13)$$

$$\varphi_i = \left( \frac{2}{3} \right) \tan^{-1} \left( \frac{1}{\lambda_{r,i}} \right) \quad (5.14)$$

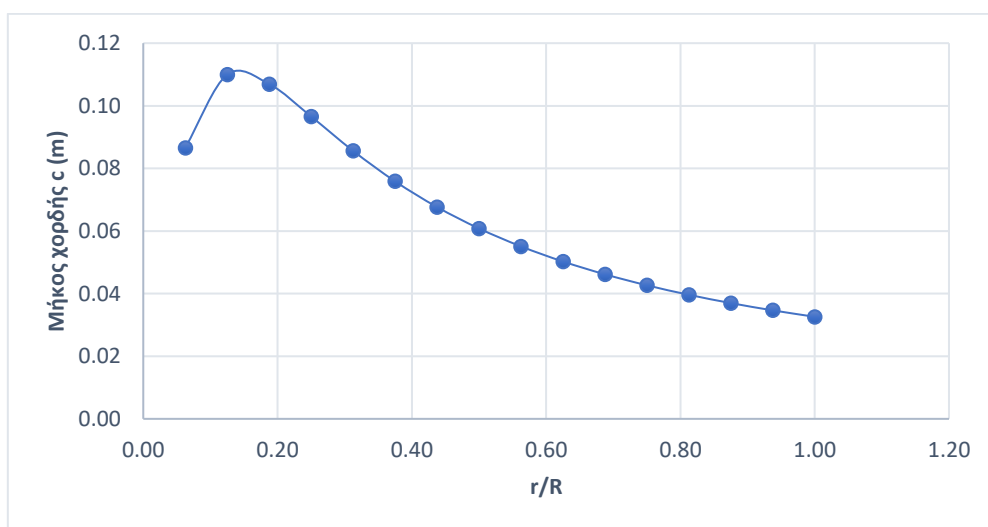
$$c_i = \frac{8\pi r_i}{BC_{l,design,i}} (1 - \cos\varphi_i) \quad (5.15)$$

$$\theta_{p,i} = \varphi_i - \alpha_{design,i} \quad (5.16)$$

Όπου το  $i$  υποδηλώνει την εκάστοτε τομή του πτερυγίου, το  $\lambda_{r,i}$  είναι ο λόγος ταχύτητας σε κάθε τομή,  $r_i$  είναι η απόσταση της τομής από το κέντρο του ρότορα, το  $\varphi_i$  είναι η γωνία της σχετικής ταχύτητας του ανέμου σε κάθε τομή. Το  $C_{l,design,i}$  και το  $\alpha_{design,i}$  είναι ο συντελεστής άντωσης και η γωνία προσβολής για κάθε τομή. Στην περίπτωση του σχεδιασμού της συγκεκριμένης ανεμογεννήτριας, έχουμε ορίσει ως ταχύτητα σχεδιασμού τα  $8 \text{ m/s}$  και το  $C_l$  και  $\alpha$  θεωρούνται σταθερά για κάθε τομή. Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται οι υπολογισμοί για τις 16 τομές που διενεργήθηκαν:

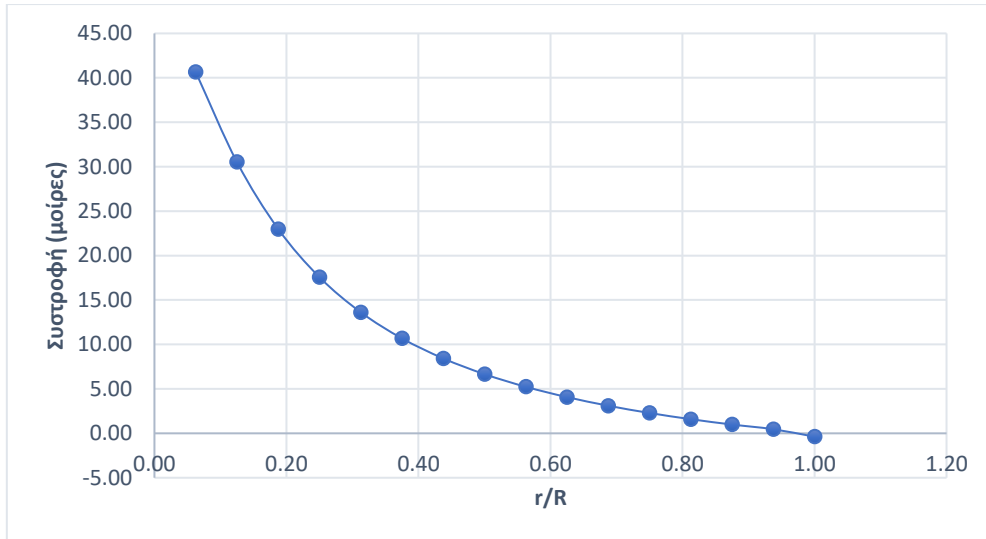
Τομή	Τομή ακτίνας r (m)	Τομή ακτίνας r/R	$\lambda r$	Γωνία σχετικής ταχύτητας $\varphi$ (deg)	Τομή βήματος $\Theta_r$ (deg)	Τομή συστροφής $\Theta_t$ (deg)	Μήκος χορδής c (m)
1	0,04	0,06	0,33	47,78	40,28	40,66	0,09
2	0,08	0,13	0,66	37,65	30,15	30,53	0,11
3	0,11	0,19	0,99	30,12	22,62	23,00	0,11
4	0,15	0,25	1,33	24,69	17,19	17,57	0,10
5	0,19	0,31	1,66	20,75	13,25	13,63	0,09
6	0,23	0,38	1,99	17,81	10,31	10,68	0,08
7	0,26	0,44	2,32	15,55	8,05	8,43	0,07
8	0,30	0,50	2,65	13,78	6,28	6,66	0,06
9	0,34	0,56	2,98	12,36	4,86	5,24	0,06
10	0,38	0,63	3,31	11,20	3,70	4,08	0,05
11	0,41	0,69	3,64	10,23	2,73	3,11	0,05
12	0,45	0,75	3,98	9,41	1,91	2,29	0,04
13	0,49	0,81	4,31	8,72	1,22	1,59	0,04
14	0,53	0,88	4,64	8,11	0,61	0,99	0,04
15	0,56	0,94	4,97	7,59	0,09	0,46	0,03
16	0,60	1,00	5,30	7,12	-0,38	-0,38	0,03

Πίνακας 5.3: Αρχικός σχεδιασμός πτερυγίου.



