



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ BEM THEORY ΚΑΙ CFD ΣΤΗΝ  
ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ: ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΣΕ ΠΤΕΡΥΓΑ  
ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ**

υπό

**ΝΙΚΟΛΑΟΥ ΜΩΥΣΙΑΔΗ**

**ΠΑΝΑΓΙΩΤΗ ΑΛΕΞΙΟΥ**

Διπλωματούχου Πολιτικού Μηχανικού Πανεπιστημίου Θεσσαλίας 2020  
Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού Διεθνές Πανεπιστημίου της Ελλάδος 2021

**Μεταπτυχιακή Εργασία**

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των  
απαιτήσεων για την απόκτηση του  
Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

Βόλος, 2023

© 2023 Νικόλαος Μωυσιάδης, Παναγιώτης Αλεξίου

Η έγκριση της μεταπτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

## Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

|                                 |                                                                                                       |
|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Πρώτος Εξεταστής<br>(Επιβλέπων) | Δρ. Ρήτος Κωνσταντίνος<br>Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,<br>Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας |
| Δεύτερος Εξεταστής              | Δρ. Καραμάνος Σπύρος<br>Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο<br>Θεσσαλίας             |
| Τρίτος Εξεταστής                | Δρ. Πελεκάσης Νίκος<br>Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο<br>Θεσσαλίας              |

## Ευχαριστίες

Θα θέλαμε να εκφράσουμε τις ειλικρινείς ευχαριστίες μας στον επιβλέποντα της μεταπτυχιακής μας εργασίας, Επίκουρο Καθηγητή κ. Ρήτο Κωνσταντίνο, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της υλοποίησης της εργασίας μου.

Επίσης, είμαστε ευγνώμονες στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της μεταπτυχιακής μας εργασίας, Καθηγητές κκ. Καραμάνο Σπύρο και Πελεκάση Νίκο για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μας και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους.

Επίσης, είμαστε ευγνώμονες στις οικογένειες μας, για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια. Αφιερώνουμε αυτή την εργασία στους οικείους μας.

# **ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ BEM THEORY ΚΑΙ CFD ΣΤΗΝ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ: ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΣΕ ΠΤΕΡΥΓΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ**

ΝΙΚΟΛΑΟΥ ΜΩΥΣΙΑΔΗ

ΠΑΝΑΓΙΩΤΗ ΑΛΕΞΙΟΥ

Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός Πανεπιστημίου Θεσσαλίας 2020

Διπλωματούχος Μηχανολόγος Μηχανικός Διεθνές Πανεπιστημίου της Ελλάδος 2021

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Ρήτος Κωνσταντίνος Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα  
Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

## **Περίληψη**

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία επικεντρώνεται στην παρουσίαση και τη σύγκριση δύο βασικών μεθόδων ανάλυσης πτερυγίων ανεμογεννήτριας, της μεθόδου BEM (Boundary Element Method) και των προσομοιώσεων CFD (Computational Fluid Dynamics). Ο τομέας της έρευνας ανήκει στα πλαίσια της αιολικής ενέργειας, επιδιώκοντας την μελέτη της επίδραση των μεθόδων αυτών για την βέλτιστη απόδοση των ανεμογεννητριών.

Ο στόχος της εργασίας είναι η λεπτομερής παρουσίαση και ανάλυση των δύο μεθόδων με εφαρμογή σε ένα παράδειγμα ανεμογεννήτριας. Με την χρήση προσομοιώσεων και ανάλυσης δεδομένων, προτίθεται να συγκρίνει τα αποτελέσματα που προκύπτουν από αμφότερες τις μεθόδους. Με αυτόν τον τρόπο, επιδιώκει να διαπιστώσει την απόδοση, την ακρίβεια και την εφαρμογή κάθε μεθόδου και να αναδείξει τις δυνητικές διαφορές και πλεονεκτήματά τους.

# **COMPARATIVE ANALYSIS OF BEM THEORY AND CFD METHODS IN WIND TURBINE BLADE ANALYSIS: A CASE STUDY**

NIKOLAOS MOYSIADIS

PANAGIOTIS ALEXIOU

Department of Mechanical Engineering, University of Thessaly, 2023

Supervisor: Dr Ritos Konstantinos

Professor at the University of Thessaly

## **Abstract**

This thesis focuses on the presentation and comparison of two fundamental methods for wind turbine blade analysis: the Boundary Element Method (BEM) and Computational Fluid Dynamics (CFD). The research encompasses the fields of wind energy and mechanical engineering, aiming to examine their impact on the performance of wind turbines.

The objective of this work is to provide a detailed presentation and analysis of both methods through practical application on a wind turbine blade. By utilizing simulations and data analysis, it seeks to compare the results obtained from both approaches. In doing so, it aims to evaluate the performance, accuracy, and applicability of each method while highlighting potential differences and advantages.

## Πίνακας Περιεχομένων

|                                                                               |           |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Κεφάλαιο 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>                                             | <b>1</b>  |
| 1.1 Κίνητρο και Υπόβαθρο .....                                                | 1         |
| 1.2 Οργάνωση Μεταπτυχιακής Εργασίας .....                                     | 2         |
| <b>Κεφάλαιο 2. ΑΝΕΜΟΣ ΚΑΙ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ .....</b>                          | <b>4</b>  |
| 2.1 Ιστορία της παραγωγής αιολικής ενέργειας .....                            | 4         |
| 2.2 Παραγωγή ανέμου .....                                                     | 5         |
| 2.2.1 Άνιση ηλιακή θέρμανση .....                                             | 5         |
| 2.2.2 Δύναμη Coriolis .....                                                   | 6         |
| 2.2.3 Τοπικές γεωγραφικές συνθήκες .....                                      | 8         |
| 2.3 Άνεμος και αιολική ενέργεια .....                                         | 8         |
| 2.3.1 Συνθήκες ανέμου .....                                                   | 9         |
| 2.3.2 Τυπική απόκλιση της ταχύτητας του ανέμου .....                          | 11        |
| 2.3.3 Ένταση τύρβης .....                                                     | 12        |
| 2.3.4 Πλευρική και οριζόντια τύρβη .....                                      | 12        |
| 2.3.5 Κατεύθυνση ανέμου .....                                                 | 13        |
| <b>Κεφάλαιο 3. ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΚΑΙ Η ΒΑΣΙΚΗ ΤΟΥΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ.....</b>          | <b>15</b> |
| 3.1 Ανεμογεννήτριες και βασική λειτουργία .....                               | 15        |
| 3.1.1 Εισαγωγή .....                                                          | 15        |
| 3.1.2 Αρχή λειτουργίας ανεμογεννητριών .....                                  | 17        |
| 3.1.3 Δομή ανεμογεννήτριας .....                                              | 17        |
| 3.1.4 Είδη ανεμογεννήτριας .....                                              | 30        |
| 3.2 Αριθμός πτερυγίων .....                                                   | 33        |
| 3.3 Έλεγχος ισχύος .....                                                      | 34        |
| 3.4 Καμπύλη ισχύος .....                                                      | 35        |
| 3.5 Αιολική ενέργεια σήμερα .....                                             | 36        |
| 3.6 Σχεδιασμός ανεμογεννητριών .....                                          | 38        |
| 3.6.1 Οικονομικές πτυχές .....                                                | 38        |
| 3.6.2 Φορτίσεις .....                                                         | 38        |
| <b>Κεφάλαιο 4. ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΟΤΟΜΕΣ .....</b>           | <b>43</b> |
| 4.1 Βασικά αεροδυναμικά χαρακτηριστικά. ....                                  | 43        |
| 4.2 Οι αεροτομές στις ανεμογεννήτριες .....                                   | 54        |
| 4.3 Απόδοση των αεροτομών στις ανεμογεννήτριες. ....                          | 54        |
| 4.4 Οι αεροτομές της ανεμογεννήτριας NREL 5MW .....                           | 56        |
| <b>Κεφάλαιο 5. BEM (Blade Element Momentum) THEORY .....</b>                  | <b>58</b> |
| 5.1 Εισαγωγή στην αεροδυναμική ανάλυση πτέρυγας ανεμογεννήτριας .....         | 58        |
| 5.2 Σκοπός και σημασία της ανάλυσης BEM Theory .....                          | 58        |
| 5.3 Αρχές της BEM Theory .....                                                | 59        |
| 5.4 Εφαρμογή των εξισώσεων .....                                              | 63        |
| <b>Κεφάλαιο 6. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΟΓΚΩΝ ΚΑΙ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ</b> |           |
| <b>CFD .....</b>                                                              | <b>72</b> |

|                                                     |                                                            |           |
|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-----------|
| 6.1                                                 | Εισαγωγή στην Μέθοδο των Πεπερασμένων Όγκων .....          | 72        |
| 6.2                                                 | Διάσταση και Διαίρεση σε Στοιχεία .....                    | 73        |
| 6.3                                                 | Εισαγωγή στην CFD.....                                     | 73        |
| 6.4                                                 | Βασικές Εξισώσεις Navier-Stokes.....                       | 74        |
| 6.5                                                 | Αριθμητική Επίλυση Εξισώσεων Ροής.....                     | 76        |
| 6.6                                                 | Μοντελοποίηση Ροών και Συνθήκες Συνοριακών Στρωμάτων ..... | 77        |
| 6.7                                                 | Μοντέλο Fluent .....                                       | 78        |
| <b>Κεφάλαιο 7. Αποτελέσματα – Συμπεράσματα.....</b> |                                                            | <b>81</b> |
| 7.1                                                 | Αποτελέσματα BEM Theory .....                              | 81        |
| 7.2                                                 | Αποτελέσματα CFD .....                                     | 85        |
| 7.3                                                 | Σύγκριση αποτελεσμάτων .....                               | 89        |
| <b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>                           |                                                            | <b>92</b> |

## **Κατάλογος Πινάκων**

### **Κεφάλαιο 2**

|                                                                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Πίνακας 2.1: Η παράμετρος της ταχύτητας για τους διάφορους τύπους του εδάφους (Πηγή: Guidelines for Design of Wind Turbines - DNV/Risø)..... | 10 |
| Πίνακας 2.2: Κλίμακα Beaufort (Πηγή: <a href="http://www.emy.gr">www.emy.gr</a> ) .....                                                      | 11 |

### **Κεφάλαιο 5**

|                                            |    |
|--------------------------------------------|----|
| Πίνακας 5.1: Πίνακας χαρακτηριστικών ..... | 67 |
|--------------------------------------------|----|

### **Κεφάλαιο 7**

|                                             |    |
|---------------------------------------------|----|
| Πίνακας 7.1: Οι υπό εφαρμογή συνθήκες ..... | 81 |
| Πίνακας 7.2: Αποτελέσματα BEM Theory .....  | 84 |

## Κατάλογος Σχημάτων

### Κεφάλαιο 2

|                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Σχήμα 2.1: Ατμοσφαιρική κυκλοφορία (Πηγή: <a href="http://www.weather.gov">www.weather.gov</a> ).....      | 7  |
| Σχήμα 2.2: Παράδειγμα διακυμάνσεων στην κατεύθυνση του ανέμου (Πηγή: DNV and Risø) <sup>[3]</sup><br>..... | 13 |
| Σχήμα 2.3: Ροδόγραμμα αεροδρομίου LaGuardia, New York. 2008 (Πηγή: Wikipedia).....                         | 14 |

### Κεφάλαιο 3

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Σχήμα 3.1: Διαχωρισμός σε upwind/downwind <sup>[4]</sup> .....                          | 16 |
| Σχήμα 3.2: Θεμέλια τύπου Monopile <sup>[4]</sup> .....                                  | 19 |
| Σχήμα 3.3: Θεμέλια τύπου Gravity-based <sup>[4]</sup> .....                             | 20 |
| Σχήμα 3.4: Θεμέλια τύπου Jacket <sup>[4]</sup> .....                                    | 20 |
| Σχήμα 3.5: Βάση τύπου Semi-submersible <sup>[4]</sup> .....                             | 21 |
| Σχήμα 3.6: Θεμέλια τύπου Tripod <sup>[4]</sup> .....                                    | 22 |
| Σχήμα 3.7: Χωρητικότητα αιολικής ενέργειας ανά έτος .....                               | 37 |
| Σχήμα 3.8: Διάγραμμα ταχυτήτων του αέρα στη διατομή μίας αεροτομής <sup>[3]</sup> ..... | 41 |

### Κεφάλαιο 4

|                                                                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Σχήμα 4.1: Η δημιουργία της επαγόμενης οπισθέλκουσας και των γωνιών της επαγόμενης γωνίας προσβολής $\alpha_i$ και της ενεργού γωνίας προσβολής $\alpha_{eff}$ .....  | 44 |
| Σχήμα 4.2: Σχέση αεροδυναμικών συντελεστών με την γωνία προσβολής. ....                                                                                               | 45 |
| Σχήμα 4.3: Η δημιουργία της επαγόμενης οπισθέλκουσας και των γωνιών της επαγόμενης γωνίας προσβολής $\alpha_i$ και της ενεργού γωνίας προσβολής $\alpha_{eff}$ . .... | 46 |
| Σχήμα 4.4: Η ταχύτητα κατωρεύματος και η καμπύλωση της ροής. ....                                                                                                     | 47 |
| Σχήμα 4.5: Η ανωστική γραμμή από τα σημεία $-b/2$ έως $b/2$ και η μορφή πεταλοειδούς δίνης.<br>.....                                                                  | 49 |
| Σχήμα 4.6: Σύστημα τεσσάρων δινών.....                                                                                                                                | 50 |
| Σχήμα 4.7: Υπέρθωση άπειρου πλήθους πεταλοειδών δινών σε κοινή ανωστική γραμμή. ...                                                                                   | 51 |
| Σχήμα 4.8: Όψη πτέρυγας.....                                                                                                                                          | 55 |
| Σχήμα 4.9: Διαχωρισμός της πτέρυγας σε τμήματα.....                                                                                                                   | 56 |

### Κεφάλαιο 5

|                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------|----|
| Σχήμα 5.1: Μοντέλο θεωρίας actuator disc.....             | 64 |
| Σχήμα 5.2: Διάρθρωση θεωρητικού δίσκου σε δακτυλίους..... | 65 |

### Κεφάλαιο 6

|                                                     |    |
|-----------------------------------------------------|----|
| Σχήμα 6.1: Γεωμετρία αεροδυναμικού προφίλ DU35..... | 79 |
| Σχήμα 6.2: Γεωμετρία αεροδυναμικού προφίλ DU21..... | 79 |
| Σχήμα 6.3: Πλέγμα γύρω από την αεροτομή .....       | 80 |

### Κεφάλαιο 7

|                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Σχήμα 7.1: Ρυθμός μεταβολής των αξονικών συντελεστών συναρτήσει του λόγου $r/R$ .....       | 82 |
| Σχήμα 7.2: Ρυθμός μεταβολής του συντελεστή άντωσης $C_l$ συναρτήσει του λόγου $r/R$ . ....  | 82 |
| Σχήμα 7.3: Ρυθμός μεταβολής των γωνιών $\beta$ και $\phi$ συναρτήσει του λόγου $r/R$ . .... | 83 |
| Σχήμα 7.4: Αξονικός συντελεστής επαγωγής συναρτήσει των επαναλήψεων.....                    | 83 |
| Σχήμα 7.5: Μεταβολή του $C_p$ και $C_x$ συναρτήσει της ακτίνας .....                        | 84 |

|                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------|----|
| Σχήμα 7.6: Κατανομή της ταχύτητας γύρω από την αεροτομή DU35..... | 85 |
| Σχήμα 7.7: Κατανομή της πίεσης γύρω από την αεροτομή DU35. ....   | 86 |

## Κατάλογος Εικόνων

### Κεφάλαιο 3

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| Εικόνα 3.1 : Ανεμογεννήτρια κάθετου άξονα (Πηγή: Wikipedia).....    | 31 |
| Εικόνα 3.2: Ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα (Πηγή: Wikipedia) ..... | 33 |

# Κεφάλαιο 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

## 1.1 Κίνητρο και Υπόβαθρο

Τα ενεργειακά συστήματα της εποχής μας βασίζονται σε αρκετά μεγάλο βαθμό στα ορυκτά καύσιμα, παρ' όλα αυτά έχουν γίνει μεγάλες αλλαγές τα τελευταία χρόνια τόσο πολιτικά όσο και κοινωνικά με αποτέλεσμα την επιτάχυνση της ανάπτυξης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Με την προστασία του περιβάλλοντος να βρίσκεται πολύ ψηλά στην ατζέντα όλο και περισσότερων κρατών παγκοσμίως, η σταδιακή αντικατάσταση της εκμετάλλευσης των ορυκτών καυσίμων με άλλων ανανεώσιμων πηγών φαίνεται να είναι μονόδρομος. Καθότι παγκόσμιο πρόβλημα, η κλιματική αλλαγή επιτάσσει τη συνεργασία των χωρών παγκοσμίως και έτσι το 2016 οι ηγέτες και ηγέτιδες του κόσμου καθόρισαν φιλόδοξους νέους στόχους για τον αγώνα κατά της κλιματικής αλλαγής. Πρόκειται για τη Συμφωνία των Παρισίων η οποία περιλαμβάνει σχέδιο δράσης για τον περιορισμό της υπερθέρμανσης του πλανήτη. Μακροπρόθεσμος στόχο αυτής είναι να συγκρατηθεί η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη κάτω από τους 2 °C. Σύμφωνα με τη δέσμευση αυτή, οι χώρες της ΕΕ συμφώνησαν ότι θα θέσουν την ΕΕ στην πορεία που θα της επιτρέψει να γίνει η πρώτη κλιματικά ουδέτερη οικονομία και κοινωνία έως το 2050.

Η μετάβαση σε καθαρότερες μορφές ενέργειας αποτελεί προϋπόθεση για την κλιματική ουδετερότητα. Έως το 2050, το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας που καταναλώνεται στην ΕΕ θα πρέπει να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές. Με τη δέσμη Fit for 55, η ΕΕ σχεδιάζει να ενισχύσει το μερίδιο της ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές έως το 2030.

Σύμφωνα με τα στοιχεία που παρουσίασε η bp (bp's Statistical Review of World Energy) για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως, τα οποία βγήκαν στη δημοσιότητα το 2022 και αναφέρονται στο έτος 2021, πέρα από την επιτακτική ανάγκη της μετάβασης σε πιο ενεργειακά "πράσινες" λύσεις, κάνει φανερό πως η αιολική ενέργεια είναι από τους πιο βασικούς παράγοντες για την επίτευξη της παραπάνω μετάβασης.

Εάν θέλουμε να έχουμε μια κλιματικά ουδέτερη κοινωνία έως το 2050 και να διατηρήσουμε παράλληλα την αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη στους 2 °C θα απαιτηθεί η μαζική εγκατάσταση αιολικών συστημάτων. Ο στόχος είναι εφικτός, με το

αντίστοιχο τίμημα και αυτό δεν είναι άλλο από τη μεγάλη χρηματοδότηση των κατάλληλων έργων από όλα τα κράτη που υπέγραψαν την Συμφωνία. Έχοντας υπόψιν μόνο την αιολική και ηλιακή ενέργεια, έχει εκτιμηθεί ότι η ελάχιστη απαίτηση μαζικής εγκατάστασης και των δύο πρέπει να είναι τουλάχιστον 400 GW ισχύος κάθε χρόνο. Όπως γίνεται κατανοητό είναι αναγκαία η εξέλιξη αυτών των συστημάτων ώστε το κάθε σύστημα να μπορεί να παράγει όλο και περισσότερη ενέργεια με μειωμένο παράλληλα κόστος κατασκευής.

Στη συγκεκριμένη μεταπτυχιακή εργασία λοιπόν στόχος είναι η κατανόηση της αεροδυναμικής συμπεριφοράς της πτέρυγας μίας ανεμογεννήτριας και η μελέτη της απόδοσής της. Η μελέτη αυτή γίνεται μέσα από την εφαρμογή δύο μεθόδων, συγκεκριμένα της μεθόδου BEM Theory (Blade Element Momentum) αλλά και της αριθμητικής μεθόδου CFD (Computational Fluid Dynamics) με την χρήση του υπολογιστικού πακέτου της Ansys και πιο συγκεκριμένα με τον επιλυτή Fluent. Με την μέθοδο BEM, η οποία αποτελεί και μία από τις απλούστερες μεθόδους αεροδυναμικής ανάλυσης των πτερυγίων των ανεμογεννητριών, γίνεται υπολογισμός των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών της πτέρυγας αλλά και της απόδοσής της. Στη συνέχεια γίνεται χρήση του προφίλ της πτέρυγας που χρησιμοποιήθηκε στο μοντέλο BEM και με τις προσομοιώσεις από την μέθοδο CFD παράγονται σημαντικά αεροδυναμικά δεδομένα. Σκοπός λοιπόν είναι η σύγκριση των αεροδυναμικών δεδομένων και από τις δύο μεθόδους ενώ παράλληλα παρουσιάζονται διάφορα πλεονεκτήματα αλλά και αδυναμίες τους. Τέλος, είναι πολύ σημαντικό και πρέπει να τονισθεί ότι η επιλογή μίας συγκεκριμένης μεθόδου εξαρτάται από τον σκοπό της μελέτης αλλά και την διαθεσιμότητα των δεδομένων.

## **1.2 Οργάνωση Μεταπτυχιακής Εργασίας**

Παρακάτω γίνεται μία σύντομη περιγραφή του περιεχομένου όλων των κεφαλαίων της παρούσας εργασίας.

Στο κεφάλαιο 2 και 3, παρουσιάζεται το σύνολο των δημοσιευμένων πηγών που αφορούν του δύο κύριους πυλώνες αυτής της εργασίας, τον άνεμο και τις ανεμογεννήτριες. Συγκεκριμένα γίνεται αναφορά στην ιστορία της αιολικής ενέργειας, την παραγωγή της, τον άνεμο και την αιολική ενέργεια, τις ανεμογεννήτριες και την βασική τους λειτουργία, τα πτερύγια, τον έλεγχο και την καμπύλη ισχύος, την αιολική ενέργεια στις μέρες μας αλλά και στον σχεδιασμό των ανεμογεννητριών.

Στο κεφάλαιο 4, με τίτλο Αεροδυναμική Ανεμογεννητριών και Αεροτομές, παρουσιάζονται βασικά αεροδυναμικά χαρακτηριστικά, βασικές αρχές και η λειτουργία των αεροτομών, καθώς και ο σχεδιασμός αυτών για ανεμογεννήτριες. Επίσης γίνεται αναφορά και στις αεροτομές που επιλέχθηκαν για την ανάλυση και την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Στο κεφάλαιο 5, με τίτλο BEM (Blade Element Momentum) Theory, γίνεται μία εισαγωγή στην αεροδυναμική ανάλυση της πτέρυγας μίας ανεμογεννήτριας, στη συνέχεια παρουσιάζεται ο σκοπός και η σημασία της μεθόδου αυτής και τέλος οι εξισώσεις που την διέπουν.

Στο κεφάλαιο 6, με τίτλο Εισαγωγή στη Μέθοδο των Πεπερασμένων Όγκων και την Ανάλυση CFD, παρουσιάζεται η παραπάνω μέθοδος η οποία αποτελεί εργαλείο για την ανάλυση προβλημάτων που δύσκολα λύνονται με αναλυτικές μεθόδους, ενώ το ίδιο γίνεται και για την ανάλυση CFD. Επίσης παρουσιάζονται οι βασικές εξισώσεις Navier-Stokes οι οποίες περιγράφουν την κίνηση των ρευστών στο χώρο και το χρόνο. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στην αριθμητική επίλυση των εξισώσεων ροής. Τέλος, παρουσιάζεται η διαδικασία της μοντελοποίησης στο Ansys μέσω του επιλυτή Fluent.

Στο 7<sup>ο</sup> και τελευταίο κεφάλαιο αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας παρατίθενται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων καθώς και τα διάφορα συμπεράσματα.

## Κεφάλαιο 2. ΑΝΕΜΟΣ ΚΑΙ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

---

### 2.1 Ιστορία της δημιουργίας αιολικής ενέργειας

Η εκμετάλλευση του ανέμου προς όφελος της ανθρωπότητας δεν είναι κάτι καινούργιο. Ταξιδεύοντας πίσω στον χρόνο, τα κειμήλια του παρελθόντος μαρτυρούνε την εξάρτηση της από τον άνεμο. Απλές εργασίες όπως ο διαχωρισμός της ήρας από το σιτάρι, ο κλιματισμός των κτιρίων κυρίως σε υποτροπικές και τροπικές περιοχές, η συντήρηση πυρκαγιών αλλά και το λιώσιμο μετάλλων φανερώνουν το μέγεθος της εξάρτησης σε πολλές πτυχές της καθημερινότητας μας. Η βοήθεια του ανέμου ήταν τόσο σημαντική για την παραγωγή καθημερινών προϊόντων και εργαλείων καταφέροντας να δημιουργήσει ένα εύπορο έδαφος για την άνθιση του εμπορίου. Με την εφεύρεση του ιστιοφόρου ενώθηκαν απομακρυσμένες ακτές και δημιουργήθηκαν εμπορικές σχέσεις. Οι άνεμοι που πνέουν στις υποτροπικές ζώνες της γης ονομάζονται ακόμα και σήμερα «εμπορικοί άνεμοι» <sup>[1]</sup>.

Η πρώτη ατμομηχανή χρονολογείται τουλάχιστον 2000 χρόνια πριν από τον Έλληνα μηχανικό και εφευρέτη Ήρων τον Αλεξανδρεύς. Οι μύλοι στην Περσία λέγεται ότι υπήρχαν από τον έβδομο αιώνα μ.Χ. και πρόκειται για μύλους δημητριακών οι οποίοι είχαν έναν κάθετο άξονα. Ο πρώτος ανεμόμυλος στη Γαλλία αναφέρεται το 1105. Από εκεί, η τεχνολογία αυτή εξαπλώθηκε στην Αγγλία όπου οι πρώτοι ανεμόμυλοι έκαναν την εμφάνισή τους το 1140. Εμφανίζονται σε αυξανόμενο αριθμό στα ανατολικά της Αγγλίας και της Βόρειας Ευρώπης τον δέκατο τρίτο αιώνα, συγκεκριμένα στη Δανία το 1235. Το αποκορύφωμα αυτής της εξέλιξης βρίσκεται μεταξύ 1500 και 1650 όταν η καλλιεργήσιμη γη στην Ολλανδία θα μπορούσε να επεκταθεί κατά 40% λόγω της χρήσης ανεμοκίνητων αντλιών αποστράγγισης. Επίσης λέγεται ότι η ανέγερση του πρώτου γερμανικού ανεμόμυλου έγινε το 1393. Περίπου 100.000 ανεμόμυλοι λειτουργούσαν στην Ευρώπη με σκοπό την άντληση νερού για την παραγωγή αλεύρου τον 18ο και 19ο αιώνα <sup>[1]</sup>.

Η ιστορία παραγωγής ενέργειας από τον άνεμο είναι πολύ μικρότερη. Ο Δανός Poul la Cour (1846-1908) κατασκεύασε την πρώτη ανεμογεννήτρια στο Askov το 1897. Ο Γερμανός μηχανικός Betz περιέγραψε την αεροδυναμική θεωρία των ανεμογεννητριών το 1926. Ο συντελεστής Betz (16/27) είναι γνωστός ακόμα και σήμερα ως ο περιοριστικός παράγοντας για την ποσότητα της ενέργειας η οποία μπορεί να εξαχθεί από τη ροή του ανέμου μέσω μίας

ανεμογεννήτριας. Η μεγάλη έκρηξη στην κατασκευή και εγκατάσταση ανεμογεννητριών παρ' όλα αυτά έγινε τις τελευταίες δύο δεκαετίες του 20ου αιώνα <sup>[1]</sup>.

Μία πρόωρη αποτυχημένη προσπάθεια ήταν η κατασκευή της γερμανικής ανεμογεννήτριας 3MW, "Growian" το 1983. Ήταν μία ανεμογεννήτρια δύο πτερυγίων με διάμετρο ρότορα τα 100m. Παρήγαγε ηλεκτρική ενέργεια μόνο για 17 ημέρες λόγω μιας σειράς τεχνικών προβλημάτων και αφαιρέθηκε το 1988. Η ανάπτυξη ξεκίνησε ξανά με μικρές ανεμογεννήτριες. Αυτή η «εξελικτική» προσέγγιση ήταν επιτυχής, με αποτέλεσμα σήμερα να κατασκευάζονται ακόμα μεγαλύτερες από την "Growian", με αποκορύφωμα τις ανεμογεννήτριες των υπεράκτιων αιολικών πάρκων <sup>[1]</sup>.

## **2.2 Δημιουργία ανέμου**

Ο άνεμος προκύπτει από την κίνηση του αέρα λόγω των κλίσεων της ατμοσφαιρικής πίεσης. Η ροή του ανέμου έχει κατεύθυνση από περιοχές υψηλότερης πίεσης σε περιοχές χαμηλότερης και όσο μεγαλύτερη είναι η κλίση της ατμοσφαιρικής, τόσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του ανέμου και επομένως μεγαλύτερη η αιολική ισχύς που μπορεί να συλληφθεί από τον άνεμο μέσω μηχανημάτων μετατροπής ενέργειας <sup>[2]</sup>.

Η δημιουργία και η κίνηση του ανέμου είναι πολύπλοκη λόγω πολλών παραγόντων. Μεταξύ αυτών, οι πιο σημαντικοί είναι η άνιση ηλιακή θέρμανση, η επίδραση Coriolis εξαιτίας της αυτοπεριστροφής της γης καθώς και οι τοπικές γεωγραφικές συνθήκες <sup>[2]</sup>.

### **2.2.1 Άνιση ηλιακή θέρμανση**

Μεταξύ όλων των παραγόντων που επηρεάζουν την δημιουργία ανέμου, η άνιση ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια της γης είναι η πιο σημαντική και κρίσιμη. Η ανομοιομορφία της ακτινοβολίας μπορεί να αποδοθεί σε τέσσερις λόγους <sup>[2]</sup>.

Πρώτον, η γη είναι μία σφαίρα που περιστρέφεται γύρω από τον ήλιο στο ίδιο επίπεδο με αυτό του ισημερινού. Επειδή η επιφάνεια της γης στις περιοχές του ισημερινού είναι κάθετη στην πορεία των ακτινών του ήλιου αλλά παράλληλη με τις ακτίνες του ήλιου στους πόλους, ο ισημερινός δέχεται τη μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας, με την ποσότητα αυτή να μειώνεται προς τους πόλους. Λόγω της ανομοιομορφίας χωρικά θέρμανσης της γης, σχηματίζεται μία κλίση θερμοκρασίας από τον ισημερινό προς τους πόλους και μία κλίση πίεσης από τους πόλους προς τον ισημερινό. Έτσι θερμός αέρας με χαμηλότερη πυκνότητα στον ισημερινό ανεβαίνει στην υψηλή ατμόσφαιρα

και κινείται προς του πόλους και ψυχρός αέρας με μεγαλύτερη πυκνότητα ρέει από τους πόλους προς τον ισημερινό κατά μήκος της επιφάνειας της γης. Χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η αυτοπεριστροφή της γης και η δύναμη Coriolis που προκαλείται από την περιστροφή, η κυκλοφορία του αέρα σε κάθε ημισφαίριο σχηματίζει ένα κελί που ορίζεται ως η μεσημβρινή ατμοσφαιρική κυκλοφορία <sup>[2]</sup>.

Δεύτερον, ο αυτοπεριστρεφόμενος άξονας της γης έχει κλίση περίπου  $23,5^\circ$  σε σχέση με το επίπεδο εκλειπτικής. Είναι η κλίση του άξονα της γης κατά την περιστροφή γύρω από τον ήλιο που οδηγεί σε κυκλική ανομοιόμορφη θέρμανση, προκαλώντας τον ετήσιο κύκλο του εποχιακών καιρικών αλλαγών <sup>[2]</sup>.

Τρίτον, η επιφάνεια της γης καλύπτεται με διαφορετικούς τύπους υλικών όπως βλάστηση, βράχους, άμμο, νερό, πάγο, χιόνι κ.λπ. Κάθε ένα από αυτά τα υλικά έχει διαφορετική ανάκλαση και ρυθμούς απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας, οδηγώντας σε υψηλή θερμοκρασία σε κάποιες περιοχές (π.χ. ερήμους) και χαμηλή σε άλλες (π.χ. παγωμένες λίμνες), ακόμη και στα ίδια γεωγραφικά πλάτη <sup>[2]</sup>.

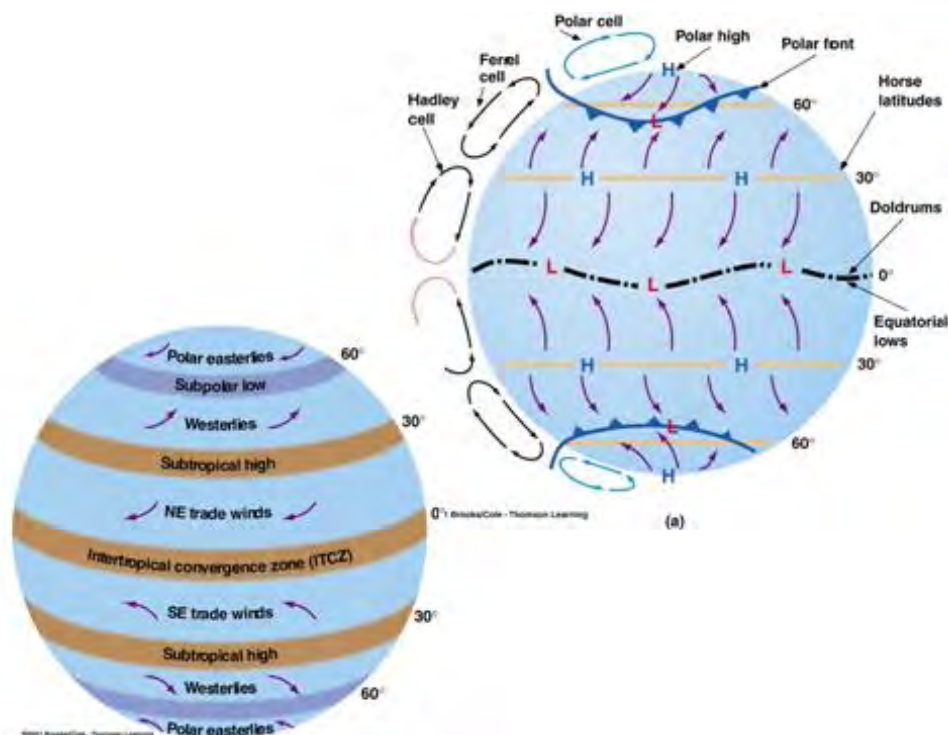
Ο τέταρτος λόγος για την ανομοιόμορφη θέρμανση της ηλιακής ακτινοβολίας οφείλεται στη τοπογραφική επιφάνεια της γης. Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός βουνών, κοιλάδων, λόφων κ.λπ. στη γη, με αποτέλεσμα να υπάρχει διαφορετική ηλιακή ακτινοβολία στις ηλιόλουστες και σκιερές πλευρές <sup>[2]</sup>.

