



ΤΜΗΜΑ
ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΠΕΡΑΚΤΙΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ



ΦΟΙΤΗΤΗΣ: ΦΘΕΝΟΣ ΣΤΑΥΡΟΣ (Α.Μ. 19116)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΣΚΟΥΡΑΣ ΕΥΓΕΝΙΟΣ

ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΠΑΤΡΑ 2024

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Αυτή η διπλωματική εργασία, η οποία εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, επικεντρώνεται στην υπολογιστική ρευστοδυναμική ανάλυση των υπεράκτιων ανεμογεννητριών, που αναδύονται ως μια πολλά υποσχόμενη μορφή ανανεώσιμης πηγής ενέργειας. Με την παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύ αιολικής ενέργειας να σημειώνει σημαντική αύξηση τα τελευταία χρόνια, η αιολική ενέργεια γίνεται όλο και πιο ελκυστική.

Αρχικά, η εργασία διερευνά τις γενικές αρχές και την εξέλιξη των ανεμογεννητριών στην παγκόσμια αγορά ενέργειας. Ακολουθεί μια εστίαση στη ρευστοδυναμική συμπεριφορά των ανεμογεννητριών, με έμφαση στις περιβαλλοντικές συνθήκες που επηρεάζουν τη λειτουργία και την απόδοσή τους.

Ευχαριστώ θερμά τον Επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Σκούρα Ευγένιο, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση του κατά τη διάρκεια της πραγματοποίησης της εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία, εξετάζει την υπολογιστική ρευστοδυναμική ανάλυση υπερράκτιων ανεμογεννητριών, οι οποίες αποτελούν ανερχόμενη μορφή ανανεώσιμης πηγής ενέργειας. Η αιολική ενέργεια έχει καταστεί ελκυστική πηγή ανανεώσιμης ενέργειας, με την εγκατεστημένη ισχύ της παγκοσμίως να έχει αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια.

Αρχικά, μελετάται η πρόοδος των ανεμογεννητριών τα τελευταία χρόνια και οι δυνατότητές τους ως πηγής παραγωγής ενέργειας. Στη συνέχεια, εξετάζεται η λειτουργία της ρευστοδυναμικής προσομοίωσης μιας ανεμογεννήτριας και πώς αυτή επηρεάζεται από το περιβάλλον της.

Η εργασία επικεντρώνεται στην ανάλυση μιας υπερράκτιας ανεμογεννήτριας 5MW, βασισμένης στα πρότυπα του NREL (National Renewable Energy Laboratory). Η χρήση υπερράκτιου αέρα ως μορφής καθαρής και ανανεώσιμης ενέργειας παρουσιάζει μεγάλες δυνατότητες στην ενεργειακή βιομηχανία. Η ταχεία ανάπτυξη των υπερράκτιων ανεμογεννητριών απαιτεί καλή κατανόηση των τεχνικών δυσκολιών και προβλημάτων που μπορεί να παρουσιαστούν σε συνθήκες λειτουργίας στη θάλασσα.

Με την πάροδο του χρόνου, ειδικά τα τελευταία χρόνια, πολλά έργα έχουν αναπτυχθεί στη Βόρεια Ευρώπη, παράγοντας υποσχόμενα αποτελέσματα. Σκοπός της παρούσας αναφοράς είναι η κατανόηση της λειτουργίας μιας υπερράκτιας ανεμογεννήτριας και ειδικότερα της συμπεριφοράς της λεπίδας της μέσω προσομοίωσης.

Η εργασία αυτή προσφέρει σημαντικά συμπεράσματα για την κατανόηση και την περαιτέρω ανάπτυξη της τεχνολογίας των υπερράκτιων ανεμογεννητριών, συμβάλλοντας στην προώθηση της ανανεώσιμης ενέργειας.

ΛΕΞΕΙΣ-ΚΛΕΙΔΙΑ

- **Προσήνεμες (upwind):** Ανεμογεννήτριες που είναι τοποθετημένες έτσι ώστε να βρίσκονται στην πλευρά από την οποία έρχεται ο άνεμος.
- **Υπήνεμες (downwind):** Ανεμογεννήτριες που είναι τοποθετημένες έτσι ώστε να βρίσκονται στην πλευρά προς την οποία κατευθύνεται ο άνεμος.
- **NREL:** Τα πρότυπα του National Renewable Energy Laboratory που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των ανεμογεννητριών.
- **HAWT:** (Horizontal Axis Wind Turbine - Ανεμογεννήτριες Οριζόντιου Άξονα)
- **VAWT:** (Vertical Axis Wind Turbine - Ανεμογεννήτριες Κατακόρυφου Άξονα)
- **Υπεράκτια Αιολική Ενέργεια:** Η χρήση της αιολικής ενέργειας που παράγεται από ανεμογεννήτριες εγκατεστημένες στη θάλασσα.
- **Θεμελιώσεις Υπεράκτιων Αιολικών Πάρκων:** Οι διάφορες τεχνικές και δομές που χρησιμοποιούνται για τη θεμελίωση ανεμογεννητριών στη θάλασσα.
- **Αεροτομή:** Η γεωμετρία των πτερυγίων των ανεμογεννητριών και οι παράμετροι που επηρεάζουν την απόδοσή τους.
- **Λεπίδα Ανεμογεννήτριας:** Τα πτερύγια των ανεμογεννητριών που αιχμαλωτίζουν την ενέργεια του ανέμου.
- **Στροβιλισμοί:** Οι κυκλικές κινήσεις του αέρα που μπορεί να δημιουργούνται από τα πτερύγια των ανεμογεννητριών και να επηρεάζουν την απόδοσή τους.
- **Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (CFD):** Η υπολογιστική προσέγγιση για την ανάλυση των ρευστοδυναμικών φαινομένων γύρω από τις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες.
- **Blade Element Theory (BET):** Θεωρία Στοιχείων Πτερυγίου, μια μέθοδος ανάλυσης των ανεμογεννητριών που διασπά το πτερύγιο σε μικρά στοιχεία για την εκτίμηση της αεροδυναμικής απόδοσης.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
2. ΜΟΝΤΕΡΝΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ	3
3. ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΙΣ ΥΠΕΡΑΚΤΙΩΝ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ	5
3.1 Θεμέλια Βάσεων Βαρύτητας.....	7
3.2 Θεμέλια με μονοπάσσαλο	7
3.3 Θεμέλια με τρίποδα	8
3.4 Θεμέλια Jacket	8
3.5 Θεμέλια με κάδους αναρρόφησης	8
3.6 Άγκυρες για πλωτές ανεμογεννήτριες	9
4. ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ	10
4.1 Αεροτομή και παράμετροι.....	11
4.2 Δυνάμεις στην αεροτομή	12
4.3 Αιολική Ισχύς.....	14
4.4 Πλήμνη Ρότορα	15
4.5 Άτρακτος	16
4.6 Επιλογή Υλικών για λεπίδα ανεμογεννήτριας	17
5. ΦΟΡΤΙΑ ΣΤΗΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ	19
5.1 Αεροδυναμικά Φορτία.....	20
5.2 Βαρυτικά Φορτία.....	20
5.3 Φυγοκεντρικά Φορτία	21
5.4 Γυροσκοπικά Φορτία	21
5.5 Αναταράξεις Ανέμου	21
5.6 Διάτμηση Ανέμου	22
6. ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΟΓΚΩΝ	23
6.1 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM).....	23
6.2 Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (CFD)	24
6.3 Κύριες Εξισώσεις.....	25
6.3.1 Διατήρηση Μάζας.....	25
6.3.2 2 ^{ος} Νόμος του Newton	25
6.3.3 Εξίσωση Ενέργειας.....	26
6.3.4 Εξίσωση Navier-Stokes	26
6.4 Μέθοδος Πεπερασμένων Όγκων	27

6.5 Μοντέλα Τύρβης	28
6.5.1 Μοντέλο Τύρβης k-ε	29
6.5.2 Μοντέλο Τύρβης k-ω	29
6.5.3 Μοντέλο Τύρβης SST (Shear Stress Transport)	30
7. BLADE ELEMENT MOMENTUM THEORY (BEMT)	31
7.1 Προσέγγιση Κινητήριου Δίσκου	32
7.2 Εκτίμηση Ισχύς Εξόδου	34
7.3 Θεωρία Στοιχείων Λεπίδας	35
7.3.1 Ροπή και συντελεστής α'	37
7.3.2 Δυνάμεις πάνω σε στοιχείο λεπίδας	39
7.3.3 Συντελεστές άντωσης και οπισθέλκουσας	40
7.3.4 Σύνδεση θεωρίας κινητήριου δίσκου και BET	41
7.3.5 Λόγος ταχύτητας ακρών λεπίδας	42
7.3.6 Σταθερότητα Τουρμπίνας	43
7.4 Η Μέθοδος Ορμής Στοιχείων Λεπίδων (BEMT)	44
8. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ	50
8.1 Γεωμετρία	50
8.2 Διάταξη Μοντέλου	50
8.3 Mesh	52
8.4 Διαμόρφωση Φυσικών Συνθηκών	54
9. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	59
10. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	66
11. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	67

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

C_L : Συντελεστής άντωσης, αδιάστατος, ποσοτικοποιεί την άνοδο που παράγεται από ένα πτερύγιο σε σχέση με την δυναμική πίεση και την επιφάνεια.

C_D : Συντελεστής οπισθέλκουσας, αδιάστατος, ποσοτικοποιεί την αντίσταση ενός αντικειμένου σε ένα ρευστό.

α : Γωνία προσβολής, η γωνία μεταξύ της χορδής του πτερυγίου και της ροής του αέρα που το προσεγγίζει.

φ : Γωνία ροής, η γωνία μεταξύ της κατεύθυνσης της σχετικής ταχύτητας και του πτερυγίου ή του αεροτομίου.

ρ : Πυκνότητα ρευστού, η μάζα ανά μονάδα όγκου του ρευστού.

l : Μήκος χορδής, η απόσταση μεταξύ του εμπρόσθιου και του οπίσθιου άκρου ενός αεροτομίου.

w : Σχετική ταχύτητα, η ταχύτητα του ρευστού σε σχέση με το κινούμενο αντικείμενο.

L : Δύναμη άντωσης, η αεροδυναμική δύναμη που δρα κάθετα προς τη διεύθυνση της ροής.

D : Δύναμη οπισθέλκουσας, η αεροδυναμική δύναμη που δρα παράλληλα προς τη διεύθυνση της ροής.

J : Αναλογία ταχύτητας άκρου, ο λόγος της ταχύτητας του άκρου της λεπίδας προς την ταχύτητα του ανέμου.

r : Ακτινική απόσταση, η απόσταση από το κέντρο περιστροφής μέχρι ένα σημείο στην λεπίδα.

R : Ακτίνα, η μέγιστη ακτινική απόσταση από το κέντρο περιστροφής μέχρι το άκρο της λεπίδας.

β : Γωνία βήματος, η γωνία μεταξύ της χορδής μιας τομής της λεπίδας και του επιπέδου περιστροφής.

α' : Συντελεστής επαγωγής, συντελεστής που λαμβάνει υπόψη τη μείωση της ταχύτητας του ανέμου λόγω της ενέργειας που εξάγεται από τον ρότορα.

α : Συντελεστής αξονικής επαγωγής, το κλάσμα της μείωσης της ταχύτητας ροής καθώς περνάει μέσα από τον δίσκο του ρότορα.

μ : Δυναμικό ιξώδες, ένα μέτρο της αντίστασης ενός ρευστού στην παραμόρφωση.

λ : Κινηματικό ιξώδες, ο λόγος του δυναμικού ιξώδους προς την πυκνότητα του ρευστού.

κ : Κινητική ενέργεια τυρβώδους ροής, που αντιπροσωπεύει την ένταση της τυρβώδους ροής.

ϵ : Ρυθμός απόσβεσης τυρβώδους ροής, ο ρυθμός με τον οποίο η κινητική ενέργεια τυρβώδους ροής μετατρέπεται σε εσωτερική ενέργεια.

U : Συνιστώσα ταχύτητας στη διεύθυνση x , χρησιμοποιείται στα πλαίσια των εξισώσεων ροής ρευστών.

V : Συνιστώσα ταχύτητας στη διεύθυνση y , αντιπροσωπεύει τη ροή σε κάθετη κατεύθυνση προς το U .

W : Συνιστώσα ταχύτητας στη διεύθυνση z , αντιπροσωπεύει τη ροή κάθετα τόσο προς το U όσο και προς το V .

P : Πίεση, η δύναμη που ασκεί το ρευστό ανά μονάδα επιφάνειας.

σ : Επιφανειακή τάση, ένα μέτρο των συνεκτικών δυνάμεων στην επιφάνεια ενός ρευστού.

T : Θερμοκρασία, συνήθως μετριέται σε Κέλβιν ή Κελσίου.

Re : Αριθμός Reynolds, μια αδιάστατη ποσότητα που χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη των προτύπων ροής στη ρευστοδυναμική.

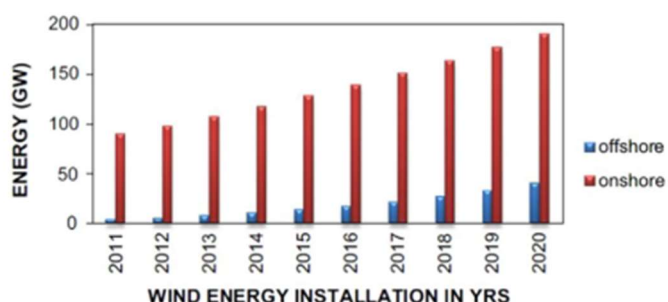
M : Αριθμός Mach, ο λόγος της ταχύτητας ενός αντικειμένου που κινείται μέσα από ένα ρευστό προς την ταχύτητα του ήχου στο ίδιο ρευστό.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΠΕΡΑΚΤΙΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Abstract: Ο υπερράκτης αέρας είναι μια μορφή καθαρής, και ανανεώσιμης ενέργειας που φέρει μεγάλες δυνατότητες στην βιομηχανία της ενέργειας. Η ταχύς ανάπτυξη που έχει παρουσιάσει ο τομέας των υπερράκτιων ανεμογεννητριών προβλέπει καλή κατανόηση των τεχνικών δυσκολιών και προβλημάτων που μπορεί να παρουσιάσει η ανεμογεννήτρια σε συνθήκες λειτουργίας μέσα σε θάλασσα. Με το πέρασ του χρόνου, ειδικά τα τελευταία χρόνια, πολλά έργα έχουν αναπτυχθεί, ειδικά στην Βόρεια Ευρώπη, και έχουν παράξει υποσχόμενα αποτελέσματα. Σκοπός αυτής της αναφοράς είναι η κατανόηση της λειτουργίας μιας υπερράκτης ανεμογεννήτριας και συγκεκριμένα η συμπεριφορά της λεπίδας της μέσω προσομοίωσης μια λεπίδας υπερράκτης ανεμογεννήτριας 5MW βασισμένη στα πρότυπα του NREL (National Renewable Energy Laboratory).

1.Εισαγωγή

Η αιολική ενέργεια, ως ανανεώσιμη πηγή, έχει κάνει σημαντικές προόδους την τελευταία δεκαετία, με μια νέα μέθοδο αξιοποίησης: την υπερράκτια ανεμογεννήτρια (offshore wind turbine). Η χερσαία αιολική ενέργεια έχει αξιοποιηθεί για χιλιετίες, με σημαντική τεχνολογική εξέλιξη τα τελευταία χρόνια. Το σχήμα 1.1 παρουσιάζει τις εγκαταστάσεις υπερράκτιων και χερσαίων ανεμογεννητριών από το 2011 έως το 2020. Παρόλο που οι υπερράκτιες ανεμογεννήτριες έχουν ακόμα περιθώριο για να φτάσουν τις χερσαίες εγκαταστάσεις, μέχρι το 2030, η Ευρώπη προβλέπεται να επενδύσει περίπου 20 δισεκατομμύρια ευρώ στις ανεμογεννήτριες, με το 60% να κατευθύνεται στον τομέα των υπερράκτιων ανεμογεννητριών.



Σχήμα 1.1. Υπερράκτιες και χερσαίες εγκαταστάσεις ανεμογεννητριών (2011-2020)

Αυτή η επένδυση, παρόλο που είναι σημαντική, είναι βασισμένη στο τεράστιο δυναμικό που έχουν οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες. Για παράδειγμα, σύμφωνα με αναφορά του Crown Estate, ενός εθνικού οργανισμού που δραστηριοποιείται στον κλάδο της ακίνητης περιουσίας στο Ηνωμένο Βασίλειο, το 2022 το Ηνωμένο Βασίλειο, ένας από τους ηγετικούς παράγοντες στην πρόοδο των υπεράκτιων ανεμογεννητριών καθώς αποτελούν το 25% περίπου του παγκοσμίου δυναμικού υπεράκτιας ενέργειας, ανέθεσε την μεγαλύτερη χωρητικότητα ενέργειας έως σήμερα σε έναν χρόνο. Η συνολική λειτουργική χωρητικότητα που συγκέντρωσαν οι υπεράκτιες φάρμες ανέρχεται στα 13.7GW, το οποίο είναι το 45% της συνολικής ευρωπαϊκής υπεράκτιας ενέργειας και το 24% της παγκόσμιας, καθιστώντας έτσι το Ηνωμένο Βασίλειο την δεύτερη μεγαλύτερη δύναμη στις υπεράκτιες φάρμες, μετά την Κίνα. Στο σχήμα 1.2 φαίνονται όλες οι υπεράκτιες φάρμες στο Ηνωμένο Βασίλειο καθώς και η συνεισφορά τους στην χωρητικότητα ενέργειας.

Operational: Total capacity of wind farms that have been fully commissioned.

	Capacity MW ¹
01 Barrow	90
02 Beatrice ²	588
03 Blyth Demonstration (Phase 1)	42
04 Burbo Bank	90
05 Burbo Bank Extension	259
06 Dudgeon	402
07 East Anglia ONE	714
08 European Offshore Wind Deployment Centre ²	97
09 Galloper	353
10 Greater Gabbard	504
11 Gunfleet Sands Demonstration	12
12 Gunfleet Sands I	108
13 Gunfleet Sands II	65
14 Gwynt y Môr	576
15 Hornsea 1	1,218
16 Hornsea 2	1,386
17 Humber Gateway	219
18 Hywind Scotland ²	30
19 Inner Dowsing	97
20 Kentish Flats	90

Capacity MW¹

21 Kentish Flats Extension	50
22 Kincardine ²	50
23 Levenmouth Demonstration ²	7
24 Lincs	270
25 London Array	630
26 Lynn	97
27 Moray East ²	953
28 North Hoyle	60
29 Ormonde	150
30 Race Bank	573
31 Rampion	400
32 Rhyl Flats	90
33 Robin Rigg East ²	84
34 Robin Rigg West ²	90
35 Scroby Sands	60
36 Sheringham Shoal	317
37 Teesside	62
38 Thanet	300
39 Triton Knoll	857
40 Walney 1	184
41 Walney 2	184
42 Walney Extension	659
43 West of Duddon Sands	389
44 Westermost Rough	210
Total	13,666

Under construction: Total capacity of wind farms that have commenced offshore construction but are not yet fully operational, or the developer has confirmed a Final Investment Decision.

Up to capacity MW¹

45 Dogger Bank A	1,235
46 Dogger Bank B	1,235
47 Dogger Bank C	1,200
48 Neart na Gaoithe ²	448
49 Seagreen Phase 1 ²	1,140
50 Sofia Offshore Wind Farm	1,400
Total	6,658

Government support on offer:

Total capacity of wind farms that have secured a Contract for Difference.

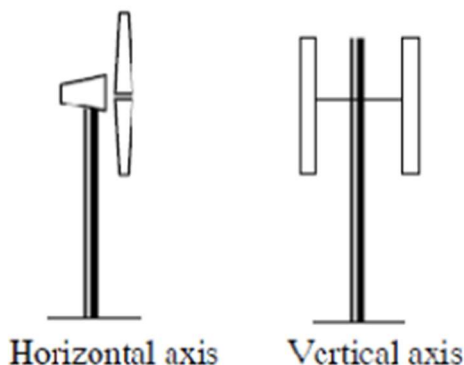
Up to capacity MW¹

51 East Anglia THREE	1,480
52 Forthwind ²	12
53 Hornsea 3	3,000
54 Inch Cape ²	1,008
55 Moray West ²	882
56 Norfolk Boreas	1,800
57 Wave Hub	30
Total	8,212

Σχήμα 1.2. Χωρητικότητα κάθε υπεράκτιας φάρμας στο Ηνωμένο Βασίλειο

2. Μοντέρνες Ανεμογεννήτριες

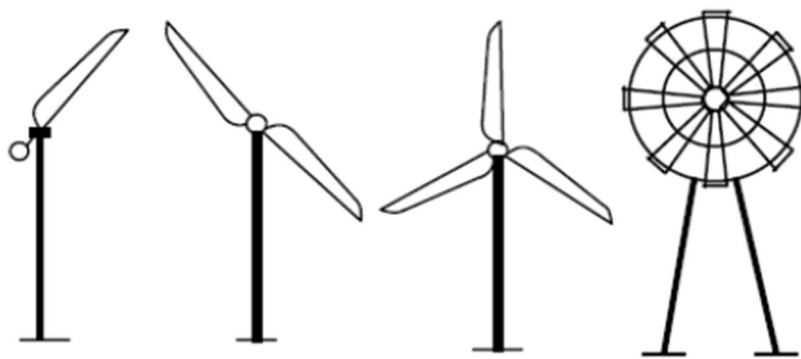
Οι μοντέρνες ανεμογεννήτριες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δυο διατάξεις ανάλογα με τον άξονα περιστροφής των λεπίδων του ρότορα: ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα (HAWTs) και ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα (VAWTs) όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1 Ανεμογεννήτριες οριζόντιου και κάθετου άξονα

Τα τελευταία χρόνια, οι περισσότερες από τις εμπορικές ανεμογεννήτριες είναι οριζόντιου άξονα (HAWT), οι οποίες έχουν τον άξονα περιστροφής τους οριζόντια του εδάφους και σχεδόν παράλληλα με τη ροή του ανέμου. Αυτοί οι τύποι ανεμογεννητριών έχουν ορισμένα αξιοσημείωτα πλεονεκτήματα, όπως η χαμηλή ταχύτητα αποκοπής του ανέμου και η εύκολη αναδίπλωση. Σε γενικές γραμμές η ισχύς εξόδου των HAWT είναι υψηλότερη από τις ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα λόγω του καλύτερου συντελεστή ισχύος στις HAWT. Ωστόσο, η γεννήτρια και το κιβώτιο ταχυτήτων αυτών των στροβίλων πρέπει να βρίσκονται πάνω από τον πύργο που καθιστά τον σχεδιασμό τους πιο πολύπλοκο και ακριβό.

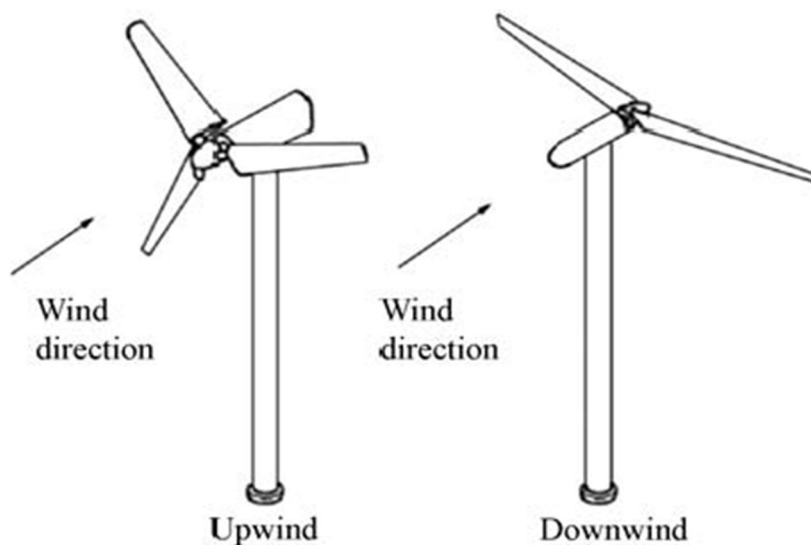
Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα (HAWT) μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση τον αριθμό των λεπίδων τους: ανεμογεννήτριες με μία λεπίδα, δύο λεπίδες, τρεις λεπίδες και πολλαπλές λεπίδες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2. Οι ανεμογεννήτριες με μία λεπίδα, παρόλο που φαίνεται να είναι πιο οικονομικές λόγω της μείωσης των απαιτούμενων υλικών, δεν χρησιμοποιούνται ευρέως σήμερα. Για την εξισορρόπηση του βάρους σε αυτές τις ανεμογεννήτριες, απαιτείται αντίβαρο στην απέναντι πλευρά της πλήμνης. Επιπλέον, χρειάζονται υψηλότερη ταχύτητα ανέμου για να παράγουν την ίδια ισχύ που αποδίδει μια ανεμογεννήτρια με τρεις λεπίδες. Οι ανεμογεννήτριες με δύο λεπίδες παρουσιάζουν σχεδόν το ίδιο μειονέκτημα με αυτές των μίας λεπίδας και μπορούν να συλλέξουν ελαφρώς λιγότερη ενέργεια από τις ανεμογεννήτριες με τρεις λεπίδες. Οι ανεμογεννήτριες πολλαπλών λεπίδων χρησιμοποιούνται κυρίως ως "ανεμόμυλοι άντλησης νερού" και δεν προορίζονται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ως εκ τούτου, οι περισσότερες από τις σημερινές εμπορικές ανεμογεννήτριες διαθέτουν τρεις λεπίδες.