Διάγραμμα 5.6: Κατανομή μήκους χορδής αρχικής σχεδίασης.





*Διάγραμμα 5.7: Κατανομή συστροφής πτερυγίου αρχικής σχεδίασης.*

Από τα παραπάνω δύο γραφήματα παρατηρούμε πως το μήκος της χορδής είναι μεγαλύτερο στις τομές που βρίσκονται πιο κοντά στη βάση και μικραίνει όσο απομακρυνόμαστε από αυτή. Το μήκος της χορδής στη βάση του πτερυγίου είναι  $0,09m$  και στην άκρη του είναι  $0,03m$ . Αντίστοιχα, η συστροφή στη βάση του πτερυγίου είναι στις  $40,66^\circ$  και στην άκρη είναι  $-0,038^\circ$ .

## 5.6. Ανάλυση απόδοσης ανεμογεννήτριας

Από τις παραπάνω εξισώσεις προέκυψε η κατανομή της χορδής και η συστροφή του πτερυγίου για τις 16 τομές. Ωστόσο, τα παραπάνω αποτελέσματα είναι μία αρχική σχεδιαστική προσέγγιση του πτερυγίου. Για τη βελτιστοποίηση του αρχικού σχεδιασμού θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος της επαναληπτικής διαδικασίας για την εύρεση των συντελεστών  $\alpha$  και  $\alpha'$ . Παρακάτω παρουσιάζονται τα βήματα της συγκεκριμένης μεθόδου:

- 1) Αρχική εκτίμηση(πρώτη επανάληψη) τιμής συντελεστών  $\alpha$  και  $\alpha'$ :

$$\varphi_{i,1} = \left(\frac{2}{3}\right) \tan^{-1} \left(\frac{1}{\lambda_{r,i}}\right) \quad (5.17)$$

$$a_{i,1} = \frac{1}{\left[1 + \frac{4 \sin^2(\varphi_{i,1})}{\sigma'_i C_{l,design} \cos \varphi_{i,1}}\right]} \quad (5.18)$$

$$a'_{i,1} = \frac{1 - 3a_{i,1}}{(4a_{i,1}) - 1} \quad (5.19)$$

Το  $i$  υποδηλώνει την επαναληπτική διαδικασία της  $j$ -επανάληψης. Το  $\sigma'_i$  είναι ο τοπικός συντελεστής στερεότητας και ορίζεται ως:

$$\sigma'_i = \frac{Bc_i}{2\pi r_i} \quad (5.20)$$

- 2) Για  $j=1$  υπολογίζουμε τη γωνία της σχετικής ταχύτητας και την απώλεια άκρου κατά Prandtl:

$$\tan \varphi_{l,j} = \frac{1 - a_{i,j}}{(1 + a'_{i,1})\lambda_{r,i}} \quad (5.21)$$

$$F_{i,j} = \left(\frac{2}{\pi}\right) \cos^{-1} \left[ \exp \left( - \left( \frac{\left(\frac{B}{2}\right) \left[1 - \left(\frac{r_i}{R}\right)\right]}{\left(\frac{r_i}{R}\right) \sin \varphi_{i,j}} \right) \right) \right] \quad (5.22)$$

- 3) Υπολογίζουμε τη τοπική γωνία προσβολής για την  $i$ -τομή:

$$\alpha_{i,j} = \varphi_{i,j} - \theta_{p,i} \quad (5.23)$$

Με την εύρεση της γωνίας προσβολής, υπολογίζονται και οι συντελεστές  $C_{l,i,j}$  Και  $C_{d,i,j}$  από την προέκταση της γωνίας προσβολής με τη μέθοδο Viterna.

4) Υπολογίζουμε τον τοπικό συντελεστή ώσης με την παρακάτω εξίσωση:

$$C_{T,i,j} = \frac{\sigma'_i (1 - a'_{i,1})^2 (C_{l,i,j} \cos \varphi_{i,j} + C_{d,i,j} \sin \varphi_{i,j})}{\sin^2 \varphi_{i,j}} \quad (5.24)$$

5) Εάν το  $C_{T,i,j} < 0,96$  τότε οι συντελεστές  $a$  και  $a'$  θα είναι:

$$a_{i,j+1} = \frac{1}{\left[ 1 + \frac{4 F_{i,j} \sin^2(\varphi_{i,1})}{\sigma'_i (C_{l,i,j} \cos \varphi_{i,j} + C_{d,i,j} \sin \varphi_{i,j})} \right]} \quad (5.25)$$

Αλλιώς, εάν το  $C_{T,i,j} > 0,96$  τότε ο συντελεστής  $a$  θα είναι:

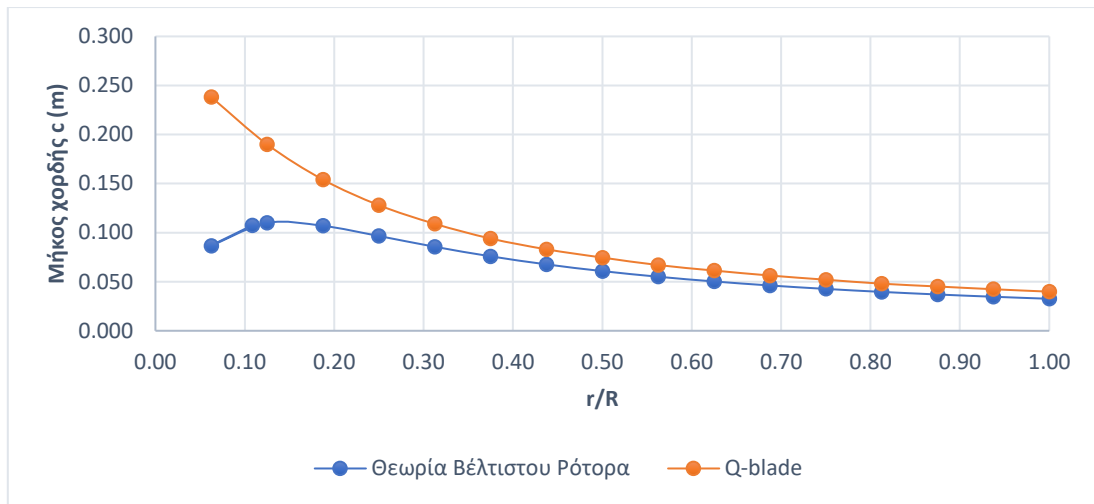
$$a_{i,j+1} = \frac{1}{F_{i,j}} \left[ 0,143 + \sqrt{0,0203 - 0,6427(0,889 - C_{T,i,j})} \right] \quad (5.26)$$

$$a'_{i,j+1} = \frac{1}{\left[ \frac{4 F_{i,j} \sin \varphi_{i,j} \cos \varphi_{i,j}}{\sigma'_i (C_{l,i,j} \sin \varphi_{i,j} - C_{d,i,j} \cos \varphi_{i,j})} - 1 \right]} \quad (5.27)$$