### **2.2.2 Δύναμη Coriolis**

Η αυτοπεριστροφή της γης είναι ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την κατεύθυνση και την ταχύτητα του ανέμου. Η δύναμη Coriolis, η οποία δημιουργείται από την αυτοπεριστροφή της γης, εκτρέπει την κατεύθυνση των ατμοσφαιρικών κινήσεων. Στη βόρεια ατμόσφαιρα ο άνεμος πνέει προς τα δεξιά και στη νότια ατμόσφαιρα προς τα αριστερά. Η δύναμη Coriolis εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος της γης, είναι μηδέν στον ισημερινό και φτάνει τις μέγιστες τιμές στους πόλους. Επιπλέον η ποσότητα εκτροπής του άνεμο εξαρτάται επίσης από την ταχύτητα του ανέμου, με μικρή ταχύτητα θα εκτρέπεται επίσης μικρή ποσότητα, ενώ ισχυρότεροι άνεμοι εκτρέπονται περισσότερο <sup>[2]</sup>.

Σε μεγάλης κλίμακας ατμοσφαιρικές κινήσεις, ο συνδυασμός της κλίσης της πίεσης λόγω της ανομοιόμορφης ηλιακής ακτινοβολίας και της δύναμης Coriolis λόγω της

αυτοπεριστροφής της γης προκαλεί τη διάσπαση του μεσημβρινού κελιού σε τρία κελιά μεταφοράς σε κάθε ημισφαίριο, το κελί Hadley, το κελί Ferrel και το κελί Polar Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: Ατμοσφαιρική κυκλοφορία (Πηγή: [www.weather.gov](http://www.weather.gov))

Κάθε κελί έχει το δικό του χαρακτηριστικό μοτίβο κυκλοφορίας. Στο βόρειο ημισφαίριο, η κυκλοφορία των κελιών Hadley βρίσκεται μεταξύ του ισημερινού βόρειο γεωγραφικό πλάτος 30°, κυριαρχώντας στα τροπικά και υποτροπικά κλίματα. Ο θερμός αέρας ανεβαίνει στον ισημερινό και ρέει προς τον Βόρειο πόλο στην ανώτερη ατμόσφαιρα. Αυτός ο κινούμενος αέρας εκτρέπεται από τη δύναμη Coriolis για να δημιουργήσει τους βορειοανατολικούς εμπορικούς ανέμους. Σε περίπου γεωγραφικό πλάτος 30°, η δύναμη Coriolis γίνεται τόσο ισχυρή ώστε να ισορροπεί τη διαβαθμισμένη δύναμη της πίεσης. Ως αποτέλεσμα, οι άνεμοι μετατοπίζονται προς τα δυτικά. Ο συσσωρευμένος αέρας στην ανώτερη ατμόσφαιρα σχηματίζει την υποτροπική ζώνη υψηλής πίεσης και βυθίζεται έτσι πίσω στην επιφάνεια της γης και χωρίζεται σε δύο συνιστώσες με τη μία να επιστρέφει στον ισημερινό ώστε να κλείσει το βρόγχο του κελιού Hadley και την άλλη να κινείται κατά μήκος της επιφάνειας της γης με κατεύθυνση τον Βόρειο Πόλο για να σχηματιστεί η κυκλοφορία του κελιού Ferrel, η οποία βρίσκεται ανάμεσα στα βόρεια γεωγραφικά πλάτη 30° και 60°. Ο αέρας κυκλοφορεί προς το Βόρειο Πόλο κατά μήκος της επιφάνειας της γης μέχρι να

συγκρουστεί με τον ψυχρό αέρα που ρέει από τον Βόρειο Πόλο σε γεωγραφικό πλάτος περίπου  $60^\circ$ . Υπό την επιρροή της δύναμης Coriolis, η κίνηση του αέρα σε αυτή τη ζώνη εκτρέπεται για να παράγει τους δυτικούς ανέμους. Η κυκλοφορία του Polar κελιού βρίσκεται μεταξύ του Βόρειου Πόλου και του γεωγραφικού πλάτους  $60^\circ$ . Ο ψυχρός αέρας βυθίζεται στο Βόρειο Πόλο και ρέει κατά μήκος της επιφάνειας της γης προς τον ισημερινό. Κοντά στο βόρειο γεωγραφικό πλάτος  $60^\circ$ , το φαινόμενο Coriolis γίνεται τόσο έντονο ώστε να εξαναγκάζει τη ροή του αέρα προς τα νοτιοδυτικά <sup>[2]</sup>.

### 2.2.3 Τοπικές γεωγραφικές συνθήκες

Η τραχύτητα στην επιφάνεια της γης είναι αποτέλεσμα τόσο της φυσικής γεωγραφίας όσο και των ανθρώπινων κατασκευών. Η τριβή είναι μία δύναμη που οφείλεται στη σχετική κίνηση του ατμοσφαιρικού αέρα πάνω στην επιφάνεια της γης και εξαρτάται από το ανάγλυφο αυτής. Όσο πιο τραχύ είναι το έδαφος τόσο πιο μεγάλη είναι η δύναμη της τριβής. Η χαμηλότερη τιμή της τριβής βρίσκεται πάνω από το επίπεδο της θάλασσας. Η επιβράδυνση αυτή προκαλεί ένα φαινόμενο γνωστό και ως διάτμηση ανέμου. Ο ρυθμός με τον οποίο αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου με το ύψος ποικίλλει ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες της τοπογραφίας, του εδάφους και του κλίματος, με τους μεγαλύτερους ρυθμούς αυξήσεων να παρατηρούνται στο πιο ανώμαλο έδαφος. Μία αξιόπιστη προσέγγιση είναι ότι η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται περίπου 10% με κάθε διπλασιασμό του ύψους. Επιπλέον, ορισμένες ειδικές γεωγραφικές δομές μπορούν να ενισχύσουν έντονα την ένταση του ανέμου. Για παράδειγμα, ο άνεμος που φυσά μέσα από ορεινά περάσματα μπορεί να σχηματίσει αεροχείμαρρους υψηλών ταχυτήτων <sup>[2]</sup>.

## 2.3 Άνεμος και αιολική ενέργεια

Ο άνεμος είναι η κύρια πηγή καταπόνησης των ανεμογεννητριών. Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, η δημιουργία του ανέμου εξαρτάται κυρίως από την ηλιακή θέρμανση, την επίδραση Coriolis καθώς και τις τοπικές γεωγραφικές συνθήκες. Αυτό σημαίνει πως η ταχύτητα του ανέμου είναι διαφορετική από τόπο σε τόπο και παράλληλα ποικίλλει κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η διακύμανση αυτή είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για την εκτίμηση της παραγόμενης ισχύος από μία ανεμογεννήτρια και για το λόγο αυτό έχει ορισθεί η μέση ταχύτητα του ανέμου  $U_{10}$  σε χρονικό διάστημα δέκα λεπτών, η οποία σε συνδυασμό με την τυπική απόκλιση  $\sigma$  αυτής αποδίδει τη μεταβολή του ανέμου

με την πάροδο του χρόνου. Οι μεταβλητές αυτές παραμένουν σταθερές σε αυτό το διάστημα των δέκα λεπτών ενώ αλλάζουν σε ειδικές μόνο περιπτώσεις οι οποίες έχουν να κάνουν με τις ακραίες μεταβολές των καιρικών συνθηκών, όπως είναι αυτές των τυφώνων καθώς και των ανεμοστρόβιλων. Σε αυτές τις περιπτώσεις οι δύο αυτές μεταβλητές θεωρούνται ανεπαρκής <sup>[3]</sup>.

### 2.3.1 Συνθήκες ανέμου

Η μέση ταχύτητα  $U_{10}$  ενός διαστήματος δέκα λεπτών διαφέρει με την αντίστοιχη ταχύτητα κάποιου άλλου διαστήματος δέκα λεπτών. Αυτή η φυσική μεταβλητότητα μπορεί να αποδοθεί με μία συνάρτηση κατανομής πιθανότητας. Μακροπρόθεσμα, η κατανομή της  $U_{10}$  μπορεί να δοθεί από την κατανομή Weibull:

$$F_{U_{10}}(u) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{u}{A}\right)^k\right) \quad (0.1)$$

όπου  $k=0.4$  είναι η σταθερά του von Karman, ενώ η παράμετρος  $A$  είναι συνάρτηση του ύψους  $z$  και δίνεται από τη σχέση:

$$A = A_H \frac{\ln \frac{z}{z_0}}{\ln \frac{H}{z_0}} \quad (2.2)$$

όπου  $z_0$  είναι η παράμετρος τραχύτητας του εδάφους που ορίζεται ως το ύψος στο οποίο η ταχύτητα του ανέμου είναι μηδέν, με την προϋπόθεση ότι το κατακόρυφο προφίλ ταχυτήτων του ανέμου είναι λογαριθμική συνάρτηση του ύψους. Η παράμετρος  $A_H$  είναι η παράμετρος της κλίμακας στο ύψος αναφοράς  $H$ . Μία συνηθισμένη επιλογή για το ύψος αναφοράς είναι η τιμή  $H = 10m$ , ωστόσο για την περίπτωση των ανεμογεννητριών συνηθίζεται η επιλογή του ύψους του άξονα περιστροφής του ρότορα ως ύψος αναφοράς. Το προφίλ της ταχύτητας του ανέμου πάνω από το έδαφος είναι λογαριθμική συνάρτηση του ύψους  $z$  και δίνεται από τη σχέση:

$$u(z) = \frac{u^*}{k} \ln \frac{z}{z_0} \quad (2.3)$$

όπου  $u^*=(\tau/\rho)^{1/2}$  είναι η ταχύτητα τριβής,  $\tau$  είναι η διατμητική τάση στην επιφάνεια του εδάφους,  $\rho$  είναι η πυκνότητα του αέρα και  $k=0,4$  είναι η σταθερά Von Karman, ενώ θεωρούνται ουδέτερες οι ατμοσφαιρικές συνθήκες .

Ένα ομοιογενές έδαφος χαρακτηρίζεται από μία σταθερά  $z_0$  με τις τυπικές της τιμές για τους διάφορους τύπους εδάφους να παρουσιάζονται στον Πίνακας 2.1. Για υπεράκτιες τοποθεσίες όπου το έδαφος αποτελείται από την επιφάνεια της θάλασσας, η παράμετρος της τραχύτητας δεν είναι σταθερή, αλλά εξαρτάται από <sup>[3]</sup>:

- Την ταχύτητα του ανέμου
- Την ανάντη απόσταση από τη στεριά
- Το βάθος του νερού
- Το κυματικό πεδίο

Πίνακας 2.1: Η παράμετρος της ταχύτητας για τους διάφορους τύπους του εδάφους (Πηγή: Guidelines for Design of Wind Turbines - DNV/Risø)

| Terrain type                                              | Roughness parameter $z_0$ (m) |
|-----------------------------------------------------------|-------------------------------|
| Plane ice                                                 | 0,00001                       |
| Open sea without waves                                    | 0,0001                        |
| Open sea with waves                                       | 0,0001 - 0,003                |
| Coastal areas with onshore winds                          | 0,001                         |
| Open country without significant building and vegetations | 0,01                          |
| Cultivated land with scattered buildings                  | 0,05                          |
| Forests and suburbs                                       | 0,3                           |
| City centers                                              | 1 - 10                        |

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η κλίμακα Beaufort η οποία χωρίζει την ταχύτητα του ανέμου σε βαθμίδες ανάλογα με το μέγεθός της, Πίνακας 2.2.

Πίνακας 2.2: Κλίμακα Beaufort (Πηγή: www.emy.gr)

| Βαθμίδα | Ταχύτητα ανέμου |         |         | Χαρακτηρισμός ανέμου            | Χαρακτηρισμός θάλασσας |
|---------|-----------------|---------|---------|---------------------------------|------------------------|
|         | [m/sec]         | [knots] | [km/h]  |                                 |                        |
| 0       | <1              | <1      | <2      | Άπνοια ή νηνεμία                | Γαλήνια                |
| 1       | 1-2             | 1-3     | 1-5     | Σχεδόν άπνοια ή Υποπνέων άνεμος | Ρυτιδωμένη             |
| 2       | 2-3             | 4-6     | 6-11    | Πολύ ασθενής                    | Ήρεμη                  |
| 3       | 4-5             | 7-10    | 12-19   | Ασθενής                         | Λίγο ταραγμένη         |
| 4       | 6-8             | 11-16   | 20-29   | Σχεδόν μέτριος                  | Ταραγμένη              |
| 5       | 9-11            | 17-21   | 30-39   | Μέτριος                         |                        |
| 6       | 12-14           | 22-27   | 40-50   | Ισχυρός                         | Κυματώδης              |
| 7       | 15-17           | 28-33   | 51-61   | Σχεδόν Θυελλώδης ή Πολύ ισχυρός | Πολύ κυματώδης         |
| 8       | 18-21           | 34-40   | 62-74   | Θυελλώδης                       |                        |
| 9       | 22-24           | 41-47   | 76-87   | Πολύ Θυελλώδης                  | Τρικυμώδης             |
| 10      | 25-28           | 48-55   | 88-102  | Θύελλα                          | Πολύ                   |
| 11      | 29-32           | 56-63   | 103-118 | Ισχυρή θύελλα                   | τρικυμώδης             |
| 12      | 33+             | 64+     | 119+    | Κυκλώνας                        | Πολύ άγρια             |

### 2.3.2 Τυπική απόκλιση της ταχύτητας του ανέμου

Σύμφωνα με του Δανικούς κανονισμούς η περίοδος επαναφοράς για την  $U_{10}$  είναι τα 50 χρόνια σε ύψος 10m από το έδαφος και με τραχύτητα ίση με  $z_0 = 0,05$ .

Για μία δεδομένη τιμή του  $U_{10}$ , η τυπική απόκλιση συ της ταχύτητας του ανέμου παρουσιάζει μία μεταβλητότητα από το μία περίοδο δέκα λεπτών στην επόμενη. Αυτή η μεταβλητότητα της ταχύτητας του ανέμου είναι γνωστή ως η τύρβη του ανέμου και ως εκ τούτου, η  $\sigma_U$  αναφέρεται συχνά ως η τυπική απόκλιση αυτής. Μετρήσεις σε πλήθος περιοχών δείχνουν ότι η κατανομή της  $\sigma_U$  σε συσχέτιση με την  $U_{10}$  αποδίδεται ικανοποιητικά από την λογαριθμική κανονική κατανομή:

$$F_{\sigma_U|U_{10}}(\sigma) = \Phi\left(\frac{\ln \sigma - b_0}{b_1}\right) \quad (2.4)$$

όπου με  $\Phi()$  αναπαρίσταται η τυπική κατανομή του Gauss. Οι όροι  $b_0$  και  $b_1$  εξαρτώνται από την περιοχή μελέτης και την  $U_{10}$ .

Μία συντηρητικά σταθερή επιλογή για την τυπική απόκλιση συ είναι επιθυμητή για σχεδιαστικούς σκοπούς π.χ. μία χαρακτηριστική τιμή και ο κανονισμός DS472 ο οποίος προτείνει:

$$\sigma_{U,c} = U_{10} \frac{1}{\ln \frac{z}{z_0}} \quad (2.5)$$

Επίσης, το πρότυπο IEC61400-1 απαιτεί τη χρήση μίας χαρακτηριστικής τυπικής απόκλισης για την ταχύτητα του ανέμου:

$$\sigma_{U,c} = I_{15} \frac{U_{10,15} + aU_{10}}{a+1} \quad (2.6)$$

όπου  $U_{10,15} = 15$  m/sec είναι η ταχύτητα αναφοράς του ανέμου,  $I_{T,15}$  είναι η ένταση της τύρβης για ταχύτητα ανέμου 15 m/sec και  $a$  είναι η παράμετρος κλίσης. Τυπικές τιμές για περιπτώσεις υψηλών επιπέδων τύρβης είναι οι  $I_{T,15} = 0.18$  και  $a = 2$ , ενώ για περιπτώσεις χαμηλών επιπέδων τύρβης είναι αντίστοιχα οι  $I_{T,15} = 0.16$  και  $a = 3$  [3].

### 2.3.3 Ένταση τύρβης

Η ένταση της τύρβης είναι ο λόγος της τυπικής απόκλισης της ταχύτητας του ανέμου προς την μέση ταχύτητα των δέκα λεπτών  $U_{10}$ ,  $I_T = \sigma_U / U_{10}$ .

Να σημειωθεί ότι η παρουσία μίας ανεμογεννήτριας επηρεάζει τη ροή του ανέμου τοπικά και η τύρβη πίσω από αυτή είναι διαφορετική απ' ότι στο μπροστινό μέρος. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως «wake effect» (φαινόμενο απόρου). Ως συνήθως, η παρουσία μίας ανεμογεννήτριας θα οδηγήσει σε αυξημένη ένταση της τύρβης πίσω από αυτή γι' αυτό και το «wake effect» θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για την εγκατάσταση ανεμογεννητριών σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους, συνήθως σε αποστάσεις μικρότερες των 20 διαμέτρων του ρότορα [3].

### 2.3.4 Πλευρική και οριζόντια τύρβη

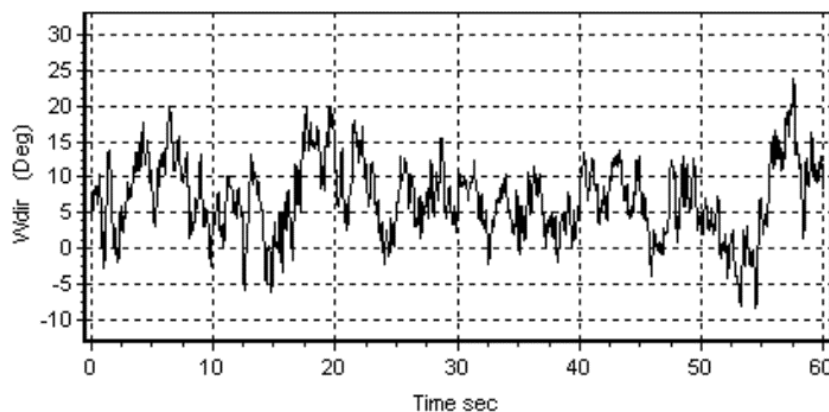
Η μέση ταχύτητα του ανέμου διάρκειας δέκα λεπτών, η τυπική απόκλιση αυτής καθώς και η ένταση της τύρβης που παρουσιάστηκαν παραπάνω, αναφέρονται στην ταχύτητα του ανέμου στη σταθερή του κατεύθυνση του μέσου ανέμου κατά τη διάρκεια των δέκα λεπτών επί σταθερών συνθηκών. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, εκτός από την τύρβη στην διεύθυνση του ανέμου, αναπτύσσεται τύρβη πλευρικά αλλά και οριζόντια. Η μέση πλευρική

ταχύτητα θα είναι μηδενική, ενώ η πλευρική τυπική απόκλιση του ταχύτητας του ανέμου μπορεί να ληφθεί ως  $\sigma_{Uy}=0,75\sigma_U$  ή και  $0,80$ . Η μέση κατακόρυφη ταχύτητα του ανέμου θα είναι επίσης μηδέν ενώ η κατακόρυφη τυπική απόκλιση μπορεί να ληφθεί ως  $\sigma_{Uz}=0,5\sigma_U$ .

Είναι σημαντικό να τονισθεί πως όλες αυτές οι τιμές αναφέρονται σε ένα ομοιογενές έδαφος, για σύνθετα εδάφη, το πεδίο της ταχύτητας του ανέμου θα είναι πιο ισότροπο και οι τιμές  $\sigma_{Uy}$  και  $\sigma_{Uz}$  αναμένεται να είναι κοντά στη τιμή του  $\sigma_U$  [3].

### 2.3.5 Κατεύθυνση ανέμου

Η κατεύθυνση του ανέμου καθώς και η αλλαγές αυτής καθορίζονται από την γεωγραφία, τις παγκόσμιες και τοπικές κλιματικές συνθήκες και από την περιστροφή της γης. Τοπικά, η κατεύθυνση του ανέμου θα ποικίλλει ανάλογα με την πλευρική ένταση της τύρβης, ενώ, ιδίως για περιοχές κοντά στην ακτή, η κατεύθυνση του ανέμου μπορεί να ποικίλλει και μεταξύ ημέρας και νύχτας [3].



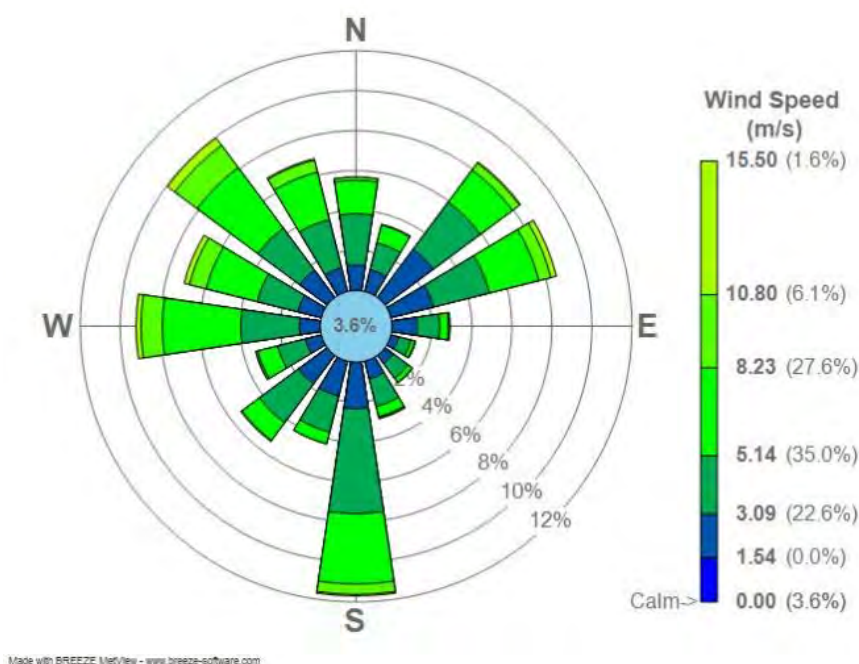
Σχήμα 2.2: Παράδειγμα διακυμάνσεων στην κατεύθυνση του ανέμου (Πηγή: DNV and Risø) [3]

Αν και το σύστημα εκτροπής της ανεμογεννήτριας θα κρατήσει τον ρότορα προς την κατεύθυνση του ανέμου, οι βραχυπρόθεσμες διακυμάνσεις στην κατεύθυνση του ανέμου προκαλούν φόρτιση κόπωσης. Σε υψηλές ταχύτητες ανέμου, ξαφνικές αλλαγές στην κατεύθυνση του ανέμου κατά τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας μπορεί να προκαλέσει ακραία φορτία [3].

Η κατανομή της διεύθυνσης του ανέμου έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον όσον αφορά την εγκατάσταση των ανεμογεννητριών σε αιολικά πάρκα. Με την εγκατάσταση πολλών

ανεμογεννητριών, κάθε ανεμογεννήτρια λειτουργεί και σαν εμπόδιο για τις γειτονικές της προκαλώντας με αυτό τον τρόπο σημαντική αύξηση στην ένταση της τύρβης [3].

Η κατανομή της διεύθυνσης του ανέμου συχνά αντιπροσωπεύεται από ένα ροδόγραμμα (wind rose) όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3: Ροδόγραμμα αεροδρομίου LaGuardia, New York. 2008 (Πηγή: Wikipedia)

Το ροδόγραμμα, παρουσιασμένο σε κυκλική μορφή, είναι το σύγχρονο διάγραμμα ανέμων το οποίο δείχνει την συχνότητα των ανέμων που πνέουν από συγκεκριμένες κατευθύνσεις σε μία συγκεκριμένη περίοδο. Το μήκος κάθε ακτίνας γύρω από τον κύκλο σχετίζεται με τη συχνότητα που πνέει ο άνεμος από μία συγκεκριμένη κατεύθυνση ανά μονάδα χρόνου. Κάθε ομόκεντρος κύκλος αντιπροσωπεύει διαφορετική συχνότητα, που εκπέμπεται από το μηδέν στο κέντρο έως τις αυξανόμενες συχνότητες στους εξωτερικούς κύκλους. Ένα ροδόγραμμα μπορεί να περιέχει επιπρόσθετες πληροφορίες, δείχνοντας ακόμα και τις διάφορες ταχύτητες του ανέμου με χρωματικά κωδικοποιημένες ζώνες. Επίσης, ένα ροδόγραμμα χωρίζεται σε 16 βασικές κατευθύνσεις, δείχνοντας το Βορρά (B), BBA, BA, κ.λπ., αν και μπορούν να υποδιαιρεθούν σε έως και 32 κατευθύνσεις. Όσον αφορά τη μέτρηση της γωνίας σε μοίρες, ο Βορράς αντιστοιχεί σε 0°/160°, η Ανατολή σε 90°, ο νότος σε 180° και η Δύση σε 270°. Τέλος, σύνταξη ενός ροδογράμματος είναι ένα από τα προκαταρκτικά βήματα που λαμβάνονται για την κατασκευή ανεμογεννητριών.

## Κεφάλαιο 3. ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΚΑΙ Η ΒΑΣΙΚΗ ΤΟΥΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ

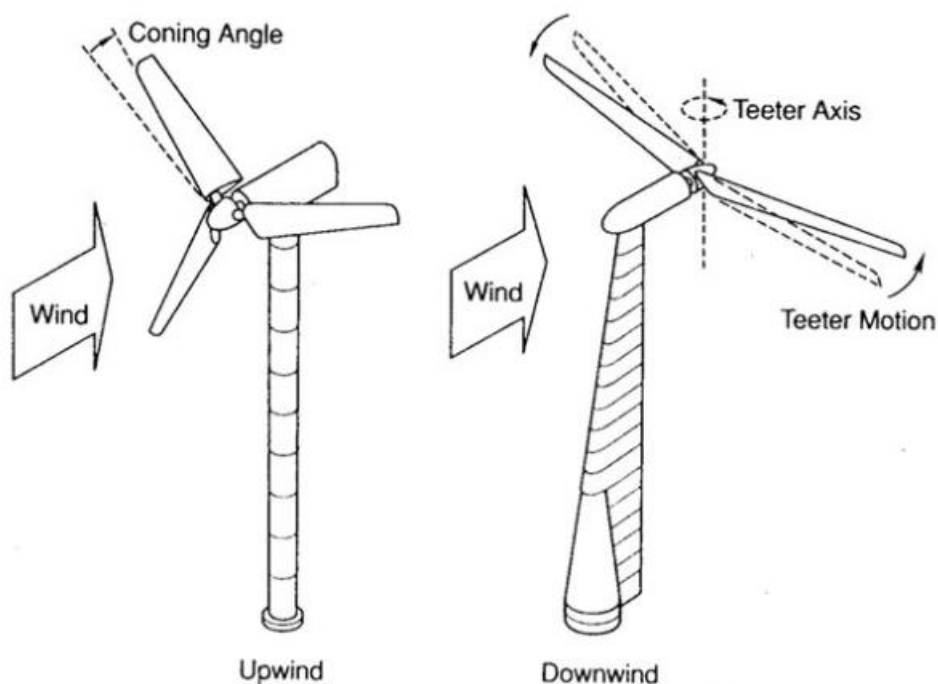
---

### 3.1 Ανεμογεννήτριες και βασική λειτουργία

#### 3.1.1 Εισαγωγή

Με την εξέλιξη της μηχανικής ενόρασης και τεχνολογίας τις τελευταίες δεκαετίες του 20ού αιώνα, ήρθε η ανάπτυξη μηχανών οι οποίες μπορούν να εξάγουν αποτελεσματικά ισχύ από τον άνεμο. Ο όρος «ανεμογεννήτριες» χρησιμοποιείται ως γενικός όρος για μηχανές με περιστρεφόμενα πτερύγια που μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε χρήσιμη ισχύ <sup>[3]</sup>.

Τον 20ο αιώνα, τα πρώιμα σχέδια των ανεμογεννητριών βασίστηκαν σε τρεις βασικές φιλοσοφίες για τον χειρισμό των φορτίων, την αντοχή των φορτίων, την απόρριψη ή αποφυγή των φορτίων και την διαχείριση αυτών είτε μηχανικά είτε ηλεκτρικά, ή και των δύο. Εν μέσω αυτής της εξέλιξης, δημιουργήθηκαν πολλά σχέδια ανεμογεννητριών, συμπεριλαμβανομένων των ανεμογεννητριών κάθετου (VAWT) καθώς και οριζόντιου άξονα (HAWT). Αυτού του τύπου οι ανεμογεννήτριες είναι εξοπλισμένες με δύο, τρία ακόμα και τέσσερα πτερύγια. Ένας επιπλέον διαχωρισμός γίνεται στις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα στις οποίες ανάλογα με τη κατεύθυνση του ανέμου σε σχέση με τον ρότορα κατατάσσονται σε upwind όταν ο ρότορας προσβάλλεται από αυτόν (ναυτική ορολογία: προσήνεμη πλευρά) και σε downwind όταν οι ανεμογεννήτριες έχουν τον ρότορα στην υπήνεμη πλευρά τους Σχήμα 3.1<sup>[3]</sup>.



Σχήμα 3.1: Διαχωρισμός σε upwind/downwind <sup>[4]</sup>.

Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες εξελίχθηκαν από τα πρώτα σχέδια και πλέον μπορούν να ταξινομηθούν ως ανεμογεννήτριες δύο ή τριών πτερυγίων με οριζόντιους άξονες και ρότορες τύπου upwind. Σήμερα, η επιλογή μεταξύ ανεμογεννητριών δύο ή τριών πτερυγίων είναι απλώς θέμα αντιστάθμισης μεταξύ της αεροδυναμικής, της απόδοσης, της πολυπλοκότητας, του κόστους, του θορύβου και της αισθητικής <sup>[3]</sup>.

Πρόσθετοι παράγοντες στον σχεδιασμό ανεμογεννητριών λαμβάνονται υπόψιν και περιλαμβάνουν το αιολικό δυναμικό, τον τύπο του ρότορα, τον τύπο της γεννήτριας, την ελαχιστοποίηση των φορτίων και του θορύβου. Επιπλέον, οι τρέχουσες τάσεις κατευθυνόμενες από το λειτουργικό καθεστώς και το περιβάλλον της αγοράς, περιλαμβάνουν την ανάπτυξη ανεμογεννητριών χαμηλού κόστους, διαφόρων Megawatt και γενικώς ελαφρών κατασκευών. Επίσης παρατηρείται μία αύξηση στις ανεμογεννήτριες με μεταβαλλόμενη ταχύτητα ρότορα, από αυτές με σταθερή ταχύτητα που κυριαρχούσαν στο παρελθόν, σε μία προσπάθεια να βελτιστοποιηθεί η δέσμευση της ενέργειας καθώς και η ποιότητα ισχύος, να μειωθούν τα φορτία και να αποκτηθεί ένας περισσότερο προηγμένος τρόπος ελέγχου της ισχύος <sup>[3]</sup>.

### 3.1.2 Αρχή λειτουργίας ανεμογεννητριών

Η αρχή λειτουργίας των ανεμογεννητριών βασίζεται στη σχέση που αναπτύσσεται μεταξύ των πτερυγίων και του αέρα που τα περιστρέφει. Τα πτερύγια είναι συνδεδεμένα με έναν περιστρεφόμενο άξονα ο οποίος περνάει σε ένα κιβώτιο μετάδοσης της κίνησης το οποίο με τη σειρά του συνδέεται με έναν άλλο άξονα μέσω του οποίου μία γεννήτρια παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Επίσης οι ανεμογεννήτριες έχουν εγκατεστημένα φρένα τα οποία περιορίζουν την περιστροφική κίνηση των πτερυγίων σε περίπτωση που η ένταση του ανέμου είναι αρκετά μεγάλη. Κατά αυτόν τον τρόπο μπορεί να αποφευχθεί η οποιαδήποτε φθορά της ανεμογεννήτριας. Υπάρχουν επίσης και γεννήτριες που συνδέονται με μετασχηματιστές ώστε να υπάρχει η κατάλληλη προσαρμογή της τάσης στο εκάστοτε δίκτυο, με τις ανεμογεννήτριες να μπορούν να παράγουν σήμερα από λίγα kW έως και μερικά MW. Τέλος, ενώ υπάρχουν αρκετοί τύποι ανεμογεννητριών η αρχή λειτουργίας τους παραμένει ίδια.

### 3.1.3 Δομή ανεμογεννήτριας

Προκειμένου μία σύγχρονη ανεμογεννήτρια να μετατρέψει την αιολική ενέργεια σε ηλεκτρική θα πρέπει να αποτελείται από συγκριμένα εξαρτήματα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται 16 από αυτά και εξηγείται η λειτουργία τους <sup>[4]</sup>.

- Η Βάση (Base or Foundation)
- Ο Πύργος (Tower)
- Ο Δρομέας ή Ρότορας (Rotor)
- Ο Άξονας Χαμηλής Ταχύτητας (Low-Speed Shaft)
- Το Ρουλεμάν του Κύριου Άξονα (Main Shaft Bearing)
- Το Κιβώτιο Ταχυτήτων (Gear Box)
- Ο Άξονας Υψηλής Ταχύτητας (High-Speed Shaft)
- Η Γεννήτρια (Generator)
- Η Άτρακτος (Nacelle)
- Ο Οδηγός Εκτροπής (Yaw Drive)
- Ο Ελεγκτής Κλίσης (Pitch Control)
- Το Σύστημα Πέδησης (Braking System)
- Ο Ελεγκτής (The Controller)

- Ο Ανεμοδείκτης και το Ανεμόμετρο (The Wind Vane and Anemometer)
- Ο Μετασχηματιστής (The Transformer)
- Το Σύστημα Μετάδοσης (The Transmission System)

## 1. Η Βάση

Στις περισσότερες περιπτώσεις τα θεμέλια μίας ανεμογεννήτριας είναι εγκατεστημένα βαθιά μέσα στο έδαφος. Αυτά είναι ένα από τα πιο σημαντικά μέρη μίας ανεμογεννήτριας διότι συγκρατούν ολόκληρη τη δομή όρθια και σταθερή.

Εκτός από την στήριξη του βάρους της ίδιας της ανεμογεννήτριας, τα θεμέλια βοηθούν στην διασφάλιση της αντοχής αυτής από τις έντονες πιέσεις που προκαλούνται από τις υψηλές ταχύτητες του ανέμου. Αυτό σημαίνει ότι η βάση πρέπει να είναι από τα πιο βαριά και ανθεκτικά μέρη μίας ανεμογεννήτριας.

Τα θεμέλια χωρίζονται σε διάφορους τύπους οι οποίοι συχνά αποφασίζονται κυρίως με βάση το μέγεθος και τον τύπο της ίδιας της ανεμογεννήτριας. Γενικά, χρησιμοποιούνται διαφορετικοί τύποι θεμελίωσης μεταξύ χερσαίων και υπεράκτιων ανεμογεννητριών.

Κατά τον σχεδιασμό μιας βάσης για χερσαίες ανεμογεννήτριες, οι κύριοι παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη περιλαμβάνουν τη θέση και τις συνθήκες της τοποθεσίας. Εκτός από αυτά, συνήθως λαμβάνονται υπόψη και τα χαρακτηριστικά της ίδιας της ανεμογεννήτριας, όπως το βάρος και το μέγεθός της.