Single bladed, two bladed, three bladed and multi bladed turbines

Σχήμα 2.2 Τύποι ανεμογεννητριών ανάλογα του αριθμού λεπίδων

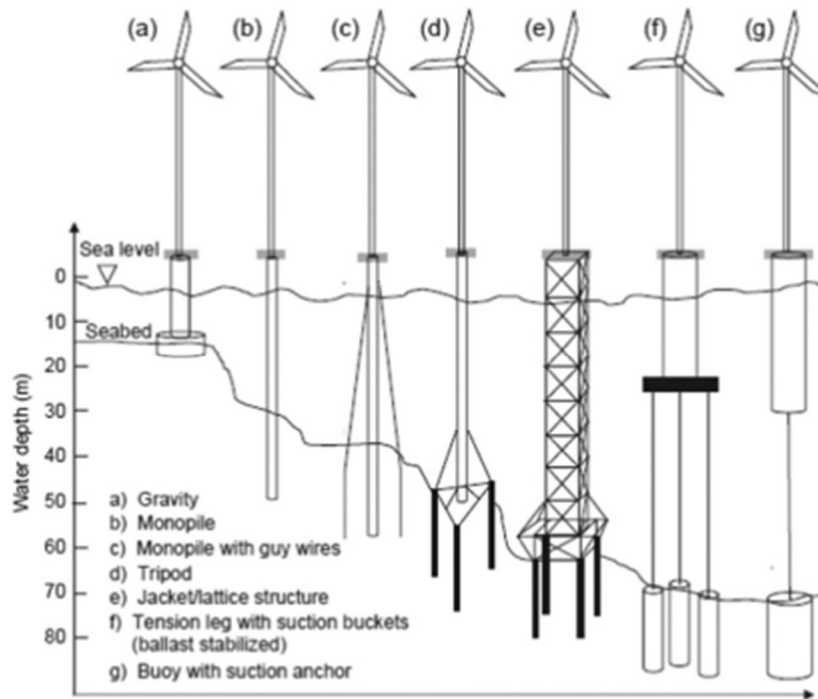
Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα μπορούν επίσης να διαχωριστούν ανάλογα με τον προσανατολισμό του ρότορα σε προσήνεμες και υπήνεμες. Στις προσήνεμες ανεμογεννήτριες, η ροή του ανέμου χτυπά πρώτα τον ρότορα πριν από τον πύργο, κάνοντάς τον να περιστρέφεται. Το πλεονέκτημα αυτού του σχεδιασμού είναι ότι οι λεπίδες λειτουργούν σε αδιατάρακτη ροή αέρα. Ωστόσο, οι δυνάμεις του ανέμου τείνουν να στρέφουν τον ρότορα προς την κατεύθυνση του ανέμου, απαιτώντας έναν επιπλέον ενεργό μηχανισμό περιστροφής για να διατηρούν τον ρότορα προσήνεμα. Αντίθετα, στις υπήνεμες ανεμογεννήτριες, ο άνεμος προσκρούει πρώτα στον πύργο και μετά στον ρότορα. Έτσι, ο άνεμος μπορεί να κρατήσει τον ρότορα σε υπήνεμη κατάσταση χωρίς την ανάγκη για επιπλέον μηχανισμό. Καθώς η κατεύθυνση του ανέμου δεν είναι σταθερή και μπορεί να αλλάζει γρήγορα, η προσήνεμη ανεμογεννήτρια προσανατολίζεται πιο γρήγορα από την υπήνεμη λόγω του ενεργού μηχανισμού προσανατολισμού της. Στο Σχήμα 2.3 απεικονίζονται αυτοί οι δύο τύποι ανεμογεννητριών.



Σχήμα 2.3 Τύποι ανεμογεννητριών ανάλογα του προσανατολισμού του ρότορα

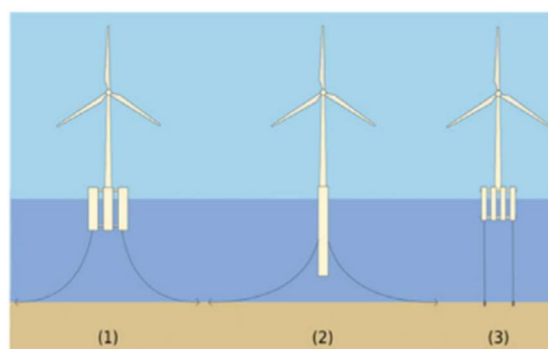
3. Θεμελιώσεις Υπεράκτιων Αιολικών Πάρκων

Η πλειονότητα των υπεράκτιων ανεμογεννητριών τοποθετούνται στην ηπειρωτική πλάκα περίπου 10 χλμ. από την ακτή σε βάθη περίπου 10 μέτρων. Η παραγωγή ενέργειας από τις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες είναι πιο περίπλοκη από σε σχέση με την παραγωγή ενέργειας στην ξηρά όσον αφορά τον σχεδιασμό του συστήματος της ανεμογεννήτριας και της κατασκευής της. Οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες πρέπει να βρίσκονται πάνω από το επίπεδο της υψηλότερης κορυφής των κυμάτων και να έχουν ανθεκτικές δομές στήριξης που συνδέονται με τον βυθό μέσω των θεμελιώσεων. Απαιτούνται υποθαλάσσια καλώδια και άλλα συστήματα μετάδοσης ηλεκτρικής ενέργειας για την εγκατάσταση και τη συντήρηση, το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε πολύ υψηλότερο κόστος εγκαταστάσεων υπεράκτιων ανεμογεννητριών σε σύγκριση με αυτό των χερσαίων ανεμογεννητριών. Έχει εκτιμηθεί ότι το κόστος μιας υπεράκτιας ανεμογεννήτριας είναι το διπλάσιο ή τριπλάσιο από αυτό μιας αντίστοιχης μονάδας στην ξηρά, ανάλογα με την τοποθεσία. Η επιλογή τοποθεσίας για τις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες είναι πιο ευέλικτη όσον αφορά τους περιορισμούς χώρου σε σχέση με αυτή των χερσαίων, καθώς συνήθως οι εγκαταστάσεις των υπεράκτιων ανεμογεννητριών βρίσκονται μακριά από πυκνοκατοικημένες περιοχές, με μειωμένη ηχητική και οπτική επίδραση στις κοινότητες. Οι υπάρχουσες φάρμες υπεράκτιων ανεμογεννητριών κατασκευάζονται με σταθερές θεμελιώσεις, όπως θεμέλια βαρύτητας (βαρίδια), θεμέλια μονοπασσάλου, τρίποδα και θεμελιώσεις τζάκετ, εγκατεστημένα σε βάθη νερού μικρότερα των 50m. Ωστόσο, πολλές παράκτιες χώρες όπως η Ιαπωνία, οι Ηνωμένες Πολιτείες και χώρες της Δυτικής Ευρώπης με ακτογραμμή στον Ατλαντικό, έχουν περιορισμένα παράκτια υδάτινα εδάφη με βάθος νερού κάτω από 50 μέτρα. Ως εκ τούτου, οι πλωτές υπεράκτιες ανεμογεννήτριες έχουν ελκύσει μεγάλο ενδιαφέρον τα τελευταία 10 χρόνια. Το σχήμα 3.1 απεικονίζει παραδείγματα τυπικών θεμελιώσεων στήριξης υπεράκτιων ανεμογεννητριών για διαφορετικά βάθη νερού.



Σχήμα 3.1 Τυπικές μονάδες θεμελιώσεων στήριξης που εφαρμόζονται σε διαφορετικά βάθη

Οι πλωτές υπερράκτιες ανεμογεννήτριες με συστήματα πρόσδεσης και θεμέλια αγκύρωσης έχουν προταθεί και δοκιμαστεί, καθώς η πρόοδος των παραπάνω συστημάτων έχει ωφεληθεί από την τεχνολογική εξέλιξη των πλωτών πετρελαιοπηγών και πλατφορμών αερίου, οι οποίες χρησιμοποιούν μέσα στήριξης όπως το Tension Leg Platform (TLPs), ημιβυθισμένες πλατφόρμες, και δοκούς όπως φαίνονται στο σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2. Τύποι πλωτών υπερράκτιων ανεμογεννητριών: (1) ημιβυθισμένη πλατφόρμα, (2) δοκός, (3) Tension Leg Platform (TLP)

Σύμφωνα με δεδομένα από έρευνες πάνω στις υπερράκτιες ανεμογεννήτριες, η επένδυση στις θεμελιώσεις συνήθως είναι το 20-30% του συνολικού κόστους μιας τυπικής υπερράκτιας ανεμογεννήτριας. Αυτό συμβάλλει σημαντικά στα υψηλότερα κόστη των υπερράκτιων ανεμογεννητριών σε σχέση με αυτά των χερσαίων. Επομένως, η επιλογή σωστού τύπου θεμελίωσης για την

ανεμογεννήτρια είναι το κλειδί για την εκμετάλλευση της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας. Στη συνέχεια, θα εξεταστούν οι κοινοί εφαρμοζόμενοι τύποι θεμελίωσης υπεράκτιων ανεμογεννητριών και συστήματα αγκυροβόλησης για μελλοντικά πλωτά αιολικά πάρκα βαθέων υδάτων.

3.1 Θεμέλια Βάσεων Βαρύτητας

Ο σχεδιασμός των βάσεων βαρύτητας για υπεράκτιες ανεμογεννήτριες βασίζεται κυρίως στο ίδιο το βάρος τους, το οποίο πρέπει να είναι αρκετό ώστε να αντιστέκεται σε ισχυρές ροπές ανατροπής, διατηρώντας τις δομές στήριξης σε όρθια θέση στον πυθμένα της θάλασσας. Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζεται μια σημαντική απεικόνιση μιας τέτοιας βάσης βαρύτητας. Η κατασκευή της, η οποία είναι συνήθως από οπλισμένο σκυρόδεμα, είναι απλή και χαρακτηρίζεται από σχετικά χαμηλή ικανότητα φόρτισης. Δεδομένου ότι οι βάσεις βαρύτητας απαιτούν επαρκή αντοχή φορτίου για να υποστηρίξουν το βάρος τους, καθώς και τα φορτία χρήσης και τα περιβαλλοντικά φορτία που ασκούνται στις θεμελιώσεις, είναι καταλληλότερες για πυθμένες που αποτελούνται από συμπυκνωμένο άργιλο, αμμώδη εδάφη ή πέτρα. Συνήθως, αυτές οι θεμελιώσεις βρίσκονται σε βάθη νερού μικρότερα των 10 μέτρων. Στα πρώτα στάδια ανάπτυξης των υπεράκτιων αιολικών εγκαταστάσεων, οι βάσεις βαρύτητας ήταν η επικρατούσα επιλογή θεμελίωσης για τις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες.

3.2 Θεμέλια με μονοπάσσαλο

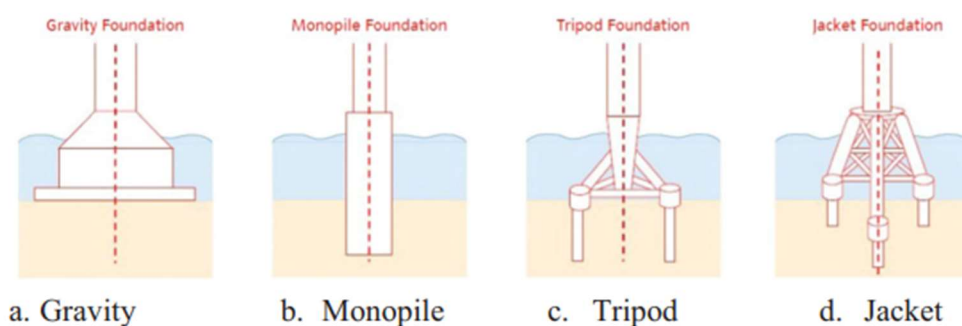
Μια τυπική θεμελίωση με μονοπάσσαλο αποτελείται από έναν μόνο χαλύβδινο σωληνωτό πάσσαλο με διάμετρο 3-8 μέτρα (όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3). Οι μονοπάσσαλοι τοποθετούνται συνήθως σε νερά σχετικά μικρού βάθους, που κυμαίνονται μεταξύ 20 και 40 μέτρων. Δεν είναι σαφές σε ποιο βάθος νερού οι θεμελιώσεις μονοπασσάλων γίνονται οικονομικά ασύμφορες. Η παρακολούθηση των ήδη εγκατεστημένων κατασκευών δείχνει ότι οι πραγματικές θεμελιώσεις προσφέρουν μεγαλύτερη δυσκαμψία από ό,τι προβλέπουν οι υπάρχουσες μέθοδοι σχεδιασμού, υποδεικνύοντας την ανάγκη για πιο ακριβείς μεθόδους σχεδιασμού ώστε να μειωθεί το βάρος και η απαιτούμενη ενσωμάτωση των θεμελιώσεων μονοπασσάλων. Σε πυθμένες με στρωματογραφία από άργιλο, άμμο ή κιμωλία, οι μονοπάσσαλοι μπορούν να εγκατασταθούν με χρήση κρουστικών σφυριών ή δονητικής οδήγησης. Για βραχώδεις θαλάσσιους πυθμένες, συνήθως υιοθετούνται μέθοδοι διάτρησης και διάνοιξης τρυπών με πασσάλους. Χάρη στην ευκολία κατασκευής, το χαμηλό κόστος και την απλή εγκατάσταση, ο μονοπάσσαλος έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως παγκοσμίως για τη θεμελίωση υπεράκτιων ανεμογεννητριών.

3.3 Θεμέλια με τρίποδα

Τα θεμέλια με τρίποδα (Σχήμα 3.3) αποτελούνται από τρεις χαλύβδινους πασσάλους μεσαίας διαμέτρου, τοποθετημένους σε σχήμα ισόπλευρου τριγώνου, με την κορυφή του τριγώνου να υποστηρίζει την ανώτερη τριποδική δομή. Ως προκατασκευασμένη μονάδα, ένα τρίποδο σύστημα μπορεί να αντέξει τα φορτία που ασκούνται στον πύργο και να μεταφέρει τις τάσεις και τις ροπές στους τρεις χαλύβδινους πασσάλους. Η τριποδική θεμελίωση είναι σταθερή, ελαφριά και κατάλληλη για εφαρμογή σε βάθη νερού μεταξύ 10 και 35 μέτρων.

3.4 Θεμέλια Jacket (δομή πλέγματος / κλωβού)

Τα θεμέλια τύπου Jacket αποτελούνται από μια δομή χωροδικτυώματος, η οποία συναρμολογείται από χαλύβδινα σωληνωτά μέλη και κατασκευάζεται συνήθως με συγκόλληση στην ξηρά. Αυτή η δομή στη συνέχεια μεταφέρεται στην περιοχή του έργου και εγκαθίσταται στον πυθμένα της θάλασσας. Η θεμελίωση τύπου Jacket είναι σχετικά οικονομική όσον αφορά την κατανάλωση χάλυβα, αλλά η αποθήκευση, ο εφοδιασμός και η εγκατάσταση μπορεί να είναι δαπανηρές, αυξάνοντας σημαντικά το συνολικό κόστος. Μέχρι σήμερα, οι θεμελιώσεις τύπου Jacket έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως σε ενδιάμεσα βάθη νερού, που κυμαίνονται από 5 έως 50 μέτρα..



Σχήμα 3.3 Κοινός εφαρμοζόμενοι τύποι θεμελίωσης υπεράκτιων ανεμογεννητριών

3.5 Θεμέλια κάδων αναρρόφησης

Τα θεμέλια με κάδους αναρρόφησης, γνωστά και ως κασόνια αναρρόφησης (Suction caisson) (Σχήμα 3.4), μπορούν να διακριθούν σε θεμέλια με έναν κάδο και σε θεμέλια με πολλαπλούς κάδους. Αυτά τα θεμέλια είναι ιδιαίτερα κατάλληλα για πυθμένα που αποτελείται από μαλακό άργιλο και για

ανεμογεννήτριες σε νερά με ποικίλο βάθος. Χάρη στη συγκεκριμένη μέθοδο εγκατάστασης που χρησιμοποιείται, το κόστος εγκατάστασης ενός θεμελίου με κάδο αναρρόφησης είναι χαμηλότερο σε σύγκριση με μια αντίστοιχη υπεράκτια θεμελίωση με πασσάλους. Επιπλέον, τα θεμέλια με κάδους αναρρόφησης είναι πιο εύκολα στη μεταφορά μέσα στη θάλασσα. Αυτή η μέθοδος θεμελίωσης γίνεται σταδιακά δημοφιλής στη βιομηχανία υπεράκτιων ανεμογεννητριών. Παρόλα αυτά, ενώ η θεμελίωση με κάδους αναρρόφησης φαίνεται να είναι μια υποσχόμενη λύση, η αξιοπιστία της απαιτεί περαιτέρω επαλήθευση.

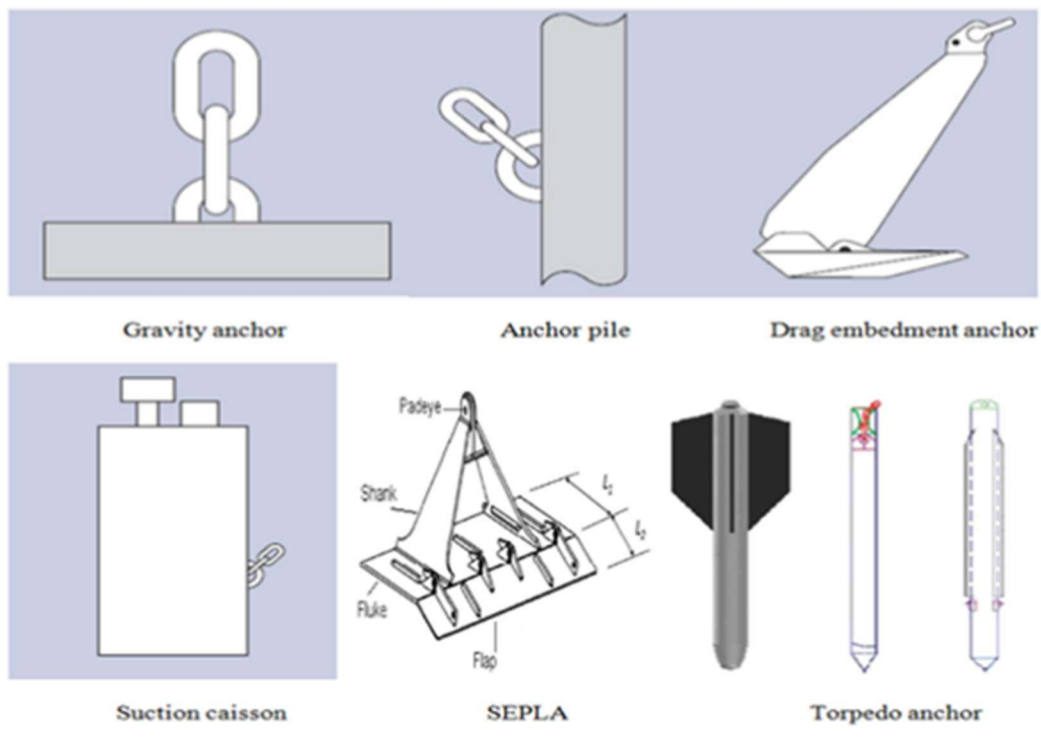
3.6 Άγκυρες για πλωτή υπεράκτια ανεμογεννήτρια

Μια πλωτή κατασκευή με σύστημα πρόσδεσης, τοποθετημένο με άγκυρες στον πυθμένα της θάλασσας, θεωρείται ίσως η καλύτερη επιλογή για την εκμετάλλευση αιολικής ενέργειας σε υπεράκτιες περιοχές με βάθος νερού άνω των 60 μέτρων. Αυτές οι πλωτές δομές πρέπει να παρέχουν επαρκή άντωση για να υποστηρίξουν το βάρος της ανεμογεννήτριας και να περιορίζουν τις κινήσεις κλίσης, κυλίσματος και ανύψωσης εντός αποδεκτών ορίων. Καθώς αυξάνεται το ενδιαφέρον για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας σε βαθιά νερά, είναι πιθανό να αναπτυχθούν νέες ιδέες για πλωτές υπεράκτιες ανεμογεννήτριες.

Σε ένα όχι τόσο μακρινό μέλλον, αυτές οι ανεμογεννήτριες θα μπορούσαν να εγκατασταθούν σε πλωτές πλατφόρμες που ήδη χρησιμοποιούνται στην υπεράκτια βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου, όπως ημιβυθιζόμενες πλατφόρμες, αρμούς και TLP (Tension Leg Platforms). Ένα παράδειγμα εφαρμογής είναι η εγκατάσταση της πρώτης πλωτής υπεράκτιας ανεμογεννήτριας από την Blue H Technologies στη Μεσόγειο Θάλασσα, ανοικτά των ακτών της Ιταλίας το 2007, και ακολούθησε η Hywind της Siemens Wind Power στη Βόρεια Θάλασσα το 2009.

Για να εξασφαλιστεί η σταθερότητα και η αποδοτικότητα κόστους, οι πλωτές κατασκευές συνδέονται με τον πυθμένα της θάλασσας μέσω συστημάτων πρόσδεσης και αγκυρών. Αυτές οι άγκυρες περιλαμβάνουν διάφορους τύπους, όπως άγκυρες βαρύτητας, που είναι κοίλα κουτιά γεμάτα με υλικά υψηλής πυκνότητας και η ικανότητα φορτίου προκύπτει από το νεκρό βάρος και την τριβή στον πυθμένα της θάλασσας. Πάσσαλοι αγκύρωσης, που αποτελούνται από κοίλους χαλύβδινους σωλήνες που εισάγονται στον πυθμένα της θάλασσας με τη βοήθεια σφυριών, με την ικανότητα συγκράτησης να εξαρτάται κυρίως από την τριβή μεταξύ του πασσάλου και του εδάφους. Άγκυρες σύρσης (αντίστασης), που αποτελούνται από πτερούγια και στέλεχος, τα οποία σύρονται στον πυθμένα της θάλασσας, με την ικανότητα συγκράτησης να εξαρτάται από τις ιδιότητες του εδάφους και την επιφάνεια του πτερυγίου.

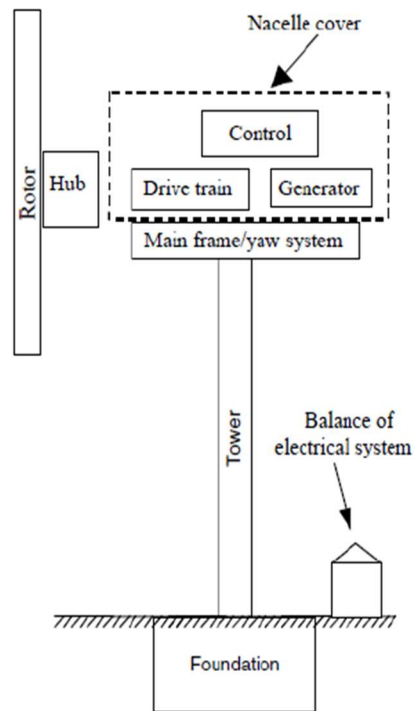
Αυτές οι τεχνολογίες αναμένεται να εξελιχθούν και να γίνουν πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες καθώς η βιομηχανία υπεράκτιων ανεμογεννητριών συνεχίζει να αναπτύσσεται.



Σχήμα 3.4 Τύποι άγκυρας για πλωτή υπεράκτια ανεμογεννήτρια

4. Εξαρτήματα Ανεμογεννητριών

Σήμερα, οι περισσότερες εμπορικές ανεμογεννήτριες έχουν οριζόντιο άξονα και είναι συνήθως εξοπλισμένες με τρεις λεπίδες. Τα κύρια συστατικά μέρη μιας τέτοιας ανεμογεννήτριας, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.1, μπορούν να διαχωριστούν σε διάφορα βασικά τμήματα. Αυτά περιλαμβάνουν τον ρότορα, που αποτελείται από τις λεπίδες και την πλήμνη, και την άτρακτο, η οποία περιλαμβάνει το κιβώτιο ταχυτήτων, το σύστημα κίνησης, τα συστήματα ελέγχου και το σύστημα προσανατολισμού. Επιπλέον, περιλαμβάνονται ο πύργος και η θεμελίωση, που ποικίλλουν ανάλογα με το αν η ανεμογεννήτρια είναι εγκατεστημένη σε ξηρά ή θάλασσα. Τέλος, το ηλεκτρικό σύστημα της ανεμογεννήτριας αποτελείται από καλώδια, διακόπτες, μετασχηματιστές και, πιθανόν, ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος.



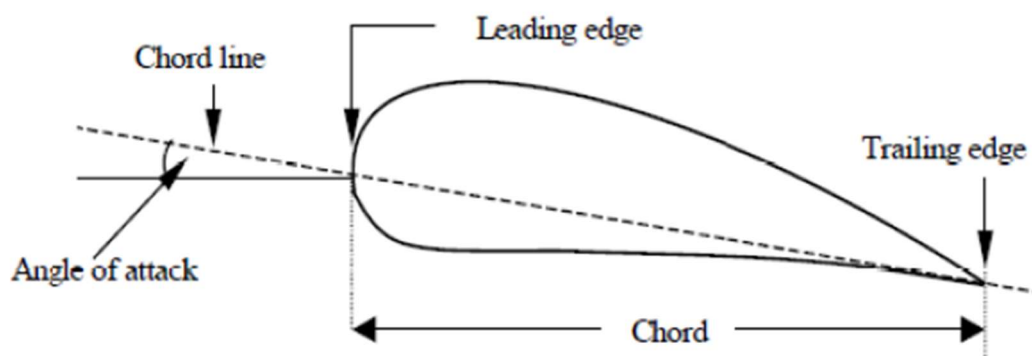
Σχήμα 4.1 Κύρια μέλη μιας ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα

Το σημαντικότερο και σπουδαιότερο μέρος μιας ανεμογεννήτριας είναι ο ρότορας, ο οποίος όπως προαναφέρθηκε αποτελείται από την πλήμνη και τις λεπίδες. Ο ρότορας λαμβάνει κινητική ενέργεια από τη ροή του ανέμου και τη μετατρέπει σε μηχανική ισχύ άξονα.

4.1. Αεροτομή και παράμετροι

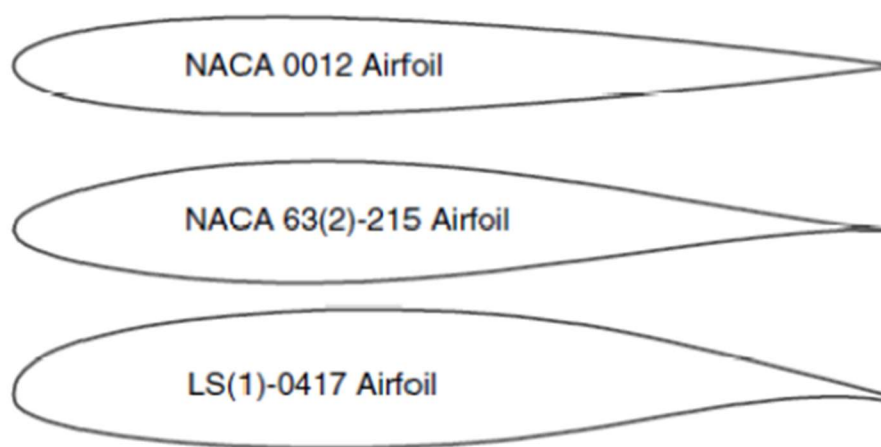
Η διατομή της λεπίδας μιας ανεμογεννήτριας είναι μια αεροτομή που δημιουργεί μηχανικές δυνάμεις μέσω της ροής του αέρα γύρω της. Το πλάτος και το μήκος του πτερυγίου καθορίζονται από την επιθυμητή αεροδυναμική απόδοση και την μέγιστη επιθυμητή ισχύ του ρότορα.

Τα βασικά χαρακτηριστικά μιας αεροτομής φαίνονται στο σχήμα 4.2. Για να μεγιστοποιηθεί η αποδοτικότητα, χρησιμοποιούνται διαφορετικοί τύποι αεροτομών κατά μήκος των λεπίδων, έτσι ώστε να αξιοποιείται η ενέργεια του ανέμου. Υπάρχουν πολλοί διαθέσιμοι τύποι αεροτομών για τον σχεδιασμό των λεπίδων, οι οποίοι ταξινομούνται βάσει αριθμών που έχουν καθοριστεί από την NACA (National Advisory Committee for Aeronautics). Οι τρεις κύριες κατηγορίες αυτών των αεροτομών παρουσιάζονται στο σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.2 Κύριες παράμετροι μιας αεροτομής

Για παράδειγμα, σε μια αεροτομή που προσδιορίζεται με τέσσερα ψηφία, το πρώτο ψηφίο υποδεικνύει τη μέγιστη καμπυλότητα της αεροτομής, εκφρασμένη ως ποσοστό επί τοις εκατό της χορδής. Το δεύτερο ψηφίο δείχνει τη θέση του σημείου της μέγιστης καμπυλότητας από την ακμή προσβολής, εκφρασμένη σε δέκατα της χορδής. Τα τρίτο και τέταρτο ψηφία υποδεικνύουν το μέγιστο πάχος της αεροτομής, επίσης ως ποσοστό επί τοις εκατό της χορδής.