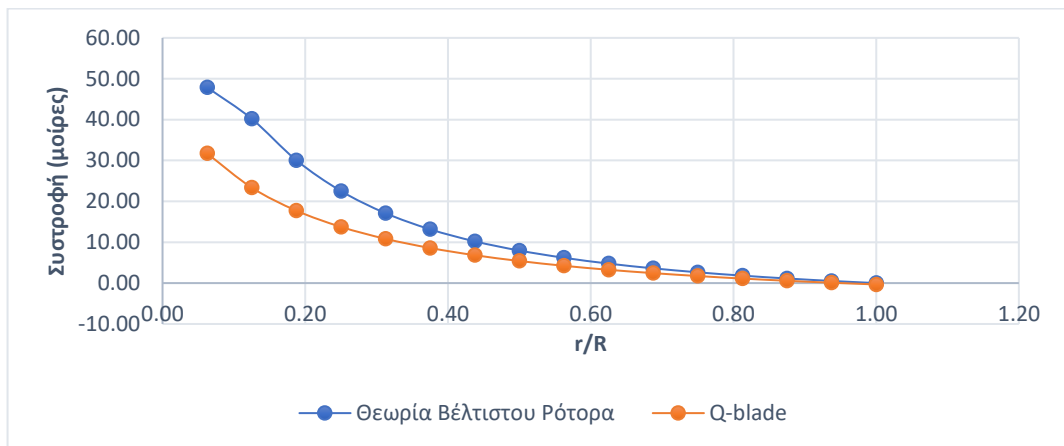
Επειδή η παραπάνω μέθοδος εμπεριέχει και σφάλματα θα πρέπει να γίνεται για κάθε επανάληψη έλεγχος ώστε οι τιμές που προκύπτουν να είναι εντός των αποδεκτών κριτηρίων σύγκλισης για να γίνει ο υπολογισμός της απόδοσης ισχύος. Για το λόγο αυτό η μέγιστη διαφορά αξονικής και εφαπτομενικής επαγωγής μεταξύ της τελευταίας και τρέχουσας πρέπει να είναι μικρότερη από το  $\varepsilon$ . Μια τυπική τιμή που δύναται να χρησιμοποιηθεί για το  $\varepsilon$  είναι η ακόλουθη:

$$\max(|a_{i,j+1} - a_{i,j+j}|, |a'_{i,j+1} - a'_{i,j+j}|) < 10^{-5} \quad (5.28)$$

Για τη συγκεκριμένη μελέτη, η επαναληπτική διαδικασία θα γίνει με τη χρήση του λογισμικού Q-blade, το οποίο είναι ανοιχτού κώδικα και χρησιμοποιείται για τον σχεδιασμό και την αεροδυναμική προσομοίωση πτερυγίων ανεμογεννήτριας, βασιζόμενο στη θεωρία BEM και στο μοντέλο Double-Multiple Stream tube (DMS). [23] Παρακάτω γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων για την κατανομή του μήκους και της συστροφής της γωνίας που προέκυψαν από το λογισμικό Q-blade:

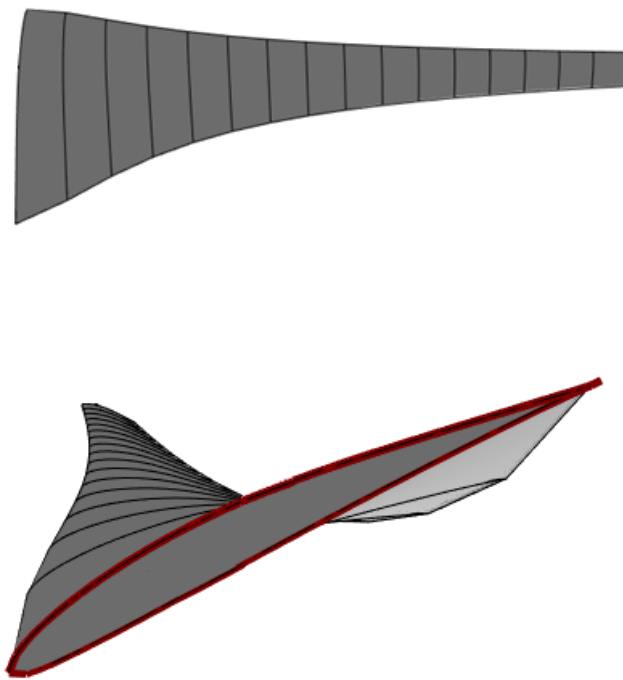


Διάγραμμα 5.8: Κατανομή μήκους με τη μέθοδο θεωρίας βέλτιστου ρότορα και με τη χρήση λογισμικού Q-blade.