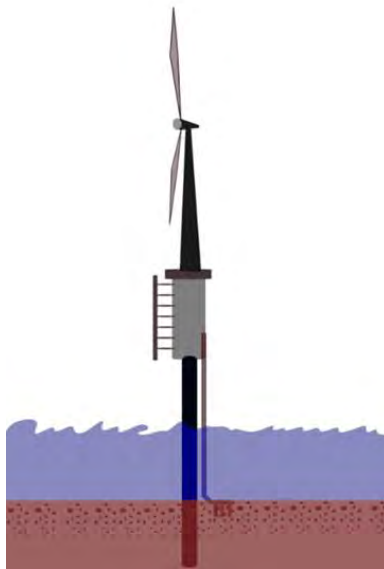
Οι συνθήκες τοποθεσίας που καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο θα σχεδιαστεί η θεμελίωση περιλαμβάνουν τις γεωτεχνικές συνθήκες, (φύση και φέρουσα ικανότητα των εδαφών, βάθος υπόγειων υδάτων, κ.λπ.) και την χρήση της γης.

Τα θεμέλια στην ξηρά μπορεί να είναι είτε πάσσαλοι είτε και πλάκες σκυροδέματος ενώ οι διαστάσεις ποικίλουν και καθορίζονται κάθε φορά από τις επικρατούσες περιβαλλοντικές συνθήκες.

Οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες συχνά σχεδιάζονται ελαφρώς διαφορετικά από τις χερσαίες και αυτό είναι κάτι που βρίσκει εφαρμογή και στη θεμελίωση. Τα θεμέλια των υπεράκτιων ανεμογεννητριών μπορεί να είναι *Monopile*, *Gravity-based*, *Jacket*, *Floating* ή *Tripod*.

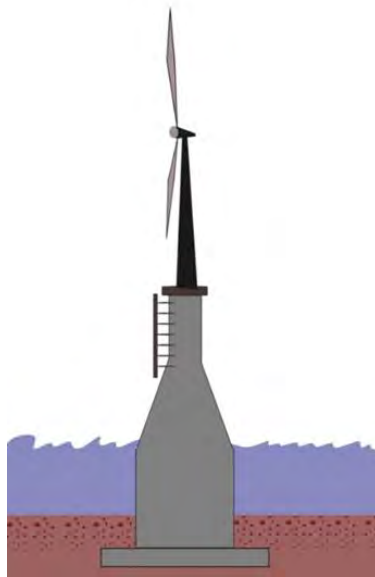
Τα θεμέλια τύπου **Monopile** αποτελούνται από μία ενιαία, κατακόρυφη κατασκευή από σκυρόδεμα ενσωματωμένη βαθιά στο έδαφος, Σχήμα 3.2. Αυτή η κατασκευή μπορεί να

αποτελείται από σκυρόδεμα ή χάλυβα. Τα θεμέλια αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται συχνά σε υπεράκτιες ανεμογεννήτριες που είναι εγκατεστημένες σε σχετικά ρηχά νερά. Το πλεονέκτημα αυτού του τύπου θεμελίωσης έγκειται στο γεγονός ότι έχει πολύ απλό σχεδιασμό και μπορεί να τοποθετηθεί χωρίς μεγάλη πολυπλοκότητα ή περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η βάση αυτή είναι επίσης προσαρμοσμένη τόσο σε εγκαταστάσεις ρηχών όσο και σε βαθιά νερά διαφόρων μεγεθών. Ωστόσο, η εγκατάσταση και η συντήρηση αυτού του τύπου συνδέεται γενικά με κινδύνους λόγω του γεγονότος ότι τα θεμέλια αυτά ενδέχεται να μην έχουν το κατάλληλο κέντρο βάρους για να αντέξουν την τεράστια υδροδυναμική πίεση. Αυτό σημαίνει ότι οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες με αυτή τη θεμελίωση είναι πιο πιθανό να καταρρεύσουν σε ακραίες συνθήκες αποτελώντας σημαντική απειλή για τον περιβάλλοντα χώρο <sup>[4]</sup>.



Σχήμα 3.2: Θεμέλια τύπου Monopile<sup>[4]</sup>

Τα θεμέλια τύπου **Gravity-based** έχουν σχεδιαστεί για να συγκρατούν τη δομή μίας ανεμογεννήτριας σταθερή αυστηρά μέσω της δύναμης της βαρύτητας. Αυτός ο τύπος θεμελίωσης κατασκευάζεται συνήθως από σκυρόδεμα και είναι ενσωματωμένος με κοκκώδη υλικά όπως πέτρες και χαλίκι που αυξάνουν το βάρος της κατασκευής, Σχήμα 3.3. Είναι ευεργετικός στις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες επειδή είναι σχετικά φθηνή η κατασκευή και η εγκατάστασή του. Ωστόσο, συνήθως απαιτείται βυθοκόρηση προτού εγκατασταθεί, η οποία μπορεί να επηρεάσει αρνητικά το περιβάλλον <sup>[4]</sup>.



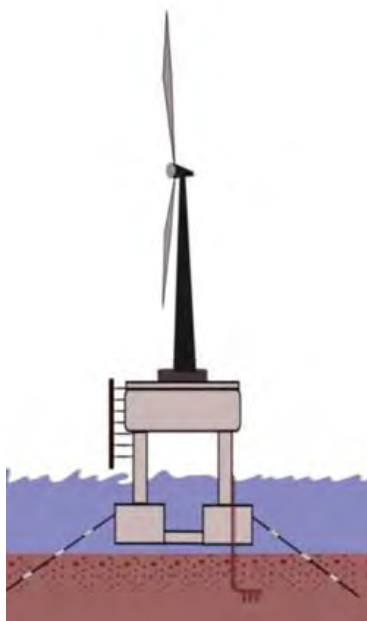
Σχήμα 3.3: Θεμέλια τύπου Gravity-based<sup>[4]</sup>

Τα θεμέλια τύπου **Jacket** για ανεμογεννήτριες αποτελούνται από τέσσερα σκέλη, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με διαγώνιες δοκούς, Σχήμα 3.4. Αυτός ο τύπος θεμελίωσης είναι επίσης αρκετά σταθερός και πολύ κατάλληλος για υπεράκτιες συνθήκες σε σύγκριση με άλλους τύπους θεμελίων. Όπως τα θεμέλια τύπου Tripod, τα θεμέλια τύπου Jacket είναι προσαρμόσιμα σε διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως χαλαρά και αδύναμα εδάφη ή και ρεύματα υψηλής ενέργειας. Ωστόσο, η εγκατάστασή τους μπορεί να διαταράξει το θαλάσσιο περιβάλλον και να προκαλέσει διαταραχή του θαλάσσιου οικοτόπου <sup>[4]</sup>.



Σχήμα 3.4: Θεμέλια τύπου Jacket<sup>[4]</sup>

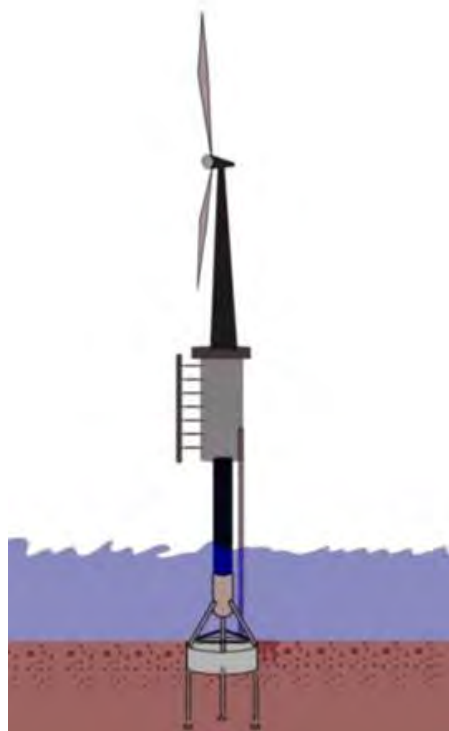
Γνωστή και ως **semi-submersible**, η πλωτή αυτή βάση είναι μία καλή επιλογή ειδικά σε τοποθεσίες όπου ο πυθμένας της θάλασσας βρίσκεται σε μεγάλο βάθος κάτω από το νερό. Η πλωτή αυτή βάση αποτελείται από μία κεντρική σημαδούρα η οποία αγκυρώνεται με τρία αλυσοειδή καλώδια, Σχήμα 3.5. Κάθε καλώδιο είναι εξοπλισμένο με ένα βάρος που βοηθά στην παροχή τάσης ενώ συγκρατεί τη δομή στον πυθμένα της θάλασσας. Οι πλωτές ανεμογεννήτριες έχουν μεγαλύτερη εμβέλεια από τις αντίστοιχες πιο άκαμπτες. Λόγω της κινητής τους φύσης είναι ικανές να συλλαμβάνουν τους καλύτερους ανέμους της περιοχής. Τα πλωτά θεμέλια έχουν λιγότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις και δεν διαταράσσουν σημαντικά την τοποθεσία στην οποία είναι εγκατεστημένα. Είναι επίσης σχετικά εύκολο να διατηρηθούν. Αν και η έννοια της πλωτής θεμελίωσης εισήχθη το 1972 από τον καθηγητή William E. Heronemus, βρίσκεται ακόμα στο στάδιο ανάπτυξής της <sup>[4]</sup>.



Σχήμα 3.5: Βάση τύπου Semi-submersible<sup>[4]</sup>

Τα **Tripod** θεμέλια για υπεράκτιες ανεμογεννήτριες παρέχουν μία δομή με τρία σκέλη η οποία παρέχει ένα αρκετά αξιόπιστο κέντρο βάρους, Σχήμα 3.6. Αυτά συνήθως συνδέονται σε μία στήλη που είναι κατασκευασμένη από χάλυβα ή σκυρόδεμα. Τα θεμέλια αυτά μπορεί να μοιάζουν με τα tri-pile θεμέλια (τριών πασσάλων), τα οποία αποτελούνται από τρεις κολώνες που φέρουν το βάρος της ανεμογεννήτριας, ωστόσο σε αντίθεση με τα tripod θεμέλια, τα τρία σκέλη των θεμελίων με τους τρεις πασσάλους δεν συνδέονται μεταξύ τους

στη βάση τους. Αντίθετα, τα σκέλη μία θεμελίωσης με τρεις πασσάλους δένονται από μία κεντρική στήλη (σκυρόδεμα ή χάλυβα) πάνω από τη βάση τους και αυτό είναι που διαφοροποιεί τους δύο τύπους. Αν και μπορεί να είναι δαπανηρή η εγκατάσταση και η συντήρησή τους, τα θεμέλια τύπου tripod έχουν το πλεονέκτημα ότι παρέχουν μεγάλη σταθερότητα στην ανεμογεννήτρια. Είναι επίσης κατάλληλα για ένα ευρύ φάσμα περιβαλλοντικών συνθηκών, συμπεριλαμβανομένων των αδύναμων και χαλαρών εδαφών θεμελίωσης αλλά και των υποβρύχιων ρευμάτων υψηλής ενέργειας. Για μεγάλες ανεμογεννήτριες, τα tripod θεμέλια παρέχουν μία οικονομική λύση. Ωστόσο, απαιτούν αρκετή συντήρηση για την αποφυγή διάβρωσης <sup>[4]</sup>.



Σχήμα 3.6: Θεμέλια τύπου Tripod<sup>[4]</sup>

## 2. Ο Πύργος

Στις περισσότερες ανεμογεννήτριες, ο πύργος κατασκευάζεται από χάλυβα που έχει κυλινδρικό σχήμα και ύψος από περίπου 50m έως πάνω από 100m. Ο πύργος είναι ένα από τα μέρη μιας ανεμογεννήτριας που απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό, λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικούς παράγοντες όπως το μέγεθος και το βάρος της ανεμογεννήτριας καθώς και τις επικρατούσες περιβαλλοντικές συνθήκες. Είναι γενικά αποδεκτό ότι το ύψος του πύργου

μιας ανεμογεννήτριας καθορίζει πόσο άνεμο θα είναι σε θέση να συλλάβει και ως εκ τούτου την απόδοσή της. Οι ψηλότεροι πύργοι είναι ικανοί να φτάσουν ρεύματα υψηλής ταχύτητας σε μεγάλα υψόμετρα. Ωστόσο, στο σχεδιασμό της ανεμογεννήτριας, συνήθως γίνονται προσπάθειες ώστε το ύψος του πύργου να είναι ίσο με τη διάμετρο των πτερυγίων κατά τη περιστροφή. Ο πύργος μιας ανεμογεννήτριας παίζει το σημαντικό ρόλο του να φέρει στηρίξει τον ρότορα και το κέλυφος. Υπάρχουν διάφοροι τύποι πύργων, οι οποίοι επιλέγονται με βάση τις υπάρχουσες ανάγκες και συνθήκες. Αυτοί οι τύποι περιλαμβάνουν τον χαλύβδινο σωληνοειδή, τον δικτυωτό πύργο, τον πύργο καλωδίων Guyed, τον υβριδικό, και τον πύργο από σκυρόδεμα <sup>[4]</sup>.

- Χαλύβδινος Σωληνοειδής Πύργος

Αποτελούμενος από τμήματα που έχουν συνήθως μήκος 20-30m το καθένα, οι χαλύβδινοι σωληνοειδής πύργοι λεπταίνουν προς τα πάνω, δίνοντάς τους ένα συνολικό κωνικό σχήμα. Τα τμήματα συνδέονται μεταξύ τους με ασφάλεια χρησιμοποιώντας μπουλόνια, σχηματίζοντας μια σταθερή δομή. Οι χαλύβδινοι πύργοι είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος που χρησιμοποιείται στις ανεμογεννήτριες <sup>[4]</sup>.

- Δικτυωτός Πύργος

Ο πύργος αυτός δεν χρησιμοποιείται συχνά λόγω της παρουσίας άλλων πιο αποτελεσματικών τύπων. Σχεδιάζεται με συγκόλληση διαφορετικών διατομών χάλυβα μεταξύ τους. Ο πύργος αυτού του τύπου είναι σχετικά φθηνός ως προς την κατασκευή <sup>[4]</sup>.

- Πύργος Καλωδίων Guyed

Αναφέρεται επίσης και ως «Guyed-Pole Tower», αυτός ο τύπος πύργου είναι σχετικά ελαφρύς και λιγότερο δαπανηρός όσο αφορά την κατασκευή και εγκατάστασή του. Οι πύργοι αυτού του τύπου αποτελούνται από έναν ενιαίο κεντρικό πόλο που υποστηρίζεται από ένα σετ συρμάτων. Το μικρό βάρος καθιστά πιο εύκολη την εγκατάσταση και τη συντήρηση των πύργων αυτών. Ωστόσο, έχουν το μειονέκτημα της κακής προσβασιμότητας επειδή τα καλώδια μπορούν να επηρεάσουν σοβαρά την ευκολία μετακίνησης γύρω από τον πύργο. Οι πύργοι αυτοί είναι επίσης λιγότερο σταθεροί από τους περισσότερους από τους άλλους τύπους. Η ελαφριά τους δομή τους καθιστά ευάλωτους σε ζημιές και βανδαλισμούς τόσο

από ανθρώπινους όσο και από φυσικούς παράγοντες. Ως εκ τούτου η εγκατάσταση μίας ανεμογεννήτριας με αυτό τον τύπο πύργου έχει ορισμένες αρνητικές επιπτώσεις στην ασφάλεια <sup>[4]</sup>.

- Υβριδικός Πύργος

Όπως υποδηλώνει και το όνομα, ο υβριδικός πύργος αποτελείται γενικότερα από έναν συνδυασμό των χαρακτηριστικών οποιονδήποτε δύο ή περισσότερων από τους γνωστούς τύπους πύργων. Οι υβριδικοί πύργοι χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου οι συνθήκες ή/και οι ανάγκες του έργου είναι αρκετά περίπλοκες και δεν μπορούν να καλυφθούν επαρκώς από κανένα από τα συμβατικά σχέδια πύργων <sup>[4]</sup>.

### 3. Ο Ρότορας

Αποτελείται από τα πτερύγια (Blades) και την πλήμνη (Hub) που τα συνδέει στο κέντρο. Ο ρότορας μιας ανεμογεννήτριας είναι υπεύθυνος για την σύλληψη και μετατροπή της κινητικής ενέργειας με τη μορφή ανέμου χρησιμοποιώντας τα πτερύγια του. Τα πτερύγια είναι σχεδιασμένα ως αεροτομή, είναι ελαφριά και ελαστικά. Υπάρχουν συνήθως τρία από αυτά και έχουν μεγάλη αποτελεσματικότητα στο να συλλαμβάνουν όσο το δυνατόν περισσότερη αιολική ενέργεια μπορούν στην περιοχή τους. Είναι επίσης σχεδιασμένα για να είναι αρκετά ανθεκτικά ώστε να μην καταστρέφονται εύκολα από τους έντονους ανέμους. Όταν τα πτερύγια δέχονται τον άνεμο, χρησιμοποιούν την κινητική του ενέργεια και αποκτούν περιστροφική κίνηση. Επειδή τα τρία πτερύγια συνδέονται στο κέντρο με την πλήμνη, η περιστροφή τους μεταδίδεται αποτελεσματικά μέσω ενός άξονα χαμηλής ταχύτητας στο υπόλοιπο σύστημα της ανεμογεννήτριας <sup>[4]</sup>.

### 4. Ο Άξονας Χαμηλής Ταχύτητας

Ο άξονας χαμηλής ταχύτητας είναι απευθείας συνδεδεμένος με τον ρότορα. Η ταχύτητα περιστροφής του ρότορα είναι συνήθως αργή σε σύγκριση με αυτή που απαιτείται για τη λειτουργία της γεννήτριας και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι με την χρήση του άξονα χαμηλής ταχύτητας μεταφέρεται αυτή η περιστροφική κίνηση (μηχανική ενέργεια) του ρότορα στο κιβώτιο ταχυτήτων όπου και ενισχύεται με αποτέλεσμα να παράγεται περιστροφή υψηλότερης συχνότητας για τη γεννήτρια. Συνήθως ο άξονας περιστρέφεται με

ταχύτητες μεταξύ 8-30 περιστροφών ανά λεπτό (rpm) και μπορεί να φτάσει σε ταχύτητες 60rpm σε εξαιρετικές περιπτώσεις <sup>[4]</sup>.

#### 5. Το Ρουλεμάν του Κύριου Άξονα

Το ρουλεμάν του κύριου άξονα μιας ανεμογεννήτριας έχει σχεδιαστεί για να υποστηρίζει τον άξονα χαμηλής ταχύτητας, μεταδίδοντας αποτελεσματικά την περιστροφική κίνηση από τον ρότορα προς το κιβώτιο ταχυτήτων. Είναι επίσης σχεδιασμένο να ελαχιστοποιεί την τριβή μεταξύ των περιστροφικών στοιχείων της ανεμογεννήτριας. Λόγω της θέσης και της λειτουργίας του, πρέπει να είναι σχεδιασμένο να αντέχει μεγάλα, μεταβαλλόμενα μεγέθη ακτινικού και αξονικού φορτίου. Το ρουλεμάν κύριου άξονα συνδέεται απευθείας με τον άξονα χαμηλής ταχύτητας και συνήθως έχει ταχύτητες που κυμαίνονται μεταξύ 8 και 60rpm. Το γεγονός ότι το ρουλεμάν είναι εκτεθειμένο σε σκληρές συνθήκες σημαίνει ότι αυτό είναι ένα από τα μέρη που θα πρέπει να σχεδιαστεί πολύ προσεκτικά. Τέλος η διάρκεια ζωής τους αναμένεται να φτάσει τουλάχιστον τα 25 χρόνια <sup>[4]</sup>.

#### 6. Το Κιβώτιο Ταχυτήτων

Το κιβώτιο ταχυτήτων είναι το εξάρτημα που καταλαμβάνει τη θέση μεταξύ του ρουλεμάν του κύριου άξονα χαμηλής ταχύτητας και του άξονα υψηλής ταχύτητας. Συγκεκριμένα, το κιβώτιο ταχυτήτων παίζει το ρόλο της αύξησης της ταχύτητας περιστροφής του συστήματος μετάδοσης της κίνησης (drivetrain), σε επίπεδο που είναι αρκετό για να κινήσει τη γεννήτρια και να παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Ένα τυπικό κιβώτιο ταχυτήτων αποτελείται από ένα σύνολο συμπλεγμάτων γραναζιών που μεταφέρουν και ενισχύουν την κυκλική κίνηση από τον άξονα χαμηλής ταχύτητας. Αυτή η συνδεσμολογία υποδηλώνει ότι το κιβώτιο ταχυτήτων είναι εκτεθειμένο σε μεγάλα ακανόνιστα κυκλικά φορτία ως αποτέλεσμα των μεταβαλλόμενων ταχυτήτων του ανέμου. Η σοβαρότητα των κυκλικών καταπονήσεων στο κιβώτιο ταχυτήτων οδηγεί σε συχνή αστοχία. Λόγω της σημαντικής λειτουργίας αυτού του εξαρτήματος, το κιβώτιο ταχυτήτων είναι ένα από τα μέρη μια ανεμογεννήτριας που έχει υποστεί συνεχείς τροποποιήσεις και βελτιώσεις με τα χρόνια. Η αυξημένη απόδοση και ανθεκτικότητα του κιβωτίου ταχυτήτων θα οδηγήσει τελικά σε αυξημένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας <sup>[4]</sup>.

## 7. Ο Άξονας Υψηλής Ταχύτητας

Σε αντίθεση με τον άξονα χαμηλής ταχύτητας, ο άξονας υψηλής ταχύτητας περιστρέφεται σε σχετικά υψηλές ταχύτητες τουλάχιστον 1000rpm κατά μέσο όρο. Αυτό συμβαίνει επειδή ο άξονας υψηλής ταχύτητας συνδέεται απευθείας με το κιβώτιο ταχυτήτων. Η λειτουργία του είναι να μεταδίδει την αυξημένη ταχύτητα περιστροφής από το κιβώτιο ταχυτήτων στη γεννήτρια. Αυτή η αυξημένη ταχύτητα περιστροφής είναι αυτή που οδηγεί το ηλεκτρικό πηνίο της γεννήτριας και την αναγκάζει να παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Ο ρότορας, ο άξονας χαμηλής ταχύτητας, το ρουλεμάν του κύριου άξονα, το κιβώτιο ταχυτήτων, ο άξονας υψηλής ταχύτητας και η γεννήτρια, όλα αυτά αποτελούν το σύστημα μετάδοσης της κίνησης της ανεμογεννήτριας. Όλες οι μετατροπές και οι μεταδόσεις ενέργειας σε μια ανεμογεννήτρια, πραγματοποιούνται από αυτό το σύστημα μετάδοσης κίνησης [4].

## 8. Η Γεννήτρια

Η γεννήτρια είναι υπεύθυνη για τη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική και είναι ένα ακόμα σημαντικό τμήμα μιας ανεμογεννήτριας. Αυτό το εξάρτημα αποτελείται από ένα ηλεκτρικό πηνίο (κατασκευασμένο από χαλκό) το οποίο είναι τοποθετημένο μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο, έτσι ώστε να βρίσκεται υπό την επίδραση του μαγνητισμού. Με την περιστροφή του πηνίου σε υψηλές ταχύτητες μέσα στο μαγνητικό πεδίο, παράγεται ηλεκτρισμός μέσω μίας διαδικασίας που ονομάζεται ηλεκτρομαγνητική επαγωγή. Η περιστροφή υψηλής ταχύτητας που απαιτείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή που μπορεί να προσφέρει η φυσική αιολική (κινητική) ενέργεια μέσω του ρότορα. Για το λόγο αυτό, ο ρυθμός περιστροφής πολλαπλασιάζεται με το κιβώτιο ταχυτήτων και η μηχανική ενέργεια που προκύπτει μεταδίδεται στη γεννήτρια μέσω του άξονα υψηλής ταχύτητας. Υπάρχουν διάφοροι τύποι γεννητριών που χρησιμοποιούνται στις ανεμογεννήτριες όπως η σύγχρονη γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος AC, η ασύγχρονη AC (εναλλακτήρας) καθώς και το δυναμό συνεχούς ρεύματος DC [4].

## 9. Η Ατράκτος

Ο σκοπός της ατράκτου είναι η προστασία όλων των μερών μίας ανεμογεννήτριας που εμπλέκονται άμεσα στη μετατροπή της κινητικής ενέργειας από τον άνεμο σε μηχανική

ενέργεια και στη συνέχεια σε ηλεκτρική. Είναι δηλαδή ένα περίβλημα το οποίο προστατεύει τον ρότορα, τους άξονες, το κιβώτιο ταχυτήτων, τη γεννήτρια και τα συστήματα ελέγχου. Με αυτό τον τρόπο τα εξαρτήματα αυτά μπορούν να παραμείνουν σε μία σταθερή και καλά σχεδιασμένη διαμόρφωση. Η άτρακτος είναι τοποθετημένη στην κορυφή του πύργου και είναι συνήθως πολύ μεγάλη, ζυγίζει εκατοντάδες τόνους και έχει μήκος μεγαλύτερο από 15 μέτρα. Ο σχεδιασμός μιας ανεμογεννήτριας είναι πάντα τέτοιος ώστε η άτρακτος να είναι προσβάσιμη για συντήρηση και επισκευή. Στις περισσότερες περιπτώσεις αυτό επιτυγχάνεται με την εγκατάσταση ενός συστήματος ανελκυστήρων, σκαλών και άλλων τεχνολογιών υποβοήθησης αναρρίχησης. Ορισμένες σύγχρονες υπεράκτιες ανεμογεννήτριες είναι εξοπλισμένες με μια πλατφόρμα προσγείωσης ελικοπτέρων στην κορυφή της άτρακτου, για να επιτρέπουν τα εργαλεία και το προσωπικό να κατεβαίνουν στην ανεμογεννήτρια για λόγους συντήρησης. Ο οδηγός εκτροπής είναι ένα άλλο εξάρτημα που συνήθως τοποθετείται κάτω από την άτρακτο και την κάνει μαζί με τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας να περιστρέφονται στον άξονα του πύργου ώστε να αντικρίζουν την κατεύθυνση των πιο ευνοϊκών ρευμάτων ανέμου. Αυτή η περιστροφή της άτρακτου και των πτερυγίων ονομάζεται «κίνηση εκτροπής» (yaw motion) <sup>[4]</sup>.

#### 10. Ο Οδηγός Εκτροπής

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η κίνηση εκτροπής βρίσκεται κυρίως σε μια ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα. Η λειτουργία αυτού του εξαρτήματος είναι να διασφαλίζει ότι η άτρακτος θα είναι συνεχώς στραμμένη προς την κατεύθυνση της βέλτιστης έντασης και ταχύτητας του ανέμου. Με αυτόν τον τρόπο, η ανεμογεννήτρια μπορεί να παράγει την μέγιστη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας σε κάθε χρονική στιγμή. Οι μηχανισμοί εκτροπής κινούν την άτρακτο και τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας γύρω από τον άξονα του πύργου με οριζόντια περιστροφική κίνηση. Αυτό περιγράφεται ως κίνηση εκτροπής. Ο μηχανισμός εκτροπής μαζί με μια σειρά από φρένα και ρουλεμάν αποτελούν το σύστημα εκτροπής <sup>[4]</sup>.

#### 11. Ο Ελεγκτής Κλίσης

Η κύρια λειτουργία του συστήματος ελέγχου κλίσης είναι η ρύθμιση του γωνιακού προσανατολισμού των πτερυγίων μιας ανεμογεννήτριας. Αυτή η λειτουργία είναι πολύ σημαντική επειδή καθορίζει πόση αιολική ενέργεια θα δεσμευτεί από τα πτερύγια και

αποτρέπει πιθανές ζημιές σε συνθήκες ακραίας έντασης του ανέμου. Το σύστημα αυτό παρακολουθεί ενεργά τον προσανατολισμό των πτερυγίων και την κατάσταση ροής του ανέμου. Χρησιμοποιώντας αυτές τις πληροφορίες ρυθμίζει συνεχώς τα πτερύγια περιστρέφοντάς τα, έτσι ώστε να παραμένουν αποτελεσματικά και να λειτουργούν εντός ασφαλών ορίων <sup>[4]</sup>.

## 12. Το Σύστημα Πέδησης

Ένα από τα μέρη μιας ανεμογεννήτριας που εμπλέκεται πλήρως στην ασφάλεια είναι το σύστημα πέδησης. Η κύρια λειτουργία του συστήματος πέδησης είναι να σταματάει αυτόματα την κίνηση του ρότορα. Αυτό είναι απαραίτητο όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι πάνω από τα ασφαλή όρια ή όταν ένα άλλο τμήμα της ανεμογεννήτριας είναι κατεστραμμένο ή ελαττωματικό. Με το σταμάτημα του ρότορα, οι κίνδυνοι και οι ζημιές ελαχιστοποιούνται ή αποτρέπονται. Δύο είναι τα είδη συστημάτων πέδησης που μπορούν να βρεθούν σε μία ανεμογεννήτρια. Αυτά είναι το αεροδυναμικό και το μηχανικό σύστημα πέδησης <sup>[4]</sup>.

- Το **αεροδυναμικό** σύστημα πέδησης είναι συνήθως το κύριο σύστημα πέδησης σε μία ανεμογεννήτρια. Παρέχει έναν σχετικά γρήγορο και αποτελεσματικό τρόπο διακοπής του κινητήρα, οποίος περιλαμβάνει την περιστροφή των πτερυγίων σε θέση 90 μοιρών σε σχέση με τον οριζόντιο άξονα <sup>[4]</sup>.

- Το **μηχανικό** σύστημα πέδησης είναι λιγότερο αποδοτικό από το αεροδυναμικό και συνήθως χρησιμεύει ως βοηθητικό σύστημα πέδησης. Ωστόσο, το μηχανικό σύστημα πέδησης χρησιμοποιείται σπάνια στις περισσότερες ανεμογεννήτριες, καθώς η λειτουργία ασφαλείας της ακινητοποίησης του κινητήρα αντιμετωπίζεται συνήθως καλά από το αεροδυναμικό σύστημα πέδησης <sup>[4]</sup>.

Ενώ το αεροδυναμικό σύστημα πέδησης κινείται με ελατήριο και βασίζεται στην υδραυλική πίεση, το μηχανικό λειτουργεί κυρίως με την τριβή. Το μηχανικό σύστημα πέδησης σε μία ανεμογεννήτρια αποτελείται συνήθως από τακάκια φρένων και έναν περιστρεφόμενο δίσκο που όταν σφίγγονται μεταξύ τους φέρνουν σε ακινητοποίηση τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας <sup>[4]</sup>.

### 13. Ο Ελεγκτής

Όσον αφορά τη ρύθμιση των λειτουργιών ολόκληρου του συστήματος, ο ελεγκτής είναι ένα από τα πιο σημαντικά μέρη μιας ανεμογεννήτριας. Στην ουσία, αυτό το εξάρτημα πραγματοποιεί διαχείριση της ισχύος, επιβλέποντας, υποβοηθώντας και συντονίζοντας τις λειτουργίες των άλλων τμημάτων του κινητήρα. Για να επιτευχθεί αυτό, χρησιμοποιείται μία σειρά υπολογιστών για τη συνεχή συλλογή δεδομένων σχετικά με τις περιβαλλοντικές συνθήκες καθώς και τη λειτουργική υγεία του κινητήρα. Με τη λειτουργία του ελεγκτή, η ανεμογεννήτρια λειτουργεί εντός καθορισμένων ορίων ταχύτητας ανέμου, η οποία είναι συνήθως μεταξύ 13 και 89 km/h. Αυτό διασφαλίζει ότι η τουρμπίνα παραμένει παραγωγική και λειτουργεί βέλτιστα χωρίς ζημιές <sup>[4]</sup>.

### 14. Ο Ανεμοδείκτης και το Ανεμόμετρο

Το ανεμόμετρο και ο ανεμοδείκτης εγκαθίστανται συνήθως σε ανεμογεννήτριες, ως μέρος των συστημάτων ασφαλείας και ελεγκτών. Αντίστοιχα αυτά τα εξαρτήματα βοηθούν στην απόκτηση δεδομένων σχετικά με την ταχύτητα και την κατεύθυνση των ανέμων που επικρατούν στην περιοχή της ανεμογεννήτριας. Τα δεδομένα που ζητούνται από το ανεμόμετρο και τον ανεμοδείκτη αποστέλλονται στα συστήματα εκτροπής κίνησης και τον ελεγκτή, τα οποία καθορίζουν τον τρόπο λειτουργίας της ανεμογεννήτριας <sup>[4]</sup>.

### 15. Ο Μετασχηματιστής

Αν και δεν είναι εάν από τα σημαντικά εξαρτήματα, αξίζει να αναφερθεί. Επί της ουσίας, ο μετασχηματιστής είναι ένα ενδιάμεσο εξάρτημα το οποίο καταλαμβάνει τη σημαντική θέση μεταξύ της ανεμογεννήτριας και του ηλεκτρικού δικτύου. Η λειτουργία του μετασχηματιστή είναι η αύξηση της τάσης εξόδου από μία ανεμογεννήτρια. Όταν η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από τη γεννήτρια, έρχεται σε σχετικά χαμηλή τάση σε σύγκριση με αυτή που απαιτείται ώστε να μεταδοθεί η ισχύς μέσω των ηλεκτρικών γραμμών χωρίς μεγάλες απώλειες. Με αύξηση της τάσης εξόδου μιας ανεμογεννήτριας, ο μετασχηματιστής διασφαλίζει ότι η ισχύς μεταδίδεται και κατανέμεται στο δίκτυο ηλεκτροδότησης αποτελεσματικά <sup>[4]</sup>.

## 16. Το Σύστημα Μετάδοσης

Στις ανεμογεννήτριες, το σύστημα μετάδοσης αποτελείται από μία σειρά ηλεκτρικών κυκλωμάτων και καλωδίων (γραμμές μετάδοσης) που μεταφέρουν την ισχύ εξόδου (μετά την αύξηση της τάσης από τον μετασχηματιστή) στα σημεία όπου αυτή χρειάζεται. Το σύστημα μετάδοσης έχει σχεδιαστεί για να μειώνει τις πιθανές απώλειες ισχύος στο ελάχιστο δυνατό κατά τη μετάδοση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αρκετές περιπτώσεις ο μετασχηματιστής θεωρείται ότι αποτελεί στοιχείο του συστήματος μετάδοσης <sup>[4]</sup>.

Όλα τα παραπάνω εξαρτήματα εξυπηρετούν έναν συγκεκριμένο σκοπό. Συνοψίζοντας τις λειτουργίες των τμημάτων μιας ανεμογεννήτριας έχουμε:

- i. Σύλληψη ανέμου
- ii. Παραγωγή μηχανικής ενέργειας
- iii. Αύξηση της ταχύτητας περιστροφής
- iv. Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- v. Αύξηση της τάσης εξόδου
- vi. Μετάδοση ισχύος
- vii. Έλεγχος και ρύθμιση
- viii. Διαχείριση και διασφάλιση της ασφάλειας
- ix. Συλλογή περιβαλλοντικών δεδομένων

Συνολικά, αυτά τα μέρη και οι λειτουργίες τους έχουν ως αποτέλεσμα την μετατροπή της αιολικής (κινητικής) ενέργειας σε μηχανική και στη συνέχεια σε ηλεκτρική, μέσω της σύλληψης του ανέμου, της περιστροφικής κίνησης και την ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής <sup>[4]</sup>.