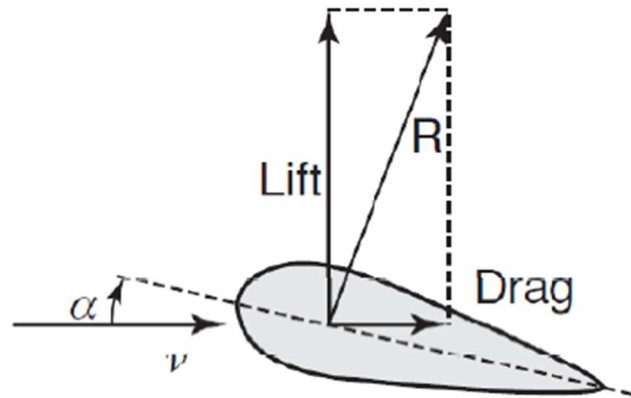


Σχήμα 4.3 Παραδείγματα αεροτομών

4.2 Δυνάμεις σε μια αεροτομή

Όταν μια αεροτομή βρίσκεται σε ροή ανέμου, ο αέρας διέρχεται τόσο από την άνω όσο και από την κάτω επιφάνεια της λεπίδας, η οποία έχει το χαρακτηριστικό καμπύλο σχήμα της. Αυτό το σχήμα αναγκάζει τον αέρα να διανύει μεγαλύτερη απόσταση ανά μονάδα χρόνου πάνω από την επιφάνεια, σε σχέση με την κάτω επιφάνεια της αεροτομής. Συνεπώς, τα σωματίδια του αέρα κινούνται ταχύτερα πάνω από την άνω πλευρά της αεροτομής.

Σύμφωνα με το θεώρημα του Bernoulli, η διαφορά στις ταχύτητες του αέρα πάνω και κάτω από την αεροτομή προκαλεί διαφορά στην πίεση μεταξύ αυτών των δύο επιφανειών. Η υψηλότερη ταχύτητα στην άνω πλευρά οδηγεί σε χαμηλότερη πίεση, ενώ η χαμηλότερη ταχύτητα στην κάτω πλευρά οδηγεί σε υψηλότερη πίεση. Αυτή η διαφορά πίεσης δημιουργεί μια δύναμη R (όπως φαίνεται στο σχήμα 4.4), η οποία μπορεί να αναλυθεί σε δύο κύριες συνιστώσες: την οριζόντια συνιστώσα που αντιστοιχεί στην αντίσταση (drag) και την κατακόρυφη συνιστώσα που αντιστοιχεί στην άντωση (lift).



Σχήμα 4.4 Δυνάμεις άντωσης και οπισθέλκουσας στην αεροτομή

Δύναμη άντωσης - προσδιορίζεται ως μια δύναμη που είναι κάθετη στη διεύθυνση της ροής του αέρα. Η δύναμη άντωσης είναι αποτέλεσμα της άνισης πίεσης στις άνω και κάτω επιφάνειες της αεροτομής. Η δύναμη άντωσης δίνεται από τη σχέση

$$R_L = C_L \frac{1}{2} \rho AV^2 = \text{Συντελεστής δύναμης άντωσης} \times \text{Δυναμική δύναμη}$$

Δύναμη οπισθέλκουσας - ορίζεται ως μια δύναμη η οποία είναι παράλληλη προς την κατεύθυνση της αντίθετης ροής του αέρα. Η δύναμη οπισθέλκουσας οφείλεται τόσο στις δυνάμεις ιξώδους τριβής στην επιφάνεια της αεροτομής όσο και στην άνιση πίεση στις επιφάνειες της αεροτομής. Η δύναμη οπισθέλκουσας ισούται με

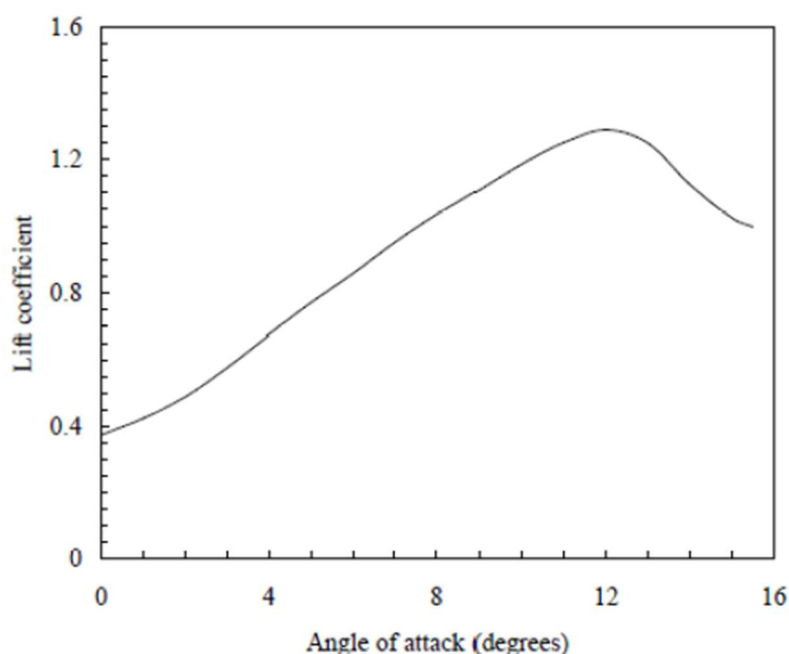
$$R_D = C_D \frac{1}{2} \rho AV^2 = \text{Συντελεστής δύναμης οπισθέλκουσας} \times$$

Δυναμική δύναμη

όπου ρ είναι η πυκνότητα του αέρα, V είναι η ταχύτητα της αδιατάρακτης ροής του αέρα, A είναι το προβαλλόμενο εμβαδόν της αεροτομής (*χορδή* \times *άνοιγμα αεροτομής*) και C_L, C_D είναι οι συντελεστές άντωσης και οπισθέλκουσας που μπορούν να βρεθούν σε πειράματα που διεξάγονται με τη βοήθεια αεροσήραγγας. Στα πειράματα αυτά, οι δυνάμεις άντωσης και οι δυνάμεις οπισθέλκουσας της σταθερής αεροτομής μετρούνται από

ορισμένους μετατροπείς που βρίσκονται στο κατακόρυφο και οριζόντιο επίπεδο.

Οι δυνάμεις άντωσης και οπισθέλκουσας σε μια αεροτομή επηρεάζονται από τη γωνία προσβολής, α , η οποία είναι η γωνία μεταξύ της αδιατάρακτης διεύθυνσης του ανέμου και της χορδής της αεροτομής. Για παράδειγμα, η επίδραση της γωνίας προσβολής στον συντελεστή άντωσης μιας αεροτομής καταδεικνύεται στο σχήμα 4.5. Όπως φαίνεται, ο συντελεστής άντωσης αυξάνεται με το α και φτάνει στη μέγιστη τιμή σε μια ορισμένη γωνία προσβολής (12° σε αυτό το παράδειγμα). Μετά το συγκεκριμένο σημείο αυτό, ο συντελεστής άντωσης μειώνεται γρήγορα με περαιτέρω αύξηση του α λόγω της εισόδου της ροής του αέρα σε τυρβώδη περιοχή που διαχωρίζει τα οριακά στρώματα από την αεροτομή. Επομένως, η δύναμη οπισθέλκουσας αυξάνεται γρήγορα και η δύναμη άντωσης μειώνεται σε αυτή τη περιοχή.



Σχήμα 4.5 Επίδραση της γωνίας προσβολής στην άντωση της αεροτομής

4.3 Αιολική Ισχύς

Η κινητική ενέργεια του αέρα μπορεί να γραφεί ως:

$$E = \frac{1}{2}mV^2$$

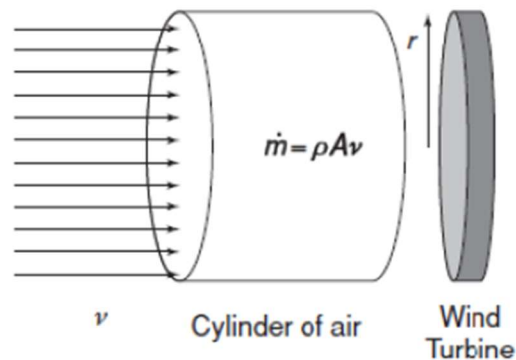
Όπου m η μάζα (kg) και V η ταχύτητα (m/s).

Ο όγκος του αέρα που ρέει μέσω του ρότορα στους στροβίλους HAWT είναι κυλινδρικός (σχήμα 4.6). Ως εκ τούτου, η ενέργεια ανά δευτερόλεπτο μπορεί να οριστεί ως εξής:

$$\dot{E} = \frac{1}{2}\dot{m}V^2$$

$$\dot{m} = \rho AV$$

Όπου A το εμβαδόν της διατομής του κυλίνδρου και ισούται με $A = \pi R^2$.



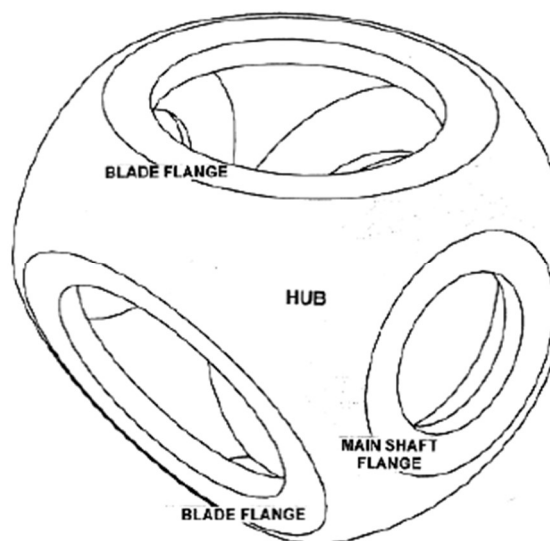
Σχήμα 4.6 Όγκος αέρα μπροστά από τον ρότορα

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ισχύς ορίζεται ως το ποσοστό της αιολικής ενέργειας που διέρχεται από μια περιοχή ανά μονάδα χρόνου, που σημαίνει:

$$P = \dot{E} = \frac{1}{2} \rho AV^3$$

4.4 Πλήμνη Ρότορα

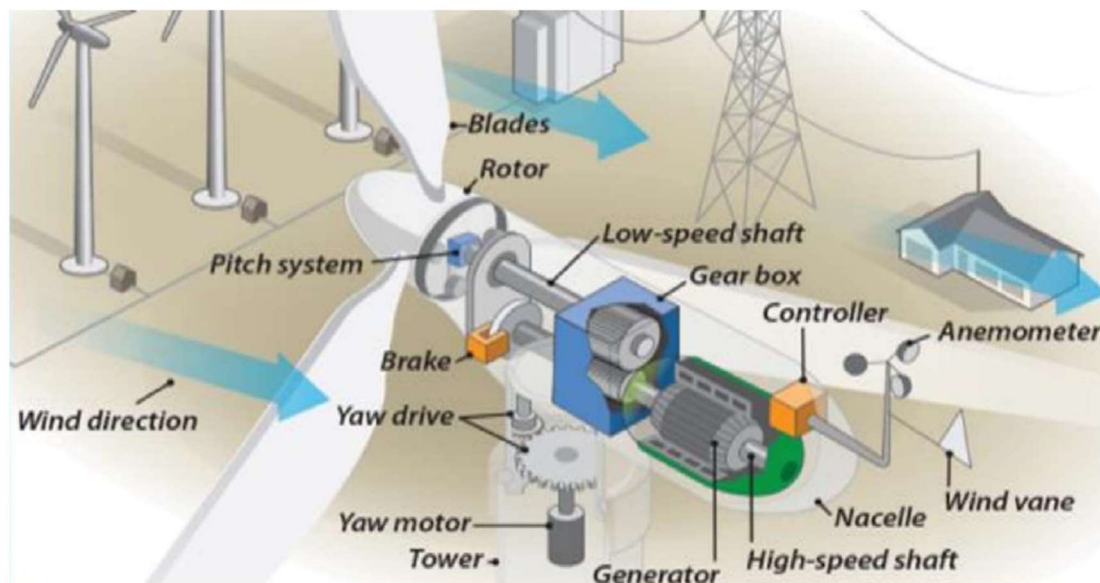
Το επόμενο σημαντικό εξάρτημα του ρότορα που στερεώνει τα πτερύγια σε αυτόν ονομάζεται πλήμνη, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.7. Το τμήμα αυτό μεταφέρει τα φορτία των πτερυγίων στο σύστημα κίνησης στην άτρακτο μέσω άξονα χαμηλής ταχύτητας. Ο τύπος της πλήμνης εξαρτάται από τις ροπές και τις δυνάμεις που μεταδίδονται στο δρομέα.



Σχήμα 4.7 Πλήμνη ρότορα

4.5 Άτρακτος

Η άτρακτος βρίσκεται στην κορυφή ενός πύργου ανεμογεννήτριας και προστατεύει τα ηλεκτρικά και μηχανικά εξαρτήματα της ανεμογεννήτριας, όπως το κιβώτιο ταχυτήτων, τη γεννήτρια, τα φρένα και τον κύριο άξονα από τις καιρικές συνθήκες, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Η άτρακτος είναι συνήθως κατασκευασμένη από ελαφρύ υλικό, όπως το υαλοβάμβακα.



Σχήμα 4.8 Εξαρτήματα Ατράκτου

Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.8, ο άξονας χαμηλής ταχύτητας (κύριος άξονας) μεταφέρει την περιστροφική ενέργεια από την πλήμνη του ρότορα στο κιβώτιο ταχυτήτων ή απευθείας στη γεννήτρια, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, ο κύριος άξονας μεταφέρει τα αεροδυναμικά, βαρυτικά και δυναμικά φορτία του ρότορα στην άτρακτο, εξασφαλίζοντας τη σταθερότητα και την ασφάλεια του ρότορα.

Ο κύριος σκοπός του κιβωτίου ταχυτήτων είναι η αύξηση της χαμηλής ταχύτητας του κύριου άξονα στην ταχύτητα που απαιτείται για τη γεννήτρια. Οι μεγάλες ανεμογεννήτριες συνήθως περιστρέφονται με χαμηλή ταχύτητα (15-30 στροφές ανά λεπτό), οπότε το κιβώτιο ταχυτήτων πρέπει να αυξάνει την ταχύτητα αυτή σε διάφορα στάδια. Επίσης, τα κιβώτια ταχυτήτων στις μεγάλες ανεμογεννήτριες χρειάζονται σύστημα ψύξης για την αποτελεσματική λίπανση και ψύξη των γραναζιών.

Το σύστημα προστασίας περιλαμβάνει το σύστημα πέδησης, το οποίο αποτελείται από δύο ανεξάρτητα υποσυστήματα: ένα αεροδυναμικό σύστημα πέδησης και ένα μηχανικό σύστημα πέδησης. Το αεροδυναμικό σύστημα πέδησης ελέγχει τις άκρες των πτερυγίων ή την κλίση ολόκληρου του

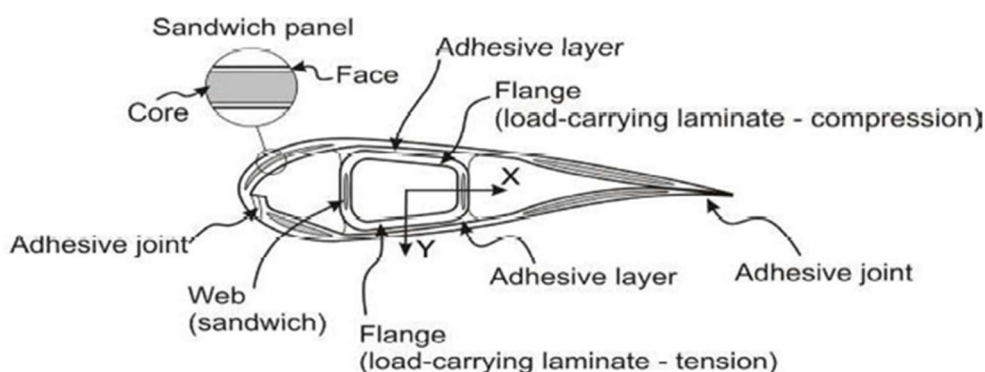
πτερυγίου του ρότορα. Τα μηχανικά φρένα χρησιμοποιούνται ως εφεδρικό σύστημα και αποτελούνται από δαγκάνες, δίσκους και τακάκια φρένων.

Η γεννήτρια της ανεμογεννήτριας μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια του άξονα σε ηλεκτρική ενέργεια. Καθώς τα πτερύγια μεταφέρουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε περιστροφική ενέργεια στο σύστημα μεταφοράς, η γεννήτρια εξασφαλίζει το επόμενο βήμα στην παροχή ενέργειας από την ανεμογεννήτρια στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Ο μηχανισμός εκτροπής ευθυγραμμίζει τον ρότορα κάθετα προς τη διεύθυνση του ανέμου. Υπάρχουν δύο τύποι μηχανισμών εκτροπής: ο παθητικός και ο ενεργός. Ο παθητικός μηχανισμός εκτροπής χρησιμοποιείται σε μικρές ανεμογεννήτριες και σε ανεμογεννήτριες κατά τον άνεμο, ενώ ο ενεργητικός μηχανισμός εκτροπής, που χρησιμοποιείται στις περισσότερες ανεμογεννήτριες με ανοδικό άνεμο, ελέγχει και παρακολουθεί την εκτροπή μέσω ηλεκτρομηχανικής κίνησης και συστήματος ελέγχου.

4.6 Επιλογή Υλικών για λεπίδα ανεμογεννήτριας

Στις σύγχρονες βιομηχανίες ανεμογεννητριών, πραγματοποιούνται μελέτες για την αύξηση της αποδοτικότητας των ανεμογεννητριών. Αυτό έχει οδηγήσει σε καινοτόμους σχεδιασμούς λεπίδων με προηγμένα συστήματα υλικών (όπως φαίνεται στο σχήμα 4.9), με στόχο την ανάπτυξη των μελλοντικών δομών των λεπίδων. Εξετάζονται εναλλακτικά συστήματα υλικών με βελτιωμένες ιδιότητες, όπως χαμηλότερη πυκνότητα, μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, υψηλότερη απόδοση, ευκολότερη επεξεργασία, δυνατότητα ανακύκλωσης και χαμηλότερο κόστος σε σύγκριση με την υπάρχουσα τεχνολογία των θερμοσκληρυνόμενων υλικών. Η δομή των λεπίδων που βασίζεται σε αυτό το νέο σύστημα υλικών επιτυγχάνει βέλτιστες αεροδυναμικές επιδόσεις, μειώνοντας τις βαρυτικές δυνάμεις και την υποβάθμιση του υλικού κατά τη διάρκεια της λειτουργίας, κάτι που με τη σειρά του οδηγεί σε βελτιωμένο κύκλο ζωής. Για να καλυφθεί αυτή η ανάγκη, είναι απαραίτητη η χρήση προηγμένων λεπίδων που διαθέτουν επαρκή ακαμψία, αντοχή και αυξημένη ανθεκτικότητα στην κόπωση.



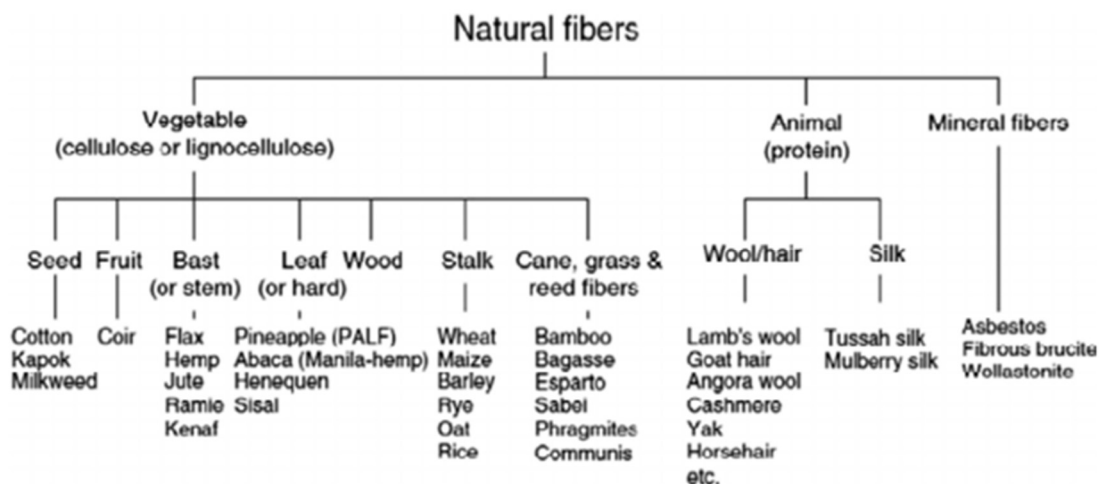
Σχήμα 4.9 Σχηματικό διάγραμμα λεπίδας ανεμογεννήτριας

Τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται για τις λεπίδες ανεμογεννητριών αποτελούνται από πολυμερή ενισχυμένα με ίνες, με την παραλλαγή τόσο των ινών όσο και του πολυμερούς να προσδίδει στα σύνθετα αυτά υλικά διαφορετικές ιδιότητες. Έχουν διεξαχθεί μελέτες για να προσδιοριστούν οι ιδιότητες αυτών των πολυμερών ενισχυμένων με ίνες με διαφορετικές συνθέσεις. Στην τρέχουσα παραγωγή, οι ίνες που χρησιμοποιούνται κυρίως είναι ίνες άνθρακα και υάλου, συνδυασμένες με θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή λόγω της αντοχής τους. Ωστόσο, η ανακύκλωση αυτών των υλικών είναι περίπλοκη.

Η εισαγωγή προηγμένων υλικών, όπως τα φυσικά σύνθετα υλικά, που διαθέτουν υψηλή ειδική αντοχή, χαμηλό κόστος, μικρό βάρος και δυνατότητα ανακύκλωσης, τα καθιστά ανώτερη επιλογή σε σχέση με τα σημερινά συνθετικά σύνθετα υλικά. Τα σύνθετα υλικά με θερμοπλαστικό πολυμερές είναι πιο φιλικά προς το περιβάλλον, καθώς είναι βιοδιασπώμενα, αν και η επεξεργασία τους είναι πιο περίπλοκη σε σύγκριση με τα σύνθετα υλικά από θερμοσκληρυνόμενο πολυμερές.

Ο συνδυασμός ενός ή περισσότερων υλικών με ίνες σε ένα σύνθετο υλικό το καθιστά υβριδικό, με προηγμένες ιδιότητες σε σχέση με τα σύνθετα υλικά που αποτελούνται από ένα μόνο υλικό. Σε αυτά, η σύνδεση μεταξύ των ινών και της ρητίνης παίζει καθοριστικό ρόλο. Η ενσωμάτωση νανοϋλικών σε σύνθετα υλικά προσδίδει στο τελικό προϊόν εξαιρετικές ιδιότητες, καθιστώντας τα νανοσύνθετα υλικά μια επιθυμητή επιλογή για τις λεπίδες των ανεμογεννητριών λόγω του χαμηλού βάρους, της υψηλής αντοχής και άλλων "έξυπνων" ιδιοτήτων.

Το υλικό που θα επιλεγεί για την κατασκευή των λεπίδων ανεμογεννητριών πρέπει να διαθέτει ανώτερες ιδιότητες στατικής συμπίεσης και αντοχής στην κόπωση σε σύγκριση με τα σύνθετα υλικά από γυαλί και πολυεστέρα. Οι φυσικές ίνες έχουν γίνει δημοφιλής επιλογή για την ενίσχυση των πολυμερών ενισχυμένων με ίνες (FRP), λόγω των επιθυμητών ιδιοτήτων τους, όπως το χαμηλό κόστος, οι μηχανικές τους ιδιότητες, η υψηλή ειδική αντοχή, η τραχύτητα και η φιλικότητά τους προς το περιβάλλον. Υπάρχουν διάφοροι τύποι φυσικών ινών που προέρχονται από φυτά, ζώα και ορυκτά. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η ταξινόμηση αυτών των φυσικών ινών.



Σχήμα 4.10 Ταξινόμηση φυσικών ινών

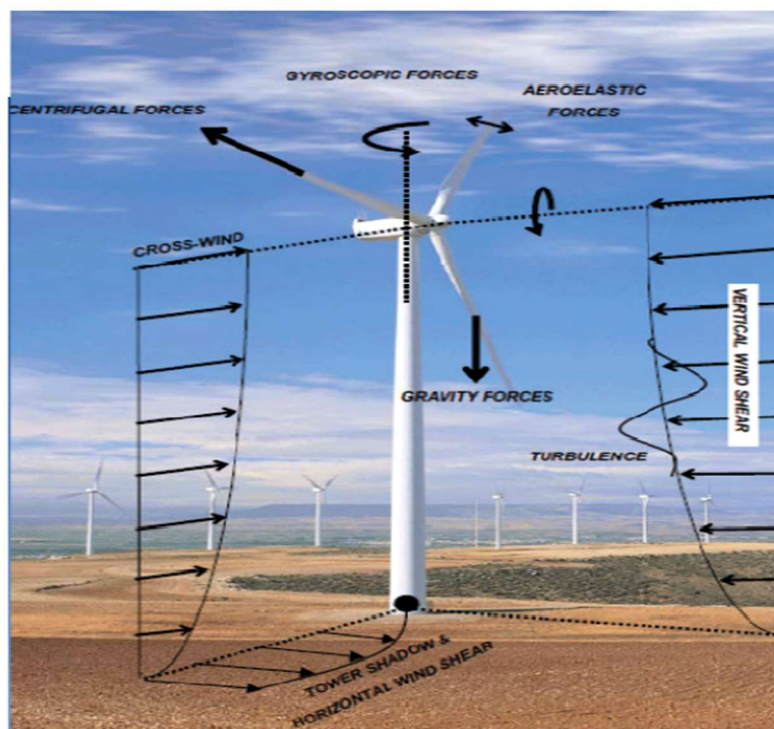
Οι βιομηχανίες ανεμογεννητριών χρησιμοποιούν κυρίως θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή λόγω της υψηλής αντοχής, της ακαμψίας και της ευκολίας επεξεργασίας που προσφέρουν. Παρά τα πλεονεκτήματα αυτά, τα συγκεκριμένα υλικά έχουν και κάποια μειονεκτήματα, όπως η εκπομπή στυρενίου κατά την επεξεργασία τους και το πρόβλημα της απόρριψής τους μετά το τέλος του κύκλου ζωής των λεπίδων. Σε αντίθεση, τα θερμοπλαστικά πολυμερή παρουσιάζουν τη δυνατότητα ανακύκλωσης και επισκευής, καθώς μπορούν να αλλάξουν φάση με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Ο K. Vijaya Kumar συνέκρινε τις μηχανικές ιδιότητες του ινοπλισμένου πολυπροπυλενίου με το ινοπλισμένο εποξειδικό και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι τα θερμοπλαστικά FRP έχουν 7 έως 8 φορές μικρότερη αντοχή σε σύγκριση με τα θερμοσκληρυνόμενα FRP. Παρ' όλα αυτά, η χρήση εναλλακτικών θερμοπλαστικών υλικών, όπως το πολυαιθερίδιο (PEI), η πολυαιθεροκετόνη (PEEK) και το σουλφίδιο του πολυφαινυλενίου (PPS), παρουσιάζει βελτιωμένες ιδιότητες αντοχής, καθιστώντας τα μια καλύτερη επιλογή για τις λεπίδες ανεμογεννητριών.