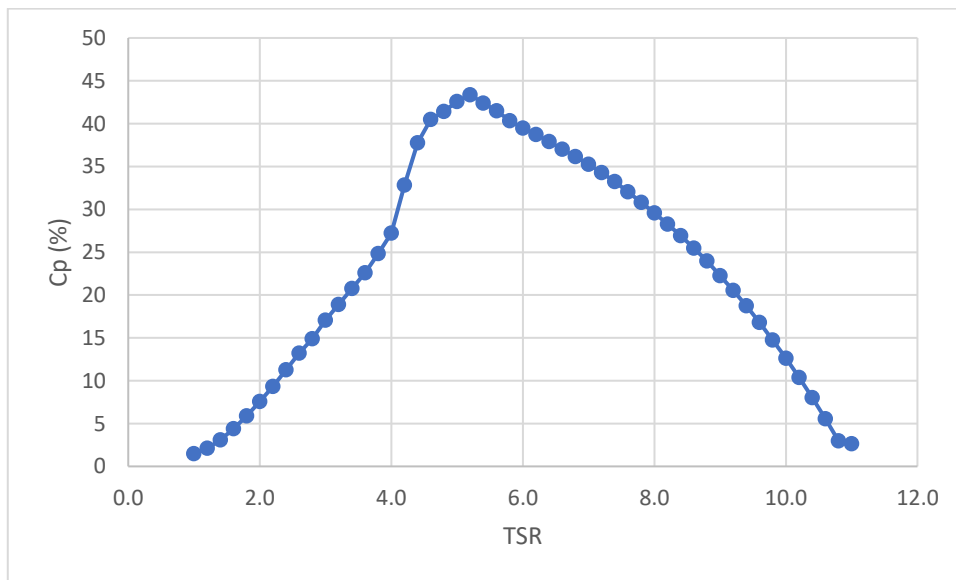


Διάγραμμα 5.9: Κατανομή συστρώφης με τη Θεωρία Βέλτιστου Ρότορα και το λογισμικό Q-blade.

Η κατανομή του μήκους χορδής βελτιστοποιήθηκε κατά *Betz*. Αντίστοιχα, η κατανομή συστρώφης που επιλέχθηκε είναι για λόγο  $C_l/C_d$  στις  $0^\circ$ . Επομένως, αυτό που παρατηρούμε είναι πως στους δύο τρόπους υπολογισμού της κατανομής της χορδής και της γωνίας συστρώφης εμφανίζεται σύγκλιση μετά την τέταρτη τομή αλλά οι αποκλίσεις είναι σχετικά μικρές.



Σχήμα 5.2: Απεικόνιση πτερυγίου μέσω του λογισμικού Q-blade.



Διάγραμμα 5.10: Συντελεστής ισχύος  $C_p$  συναρτήσει του λόγου ταχύτητας  $\lambda$ .

Ο μέγιστος συντελεστής που μπορεί να επιτευχθεί στη συγκεκριμένη σχεδίαση είναι 43,4% για λόγο ταχύτητας  $\lambda = 5,3$ . Η τιμή του  $C_p$  υπολογίστηκε μέσω του Q-blade για ιδανικό ρότορα με απόρρευμα περιστροφής, φαινόμενα αντίστασης και απώλεια άκρου (συντελεστής διόρθωσης Prandtl).

## Κεφάλαιο 6. Σχεδιασμός και κατασκευή με τρισδιάστατη εκτύπωση

Στο προηγούμενο κεφάλαιο με τη χρήση υπολογιστικών μοντέλων σχεδιάστηκε το πτερύγιο μίας ανεμογεννήτριας με σκοπό τη βέλτιστη αεροδυναμική ισχύ της. Στο παρόν θα σχεδιασθεί και θα κατασκευασθεί η πλήμνη και τα πτερύγια με τη χρήση τρισδιάστατης εκτύπωσης, με απώτερο στόχο την επιτυχή υλοποίησή τους.

### 6.1 Τρισδιάστατη εκτύπωση

Τα τελευταία χρόνια στο κατασκευαστικό προσκήνιο βρίσκεται η τρισδιάστατη εκτύπωση, η οποία δημιουργεί σύνθετες γεωμετρικές μορφές που με τις παραδοσιακές μεθόδους η κατασκευή τους καθίσταται χρονοβόρα και δύσκολη. Πρόκειται για μία προσθετική μέθοδο που κατασκευάζει αντικείμενα μέσω διαδοχικών στρώσεων υλικού. Μέχρι στιγμής έχουν αναπτυχθεί 7 κύριες κατηγορίες τρισδιάστατης εκτύπωσης οι οποίες είναι:

1. **Εξώθηση Υλικού (Material Extrusion):** Θεωρείται η πιο κοινή μέθοδος εκτύπωσης με πληθώρα υλικών, όπως τα θερμοπλαστικά, τα οικοδομικά υλικά (σκυρόδεμα), τα κεραμικά ή ακόμη και διάφορες τροφές που περιέχουν σοκολάτα ή ζαχαρούχα τα οποία μπορούν να χρησιμοποιούν για εκτυπώσεις φαγητών.
2. **Φωτοπολυμερισμός (Photopolymerization):** Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιεί ένα υγρό ρητίνης φωτοπολυμερούς, το οποίο στερεοποιείται όταν δέσμες λέιζερ ακτινοβολούν στα σημεία σχεδιασμού.
3. **Εκτόξευση Υλικού (Material Jetting):** Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί μία εκτυπωτική κεφαλή που εκτοξεύει υλικό σε υγρή μορφή το οποίο στη συνέχεια πολυμερίζεται με τη βοήθεια λέιζερ. Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι γνωστή για την υψηλή ανάλυση και ακρίβεια που προσφέρει.
4. **Δέσμευση Συνδετικού Υλικού (Binder Jetting):** Θεωρείται η γρηγορότερη μέθοδος προσθετικής κατασκευής προσφέροντας παράλληλα τη δυνατότητα εκτύπωσης ποικίλων υλικών, όπως κεραμικά ή μέταλλα σε πολύ υψηλή ανάλυση και λεπτομέρεια. Σαν τεχνολογία χρησιμοποιεί ένα συνδετικό υλικό σε υγρή μορφή το οποίο εναποτίθεται σε μία κλίνη που περιέχει το προς κατασκευή υλικό σε μορφή κονιάματος.
5. **Σύντηξη υποστρώματος σκόνης (Powder Bed Fusion):** Η μέθοδος αυτή ακολουθεί την ίδια φιλοσοφία με την προηγούμενη, μόνο που σε αυτή το προς κατασκευή υλικό θερμαίνεται και λιώνει σε συγκεκριμένα σημεία με τη βοήθεια λέιζερ, δημιουργώντας το τελικό αντικείμενο. Και σε αυτή τη

μέθοδο η υψηλή ακρίβεια και η δημιουργία πολύπλοκων γεωμετρικών σχημάτων καθίσταται εφικτή.