### 3.1.4 Είδη ανεμογεννήτριας

#### 3.1.4.1 VAWT

Οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα (VAWT), Εικόνα 3.1, είναι ένα τύπος ανεμογεννητριών που είδαν το φως της δημοσιότητας τον περασμένο αιώνα. Οι κλασικοί νερόμυλοι επιτρέπουν στο νερό να φτάνει εφάπτομενικά σε αυτούς σε ορθή γωνία προς τον άξονα περιστροφής τους. Οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα είναι σχεδιασμένες να δρουν

αντίστοιχα προς τον άνεμο. Ωστόσο, ένας τέτοιος σχεδιασμός ενώ θα λειτουργούσε θεωρητικά και σε ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα, αυτές θα απαιτούσαν έναν πιο σύνθετο σχεδιασμό ο οποίος δύσκολα θα μπορούσε να ξεπεράσει την αποτελεσματικότητα του ρότορα τύπου προπέλας. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα μίας ανεμογεννήτριας κάθετου άξονα είναι ότι η γεννήτρια και το κιβώτιο ταχυτήτων τοποθετούνται στο έδαφος και έτσι είναι εύκολα προσβάσιμα και δεν χρειάζεται μηχανισμός εκτροπής. Επίσης το γεγονός ότι ο ρότορας χρειάζεται ολική αποσυναρμολόγηση για την αντικατάσταση μόνο του κύριου ρουλεμάν και ότι ο ρότορας έχει τοποθετηθεί σχετικά κοντά στο έδαφος όπου δεν έχει πολύ αέρα, προσθέτει επιπλέον μειονεκτήματα σε αυτόν τον τύπο ανεμογεννήτριας [3].



Εικόνα 3.1 : Ανεμογεννήτρια κάθετου άξονα (Πηγή: Wikipedia)

#### 3.1.4.2 HAWT

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα αποτελούν τον πιο κοινό τύπο ανεμογεννήτριας σε χρήση σήμερα, Εικόνα 3.2. Στην πραγματικότητα όλες οι εμπορικές ανεμογεννήτριες που είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο έχουν ρότορα τύπου προπέλας οι οποίες τοποθετούνται πάνω

σε οριζόντιους άξονες πάνω σε κατακόρυφους πύργους. Σε αντίθεση με τον τρόπο λειτουργίας των VAWT οι HAWT πρέπει να ευθυγραμμιστούν με την κατεύθυνση του ανέμου, επιτρέποντας έτσι στον άνεμο να ρέει παράλληλα με τον άξονα της περιστροφής.

Όσον αφορά τις HAWT και το διαχωρισμό τους σε upwind και downwind, ο πρώτος τύπος ρότορα από τη στιγμή που προσβάλλεται από τον άνεμο κατά μέτωπο και μπροστά από τον πύργο έχει το πλεονέκτημα να αποφεύγει κατά κάποιο τρόπο το ονομαζόμενο φαινόμενο της σκίασης του ανέμου [wind shade], σύμφωνα με το οποίο όταν ο άνεμος συναντάει ένα εμπόδιο πίσω από αυτό οι ταχύτητες είναι πολύ μικρότερες. Ο δεύτερος τύπος ρότορα χρειάζεται μηχανισμό εκτροπής για να διατηρεί τον άξονα ευθυγραμμισμένο με την κατεύθυνση του ανέμου. Επειδή οι ρότορες αυτοί τοποθετούνται στην υπήνεμη πλευρά του πύργου δημιουργείται ένα μεγάλο μειονέκτημα. Λόγω αυτού του σχεδιασμού δημιουργούνται διακυμάνσεις της αιολικής ενέργειας λόγω της τοποθέτησης του ρότορα στην «σκιά του ανέμου» εξαιτίας του πύργου και αυτό με τη σειρά του προσθέτει περισσότερα φορτία κόπωσης. Θεωρητικά οι downwind ρότορες μπορούν να κατασκευαστούν χωρίς μηχανισμό εκτροπής, υπό την προϋπόθεση ότι ο ρότορας καθώς και η άτρακτος μπορούν να σχεδιαστούν με τέτοιο τρόπο ώστε η άτρακτος θα ακολουθεί τον άνεμο παθητικά. Αυτό μπορεί ωστόσο, να προκαλέσει γυροσκοπικά φορτία και να παρεμποδίσει το ξετύλιγμα των καλωδίων κατά την περιστροφική κίνηση του ρότορα κατά την ίδια φορά για μεγάλο χρονικό διάστημα, προκαλώντας έτσι τη συστροφή των καλωδίων τροφοδοσίας. Όσον αφορά τις μεγάλες ανεμογεννήτριες, είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθούν δαχτυλίδια ολίσθησης ή μηχανικοί συλλέκτες για την αποφυγή αυτού του προβλήματος. Ενώ, οι upwind ρότορες πρέπει να είναι άκαμπτοι ώστε να κρατήσουν τα πτερύγια του ρότορα μακριά από τον πύργο, παρ' όλα αυτά οι ρότορες αυτοί θα μπορούσαν να γίνουν πιο εύκαμπτοι. Το τελευταίο υπονοεί μία πιθανή εξοικονόμηση σε σχέση με το βάρος και μπορεί να συμβάλει στη μείωση των φορτίων που δέχεται ο πύργος. Η συντριπτική πλειοψηφία των ανεμογεννητριών σε λειτουργία σήμερα έχουν upwind ρότορες <sup>[3]</sup>.



Εικόνα 3.2: Ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα (Πηγή: Wikipedia)

### 3.2 Αριθμός πτερυγίων

Ο σχεδιασμός με τρία πτερύγια είναι ο πιο κοινός στις σύγχρονες ανεμογεννήτριες. Μία ανεμογεννήτρια με upwind ρότορα, με μία ασύγχρονη γεννήτρια και ενεργό σύστημα εκτροπής αναφέρεται συνήθως ως η δανική ιδέα και λειτουργεί ως πρότυπο βάσει του οποίου αξιολογούνται άλλες ιδέες σχεδιασμού. Συγκρίνοντας το σχέδιο των τριών πτερυγίων με τα άλλα δύο των δύο και του ενός, τα δύο τελευταία έχουν το πλεονέκτημα μιας πιθανής εξοικονόμησης σε σχέση με το κόστος και το βάρος του ρότορα. Ωστόσο, η χρήση λιγότερων πτερυγίων απαιτεί μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής ή μεγαλύτερη χορδή για την απόδοση της ίδιας παραγωγής ενέργειας με έναν ρότορα τριών πτερυγίων παρόμοιου μεγέθους. Επίσης η χρήση ενός ή και δύο πτερυγίων θα έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία περισσότερων κυμαινόμενων φορτίων λόγω της μεταβολής της αδράνειας, ανάλογα με το αν τα πτερύγια είναι σε οριζόντια ή κάθετη θέση καθώς και στη διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου όταν το πτερύγιο είναι στραμμένο προς τα πάνω ή προς τα κάτω. Επομένως, τα σχέδια με ένα ή δύο πτερύγια έχουν τον ρότορα αρθρωτό στον κύριο άξονα. Αυτό το σχέδιο επιτρέπει στον ρότορα να εξαλείφει μερικά από τα μη ισορροπημένα φορτία. Οι ανεμογεννήτριες με ένα πτερύγιο είναι λιγότερο διαδεδομένες από αυτές με δύο και αυτό είναι λόγω του ότι πέρα από την υψηλότερη ταχύτητα περιστροφής, παράγεται περισσότερος θόρυβος και χρειάζονται και αντίβαρο για την εξισορρόπηση του <sup>[3]</sup>.

### 3.3 Έλεγχος ισχύος

Οι ανεμογεννήτριες έχουν σχεδιαστεί για να παράγουν ρεύμα όσο το δυνατόν φθηνότερα. Για αυτό το σκοπό έχουν σχεδιαστεί ώστε να παρέχουν τη μέγιστη ισχύ εξόδου για ταχύτητες ανέμου κοντά στα 15 m/s. Δεν θα υπήρχε κέρδος αν οι ανεμογεννήτριες σχεδιάζονταν να μεγιστοποιούν την παραγωγή ισχύος σε ισχυρότερους ανέμους διότι τέτοιοι άνεμοι είναι αρκετά σπάνιοι. Ωστόσο, σε περίπτωση ισχυρότερων ανέμων είναι απαραίτητο να σπαταληθεί μέρος της περίσσειας ενέργειας για την αποφυγή ζημιών στην ανεμογεννήτρια. Έτσι η ανεμογεννήτρια χρειάζεται κάποιου είδους έλεγχο ισχύος. Ο έλεγχος αυτός χωρίζεται σε δύο κατηγορίες <sup>[3]</sup>:

- Την βελτιστοποίηση της ισχύος για χαμηλές ταχύτητες ανέμου
- Τον περιορισμό της ισχύος για υψηλές ταχύτητες ανέμου

Αυτές οι δυο κατηγορίες χωρίζονται από την ταχύτητα του ανέμου με την οποία επιτυγχάνεται η μέγιστη ισχύς εξόδου, τυπικά περίπου στα 15m/s. Υπάρχουν τρεις προσεγγίσεις στον έλεγχο ισχύος<sup>[3]</sup>:

- Ο έλεγχος απώλειας στήριξης (stall control)
- Ο έλεγχος του βήματος του πτερυγίου (pitch control)
- Ο έλεγχος της ενεργητικής απώλειας στήριξης (active stall control)

Οι ανεμογεννήτριες τύπου **stall control** έχουν τα πτερύγια βιδωμένα στην πλήμνη υπό σταθερή γωνία. Το φαινόμενο stall χρησιμοποιείται για τον περιορισμό της ισχύς εξόδου όταν η ταχύτητα του ανέμου γίνεται πολύ μεγάλη. Αυτό επιτυγχάνεται σχεδιάζοντας τη γεωμετρία του πτερυγίου με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργείται διαχωρισμός της ροής στην υπήνεμη πλευρά του πτερυγίου (downwind) όταν η ταχύτητα του ανέμου υπερβαίνει κάποια επιλεγμένη κρίσιμη τιμή. Ο έλεγχος αυτός απαιτεί τη σωστή εγκατάσταση των πτερυγίων σε μία γωνία σχετική με το επίπεδο του ρότορα. Μερικά μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι: η χαμηλότερη απόδοση σε χαμηλές ταχύτητες του ανέμου, χωρίς υποβοηθούμενη εκκίνηση και οι μεταβολές στη μέγιστη σταθερής κατάστασης ισχύς λόγω της διακύμανσης της πυκνότητας του αέρα και της συχνότητας του δικτύου <sup>[3]</sup>.

Οι ανεμογεννήτριες τύπου **pitch control** διαθέτουν πτερύγια τα οποία έχουν την δυνατότητα περιστροφής κατά τον διαμήκη άξονά τους ώστε να μπορούν να έρθουν σε γωνία όπου η χορδή τους είναι παράλληλη με την κατεύθυνση του ανέμου. Η ισχύς εξόδου παρακολουθείται και όποτε γίνεται υψηλή, τα πτερύγια περιστρέφονται ελαφρώς εκτός της κατεύθυνσης του ανέμου με αποτέλεσμα την μείωση της παραγόμενης ισχύς. Τα πτερύγια περιστρέφονται στην αρχική τους θέση όταν η ταχύτητα του ανέμου μειωθεί. Αυτός ο τύπος ελέγχου απαιτεί έναν σχεδιασμό ο οποίος να διασφαλίζει ότι τα πτερύγια έχουν κλίση σε ακριβείς γωνίες ώστε να βελτιστοποιείται η ισχύς εξόδου για όλες τις ταχύτητες του ανέμου. Σήμερα αυτός ο τύπος ελέγχου χρησιμοποιείται μόνο σε συνδυασμό με ρότορα μεταβαλλόμενης ταχύτητας. Ένα πλεονέκτημα αυτού του τύπου είναι ο καλός έλεγχος ισχύος, δηλαδή ότι η μέση τιμή της ισχύος εξόδου διατηρείται κοντά στην ονομαστική ισχύ της ανεμογεννήτριας σε ισχυρούς ανέμους. Στα μειονεκτήματα συγκαταλέγεται μία γενική πολυπλοκότητα λόγω του μηχανισμού βήματος καθώς και των διαφόρων διακυμάνσεων υψηλής ισχύος σε μεγάλες ταχύτητες του ανέμου [3].

Οι ανεμογεννήτριες τύπου **active stall control** μοιάζουν με αυτές των δύο τύπων που προαναφέρθηκαν, πιο συγκεκριμένα είναι ένας συνδυασμός αυτών. Σε χαμηλές ταχύτητες του ανέμου λειτουργούν ως **pitch controlled** ανεμογεννήτριες, ενώ σε υψηλές περιστρέφουν τα πτερύγια προς την αντίθετη κατεύθυνση από αυτή που θα έκανε μία **pitch controlled** ανεμογεννήτρια και φέρνουν τα πτερύγια σε μία γωνία ώστε να δημιουργηθεί το φαινόμενο της απώλειας της αεροδυναμικής στήριξης (**stall**) λειτουργώντας έτσι ως **stall controlled**. Αυτό δίνει τη δυνατότητα ενός ακριβή ελέγχου της ισχύος εξόδου, και καθιστά δυνατή της λειτουργία της ανεμογεννήτριας στην ονομαστική ισχύ για όλες τις υψηλές ταχύτητες του ανέμου. Το πλεονέκτημα αυτού του τύπου ελέγχου είναι η ικανότητά του να αντισταθμίζει τις διακυμάνσεις της πυκνότητας του αέρα [3].

### 3.4 Καμπύλη ισχύος

Η καμπύλη ισχύος αποτελεί ένα από τα καίρια και πολυσύνθετα θέματα στην αιολική ενέργεια. Αντιπροσωπεύει τη σχέση μεταξύ της ταχύτητας του ανέμου και της παραγόμενης ισχύος από μια ανεμογεννήτρια. Κατανοώντας αυτήν τη σχέση, μπορούμε να βελτιστοποιήσουμε τον σχεδιασμό και την απόδοση των ανεμογεννητριών.

Η καμπύλη ισχύος παρέχει σημαντική πληροφορία για το εύρος της ισχύος που μπορεί να παράγει μια ανεμογεννήτρια σε συνάρτηση με την ταχύτητα του ανέμου. Αυτό

είναι κρίσιμο για τον σχεδιασμό και την λειτουργία μιας ανεμογεννήτριας, καθώς πρέπει να εξασφαλίζεται η αποδοτική παραγωγή ενέργειας σε διάφορες συνθήκες ανέμου. Επίσης επηρεάζει την απόδοση της ανεμογεννήτριας, καθώς καθορίζει πότε και σε ποια ταχύτητα του ανέμου η ανεμογεννήτρια θα παράγει τη μέγιστη ισχύ. Αυτό είναι σημαντικό για την αποδοτική παραγωγή ενέργειας.

Η εξίσωση που απαιτείται για την δημιουργία της καμπύλης ισχύος είναι η:

$$P = \frac{1}{2} \rho A C_p V^3 \quad (3.1)$$

όπου:

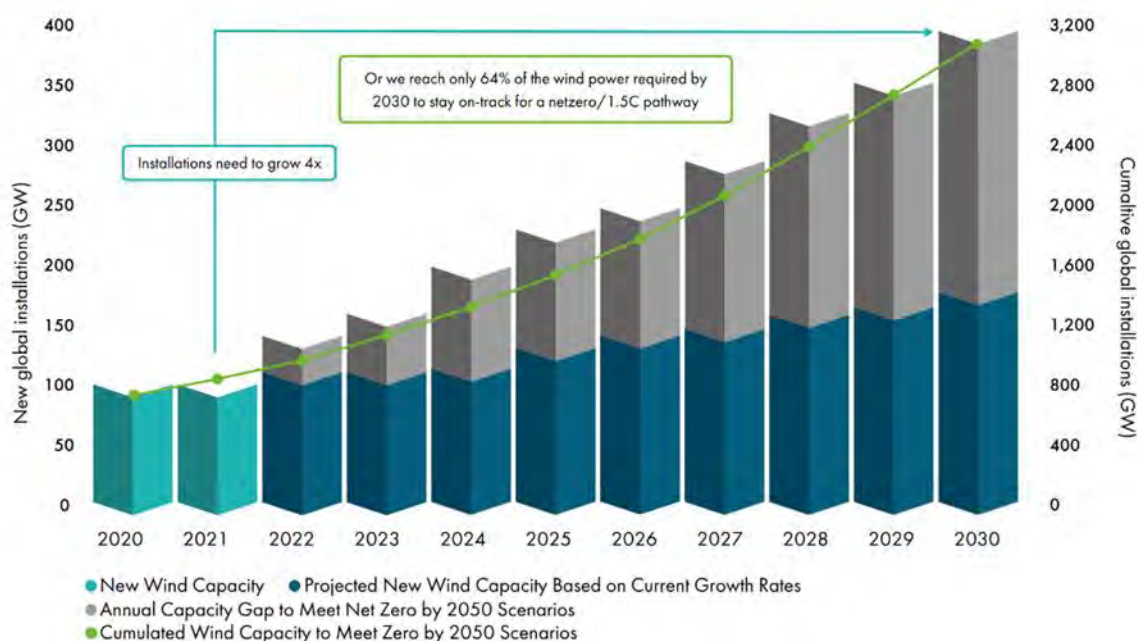
- $P$  είναι η παραγόμενη ισχύς
- $C_p$  είναι ο συντελεστής ισχύος (ανάλογα με τη σχεδίαση της ανεμογεννήτριας)

### 3.5 Αιολική ενέργεια σήμερα

Η απανθρακοποίηση της οικονομίας είναι μία τεράστια ευκαιρία δημιουργίας πλούτου, απασχόλησης και βελτίωσης τόσο της κατάστασης του πλανήτη όσο και της υγείας των ανθρώπων. Επίσης υπάρχει σαφής κατανόηση στον ρόλο του ανέμου για την επίτευξη του στόχου του 1,5 °C της παγκόσμιας υπερθέρμανσης σύμφωνα με την Συμφωνία του Παρισιού. Τα τελευταία γεωπολιτικά γεγονότα έχουν βάλει στα φώτα της δημοσιότητας την επείγουσα ανάγκη για την ενίσχυση της ασφάλειας του εφοδιασμού, την μείωση της ενεργειακής εξάρτησης και την προστασία από τις διαταραχές της αγοράς που προκαλούνται από τις υψηλές τιμές. Όλα αυτά μπορούν να επιτευχθούν μόνο με την μαζική ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας [5].

Εξετάζοντας το 2021 ως μία από τις πιο επιτυχημένες χρονιές της βιομηχανίας της αιολικής ενέργειας, αυτή συνέχισε την παγκόσμια επέκτασή της τόσο σε χερσαίες εγκαταστάσεις όσο και σε υπεράκτιες, με τις δεύτερες να βλέπουν την μεγαλύτερη άνθιση έχοντας τριπλάσια αύξηση σε σχέση με το 2020. Ωστόσο διαφαίνεται πως με τους σημερινούς ρυθμούς, χωρίς άμεση, γρήγορη και μεγάλης κλίμακας μείωση σε εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου αυτή τη δεκαετία θα είναι δύσκολο να η επίτευξη των στόχων της Συμφωνίας του Παρισιού [5].

Η αιολική ενέργεια δεν αυξάνεται αρκετά γρήγορα ή ευρέως σε παγκόσμια κλίμακα. Με τον τρέχοντα ρυθμό εγκατάστασης η υπηρεσία GWEC προβλέπει ότι το 2030 θα έχει εγκατασταθεί λιγότερη από τα δύο τρίτα της απαιτούμενης χωρητικότητας σε αιολική ενέργεια σε σχέση με τον στόχο για την υπερθέρμανση του πλανήτη. Παρακάτω στο Σχήμα 3.7, παρουσιάζεται η σημερινή χωρητικότητα της αιολικής ενέργειας καθώς και ο ρυθμός εγκατάστασής της έως και το έτος 2030 [5].



Σχήμα 3.7: Χωρητικότητα αιολικής ενέργειας ανά έτος

Για την επίτευξη του στόχου, θα πρέπει η ετήσια εγκατάσταση αιολικής ενέργειας να τετραπλασιαστεί. Να βελτιωθεί ο σχεδιασμός των ανεμογεννητριών ώστε με λιγότερο κόστος να παράγεται περισσότερη ενέργεια. Τα κράτη και οι κοινωνίες να συνεργαστούν ώστε η μετάβαση στην χρήση καθαρής ενέργειας να γίνει πιο γρήγορα. Επίσης θα πρέπει η αιολική ενέργεια να γίνει συνώνυμο της ασφάλειας του ανθρώπου και γενικότερα του περιβάλλοντος. Τέλος θα πρέπει το δίκτυο ηλεκτροδότησης σε παγκόσμια κλίμακα να εκσυγχρονίζεται και να ακολουθεί την πορεία ανάπτυξης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας [5].

## **3.6 Σχεδιασμός ανεμογεννητριών**

### **3.6.1 Οικονομικές πτυχές**

Ο ιδανικός σχεδιασμός της ανεμογεννήτριας δεν υπαγορεύεται μόνο από την τεχνολογία, αλλά είναι ένας συνδυασμός τεχνολογίας και οικονομίας. Οι κατασκευαστές επιθυμούν να βελτιστοποιήσουν τις ανεμογεννήτριες ώστε αυτές να παραδίδουν ηλεκτρική ενέργεια στο χαμηλότερο δυνατό κόστος ανά μονάδα ενέργειας. Σε αυτό το πλαίσιο δεν είναι απαραίτητα βέλτιστο να μεγιστοποιηθεί η ετήσια παραγωγή ενέργειας, εάν αυτό απαιτούσε μία πολύ ακριβή ανεμογεννήτρια. Αφού η εισροή ενέργειας είναι δωρεάν (άνεμος), ο βέλτιστος σχεδιασμός μιας ανεμογεννήτριας είναι αυτός με χαμηλό κόστος παραγωγής ανά παραγόμενη kWh. Η επιλογή του μεγέθους του ρότορα και της ανεμογεννήτριας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την κατανομή της ταχύτητας του ανέμου και το δυναμικό της αιολικής ενέργειας σε μία πιθανή τοποθεσία. Ένας μεγάλος ρότορας σε μία μικρή ανεμογεννήτρια θα παράγει ηλεκτρική ενέργεια για πολλές ώρες στη διάρκεια ενός έτους, αλλά θα μπορεί να συλλάβει μόνο ένα μικρό μέρος του αιολικού δυναμικού. Από την άλλη μία μεγάλη ανεμογεννήτρια θα είναι πολύ αποτελεσματική σε υψηλές ταχύτητες του ανέμου αλλά λιγότερο αποτελεσματική σε χαμηλές. Μερικές φορές θεωρείτε ωφέλιμο να τοποθετηθούν δύο γεννήτριες στην ανεμογεννήτρια η καθεμία με διαφορετική ονομαστική ισχύ <sup>[3]</sup>.

### **3.6.2 Φορτίσεις**

Ως μέρος της διαδικασίας σχεδιασμού, μια ανεμογεννήτρια πρέπει να αναλυθεί για τα διάφορα φορτία που θα δεχθεί κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της. Πρωταρχικός στόχος είναι να επαληθευθεί ότι η ανεμογεννήτρια θα είναι σε θέση να αντέξει τα διάφορα φορτία με ένα επαρκές περιθώριο ασφαλείας. Έτσι είναι αναγκαίο κατά την ανάλυση να ληφθεί υπόψη πληθώρα κρίσιμων σεναρίων φόρτισης. Τα σενάρια αυτά μπορούν να ληφθούν υπόψη είτε μεμονωμένα είτε ως συνδυασμός διαφόρων σεναρίων φορτίσεων και φάσεων του ανέμου, από τα οποία εξαρτάται εν τέλει και ο σχεδιασμός μιας ανεμογεννήτριας. Τα σενάρια αυτά αποτελούνται κυρίως από διάφορες συνθήκες λειτουργίας και διακρίνονται σε δύο κατηγορίες <sup>[3]</sup>.

1. Συνθήκες λειτουργίας, οι οποίες περιλαμβάνουν:

- a. Την κανονική λειτουργία και την παραγωγή ενέργειας
  - b. Την εκκίνηση, τη διακοπή, τη βραδεία λειτουργία και την αναμονή
2. Προσωρινές συνθήκες, οι οποίες περιλαμβάνουν:
- a. Τη μεταφορά
  - b. Την εγκατάσταση και τη συνδεσμολογία
  - c. Τις πιθανές βλάβες
  - d. Τη συντήρηση και την επισκευή
  - e. Τον έλεγχο και τη δοκιμή διαφόρων μελών

Οι φάσεις του ανέμου μπορούν να χωριστούν σε κανονικές και ακραίες. Σύμφωνα με το πρότυπο IEC-61400-1 γίνεται ένας επιπλέον διαχωρισμός όπου ορίζονται οι ακόλουθες φάσεις <sup>[6]</sup>:

- Κανονικό προφίλ ανέμου
- Κανονικό επίπεδο τύρβης
- Ακραία συνεχόμενη ριπή ανέμου
- Ακραία μεταβολή διεύθυνσης του ανέμου
- Ακραία ριπή ανέμου με συγκεκριμένη κατεύθυνση
- Ακραία ταχύτητα ανέμου
- Ακραία μεταβολή των ταχυτήτων καθ' ύψος

Οι υπό ανάλυση περιπτώσεις φορτίων κατά την φάση του σχεδιασμού μιας ανεμογεννήτριας είναι αποτέλεσμα του συνδυασμού διαφόρων καταστάσεων σχεδιασμού και εξωτερικών συνδυασμών. Ορισμένοι πιθανοί σχεδιασμοί φορτίσεων είναι οι ακόλουθοι:

- Κανονική λειτουργία σε κανονικές εξωτερικές συνθήκες
- Κανονική λειτουργία σε ακραίες εξωτερικές συνθήκες
- Μεταφορά, εγκατάσταση, συντήρηση - επισκευή σε δυσμενείς εξωτερικές συνθήκες
- Περιπτώσεις βλαβών σε κατάλληλες εξωτερικές συνθήκες, οι οποίες πιθανόν να περιλαμβάνουν ακραίες εξωτερικές συνθήκες

Τα εξωτερικά φορτία που επιδρούν σε μια ανεμογεννήτρια είναι κυρίως φορτία ανέμου. Εφόσον μια ανεμογεννήτρια αποτελείται από λεπτά στοιχεία όπως τα πτερύγια και ο πύργος, είναι φυσικό και επόμενο να δημιουργούνται αδρανειακά φορτία πέρα από τα ήδη υπάρχοντα βαρυτικά. Επιπλέον, πρέπει να ληφθούν υπόψη φορτίσεις όπως οι φυγόκεντρες, οι γυροσκοπικές και οι Coriolis, οι οποίες δρουν κατά την λειτουργία των ανεμογεννητριών. Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα φορτία μπορούν να ταξινομηθούν στις εξής κατηγορίες φορτίων <sup>[3]</sup>:

- Αεροδυναμικά φορτία στα πτερύγια
- Βαρυτικές δυνάμεις στα πτερύγια
- Φυγόκεντρες και Coriolis δυνάμεις λόγω περιστροφής
- Αεροδυναμικές δυνάμεις στον πύργο και στη βάση και των πτερυγίων
- Βαρυτικές δυνάμεις στον πύργο και στη βάση των πτερυγίων
- Γυροσκοπικές δυνάμεις εξαιτίας της λειτουργίας του συστήματος ευθυγράμμισης

Τα βαρυτικά φορτία στα πτερύγια προκαλούν ροπή κάμψης στην edgewise κατεύθυνση. Για μία pitch-controlled τύπου ανεμογεννήτρια, τα βαρυτικά φορτία μπορούν επίσης να προκαλέσουν και ροπή κάμψης στην flapwise κατεύθυνση. Λόγω της περιστροφής των πτερυγίων, τα βαρυτικά φορτία είναι κυκλικά με διάφορες ροπές κάμψης. Όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος του ρότορα τόσο μεγαλύτερα θα είναι και τα βαρυτικά φορτία, το οποίο και αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις στην κατασκευή μεγαλύτερων ανεμογεννητριών <sup>[3]</sup>.

#### 3.6.2.1 Λειτουργικά φορτία

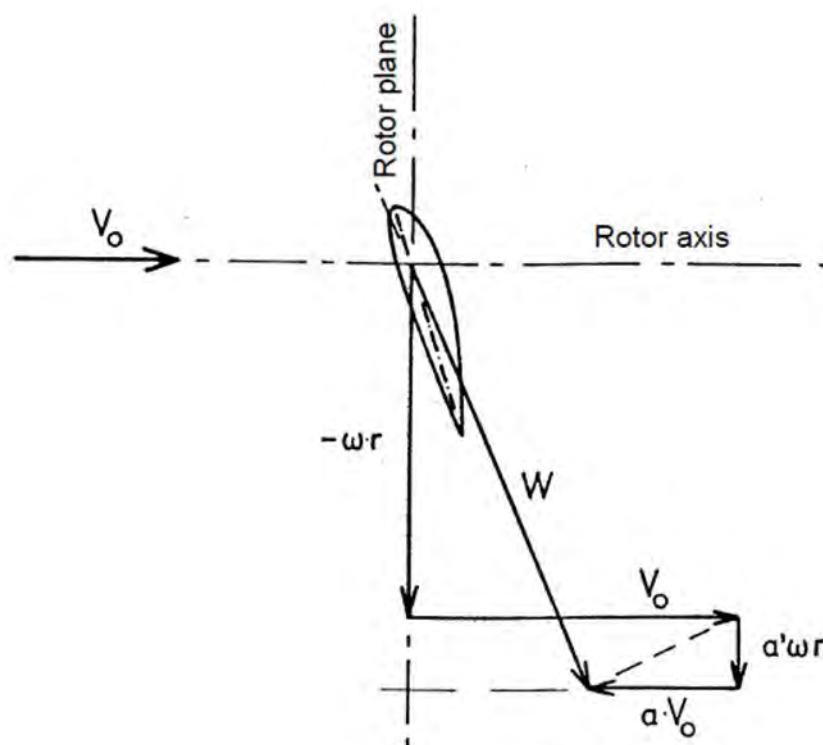
Τα λειτουργικά φορτία σε μία ανεμογεννήτρια προκύπτουν όταν αυτή υπόκειται σε ένα μεταβατικό στάδιο λειτουργίας όπως είναι το φρενάρισμα, η περιστροφή της ανεμογεννήτριας προς την κατάλληλη κατεύθυνση του ανέμου, ή όταν η γεννήτρια είναι συνδεδεμένη με το δίκτυο. Τα πιο σημαντικά λειτουργικά φορτία μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής <sup>[3]</sup>:

- Φορτία πέδησης από μηχανικά και αεροδυναμικά φρένα

- Μεταβατικά φορτία στο κιβώτιο ταχυτήτων, π.χ. που προκαλείται από εμπλοκή της γεννήτριας
- Φορτία εκτροπής, πχ φορτία που παράγονται με την περιστροφή της ανεμογεννήτριας
- Φορτία που προκαλούνται από την περιστροφή των πτερυγίων ή την ενεργοποίηση των φρένων.

### 3.6.2.2 Αεροδυναμικές φορτίσεις - Πτερύγια

Ο υπολογισμός της πραγματικής ταχύτητας του ανέμου σε περιοχές κοντά στο ρότορα είναι αρκετά περίπλοκος. Η πολυπλοκότητα αυτή οφείλεται κυρίως στην λειτουργία του ρότορα, η οποία διαφοροποιεί τις ταχύτητες και το πεδίο του ανέμου στις περιοχές αυτές. Ως εκ τούτου είναι κοινή πρακτική η χρήση μιας απλοποιημένης μεθόδου υπολογισμού των φορτίων του ρότορα. Η φόρτιση της διατομής ενός πτερυγίου και οι επιμέρους συνιστώσες της ταχύτητας του ανέμου φαίνονται στο Σχήμα 3.8 <sup>[3]</sup>.



Σχήμα 3.8: Διάγραμμα ταχυτήτων του αέρα στη διατομή μίας αεροτομής <sup>[3]</sup>.

Η ταχύτητα του ανέμου που είναι κάθετη στο επίπεδο του ρότορα ονομάζεται  $V_0$  και είναι η ταχύτητα εισροής. Όταν ο άνεμος περνάει μέσα από το επίπεδο του ρότορα, η

ταχύτητα του μειώνεται κατά ένα ποσό  $aV_0$  εξαιτίας της αξονικής παρεμβολής με το πτερύγιο. Έτσι, ο ρότορας περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα  $\omega$  και ένα οποιοδήποτε σημείο κατά μήκος του πτερυγίου σε απόσταση  $r$  από τον άξονα του ρότορα θα κινείται με ταχύτητα  $\omega r$  στο επίπεδο του αυτού. Όταν ο άνεμος περνάει μέσω του επιπέδου του ρότορα και αλληλοεπιδρά με αυτόν, εμφανίζεται μία εφαπτομενική ταχύτητα  $a'\omega r$ . Η τελική ταχύτητα του ανέμου που θα δεχθεί το πτερύγιο του ρότορα είναι η  $W$ . Αυτή η ταχύτητα του ανέμου προκαλεί αεροδυναμικές δυνάμεις στον πτερύγιο, οι οποίες διακρίνονται στην δύναμη της ανύψωσης (Lift) και στην δύναμη της αντίστασης (Drag), οι οποίες θα παρουσιαστούν στο επόμενο κεφάλαιο.

### 3.6.2.3 Αεροδυναμικές φορτίσεις - Πύργος και βάση πτερυγίων

Η αεροδυναμική δύναμη της αντίστασης,  $F_d$  στον πύργο και στην βάση μπορεί να υπολογιστεί βάση της προβαλλόμενης επιφάνειας κάθετα στο ροή του ανέμου, από τη σχέση:

$$F_d = 0.5 \rho A V_0^2 C_D \quad (3.2)$$

όπου  $F_d$  ο αεροδυναμικός συντελεστής αντίστασης,  $\rho$  η πυκνότητα του αέρα,  $A$  η προβαλλόμενη επιφάνεια κάθετα στη ροή του ανέμου και  $V_0$  η ταχύτητα του ανέμου .

## Κεφάλαιο 4. ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΟΤΟΜΕΣ

---

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται βασικές έννοιες της αεροδυναμικής των ανεμογεννητριών, η ομάδα των αεροτομών που επιλέχθηκε καθώς και οι λόγοι επιλογής τους. Επίσης θα παρουσιαστούν μέθοδοι και εργαλεία με τα οποία μπορεί κάποιος να υπολογίσει βασικά αεροδυναμικά χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών ανάλογα με τα ζητούμενα του κάθε προβλήματος αλλά και τα δεδομένα του. Η αποτελεσματικότητα των ανεμογεννητριών μετράται με το συντελεστή ισχύς, ο οποίος είναι ο λόγος της ισχύς του στροβίλου προς την διαθέσιμη ισχύ που περικλείεται στον άνεμο. Οι συνηθισμένοι συντελεστές ισχύς κυμαίνονται από το 0,3 έως το 0,5, κάτι το οποίο σημαίνει πως οι ανεμογεννήτριες είναι ικανές να εξάγουν το 30% με 50% της διαθέσιμης αιολικής ενέργειας.