5. Φορτία στην λεπίδα της ανεμογεννήτριας

Το κύριο αίτιο των περισσότερων φορτίων σε μια ανεμογεννήτρια είναι η ταχύτητα του αέρα η οποία μπορεί να έχει τυχαίες ιδιότητες και μπορεί να προσδιοριστεί από πολλούς παράγοντες όπως οι γεωγραφικές και καιρικές συνθήκες. Επομένως, το φορτίο του αέρα έχει έναν σημαντικό ρόλο στον σχεδιασμό της ανεμογεννήτριας.

Αεροδυναμικά, βαρυτικά και αδρανειακά φορτία είναι η κύρια πηγή φόρτου στην ανεμογεννήτρια καθώς και αλλά φορτία που προκύπτουν κατά τη διάρκεια λειτουργίας της ανεμογεννήτριας. Το σχήμα 5.1 παρουσιάζει όλα τα φορτία μιας ανεμογεννήτριας



Σχήμα 5.1 Φορτία σε μια ανεμογεννήτρια

5.1 Αεροδυναμικά Φορτία

Τα αεροδυναμικά φορτία προκαλούνται από τη ροή του αέρα όταν αυτός περνάει από τις λεπίδες των ανεμογεννητριών και τον πύργο, έτσι, τα αεροδυναμικά φορτία μπορούν να διαχωριστούν σε αεροδυναμικά φορτία κατά μήκος των ελπίδων (άντωση και οπισθέλκουσα), και αεροδυναμική οπισθέλκουσα δύναμη στον πύργο η οποία ορίζεται ως:

$$F_D = 0.5\rho C_D AV^2$$

Όπου C_D ο συντελεστής της οπισθέλκουσας και A είναι η προβαλλόμενη επιφάνεια κάθετα στη ροή. Επιπλέον, σε καταστάσεις υψηλής ταχύτητας ανέμου, όταν μια ανεμογεννήτρια είναι ακίνητη, οι οπισθέλκουσες δυνάμεις είναι το κύριο πρόβλημα σε αντίθεση με όταν η ανεμογεννήτρια είναι σε λειτουργία, όπου το κύριο πρόβλημα είναι οι δυνάμεις άντωσης.

5.2 Βαρυτικά Φορτία

Τα βαρυτικά φορτία είναι μια σημαντική πηγή φορτίων η οποία μπορεί να ασκήσει μεγάλες καταπονήσεις κόπωσης στον ρότορα και στον πύργο. Όταν οι διαστάσεις της ανεμογεννήτριας μεγαλώνουν, το βάρος της δομής γίνεται το

κύριο πρόβλημα σε σχέση με την αντοχή. Οι δυνάμεις βαρύτητας δίνονται απλά από τον εξής τύπο:

$$F_{g_{rot}} = \sum_{i=1}^n m_i g$$

Όπου m_i η μάζα του i -οστού στοιχείου λεπίδας και $g = 9.82 \text{ m/s}^2$

Η βαρύτητα του πύργου ισούται με:

$$F_{g_{tower}} = m_{tower} g$$

5.3 Φυγοκεντρικά φορτία

Η επίδραση των αδρανειακών δυνάμεων στη μάζα των λεπίδων που οδηγεί τις ροπές να προκαλέσουν κλίση στις λεπίδες ονομάζεται φυγοκεντρικό φορτίο. Λόγω της χαμηλής ταχύτητας περιστροφής των ροτόρων στις μεγάλες ανεμογεννήτριες, οι φυγοκεντρικές δυνάμεις δεν είναι πολύ σημαντικές. Σε ορισμένους ρότορες, ωστόσο, οι λεπίδες περιστρέφονται σε κατεύθυνση εκτός του επιπέδου περιστροφής, γεγονός που προκαλεί τη γωνία του κώνου μεταξύ των λεπίδων και των ταχυτήτων περιστροφής. Τα φυγοκεντρικά φορτία στο ρότορα ισούνται με:

$$F_c = \sum_{i=1}^n m_i r_i \omega^2$$

Όπου m_i η μάζα του i -οστού στοιχείου λεπίδας, r_i η ακτινική θέση του i -οστού στοιχείου λεπίδας σε μια διακριτοποίηση της λεπίδας σε n στοιχεία και ω είναι η γωνιακή ταχύτητα του ρότορα.

5.4 Γυροσκοπικά Φορτία

Τα γυροσκοπικά φορτία προκύπτουν από την περιστροφή του ρότορα όταν αυτός στρέφεται προς την κατεύθυνση του ανέμου. Ένας γρήγορος ρυθμός εκτροπής μπορεί να δημιουργήσει μεγάλες γυροσκοπικές ροπές, οι οποίες εμφανίζονται ως ροπές κλίσης στον άξονα του δρομέα. Ωστόσο, στις οριζόντιες ανεμογεννήτριες, οι ρυθμοί εκτροπής είναι συνήθως χαμηλοί λόγω της χρήσης ενεργών μηχανισμών εκτροπής, ενώ στις ανεμογεννήτριες με παθητική εκτροπή, οι γυροσκοπικές δυνάμεις αποτελούν σημαντικό πρόβλημα.

Ο ρότορας χρειάζεται επίσης να αντιδράσει πολύ γρήγορα όταν οι διευθύνσεις του ανέμου αλλάζουν απότομα κατά τη διάρκεια χαμηλών ταχυτήτων ανέμου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι λεπίδες του ρότορα, σε αυτή την κατάσταση, να υφίστανται έντονα φορτία κάμψης. Αυτός είναι ένας ακόμη λόγος για τον οποίο ο παθητικός μηχανισμός εκτροπής χρησιμοποιούνταν στις προσήνεμες ανεμογεννήτριες, οι οποίες ωστόσο δεν κατασκευάζονται πλέον.

5.5 Αναταράξεις Ανέμου

Η τύρβη του ανέμου αναφέρεται στις διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου σε μικρά χρονικά διαστήματα, οι οποίες δημιουργούν δυναμικά φορτία στις ανεμογεννήτριες. Αυτά τα φορτία μπορούν να επηρεάσουν τις ανεμογεννήτριες, ιδίως τις λεπίδες του ρότορα, λόγω της αυξημένης τύρβης όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι σημαντικά υψηλή. Είναι χρήσιμο να

σκεφτούμε τον άνεμο ως μια μέση ταχύτητα που μεταβάλλεται σε χρονική κλίμακα μιας ή περισσότερων ωρών. Η ταχύτητα του ανέμου μεταβάλλεται φυσικά σε τρεις κατευθύνσεις: διαμήκη, κατακόρυφη και πλευρική. Παρόλα αυτά, το μοντέλο τύρβης συνήθως υποθέτει ότι η τύρβη μεταβάλλεται μόνο στη διαμήκη κατεύθυνση, λόγω της δυσκολίας στον αριθμητικό χειρισμό δύο διαστάσεων και της σημαντικής επιρροής της διαμήκου τύρβης στην περιοχή που σαρώνεται από τον ρότορα.

Η κύρια παράμετρος της τύρβης είναι η ένταση, η οποία μετρά την ταχεία αλλαγή στην ταχύτητα του ανέμου σε μικρά χρονικά διαστήματα:

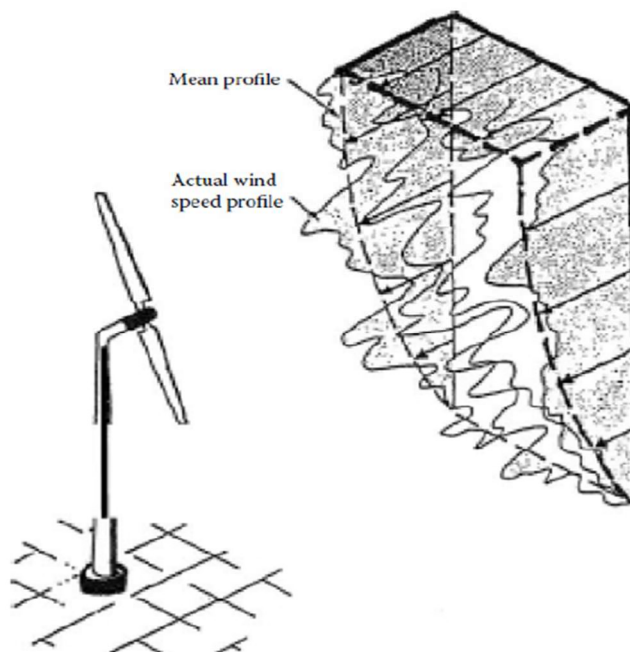
$$I = \frac{\sigma_u}{\bar{u}}$$

Όπου \bar{u} είναι η μέση ταχύτητα του ανέμου και σ_u είναι η αναλογία της τυπικής απόκλισης στο ίδιο σημείο και κατά μέσο όρο για την ίδια χρονική περίοδο.

Γενικά, οι υψηλότερες εντάσεις τύρβης εμφανίζονται στις χαμηλότερες ταχύτητες ανέμου, ωστόσο η ελάχιστη τιμή της έντασης τύρβης σε μια δεδομένη θέση εξαρτάται από συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του εδάφους και τις συνθήκες επιφάνειας της συγκεκριμένης τοποθεσίας..

5.6 Διάτμηση Ανέμου

Η διάτμηση του ανέμου είναι ένα μετεωρολογικό φαινόμενο που περιγράφει τις μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου ανάλογα με το ύψος. Η ταχύτητα του ανέμου κοντά στην επιφάνεια του εδάφους θεωρείται μηδενική λόγω της τριβής της ροής του αέρα με το έδαφος. Ως αποτέλεσμα, ο ρυθμός αύξησης της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα για τον σχεδιασμό εγκαταστάσεων αιολικής ενέργειας. Στο Σχήμα 5.2 απεικονίζονται οι μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου σε σχέση με το ύψος.

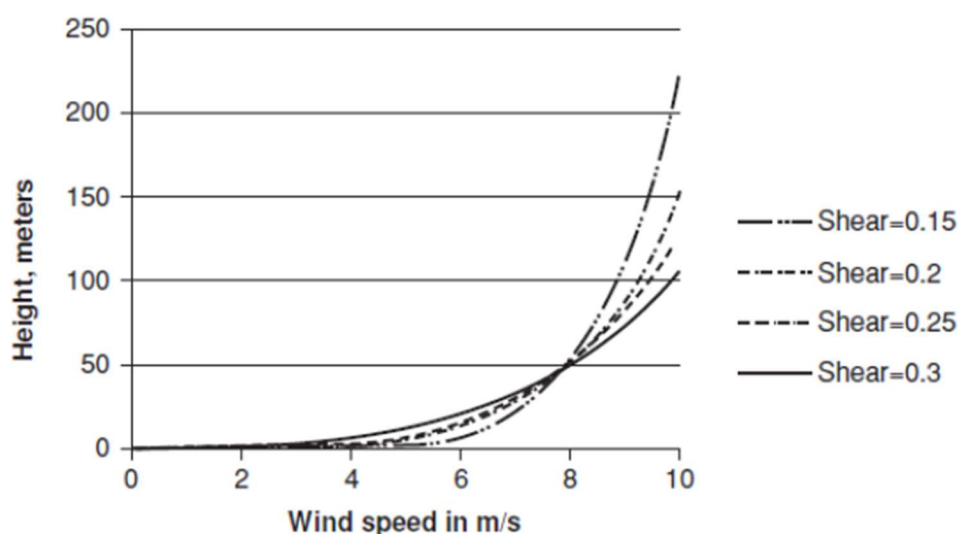


Σχήμα 5.2 Ροή ανέμου σε οριακό στρώμα

Ο νόμος της δύναμης είναι η πιο συνηθισμένη μέθοδος για την περιγραφή της μέσης ταχύτητας ανέμου σε συνάρτηση με το ύψος h πάνω από το έδαφος, ο οποίος ορίζεται ως εξής:

$$\frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^a$$

Όπου V_2 και V_1 οι ταχύτητες ανέμου σε ύψη h_2 και h_1 , και a είναι ο συντελεστής διάτμησης ανέμου που εξαρτάται από ορισμένους παραγοντες, όπως το υψος, ο χρόνος και οι τοποθεσίες. Ο συντελεστής αυτός κυμαίνεται συνήθως σε τιμές 0.15-0.3, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.3.



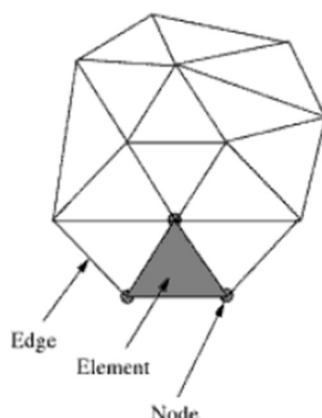
Σχήμα 5.3 Ταχύτητα του ανέμου σε σχέση με το ύψος για διαφορετικές τιμές της διάτμησης, η μέση ταχύτητα του ανέμου δίνεται 8 m/s στα 50 m

6. Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method, FEM)

6.1 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM)

Η FEM είναι μια από τις πιο ισχυρές αριθμητικές μεθόδους για την επίλυση των μερικών διαφορικών εξισώσεων που εμφανίζονται σε προβλήματα μηχανικής. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζει ένα πρόβλημα μεταβολής που περιλαμβάνει ένα ολοκλήρωμα της διαφορικής εξίσωσης στο πεδίο του μοντέλου. Το πεδίο αυτό διαιρείται σε πεπερασμένο αριθμό υποπεριοχών που ονομάζονται στοιχεία και τα στοιχεία συνδέονται μεταξύ τους σε σημεία που ονομάζονται κόμβοι. Οι υποπεριοχές μπορούν να επιλυθούν με τον καθορισμό προσεγγιστικής παρεμβολής ή συναρτήσεων σχήματος για κάθε στοιχείο. Οι συναρτήσεις αυτές πρέπει να είναι ένα πλήρες σύνολο πολυωνύμων τα οποία μπορεί να είναι γραμμικά, τετραγωνικά η ανώτερης τάξης. Όταν οι πολυωνυμικές συναρτήσεις όλων των στοιχείων είναι γνωστές, τότε

τοποθετούνται μαζί προκειμένου να βρεθεί μια λύση για ολόκληρη την περιοχή.



Σχήμα 6.1 Τυπικό πλέγμα πετερασμένων στοιχείων (δυσ διαστάσεων)

Τα κυριότερα βήματα στην FEM είναι:

1. Να βρεθεί η ισχυρή μορφή της διαφορικής εξίσωσης που διέπει στο σύστημα.
2. Μετατροπή της ισχυρής μορφής της εξίσωσης στην ασθενή της μορφή.
3. Επιλογή καταλλήλων συναρτήσεων παρεμβολής (σχήματος).
4. Επιλογή συναρτήσεων βάρους και ορισμός αλγεβρικών εξισώσεων κάθε στοιχείο.
5. Λαμβάνεται το συνολικό σύστημα πινάκων των εξισώσεων μέσω της συγκέντρωσης όλων των στοιχείων.
6. Επιβολή οριακών συνθηκών.
7. Επίλυση του συστήματος των αλγεβρικών εξισώσεων.
8. Επεξεργασία των αποτελεσμάτων

6.2. Υπολογιστική Δυναμική Ρευστών (Computational Fluid Dynamics, CFD)

Η CFD είναι μια αριθμητική μέθοδος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της ροής ρευστών, της μεταφοράς θερμότητας και των χημικών αντιδράσεων σε πολύπλοκα συστήματα. Η CFD έχει εφαρμοστεί ευρύτερα σε βιομηχανικούς και μη βιομηχανικούς τομείς λόγω μικρότερων χρόνων και κόστους που χρειάζεται για το σχεδιασμό μοντέλων. Προκειμένου να αναλυθεί ένα πρόβλημα ρευστού με CFD, πρέπει να λάβουμε τις μαθηματικές εξισώσεις που περιγράφουν τη συμπεριφορά του ρευστού.

6.3 Κύριες εξισώσεις

Η δυναμική των ρευστών βασίζεται σε τρεις θεμελιώδεις φυσικές αρχές: Νόμος του Νεύτωνα (Ορμή), διατήρηση της μάζας, και διατήρηση της ενέργειας.

6.3.1 Διατήρηση της μάζας

Η διατήρηση της μάζας σημαίνει ότι ο ρυθμός ροής μάζας σε ένα στοιχείο ρευστού (όγκου) ισούται με το ρυθμό αύξησης της μάζας στο στοιχείο του ρευστού (όγκου), επομένως για ένα συμπίεστο ρευστό:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0$$

Όπου ρ η πυκνότητα του ρευστού και \mathbf{u} το διάνυσμα ταχύτητας σε καρτεσιανές συντεταγμένες.

Επίσης, η πυκνότητα ενός ασυμπίεστου ρευστού, όπως ένα υγρό, είναι σταθερή ($\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$), οπότε:

$$\text{div} \mathbf{u} = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Όπου u, v και w είναι οι συνιστώσες ταχύτητας του \mathbf{u} .

6.3.2 2^{ος} Νόμος του Νεύτωνα

Ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα δηλώνει ότι ο ρυθμός μεταβολής της ροής ισούται με το άθροισμα των δυνάμεων στα σωματίδια του ρευστού. Οι δυνάμεις μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε επιφανειακές δυνάμεις ως ξεχωριστούς όρους και σε δυνάμεις σώματος ως όρο πηγής. Στη συνέχεια, οι εξισώσεις ορμής σε τρεις κατευθύνσεις μπορούν να προκύψουν θεωρώντας τις τάσεις ως προς τις πιέσεις σε έναν όγκο ελέγχου. Επομένως, η εξίσωση ορμής στις συνιστώσες x, y, z ισούται με:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v} \mathbf{u}) = \frac{\partial(-p + \zeta_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \zeta_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \zeta_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (6.1)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = \frac{\partial \zeta_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial(-p + \zeta_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial \zeta_{zy}}{\partial z} + S_{My} \quad (6.2)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v} \mathbf{w}) = \frac{\partial \zeta_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \zeta_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(-p + \zeta_{zz})}{\partial z} + S_{Mz} \quad (6.3)$$

Όπου S_{Mx}, S_{My} και S_{Mz} είναι οι δυνάμεις του σώματος (όρος πηγής, για παράδειγμα η τιμή των δυνάμεων σώματος λόγω της βαρύτητας θα είναι: $S_{Mx} = 0, S_{My} = 0$ και $S_{Mz} = -\rho g$). Οι συνιστώσες των τάσεων προκύπτουν από τις εξισώσεις Navier – Stokes.

6.3.3 Εξίσωση ενέργειας

Η εξίσωση ενέργειας προκύπτει από τον πρώτο νόμο της θερμοδυναμικής, ο οποίος περιγράφει ότι ο ρυθμός μεταβολής της ενέργειας ενός σωματιδίου ρευστού είναι ίσος με τον ρυθμό προσθήκης ενέργειας στο σωματίδιο του

ρευστού συν το ρυθμό του έργου που επιτελείται πάνω στο σωματίδιο. Ως εκ τούτου, η εξίσωση της ενέργειας ισούται με:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho i)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho i \mathbf{u}) = & -p \operatorname{div} \mathbf{u} + \operatorname{div}(\mathbf{k} \operatorname{grad} \mathbf{T}) + \zeta_{xx} \frac{\partial u}{\partial x} + \zeta_{yx} \frac{\partial u}{\partial y} + \\ & \zeta_{zx} \frac{\partial u}{\partial z} + \zeta_{xy} \frac{\partial v}{\partial x} + \zeta_{yy} \frac{\partial v}{\partial y} + \zeta_{zy} \frac{\partial v}{\partial z} + \zeta_{xz} \frac{\partial w}{\partial x} \\ & + \zeta_{yz} \frac{\partial w}{\partial y} + \zeta_{zz} \frac{\partial w}{\partial z} + S_i \end{aligned}$$

Όπου i είναι η εσωτερική ενέργεια, \mathbf{T} είναι η θερμοκρασία, \mathbf{k} είναι η θερμική αγωγιμότητα, p η πίεση, u, v και w οι συνιστώσες ταχύτητας \mathbf{u} και S_i είναι ένας νέος ορος πηγής $S_i = S_E - \mathbf{u} S_K$ όπου S_E πηγή ενέργειας και S_K πηγή μηχανικής (κινητικής) ενέργειας.

Έτσι, η εξίσωση της ενέργειας για τα συμπιεστά ρευστά θα είναι:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho h_0)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho h_0 \mathbf{u}) = & \operatorname{div}(\mathbf{k} \operatorname{grad} \mathbf{T}) + \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial(u \zeta_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u \zeta_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u \zeta_{zx})}{\partial z} + \\ & \frac{\partial(u \zeta_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(u \zeta_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(u \zeta_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(u \zeta_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(u \zeta_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(u \zeta_{zz})}{\partial z} + S_h \end{aligned}$$

Όπου h_0 η ολική ειδική ενθαλπία και S_h η πηγή ενέργειας της ενθαλπίας.

6.3.4 Εξισώσεις Navier – Stokes

Υπάρχουν ακόμη κάποιες άγνωστες μεταβλητές, οι συνιστώσες ιξώδους τάσης, οι οποίες παραμένουν στις προηγούμενες εξισώσεις. Οι τιμές αυτές μπορούν να ληφθούν με την παρουσίαση του κατάλληλου μοντέλου το οποίο αναπαρίσταται ως συναρτήσεις του τοπικού ρυθμού της παραμόρφωσης για τις περισσότερες ροές ρευστών. Ο τοπικός ρυθμός παραμόρφωσης αποτελείται από το γραμμικό ρυθμό παραμόρφωσης και τον ογκομετρικό ρυθμό παραμόρφωσης σε τρισδιάστατες ροές. Ο νόμος του ιξώδους του Νεύτωνα για συμπιεζόμενες ροές που αποτελούνται από δυο σταθερά ιξώδη, το δυναμικό ιξώδες, μ , το οποίο σχετίζεται με τις γραμμικές παραμορφώσεις και το δεύτερο ιξώδες, λ , το οποίο σχετίζεται με τις ογκομετρικές παραμορφώσεις. Επομένως, οι έξι συνιστώσες ιξώδους τάσης είναι σταθερές και τρεις από αυτές είναι μεταβλητές. Οι συνιστώσες αυτές εξηγούνται ως εξής:

$$\begin{aligned} \zeta_{xx} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \operatorname{div} \mathbf{u}, \zeta_{yy} = 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} + \lambda \operatorname{div} \mathbf{u}, \zeta_{zz} = 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} + \lambda \operatorname{div} \mathbf{u} \\ \zeta_{xy} = \zeta_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right), \quad \zeta_{xz} = \zeta_{zx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \zeta_{yz} = \zeta_{zy} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (6.4)$$

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (6.4) με τις εξισώσεις (6.1), (6.2) και (6.3), καταλήγουμε στις εξισώσεις Navier – Stokes:

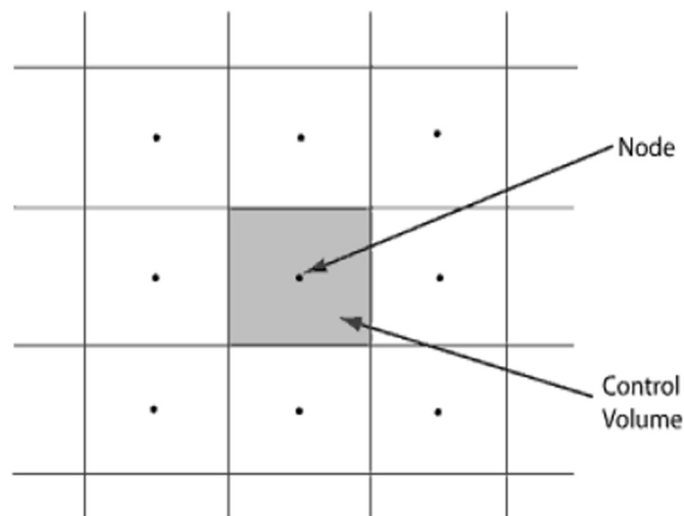
$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad} u) + S_{Mx} \quad (6.5)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v} \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad} v) + S_{My} \quad (6.6)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{w} \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad} w) + S_{Mz} \quad (6.7)$$

6.4 Μέθοδος Πεπερασμένου Όγκου (Finite Volume Method, FVM)

Η Μέθοδος Πεπερασμένου Όγκου (FVM) είναι η πιο δημοφιλής μέθοδος διακριτοποίησης στην CFD. Η μέθοδος αυτή διαιρεί τον κύριο τομέα σε όγκους ελέγχου και στη συνέχεια ολοκληρώνει τις εξισώσεις σε κάθε όγκο ελέγχου. Η μέθοδος FVM σε ορισμένα χαρακτηριστικά είναι παρόμοια με τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών ενώ η μορφή αποκριτοποίησης συνδέεται με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Η υπολογιστική προσπάθεια αυτής της μεθόδου είναι μεγαλύτερη από αυτή της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών και μικρότερη από τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων για μια παρόμοια ακρίβεια. Επιπλέον, το FVM βασίζεται στην μέση τιμή των κελιών, το οποίο έχει ορισμένα πλεονεκτήματα, πρώτον, η διατήρηση των ποσοτήτων (μάζα, ορμή, ενεργεία) παραμένει σταθερή σε τοπικές κλίμακες και, δεύτερον, οι πολύπλοκες γεωμετρίες μπορούν να πλεγματοποιηθούν.



Σχήμα 6.2 Τυπικό πλέγμα πεπερασμένου όγκου δυο διαστάσεων (ορθογώνιο πλέγμα)

Η γενική εξίσωση διατήρησης είναι:

$$\frac{\partial(\rho \phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho \phi \mathbf{u}) = \text{div}(\Gamma \text{grad} \phi) + S_{\phi} \quad (6.8)$$

Όπου ϕ είναι η ιδιότητα του ρευστού και Γ ο συντελεστής διάχυσης.