6. **Κατευθυνόμενη Ενεργειακή Εναπόθεση (Directed Energy Deposition):**  
Σε αυτή τη μέθοδο το υλικό είναι είτε σε μορφή σκόνης είτε σε μορφή σύρματος και τήκεται με τη βοήθεια μίας δέσμης λέιζερ. Η κλίνη περιστρέφεται και σε κάθε περιστροφή σχηματίζεται και ένα νέο στρώμα υλικού. Επίσης, έχει τη δυνατότητα να προσθέτει υλικό σε συγκεκριμένα σημεία και χρησιμοποιείται ευρέως στη κατασκευή μεγάλων και πολύπλοκων μεταλλικών αντικειμένων.
7. **Ελάσματα σε φύλλα (Sheet Lamination):** Αποτελεί μία ταχεία τεχνική εκτύπωσης που χρησιμοποιεί λεπτά φύλλα υλικού τα οποία συνδέονται ή ενώνονται μεταξύ τους στρώμα προς στρώμα για την κατασκευή του τελικού αντικειμένου. Αυτή η τεχνική βρίσκει εφαρμογές σε διάφορους τομείς, όπως η κατασκευή πρωτοτύπων ή μεγάλων αντικειμένων με υψηλή ταχύτητα κατασκευής.[24]

Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας η κατασκευή των πτερυγίων και της πλήμνης θα γίνει με εξώθηση θερμοπλαστικού πολυγαλακτικού οξέος PLA (Poly Lactic Acid).

## 6.2 Πολυγαλακτικό οξύ PLA

Το PLA παράγεται από πρώτες ύλες αμύλου που προέρχονται από ανανεώσιμες φυτικές πηγές, όπως το καλαμπόκι. Ως υλικό διακρίνεται για την καλή βιοδιασπασιμότητα του και μετά τη χρήση του μπορεί να αποικοδομηθεί πλήρως από μικροοργανισμούς στη φύση παράγοντας μόνο διοξείδιο του άνθρακα και νερό. Επομένως, το PLA αναγνωρίζεται ως υλικό φιλικό προς το περιβάλλον με καλή μηχανική αντοχή σε εφελκυσμό και ολκιμότητα, προσδίδοντας, παράλληλα, εξαιρετική λεπτομέρεια στην εκτύπωση. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι ιδιότητες του PLA: [25]

Πυκνότητα (kg/m <sup>3</sup> )	1300
Σκληρότητα (Rockwell R)	114
Τάση διαρροής YTS (MPa)	41,9
Μέγιστη τάση UTS (MPa)	58,9
Επιμήκυνση στο σημείο διαρροής (%)	29,3
Επιμήκυνση στο σημείο θραύσης (%)	75%
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	2,35
Μέτρο καμπτικότητας (GPa)	3,57
Θερμοκρασία επεξεργασίας (°C)	172
Θερμοκρασία τήξης (°C)	182
Θερμοκρασία ακροφυσίου (°C)	197
Θερμοκρασία πήξεως (°C)	68,4

Πίνακας 6.1: Ιδιότητες υλικού PLA [26]

### 6.3 Εκτυπωτής Adventurer 5M Pro

Για την προσθετική κατασκευή των πτερυγίων θα χρησιμοποιηθεί ο εκτυπωτής Adventurer 5M Pro της εταιρίας Flashforge. Παρακάτω παρουσιάζονται οι τεχνικές προδιαγραφές του:

Αριθμός εξωθήσεων	1
Ακρίβεια εκτύπωσης	$\pm 0,1\text{mm}$ (Έλεγχος σε κύβο 100mm)
Ακρίβεια θέσης	X/Y άξονες:0,0125mm, Z άξονας:0,0025mm
Μέγιστη ταχύτητα εξώθησης	600 mm/s
Μέγιστη επιτάχυνση	20000 mm/s <sup>2</sup>
Πάχος στρώσης	0.1-0.4 mm
Όγκος εκτύπωσης	220·220·220 mm
Διάμετρος ακροφυσίου	0.4mm/ 0.6mm/ 0.8mm/ 0.25mm(προερατικό)
Μέγιστη θερμοκρασία εξωθήσεως	280°C
Μέγιστη θερμοκρασία τράπεζας	110°C
Υλικό τράπεζας εκτύπωσης	PEI(Polyetherimide)
Τύπος νήματος	PLA/PETG (0.4mm ακροφύσιο) ABS/ASA/TPU/PLA-CF/PETG-CF (0.6/0.8mm ακροφύσιο)
Συμβατά λογισμικά	Prusa Slicer/ Cura /Orca Slicer

*Πίνακας 6.2: Τεχνικές προδιαγραφές του εκτυπωτή Flashforge 5M Pro*

[27]