### 4.1 Βασικά αεροδυναμικά χαρακτηριστικά.

Κατά την κίνηση του ρευστού γύρω από μία αεροτομή, δημιουργείται μία αλληλεπίδραση μεταξύ της επιφάνειας της αεροτομής και του αέρα. Οι δυνάμεις που σχηματίζονται από αυτήν την αλληλεπίδραση οφείλονται στην κατανομή της πίεσης και των διατμητικών τάσεων στην επιφάνεια της αεροτομής. Οι διατμητικές τάσεις  $\tau_w$  οφείλονται στο ιξώδες και ασκούνται πάνω στην επιφάνεια του σώματος, ενώ οι ορθές τάσεις οφείλονται στην πίεση, ενώ και η πίεση και οι διατμητικές τάσεις έχουν μονάδα μέτρησης  $N/m^2$ . Η δύναμη  $R$  αναλύεται σε δύο συνιστώσες όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1, όπου φαίνεται ότι η συνισταμένη δύναμη  $R$  αναλύεται με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος είναι να αναλυθεί σε ένα σύστημα συντεταγμένων με θεωρητικούς άξονες  $x$  και  $y$  με αποτέλεσμα να υπάρχουν οι συνισταμένες δυνάμεις της οπισθέλκουσας  $D$  (Drag), που είναι παράλληλη με την ανάντη ταχύτητα και της άντωσης  $L$  (Lift) που ασκείται κάθετα στην ανάντη ταχύτητα. Αναλύοντας την δύναμη  $R$  με τον δεύτερο τρόπο, δημιουργούνται οι συνιστώσες  $A$  και  $N$  που είναι παράλληλη και κάθετη στην χορδή της αεροτομής. Παρακάτω παρουσιάζεται το σύνολο των μεγεθών του Σχήμα 4.1.

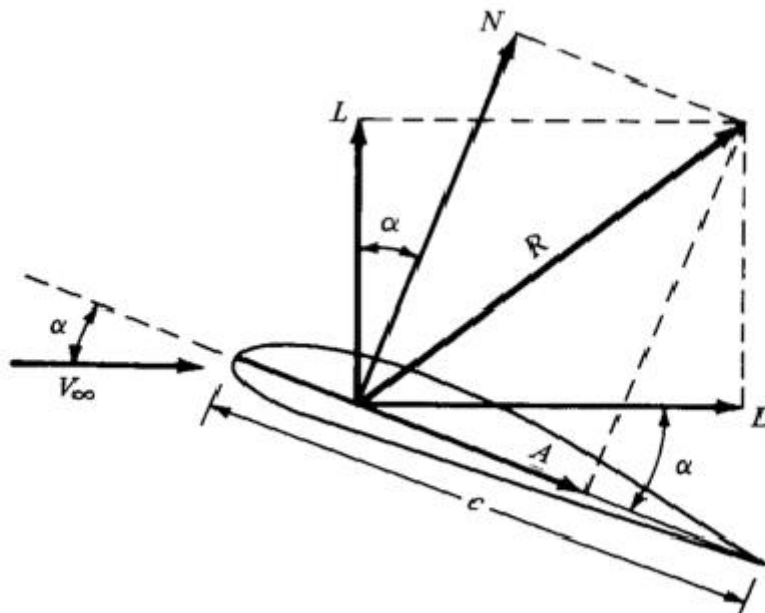
- Η ταχύτητα  $V_0$  της ελεύθερης ροής.

- Η άντωση  $L$  και η οπισθέλκουσα  $D$ .
- Η χορδή  $c$ .
- Η γωνία προσβολής  $\alpha$ , η οποία σχηματίζεται μεταξύ της χορδής και τον άξονα και της ελεύθερης ροής.

Από την ανάλυση των δυνάμεων προκύπτουν οι εξής εξισώσεις:

$$D = N * (\sin\alpha) + A * (\cos\alpha) \quad (4.1)$$

$$L = N * (\cos\alpha) + A * (\sin\alpha) \quad (4.2)$$



Σχήμα 4.1: Η δημιουργία της επαγόμενης οπισθέλκουσας και των γωνιών της επαγόμενης γωνίας προσβολής  $\alpha_i$  και της ενεργού γωνίας προσβολής  $\alpha_{eff}$ .

Για την μελέτη και τον σχεδιασμό των αεροτομών και των πτερύγων στο σύνολο τους, δεν επαρκούν μόνο να υπολογιστούν οι τιμές της άντωσης και τις οπισθέλκουσας αλλά υπάρχουν αδιάστατοι συντελεστές που έχουν καθοριστικό ρόλο στην επιστήμη της αεροδυναμικής. Αρχικά ορίζεται ως  $S$  το εμβαδόν της αεροτομής και  $l$  το μήκος, ενώ η δυναμική πίεση  $q_\infty = \frac{1}{2} \cdot \rho_\infty \cdot V_0^2$  ( $N/m^2$ ). Με την βοήθεια των παραπάνω ορίζονται οι αδιάστατοι αεροδυναμικοί συντελεστές.

- Συντελεστής άντωσης:  $C_L = \frac{L}{q_\infty \cdot S}$  (4.3)

- Συντελεστής οπισθέλκουσας:  $C_D = \frac{D}{q_\infty \cdot S}$  (4.4)

- Συντελεστής ροπής:  $C_M = \frac{M}{q_\infty \cdot S \cdot l}$  (4.5)

Σύμφωνα με το θεώρημα  $\Pi$  του Buckingham οι παραπάνω αεροδυναμικοί συντελεστές εξαρτώνται από τον από τους αριθμούς Reynolds και Mach, αλλά και από την γωνία προσβολής  $\alpha$ , με δεδομένη την γεωμετρία της αεροτομής. Με σταθερές τιμές Mach και Reynolds, και με γνωστή την γεωμετρία ο μόνος παράγοντας που επηρεάζει τους αεροδυναμικούς συντελεστές άντωσης και οπισθέλκουσας είναι η γωνία προσβολής. Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζεται η σχέση των αεροδυναμικών συντελεστών με την γωνία προσβολής. Παρατηρείται ότι ο συντελεστής  $C_L$  αυξάνεται σχεδόν γραμμικά μέχρι μία συγκεκριμένη τιμή για την γωνία προσβολής  $\alpha$  όπου μετά το μέγιστο σημείο παρουσιάζεται απώλεια στήριξης.

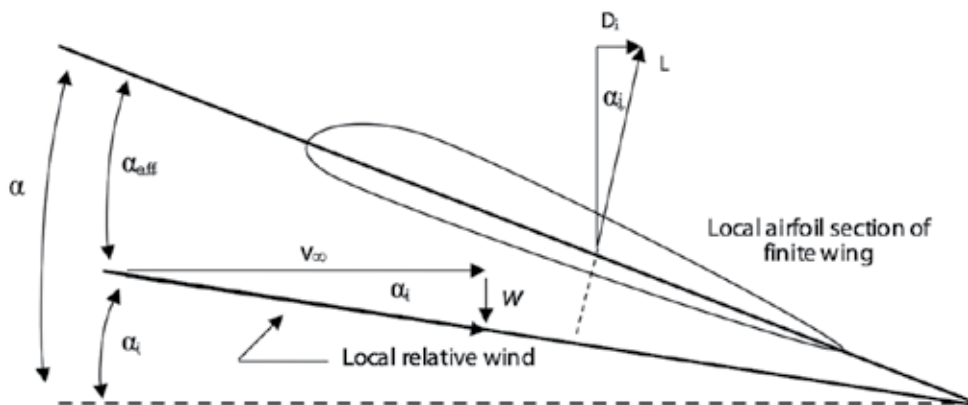


Σχήμα 4.2: Σχέση αεροδυναμικών συντελεστών με την γωνία προσβολής.

Η διαφορά πίεσης που σχηματίζεται μεταξύ των επιφανειών της αεροτομής ισχύει για όλη της πτέρυγα μια ανεμογεννήτριας. Αυτή η διαφορά πίεσης δεν δημιουργεί μόνο τις δυνάμεις της άντωσης και τις οπισθέλκουσας αλλά δημιουργεί και ένα ακόμα φαινόμενο αυτό του στροβιλισμού της ροής στο άκρο της πτέρυγας. Ουσιαστικά η υψηλή πίεση στην κάτω πλευρά της πτέρυγας ωθεί το ρευστό προς την χαμηλή πίεση. Άρα στην επάνω πλευρά της πτέρυγας δημιουργείται μία παράλληλη ροή με το εκπέτασμα η οποία αναγκάζει την συνολική ροή να κατευθυνθεί προς την βάση της πτέρυγας ενώ αντίθετα στην κάτω πλευρά της πτέρυγας συμβαίνει το αντίθετο, η ροϊκές γραμμές εκτρέπονται προς τα άκρα της πτέρυγας. Αυτό το φαινόμενο δημιουργεί μία κίνηση κατάντη της πτέρυγας η οποία

ονομάζεται δίνη άκρου της πτέρυγας. Αυτές οι δίνες συνεχίζουν να κινούνται κατάντη της πτέρυγας.

Η ροή που παράγεται από αυτές τις δίνες επηρεάζει την κατανομή της πίεσης στην πτέρυγα με αποτέλεσμα να παράγεται μία οπισθέλκουσα η οποία καλείται επαγόμενη οπισθέλκουσα και συμβολίζεται με  $D_i$  και είναι ομόρροπη της ελεύθερης ταχύτητας  $V_0$ . Στο Σχήμα 4.3 παρακάτω φαίνεται πως το κατώρευμα επηρεάζει μία αεροτομή, δημιουργώντας την επαγόμενη οπισθέλκουσα. Παρατηρείται επίσης πως το τοπικό ρεύμα αέρα σχηματίζει την μία γωνία με την ελεύθερη ροή  $V_0$ , την γωνία  $\alpha_i$  η οποία ονομάζεται επαγόμενη γωνία προσβολής.



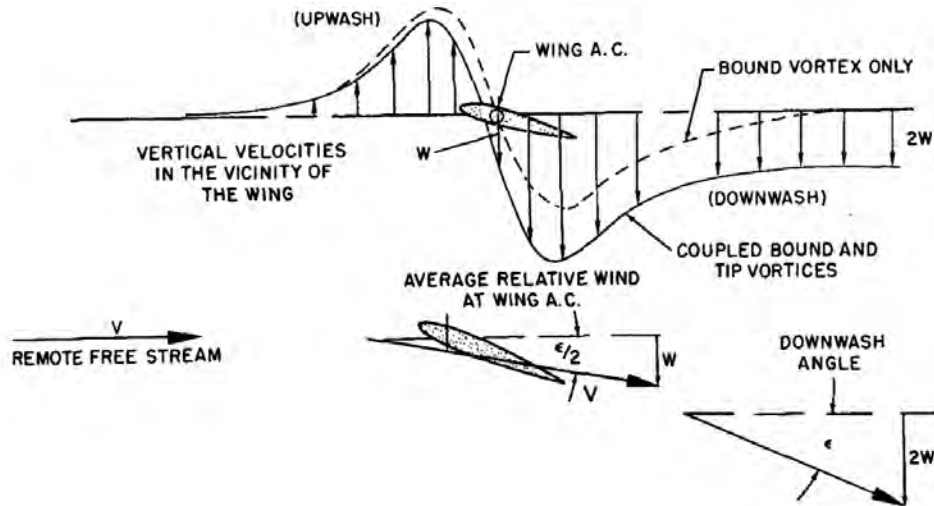
Σχήμα 4.3: Η δημιουργία της επαγόμενης οπισθέλκουσας και των γωνιών της επαγόμενης γωνίας προσβολής  $\alpha_i$  και της ενεργού γωνίας προσβολής  $\alpha_{eff}$ .

Στην πραγματικότητα η γωνία προσβολής που βλέπει κάθε τοπική αεροτομή δεν είναι θεωρητική γωνία προσβολής  $\alpha$  αλλά είναι η γωνία μεταξύ της χορδής και του τοπικού ρεύματος αέρα, η οποία συμβολίζεται  $\alpha_{eff}$  και καλείται ενεργός γωνία προσβολής και υπολογίζεται:

$$\alpha_{eff} = \alpha - \alpha_i \quad (4.6)$$

Πέρα από την μείωση της γωνίας προσβολής  $\alpha$ , η συνιστώσα της ταχύτητας του κατωρεύματος προστίθεται στην ταχύτητα της ελεύθερης ροής, κατάντη της πτέρυγας. Αποτέλεσμα αυτού είναι να παρατηρείται μία καμπύλωση της ροής η οποία ξεκινάει από την ακμή προσβολής μέχρι την ακμή εκφυγής, όπως φαίνεται παρακάτω στο Σχήμα 4.4. Ο

υπολογισμός της ταχύτητας του κατωρεύματος και της επαγόμενης γωνίας είναι σύνθετος και γίνεται με την βοήθεια του νόμου των Biot - Savart και των θεωρημάτων των Helmholtz και Prandtl [8].



Σχήμα 4.4: Η ταχύτητα κατωρεύματος και η καμπύλωση της ροής.

Για τον υπολογισμό της ταχύτητας του κατωρεύματος θα αναλυθεί αρχικά η έννοια της δίνης και κάποιες απαιτούμενες έννοιες που είναι απαραίτητες για τους υπολογισμούς.

Έστω ένα σημείο  $O$  και γύρω από αυτό μία ροή, της οποίας οι ροϊκές γραμμές σχηματίζουν ομόκεντρους κύκλους γύρω από το σημείο  $O$ . Η ταχύτητα  $V_\theta$  είναι σταθερή σε όλη την ροϊκή γραμμή, διαφέρει όμως από γραμμή σε γραμμή. Η ροή αυτή ονομάζεται δίνη. Μία τέτοια ροή έχει δύο χαρακτηριστικά, είναι ασυμπίεστη και αστρόβιλη. Η ταχύτητα  $V_\theta$  υπολογίζεται:

$$V_\theta = \frac{C}{r} \quad (4.7)$$

Όπου  $C$  είναι σταθερά και  $r$  η απόσταση του σημείου από το σημείο  $O$ . Η σταθερά  $C$  υπολογίζεται ως:

$$C = -\frac{\Gamma}{2\pi} \quad (4.8)$$

Στην παραπάνω εξίσωση,  $\Gamma$  καλείται η ένταση της δίνης. Σύμφωνα με το θεώρημα του Helmholtz, ο οποίος ήταν ο πρώτος που εφάρμοσε την ιδέα του νήματος, ένα νήμα δινών δεν μπορεί να καταλήγει σε ρευστό αλλά θα πρέπει να επεκτείνεται μέχρι τα όρια αυτού ή τα σχηματίζει μία κλειστή διαδρομή. Η ένταση του νήματος δινών είναι σταθερή σε όλο το μήκος του. Έστω, λοιπόν, ένα νήμα δινών το οποίο είναι καμπυλωμένο, και η κυκλοφορία είναι κατά μήκος οποιασδήποτε κλειστής διαδρομής, τότε η ένταση των δινών έχει σταθερή τιμή  $\Gamma$ . Επίσης έστω ένα τυχαίο σημείο του νήματος  $\vec{dl}$  και  $P$  ένα τυχαίο σημείο στον χώρο που απέχει από το νήμα απόσταση  $r$ . Το νήμα δινών θα επάγει στο σημείο  $P$  μία ταχύτητα:

$$\vec{dV} = \frac{\Gamma}{4\pi} \cdot \frac{\vec{dl} \times \vec{r}}{|\vec{r}|^3} \quad (4.9)$$

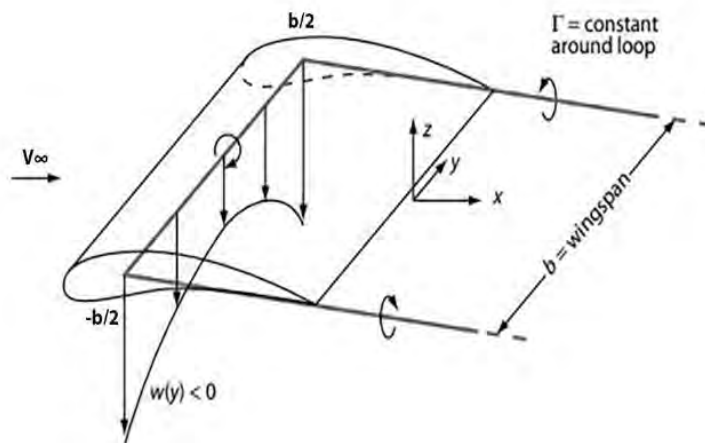
Αυτή η εξίσωση αποτελεί τον Νόμο Biot-Savart. Σε ένα ευθύγραμμο και άπειρο σύστημα δινών, η ταχύτητα στο σημείο  $P$  είναι,

$$V = \frac{\Gamma}{2\pi h} \quad (4.10)$$

όπου  $h$  είναι η απόσταση του σημείου  $P$  από το νήμα δινών. Τα παραπάνω θεωρήματα βρίσκουν εφαρμογή στην έννοια της Κατανομής της Άντωσης. Έστω ένα σημείο  $y_1$  κατά μήκος του εκπετάσματος, με  $c$  την τιμή της χορδής και  $\alpha$  την γωνία προσβολής, η άντωση για την συγκεκριμένη θέση είναι  $L'(y_1)$ , ενώ για ένα σημείο με διαφορετικά την τιμή  $c$ , την γωνία προσβολής και την γεωμετρία, η άντωση θα είναι  $L'(y_2)$ . Η άντωση κατά μήκος μίας πτέρυγας θα είναι:

$$L' = L'(y) = \rho_\infty V_\infty \Gamma(y) \quad (4.11)$$

Η θεωρία του Prandtl που αναπτύχθηκε το 1911 - 18, και είναι πολύ σημαντική για τους υπολογισμούς των χαρακτηριστικών των πτερύγων. Σύμφωνα με αυτήν λοιπόν, αν αντικατασταθεί η πτέρυγα με μία οριακή δίνη με όρια  $y = -b/2$  και  $y = b/2$ , τότε το νήμα δινών θα συνεχίζει ως δύο δίνες που εκρέουν από τα άκρα της πτέρυγας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.5.

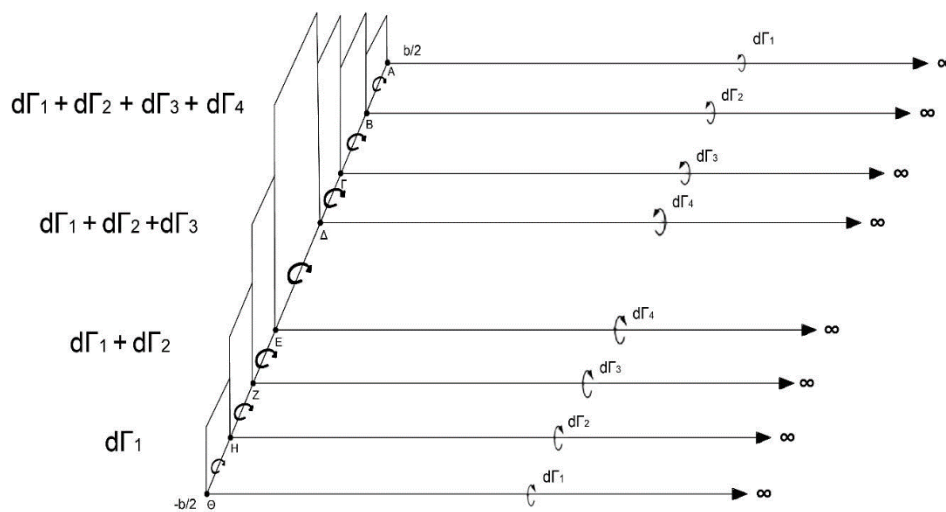


Σχήμα 4.5: Η ανωστική γραμμή από τα σημεία  $-b/2$  έως  $b/2$  και η μορφή πεταλοειδούς δίνης.

Αυτή η μορφή δίνης που παρουσιάζεται παραπάνω ονομάζεται πεταλοειδής δίνη. Παρατηρείται ότι οι δύο εκρεόμενες δίνες συμβάλουν στην επαγόμενη ταχύτητα οριακής δίνης, παράγοντας ένα κατώρευμα  $w(y)$  με φορά προς τα κάτω, το οποίο υπολογίζεται ως εξής:

$$w(y) = -\frac{\Gamma}{4\pi\left(\frac{b}{2}+y\right)} - \frac{\Gamma}{4\pi\left(\frac{b}{2}-y\right)} = -\frac{\Gamma}{4\pi} \cdot \frac{b}{\left(\left(\frac{b}{2}\right)^2 - y^2\right)} \quad (4.12)$$

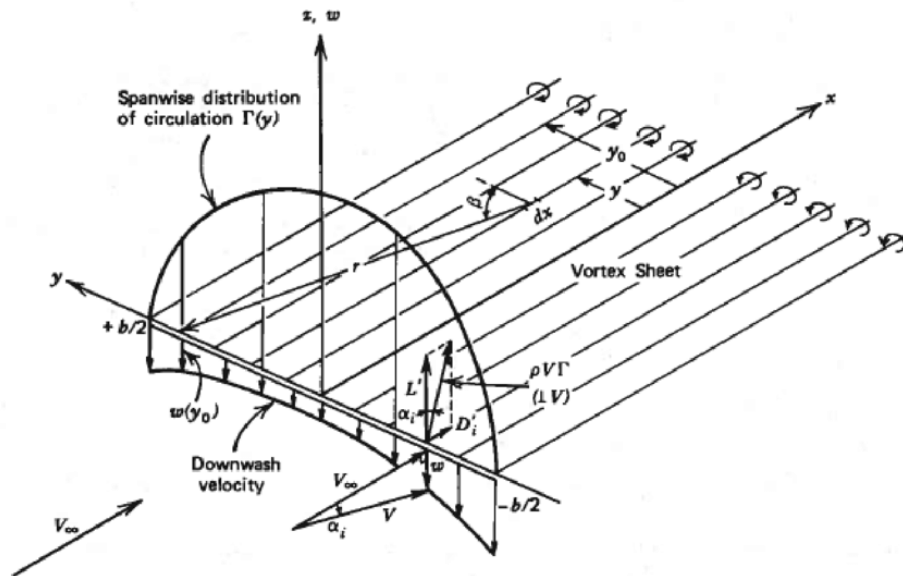
Από τη παραπάνω εξίσωση παρατηρείται ότι όταν το  $y$  τείνει στις ακραίες τιμές,  $b/2$  και  $-b/2$ , το  $w$  τείνει στο  $-\infty$ . Αυτό όμως δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Για τον λόγο αυτό ο Prandtl αντικατέστησε την απλή πεταλοειδή δίνη με ένα σύστημα περισσότερων πεταλοειδών δινών, του οποίου η κάθε μία έχει διαφορετικό μήκος οριακής δίνης, αλλά όλες οι οριακές δίνες βρίσκονται πάνω σε μία κοινή γραμμή την λεγόμενη γραμμή άντωσης. Στο Σχήμα 4.6 φαίνεται ένα σύστημα τεσσάρων δινών. Παρατηρείται ότι η οριακή δίνη, της πρώτης πεταλοειδούς δίνης έντασης  $d\Gamma_1$ , εκτείνεται από το ένα άκρο  $b/2$  της πτέρυγας μέχρι το άλλο άκρο  $-b/2$ . Στην συνέχεια, στο σημείο Β στην υπάρχουσα δίνη έντασης  $d\Gamma_1$  προστίθεται μία δεύτερη πεταλοειδής δίνη έντασης  $d\Gamma_2$ . Αυτό σημαίνει ότι στα τμήματα ΒΓ και ΖΗ η κυκλοφορία είναι  $d\Gamma_1 + d\Gamma_2$ . Το ίδιο γίνεται και στα σημεία Γ και Δ αντίστοιχα μέχρις την εμφάνιση μίας πεταλοειδούς δίνης της οποίας η κυκλοφορία είναι  $d\Gamma_1 + d\Gamma_2 + d\Gamma_3 + d\Gamma_4$ .



Σχήμα 4.6: Σύστημα τεσσάρων δινών.

Η διαφορά στην κυκλοφορία φαίνεται και από το ύψος των μπαρών. Σχηματίζονται ζεύγη δινών, προερχόμενο το καθένα από μία πεταλοειδή δίνη. Αν αντικατασταθεί αυτό το σύστημα των τεσσάρων δινών με άπειρο αριθμό πεταλοειδών δινών, οι μπάρες που παρουσιάζουν την μεταβολή της κυκλοφορίας πλέον δεν υπάρχουν και την θέση τους παίρνει μία ελλειπτική διακεκομμένη γραμμή. Η αντικατάσταση αυτή φαίνεται αναλυτικά στο Σχήμα 4.7. Πλέον η κατανομή κατά μήκος της γραμμής άντωσης είναι  $\Gamma(y)$  και η τιμή της κυκλοφορίας στο μέση της της γραμμής άντωσης είναι  $\Gamma_0$ . Αυτός ο αριθμός πεταλοειδών δινών δημιουργεί ένα “φύλλο” δινών, το οποίο κινείται κατάντη της πτέρυγας. Η ολική ένταση αυτού του “φύλλου” είναι μηδέν καθώς απαιτείται από ίσα και αντίθετα ζεύγη δινών. Αντίθετα, σε ένα σημείο  $y$  της γραμμής άντωσης η κυκλοφορία είναι  $\Gamma(y)$  και η μεταβολή της είναι:

$$d\Gamma = \frac{d\gamma}{dy} dy \quad (4.13)$$



Σχήμα 4.7: Υπέρθεση άπειρου πλήθους πεταλοειδών δινών σε κοινή ανωστική γραμμή.

Η εκρεόμενη δίνη από το σημείο  $y$ , επάγει μία ταχύτητα σε ένα τυχαίο σημείο  $y_0$  της γραμμής άντωσης. Η διεύθυνση και το μέτρο της ταχύτητας αυτής καθορίζονται από την εξίσωση. Επίσης στο σημείο  $y_0$  επάγεται μία ταχύτητα κατωρεύματος  $dw$ , η οποία υπολογίζεται ως εξής:

$$dw = -\frac{\frac{d\Gamma}{dy}dy}{4\pi \cdot (y_0 - y)} \quad (4.14)$$

Το αρνητικό πρόσημο χαρακτηρίζει την φορά του κατωρεύματος. Με την ολοκλήρωση της παραπάνω εξίσωσης προκύπτει η ολική ταχύτητα  $w$  στο σημείο  $y_0$ , η οποία προκαλείται από το φύλλο δινών, με όρια τα σημεία  $b/2$  και  $-b/2$ .

$$w(y_0) = -\frac{1}{4\pi} \cdot \int_{-b/2}^{b/2} \frac{\frac{d\Gamma}{dy}dy}{y_0 - y} \quad (4.15)$$

Από τα παραπάνω προκύπτει, ότι η ταχύτητα κατωρεύματος προκαλεί μείωση της θεωρητικής γωνίας προσβολής, δημιουργώντας μία γωνία μεταξύ της ελεύθερης ροής  $V_0$  και του τοπικού ρεύματος αέρα. Στη συνέχεια, υπολογίζεται η επαγόμενη γωνία προσβολής  $\alpha_i$  για το σημείο  $y_0$ .

$$a_i(y_o) = \tan^{-1} \left[ -\frac{w(y_o)}{V_\infty} \right] \quad (4.16)$$

Το γεγονός ότι η ταχύτητα  $V_\infty$  είναι αρκετά μεγαλύτερη από το κατώρευμα  $w$ , άρα και η επαγόμενη γωνία  $a_i$  είναι πολύ μικρή, επιτρέπει να εκφραστεί η προηγούμενη εξίσωση ως:

$$a_i(y_o) = -\frac{w(y_o)}{V_\infty} \quad (4.17)$$

Αν αντικατασταθεί η ταχύτητα  $w(y_o)$  η επαγόμενη γωνία  $a_i$  θα μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει της κατανομής της κυκλοφορίας  $\Gamma(y)$ , οπότε προκύπτει:

$$a_i(y_o) = \frac{1}{4\pi \cdot V_\infty} \cdot \int_{-b/2}^{b/2} \frac{\frac{d\Gamma}{dy} dy}{y_o - y} \quad (4.18)$$

Στην πραγματικότητα, η χορδή των πτερύγων είναι μεταβαλλόμενο μέγεθος, όπως και η θεωρητική γωνία προσβολής, και μεταβάλλονται κατά μήκος της πτέρυγας. Επίσης οι πτέρυγες των σημερινών ανεμογεννητριών αποτελούνται από πολλές διαφορετικές διαδοχικές αεροτομές, με διαφορετικές τιμές  $\alpha_L = 0$ . Αυτές οι πτέρυγες ονομάζονται “συστραμμένες”. Αφού λοιπόν, κατά μήκος της γραμμής άντωσης το κατώρευμα  $w$  μεταβάλλεται, τότε θα μεταβάλλεται και η ενεργός γωνία προσβολής  $\alpha_{eff}$  που ορίστηκε στην εξίσωση (4.1). Αυτό σημαίνει ότι εκφράζεται ως  $\alpha_{eff} = \alpha_{eff}(y_o)$ . Έτσι για ένα σημείο  $y_o$  της γραμμής άντωσης ο συντελεστής άντωσης θα είναι:

$$c_l = 2\pi \cdot [\alpha_{eff}(y_o) - \alpha_{L=0}] \quad (4.19)$$

Σύμφωνα με το θεώρημα των Kutta-Joukowski και γνωρίζοντας από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά την τιμή του  $\alpha_L = 0$ , η άντωση στο σημείο  $y_o$  θα είναι:

$$L'(y) = \rho_{\infty} V_{\infty} \Gamma(y_o) \quad (4.20)$$

Η συνολική άντωση για όλο το μήκος του εκπετάσματος προκύπτει από την ολοκλήρωση της εξίσωσης.

$$L = \int_{-b/2}^{b/2} [L'(y)] dy = \rho_{\infty} V_{\infty} \int_{-b/2}^{b/2} [\Gamma(y)] dy \quad (4.21)$$

Ενώ ο συντελεστής άντωσης:

$$C_L = \frac{2}{V_{\infty} \cdot S} \cdot \int_{-b/2}^{b/2} [L(y)] dy \quad (4.22)$$

Γνωρίζοντας πλέον την συνολική άντωση αλλά και τον συντελεστή, εφαρμόζοντας τριγωνομετρία στο Σχήμα 4.3, η επαγόμενη οπισθέλκουσα  $D_i$  είναι:

$$D'_i = L'_i \cdot \sin \alpha_i \quad (4.23)$$

Η εξίσωση (4.23) μπορεί να αναδιατυπωθεί, λόγω του ότι η γωνία  $\alpha_i$  είναι αρκετά μικρή, ως εξής:

$$D'_i = L'_i \cdot \alpha_i \quad (4.24)$$

Ολοκληρώνοντας προκύπτει η επαγόμενη οπισθέλκουσα κατά μήκος του εκπετάσματος:

$$D_i = \int_{-b/2}^{b/2} [L'(y) \cdot \alpha_i(y)] dy = \rho_{\infty} V_{\infty} \int_{-b/2}^{b/2} [\Gamma(y) \cdot \alpha_i(y)] dy \quad (4.25)$$

Και ο συντελεστής επαγόμενης οπισθέλκουσας:

$$C_{Di} = \frac{2}{V_{\infty} \cdot S} \cdot \int_{-b/2}^{b/2} [\Gamma(y) \cdot a_i(y)] dy \quad (4.26)$$

Η εξίσωση δεν ανταποκρίνεται πλήρως στην πραγματικότητα, αλλά περιγράφει τον συντελεστή επαγόμενης οπισθέλκουσας μόνο στις ορθογωνικές πτέρυγες.

## 4.2 Οι αεροτομές στις ανεμογεννήτριες

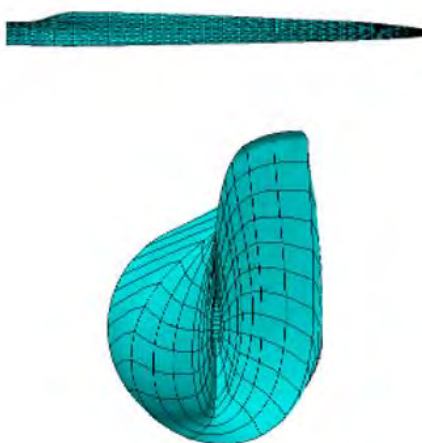
Όπως ήδη έχουμε πει, σκοπός των ανεμογεννητριών είναι η μετατροπή της κινητικής ενέργειας που βρίσκεται στο άνεμο, σε περιστρεφόμενη μηχανική ενέργεια. Αυτή η μετατροπή ενέργειας βασίζεται σε μεγάλο βαθμό από τον σχεδιασμό των αεροτομών και των πτερύγων των ανεμογεννητριών. Η σχεδίαση των πτερύγων αλλά κυρίως των αεροτομών είναι πολύ σημαντικός καθώς επηρεάζει τον βαθμό απόδοσης της ανεμογεννήτριας. Σκοπός των αεροτομών είναι η μεγιστοποίηση της άντωσης και η μείωση της αεροδυναμικής αντίστασης. Οι αεροτομές των ανεμογεννητριών είναι αρκετά κοινές στο σχήμα τους με αυτές των αεροσκαφών, έχουν δηλαδή καμπυλωτή την άνω επιφάνεια και επίπεδη ή λιγότερο καμπυλωτή την κάτω επιφάνεια. Όπως είναι γνωστό, η άνω επιφάνεια κάνει το ρευστό, τον αέρα δηλαδή, να κινείται γρηγορότερα σε σύγκριση με την κάτω επιφάνεια. Σαν αποτέλεσμα έχουμε να δημιουργείται μία περιοχή με χαμηλότερη πίεση δημιουργώντας έτσι την άντωση. Τόσο ο σχεδιασμός όσο και η επιλογή των αεροτομών για την κατασκευή πτερύγων ανεμογεννητριών είναι αρκετά πολύπλοκο ζήτημα καθώς θα πρέπει να υπάρχει ένα συγκεκριμένος λόγος μεταξύ των παραγόμενων δυνάμεων, δηλαδή της οπισθέλκουσας και της άντωσης. Οι ιδανικές αεροτομές για τις ανεμογεννήτριες παράγουν μεγαλύτερη άντωση και μικρή οπισθέλκουσα.

## 4.3 Απόδοση των αεροτομών στις ανεμογεννήτριες.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, κατά την διάρκεια του σχεδιασμού η αξιολόγηση των αεροτομών γίνεται με τον λόγο  $L/D$ . Ένας υψηλός λόγος  $L/D$  σημαίνει ότι η αεροτομή είναι αποτελεσματική, καθώς παράγει μεγάλη δύναμη άντωσης και λιγότερη οπισθέλκουσα. Πέρα από τον σχεδιασμό και κατά την συνέπεια τον λόγο  $L/D$ , ή αποδοτικότητα μίας

αεροτομής επηρεάζεται από την γωνία προσβολής και την γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της χορδής και της διεύθυνσης του ανέμου. Στην ουσία η γωνία προσβολής επηρεάζει άμεσα την ποσότητα παραγωγής άντωσης και οπισθέλκουσας. Στην πραγματικότητα όταν η γωνία προσβολής είναι πολύ υψηλή, η πτέρυγα θα σταματήσει να γυρίζει για λόγους ασφαλείας, η αεροτομή θα παράγει πού υψηλή άντωση.