Με την ολοκλήρωση της εξίσωσης σε έναν όγκο ελέγχου η εξίσωση γίνεται

$$\int_{CV} \frac{\partial(\rho \phi)}{\partial t} dV + \int_{CV} \text{div}(\rho \phi \mathbf{u}) dV = \int_{CV} \text{div}(\Gamma \text{grad} \phi) dV + \int_{CV} S_{\phi} dV \quad (6.9)$$

Εφαρμόζοντας το θεώρημα απόκλισης του Gauss, η εξίσωση (6.9) μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\int_{CV} \rho \phi dV) + \int_A \mathbf{n} \cdot (\rho \phi \mathbf{u}) dA = \int_A \mathbf{n} \cdot (\Gamma \text{grad} \phi) dA + \int_{CV} S_\phi dV \quad (6.10)$$

Ο όρος αξιολόγησης αλλαγής της εξίσωσης (6.9) για τα προβλήματα σταθερής κατάστασης είναι ίσος με μηδέν, επομένως:

$$\int_A \mathbf{n} \cdot (\rho \phi \mathbf{u}) dA = \int_A \mathbf{n} \cdot (\Gamma \text{grad} \phi) dA + \int_{CV} S_\phi dV \quad (6.11)$$

Και για τα μεταβατικά προβλήματα, η εξίσωση θα είναι:

$$\begin{aligned} \int_{\Delta t} \frac{\partial}{\partial x} (\int_{CV} (\rho \phi) dV) dt + \int_{\Delta t} \int_A \mathbf{n} \cdot (\rho \phi \mathbf{u}) dA dt \\ = \int_{\Delta t} \int_A \mathbf{n} \cdot (\Gamma_\phi \text{grad} \phi) dA dt + \int_{\Delta t} \int_{CV} S_\phi dV dt \end{aligned} \quad (6.12)$$

6.5 Μοντελοποίηση Τύρβης

Η τυρβώδης ροή είναι ένας τύπος ροής ρευστού (αερίου ή υγρού) όταν η ταχύτητα και οι άλλες ιδιότητες του ρευστού αυξομειώνονται προς όλες τις κατευθύνσεις. Χρησιμοποιώντας το σύστημα Navier-Stokes για μια τυρβώδη ροή είναι εξαιρετικά δύσκολο λόγω του χρονοβόρων, μη γραμμικών και τρισδιάστατων εξισώσεων. Ως εκ τούτου, το σύστημα Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη εξίσωση για τον υπολογισμό βιομηχανικών ροών. Η RANS μπορεί να προκύψει από την εξίσωση Navier-Stokes λαμβάνοντας υπόψη τις μέσες ιδιότητες της ροής, όπως οι μέσες ταχύτητες, μέσες πιέσεις και μέσες τάσεις κ.λπ.

Οι εξισώσεις (6.5), (6.6) και (6.7) γίνονται:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \text{div}(\rho U U) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad} U) + \\ \left[-\frac{\partial(\overline{\rho u'^2})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{\rho u' v'})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{\rho u' w'})}{\partial z} \right] + S_{Mx} \end{aligned} \quad (6.13)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho V)}{\partial t} + \text{div}(\rho V U) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad} V) + \\ \left[-\frac{\partial(\overline{\rho u' v'})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{\rho v'^2})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{\rho v' w'})}{\partial z} \right] + S_{My} \end{aligned} \quad (6.14)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho W)}{\partial t} + \text{div}(\rho W U) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad} W) + \\ \left[-\frac{\partial(\overline{\rho u' w'})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{\rho v' w'})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{\rho w'^2})}{\partial z} \right] + S_{Mz} \end{aligned} \quad (6.15)$$

Τα πρόσθετα μέρη της εξίσωσης για τις συνιστώσες της μέσης ταχύτητας U, V και W είναι οι τυρβώδεις τάσεις που ονομάζονται τάσεις Reynolds.

Όπου:

$$\mathbf{U} = \mathbf{u} - \mathbf{u}', U = u - u', V = v - v', W = w - w', P = p - p'$$

u, v, w είναι οι συνιστώσες ταχύτητας του $\mathbf{u} - \mathbf{U}$, V, W είναι η συνιστώσες της μέσης ταχύτητας του $\mathbf{U} - \mathbf{u}'$, v', w' είναι οι κυμαινόμενες συνιστώσες ταχύτητας του \mathbf{u} και p' είναι η μέση και κυμαινόμενη συνιστώσα της πίεσης.

Οι τάσεις Reynolds μπορούν να ληφθούν από τους μέσους ρυθμούς παραμόρφωσης οι οποίες είναι ίσες με:

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (6.16)$$

Όπου μ_t είναι το τυρβώδες ιξώδες που καθορίζεται από διάφορα μοντέλα.

6.5.1 Μοντέλο Τύρβης k - ε

Το εξεταζόμενο μοντέλο για το ρευστό ελεύθερης ροής είναι το μοντέλο k - ε το οποίο έχει μία εξίσωση για την τυρβώδη κινητική ενέργεια, k, και μία εξίσωση για τον τυρβώδη ρυθμό διάχυσης, ε. Ως εκ τούτου, το ιξώδες τύρβης αυτού του μοντέλου μπορεί να προκύψει από την παρακάτω εξίσωση:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6.17)$$

Όπου C_μ μια αδιάστατη σταθερά, τα k και ε υπολογίζονται με τη βοήθεια των παρακάτω εξισώσεων:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k \mathbf{U}) = \text{div} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \text{grad} k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (6.18)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \varepsilon \mathbf{U}) = \text{div} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \text{grad} \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (6.19)$$

P_k είναι η παραγωγή τύρβης και $\sigma_k, \sigma_\varepsilon, C_{\varepsilon 1}$ και $C_{\varepsilon 2}$ είναι σταθερές και ίσες με:

$$\sigma_k = 1, \sigma_\varepsilon = 1.3, C_{\varepsilon 1} = 1.44, C_{\varepsilon 2} = 1.92$$

6.5.2 Μοντέλο Τύρβης k - ω

Αυτό το μοντέλο είναι κατάλληλο για τον υπολογισμό της τύρβης κοντά στον τοίχο. Το μοντέλο k - ω βασίζεται σε πρότυπες εξισώσεις μεταφοράς για την κινητική ενέργεια της τύρβης, k, και τον ειδικό ρυθμό διάχυσης, ω. Οι τιμές αυτές προκύπτουν από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k \mathbf{U}) = \text{div} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \text{grad} k \right] + P_k - \beta' \rho k \omega \quad (6.20)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \text{div}(\rho \omega \mathbf{U}) = \text{div} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \text{grad} \omega \right] + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2 \quad (6.21)$$

$\sigma_k, \sigma_\omega, \alpha, \beta$ και β' είναι σταθερές και ισούνται με:

$$\sigma_k = 1, \sigma_\omega = 2, \alpha = \frac{5}{9}, \beta = 0.075, \beta' = 0.09$$

Επομένως, το ιξώδες τύρβης αυτού του μοντέλου θα είναι:

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (6.22)$$

Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η χρήση του χαμηλού αριθμού Reynolds κοντά στο τοίχωμα και η ευκολότερη μοντελοποίηση που μας δίνει πιο ακριβή και πιο αξιόπιστα αποτελέσματα, αλλά το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η μεγάλη ευαισθησία στις συνθήκες της ελεύθερης ροής.

6.5.3 Μοντέλο Τύρβης Shear-Stress Transport (SST, Μεταφορά Διατμητικής Τάσης)

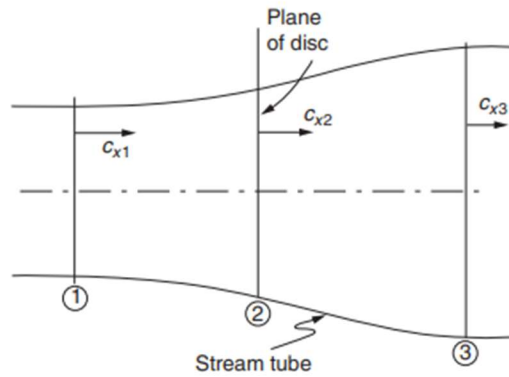
Το μοντέλο SST βασίζεται στο μοντέλο $k - \omega$ και έχει την ίδια αυτόματη επεξεργασία των τοιχωμάτων. Αυτό το μοντέλο συνδυάζει τις καλύτερες ιδιότητες του μοντέλου $k - \omega$ και του μοντέλου $k - \epsilon$, πράγμα που σημαίνει ότι γύρω από την περιοχή κοντά στο τοίχωμα χρησιμοποιείται το μοντέλο $k - \omega$ και στην ελεύθερη ροή χρησιμοποιείται το μοντέλο $k - \epsilon$ προκειμένου να ληφθούν καλύτερα αποτελέσματα.

7. Blade Element Momentum Theory (BEM)

Στις επόμενες σελίδες θα αναλυθεί η αεροδυναμική θεωρία των ανεμογεννητριών, ξεκινώντας από μια απλή μονοδιάστατη ανάλυση της κίνησης ενός κινητήριου δίσκου και έπειτα μια πιο αναλυτική ανάλυση του Blade Element Theory (BEM). Η κατάσταση της ροής ακριβώς πάνω από το επίπεδο του ρότορα σχηματίζει την ονομαζόμενη συνθήκη εισροής για τις λεπίδες του ρότορα, από την οποία μπορούν να καθοριστούν οι αεροδυναμικές δυνάμεις που ασκούνται στις λεπίδες. Η γνωστή μέθοδος BEM παρουσιάζεται και χρησιμοποιείται εκτενώς. Παρακάτω, θα περιγράψουν παραδείγματα που βοηθούν στην κατανόηση της μεθόδου. Η BEM βοηθάει στην απεικόνιση της επίδρασης διαφόρων παραγόντων όπως ο λόγος ταχύτητας ακρωπτερυγίων ανέμου και του αριθμού λεπίδων στην απόδοση.

7.1 Προσέγγιση Κινητήριου Δίσκου

Η ιδέα του κινητήριου δίσκου χρησιμοποιείται σαν μέθοδος προσδιορισμού των τρισδιάστατων ροών στον συμπιεστή και στις σειρές λεπίδων της τουρμπίνας. Για την αρχή της κατανόησης της ιδέας αυτής είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη το παρακάτω μοντέλο όπου ο ρότορας μιας οριζόντιας ανεμογεννήτριας (HAWT) αντικαθίσταται από έναν κινητήριο δίσκο.



Σχήμα 7.1 Μοντέλο κινητήριου δίσκου και σωλήνα οριακού ρεύματος

Είναι απαραίτητο να γίνουν ορισμένες παραδοχές όσον αφορά τη ροή:

- (i) Σταθερή και ομοιόμορφη ροή ανοδικά του δίσκου,
- (ii) Ομοιόμορφη και σταθερή ταχύτητα στον δίσκο
- (iii) Ο δίσκος δεν παράγει περιστροφικές κινήσεις στη ροή
- (iv) Η ροή που περνάει μέσα από τον δίσκο περικλείεται ανοδικά και καθοδικά από τον οριακό ροϊκό σωλήνα
- (v) Η ροή είναι ασυμπίεστη

Επειδή ο κινητήριος δίσκος προκαλεί αντίσταση στη ροή, η ταχύτητα του αέρα ελαττώνεται όσο πλησιάζει το δίσκο καθώς υπάρχει και μια αντίστοιχη αύξηση στην πίεση. Η ροή που περνάει μέσα από το δίσκο βιώνει μια ξαφνική πτώση στην πίεση, κάτω από την περιβαλλοντική πίεση. Αυτή η ασυνέχεια στην πίεση χαρακτηρίζει τον κινητήριο δίσκο. Καθοδικά του δίσκου υπάρχει μια σταδιακή ανάκαμψη της πίεσης στην περιβαλλοντική τιμή της.

Ορίζουμε τις αξονικές ταχύτητες της ροής ανοδικά του δίσκου ($x \rightarrow -\infty$), στον δίσκο ($x = 0$), και καθοδικά του δίσκου ($x \rightarrow \infty$), ως C_{x1} , C_{x2} και C_{x3} αντίστοιχα. Από την εξίσωση συνέχειας η ροή της μάζας είναι:

$$\dot{m} = \rho C_{x2} A_2 \quad (7.1)$$

Όπου ρ = πυκνότητα αέρα και A_2 = εμβαδον δίσκου

Η αξονική δύναμη που ασκείται στον δίσκο είναι:

$$X = \dot{m}(C_{x1} - C_{x3}) \quad (7.2)$$

Και η αντίστοιχη δύναμη που εξάγεται από την τουρμπίνα είναι:

$$P = X C_{x2} = \dot{m}(C_{x1} - C_{x3}) C_{x2} \quad (7.3)$$

Ο ρυθμός απώλειας της ενέργειας από τον αέρα θα είναι:

$$P_W = \dot{m}(C_{x1}^2 - C_{x3}^2)/2 \quad (7.4)$$

Με την υπόθεση ότι δεν υπάρχουν άλλες απώλειες ενέργειας, μπορούμε να εξισώσουμε την απώλεια ενέργειας από τον αέρα με το κέρδος ενέργειας από τον ρότορα του ρομπίνας η τον κινητήρα:

$$P_W = P,$$

$$\frac{\dot{m}(C_{x1}^2 - C_{x3}^2)}{2} = \dot{m}(C_{x1} - C_{x3})C_{x2},$$

Άρα,

$$C_{x2} = 1/2(C_{x1} + C_{x3}) \quad (7.5)$$

Αυτή η απόδειξη που αναπτύχθηκε από τον Betz (1926) για να φανεί ότι η ροή στο επίπεδο του κινητήριου δίσκου είναι το μέσο των ταχυτήτων ανοδικά και καθοδικά του δίσκου. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι έχει αγνοηθεί η ανάμειξη του περιβάλλοντα αέρα και του αέρα που μεταβάλλεται λόγω της ανεμογεννήτριας, που συνήθως προκύπτει καθοδικά του δίσκου.

Ένώνοντας τις εξισώσεις (7.1) και (7.3):

$$P = \rho A_2 C_{x2}^2 (C_{x1} - C_{x3})$$

Και από την εξίσωση (7.5) μπορούμε να πάρουμε:

$$C_{x3} = 2C_{x2} - C_{x1}$$

Άρα,

$$C_{x1} - C_{x3} = C_{x1} - 2C_{x2} + C_{x1} = 2(C_{x1} - C_{x2})$$

Επομένως,

$$P = 2\rho A_2 C_{x2}^2 (C_{x1} - C_{x2}) \quad (7.6)$$

Εδώ, είναι σημαντικό να ορίσουμε έναν συντελεστή επηρεασμού της αξονικής ροής, $\bar{\alpha}$ (αμεταβλητο ως προς την ακτινα), για τον κινητήριο δίσκο:

$$\bar{\alpha} = (C_{x1} - C_{x2})/C_{x1} \quad (7.7)$$

$$\text{Ή,} \quad C_{x2} = C_{x1}(1 - \bar{\alpha})$$

$$\text{Άρα,} \quad P = 2\bar{\alpha}\rho A_2 C_{x1}^3 (1 - \bar{\alpha})^2 \quad (7.8)$$

Συντελεστής ισχύος και αξονικής δύναμης

Για τον αδιατάραχτο αέρα (με ταχύτητα C_{x1}), με την ίδια επιφάνεια ροής όπως του δίσκου ($A_2 = \pi R^2$), η κινητική ενέργεια που παρέχει ο αέρας είναι:

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

Ο συντελεστής ισχύος C_p ορίζεται ως:

$$C_p = \frac{P}{P_0} = 4\bar{\alpha}(1 - \bar{\alpha})^2 \quad (7.9)$$

Η μέγιστη τιμή του C_p βρίσκεται παραγωγίζοντας το C_p ως προς το $\bar{\alpha}$:

$$dC_p/d\bar{\alpha} = 4(1 - \bar{\alpha})(1 - 3\bar{\alpha}) = 0$$

Το οποίο μας δίνει δυο ρίζες, $\bar{\alpha} = \frac{1}{3}$, και 1.0. Χρησιμοποιώντας την πρώτη τιμή, βρίσκεται η μέγιστη τιμή του συντελεστή ισχύος η οποία είναι:

$$C_{pmax} = \frac{16}{27} = 0.593 \quad (7.10)$$

Η τιμή αυτή του C_p αναφέρεται συχνά και ως οριο Betz (Betz limit), που είναι ουσιαστικά η μέγιστη δυνατή τιμή του συντελεστή ισχύος της τουρμπίνας (με τις προεγγραμμένες συνθήκες ροής).

Ένα ακόμα χρήσιμο μέγεθος μέτρησης της απόδοσης της ανεμογεννήτριας είναι ο λόγος του συντελεστή ισχύος C_p προς τον μέγιστο συντελεστή ισχύος C_{pmax} . Αυτός ο λόγος, που μπορεί να ονομαστεί συντελεστής σχετικής μέγιστης ισχύος, είναι:

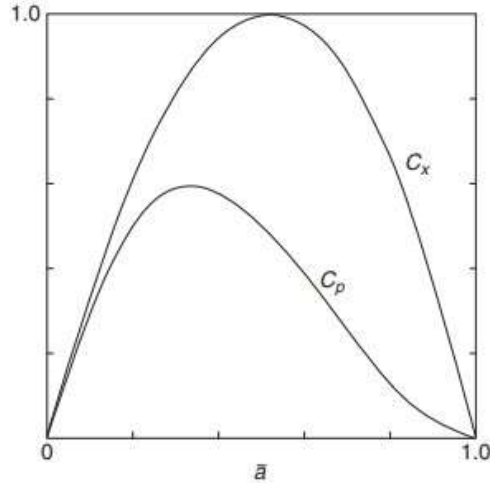
$$\zeta = 27/16C_p \quad (7.11)$$

Ο συντελεστής αξονικής δύναμης ορίζεται ως:

$$\begin{aligned} C_X &= X / \left(\frac{1}{2} \rho C_{x1}^2 A_2 \right) \\ &= 2\dot{m}(C_{x1} - C_{x2}) / \left(\frac{1}{2} \rho C_{x1}^2 A_2 \right) \\ &= 4C_{x2}(C_{x1} - C_{x2}) / C_{x1}^2 \\ &= 4\bar{\alpha}(1 - \bar{\alpha}) \end{aligned} \quad (7.12)$$

Παραγωγίζοντας αυτή την έκφραση ως προς $\bar{\alpha}$ μπορούμε να δείξουμε ότι το C_X έχει μέγιστη τιμή μονάδας για $\bar{\alpha} = 0.5$

Το σχήμα 7.2 παρουσιάζει την μεταβολή των C_p και C_X ως συναρτησεις του $\bar{\alpha}$



Σχήμα 7.2 Μεταβολή του συντελεστή ισχύος C_p και του συντελεστή αξονικής δύναμης C_x συναρτήσει του συντελεστή αξονικής επαγωγής a

7.2 Εκτίμηση ισχύς εξόδου

Αρχικές εκτιμήσεις για την διάμετρο του ρότορα μπορούν εύκολα να γίνουν με την χρήση της θεωρίας του κινητήριου δίσκου. Αρκετοί παράγοντες πρέπει να ληφθούν υπόψη, όπως τις συνθήκες του αέρα στις οποίες θα πρέπει να λειτουργήσει η γεννήτρια, και ο λόγος των ταχυτήτων στις άκρες των λεπίδων. Επίσης, διάφορες απώλειες πρέπει να ληφθούν υπόψη, εκ των οποίων οι κυριότερες είναι η μηχανική μετάδοση στην οποία συμπεριλαμβάνονται οι απώλειες του κιβωτίου ταχυτήτων και τις απώλειες από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Από την θεωρία του κινητήριου δίσκου, η αεροδυναμική ισχύς εξόδου της γεννήτριας είναι:

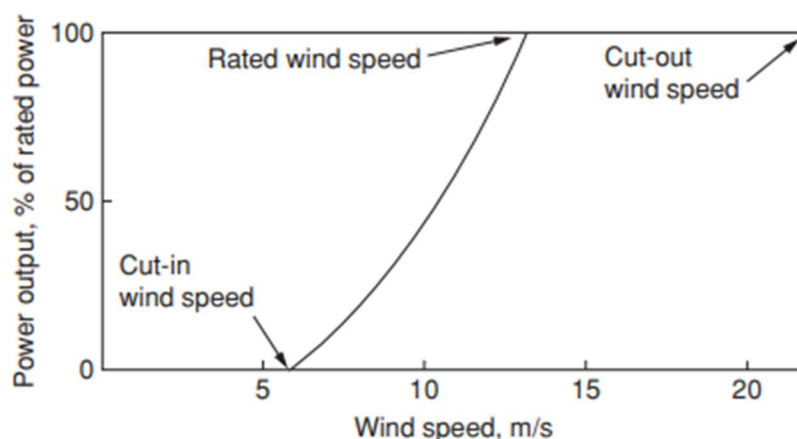
$$P = \frac{1}{2} \rho A_2 C_p C_{x1}^3 \quad (7.13)$$

(Υπό θεωρητικές ιδανικές συνθήκες όπου η μέγιστη τιμή του $C_p = 0.593$).

Σύμφωνα με τους Eggleston και Stoddard (1987), έχουν σημειωθεί τιμές C_p που φτάνουν έως και 0.45. Τέτοιες υψηλές, πραγματικές τιμές του C_p είναι δυνατές εξαιτίας των αεροτομών με μεγάλη ακρίβεια και λειότητα στις λεπίδες, καθώς και λόγους ταχυτήτων στις άκρες των λεπίδων πάνω από 10. Για τις περισσότερες μηχανές καλού σχεδιασμού, δυνατές τιμές του C_p θα κυμαίνονταν από 0.3 έως 0.35. Με μηχανικό βαθμό απόδοσης, η_d , και ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης, η_g , η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς θα είναι:

$$P_{ελ} = \frac{1}{2} \rho A_2 C_p \eta_g \eta_d C_{x1}^3$$

Η ιδανική ισχύς που παράγεται από μια ανεμογεννήτρια μπορεί επομένως να ποικίλει ως προς τον κύβο της ταχύτητας του αέρα. Το σχήμα 7.3 δείχνει την ιδανική καμπύλη ισχύος μιας ανεμογεννήτριας όπου ο παραπάνω «νόμος» για τον κύβο της ταχύτητας εφαρμόζεται ανάμεσα στην αρχική ταχύτητα όπου οι λεπίδες αρχίζουν να περιστρέφονται (cut-in wind speed) και στην ταχύτητα όπου η μέγιστη ισχύς επιτυγχάνεται για πρώτη φορά (rated wind speed).



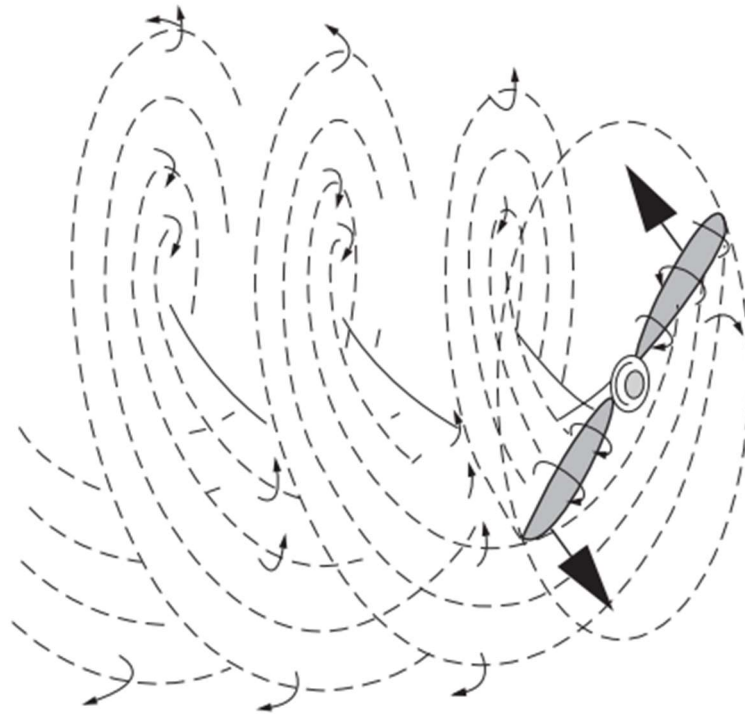
Σχήμα 7.3 Εξιδανικευμένη καμπύλη ισχύος για μια ανεμογεννήτρια

Σε ταχύτητες μεγαλύτερες από αυτήν που επιτυγχάνεται η μέγιστη ισχύς, για τις περισσότερες ανεμογεννήτριες, η ισχύς εξόδου διατηρείται σταθερή μέσω αεροδυναμικών ελέγχων. Η ταχύτητα αποκοπής (cut-out wind speed) είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα η οποία, αν επιτευχθεί, προκαλεί το σύστημα ελέγχου να ενεργοποιήσει τα φρένα, φέρνοντας έτσι τον ρότορα σε ανάπαυση.

7.3 Εισαγωγή στην BEM

Εδώ και πολύ καιρό αναγνωρίζεται το έργο του Glauert (1935) στην ανάπτυξη της θεμελιώδους θεωρίας των αεροτομών και των ελικοφόρων ως μια από τις πιο διάσημες αεροδυναμικές θεωρίες. Ο Glauert επίσης γενίκευσε την θεωρία για να την καταστήσει εφαρμόσιμη στις ανεμογεννήτριες, και με διάφορες τροποποιήσεις, εξακολουθεί να χρησιμοποιείται στον σχεδιασμό ανεμογεννητριών και συχνά αναφέρεται ως Θεωρία Στοιχειακών Πτερυγίων (Blade Element Theory). Ωστόσο, το αρχικό έργο παρέλειψε ένα σημαντικό παράγοντα: την περιοδικότητα της ροής που προκύπτει από το γεγονός ότι η ανεμογεννήτρια έχει έναν πεπερασμένο αριθμό λεπίδων. Ο Glauert υπέθετε ότι μπορούσαν να αναλυθούν ανεξάρτητα τα στοιχειώδη ακτινικά τμήματα των λεπίδων, κάτι που είναι έγκυρο μόνο για έναν ρότορα με άπειρο αριθμό λεπίδων. Παρ' όλα αυτά, με την βοήθεια διαφόρων προσεγγιστικών λύσεων (από Prandtl και Tietjens, 1957 και Goldstein, 1929) είναι δυνατή η διόρθωση των τιμών για πεπερασμένο αριθμό λεπίδων. Η απλούστερη και πιο συχνά χρησιμοποιούμενη από αυτές είναι ο παράγοντας διόρθωσης Prandtl, ο οποίος θα εξεταστεί αργότερα.

Για να υπάρξει μια καλύτερη κατανόηση της αεροδυναμικής μιας HAWT από αυτή της απλής θεωρίας του κινητήριου δίσκου, είναι σημαντικό να αναλυθούν οι δυνάμεις που ασκούνται στις λεπίδες. Θεωρούμε κάθε ακτινικό στοιχείο της λεπίδας ως μια αεροτομή.



Σχήμα 7.4 Σχηματική απεικόνιση του συστήματος στροβίλων που συγκλίνουν κατάντη ενός δρομέα ανεμογεννήτριας με δύο πτερύγια

Η ανεμογεννήτρια θεωρείται ότι έχει σταθερή γωνιακή ταχύτητα Ω και είναι τοποθετημένη υπό ομοιόμορφη ταχύτητα αέρα C_{x1} παραλληλη του άξονα της περιστροφής. Η δύναμη άντωσης που ασκείται σε κάθε στοιχείο πρέπει να έχει μια συσχετιζόμενη περιστροφή γύρω της λεπίδας. Στην ουσία υπάρχει μια γραμμική δίνη (η ένα σύνολο γραμμικών δινών) κατά μήκος του ανοίγματος της αεροτομής. Οι γραμμικές δίνες οι οποίες κινούνται μαζί με την αεροτομή ονομάζονται δεσμευμένες δίνες της αεροτομής. Καθώς η κυκλοφορία κατά μήκος της λεπίδας μπορεί να ποικίλλει, οπίσθιες δίνες θα ανυψωθούν από την λεπίδα και θα μεταφερθούν προς τα κάτω με τη ροή σε περίπου ελικοειδής διαδρομές, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα για ανεμογεννήτρια με δυο λεπίδες. Παρατηρείται ότι οι έλικες, όπως σχεδιάζονται, διαστέλλονται σταδιακά σε ακτίνα καθώς κινούνται προς τα κάτω και η κλίση μεταξύ κάθε φύλλου γίνεται μικρότερη λόγω της επιβράδυνσης της ροής.