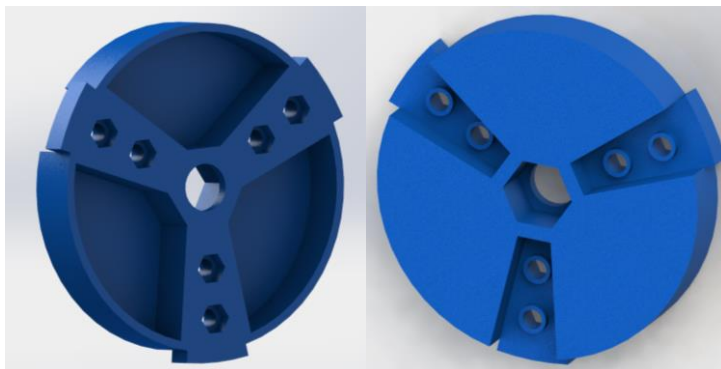


*Εικόνα 6.1: Εκτυπωτής Flashforge Adventurer 5M Pro.[27]*

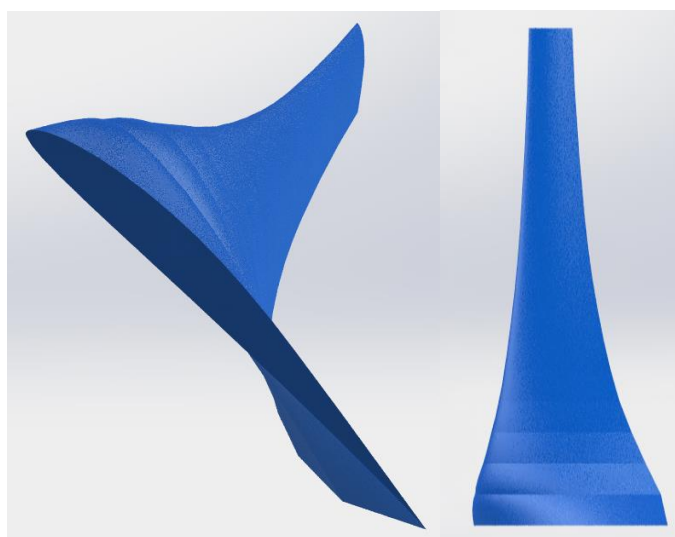
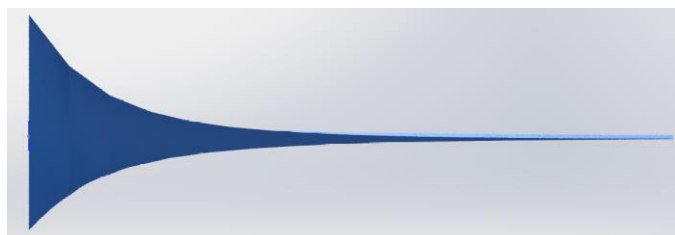


#### 6.4 Σχεδιασμός πτερυγίων με τη χρήση λογισμικού SolidWorks

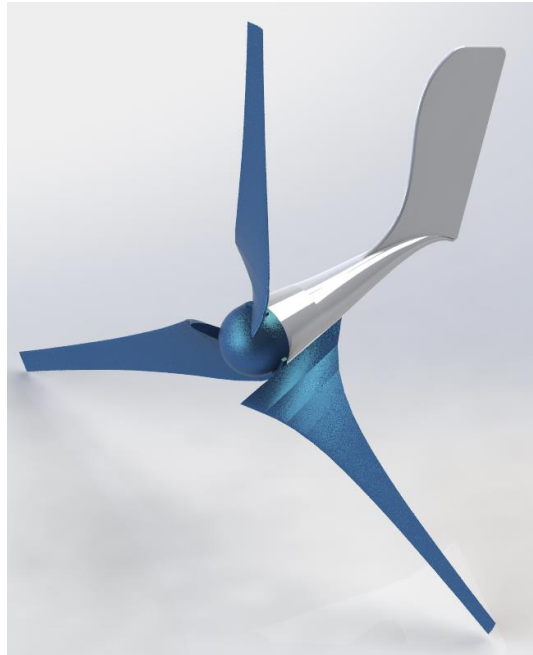
Κατά τον τελικό σχεδιασμό των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας προέκυψε το μήκος και η συστροφή για κάθε τομή από τις συνολικά 16 τομές. Με τη χρήση του λογισμικού τρισδιάστατης σχεδίασης Solidworks, θα σχεδιαστεί η πλήμνη και το πτερόγιο και στη συνέχεια με τη χρήση του λογισμικού OrcaSlicer θα προβούμε στην τρισδιάστατη εκτύπωση. Παρακάτω παρουσιάζονται τα τελικά σχέδια της πλήμνης και των πτερυγίων με τη χρήση του Solidworks:



*Σχήμα 6.1: Πλήμνη ανεμογεννήτριας.*



*Σχήμα 6.2: Πτερόγιο ανεμογεννήτριας.*



Σχήμα 6.3: Τρισδιάστατη απεικόνιση ανεμογεννήτριας με τη χρήση του λογισμικού Solidworks.

### 6.5 Λογισμικό Orca Slicer

Τα τελικά σχέδια της πλήμνης και του πτερυγίου μετατρέπονται σε μορφή *STL* ώστε να μπορέσουν να επεξεργασθούν στο λογισμικό *Orca Slicer*. Το *Orca Slicer* είναι ένα λογισμικό ανοιχτού κώδικα που μετατρέπει αρχεία *STL* σε *G* – κώδικα, δημιουργώντας διαδρομές εργαλείων που χρησιμοποιούνται στην τρισδιάστατη εκτύπωση. Το λογισμικό χωρίζει σε 4 κύριες κατηγορίες τις ρυθμίσεις που συμβάλλουν στην τελική του σχεδίου:

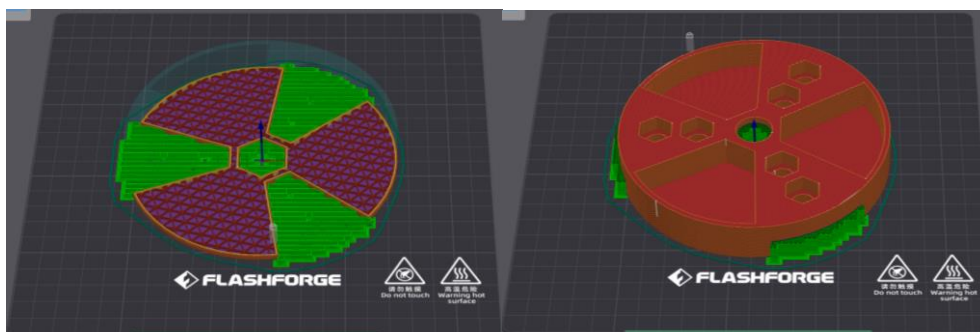
1. **Ρυθμίσεις πάχους στρώσης:** Ο χρήστης μπορεί να ορίσει το πάχος κάθε στρώσης που θα χρησιμοποιηθεί κατά την εκτύπωση, επηρεάζοντας την ανάλυση και την τελική επιφάνεια του αντικειμένου.
2. **Ρυθμίσεις γέμισης:** Σε αυτή την κατηγορία τροποποιούνται οι παράμετροι της εσωτερικής και εξωτερικής δομής, επηρεάζοντας την αντοχή και την εξοικονόμηση υλικού.
3. **Ρυθμίσεις ταχύτητας:** Η ταχύτητα εκτύπωσης διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη σταθερότητα του υλικού. Υψηλές ταχύτητες σε διαδρομές που εμφανίζουν καμπυλότητες ή γέφυρες μπορούν να οδηγήσουν σε κατάρρευση του υλικού, καθώς δεν προλαβαίνει να ψυχθεί και να στερεοποιηθεί. Επομένως, η ρύθμιση της βελτιώνει την τελική εκτύπωση.
4. **Ρυθμίσεις υποστήριξης υλικού:** Σε αυτή την κατηγορία δίνεται η δυνατότητα υποστήριξης γεωμετριών που υπερβαίνουν τις μηχανικές και φυσικές ιδιότητες του προς εκτύπωση υλικού. Έτσι, αναπτύσσονται χαμηλότερης πυκνότητας

γεωμετρίες οι οποίες λειτουργούν ως υποστηρίγματα του κύριου υλικού και αποφεύγονται οι ασυνέχειες και προεξοχές (overhangs) του υλικού. [28]

Με αυτές τις ρυθμίσεις, ο χρήστης μπορεί να προσαρμόσει τη διαδικασία εκτύπωσης στις συγκεκριμένες απαιτήσεις και προδιαγραφές του έργου του.