Στόχος των σχεδιαστών είναι ο σχεδιασμός με την μέγιστη δυνατή απόδοση των πτερύγων με συνέπεια και των αεροτομών. Για την μεγιστοποίηση της απόδοσης των πτερύγων παρατηρούμε την εφαρμογή μίας μεθόδου κατά την οποία η πτέρυγα περιστρέφονται γύρω από τον άξονα της. Με αυτό τον τρόπο η γωνία προσβολής για κάθε αεροτομή είναι διαφορετική κατά τον μήκος της πτέρυγας. Στην βάση της πτέρυγας, οι αεροτομές έχουν μικρή γωνία προσβολής και όσο μεγαλώνει το μήκος της πτέρυγας φτάνοντας στην άκρη της, οι αεροτομές έχουν ολοένα και μεγαλύτερη γωνία προσβολής. Με αυτή την μέθοδο, πέρα από την διαφορετική γωνία προσβολής που πετυχαίνετε, μειώνονται και τα φορτία που εφαρμόζονται πάνω στην πτέρυγα. Αναλυτικότερα, οι αεροτομές στην βάση της πτέρυγας έχοντας μικρή γωνία προσβολής υπόκεινται σε χαμηλότερες ταχύτητες άρα και σε μικρότερες δυνάμεις. Το αντίθετο συμβαίνει στις αεροτομές που βρίσκονται στις άκρες των πτερύγων. Έτσι λοιπόν, με αυτή την συστροφή της πτέρυγας Σχήμα 4.8, οι δυνάμεις κατανέμονται ομοιόμορφα κατά το μήκος της πτέρυγας αυξάνοντας έτσι τον χρόνο ζωής αυτής.



Σχήμα 4.8: Όψη πτέρυγας

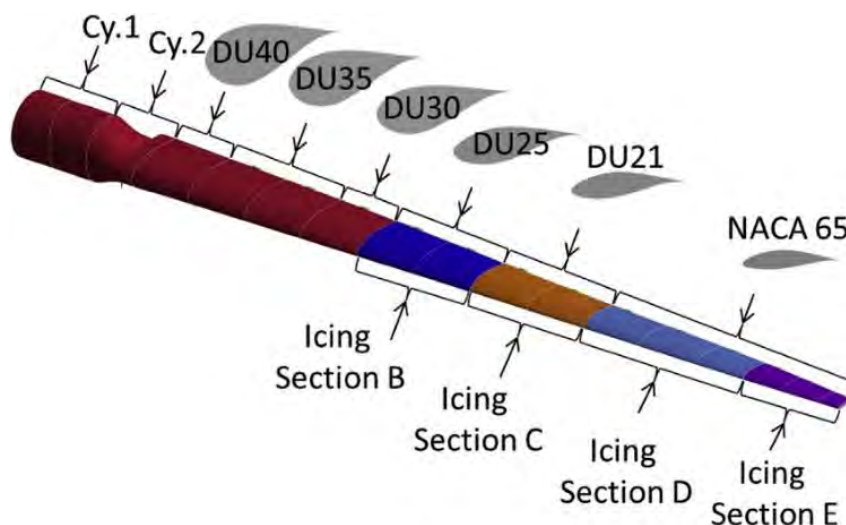
Συμπερασματικά πρέπει να σημειωθεί ότι οι πτέρυγες είναι από τα κρίσιμότερα μέρη των ανεμογεννητριών καθώς είναι το μέρος που γίνεται η σύλληψη της ενέργειας που

περικλείεται στον άνεμο. Οι σχεδιαστές των ανεμογεννητριών με τις μεθόδους που παρουσιάστηκαν παραπάνω, καταφέρνουν να δημιουργούν πτέρυγες που είναι ταυτόχρονα αποτελεσματικές και ανθεκτικές, μεγιστοποιώντας την απόδοση και την παραγωγή της ισχύος αλλά και την διάρκεια ζωής.

#### 4.4 Οι αεροτομές της ανεμογεννήτριας NREL 5MW

Το Εθνικό Εργαστήριο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (NREL) έχει σχεδιάσει μια ανεμογεννήτρια εξαιρετικά προηγμένη κατάλληλη για υπεράκτια αιολικά πάρκα. Ο ρότορας της συγκεκριμένης ανεμογεννήτριας έχει την εξαιρετικά μεγάλη διάμετρο των 126 μέτρων και έξοδο ονομαστικής εξόδου τα 5MW. Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου μοντέλου είναι οι αεροτομές του, οι οποίες έχουν σχεδιαστεί με σκοπό την μεγιστοποίηση της απόδοσης.

Βασικό χαρακτηρισκό του σχεδιασμού των πτερύγων της ανεμογεννήτριας NREL 5MW είναι ότι αποτελείται από πέντε τμήματα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.9, που είναι ξεχωριστά σχεδιασμένα με στόχο την βέλτιστη απόδοση της συνολικής πτέρυγας.



Σχήμα 4.9: Διαχωρισμός της πτέρυγας σε τμήματα.

Ο σχεδιασμός των αεροτομών αυτής της ανεμογεννήτριας βασίζεται στην αεροτομή DU 00-W-210. Αυτή η αεροτομή είναι συμμετρική και αρχικά αναπτύχθηκε από το Τμήμα Αιολικής Ενέργειας του Τεχνικού Πανεπιστημίου της Δανίας. Η συγκεκριμένη αεροτομή έχει μήκος χορδής 210 mm και λόγο πάχους προς χορδή 12%. Επίσης χαρακτηρίζεται από τον υψηλό συντελεστή άντωσης και τον χαμηλό συντελεστή οπισθέλκουσας, κάτι το οποίο την

καθιστά ιδανική για συνθήκες χαμηλών ταχυτήτων ανέμου. Η απόδοση αυτής της αεροτομής έχει δοκιμαστεί τόσο μέσω πειραμάτων όσο και μέσω υπολογιστικών μεθόδων. Οι αεροτομές της ανεμογεννήτριας NREL 5MW είναι σχεδιασμένες με στόχο την μείωση των φορτίων στην πτέρυγα, κάτι το οποίο συμβάλει στην αξιοπιστία της αλλά και στην μείωση του κόστους συντήρησης της ανεμογεννήτριας. Ο δεύτερος στόχος του σχεδιασμού αυτών των αεροτομών είναι η μείωση του θορύβου που παράγεται από τον στρόβιλο στο απόρευμα των ανεμογεννητριών. Αυτό τις καθιστά κατάλληλες προς χρήση σε κατοικημένες περιοχές. Για τους παραπάνω λόγους αλλά και για την πληθώρα πληροφοριών, στην παρούσα εργασία έγινε επιλογή των παραπάνω τύπων αεροτομών.

## Κεφάλαιο 5. BEM (Blade Element Momentum) THEORY

---

Η αεροδυναμική ανάλυση πτέρυγας ανεμογεννήτριας αποτελεί ένα σημαντικό πεδίο έρευνας και ανάπτυξης στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Οι ανεμογεννήτριες αποτελούν κεντρικό στοιχείο στην μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια. Για να μπορέσουν να σχεδιαστούν αποδοτικές και αξιόπιστες ανεμογεννήτριες, είναι αναγκαία η κατανόηση της αεροδυναμικής συμπεριφοράς των πτερυγίων.

### 5.1 Εισαγωγή στην αεροδυναμική ανάλυση πτέρυγας ανεμογεννήτριας

Η αεροδυναμική ανάλυση πτέρυγας ανεμογεννήτριας αποτελεί μια μεθοδολογία για τη μοντελοποίηση και την ανάλυση της κίνησης του αέρα γύρω από το πτερύγιο μιας ανεμογεννήτριας. Ο στόχος της ανάλυσης είναι να κατανοήσουμε την αεροδυναμική συμπεριφορά της πτέρυγας και να μελετήσουμε την απόδοσή της. Η απόδοση της πτέρυγας επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, όπως η γεωμετρία της πτέρυγας, η γωνία προσβολής του αέρα, οι αντιστάσεις που δημιουργούνται κ.ά.

### 5.2 Σκοπός και σημασία της ανάλυσης BEM Theory

Η θεωρία BEM (Blade Element Momentum) αποτελεί μια από τις κυριότερες μεθόδους αεροδυναμικής ανάλυσης πτερυγίων ανεμογεννητριών. Η θεωρία BEM βασίζεται στη διαίρεση της πτέρυγας σε μικρά στοιχειώδη τμήματα, γνωστά ως "blade elements". Κάθε blade element αναλύεται χρησιμοποιώντας τις αρχές της αεροδυναμικής, λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρία της πτέρυγας και τις αλληλεπιδράσεις με τον αέρα.

Ο σκοπός της ανάλυσης BEM Theory είναι να παράσχει μια λεπτομερή αεροδυναμική περιγραφή της πτέρυγας ανεμογεννήτριας, περιλαμβάνοντας τη δημιουργία αντίδρασης και την απόδοσή της. Η κατανόηση της απόδοσης της πτέρυγας μέσω της BEM Theory επιτρέπει τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και τη βελτίωση της αποδοτικότητας των ανεμογεννητριών.

Συνοψίζοντας, η αεροδυναμική ανάλυση πτέρυγας ανεμογεννήτριας και η χρήση της BEM Theory αποτελούν ζωτικά εργαλεία για την κατανόηση και βελτιστοποίηση της απόδοσης των ανεμογεννητριών. Στη συνέχεια του κεφαλαίου, θα παρουσιάσουμε τη

μεθοδολογία της BEM Theory και θα αναλύσουμε τα αποτελέσματα μιας δοκιμαστικής πτέρυγας ανεμογεννήτριας, εστιάζοντας στα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά και την απόδοσή της.

### 5.3 Αρχές της BEM Theory

Η θεωρία BEM (Blade Element Momentum) είναι ένα από τα κύρια εργαλεία που χρησιμοποιούνται στην αεροδυναμική ανάλυση πτέρυγας ανεμογεννήτριας. Αυτή η θεωρία βασίζεται στην αρχή της συντήρησης της ορμής και αποσκοπεί στον υπολογισμό των αεροδυναμικών δυνάμεων που δρουν στην πτέρυγα.

Η BEM Theory βασίζεται σε δύο βασικές αρχές:

- Αρχή της συντήρησης της ορμής: Αυτή η αρχή ορίζει ότι η συνολική ορμή που εισέρχεται σε ένα στοιχείο της πτέρυγας πρέπει να ισούται με τη συνολική ορμή που εξέρχεται από αυτό το στοιχείο. Αυτό σημαίνει ότι οι αεροδυναμικές δυνάμεις που δρουν στην πτέρυγα προκύπτουν από τις μεταβολές της ορμής.
- Μοντελοποίηση της πτέρυγας σε blade elements: Η πτέρυγα χωρίζεται σε μικρά στοιχεία που ονομάζονται blade elements. Κάθε blade element θεωρείται ότι λειτουργεί σαν αεροφυσείο με ορισμένες αεροδυναμικές ιδιότητες.

Η μοντελοποίηση της πτέρυγας σε blade elements είναι μια βασική έννοια της BEM Theory. Αυτό το βήμα συνίσταται στο να χωρίσουμε την πτέρυγα σε μικρά στοιχεία, καθένα από τα οποία αντιπροσωπεύεται από ένα blade element. Κάθε blade element έχει μια διακριτή θέση και γεωμετρικά χαρακτηριστικά, όπως μήκος, πλάτος και γωνία προσβολής.

Η μοντελοποίηση της πτέρυγας σε blade elements μας επιτρέπει να προσεγγίσουμε την αεροδυναμική συμπεριφορά της πτέρυγας, λαμβάνοντας υπόψη την αλληλεπίδραση μεταξύ των διάφορων στοιχείων της. Αυτό μας επιτρέπει να υπολογίσουμε τις αεροδυναμικές δυνάμεις που δρουν σε κάθε blade element και, συνολικά, στην πτέρυγα ως σύνολο.

Κάθε blade element αναπαριστά ένα μικρό τμήμα της πτέρυγας με συγκεκριμένες γεωμετρικές διαστάσεις και αρχικές συνθήκες. Το μήκος του blade element, το οποίο είναι

κατακόρυφο στον άξονα της πτέρυγας, συμβολίζεται με  $dL$ . Επίσης, κάθε blade element έχει μια οριζόντια απόσταση  $dR$  από το κέντρο της πτέρυγας.

Για κάθε blade element, χρησιμοποιούμε τις γεωμετρικές παραμέτρους και την κίνηση του αέρα για να υπολογίσουμε τις αεροδυναμικές δυνάμεις που δρουν πάνω του. Οι αεροδυναμικές δυνάμεις περιλαμβάνουν την αεροδυναμική άντωση (lift) και την αεροδυναμική οπισθέλκουσα (drag). Οι αεροδυναμικές δυνάμεις εξαρτώνται από παραμέτρους όπως η γωνία προσβολής (angle of attack) και ο αεροδυναμικός συντελεστής.

Συνολικά, η μοντελοποίηση της πτέρυγας σε blade elements μας επιτρέπει να προσεγγίσουμε την αεροδυναμική συμπεριφορά της πτέρυγας, λαμβάνοντας υπόψη την αλληλεπίδραση μεταξύ των διάφορων στοιχείων της. Αυτό μας επιτρέπει να υπολογίσουμε τις αεροδυναμικές δυνάμεις που δρουν σε κάθε blade element και, συνολικά, στην πτέρυγα ως σύνολο.

Στην ανάλυση των blade elements, η αεροδυναμική αλληλεπίδραση μεταξύ του αέρα και των στοιχείων της πτέρυγας είναι κρίσιμη. Κατά την εκτέλεση του υπολογισμού για κάθε blade element, λαμβάνουμε υπόψη την τοπική γεωμετρία του element, την αρχική κίνηση του αέρα και τις αεροδυναμικές ιδιότητες.

Για να υπολογίσουμε τις αεροδυναμικές δυνάμεις σε κάθε blade element, χρησιμοποιούμε τη θεωρία της άντωσης και της οπισθέλκουσας. Η άντωση αναφέρεται στη δύναμη που σημειώνεται κάθε φορά που ο αέρας ρέει πάνω από την επιφάνεια της πτέρυγας και προκαλεί ανόδους δυνάμεις. Η οπισθέλκουσα, από την άλλη πλευρά, αναφέρεται στη δύναμη που αντιστέκεται στην κίνηση της πτέρυγας προς τα εμπρός.

Για τον υπολογισμό της άντωσης και της οπισθέλκουσας σε κάθε blade element, χρησιμοποιούμε τον αεροδυναμικό συντελεστή (aerodynamic coefficient), ο οποίος εξαρτάται από τη γεωμετρία του element και την αγωγή του αέρα γύρω από αυτό. Ο αεροδυναμικός συντελεστής αν χρησιμοποιείται για να αποτυπώσει τη σχέση μεταξύ της παραγόμενης αεροδυναμικής δύναμης και των παραμέτρων του blade element, όπως η γωνία προσβολής (angle of attack), η γεωμετρία του προφίλου και η ταχύτητα του αέρα.

Ο αεροδυναμικός συντελεστής άντωσης (lift coefficient) συμβολίζεται με το γράμμα  $CL$  και αναπαριστά τη σχέση μεταξύ της αεροδυναμικής δύναμης άντωσης και της δυναμικής πίεσης του αέρα κατά μήκος του blade element. Ο αεροδυναμικός συντελεστής

οπισθέλκουσας (drag coefficient) συμβολίζεται με το γράμμα  $C_d$  και αναπαριστά τη σχέση μεταξύ της αεροδυναμικής δύναμης οπισθέλκουσας και της δυναμικής πίεσης του αέρα.

Για την υπολογιστική ανάλυση της πτέρυγας, κάθε blade element αναλύεται ξεχωριστά. Ο υπολογισμός των αεροδυναμικών δυνάμεων σε κάθε blade Element βασίζεται στη χρήση των αεροδυναμικών συντελεστών, της γεωμετρίας του element και των αεροδυναμικών παραμέτρων.

Με τη χρήση της BEM Theory, μπορούμε να υπολογίσουμε τις αεροδυναμικές δυνάμεις (άντωση, οπισθέλκουσα) σε κάθε blade Element της πτέρυγας, λαμβάνοντας υπόψη την αεροδυναμική αλληλεπίδραση μεταξύ τους. Αυτό μας επιτρέπει να κατανοήσουμε καλύτερα την αεροδυναμική συμπεριφορά της πτέρυγας, να βελτιώσουμε τον σχεδιασμό και να προβλέψουμε την απόδοση της σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας.

Για την περαιτέρω ανάλυση της πτέρυγας με βάση το μοντέλο των blade elements, αξίζει να αναφερθούμε σε μερικά κύρια στάδια της διαδικασίας. Ας εξετάσουμε τα εξής βήματα:

- Διαίρεση της πτέρυγας σε blade elements: Αρχικά, η πτέρυγα διαιρείται σε μικρά τμήματα, γνωστά ως blade elements. Κάθε blade element είναι ένα μικρό τμήμα της πτέρυγας που μπορεί να θεωρηθεί ως επίπεδο προφίλ.
- Υπολογισμός των αεροδυναμικών παραμέτρων: Για κάθε blade element, υπολογίζονται οι αεροδυναμικές παράμετροι, όπως η γεωμετρία του προφίλ, η γωνία προσβολής και η ταχύτητα του αέρα. Αυτές οι παράμετροι καθορίζουν τους αεροδυναμικούς συντελεστές άντωσης και οπισθέλκουσας για κάθε blade element.
- Υπολογισμός των αεροδυναμικών δυνάμεων σε κάθε blade element: Χρησιμοποιώντας τους αεροδυναμικούς συντελεστές, τη γεωμετρία του element και τις αεροδυναμικές παραμέτρους, υπολογίζονται οι αεροδυναμικές δυνάμεις άντωσης και οπισθέλκουσας που δρουν σε κάθε blade element.
- Αθροιστικός υπολογισμός των αεροδυναμικών δυνάμεων: Οι αεροδυναμικές δυνάμεις που υπολογίζονται για κάθε blade element συνολικά αθροίζονται για να

προκύψουν οι συνολικές αεροδυναμικές δυνάμεις (άντωση, οπισθέλκουσα) που δρουν στην πτέρυγα.

Η ανάλυση της πτέρυγας με βάση το μοντέλο των blade elements και την BEM Theory μας επιτρέπει να λάβουμε υπόψη πολλές αεροδυναμικές παραμέτρους και αλληλεπιδράσεις, προσφέροντας μια πιο ακριβή εκτίμηση της αεροδυναμικής απόδοσης της πτέρυγας. Επίσης, μας επιτρέπει να αντιληφθούμε καλύτερα τις δυνάμεις που δρουν σε κάθε τμήμα της πτέρυγας και να βελτιώσουμε τον σχεδιασμό και την απόδοσή της σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας.

Στην επόμενη ενότητα θα εξετάσουμε την εφαρμογή της BEM Theory σε αναλυτικό επίπεδο, παρουσιάζοντας τις βασικές αρχές και εξισώσεις που χρησιμοποιούνται στην BEM Theory για τον υπολογισμό των αεροδυναμικών δυνάμεων σε κάθε blade element.

Στην BEM Theory, οι αεροδυναμικές δυνάμεις σε κάθε blade element υπολογίζονται με βάση την εξίσωση ισορροπίας για τη ροή του αέρα κατά μήκος της πτέρυγας. Αυτή η εξίσωση λέγεται εξίσωση της ροής του εξωτερικού αέρα (External Flow Equation) και εκφράζεται ως εξής:

- Για τον άξονα  $x$  (κατακόρυφος άξονας):

$$dF_x = \rho V_\infty (V_x - V_i) dS \quad (5.1)$$

- Για τον άξονα  $y$  (οριζόντιος άξονας):

$$dF_y = \rho V_\infty (V_y - V_i) dS \quad (5.2)$$

Σε αυτές τις εξισώσεις,  $dF_x$  και  $dF_y$  αναπαριστούν τις αεροδυναμικές δυνάμεις στον άξονα  $x$  και  $y$  αντίστοιχα,  $\rho$  είναι η πυκνότητα του αέρα,  $V_\infty$  είναι η ταχύτητα του αέρα στο άπειρο (είσοδος),  $V_x$  και  $V_y$  είναι οι συνιστώσες της ταχύτητας στους άξονες  $x$  και  $y$  αντίστοιχα,  $V_i$  είναι η ταχύτητα εισόδου του αέρα στο blade element και  $dS$  είναι η επιφάνεια του blade element.

Στην BEM Theory, η ταχύτητα  $V_i$  είναι το άθροισμα της ταχύτητας εισόδου του αέρα στο blade element ( $V_0$ ) και της επιπρόσθετης ταχύτητας που προκύπτει από την αεροδυναμική φόρτιση του element ( $\Delta V_i$ ).

$$V_i = V_0 + \Delta V_i \quad (5.3)$$

Η ταχύτητα εισόδου του αέρα εξαρτάται από τη γεωμετρία του προφίλ και τις αεροδυναμικές παραμέτρους, ενώ η επιπρόσθετη ταχύτητα εξαρτάται από τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των blade elements και την αλληλεπίδραση με την ροή.

Ο υπολογισμός των αεροδυναμικών δυνάμεων σε κάθε blade element γίνεται εφαρμόζοντας τις παραπάνω εξισώσεις σε κάθε στοιχείο της πτέρυγας και αθροίζοντας τις αεροδυναμικές δυνάμεις για όλα τα blade elements.

Συνοψίζοντας, η BEM Theory και η μοντελοποίηση της πτέρυγας σε blade elements επιτρέπουν τον ακριβή υπολογισμό των αεροδυναμικών δυνάμεων που δρουν στην πτέρυγα και την καλύτερη κατανόηση της αεροδυναμικής συμπεριφοράς της. Αυτή η ανάλυση είναι πολύ χρήσιμη για τον σχεδιασμό, τη βελτιστοποίηση και την πρόβλεψη της απόδοσης των ανεμογεννητριών.

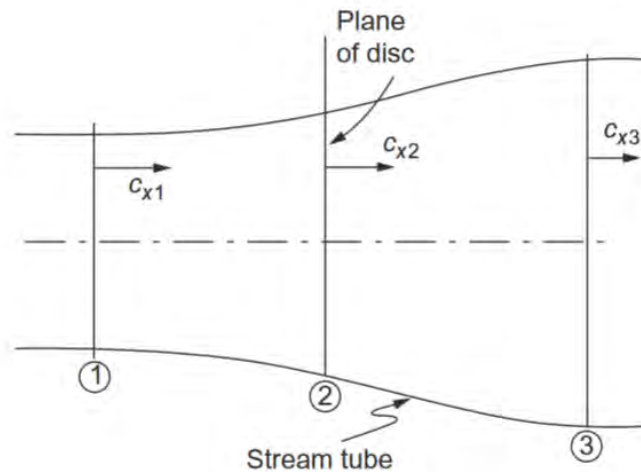
## 5.4 Εφαρμογή των εξισώσεων

Για την ορθή εφαρμογή και την κατανόηση των εξισώσεων της BEM Theory, θα παρουσιαστούν αρχικά βασικές εξισώσεις από την θεωρία actuator disk. Σύμφωνα με τη θεωρία του actuator disk, ο ρότορας αντιμετωπίζεται ως ένας δισδιάστατος δίσκος που διακόπτει ομοιόμορφα τη ροή του αέρα. Ο δίσκος αυτός απαρτίζεται θεωρητικά από άπειρο αριθμό πτερυγίων, προκαλώντας ομοιόμορφη ροή, κάτι το οποίο δεν ισχύει στην πραγματικότητα. Σε αυτήν τη θεωρία ισχύουν οι παρακάτω υποθέσεις:

- Η ροή είναι σταθερή και ασυμπίεστη.
- Η ροή είναι ομοιόμορφη, ομοιογενής και μη τυρβώδης.
- Δεν υπάρχει μεταφορά θερμότητας.

Η ροή του αέρα διαιρείται σε δύο περιοχές: την περιοχή πριν από το δίσκο (upstream) και την περιοχή μετά το δίσκο (downstream). Κατά τη διάβαση του αέρα μέσα από τον δίσκο

Σχήμα 5.1, δημιουργείται μια αντίδραση που προκαλεί την προώθηση του αέρα προς τα πίσω. Αυτή η προώθηση του αέρα δημιουργεί την κίνηση της ανεμογεννήτριας και συνεπώς τη μετατροπή της κινητικής ενέργειας του αέρα σε ενέργεια περιστροφής του άξονα της ανεμογεννήτριας [16].



Σχήμα 5.1: Μοντέλο θεωρίας actuator disc.

Στο παραπάνω σχήμα ισχύουν οι εξής εξισώσεις:

$$\dot{m} = \rho c_{x1} A_1 \quad (5.4)$$

$$T = \dot{m}(c_{x3} - c_{x1}) \quad (5.5)$$

$$P_{ow} = T c_{x2} = \frac{1}{2} \dot{m}(c_{x1}^2 - c_{x3}^2) \quad (5.6)$$

Όπου  $\dot{m}$  είναι η ροή της μάζας,  $P_{ow}$  ή ενέργεια που εκλύεται από τον θεωρητικό δίσκο,  $T$  είναι η ώση, η δύναμη που ασκείται αξονικά στον δίσκο.

Συνδυάζοντας 5.5 και 5.6 προκύπτει η εξίσωση για τον υπολογισμό της ταχύτητας  $c_{x2}$ :

$$c_{x2} = \frac{P_{ow}}{T} = \frac{1}{2} (c_{x1} + c_{x3}) \quad (5.7)$$

Η διαθέσιμη ισχύ που μπορεί να εξαχθεί από την ανεμογεννήτρια υπολογίζεται επίσης από την παρακάτω εξίσωση:

$$P = 2\bar{a}\rho A_2 c_{x1}^3 (1 - \bar{a})^2 \quad (5.8)$$

Η παραπάνω εξίσωση προκύπτει από τον συνδυασμό της εξίσωσης της συνέχειας και μια απλοποιημένης μορφής της διαθέσιμης ενέργειας. Όπου  $\bar{a}$  ο συντελεστής επαγωγικής αξονικής ροής (axial flow induction factor), οποίος ισούται:

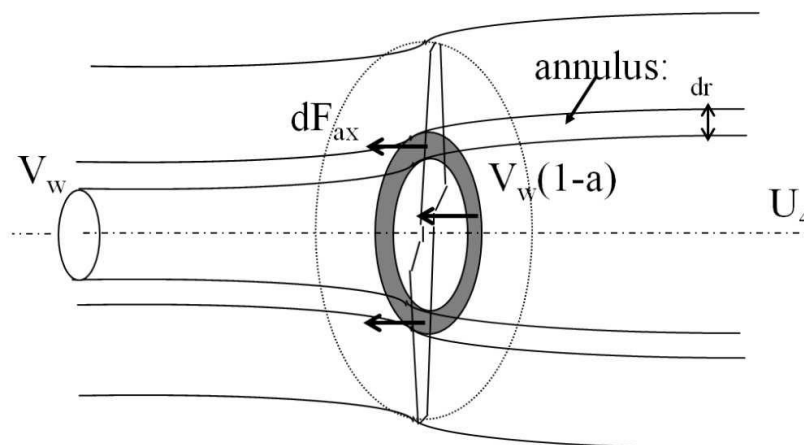
$$\bar{a} = (c_{x1} - c_{x2})/c_{x1} \quad (5.9)$$

Από την παραπάνω εξίσωση υπολογίζεται και η ταχύτητα  $c_{x2}$ :

$$c_{x2} = c_{x1} (1 - \bar{a})^2 \quad (5.10)$$

Για τον ακριβή υπολογισμό της αξονικής δύναμης, ο θεωρητικός δίσκος θα διαιρεθεί σε δακτυλίδια όπως στο σχήμα παρακάτω. Με τον τρόπο αυτό η παρακάτω εξίσωση υπολογίζεται η αξονική δύναμη σε ένα δακτυλίδι συναρτήσει της ακτίνας.

$$dT(r) = \rho c_{x1}^2 4\alpha(1 - \alpha)\pi r dr \quad (5.11)$$



Σχήμα 5.2: Διαίρεση θεωρητικού δίσκου σε δακτυλίδιους.

Η διαθέσιμη κινητική ενέργεια στον άνεμο, δηλαδή η μέγιστη και η ιδανική ενέργεια που μπορεί να παράγει μία ανεμογεννήτρια υπολογίζεται ως εξής:

$$P_0 = \frac{1}{2} c_{x1}^2 (\rho A_2 c_{x1}) = \frac{1}{2} \rho A_2 c_{x1}^3 \quad (5.12)$$

Ο συντελεστής ισχύος είναι ο λόγος της παραγόμενης ισχύος προς την θεωρητική παραγόμενη ισχύ:

$$C_P = \frac{P}{P_0} = 4\bar{a}(1 - \bar{a})^2 \quad (5.13)$$

Ο συντελεστής αυτός μπορεί να λάβει μία μέγιστη τιμή στην περίπτωση που ο αξονικός συντελεστής  $\bar{a}$  έχει τιμή ίση με 1/3. Αυτή η μέγιστη τιμή καλείται, όριο Betz, και ισούται με:

$$C_P = \frac{16}{27} \quad (5.14)$$

Η θεωρία αυτή επιτρέπει τον υπολογισμό της απόδοσης μιας ανεμογεννήτριας με βάση τις ιδιότητες της ροής του αέρα, όπως η ταχύτητα και η πίεση, και τον τρόπο με τον οποίο επηρεάζονται από τον δίσκο. Παρά τις απλοποιήσεις της, η θεωρία του actuator disk αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο για την κατανόηση και τον σχεδιασμό ανεμογεννητριών, καθώς βοηθά στον υπολογισμό της απόδοσης και της απόδοσης της μετατροπής της ανεμικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια.

Σε αυτό το σημείο θα ξεκινήσει να χτίζεται η BEM Theory και η άμεση σύγκριση με την τη θεωρία που παρουσιάστηκε μέχρι αυτό το σημείο.

Η BEM Theory εφαρμόζεται ανάλογα με τα δεδομένα που έχουμε στην διάθεση μας την εκάστοτε περίπτωση. Στην παρούσα διπλωματική θα χρησιμοποιηθεί η BEM Theory, όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, για την σύγκριση των αποτελεσμάτων της υπολογιστικής μεθόδου με πεπερασμένα στοιχεία. Έχοντας υπόψιν μας ότι έχουμε ως δεδομένα τα εξής χαρακτηριστικά της τουρμπίνας:

Πίνακας 5.1: Πίνακας χαρακτηριστικών

|                                |          |
|--------------------------------|----------|
| Διάμετρος:                     | $D$      |
| Μήκος χορδής:                  | $l$      |
| Αριθμός πτερύγων:              | $Z$      |
| Λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου: | $J$      |
| Ταχύτητα ανέμου                | $c_{x1}$ |
| Λόγος άντωσης:                 | $C_L$    |
| Γωνία προσβολής:               | $\alpha$ |

Η διαδικασία ξεκινάει θέτοντας την ακτίνα  $r$  για την οποία θέλουμε να κάνουμε την επίλυση. Με αυτό τον τρόπο έχουμε γνωστό τον λόγο  $r/R$ . Πρώτο βήμα είναι να θέσουμε τους δύο συντελεστές, αξονικός και εφαπτομενικός συνελεστής ταχύτητας, ίσους με το μηδέν

$$\bar{\alpha} = 0 \quad (5.15)$$

$$\bar{\alpha}' = 0 \quad (5.16)$$

Συνεχίζουμε υπολογίζοντας τον συντελεστή φορτίου πτέρυγας  $\lambda$ ,

$$\lambda = \frac{ZlC_L}{8\pi r} \quad (5.17)$$

Έχοντας θέσει τους δύο συντελεστές ίσους με μηδέν, θα υπολογιστεί η εφαπτομένη της γωνίας  $\varphi$  και κατά συνέπεια η γωνία  $\varphi$ .

$$\tan \varphi = \frac{R}{rJ} \left( \frac{1-a}{1+a'} \right) \quad (5.18)$$

Γνωρίζοντας πλέον την γωνία  $\varphi$  μπορεί να υπολογιστεί η γωνία περιστροφής  $\beta$  (pitch angle), καθώς η γωνία αυτή ισούται με:

$$\beta = \varphi - \alpha \quad (5.19)$$

Όπου  $\alpha$  είναι η γωνία προσβολής, που μας είναι γνωστή. Έχοντας πλέον υπολογιστεί μεγέθη από τα οποία εξαρτώνται οι δύο συντελεστές, θα υπολογιστούν εκ νέου.

$$\frac{1}{\alpha} = 1 + \left(\frac{1}{\lambda}\right) \sin \varphi \tan \varphi \quad (5.20)$$

$$\frac{1}{\alpha'} = \left(\frac{1}{\lambda}\right) \cos \varphi - 1 \quad (5.21)$$

Από τις δύο παραπάνω εξισώσεις θα προκύψουν δύο αριθμητικά αδιάστατα νούμερα για τους δύο συντελεστές. Το επόμενο βήμα είναι η επανάληψη της διαδικασίας που παρουσιάστηκε μέχρι αυτό το σημείο. Τα δύο αποτελέσματα των συντελεστών θα εφαρμοστούν για τον υπολογισμό της εφαπτομένης της γωνίας  $\varphi$  και της γωνίας περιστροφής  $\beta$ . Αυτή η διαδικασία επανάληψης θα γίνει μέχρι να προκύψει ακρίβεια τεσσάρων δεκαδικών ψηφίων στα αποτελέσματα των δύο συντελεστών.