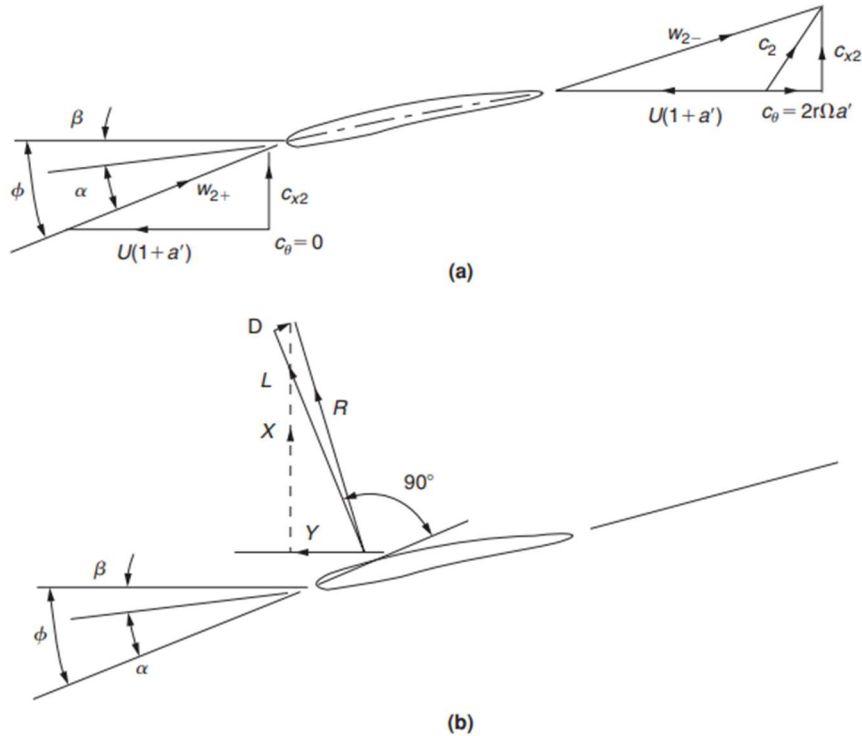
7.3.1 Ροπή, τ και Παράγοντας εισαγωγής εφαπτομενικής ροής, α'

Από τους νόμους κίνησης του Νεύτωνα, αποδεικνύεται ότι η ροπή που ασκείται στον άξονα της τουρμπίνας πρέπει να μεταφέρει ίση και αντίθετη ροπή στη ροή του αέρος, ίση με τον ρυθμό μεταβολής της γωνιακής ροπής της ροής. Δεν υπάρχει περιστροφή στην ροή αντίθετη της φοράς κίνησης στις λεπίδες η εκτός του οριακού στρώματος ροής.

Σύμφωνα με τον Glauert, αυτή η περιστροφική κίνηση οφείλεται εν μέρει στο σύστημα των οπίσθιων δινών αλλά και στην περιστροφή γύρω των λεπίδων. Λόγω των οπίσθιων δινών, η ροή στο επίπεδο των λεπίδων της τουρμπίνας θα έχει γωνιακή ταχύτητα $\alpha'\Omega$ με κατεύθυνση αντίθετη της περιστροφής των λεπίδων, και η κυκλοφορία γύρω στις λεπίδες θα προκαλεί ίσες και αντίθετες γωνιακές ταχύτητες στις ροές που είναι αμέσως πάνω και κάτω των λεπίδων της γεννήτριας. Το σύνολο αυτών των γωνιακών ταχυτήτων, προφανώς, ισούται με μηδέν πάνω από τις λεπίδες, καθώς δεν είναι δυνατή καμία περιστροφή μέχρι η ροή να φτάσει το σύστημα δίνης που παράγεται από τις λεπίδες. Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι η γωνιακή ταχύτητα κάτω των λεπίδων θα ισούται με $2\alpha'\Omega$ και ροή παρεμβολής, η οποία δρα στα στοιχεία της λεπίδας, θα έχει την γωνιακή ταχύτητα $\alpha'\Omega$.

Ο Glauert θεώρησε ότι ο ακριβής υπολογισμός της ροής παρεμβολής είναι πολύπλοκος λόγω της περιοδικότητας της ροής που προκαλείται από τις λεπίδες. Συμπέρανε επίσης ότι για τις περισσότερες περιπτώσεις είναι αρκετά ακριβής να χρησιμοποιηθούν μέσες τιμές κατά την περιφέρεια, θεωρώντας δηλαδή ότι η ώση και η ροπή που μεταφέρεται από έναν πεπερασμένο αριθμό λεπίδων αντικαθίσταται από ομοιόμορφες κατανομές ώσης και ροπής που εξαπλώνονται σε ολόκληρη την περιφέρεια για την ίδια ακτίνα.

Θεωρείται ένας τέτοιος στοιχειώδης δακτύλιος ενός HAWT ακτίνας r από τον άξονα περιστροφής και ακτινικού πάχους dr . Έστω $d\tau$ το στοιχείο της ροπής που ισούται με το ρυθμό μείωσης της στροφορμής του ανέμου που διέρχεται από τον δακτύλιο. Έτσι,



Σχήμα 7.5 (α) Στοιχείο λεπίδας στην ακτίνα r που κινείται από δεξιά προς τα αριστερά και δείχνει τις διάφορες συνιστώσες της ταχύτητας. Η σχετική ταχύτητα που προσπίπτει στο πτερύγιο είναι W_2 σε σχετική γωνία ροής και γωνία πρόσπτωσης α . (β) Οι διάφορες συνιστώσες δυνάμεων που δρουν στο τμήμα του πτερυγίου.

$$d\tau = (dm) \times 2a' \Omega r^2 = (2\pi r dr \rho c_{x2}) \times 2a' \Omega r^2 \quad (7.14)$$

ή

$$d\tau = 4\pi\rho\Omega c_{x1}(1-a)a' r^3 dr \quad (7.15)$$

Στην ανάλυση του κινητήριου δίσκου η τιμή του a (συμβολιζόμενη με \bar{a}) είναι μια σταθερά για το σύνολο του δίσκου. Με την BEM η τιμή του a είναι συνάρτηση της ακτίνας, γεγονός το οποίο δεν πρέπει να παραβλεφθεί. Μια σταθερή τιμή του a θα μπορούσε να ληφθεί για τον σχεδιασμό μιας ανεμογεννητριας αλλά μόνο με την μεταβολή της χορδής και της κλίσης με κάποιο ειδικό τρόπο κατά μήκος της ακτίνας, κάτι το οποίο δεν είναι χρήσιμο στις απαιτήσεις του σχεδιασμού.

Θεωρώντας ότι οι συντελεστές αξονικής και επαπτομενικής επαγωγής a και a' είναι συναρτήσεις του r , λαμβάνουμε μια έκφραση για την ισχύ που αναπτύσσεται από τα πτερύγια πολλαπλασιάζοντας την έκφραση (7.15) με Ω και ολοκληρώνοντας από την ακτίνα r_h της πλήμνης έως την ακτίνα R του άκρου:

$$P = 4\pi\rho\Omega^2 c_{x1} \int_{r_h}^R (1-a) a' r^3 dr \quad (7.16)$$

7.3.2 Δυνάμεις που ασκούνται σε στοιχείο λεπίδας

Ας θεωρήσουμε τώρα μια γεννήτρια με Z λεπίδες με ακτίνα κορυφής R , το καθένα με χορδή l σε ακτίνα r , περιστρεφόμενα με γωνιακή ταχύτητα Ω . Η γωνία κλίσης της ακτίνας r είναι β μετρούμενη από τη γραμμή μηδενικής ανύψωσης προς το επίπεδο επιστροφής. Η αξονική ταχύτητα του ανέμου στα πτερύγια είναι η ίδια με την τιμή από την θεωρία του κινητήριου δίσκου, δηλαδή: $C_{x2} = C_{x1}(1 - a)$, και είναι κάθετη του επιπέδου της περιστροφής.

Το σχήμα 7.5 παρουσιάζει το στοιχείο λεπίδας να κινείται από δεξιά στα αριστερά μαζί με τα διανύσματα ταχύτητας σε σχέση με την χορδή της λεπίδας σε ακτίνα r . Η συνισταμένη της σχετικής ταχύτητας αμέσως πάνω των λεπίδων είναι,

$$w = [C_{x1}^2(1 - a)^2 + (\Omega r)^2(1 + \alpha')^2]^{0.5} \quad (7.17)$$

Και αυτό φαίνεται στο σχήμα να προσπίπτει στο στοιχείο της λεπίδας υπό γωνία φ ως προς το επίπεδο της περιστροφής. Πρέπει να σημειωθεί ότι η εφαπτομενική συνιστώσα της ταχύτητας που συμβάλλει στο w είναι η ταχύτητα της λεπίδας προσαυξημένη κατά την ταχύτητα της ροής παρεμβολής, $\alpha' \Omega r$. Οι παρακάτω σχέσεις θα φανούν χρήσιμες σε μεταγενέστερες αλγεβρικές αναλύσεις.

$$\sin\varphi = C_{x2}/w = C_{x1}(1 - a)/w, \quad (7.18)$$

$$\cos\varphi = \Omega r(1 + \alpha')/w, \quad (7.19)$$

$$\tan\varphi = \frac{C_{x1}}{\Omega r} \left(\frac{1-a}{1+\alpha'} \right). \quad (7.20)$$

Το παραπάνω σχήμα δείχνει επίσης τη δύναμη ανύψωσης L και την οπισθέλκουσα δύναμη D που σχεδιάζονται (κατά σύμβαση) κάθετα και παράλληλα προς τη σχετική ταχύτητα στην είσοδο, αντίστοιχα. Στο κανονικό εύρος λειτουργίας, η D αν και σχετικά μικρή (1-2%) σε σύγκριση με την L , δεν πρέπει να αγνοείται εντελώς. Η προκύπτουσα δύναμη, R , θεωρείται ότι έχει συνιστώσα κατά τη διεύθυνση της κίνησης της λεπίδας. Αυτή είναι η δύναμη που συμβάλλει στην θετική ισχύ εξόδου του στροβίλου.

Από το σχήμα (7.5) η δύναμη ανά μονάδα μήκους της λεπίδας στην κατεύθυνση της κίνησης είναι:

$$Y = L\sin\varphi - D\cos\varphi \quad (7.21)$$

Και η δύναμη ανά μονάδα μήκους της λεπίδας στην αξονική διεύθυνση είναι:

$$X = L\cos\varphi + D\sin\varphi \quad (7.22)$$

7.3.3 Συντελεστές άντωσης και οπισθέλκουσας

Μπορούμε να ορίσουμε τους συντελεστές άντωσης και οπισθέλκουσας ως:

$$C_L(a) = L / (\frac{1}{2} \rho w^2 l) \quad (7.23)$$

$$C_D(a) = D / (\frac{1}{2} \rho w^2 l) \quad (7.24)$$

Όπου, σύμφωνα με τη σύμβαση που χρησιμοποιείται για μια απομονωμένη αεροτομή, w είναι η εισερχόμενη σχετική ταχύτητα και l είναι η χορδή του πτερυγίου. Οι συντελεστές C_L και C_D είναι συναρτήσεις της γωνίας πρόσπτωσης, $\alpha = \varphi - \beta$, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, όπως είναι και το προφίλ της λεπίδας αλλά και ο αριθμός Reynolds της λεπίδας. Σε αυτό το κεφάλαιο η γωνία πρόσπτωσης θεωρείται ότι μετράται από τη γραμμή μηδενικής ανύψωσης για την οποία η καμπύλη C_L ως προς α διερχεται από το μηδέν. Είναι επίσης αξιοσημείωτο ότι ο Glauert, όταν εξέτασε αεροτομές μικρής καμπυλότητας και πάχους, έλαβε μια θεωρητική έκφραση για τον συντελεστή της άντωσης,

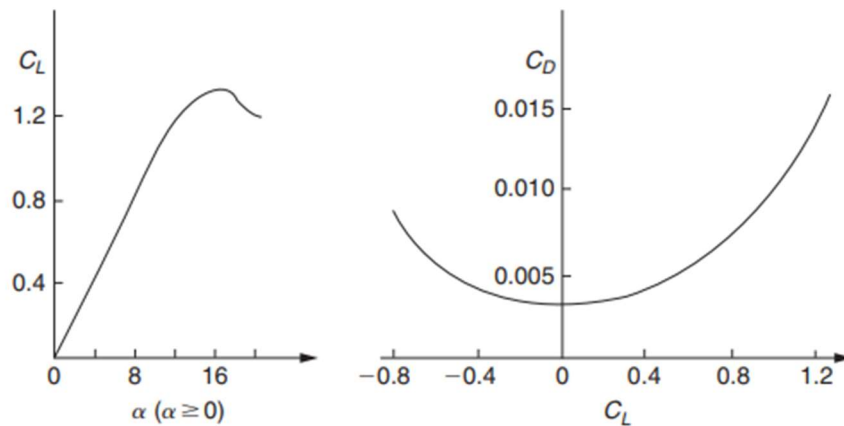
$$C_L = 2\pi \sin\alpha \quad (7.25)$$

Η θεωρητική κλίση της καμπύλης του συντελεστή άντωσης ως προς την πρόσπτωση είναι 2π ανά ακτίνιο (για μικρές τιμές του α) ή 0.11 ανά μοίρα, αλλά από πειραματικά αποτελέσματα, ένας κάλος μέσος όρος γενικά αποδεκτός είναι 0.1 ανά μοίρα εντός του καθεστώτος προ-σταθεροποίησης. Αυτό το πολύ χρήσιμο αποτέλεσμα θα χρησιμοποιηθεί εκτενώς στον υπολογισμό αποτελεσμάτων αργότερα. Ωστόσο, οι μετρούμενες τιμές της κλίσης της καμπύλης άντωσης που αναφέρθηκαν από τους Abbot και von Doenhoff (1959) για αριθμό τετραπήφιων και πενταπήφιων σειρών NACA και τμημάτων πτέρυγας της εξαπήφιας σειράς NACA, μετρούμενες σε αριθμό Reynolds 6×10^6 , έδωσαν τιμές 0.11 ανά μοίρα. Όμως αυτά τα προφίλ λεπίδων προορίζονταν για πτέρυγες αεροσκαφών, οπότε είναι λογικό να αναμένεται κάποια απόκλιση από τον κανόνα όταν η εφαρμογή είναι ανεμογεννήτρια.

Και πάλι, εντός του καθεστώτος προ-σταθεροποίησης οι τιμές του C_D είναι μικρές και ο λόγος C_D/C_L είναι συνηθώς περίπου 0.01 . Το σχήμα 7.6 δείχνει τυπικές μεταβολές του συντελεστή άντωσης C_L συναρτησει της προσπτωσης α και του συντελεστή οπισθέλκουσας C_D συναρτησει του C_L για μια λεπίδα της ανεμογεννήτριας που δοκιμάστηκε πέρα από την κατάσταση ακινητοποίησης. Οι λεπίδες μιας ανεμογεννήτριας μπορεί περιστασιακά να χρειαστεί να λειτουργήσουν σε συνθήκες μετά το σταμάτημα, όταν το C_D γίνεται μεγάλο – τότε ο ορος της αντιστάσης πρέπει να συμπεριληφθει στους υπολογισμούς επιδοσεων. Λεπτομέρειες της μοντελοποίησης και των τύπων ακινητοποίησης για C_D και C_L σε συνθηκες μετα το σταματημα δινονται από τους Eggleston και Stoddard (1987)

Η σωστή επιλογή των τμημάτων αεροτομής είναι πολύ σημαντική για την επίτευξη καλών επιδόσεων. Οι λεπτομέρειες σχεδιασμού και οι προκύπτουσες

επιδόσεις είναι σαφώς ανταγωνιστικές και δεν υπάρχουν πολλές πληροφορίες στον δημόσιο τομέα. Το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ (DOE) ανέπτυξε μια σειρά αεροτομών ειδικά για λεπίδες ανεμογεννητριών. Αυτές οι αεροτομές σχεδιάστηκαν για να παρέχουν τα απαραίτητα διαφορετικά χαρακτηριστικά επιδόσεων από την ρίζα της λεπίδας έως την άκρη, προσαρμοσμένες παράλληλα στις δομικές απαιτήσεις. Με την χρήση των νέων αυτών λεπίδων έχει σημειωθεί σημαντική αύξηση παραγωγής ενέργειας (από 10 έως 35%) από τις ανεμογεννήτριες. Τα δεδομένα αυτά έχουν καταγραφεί και είναι διαθέσιμα στην αιολική βιομηχανία των ΗΠΑ. Πολλές άλλες χώρες έχουν εθνικές ενώσεις, ερευνητικά κέντρα και συνέδρια σχετικά με την αιολική ενέργεια.



Σχήμα 7.6 Τυπικά χαρακτηριστικά επιδόσεων για μια λεπίδα ανεμογεννήτριας, C_L ως προς α και C_D ως προς C_L

7.3.4 Σύνδεση θεωρίας κινητήριου δίσκου και BEM

Η στοιχειώδης αξονική δύναμη και η στοιχειώδης δύναμη σε ένα πτερύγιο μήκους dr σε ακτίνα r είναι:

$$dX = (L\cos\varphi + D\sin\varphi)dr$$

$$d\tau = r(L\sin\varphi - D\cos\varphi)dr$$

Για μια γεννήτρια με Z λεπίδες, και χρησιμοποιώντας τους ορισμούς για C_L και C_D που δίνονται από τις εξισώσεις (7.23) και (7.24), μπορούμε να γράψουμε τις εκφράσεις που εκφράζουν την στοιχειώδη ροπή, ισχύ, και ώση ως εξής:

$$d\tau = \frac{1}{2}\rho w^2 r(C_L\sin\varphi - C_D\cos\varphi)Zldr, \quad (7.26)$$

$$dP = \Omega d\tau = \frac{1}{2}\rho w^2 \Omega r(C_L\sin\varphi - C_D\cos\varphi)Zldr, \quad (7.27)$$

$$dX = \frac{1}{2}\rho w^2 (C_L\cos\varphi + C_D\sin\varphi)Zldr. \quad (7.28)$$

Είναι πλέον δυνατό να γίνει σύνδεση μεταξύ της θεωρίας του κινητήριου δίσκου και της BEM. (Οι τιμές των α και α' επιτρεπεται να μεταβαλλονται με

την ακτινα σε αυτή την αναλυση). Από την εξίσωση (7.2) για ένα στοιχείο της ροής, παίρνουμε:

$$dX = d\dot{m}(C_{x1} - C_{x3}) = d\dot{m}C_{x2}2a/(1 - a) \quad (7.29)$$

Εξισώνοντας τις εξισώσεις (7.28) και (7.29) και με κάποιες αναδιατάξεις, έχουμε:

$$a/(1 - a) = Zl(C_L \cos\varphi - C_D \sin\varphi)/(8\pi r \sin^2\varphi). \quad (7.30)$$

Και πάλι, λαμβάνοντας υπόψη την εφαπτομενική ορμή, από την εξίσωση (7.14) η στοιχειώδης ροπή είναι:

$$d\tau = (2\pi r dr)\rho C_{x2}(rC_\theta)$$

Εξισώνοντας την έκφραση αυτή με την εξίσωση (7.26) και απλοποιώντας, παίρνουμε:

$$C_{x2}C_\theta/w^2 = Zl(C_L \sin\varphi - C_D \cos\varphi)/(4\pi r) \quad (7.31)$$

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (7.19) βρίσκουμε:

$$C_\theta/w = U\alpha' \cos\varphi/[U(1 + \alpha')] = 2\alpha' \cos\varphi/(1 + \alpha')$$

Και με την εξίσωση (7.18), η (7.31) γίνεται:

$$\alpha'/(1 + \alpha') = Zl(C_L \sin\varphi - C_D \cos\varphi)/(8\pi r \sin\varphi \cos\varphi) \quad (7.32)$$

Εισάγεται εδώ μια νέα χρήσιμη παράμετρος χωρίς διαστάσεις, ο συντελεστής φόρτισης της λεπίδας:

$$\lambda = ZlC_L/(8\pi r) \quad (7.33)$$

Με τη βοήθεια της παραμέτρου αυτής έχουμε στις εξισώσεις (7.30) και (7.32):

$$a/(1 - a) = \lambda(\cos\varphi + \varepsilon \sin\varphi)/\sin^2\varphi \quad (7.34)$$

$$\alpha'/(1 + \alpha') = \lambda(\sin\varphi - \varepsilon \cos\varphi)/(\sin\varphi \cos\varphi) \quad (7.35)$$

$$\varepsilon = \frac{C_D}{C_L} \quad (7.36)$$

7.3.5 Λόγος ταχύτητας ακρών λεπίδας

Μια πολύ σημαντική μη διαστατική παράμετρος για τους ρότορες των HAWT είναι ο λόγος ταχύτητας των άκρων της λεπίδας, ο οποίος ορίζεται ως εξής:

$$J = \frac{\Omega R}{C_{x1}} \quad (7.37)$$

Η παράμετρος αυτή ελέγχει τις συνθήκες λειτουργίας ενός στροβίλου και επηρεάζει σημαντικά τις τιμές των συντελεστών επαγωγής ροής, α και α'

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (7.37) και (7.20) γράφουμε την εφαπτομένη της σχετικής γωνίας ροής ως εξής:

$$\tan\varphi = \frac{R}{rJ} \left(\frac{1-a}{1+a} \right) \quad (7.38)$$

7.3.6 Σταθερότητα Τουρμπίνας

Μια κύρια μη διαστατική παράμετρος που χαρακτηρίζει τη γεωμετρία μιας ανεμογεννήτριας είναι η σταθερότητα λεπίδας, σ . Η σταθερότητα ορίζεται ως ο λόγος της επιφάνειας της λεπίδας προς την επιφάνεια του δίσκου

$$\sigma = Z A_B / (\pi R^2)$$

Όπου

$$A_B = \int l(r) dr = \frac{1}{2} R l_{av}.$$

Το οποίο συνήθως γράφεται ως

$$\sigma = Z l_{av} / (2\pi R), \quad (7.39)$$

Όπου l_{av} είναι η μέση χορδή της λεπίδας.

Επίλυση των εξισώσεων και παράδειγμα

Η προηγούμενη ανάλυση παρέχει ένα σύνολο σχέσεων που μπορούν να επιλυθούν με μία διαδικασία επανάληψης, επιτρέποντας τον προσδιορισμό των α και α' για οποιαδήποτε συγκεκριμένη γωνία πρόνευσης β , υπό την προϋπόθεση ότι είναι δυνατή η σύγκλιση. Για να επιτύχουμε ταχύτερες λύσεις, θα χρησιμοποιήσουμε την προσέγγιση ότι το $\varepsilon \cong 0$ βρίσκεται στο κανονικό αποδοτικό εύρος λειτουργίας (δηλ. στο εύρος πριν από το σταμάτημα). Οι εξισώσεις (10.35α) και (10.36α) μπορούν τώρα να γραφούν ως εξής

$$\alpha / (1 - \alpha) = \lambda \cot \varphi / \sin \varphi \quad (7.40)$$

$$\alpha' / (1 + \alpha') = \lambda / \cos \varphi \quad (7.41)$$

Αυτές οι εξισώσεις είναι όσο πιο απλές γίνεται και θα χρησιμοποιηθούν για να μοντελοποιήσουν κάποιες αριθμητικές λύσεις.

Εφόσον έχουν δοθεί όλοι οι ορισμοί και οι απαραίτητες σχέσεις είναι πλέον δυνατό να βρεθούν ορισμένες αριθμητικές λύσεις.

Παράδειγμα

Θεωρήστε μια ανεμογεννήτρια HAWT τριών λεπίδων με διάμετρο ρότορα 30m, που λειτουργεί με λόγο ταχύτητας άκρου $J = 5.0$. Η χορδή του πτερυγίου θεωρείται σταθερή στα 1,0m. Υποθέτοντας ότι ο συντελεστής οπισθέλκουσας είναι αμελητέος σε σύγκριση με τον συντελεστή άντωσης, προσδιορίστε χρησιμοποιώντας μια επαναληπτική μέθοδο υπολογισμού τις κατάλληλες τιμές των αξονικών και εφαπτομενικών συντελεστών επαγωγής σε $r/R = 0,95$ όπου η γωνία πρόνευσης β είναι 2° .

Λύση

Είναι προτιμότερο να αρχίσει η διαδικασία υπολογισμού ορίζοντας ότι $\alpha = \alpha' = 0$. Οι τιμές, φυσικά, θα μεταβάλλονται με την πάροδο των επαναλήψεων. Έτσι έχουμε:

$$\tan\varphi = (R/rf)(1 - a)/(1 + a') = 1/(0.95 \times 5) = 0.2105$$

Επομένως,

$$\varphi = 11.89^\circ \text{ και } \alpha = \varphi - \beta = 9.89^\circ$$

Χρησιμοποιώντας την εκτίμηση ότι $C_L = 0.1 \times \alpha = 0.989$, έχουμε:

$$\lambda = (ZlC_L)/(8\pi r) = 0.00884 \times C_L = 0.008743$$

$$1/\alpha = 1 + (1/\lambda)\sin\varphi\tan\varphi = 1 + 114.38 \times \sin 11.89 \times \tan 11.89 = 5.962$$

Έτσι βρίσκουμε,

$$\alpha = 0.1677,$$

$$1/\alpha' = (1/\lambda)\cos\varphi - 1 = 110.9,$$

$$\alpha' = 0.00902$$

Με την χρήση των καινούργιων τιμών των α και α' στην εξίσωση (7.38), ο υπολογισμός επαναλαμβάνεται μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση, που συνήθως διαρκεί τέσσερις ή πέντε κύκλους (αλλά σε υπολογισμούς όπου αν $\alpha > 0,3$, θα χρειαστούν πολύ περισσότερες επαναλήψεις). Τελικά, και με επαρκή ακρίβεια,

$$\alpha = 0.1925 \text{ και } \alpha' = 0.00685$$

Επίσης,

$$\varphi = 9.582^\circ \text{ και } C_L = 0.1 \times (\varphi - \beta) = 0.758$$

Ένα περίγραμμα του αλγορίθμου, που ονομάζεται BEM, δίνεται στον πίνακα I,

Βήμα	Απαιτούμενη δράση
1	Αρχικοποίηση των α και α' με μηδενικές τιμές
2	Υπολογισμός της γωνίας ροής με την εξίσωση (7.38)
3	Υπολογισμός της τοπικής γωνίας πρόσπτωσης, $\alpha = \varphi - \beta$
4	Προσδιορισμός C_L και C_D από πίνακες ή από τύπο
5	Υπολογισμός α και α'
6	Έλεγχος της σύγκλισης των α και α' , αν δεν είναι επαρκής, στο βήμα 2, αλλιώς στο βήμα 7
7	Υπολογισμός των τοπικών δυνάμεων στο στοιχείο

Πίνακας I Μέθοδος BEM για τον υπολογισμό των α και α'

7.4 Η Μέθοδος Ορμής Στοιχείων Λεπίδων (BEMT)

Όλη η θεωρία και οι σημαντικοί ορισμοί για τον προσδιορισμό των συνιστωσών της δύναμης σε ένα στοιχείο πτερυγίου έχουν παρουσιαστεί και δόθηκε μια πρώτη δοκιμαστική προσέγγιση για την εύρεση της λύσης στο παραπάνω παράδειγμα. Τα διάφορα βήματα του κλασικού μοντέλου BEM του

Glauert διατυπώνονται στον πίνακα I ως αλγόριθμος για την αξιολόγηση των α και α' για κάθε στοιχείο όγκου.