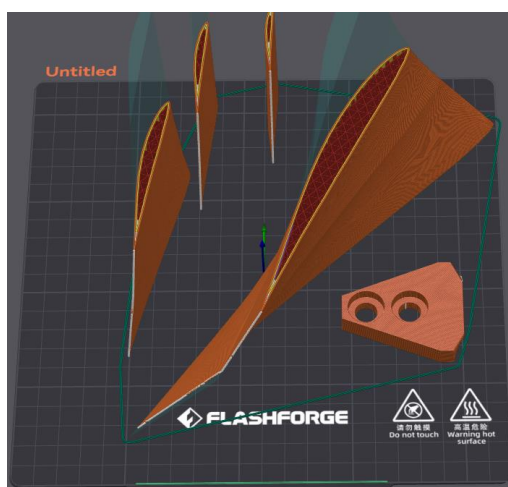
### 6.6 Σχεδιαστικοί παράμετροι και περιορισμοί

Για την εκτύπωση της πλήμνης το πάχος στρώσης ορίστηκε στα  $0,3mm$  και το εσωτερικό πλέγμα με πυκνότητα 30% τριγωνικής γεωμετρίας. Για τις προεξοχές χρησιμοποιήθηκε υποστηρικτικό υλικό. Ο τελικός χρόνος σχεδίασης είναι 1 ώρα και 44 λεπτά και το υλικό που χρησιμοποιήθηκε είναι  $111,10g$ . Στις ακόλουθες εικόνες παρουσιάζονται το προσθετικό υλικό, η γεωμετρία του πλέγματος και η τελική σχεδίαση.



Εικόνα 6.2: Τρισδιάστατη απεικόνιση πλήμνης με το λογισμικό Orca Slicer.

Αντίστοιχα, για την εκτύπωση των περυγίων το πάχος στρώσης ορίστηκε στα  $0,3mm$  και το εσωτερικό πλέγμα με πυκνότητα 30% τριγωνικής γεωμετρίας. Επιπλέον το περύγιο χωρίστηκε σε 4 ίσα μέρη των  $150mm$ , καθώς το ύψος θαλάμου του εκτυπωτή δεν υπερβαίνει τα  $250mm$ . Η συναρμογή του θα γίνει με σύνδεση υποστηρικτικής χαλύβδινης δοκού  $2mm$ . Ο συνολικός χρόνος εκτύπωσης είναι 4 ώρες και το υλικό που χρησιμοποιήθηκε είναι  $259,1g$ .



Εικόνα 6.3: Τρισδιάστατη απεικόνιση περυγίου με το λογισμικό Orca Slicer.



*Εικόνα 6.4: Εκτυπωμένο πτερύγιο και βάση στήριξης.*

## Κεφάλαιο 7. Συμπεράσματα και προτάσεις

Με την ολοκλήρωση του σχεδιασμού και της κατασκευής των πτερυγίων και της πλήμνης της ανεμογεννήτριας προέκυψαν ορισμένα συμπεράσματα που είναι χρήσιμο να αναφερθούν.

### 7.1 Συμπεράσματα

Το πρώτο συμπέρασμα αφορά το μέγεθος της ανεμογεννήτριας. Οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα επηρεάζονται σημαντικά από την επιφάνεια περιστροφής του ρότορα. Όσο μεγαλύτερη επιφάνεια καλύπτεται από τα πτερύγια, τόσο πιο αποδοτικό είναι το αιολικό σύστημα. Συνεπώς, η ισχύς της ανεμογεννήτριας που επιλέχθηκε στην παρούσα διπλωματική κινείται χαμηλά, καθώς η διάμετρος της επιφάνειας είναι μικρή.

Το δεύτερο συμπέρασμα έγκειται στην επιλογή της αεροτομής. Για την καταλληλότερη αεροτομή τα κριτήρια που λαμβάνονται περιλαμβάνουν όχι μόνο τις συνθήκες λειτουργίας και την απόδοση που προκύπτει από αυτά, αλλά και τη δυνατότητα κατασκευής τους. Σύνθετες γεωμετρίες με καλή αεροδυναμική συμπεριφορά καθιστούν δύσκολη και κοστοβόρα την κατασκευή τους. Ακόμη, σημαντικό κριτήριο διαδραματίζουν τα πειραματικά δεδομένα σε συνδυασμό με την υπολογιστική ρευστοδυναμική για κάθε αεροτομή. Έτσι, για την περίπτωση της αεροτομής E387 τα δεδομένα που λήφθηκαν στηρίχθηκαν μόνο στη δισδιάστατη ροϊκή ανάλυση με αποτελέσματα μικρότερης ακρίβειας από τις πειραματικές μεθόδους και τις μεθόδους CFD.

Το τρίτο συμπέρασμα σχετίζεται με τη μεταβολή της γωνίας προσβολής στο μήκος του πτερυγίου. Αυτή η παράμετρος επηρεάζει την απόδοση και την αποτελεσματικότητα της ανεμογεννήτριας. Οι ανεμογεννήτριες με μεταβλητή γωνία προσβολής προσφέρουν μεγαλύτερη απόδοση, έλεγχο, ασφάλεια κ.α. Όμως για την κατασκευή τους απαιτούνται πιο σύνθετοι μηχανισμοί, των οποίων η ανάλυση τους εντάσσεται εκτός ορίων της συγκεκριμένης εργασίας.