Στη συνέχεια έχουμε όλα τα απαραίτητα δεδομένα για τον υπολογισμό της αξονικής δύναμης  $X$  από την παρακάτω εξίσωση.

$$\Delta X = \frac{1}{2} \rho Z l R c_{x1}^2 \left[ \frac{(1-a)}{\sin \varphi} \right]^2 C_L \cos \varphi \Delta(r/R) \quad (5.22)$$

Εύκολα παρατηρείται ότι η εξίσωση αυτή μπορεί να χωριστεί σε δύο σκέλη με γνώμονα το γεγονός ότι το ένα σκέλος μένει σταθερό για οποιοδήποτε τιμή χορδής και ακτίνας ενώ το δεύτερο σκέλος είναι εξαρτημένο άμεσα από διάφορα μεταβαλλόμενα μεγέθη. Αυτό είναι σημαντικό καθώς διευκολύνει στην επίλυση των προβλημάτων για ολόκληρη την τουρμπίνα καθώς για κάθε διαφορετικό λόγο  $r/R$  θα χρειάζεται να λυθεί μόνο το ένα εκ των δύο σκελών της εξίσωσης. Το πρώτο και σταθερό σκέλος είναι:

$$\frac{1}{2} \rho Z l R c_{x1}^2 \quad (5.23)$$

Ενώ το μεταβλητό είναι:

$$Var_1 = \left[ \frac{(1-a)}{\sin \varphi} \right]^2 C_L \cos \varphi \Delta(r/R) \quad (5.24)$$

Με παρόμοιο τρόπο μπορούμε να υπολογίσουμε την ροπή  $\tau$  από την εξίσωση,

$$\Delta\tau = \frac{1}{2}\rho Zl\Omega R^4 \left[ \frac{(1-a')}{\cos\varphi} \right]^2 (r/R)^3 C_L \sin\varphi \Delta(r/R) \quad (5.25)$$

Το πρώτο βήμα για τον υπολογισμό της ροπής είναι ο υπολογισμός της γωνιακής ταχύτητας  $\Omega$  από την εξίσωση:

$$J = \frac{\Omega R}{c_{x1}} \quad (5.26)$$

Η εξίσωση της ροπής μπορεί να διαχωριστεί και αυτή σε δύο σκέλη με την ίδια λογική όπως η εξίσωση της αξονικής δύναμης. Το σκέλος της εξίσωσης που είναι αμετάβλητο είναι:

$$\frac{1}{2}\rho Zl\Omega R^4 \quad (5.27)$$

Ενώ το εξαρτώμενο σκέλος το οποίο είναι διαφορετικό για κάθε διαφορετικό λόγο  $r/R$ , είναι:

$$Var_1 = \left[ \frac{(1-a')}{\cos\varphi} \right]^2 (r/R)^3 C_L \sin\varphi \Delta(r/R) \quad (5.28)$$

Έτσι για τον υπολογισμό της συνολικής αξονικής δύναμης και της συνολικής ροπής που ασκούνται στην τουρμπίνα είναι το άθροισμα των μεταβλητών σκελών για κάθε λόγο  $r/R$ , σχηματίζοντας οι δύο παρακάτω εξισώσεις:

$$T = \frac{1}{2}\rho ZlRc_{x1}^2 \sum Var_1 \quad (5.29)$$

$$\tau = \frac{1}{2}\rho Zl\Omega R^4 \sum Var_2 \quad (5.30)$$

Ο υπολογισμός της παραγόμενης συνολικής ισχύς από την τουρμπίνα είναι το γινόμενο της ροπής με την γωνιακή ταχύτητα,

$$P = \tau\Omega \quad (5.31)$$

Μέχρι στιγμής, με την συγκεκριμένη μαθηματική ανάλυση αγνοείται η επίδραση της ύπαρξης πεπερασμένου αριθμού ελίκων. Το γεγονός ότι σε ένα σταθερό σημείο, ο ρυθμός ροής κυμαίνεται καθώς περνάει η λεπίδα. Η επαγόμενη ταχύτητα στο σημείο είναι σταθερή με το χρόνο. Για τον λόγο αυτό απαιτείται κάποια τροποποίηση της ανάλυσης και αυτό γίνεται με την εφαρμογή ενός συντελεστή διόρθωσης άκρων της λεπίδας. Διατίθενται αρκετές λύσεις με την επικρατέστερη να είναι αυτή των Prandtl and Tietjens (1957).

Ο υπολογισμός του συντελεστή διόρθωσης του Prandtl γίνεται από την εξίσωση,

$$F = \left(\frac{2}{\pi}\right) \cos^{-1} \left[ \exp \left( -\frac{\pi d}{s} \right) \right] \quad (5.32)$$

Όπου,

$$\frac{\pi d}{s} = \frac{1}{2} Z \left( 1 - \frac{r}{R} \right) (1 + J^2)^{0,5} \quad (5.33)$$

Το επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός εκ νέου του συντελεστή άντωσης  $C_L$  από την παρακάτω εξίσωση με την υπόθεση ξανά ότι ο αξονικός και ο εφαπτομενικός συντελεστής ταχύτητας  $\alpha$  και  $\alpha'$  είναι ίσοι με το μηδέν.

$$C_L = (\varphi - \beta)/10 \quad (5.34)$$

Γνωρίζοντας πλέον τον συντελεστή άντωσης μπορεί να υπολογιστεί ο λόγος,

$$\frac{F}{\lambda} = \frac{62,32}{C_L} \quad (5.35)$$

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να ακολουθηθεί η διαδικασία με τις διαδοχικές επαναλήψεις μέχρι την ακρίβεια τεσσάρων δεκαδικών ψηφίων για τα αποτελέσματα των δύο συντελεστών που τέθηκαν στην αρχή ίσους με μηδέν. Οι εξισώσεις με τις οποίες θα υπολογιστούν οι δύο συντελεστές είναι:

$$\frac{\alpha}{1-\alpha} = \frac{\lambda \cos \varphi}{F \cos^2 \varphi} \quad (5.36)$$

$$\frac{\alpha'}{1+\alpha'} = \frac{\lambda}{F \cos \varphi} \quad (5.37)$$

Με την ολοκλήρωση των επαναλήψεων μπορεί να υπολογιστεί η αξονική δύναμη και η ροπή με τις ίδιες εξισώσεις. Επίσης το ίδιο ισχύει και την παραγόμενη ισχύ. Και για τα τρία αυτά μεγέθη παρατηρείται μία μείωση, καθώς εφαρμόστηκε αυτή την φορά ένας συντελεστής με στόχο την ακριβέστερη επίλυση του προβλήματος.

Στο κεφάλαιο των αποτελεσμάτων θα παρουσιαστούν αναλυτικά οι πίνακες με τα αποτελέσματα αλλά και τις παραδοχές διαδοχικά, ακριβώς όπως αναλύθηκαν σε αυτό το κεφάλαιο. Επίσης θα δούμε την σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των δύο μεθόδων που αναλύσαμε, την μείωση μετά την εφαρμογή του διορθωτικού συντελεστή αλλά και θα παρουσιαστεί και η σύγκριση των τελικών αποτελεσμάτων με αυτά που θα προκύψουν από την ανάλυση του προβλήματος με την βοήθεια λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων.

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί θα δούμε την διαδικασία και βασικές θεωρίες για την μοντελοποίηση του συγκεκριμένου προβλήματος στο λογισμικό Ansys.

## Κεφάλαιο 6. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΟΓΚΩΝ ΚΑΙ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ CFD

---

### 6.1 Εισαγωγή στην Μέθοδο των Πεπερασμένων Όγκων

Η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων (Finite Volume Method) είναι μια αριθμητική τεχνική που χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων ροής και μεταφοράς μάζας, ενέργειας και άλλων μεγεθών σε χώρους που χωρίζονται σε πεπερασμένους όγκους. Αυτή η μέθοδος είναι δημοφιλής στον τομέα της μηχανικής, της μηχανολογίας, της ρευστοδυναμικής, της θερμοδυναμικής και άλλων σχετικών επιστημονικών πεδίων. Ας δούμε τα βασικά στοιχεία και τα βήματα της μεθόδου των πεπερασμένων όγκων:

**Διαίρεση του χώρου:** Ο χώρος που εξετάζεται διαιρείται σε πεπερασμένους όγκους ή κύβους. Αυτοί οι όγκοι συνήθως ονομάζονται "κύτταρα" ή "στοιχειώδεις όγκοι".

**Εφαρμογή των εξισώσεων:** Για κάθε υπολογιστικό κελί, εφαρμόζονται οι εξισώσεις ροής ή μεταφοράς (όπως οι εξισώσεις Navier-Stokes για τη ρευστοδυναμική) για τον υπολογισμό των μεταβλητών ροής σε αυτόν τον όγκο.

**Υπολογισμός των ροών:** Οι ποσότητες όπως η μάζα, η ενέργεια και άλλες φυσικές μεταβλητές υπολογίζονται στα φαντώματα (ιστορικά πρόσοψης) των κελιών κατά μήκος των επιφανειών που διαχωρίζουν τα κύτταρα.

**Ενημέρωση του χρόνου:** Οι υπολογισμένες τιμές ενημερώνονται σε κάθε χρονικό βήμα ώστε να παρακολουθείται η εξέλιξη της ροής ή της μεταφοράς μεγεθών.

**Συνοριακές συνθήκες:** Πρέπει να οριστούν κατάλληλες συνοριακές συνθήκες στα όρια του χώρου, προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι επιδράσεις με το περιβάλλον.

**Συνάρτηση χρόνου:** Η μέθοδος μπορεί να είναι είτε στατική (χρονικά ανεξάρτητη) είτε δυναμική (χρονικά εξαρτημένη), ανάλογα με την πολυπλοκότητα του προβλήματος.

## 6.2 Διάσταση και Διαίρεση σε Στοιχεία

Η μέθοδος FVM απαιτεί πρώτα από όλα την κατάλληλη διαμόρφωση του φυσικού προβλήματος σε μια ή περισσότερες διαστάσεις. Συγκεκριμένα, χωρίζουμε τον χώρο του προβλήματος σε μικρούς όγκους, που συνήθως ονομάζονται κελιά. Οι διαστάσεις αυτών των κελιών μπορεί να είναι μια, δύο, ή τρεις, ανάλογα με τη φύση του προβλήματος που εξετάζεται.

Ο επόμενος σημαντικός βήματος είναι η διαίρεση του χώρου σε στοιχεία (κελιά), τα οποία είναι τα βασικά στοιχεία της μεθόδου FVM. Κάθε κελί αντιπροσωπεύει έναν πεπερασμένο όγκο του χώρου και είναι χαρακτηριστικό του γεωμετρικού περιγράμματος του προβλήματος. Τα σύνορα ανάμεσα στα κελιά ονομάζονται "cell interfaces" και αποτελούν τις επιφάνειες όπου υπολογίζονται οι ροές ανάμεσα στα κελιά.

Σε κάθε κελί, οι μεταβλητές ροής υπολογίζονται σε ένα σημείο που ονομάζεται "cell center" ή "cell solution" του κελιού. Από αυτό το σημείο, οι τιμές των μεταβλητών είναι διαθέσιμες για τον υπολογισμό των ροών προς τα γειτονικά κύτταρα μέσω των cell interfaces<sup>5</sup>.

## 6.3 Εισαγωγή στην CFD

Η Computational Fluid Dynamics (CFD), ή Υπολογιστική Δυναμική των Ρευστών, αποτελεί μια πανίσχυρη αριθμητική μέθοδο που χρησιμοποιείται για την μελέτη, την πρόβλεψη και την ανάλυση της ροής ρευστών και αερίων. Η CFD αποτελεί ένα απαραίτητο εργαλείο για την κατανόηση και τη βελτιστοποίηση της ροής σε διάφορες εφαρμογές, όπως αεροδυναμική, υδροδυναμική, κλιματισμός, καύσιμες μηχανές και πολλές άλλες.

Στην CFD, η ροή ενός ρευστού μελετάται με την επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes, οι οποίες περιγράφουν την κίνηση και τη συμπεριφορά του ρευστού. Αυτές οι εξισώσεις είναι μαθηματικές εξισώσεις που περιγράφουν την συντηρητική μάζα, την ορμή και την ενέργεια σε ένα ρευστό. Ωστόσο, η επίλυση αυτών των εξισώσεων σε μη τετριμμένες περιπτώσεις μπορεί να είναι απαιτητική από πλευράς υπολογιστικών πόρων και χρόνου.

Η CFD χωρίζεται συνήθως σε τρεις βασικές φάσεις:

**Προεπεξεργασία (Preprocessing):** Σε αυτήν τη φάση, ο χρήστης προετοιμάζει τη γεωμετρία του προβλήματος, ορίζει τις συνθήκες συνοριακών στρωμάτων και επιλέγει τον τύπο της ανάλυσης που θα πραγματοποιηθεί.

**Επίλυση (Solution):** Σε αυτό το στάδιο, οι αριθμητικές μέθοδοι επιλύουν τις εξισώσεις Navier-Stokes και υπολογίζουν την ροή του ρευστού στο εσωτερικό της γεωμετρίας.

**Μετεπεξεργασία (Postprocessing):** Στην τελευταία φάση, οι αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζονται και αναλύονται. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει την απεικόνιση της ροής με διάφορες μεθόδους, όπως αναπαραστάσεις των διανυσματικών πεδίων της ταχύτητας και της πίεσης.

Η CFD αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο για την πρόβλεψη και τη βελτιστοποίηση της ροής ρευστών και αερίων σε διάφορες εφαρμογές. Από τη μελέτη της αεροδυναμικής ενός αεροσκάφους μέχρι τον σχεδιασμό και την αξιολόγηση αεροσκαφών, οικοδομικών κατασκευών και ανεμογεννητριών, η CFD προσφέρει τη δυνατότητα να εξερευνήσουμε την ροή και να προβλέψουμε τη συμπεριφορά των ρευστών με ακρίβεια και αποτελεσματικότητα.

## 6.4 Βασικές Εξισώσεις Navier-Stokes

Οι εξισώσεις κίνησης, γνωστές ως εξισώσεις Navier-Stokes, έχουν μια ιστορία που απλώνεται για περισσότερο από εκατό χρόνια και χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τη ροή των ρευστών, είτε αυτή είναι συμπίεστη είτε ασυμπίεστη. Ωστόσο, η πολύπλοκη φύση και η μη γραμμική συμπεριφορά αυτών των εξισώσεων δυσκολεύει σημαντικά την αναλυτική τους επίλυση για πρακτικά προβλήματα που απασχολούν τον τομέα, όπως η ροή σε τζετ αεροπλάνων, η ροή γύρω από αεροπλάνα, ελικόπτερα, ανεμογεννήτριες και άλλα. Προβλήματα ροής σε περίπλοκες γεωμετρίες και ειδικές συνθήκες ροής, όπως ασταθείς ή τυρβώδεις ροές, παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον στη βιομηχανία και τον σχεδιασμό, αλλά μπορούν να αντιμετωπιστούν μόνο μέσω αριθμητικών λύσεων. Γενικά γνωστό και αποδεκτό είναι ότι οι εξισώσεις κίνησης Navier-Stokes περιγράφουν όλες τις πιθανές

καταστάσεις ροής, από απλές ως πολύπλοκες. Παρά την αναγνώριση αυτού του γεγονότος, η αναλυτική επίλυση τους παραμένει αδύνατη σε πολλές πρακτικές περιπτώσεις. Αυτό οδήγησε στη χρήση απλοποιημένων μορφών εξισώσεων ροής, όπως οι εξισώσεις Euler, το οριακό στρώμα και οι εξισώσεις του δυναμικού πεδίου. Ακόμη και αυτές οι απλοποιημένες εξισώσεις είναι δύσκολο να επιλυθούν αναλυτικά σε πολλές πρακτικές περιπτώσεις.

Οι νόμοι διατήρησης παίζουν κεντρικό ρόλο στην μηχανική των συνεχών μέσων και εκφράζουν την διατήρηση ποσοτήτων όπως η μάζα ενέργεια και ορμή που περιέχονται σε ένα όγκο ελέγχου. Η γενική μορφή του νόμου διατήρησης είναι:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \nabla \cdot F(q) = S \quad (6.1)$$

Όπου είναι η ανά μονάδα όγκου διατηρούμενη ποσότητα,  $F$  είναι το διάνυσμα ροής αυτής της ποσότητας και εκφράζει την ανταλλαγή της με το περιβάλλον και  $S$  είναι ένας όρος παραγωγής. Οι βασικές εξισώσεις Navier-Stokes για μια συμπιεστή ροή ρευστού σε διανυσματική μορφή και σε τρεις διαστάσεις είναι:

Εξίσωση Διατήρησης της Μάζας (Εξίσωση Συνέχειας)::

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (6.2)$$

Εξίσωση Διατήρησης της Ορμής:

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \otimes \mathbf{u} + p \mathbf{I}) = \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{g} \quad (6.3)$$

Εξίσωση Διατήρησης της Ενέργειας:

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \nabla \cdot ((e + p) \mathbf{u}) = \kappa \nabla^2 T + Q \quad (6.4)$$

όπου  $e$  είναι η εσωτερική ενέργεια ανά μονάδα όγκου,  $\kappa$  είναι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας,  $T$  είναι η θερμοκρασία και  $Q$  είναι μια πηγή ή απορρόφηση ενέργειας. Οι εξισώσεις Navier-Stokes αποτελούν τη βάση για τη μοντελοποίηση και την ανάλυση της ροής σε διάφορες εφαρμογές, επιτρέποντας την εξαγωγή πολύτιμων πληροφοριών για τη συμπεριφορά των ρευστών και την βελτιστοποίηση του σχεδιασμού.

## 6.5 Αριθμητική Επίλυση Εξισώσεων Ροής

Η αριθμητική επίλυση των εξισώσεων ροής είναι ο κεντρικός πυλώνας της υπολογιστικής δυναμικής υγρών και αερίων (CFD). Εφαρμόζοντας διάφορες αριθμητικές μεθόδους, οι εξισώσεις Navier-Stokes μετατρέπονται σε διακριτές εξισώσεις που μπορούν να επιλυθούν σε υπολογιστικό περιβάλλον. Η αριθμητική επίλυση επιτρέπει την προσομοίωση και τον υπολογισμό της ροής σε ποικίλα φυσικά προβλήματα.

Υπάρχουν διάφορες αριθμητικές μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται για την επίλυση των εξισώσεων ροής:

Μέθοδος Ροής Πεπερασμένου Όγκου (Finite Volume Method - FVM): Σε αυτήν τη μέθοδο, ο χώρος διαιρείται σε μικρά υποσύνολα, γνωστά ως κύτταρα ή όγκοι. Οι εξισώσεις Navier-Stokes παραμετροποιούνται σε αυτά τα κύτταρα, και η ροή του ρευστού αξιολογείται στις επιφάνειες των κελιών.

Η μέθοδος πεπερασμένων όγκων είναι μια αριθμητική μέθοδος για την επίλυση μερικών διαφορικών εξισώσεων που υπολογίζει τις τιμές των διατηρητικών μεταβλητών που έχουν αποτελέσει μέσο όρο σε όγκους<sup>[13]</sup> <sup>[14]</sup> <sup>[15]</sup>. Συγκεκριμένα, η μέθοδος πεπερασμένων όγκων χρησιμοποιεί μια διαμόρφωση ολοκλήρωσης όγκου του προβλήματος με ένα πεπερασμένο σύνολο όγκων για να διακρίνει τις εξισώσεις<sup>[14]</sup>. Οι εξισώσεις Navier-Stokes, για παράδειγμα, μπορούν να απεικονίζονται και να αξιολογούνται ως αλγεβρικές εξισώσεις<sup>[13]</sup>.

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της μεθόδου πεπερασμένων όγκων συγκριτικά με τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών είναι ότι δεν απαιτεί δομημένο πλέγμα (παρόλο που ένα δομημένο πλέγμα μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί)<sup>[15]</sup>.

Κατά την αριθμητική επίλυση, οι διακριτοποιημένες εξισώσεις Navier-Stokes αντιμετωπίζονται μέσω μεθόδων που χρησιμοποιούν την πληροφορία της κίνησης, της πίεσης και των άλλων μεγεθών της ροής σε κάθε στοιχείο ή υπολογιστικό κελί. Οι αριθμητικές αυτές μέθοδοι είναι επικεντρωμένες στον υπολογισμό των τιμών των μεγεθών της ροής σε διακριτά σημεία του χώρου και του χρόνου.

Η αριθμητική επίλυση εξισώσεων ροής απαιτεί τη χρήση πολυπλοκότερων αλγορίθμων και υπολογισμών, καθώς και την εξασφάλιση αρκετών υπολογιστικών πόρων. Παρόλα αυτά, η αριθμητική CFD παρέχει τη δυνατότητα να προσεγγίσουμε τη συμπεριφορά της ροής σε πραγματικά προβλήματα και να αποκτήσουμε σημαντική κατανόηση για τη φυσική δυναμική των ρευστών και αερίων.

## **6.6 Μοντελοποίηση Ροών και Συνθήκες Συνοριακών Στρωμάτων**

Η μοντελοποίηση των ροών και η καθορισμένη διαχείριση των συνθηκών συνοριακών στρωμάτων (ή συνοριακών συνθηκών) είναι κρίσιμα στοιχεία της αριθμητικής επίλυσης σε υπολογιστική δυναμική ρευστών και αερίων (CFD). Η ακριβής περιγραφή της ροής και η αντιμετώπιση των συνθηκών στα όρια έχουν σημαντική επίδραση στην αξιοπιστία και την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

### **Μοντελοποίηση Ροών:**

Η μοντελοποίηση των ροών αναφέρεται στον τρόπο που εκφράζονται οι εξισώσεις Navier-Stokes, λαμβάνοντας υπόψη διάφορες παραδοχές και απλοποιήσεις. Ανάλογα με τον τύπο της ροής, επιλέγονται κατάλληλα μοντέλα για την ιξώδη, την ταραχώδη ροή, τις αλληλεπιδράσεις φάσεων και άλλες παράμετροι. Η επιλογή του σωστού μοντέλου είναι ζωτικής σημασίας για την επίτευξη ακρίβειας και αξιοπιστίας στα αποτελέσματα.

### **Συνθήκες Συνοριακών Στρωμάτων:**

Οι συνθήκες συνοριακών στρωμάτων αναφέρονται στις συνθήκες που καθορίζουν τη ροή στα όρια της χωροχρονικής περιοχής που μελετάται. Αυτές οι συνθήκες περιλαμβάνουν τις αρχικές συνθήκες για την αρχική κατάσταση του ρευστού, καθώς και τις συνθήκες συνοριακών στρωμάτων στις εξωτερικές επιφάνειες της γεωμετρίας. Οι συνθήκες αυτές μπορεί να περιλαμβάνουν τιμές ταχύτητας, πίεσης, θερμοκρασίας και άλλων μεταβλητών. Για τις εξωτερικές συνθήκες συνοριακών στρωμάτων, χρησιμοποιούνται συνήθως οι εξής τύποι:

**Συνθήκες Εισόδου:** Παρέχουν τις αρχικές τιμές των μεταβλητών στο εσωτερικό της περιοχής.

**Συνθήκες Εξόδου:** Περιγράφουν τη ροή έξω από τη γεωμετρία και μπορεί να απαιτείται η προσέγγιση της ροής στις εξωτερικές περιοχές.

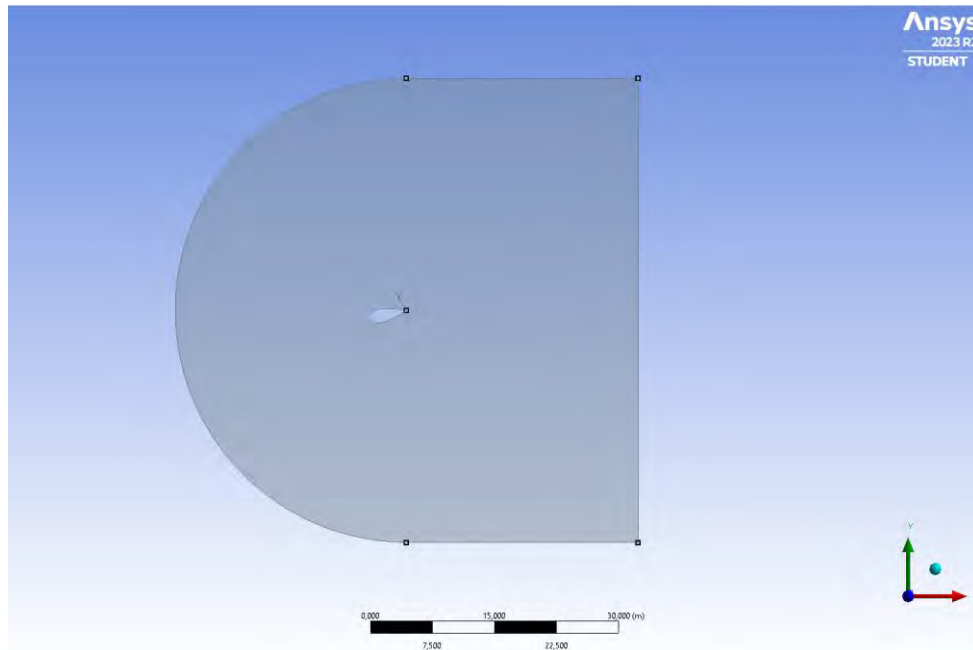
**Συνθήκες Τοίχου:** Περιγράφουν την αλληλεπίδραση με τις επιφάνειες των τοίχων. Οι συνθήκες αυτές περιλαμβάνουν συνθήκες λείας τοίχου, τοίχου με προσκλίσεις (κλίση της ταχύτητας) και άλλες.

**Συνθήκες Συμμετρίας/Αντισυμμετρίας:** Χρησιμοποιούνται για τις αντίστοιχες γεωμετρίες που είναι συμμετρικές ή αντισυμμετρικές.

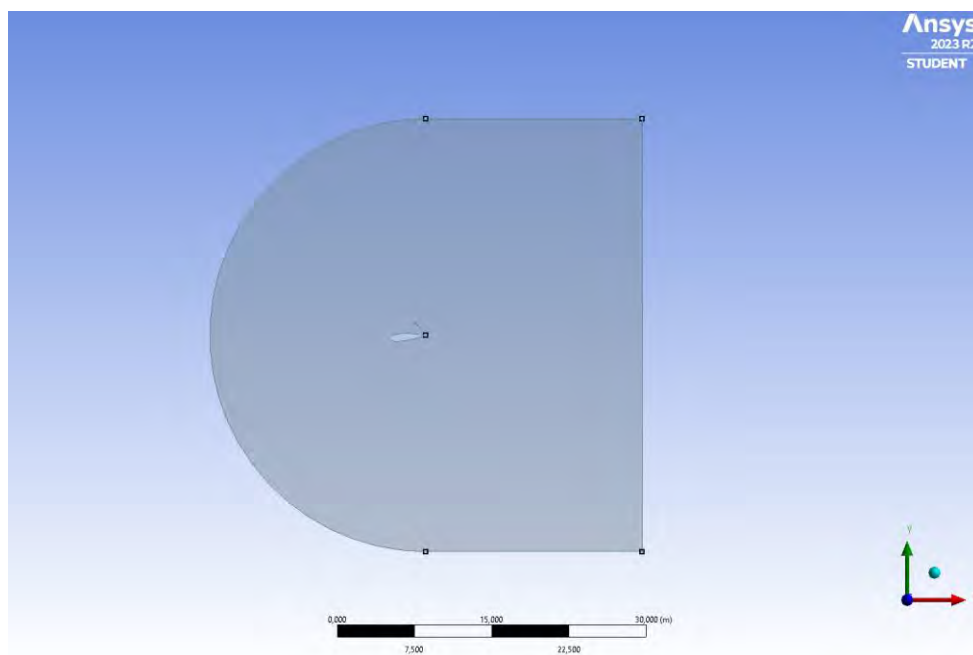
Η ορθή επιλογή και μοντελοποίηση των συνθηκών συνοριακών στρωμάτων είναι ουσιαστική για την αξιοπιστία των αριθμητικών αποτελεσμάτων και την αναπαράσταση της φυσικής συμπεριφοράς της ροής.

## **6.7 Μοντέλο Fluent**

Για το σκοπό της παρούσας εργασίας, η σύγκριση των δύο μεθόδων που έχουν αναφερθεί θα γίνει σε δύο τύπους αεροδυναμικού προφίλ. Επιλέχθηκαν δύο προφίλ. Προκύπτει ένα προφίλ για την βάση της πτέρυγας, στην μέση και στην κορυφή. Η επιλογή των προφίλ έγινε με βάση την γεωμετρία τους. Το ένα από τα δύο προφίλ είναι πιο συμμετρικό ενώ το δεύτερο παρουσιάζει μεγαλύτερη καμπύλη στο από κάτω μέρος του πτερυγίου. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του προφίλ έχουν αντληθεί από προηγούμενες μελέτες και εργαλείο το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των χαρακτηριστικών είναι το QBlade. Στην συνέχεια παρουσιάζονται εικόνες από το Design modeler, αλλά και από τα επόμενα βήματα της επίλυσης του προβλήματος <sup>[17]</sup>.



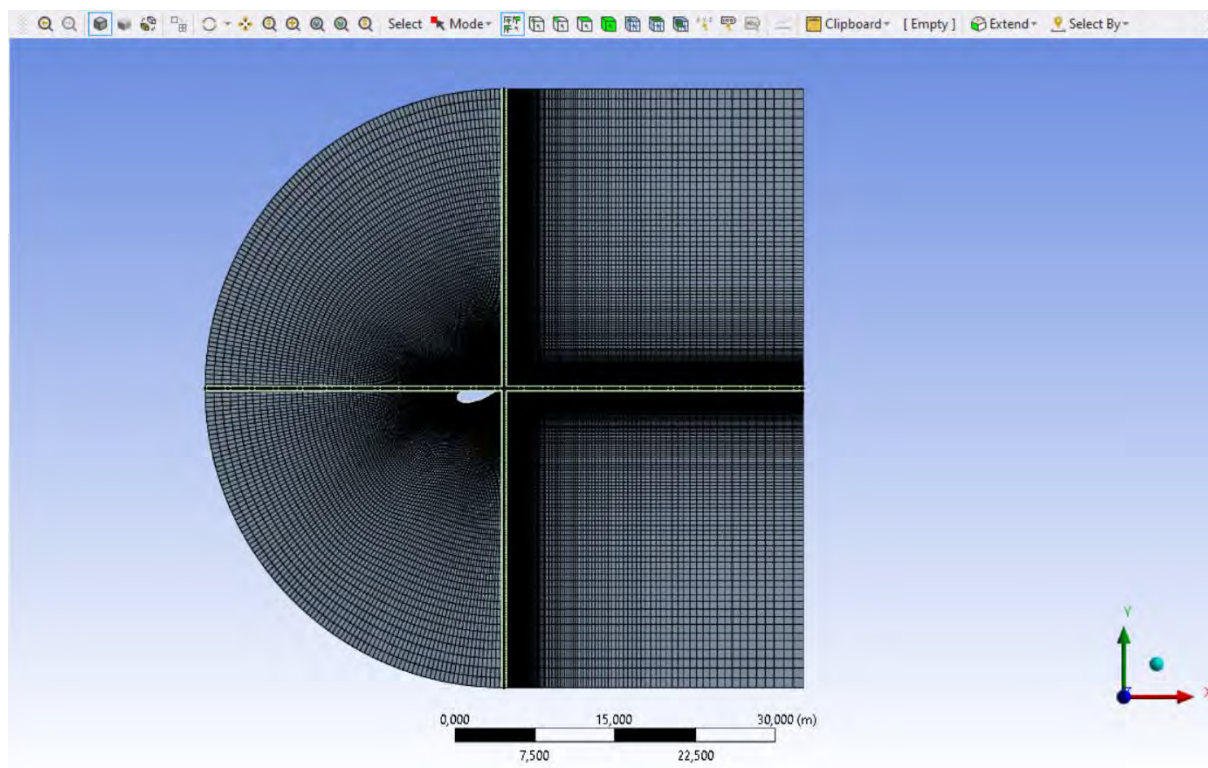
Σχήμα 6.1: Γεωμετρία αεροδυναμικού προφίλ DU35.



Σχήμα 6.2: Γεωμετρία αεροδυναμικού προφίλ DU21.

Επόμενο βήμα είναι η δημιουργία πλέγματος γύρω από τις αεροτομές. Σε όλες τις περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες ρυθμίσεις με σκοπό την ακριβή σύγκριση αλλά και

την μείωση του υπολογιστικού χρόνου. Επομένως η μορφή του πλέγματος θα έχει την μορφή όπως στο Σχήμα 6.3.



Σχήμα 6.3: Πλέγμα γύρω από την αεροτομή

Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις δύο μεθόδους που αναλύθηκαν μέχρι αυτό το σημείο. Θα γίνει παρουσίαση τόσο των αποτελεσμάτων όσο και την δημιουργία του μοντέλου για την επίλυση.

Οι οριακές συνθήκες είναι ίδιες και για τις δύο αεροτομές καθώς είναι στόχος ή άμεση σύγκριση στις ίδιες συνθήκες. Η μόνη διαφορά είναι ή γωνία πρόσπτωσης καθώς θεωρητικά, ή κάθε αεροτομή βρίσκεται σε διαφορετική ακτίνα της συνολικής πτέρυγας, με αποτέλεσμα να έχουν διαφορετική γωνία στρέψης και άρα και διαφορετική γωνία με την οποία συγκρούονται με τον άνεμο.

## Κεφάλαιο 7. Αποτελέσματα – Συμπεράσματα

---

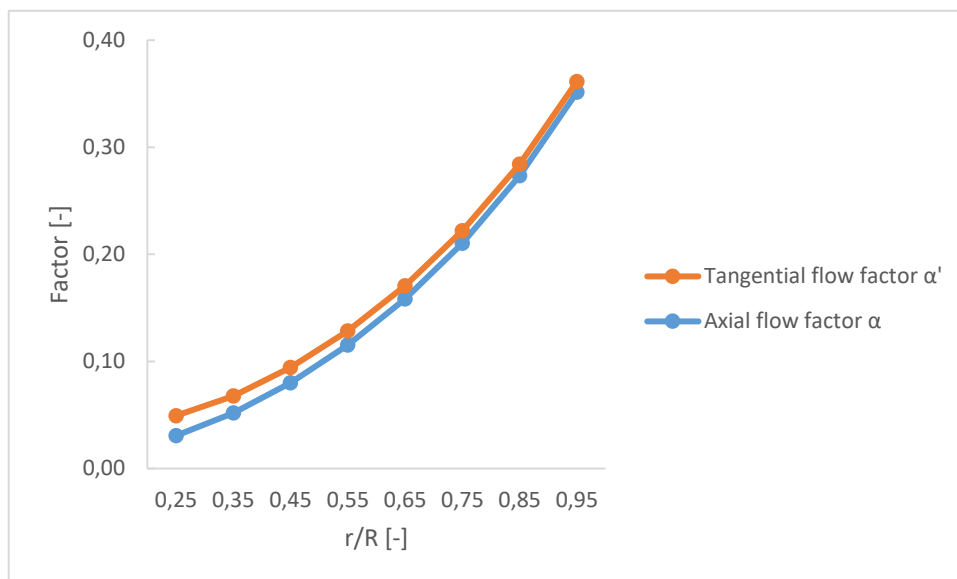
### 7.1 Αποτελέσματα BEM Theory

Πριν γίνει η σύγκριση μεταξύ των δύο μεθόδων που παρουσιάστηκαν στην παρούσα διπλωματική, θα δούμε αναλυτικά τα αποτελέσματα και των δύο μεθόδων. Οι συνθήκες που εφαρμόζονται στην BEM Theory είναι η εξής:

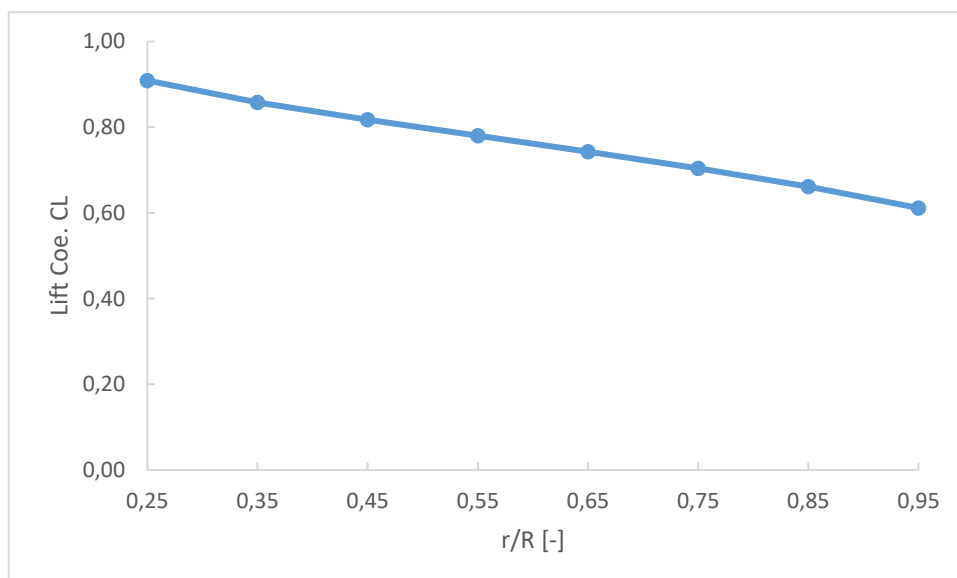
Πίνακας 7.1: Οι υπό εφαρμογή συνθήκες

|                       |                        |
|-----------------------|------------------------|
| Diameter:             | 30 m                   |
| Tip speed ratio J:    | 5,0                    |
| Chord l:              | 10,24 m                |
| Blade number Z:       | 3                      |
| Wind speed $c_{x1}$ : | 7,50 m/sec             |
| Air density $\rho$ :  | 1,20 kg/m <sup>3</sup> |
| Lift coefficient CL:  | 0,8                    |
| Angle $\alpha$ :      | 8 °                    |

Οι εξισώσεις που αποτελούν την BEM Theory θα λυθούν με την μέθοδο της σύγκλισης ως προς τον αξονικό συντελεστή  $\bar{a}$ . Η σύγκλιση του συντελεστή κατά την διάρκεια των επαναλήψεων παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.1. Στο Σχήμα 7.2 φαίνεται πως διαμορφώνεται ο συντελεστής άντωσης CL κατά το μήκος της πτέρυγας.