Μεταβολή των παραμέτρων κατά μήκος του φάσματος

Κατά μήκος του ανοίγματος της λεπίδας υπάρχει σημαντική μεταβολή της γωνίας κλίσης β της λεπίδας, η οποία συνδέεται στενά με την τιμή του J και σε μικρότερο βαθμό με τις τιμές του συντελεστή άντωσης C_L και της χορδής του πτερυγίου. Οι τρόποι με τους οποίους τόσο το C_L όσο και το l μεταβάλλονται με την ακτίνα είναι στη διακριτική ευχέρεια του σχεδιαστή της γεννήτριας. Στο προηγούμενο παράδειγμα καθορίστηκε η τιμή γωνίας βήματος και προέκυψε ο συντελεστής άντωσης (μαζί με άλλους παράγοντες) από αυτήν. Μπορούμε ομοίως να καθορίσουμε τον συντελεστή άντωσης, διατηρώντας την πρόσπτωση κάτω από την γωνία ακινητοποίησης και από αυτήν να προσδιορίσουμε τη γωνία κλίσης. Αυτή η διαδικασία θα χρησιμοποιηθεί στο επόμενο παράδειγμα για να λάβουμε τη μεταβολή του β κατά μήκος του ανοίγματος για τη λεπίδα της γεννήτριας. Είναι βέβαια αλήθεια ότι για βέλτιστη απόδοση η λεπίδα πρέπει να είναι συνεστραμμένη κατά μήκος του με αποτέλεσμα, κοντά στη ρίζα, να υπάρχει μεγάλη γωνία κλίσης. Η γωνία κλίσης της λεπίδας θα μειώνεται με την αύξηση της ακτίνας έτσι ώστε, κοντά στην κορυφή, να είναι κοντά στο μηδέν και μπορεί ακόμη και να γίνει ελαφρώς αρνητική. Η χορδή της λεπίδας στο επόμενο παράδειγμα έχει διατηρηθεί σταθερή για να περιοριστεί ο αριθμός των επιλογών. Φυσικά, οι περισσότερες γεννήτριες σε λειτουργία έχουν κωνικές λεπίδες των οποίων τα χαρακτηριστικά σχεδιασμού εξαρτώνται από την αντοχή της λεπίδας καθώς και από οικονομικές και αισθητικές εκτιμήσεις.

Παράδειγμα

Μια ανεμογεννήτρια HAWT τριών λεπίδων με διάμετρο κορυφής 30m πρέπει να σχεδιαστεί για να λειτουργεί με σταθερό συντελεστή άντωσης $C_L = 0.8$ κατά μήκος του ανοίγματος της λεπίδας, με λόγο ταχύτητας κορυφής $J = 5.0$. Υποθέτοντας σταθερή χορδή 1,0m, προσδιορίστε, χρησιμοποιώντας επαναληπτική μέθοδο υπολογισμού, τη μεταβολή κατά μήκος του ανοίγματος ($0,2 \leq r/R \leq 1,0$) των συντελεστών επαγωγής ροής α και α' και της γωνίας κλίσης β .

Λύση

Ξεκινάμε τον υπολογισμό στο άκρο, όπου $r = 15 \text{ m}$ και, όπως και προηγουμένως, παίρνουμε αρχικές τιμές για τα α και α' μηδέν. Έχουμε:

$$\lambda = (ZlC_L)/8\pi r = (3 \times 0.8)/(8 \times \pi \times 15) = 0.006366, \text{ και } 1/\lambda = 157.1,$$

$$\tan\varphi = \frac{\left(\frac{R}{r}\right)^{(1-\alpha)}}{1+\alpha} = 0.2, \quad \varphi = 11.31^\circ,$$

$$1/\alpha = 1 + 157.1 \times \sin 11.31 \times \tan 11.31 = 7.162, \quad \alpha = 0.1396,$$

$$1/\alpha' = 157.1 \times \cos 11.31 - 1 = 153.05, \quad \alpha' = 0.00653$$

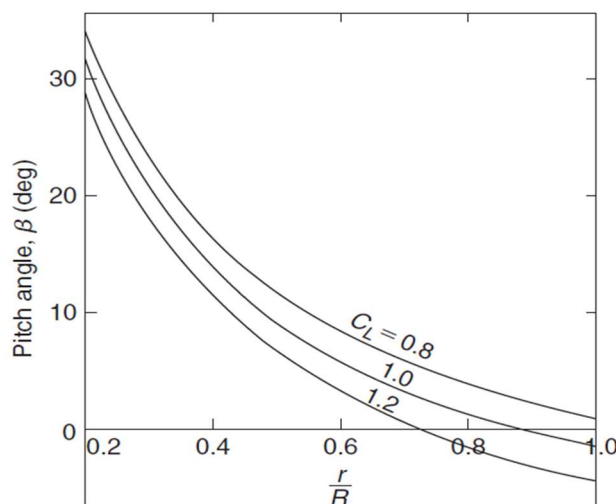
Μετά από άλλες πέντε επαναλήψεις (για να επιτευχθεί επαρκής σύγκλιση) το αποτέλεσμα είναι:

$$\alpha = 0.2054, \alpha' = 0.00649, \text{ και } \beta = 0.97$$

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών κατά μήκος ολόκληρου του ανοίγματος ($0,2 \leq r/R \leq 1,0$) για α και α' παρουσιάζονται στον πίνακα II. Είναι πολύ εμφανές ότι η παράμετρος α μεταβάλλεται αισθητά με την ακτίνα, σε αντίθεση με την εφαρμογή του κινητήριου δίσκου όπου το α ήταν σταθερό. Η μεταβολή της γωνίας κλίσης β κατά μήκος του ανοίγματος για $C_L = 0.8$ (καθώς και για $C_L = 1.0$ και 1.2 για λόγους σύγκρισης) παρουσιάζεται στο σχήμα 7.7. Η μεγάλη μεταβολή του β κατά μήκος του ανοίγματος δεν προκαλεί έκπληξη και συνδέεται με την επιλογή της τιμής του J , του λόγου ταχύτητας άκρου. Η επιλογή του λόγου της εσωτερικής ακτίνας $r/R = 0,2$ ήταν αυθαίρετη. Ωστόσο, η συμβολή στην αναπτυσσόμενη ισχύ από την επιλογή μιας ακόμη μικρότερης ακτίνας θα ήταν αμελητέα.

r/R	0.2	0.3	0.4	0.6	0.8	0.9	0.95	1.0
φ	42.29	31.25	24.36	16.29	11.97	10.32	9.59	8.973
β	34.29	23.35	16.36	8.29	3.97	2.32	1.59	0.97
α	0.0494	0.06295	0.07853	0.1138	0.1532	0.1732	0.1915	0.2054
α'	0.04497	0.0255	0.01778	0.01118	0.00820	0.00724	0.00724	0.00649

Πίνακας II Σύνοψη των αποτελεσμάτων μετά από επαναλήψεις ($C_L = 0.8$)



Σχήμα 7.7 Μεταβολή της γωνίας κλίσης λεπίδας β με τον λόγο ακτίνας r/R για $C_L = 0,8, 1,0$ και $1,2$

Διόρθωση για πεπερασμένο αριθμό στοιχείων

Μέχρι στιγμής, η ανάλυση αγνοούσε την επίδραση του πεπερασμένου αριθμού λεπίδων. Το γεγονός είναι, ότι σε ένα σταθερό σημείο, η ροή αυξομειώνεται καθώς περνάει ένα μια λεπίδα. Οι επαγόμενες ταχύτητες στο σημείο δεν είναι σταθερές με τον χρόνο. Το συνολικό αποτέλεσμα είναι η μείωση της καθαρής ανταλλαγής ορμής και της καθαρής ισχύος της γεννήτριας. Χρειάζεται κάποια τροποποίηση της ανάλυσης και αυτό γίνεται με την εφαρμογή ενός συντελεστή διόρθωσης του άκρου της λεπίδας. Υπάρχουν διάφορες λύσεις: (i) μια ακριβής λύση που οφείλεται στον Goldstein (1929), η οποία αντιπροσωπεύεται από μια άπειρη σειρά τροποποιημένων συναρτήσεων Bessel, και (ii) μια προσέγγιση κλειστής μορφής που οφείλεται στους Prandtl και Tietjens (1957). Και οι δυο μέθοδοι δίνουν παρόμοια αποτελέσματα αλλά η μέθοδος του Prandtl είναι αυτή που συνήθως προτιμάται.

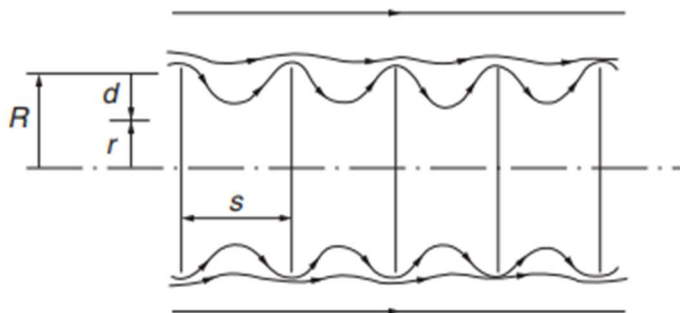
Συντελεστής διόρθωσης του Prandtl

Οι μαθηματικές λεπτομέρειες της ανάλυσης του Prandtl ξεφεύγουν από το αντικείμενο αυτής της αναφοράς, αλλά το αποτέλεσμα συνήθως εκφράζεται ως:

$$F = (2/\pi) \cos^{-1} [\exp(-\frac{\pi d}{s})],$$

Όπου όπως φαίνεται στο σχήμα 7.7, το s είναι η απόσταση κατά μήκος του βήματος μεταξύ των διαδοχικών ελικοειδών στροβιλών και $d = R - r$. Από τη γεωμετρία των ελίκων:

$$s = (2\pi R/Z) \sin\varphi,$$



Σχήμα 7.8 Μοντέλο απώλειας άκρων Prandtl που δείχνει τις αποστάσεις που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση

Όπου $\sin\varphi = C_{x2}/w$. Έτσι,

$$s = 2\pi(1 - \alpha)RC_{x1}/(wZ),$$

$$\pi d/s = \frac{1}{2}Z(1 - r/R)w/C_{x2} = \frac{1}{2}Z(1 - r/R)/\sin\varphi.$$

Αυτό μπορεί να εκτιμηθεί με επαρκή ακρίβεια και ίσως πιο εύκολα με την προσέγγιση,

$$\pi d/s = \frac{1}{2}Z(1 - r/R)(1 + J^2)^{0.5}.$$

Η κυκλοφορία στα άκρα των λεπίδων μηδενίζεται λόγω της στροβιλότητας που αποβάλλεται από αυτά, με τον ίδιο τρόπο όπως και στα άκρα των λεπίδων ενός αεροσκάφους. Αυτές οι εκφράσεις εξασφαλίζουν ότι η F μηδενίζεται όταν $r = R$ αλλά αυξάνεται γρήγορα προς τη μονάδα με τη μείωση της ακτίνας.

Η μεταβολή του $F = F(r/R)$ παρουσιάζεται στο σχήμα 7.8 για $J = 5$ και $Z = 2,3,4$ και 6 . Είναι σαφές από το γραφήμα και τις προηγούμενες εξισώσεις ότι όσο μεγαλύτερο είναι το βήμα s και όσο μικρότερος είναι ο αριθμός των λεπίδων Z , τόσο μεγαλύτερη θα είναι η μεταβολή του F (από τη μονάδα) σε κάθε λόγο ακτίνας. Με άλλα λόγια, το πλάτος των διακυμάνσεων της ταχύτητας θα αυξηθεί.

Ο συντελεστής διόρθωσης άκρου Prandtl εφαρμόζεται απευθείας σε κάθε στοιχείο λεπίδας, τροποποιώντας την στοιχειώδες αξονική δύναμη, που προκύπτει από τη σχέση (7.12):

$$dX = 4\pi r \alpha (1 - \alpha) r C_{x1}^2 dr$$

να γίνει

$$dX = 4\pi r \alpha (1 - \alpha) r C_{x1}^2 F dr \quad (7.42)$$

Η στοιχειώδης ροπή, από την εξίσωση (7.15) είναι:

$$d\tau = 4\pi r \Omega C_{x1} (1 - \alpha) \alpha' r^3 dr$$

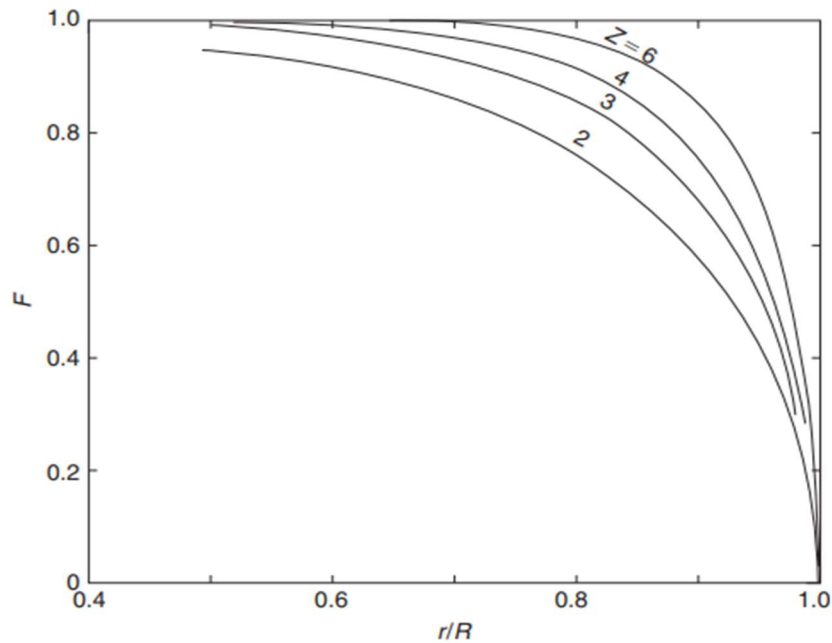
Τροποποιείται για να γίνει:

$$d\tau = 4\pi r \Omega C_{x1} (1 - \alpha) \alpha' F r^3 dr \quad (7.43)$$

Ακολουθώντας τις διαδικασίες αναγωγής που οδήγησαν στις εξισώσεις (7.34) και (7.35), δίνονται τα ακόλουθα αποτελέσματα:

$$\alpha/(1 - \alpha) = \lambda(\cos\varphi + \epsilon\sin\varphi)/(F\sin^2\varphi),$$

$$\alpha'/(1 + \alpha') = \lambda(\sin\varphi - \epsilon\cos\varphi)/(F\sin\varphi\cos\varphi).$$



Σχήμα 7.9 Μεταβολή του συντελεστή διόρθωσης Prandtl F με τον λόγο ακτίνας για αριθμό λεπίδων $Z= 2, 3, 4$ και 6

Η εφαρμογή του συντελεστή διόρθωσης άκρου του Prandtl στη στοιχειώδη αξονική δύναμη και τη στοιχειώδη ροπή έχει ορισμένες σημαντικές επιπτώσεις όσον αφορά τη συνολική ροή και τους παράγοντες παρεμβολής.

Η βασική έννοια της εξίσωσης (7.42) είναι:

$$dX = d\dot{m}(2\alpha F C_{x1}),$$

Δηλαδή, ο μέσος συντελεστής αξονικής επαγωγής στο μακρινό απόρρευμα είναι $2\alpha F$ όταν εφαρμόζεται ο συντελεστής διορθωσης, ενώ όταν δεν εφαρμόζεται θα είναι 2α . Να σημειωθεί επίσης ότι, στο επίπεδο του δίσκου (η των λεπίδων), ο μέσος συντελεστής επαγωγής είναι αF , και η αξονική ταχύτητα γίνεται

$$C_{x2} = C_{x1}(1 - \alpha F).$$

Από αυτό βλέπουμε ότι στις άκρες των λεπίδων ισχύει ότι $C_{x2} = C_{x1}$, επειδή η F είναι μηδέν σε αυτή την ακτίνα.

8. Προσομοίωση

8.1 Γεωμετρία

Η παρούσα έρευνα χρησιμοποίησε το γενικό μοντέλο NREL 5-MW για την κατασκευή της ανεμογεννήτριας που σχεδιάστηκε υπό την προϋπόθεση της κλάσης IIA του IEC (International Electrotechnical Commission). Περιέχει ένα σύστημα τριών λεπίδων προς την κατεύθυνση του ανέμου, 90,55 m πάνω από τη μέση στάθμη της θάλασσας (MSL). Στον πίνακα III παρατίθενται τα δεδομένα του μοντέλου της ανεμογεννήτριας.

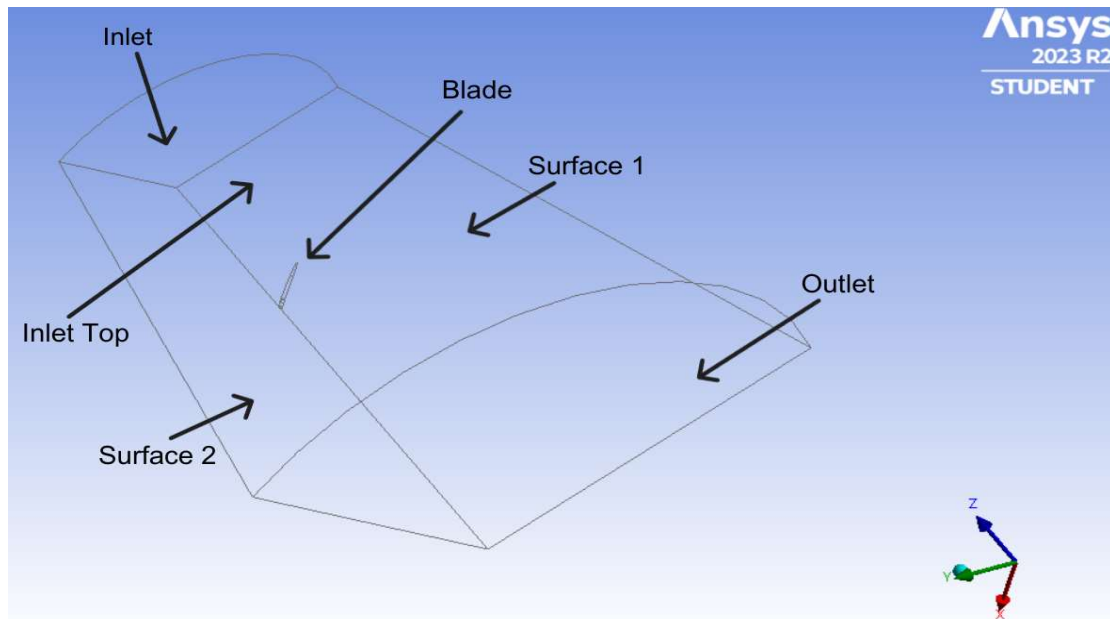
Rated power	5 MW
Class	IIA
No. of blade	3
Blade length	61.5 m
Hub height	90.55 m
Tower height	88.15 m
Cut-in wind speed	3 m/s
Rated wind speed	11.4 m/s
Cut-out wind speed	25 m/s
Cut-in, rated rotational speed	6.9 rpm, 12.1 rpm
Blade set angle	0°
Rotor shaft tilt angle	5°
Maximum chord length	4.1 m
Rotor overhang	5 m
Rotor position	Upwind
Transmission	Gearbox
Power control	Pitch
Fixed/variable	Variable
Gear ratio	97
Support structure types	Jacket & mono-pile

Πίνακας III Τεχνικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας 5MW του NREL

Η παρακάτω εικόνα δείχνει το 3D μοντέλο της λεπίδας που έχει σχεδιαστεί για την προσομοίωση της σε υπεράκτιες συνθήκες.

8.2 Διάταξη Μοντέλου

Η λεπίδα σχεδιάστηκε 1,5 m από την αρχή των αξόνων δεδομένου ότι η πλήμνη έχει διάμετρο 3 m. Το επόμενο βήμα είναι ο καθορισμός των οριακών συνθηκών για όλους τους τομείς ως εξής:



Σχήμα 8.1 Διάταξη πεδίου ρευστού που περικλείει την λεπίδα

Εισροή (Inlet)

Σύμφωνα με την αρχή της διάτμησης του ανέμου, η ταχύτητα του ανέμου δεν είναι σταθερή και μεταβάλλεται με το ύψος. Έτσι, η εξίσωση $I = \frac{\sigma_u}{\bar{u}}$ ορίζεται και τίθεται ως η ταχύτητα του ανέμου εισόδου στο οριακό στρώμα εισόδου. Το είδος του ρευστού θεωρείται αέρας στους 15 °C, στη θερμοκρασία δηλαδή που επικρατεί στο επίπεδο της θάλασσας, όπου ο αέρας έχει πυκνότητα 1.225 kg/m³ .

Εκροή (Outlet)

Ο τύπος εκροής έχει θεωρηθεί ανοιχτής τάξης όπου το ρευστό μπορεί να εισέλθει και να εισέλθει μέσω των οριακών επιφανειών. Η τιμή της σχετικής πίεσης υποτίθεται επίσης ότι είναι μηδενική λόγω της απεριόριστης περιοχής γύρω από την ανεμογεννήτρια.

Μοντέλο Τύρβης

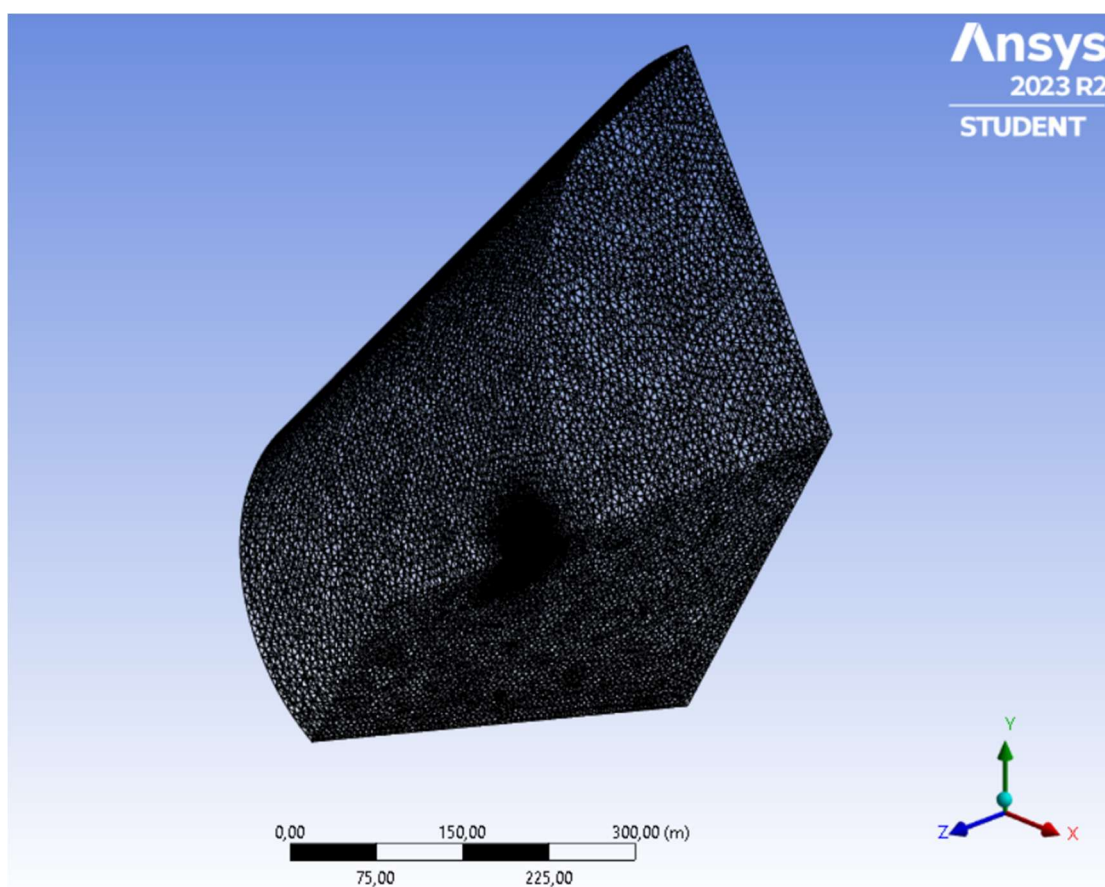
το μοντέλο τύρβης για το πεδίο ροής έχει επιλεγεί είναι το Shear Stress Transport (SST) λόγω του πλεονεκτήματός αυτού του μοντέλου σε σχέση με το μοντέλο k - ε που περιεγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Αρχικές Συνθήκες

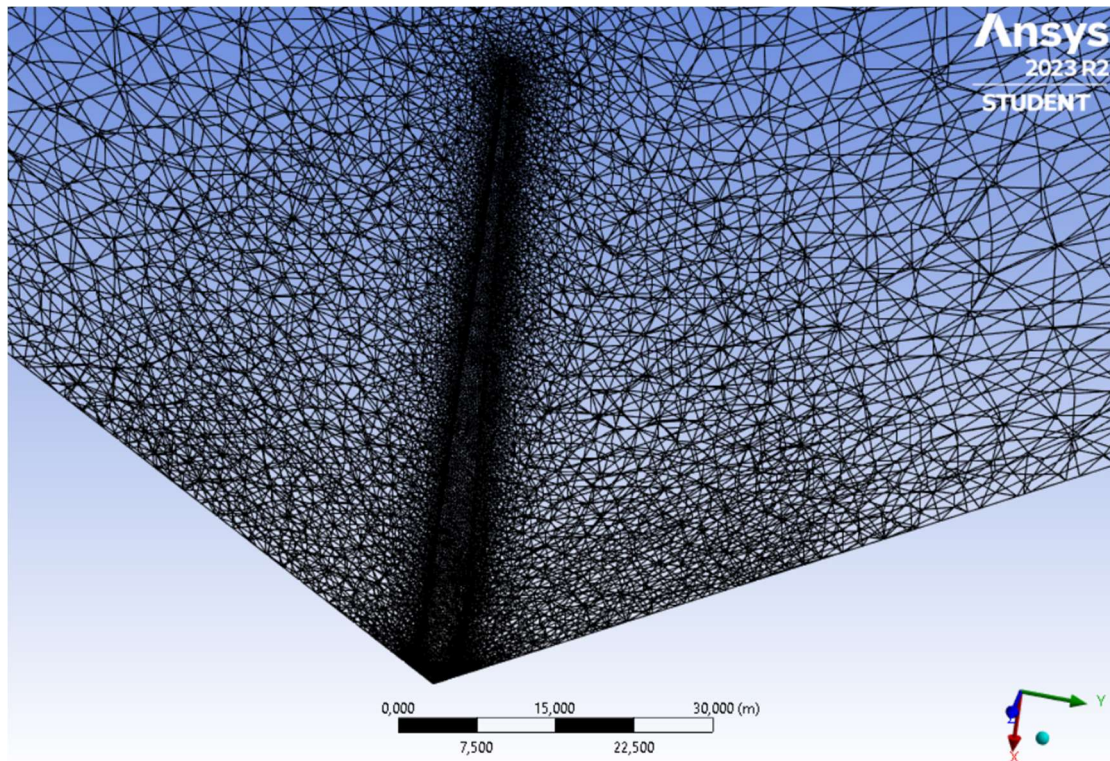
Η σχετική πίεση μεταξύ των οριακών στρωμάτων εισροής και εκροής θεωρείται επίσης μηδενική στο πεδίο ροής. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές της ανεμογεννήτριας, η γωνιακή ταχύτητα του πεδίου ροής πρέπει να οριστεί στις 12,1 στροφές ανά λεπτό, η οποία είναι η μέγιστη ταχύτητα περιστροφής του ρότορα. Ως εκ τούτου, η ταχύτητα του ρότορα έχει καθοριστεί ως σταθερή τιμή στο λογισμικό. Επίσης, η τιμή της ταχύτητα αέρα εισροής θα είναι ίση με 10 m/s, σύμφωνα με τις μετρήσεις των μέσων ταχυτήτων αέρα σε επίπεδο θάλασσας του IEC.