Το τέταρτο συμπέρασμα αναφέρεται στην κατασκευή των πτερυγίων. Όπως είναι γνωστό τα πτερύγια αποτελούνται από τη σύνθεση διάφορων υλικών, όπως ο υαλοβάμβακας, το ανθρακόνημα, οι ρητίνες κ.α. που τους προσδίδουν εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες και αντοχή στις καιρικές συνθήκες. Η κατασκευή με τη χρήση τρισδιάστατης εκτύπωσης με ενισχυμένα υλικά θα μπορούσε να αλλάξει το σχεδιαστικό τρόπο προσέγγισης και να βελτιώσει τις υπάρχουσες ιδιότητες των πτερυγίων.

## 7.2 Προτάσεις

Με τον τελικό σχεδιασμό της ανεμογεννήτριας είναι δυνατή η διεξαγωγή μίας μελλοντικής μελέτης σύγκλισης πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων. Αυτή η μελέτη μπορεί να περιλαμβάνει την ανάλυση της αεροδυναμικής συμπεριφοράς της ανεμογεννήτριας υπό ορισμένες συνθήκες και την αξιολόγηση της απόδοσης της σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

Επιπροσθέτως, προτείνεται η τρισδιάστατη εκτύπωση πτερυγίων με διάφορες γεωμετρίες και υλικά ώστε να αξιολογηθούν οι μηχανικές ιδιότητες τους. Αυτό μπορεί να έχει οφέλη στην σχεδιαστική ευελιξία, αλλά και στη βελτίωση τόσο της απόδοσης όσο και του συνολικού κόστους και χρόνου κατασκευής των πτερυγίων.

Τέλος, μπορούν να γίνουν βελτιώσεις στον αρχικό σχεδιασμό και λειτουργία της ανεμογεννήτριας χρησιμοποιώντας υπολογιστικές μεθόδους CFD με πιο ακριβή αποτελέσματα.

## Κεφάλαιο 8 Βιβλιογραφικές παραπομπές

- [1] Ζέρβος Αρθούρος και Κάραλης Γεώργιος, (2018), 'Σημειώσεις Αιολικής Ενέργειας', Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- [2] Ι. Καλλιντέρης, (2023), 'Βασική Αεροδυναμική', Πανεπιστήμιο Πατρών
- [3] K. A. Adeyeye, N. Ijumba, και J. Colton, (2021), 'The Effect of the Number of Blades on the Efficiency of A Wind Turbine', *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*
- [4] Γεωργάκης Αναστάσιος, (2019), 'Ανάλυση λειτουργίας αιολικών πάρκων και η επίδραση της διείσδυσης τους στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας', Προπτυχιακή Εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
- [5] Kid Wind, (2024), 'Calculating the Tip Speed Ratio of Your Wind Turbine', Minnesota Municipal Power Agency.
- [6] C. Kress, (2016), 'Downwind Wind Turbine Performance, Loading and Design Considerations', Thesis, ETH Zurich
- [7] W. Cao, Y. Xie, Z. Tan, W. Cao, Y. Xie, και Z. Tan, (2012), 'Wind Turbine Generator Technologies', *Advances in Wind Power*, διαθέσιμο στο doi: 10.5772/51780.
- [8] M. G. Molina και J.M.G Alvarez, (2011), 'Technical and Regulatory Exigencies for Grid Connection of Wind Generation', Intechopen, διαθέσιμο στο: doi: 10.5772/16474
- [9] Wikipedia, (n.d), 'Yaw system'
- [10] J. F. Manwell, J. G. McGowan, και A. L. Rogers, (2009) 'Wind energy explained: theory, design and application', 2nd ed. Chichester, U.K
- [11] L. Tartibu, M. Kilfoil, και A. van der Merwe, (2015), 'Vibration Analysis of a Variable Length Blade Wind Turbine', *Int. J. Adv. Eng. Technol*
- [12] Martin Jakubowski, (2019), 'The importance of the fundamentals', LinkedIn.
- [13] David Roberts, (2016), 'The tallest wind power tower in the US, assembled in one hypnotizing video', Vox
- [14] Κώστας Κονταξάκης, (n.d), *Αιολικά Συστήματα*, Τμήμα Μηχανολογίας, Τ.Ε.Ι Κρήτης
- [15] *Aerodynamics Presentation*, (n.d), University of Notre Dame
- [16] Νικόλαος Αποστολόπουλος, (2016), 'Υπολογιστική μελέτη ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα με τη μέθοδο στοιχείου- πτερυγίου (BEM) με σκοπό τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού της, Διπλωματική εργασία, ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδος.
- [17] M. Ragheb, (2014) 'Optimal Rotor Tip Speed Ratio', Worcester Polytechnic Institute.

- [18] I. R. Kennedy, M. Hodzic, A. N. Crossan, N. Crossan, N. Acharige, και J. W. Runcie, (2023), '*Estimating Maximum Power from Wind Turbines with a Simple Newtonian Approach*', διαθέσιμο στο doi: 10.47852/bonviewAAES32021330.
- [19] Κοπέλιας Αλέξανδρος, (2014) '*Αεροδυναμική ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα*', Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Τ.Ε.Ι Κρήτης
- [20] X. Liu, L. Wang, και X. Tang, (2013) '*Optimized linearization of chord and twist angle profiles for fixed-pitch fixed-speed wind turbine blades*', *Renew. Energy*, Διαθέσιμο στο doi: 10.1016/j.renene.2013.01.036.
- [21] Airfoiltools, Διαθέσιμο στο: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=e387-il>
- [22] Airfoiltools, '*E387*', Διαθέσιμο στο : <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=e387il>
- [23] Wikipedia, '*QBlade*', Διαθέσιμο στο: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=QBlade&oldid=1163548851>
- [24] Wikipedia, '*3d printing*', Διαθέσιμο στο: [https://en.wikipedia.org/wiki/3D\\_printing](https://en.wikipedia.org/wiki/3D_printing)
- [25] Odinmould , Διαθέσιμο στο: <http://gr.bmcmould.com/news/poly-lactic-acid-plastic-71650220.html>
- [26] MatWeb, '*Overview of materials for Polylactic Acid (PLA) Biopolymer*', Διαθέσιμο στο: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=ab96a4c0655c4018a8785ac4031b9278&ckck=1>
- [27] Flashforge, Διαθέσιμο στο: <https://flashforge.com/products/adventurer-5m-pro>
- [28] github, Διαθέσιμο στο: <https://github.com/SoftFever/OrcaSlicer/wiki>