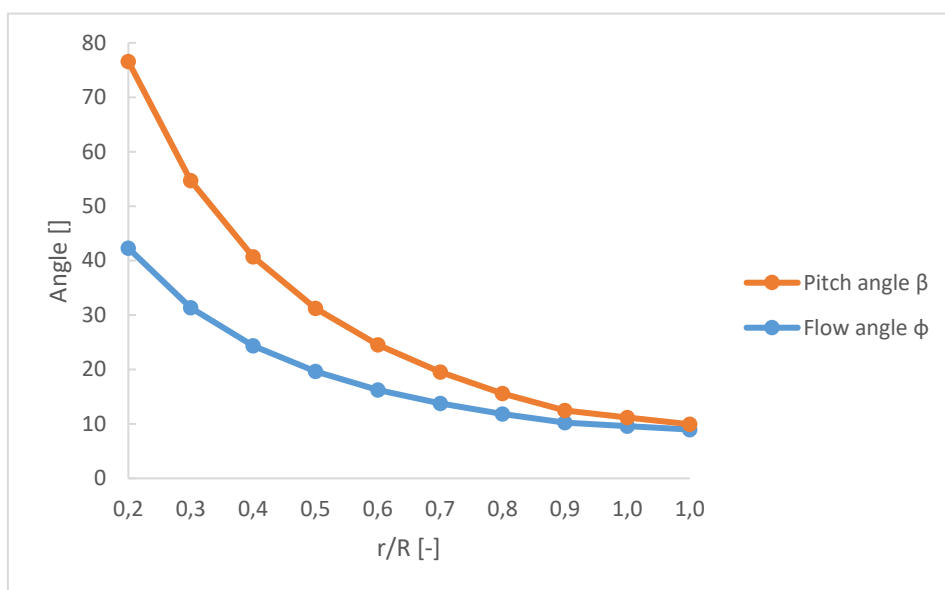


Σχήμα 7.1: Ρυθμός μεταβολής των αξονικών συντελεστών συναρτήσει του λόγου  $r/R$ .

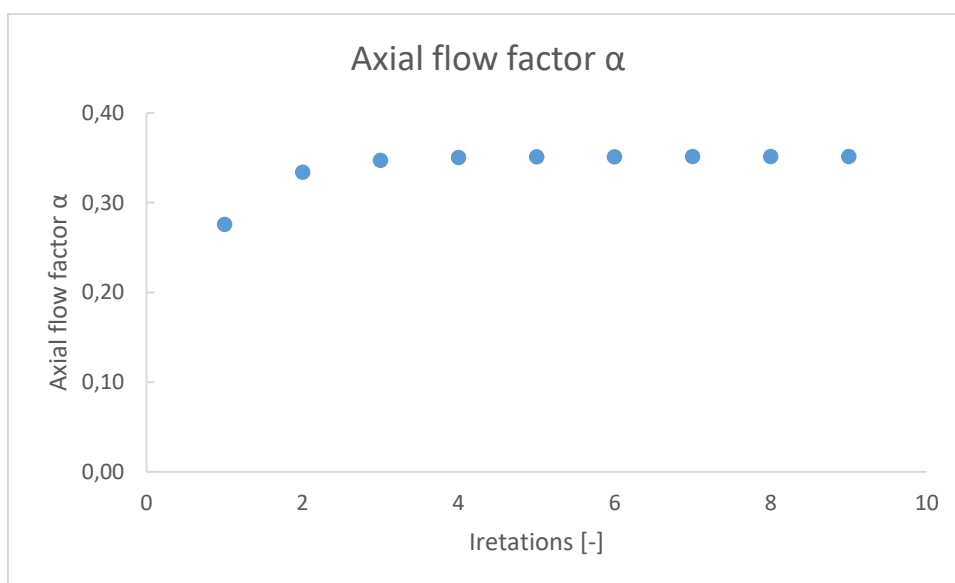


Σχήμα 7.2: Ρυθμός μεταβολής του συντελεστή άντωσης  $CL$  συναρτήσει του λόγου  $r/R$ .

Στο Σχήμα 7.3 παρατηρείται η μείωση της γωνίας εισροής αλλά και την διαφοροποίηση της γωνίας συστροφής της πτέρυγας, Σχήμα 7.4 . Το γεγονός ότι η γραμμή της γεωμετρικής γωνίας συστροφής της πτέρυγας είναι περίπου παράλληλη με την γωνία εισροής έχει ως αποτέλεσμα μια σχεδόν σταθερή γωνία προσβολής (angle of attack). Αυτό εξηγεί απευθείας τον σκοπό της περιστροφής, καθώς η περιστροφή επιτρέπει στην συγκεκριμένη διατομή στην συγκεκριμένη θέση να λειτουργεί στην βέλτιστη γωνία πρόσπτωσης σε κάθε τμήμα της .

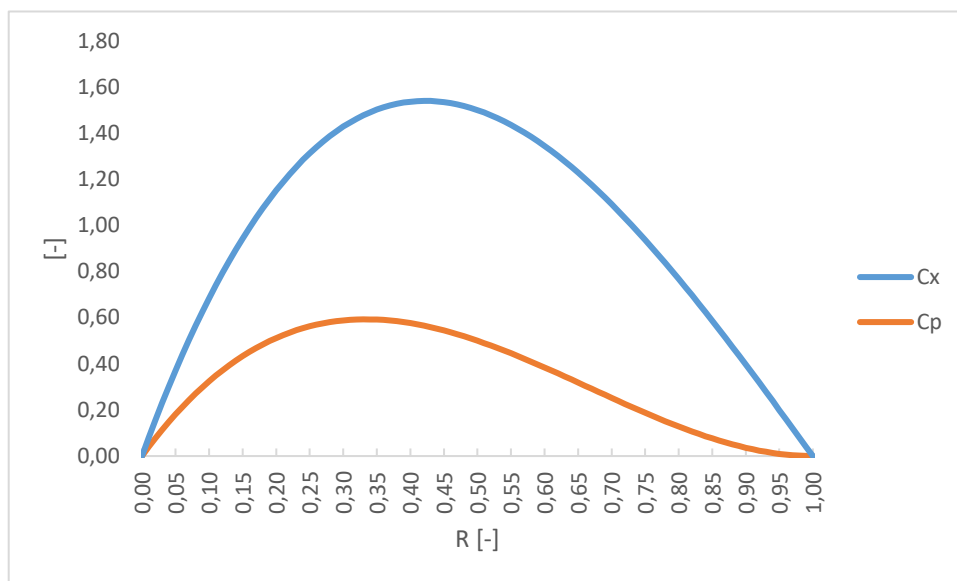


Σχήμα 7.3: Ρυθμός μεταβολής των γωνιών  $\beta$  και  $\phi$  συναρτήσει του λόγου  $r/R$ .



Σχήμα 7.4: Αξονικός συντελεστής επαγωγής συναρτήσει των επαναλήψεων.

Για να αξιολογηθεί σωστά μία πτέρυγα ανεμογεννήτριας απαιτείται ο συντελεστής παραγόμενης ισχύος. Ο συντελεστής ισχύος που φαίνεται στο Σχήμα 7.5 μπορεί να ερμηνευτεί ως μέτρο αποδοτικότητας. Το γεγονός ότι η καμπύλη μειώνεται προς την άκρη δεν σημαίνει απευθείας ότι η ισχύς μειώνεται, αλλά ότι ο λόγος μεταξύ της παραγόμενης ισχύς και της διαθέσιμης ισχύος μειώνεται καθώς πλησιάζουμε στην άκρη.



Σχήμα 7.5: Μεταβολή του  $C_p$  και  $C_x$  συναρτήσει της ακτίνας

Ο συνολικός συντελεστής ισχύος εμφανίζεται στον πίνακα 6.1, καθώς και η συνολική ώθηση, ροπή και ισχύς.

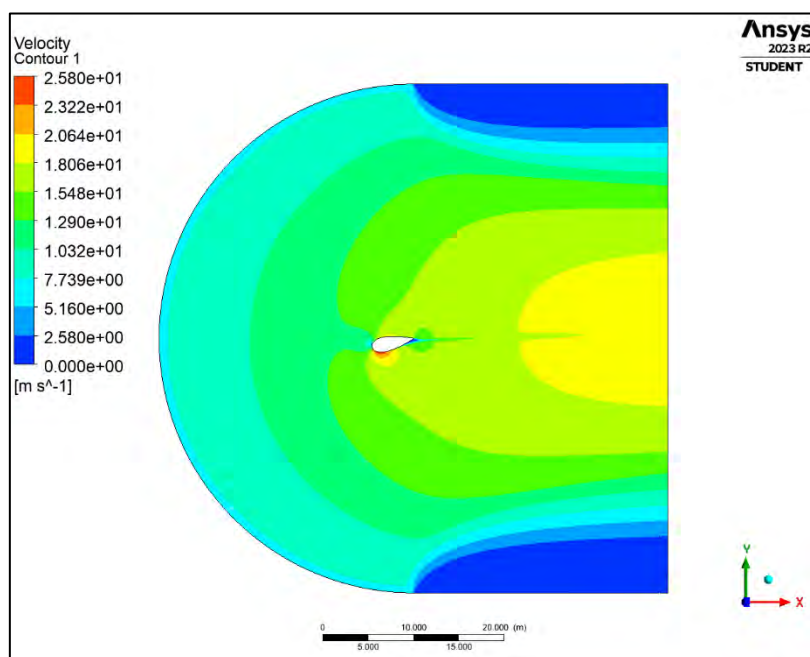
Πίνακας 7.2: Αποτελέσματα BEM Theory

|                   |            |
|-------------------|------------|
| Thrust            | 9278 [N]   |
| Torque            | 21568 [Nm] |
| Power             | 53919 [kW] |
| Power Coefficient | 0.30       |

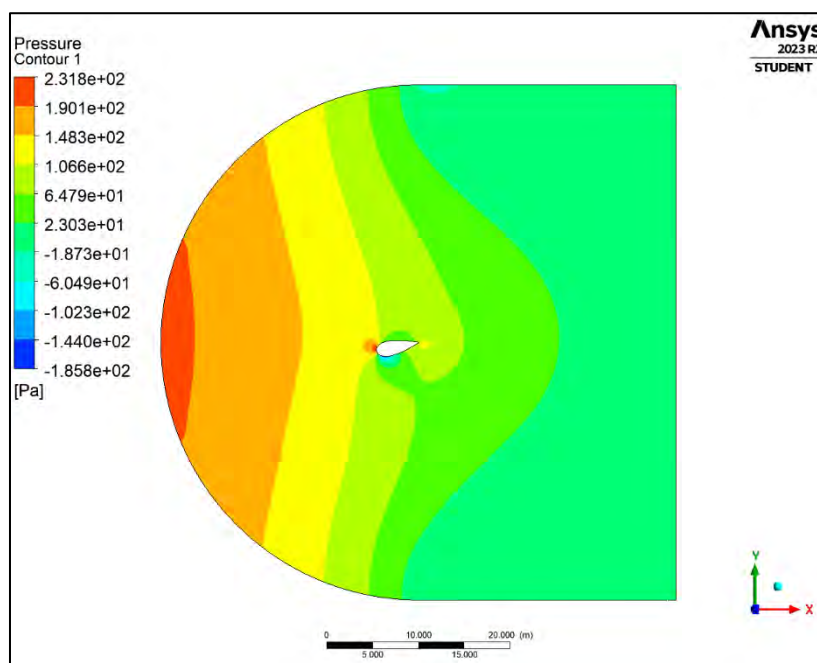
## 7.2 Αποτελέσματα CFD

Ο στόχος των προσομοιώσεων CFD είναι να ληφθούν αεροδυναμικά δεδομένα για τα προφίλ των πτερύγων που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο BEM. Για το πλέγμα που περιεγράφηκε στο αντίστοιχο κεφάλαιο, διενεργούνται σταθερές προσομοιώσεις για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης. Οι γωνίες πρόσπτωσης που αξιολογούνται κυμαίνονται από -8 έως 10 μοίρες με βήμα ένα. Αυτό δεν καλύπτει το σύνολο του πεδίου ενδιαφέροντος για εφαρμογές στην αιολική ενέργεια, καθώς για μεγαλύτερη ακρίβεια το εύρος της διερεύνησης θα έπρεπε να ήταν από -8 έως 20 με πολύ μικρό βήμα με σκοπό την μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα. Ο λόγος που επιλέχθηκε το συγκεκριμένο εύρος, είναι η οικονομία υπολογιστικού χρόνου και η αντιστοιχία στις δυνατότητες των υπολογιστικών μας συστημάτων. Έτσι δημιουργείται μία πρόταση για μία ακριβέστερη και πιο χρονοβόρα διερεύνηση στο μέλλον.

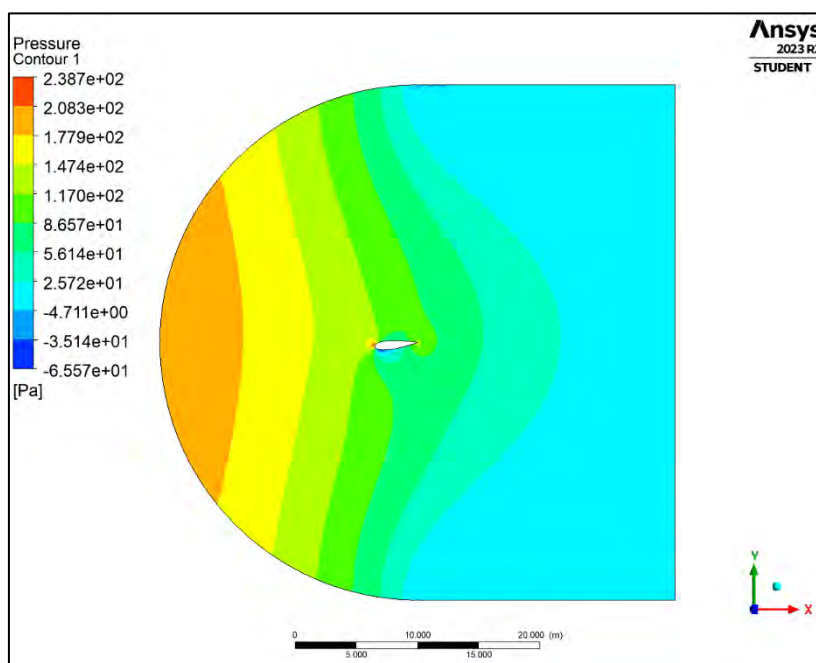
Με την χρήση του Results στο Ansys, αποτυπώνονται τα υπολογιστικά αποτελέσματα σε εικόνες και διαγράμματα. Στις εικόνες παρακάτω, φαίνεται η κατανομή της πίεσης και της ταχύτητας γύρω από την πτέρυγα μέσα στον υπολογιστικό χώρο. Λόγω του σχετικά αραιού πλέγματος τα αποτελέσματα δεν είναι τόσο λεπτομερή. Άλλη μία πρόταση για το μελλοντική μελέτη, είναι η δημιουργία βέλτιστου πλέγματος, πυκνότερου και με διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά.



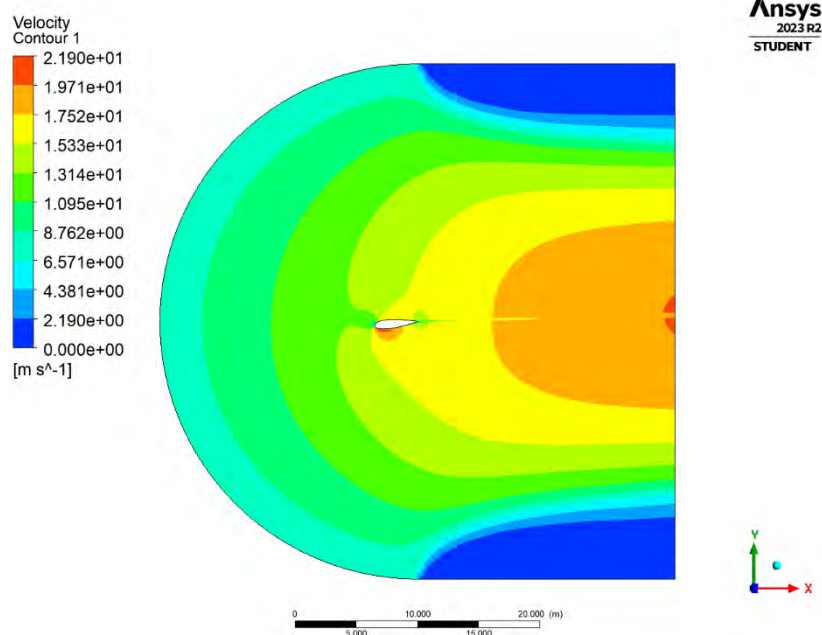
Σχήμα 7.6: Κατανομή της ταχύτητας γύρω από την αεροτομή DU35.



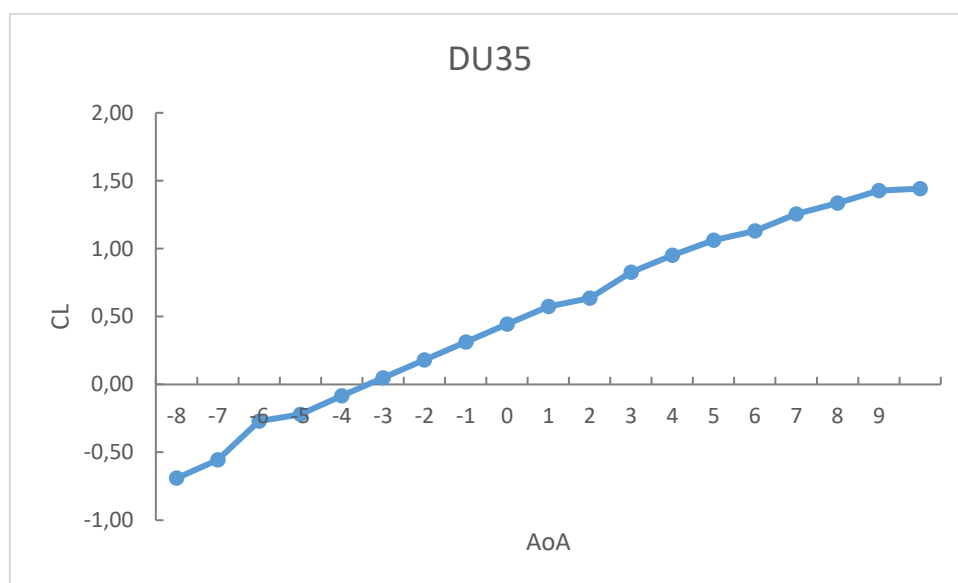
Σχήμα 7.7: Κατανομή της πίεσης γύρω από την αεροτομή DU35.



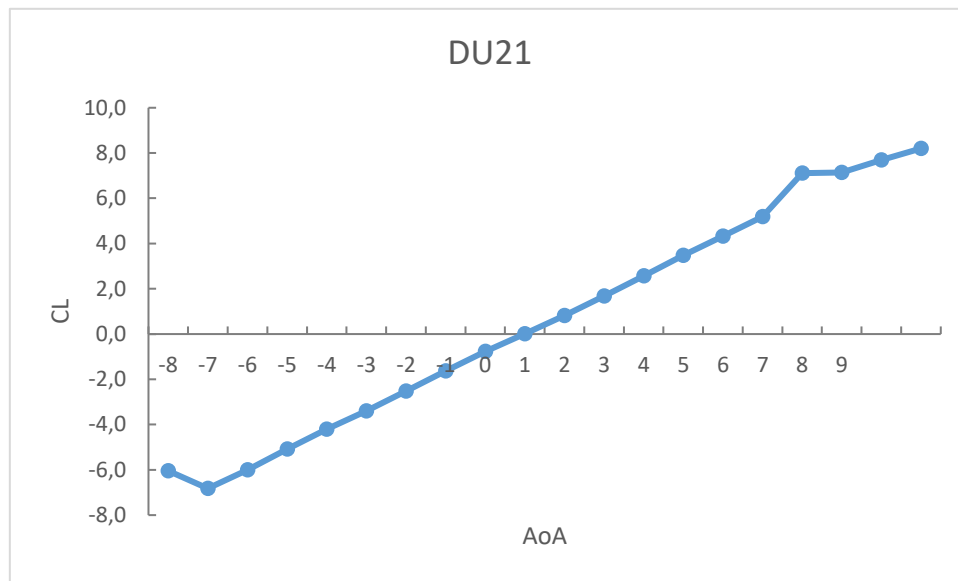
Σχήμα 7.8: Κατανομή της πίεσης γύρω από την αεροτομή DU21.



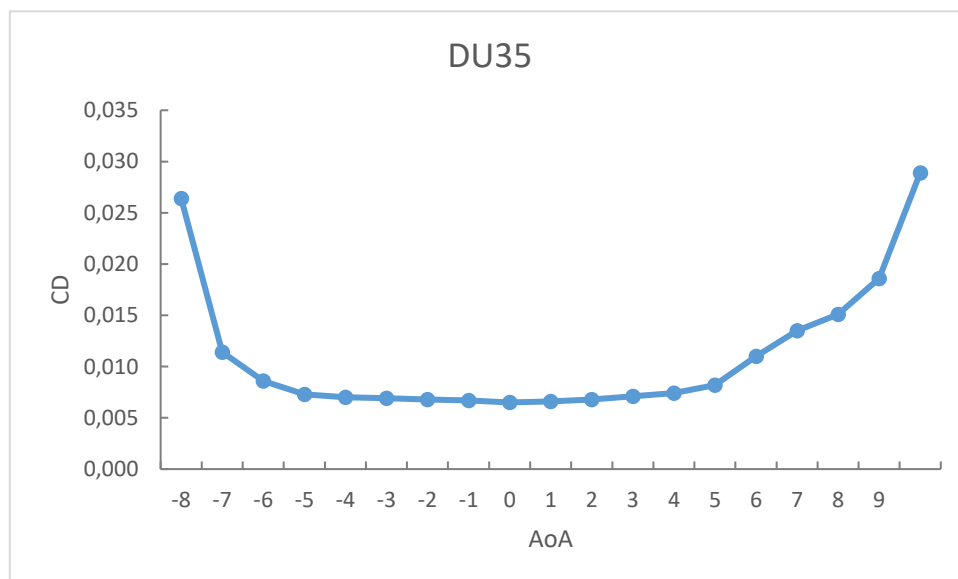
Σχήμα 7.9: Κατανομή της ταχύτητας γύρω από την αεροτομή DU21.



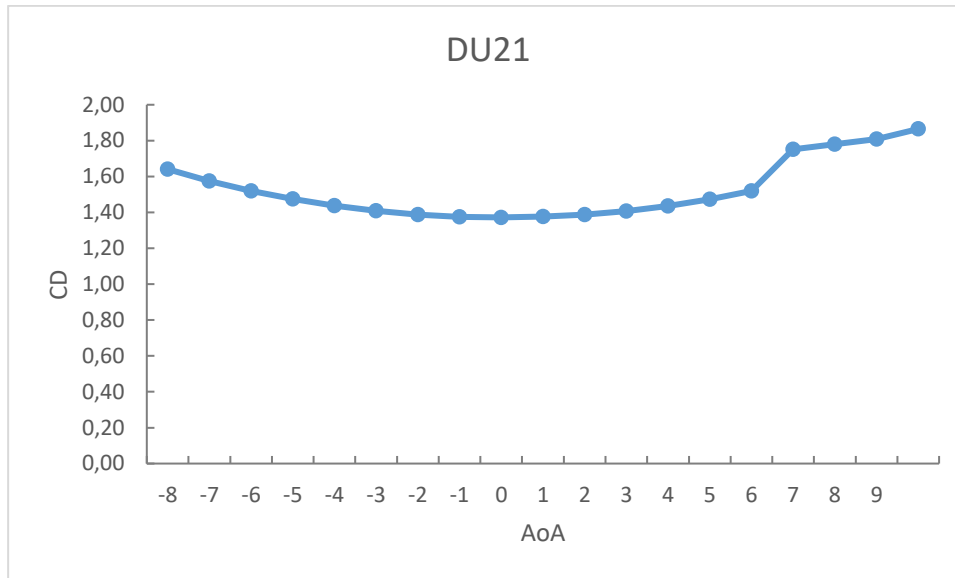
Σχήμα 7.10: Μεταβολή του συντελεστή άντωσης ανάλογα με την γωνία πρόσπτωσης στην αεροτομή DU35.



Σχήμα 7.11: Μεταβολή του συντελεστή άντωσης ανάλογα με την γωνία πρόσπτωσης στην αεροτομή DU21.



Σχήμα 7.12: Μεταβολή του συντελεστή οπισθέλκουσας ανάλογα με την γωνία πρόσπτωσης στην αεροτομή DU35.



Σχήμα 7.13: Μεταβολή του συντελεστή οπισθέλκουσας ανάλογα με την γωνία πρόσπτωσης στην αεροτομή DU21.

### 7.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Όπως παρουσιάστηκε μέχρι στιγμής, σύγκριση μεταξύ της Θεωρίας BEM (Boundary Element Method) και της Υπολογιστικής Δυναμικής Ρευστών (CFD - Computational Fluid Dynamics), δεν είναι ένα απλό ζήτημα, αλλά κάτι πολύπλοκο και κάτι το οποίο εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες. Καθένα από αυτά τα μοντέλα έχει τα πλεονεκτήματά του αλλά και τις αδυναμίες του, και η επιλογή του ποιο μοντέλο να χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από τον σκοπό της μελέτης και τη διαθεσιμότητα των δεδομένων.

Η Θεωρία BEM βασίζεται στην ιδέα ότι μπορεί να προσομοιώσει την αλληλεπίδραση ανέμου και πτέρυγας χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των συνόρων. Προσφέρει αξιόπιστα αποτελέσματα για συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας ανεμογεννητριών, αλλά δεν λαμβάνει υπόψη τρισδιάστατα φαινόμενα και μπορεί να είναι περιορισμένη στον υπολογισμό της συμπεριφοράς του ανέμου σε όλη την περιοχή της ανεμογεννήτριας. Από την άλλη πλευρά, η CFD χρησιμοποιεί προχωρημένες μαθηματικές μεθόδους για να μοντελοποιήσει τη ροή του αέρα γύρω από την ανεμογεννήτρια σε τρεις διαστάσεις. Αυτό το μοντέλο είναι πιο ακριβές και μπορεί να λάβει υπόψη πολύπλοκες φαινομενικές συνθήκες. Ωστόσο, απαιτεί περισσότερους υπολογιστικούς πόρους και χρόνο.

Δυστυχώς δεν έγινε εφικτό στην παρούσα διπλωματική εργασία να γίνει μία οριζόντια σύγκριση σε όλα τα μεγέθη που χαρακτηρίζουν ένα τέτοιο πρόβλημα.

Όπως παρατηρείται από τα διαγράμματα των προηγούμενων σελίδων, υπάρχει μία μεγάλη διαφορά τόσο στις τιμές του συντελεστή άντωσης όσο και της οπισθέλκουσας, μεταξύ των δύο αεροτομών. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία στις αεροτομές που χρησιμοποιούνται σε μεγάλες ανεμογεννήτριες παρατηρούνται μεγάλες τιμές συντελεστών χωρίς να υπάρχει κάποια συγκεκριμένη πειραματική απόδειξη. Επίσης είναι αδύνατη η σύγκριση αυτών των τιμών με πειραματικά δεδομένα καθώς για τα συγκεκριμένα αεροδυναμικά προφίλ δεν είναι εύκολο να βρεθούν ελευθέρα στο διαδίκτυο.

Το μόνο μέγεθος που μπορεί να γίνει μία σύγκριση η αξονική δύναμη δηλαδή που παράγεται από το συγκεκριμένο προφίλ. Σύμφωνα με την Θεωρία BEM η αξονική δύναμη που υπολογίστηκε είναι ίση με 17.567 Nm ενώ η ροπή που υπολογίστηκε μέσω του υπολογιστικών μεθόδων είναι ίση με 14.081 Nm. Θεωρητικά η μέθοδος με CFD παρέχει υψηλότερη ακρίβεια ως προς τη μοντελοποίηση της ροής του αέρα, καθώς λαμβάνει υπόψη πολύπλοκες τρισδιάστατες αλληλεπιδράσεις και είναι σε θέση να εξετάσει λεπτομέρειες που η μέθοδος BEM δεν μπορεί να ανιχνεύσει. Δυστυχώς για το συγκεκριμένο προφίλ πτέρυγας δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα από πειραματικές μεθόδους για να μπορέσει να γίνει μία ολοκληρωμένη σύγκριση, με στόχο να αναδειχθεί η μέθοδος με την μεγαλύτερη ακρίβεια.

Σημασία έχει να γίνει μία σύγκριση αναφορικά με τον απαιτούμενο χρόνο για την επίλυση τέτοιων προβλημάτων μεταξύ των δύο μεθόδων. Ο απαιτούμενος χρόνος με την μέθοδο BEM είναι αρκετά σύντομος, καθώς αν γνωρίζει κάποιος τις εξισώσεις που απαιτούνται αλλά και να γνωρίζει τα δεδομένα του προβλήματος του, είναι απλή η διαδικασία του στησίματος ενός μοντέλου με επαναλήψεις σε κατάλληλο λογισμικό. Αντίθετα η αντιμετώπιση του ίδιου προβλήματος με την μέθοδο CFD απαιτεί πολύ περισσότερο χρόνο για διάφορους λόγους. Αρχικά απαιτείται ο χρήστης να γνωρίζει αρκετά πράγματα γύρω από την συγκεκριμένη μέθοδο και σε πολλές φορές να έχει ένα σημαντικό επίπεδο γνώσεων προγραμματισμού. Επίσης για την χρήση αυτής της μεθόδου απαιτείται πολλές φορές μεγάλη υπολογιστική ισχύς, κάτι το οποίο σημαίνει ότι ανεβαίνει και το υπολογιστικό κόστος πέρα από τον χρόνο. Σημαντική διαφορά είναι και το περιβάλλον της επίλυσης, καθώς στην μέθοδο CFD χρειάζονται εξειδικευμένα λογισμικά τα οποία πολλές φορές έχουν τεράστιο κόστος με αποτέλεσμα να καθιστούν την απόκτηση τους αδύνατη.

Αντίθετα, η μέθοδος BEM μπορεί να πραγματοποιηθεί σε λογισμικά τα οποία είναι ελεύθερα ή με σχετικά μικρό κόστος αλλά και λογισμικά που είναι γνωστά στο ευρύ κοινό.

Εδώ είναι μία επιπλέον πρόταση για μελλοντική μελέτη. Θα ήταν εφικτό η κατασκευή ενός πραγματικού μοντέλου αυτής της αεροτομής και να εξετασθεί σε μία αεροσύραγγα για ορισμένες συνθήκες. Έτσι ο μελετητής θα έχει στην διάθεση του περισσότερα δεδομένα για να συγκρίνει τα αποτελέσματα του αλλά και για ολοκλήρωση ένα ορθότερο υπολογιστικό μοντέλο σε λογισμικό.

Συνοψίζοντας, η μέθοδος BEM είναι πιο απλή και γρήγορη, κατάλληλη για γρήγορους υπολογισμούς σε συγκεκριμένες συνθήκες, ενώ η μέθοδος CFD προσφέρει υψηλή ακρίβεια αλλά απαιτεί περισσότερο υπολογιστικό κόστος και χρόνο. Η επιλογή μεταξύ τους εξαρτάται από την συγκεκριμένη μελέτη και τους διαθέσιμους πόρους.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

- [1] Stefan Emeis (2013) Wind Energy Meteorology, Atmospheric Physics for Wind Power Generation, *Green Energy and Technology*, 3-4. ISBN 978-3-642-30522-1
- [2] Wei Tong (2010) Wind Power Generation and Wind Turbine Design. *WIT Transactions on State-of-the-art in Science and Engineering*, 4-6.
- [3] DNV and Risø. (2002) Guidelines for Design of Wind Turbines 2<sup>nd</sup> Edition, ISBN 87-550-2870-5.
- [4] C. E. Mebunii, January 2022, 17 Wind Turbine Components and Their Functions Explained, [www.felsics.com](http://www.felsics.com) (Πρόσβαση 25/04/2023)
- [5] Joyce Lee, Feng Zhao (2022) GWEC GLOBAL WIND REPORT 2022, *Global Wind Energy Council*
- [6] International Standard IEC 64100-1 Third Edition (2005-08) 6, 26-32.
- [7] Hansen, A. C., Butterfield, C. P., "Aerodynamics of Horizontal-Axis Wind Turbines", *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol.25, 1993
- [8] Anderson, J., 2011. Fundamentals of aerodynamics. Boston: McGraw-Hill.
- [9] The Truth About "Induced Drag". [image] Available at: <https://www.perfectedflight.com/the-truth-about-induced-drag/>
- [10] Saffman, P., 1995. Vortex dynamics. New York: Cambridge University Press.
- [11] Martin O. L., H. (no date) Aerodynamics of wind turbines. 8–12 Camden High Street London, NW1 0JH, UK.
- [12] Burton, T. (2009) Wind energy handbook. Chichester u.a.: Wiley.
- [13] LeVeque, Randall (2002). Finite Volume Methods for Hyperbolic Problems. ISBN 9780511791253
- [14] FINITE VOLUME METHODS LONG CHEN  
<https://www.math.uci.edu/~chenlong/226/FVM.pdf>. FVM.pdf (uci.edu) (Πρόσβαση 06/05/2023)
- [15] Ranganayakulu, C. (Chennu) (2 February 2018). "Chapter 3, Section 3.1". Compact heat exchangers: analysis, design and optimization using FEM and CFD approach. Seetharamu, K. N. Hoboken, NJ. ISBN 978-1-119-42435-2. OCLC 1006524487
- [16] S. L. Dixon, B. Eng., Ph.D., C. A. Hall, Ph.D., 2014, *Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery, Seventh Edition*, ISBN: 978-0-12-415954-9
- [17] "Finite Volume Methods for Hyperbolic Problems" Συγγραφέας: Randall J. LeVeque