8.3 Mesh

Στόχος του mesh είναι η παραγωγή πλεγμάτων υψηλής ποιότητας που μπορούν να επιλύσουν φαινόμενα οριακού στρώματος και να πληρούν αυστηρά κριτήρια ποιότητας. Το mesh του Fluent κατασκευάζει πλέγματα που περιλαμβάνουν τετράεδρα, πρίσματα και πυραμίδες σε πρότυπο τρισδιάστατο μοντέλο πλέγματος και επίσης μπορεί να περιλαμβάνει εξάεδρα σε λειτουργία 2D-meshing. Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται με σειρά το mesh του πεδίου ροής, και το mesh της λεπίδας στο πεδίο ροής.



Σχήμα 8.2 Πλέγμα πεδίου ρευστού



Σχήμα 8.3 Πλέγμα λεπίδας ανεμογεννήτριας

Οι κόμβοι (nodes) είναι διασταυρώσεις ή τελικά σημεία σε ένα σύστημα που συχνά περιλαμβάνουν οριακές συνθήκες, ενώ τα στοιχεία (elements) είναι μεμονωμένα μέρη που μεταφέρουν φυσικές ιδιότητες και εξισώσεις που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο. Το mesh αυτό χρησιμοποιεί πολυεδρικό πλέγμα το οποίο προκύπτει απευθείας από το τετραεδρικό πλέγμα σχηματίζοντας πολύγωνα γύρω από κάθε κόμβο του τετραεδρικού πλέγματος. Παρακάτω φαίνεται το πλήθος κόμβων και στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν στο mesh που φαίνεται στις παραπάνω εικόνες.

Domain	Nodes	Elements
fluid	150904	725802

Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζονται τα μέτρα ποιότητας skewness (λοξότητα) και orthogonal quality (ορθογωνική ποιότητα) για τον προσδιορισμό της ποιότητας του πλέγματος. Συγκεκριμένα το skewness προσδιορίζει πόσο κοντά στο ιδανικό (δηλαδή, ισόπλευρο ή ισογωνικό) είναι μια επιφάνεια ή ένα κελί. Συγκεκριμένα, δίνονται οι παρακάτω πίνακες για την ποιότητα του πλέγματος ανάλογα με τα μέτρα ποιότητας αυτά.

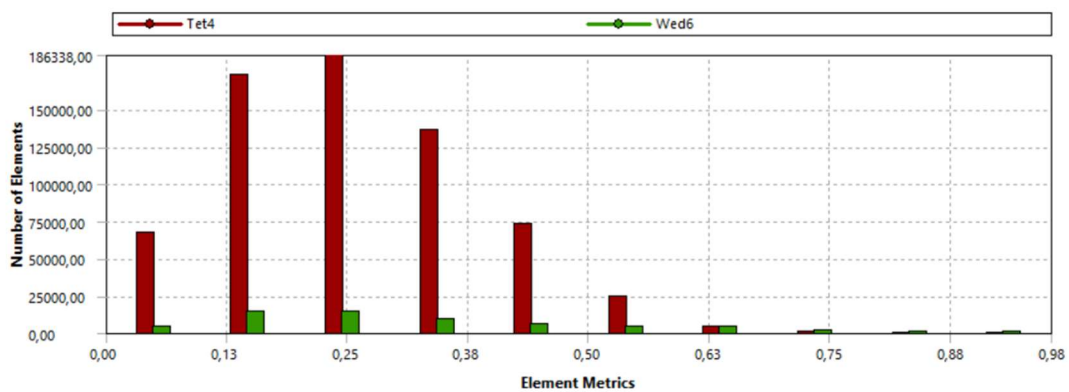
Skewness:

Outstanding	Very Good	Good	Sufficient	Bad	Inappropriate
0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.95	0.95-0.98	0.98-1.00

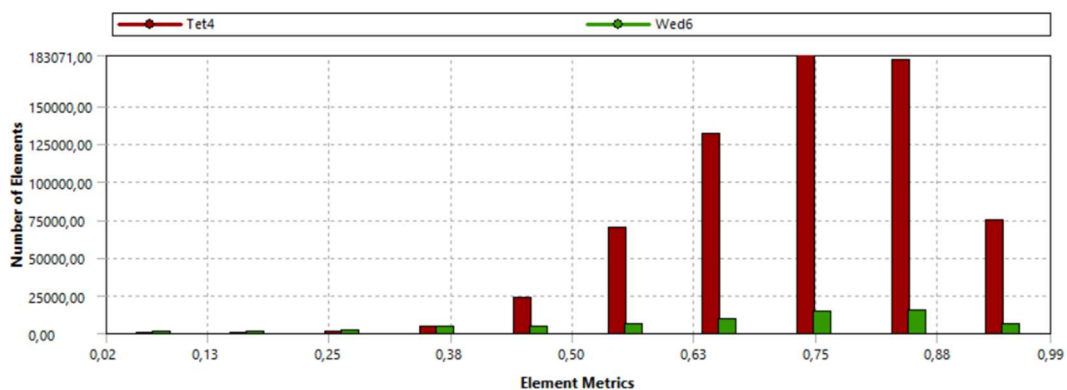
Orthogonal quality:

Inappropriate	Bad	Sufficient	Good	Very Good	Outstanding
0-0.001	0.001-0.15	0.15-0.20	0.20-0.70	0.70-0.95	0.95-1.00

Στο δικό μας πλέγμα τα μέτρα ποιότητας είχαν τις εξής μετρήσεις:



Σχήμα 8.4 Skewness



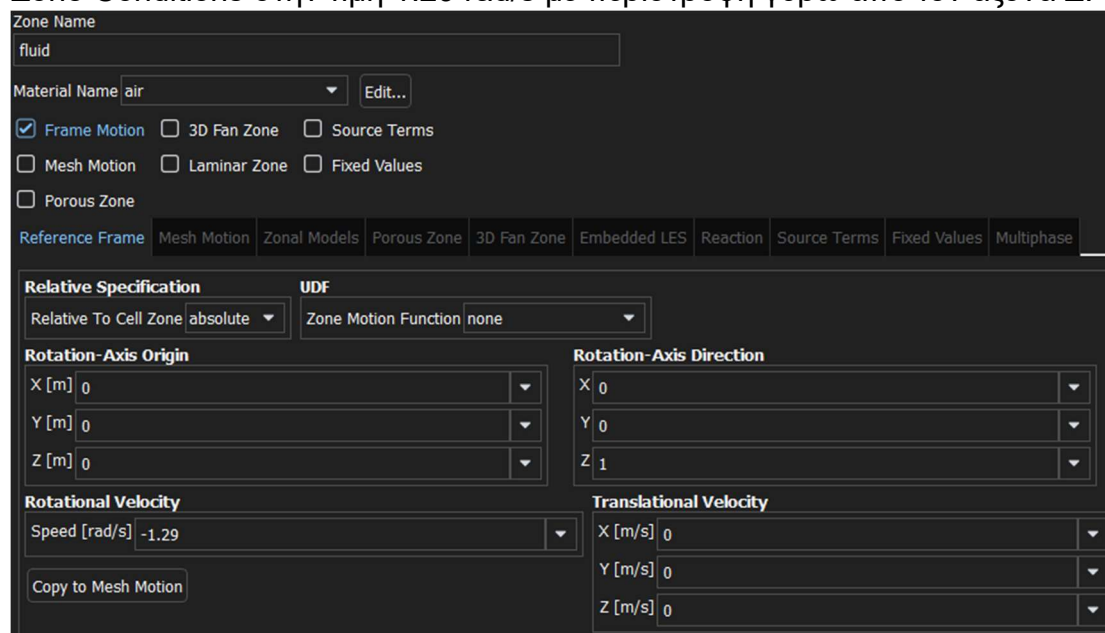
Σχήμα 8.5 Orthogonal Quality

8.4 Διαμόρφωση Φυσικών Συνθηκών

Η προσομοίωση πραγματοποιείται με το πρόγραμμα ANSYS Fluent, όπου η διαμόρφωση των φυσικών μοντέλων γίνεται με χρήση διπλής ακρίβειας και παράλληλης επεξεργασίας (parallel processing) σε 2 πυρήνες (cores), λόγω του μεγέθους της προσομοίωσης στις ρυθμίσεις του setup. Αυτή η

προσομοίωση είναι μονίμου ρεύματος (steady-state simulation) και χρησιμοποιεί επιλυτή που βασίζεται στην πίεση (pressure-based solver).

Στη συνέχεια, ρυθμίζονται οι ιδιότητες του ρευστού, το οποίο σε αυτή την περίπτωση είναι αέρας σε συνθήκες επιπέδου θαλάσσης, καθώς και η γωνιακή ταχύτητα της λεπίδας, η οποία εισάγεται μέσω της ρύθμισης Cell Zone Conditions στην τιμή 1.29 rad/s με περιστροφή γύρω από τον άξονα Z.



Σχήμα 8.6 Ρυθμίσεις Cell Zone Conditions

Ένα από τα σημαντικότερα βήματα κατά την προετοιμασία για την προσομοίωση είναι ο ορισμός των οριακών συνθηκών (boundary conditions) στα στοιχεία της γεωμετρίας, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

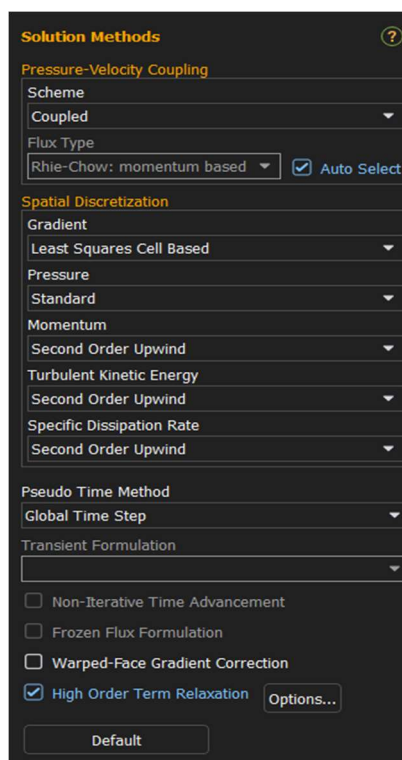
Zone	Type
Blade	Wall
Inlet	Velocity Inlet
Inlet Top	Velocity Inlet
Outlet	Pressure Outlet
Periodic 1	Interface
Periodic 2	Interface

Πίνακας IV Ορισμός οριακών συνθηκών στα στοιχεία της γεωμετρίας

Η επιφάνεια της λεπίδας ορίζεται ως στατικός τοίχος (stationary wall), ενώ η κίνηση της προσομοιώνεται μέσω του περιοχής κυψελών (Cell Zone) που ορίστηκε προηγουμένως. Η είσοδος, η οποία χωρίζεται σε δύο σημεία (inlet και inlet top), ορίζεται ως είσοδος ταχύτητας (velocity inlet), από όπου ο αέρας εισέρχεται με ταχύτητα 11,4 m/s, σύμφωνα με τις προδιαγραφές της

συγκεκριμένης ανεμογεννήτριας. Η έξοδος ορίζεται ως έξοδος πίεσης (pressure outlet), με την πίεση σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας να ορίζεται σε 1 ατμόσφαιρα. Τέλος, ορίζονται οι επιφάνειες periodic 1 και periodic 2 ως περιοδικά όρια (periodic boundaries), τα οποία λειτουργούν ως διασυνδέσεις πλέγματος (mesh interfaces) και περιστρέφονται με γωνία 120°.

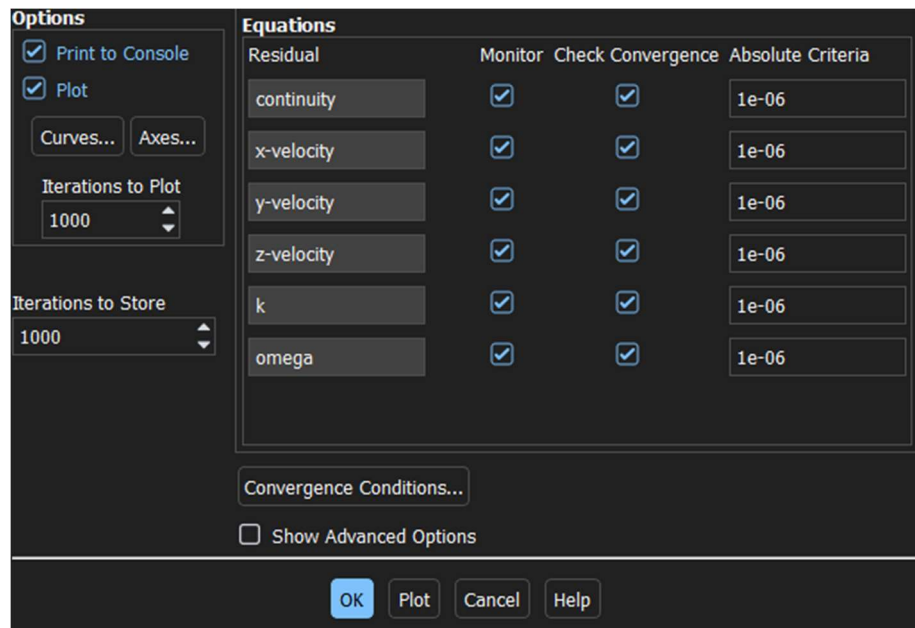
Η προσομοίωση εκτελέστηκε, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.7, με τη χρήση του συζευγμένου σχήματος (Coupled scheme), το οποίο προσφέρει μια στιβαρή και αποδοτική μέθοδο για ροές μόνιμης κατάστασης, με ανώτερη απόδοση σε σύγκριση με τα διαχωρισμένα σχήματα επίλυσης. Ο συζευγμένος αλγόριθμος επιλύει ταυτόχρονα τις εξισώσεις συνέχειας και ορμής. Η πλήρης έμμεση σύζευξη επιτυγχάνεται μέσω έμμεσης διακριτοποίησης των όρων κλίσης πίεσης στις εξισώσεις ορμής, καθώς και μέσω της έμμεσης διακριτοποίησης της ροής μάζας στις επιφάνειες, συμπεριλαμβανομένων των όρων διάχυσης πίεσης κατά Rhie-Chow.



Σχήμα 8.7 Ρυθμίσεις διαδικασίας προσομοίωσης

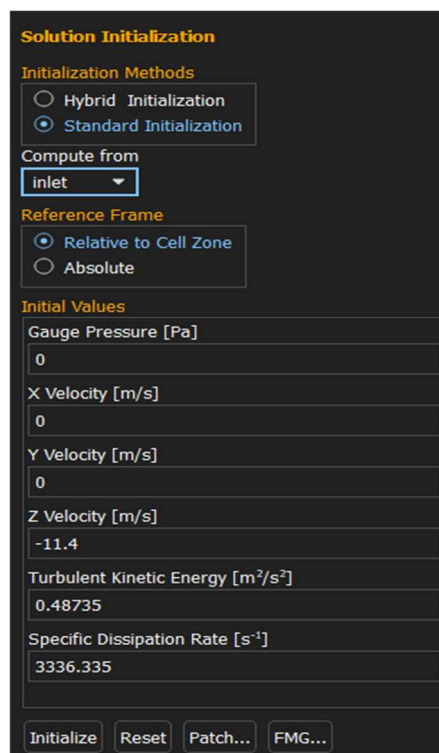
Ένα κρίσιμο βήμα στην προετοιμασία της προσομοίωσης είναι ο ορισμός ενός απόλυτου ορίου σύγκλισης για τα υπολείμματα (residuals), το οποίο καθορίζει τη σταθερότητα και την ακρίβεια της λύσης. Στην παρούσα προσομοίωση, οι τιμές αυτές έχουν οριστεί στο 10^{-6} , όπως φαίνεται και στο Σχήμα 8.8. Ο καθορισμός ενός τόσο χαμηλού ορίου για τα υπολείμματα εγγυάται ότι οι αριθμητικές λύσεις για τις εξισώσεις ορμής, συνέχειας, και ενέργειας έχουν συγκλίνει επαρκώς και ότι οι διαφορές μεταξύ διαδοχικών επαναλήψεων είναι πρακτικά μηδενικές. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε προσομοιώσεις που απαιτούν ακριβή σύλληψη της ροής γύρω από πολύπλοκες γεωμετρίες, όπου οι αριθμητικές αποκλίσεις θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε ανακριβή

αποτελέσματα, όπως η προσομοίωση της ροής γύρω από τις λεπίδες της ανεμογεννήτριας.



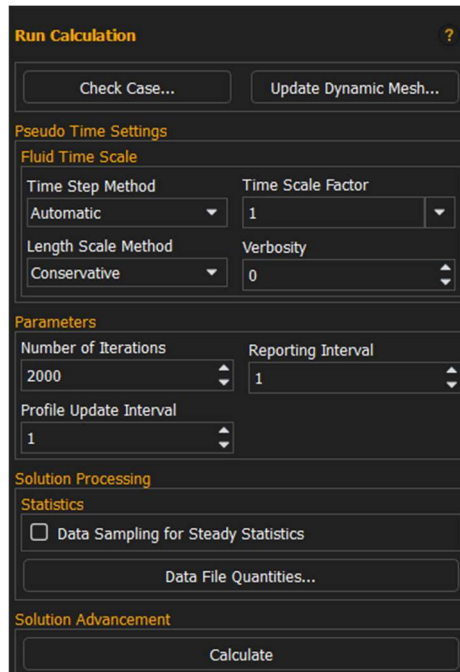
Σχήμα 8.8 Ορισμός τιμών σύγκλισης

Το τελευταίο βήμα που πρέπει να ρυθμιστεί είναι η αρχικοποίηση της προσομοίωσης. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.9, η προσομοίωση ακολουθεί τυπική αρχικοποίηση (Standard Initialization), όπου οι τιμές θα υπολογίζονται από την είσοδο (inlet) και οι αρχικές τιμές θα είναι όπως φαίνονται παρακάτω.



Σχήμα 8.9 Αρχικοποίηση Προσομοίωσης

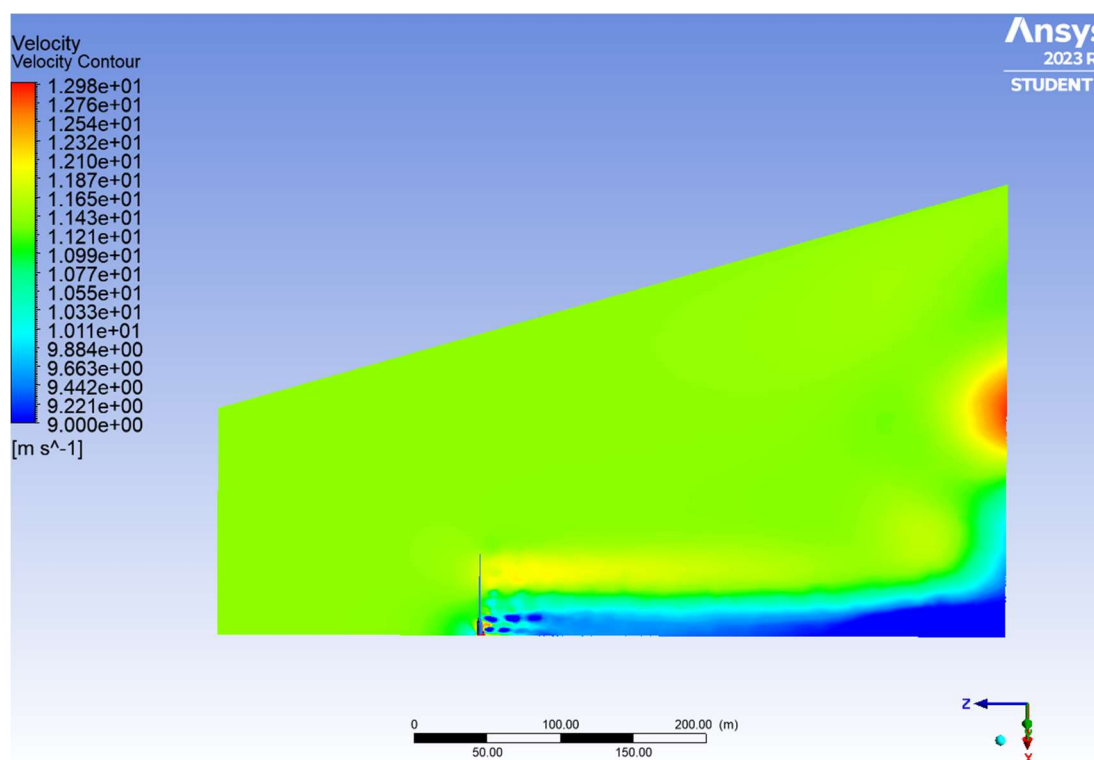
Η εκτέλεση της προσομοίωσης γίνεται με 2000 επαναλήψεις για την επίτευξη σύγκλισης και την εξαγωγή ακριβών αποτελεσμάτων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.10.



Σχήμα 8.10 Εκτέλεση προσομοίωσης

9. Αποτελέσματα

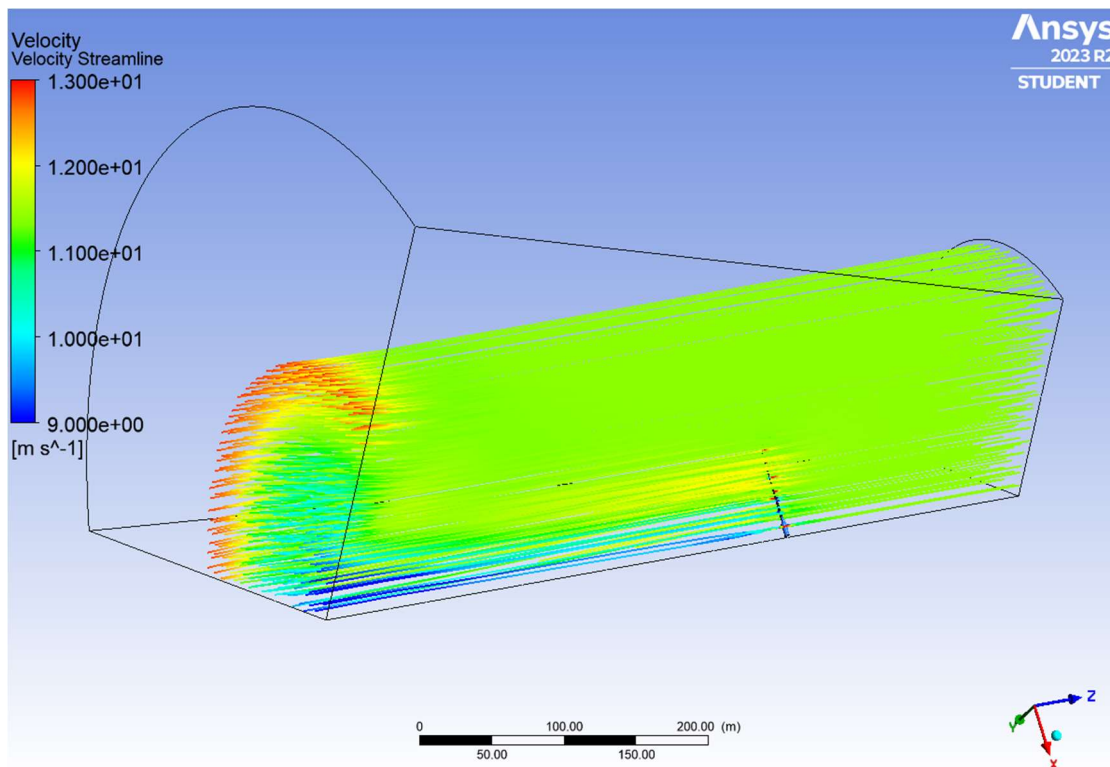
Όταν η ενέργεια του ανέμου εξάγεται από μια ανεμογεννήτρια, τότε ο αέρας φεύγει από την τουρμπίνα με μικρότερη ταχύτητα, λιγότερη ενέργεια και υψηλότερο επίπεδο τύρβης, το οποίο ονομάζεται απόρρευμα μιας ανεμογεννήτριας. Μια άλλη ανεμογεννήτρια που λειτουργεί σε αυτό το απόρρευμα θα παράγει επομένως λιγότερη ενέργεια και θα ανέχεται μεγαλύτερη δομική φόρτιση από μια ανεμογεννήτρια που λειτουργεί σε ελεύθερο ρεύμα. Το απόρρευμα που δημιουργείται από μια ανεμογεννήτρια έχει σημαντικές επιπτώσεις στην αεροδυναμική απόδοση και την αποδοτικότητα της ανεμογεννήτριας, καθώς και στη συνολική παραγωγή ενέργειας ενός αιολικού πάρκου. Το σχήμα 9.1 δείχνει το σχήμα της ταχύτητας του απορρέυματος πίσω από την ανεμογεννήτρια όταν η ο αέρας περνά μέσα από την τουρμπίνα.



Σχήμα 9.1 Περίγραμμα ταχύτητας γύρω από τη λεπίδα

Το Σχήμα 9.2 υποστηρίζει περαιτέρω αυτή την παρατήρηση με την απεικόνιση των γραμμών ροής της ταχύτητας. Αυτές οι γραμμές ροής αντιπροσωπεύουν τις διαδρομές ροής των σωματιδίων του αέρα και τον τρόπο με τον οποίο αλλάζει η ταχύτητά τους καθώς αλληλοεπιδρούν με την τουρμπίνα. Η συγκέντρωση και η κάμψη των γραμμών ροής πίσω από την τουρμπίνα υποδηλώνουν αναταραχή και πτώση της ταχύτητας, ενισχύοντας την ιδέα ότι το απόρρευμα όχι μόνο μειώνει την ταχύτητα του ανέμου αλλά και διαταράσσει τη ροή, καθιστώντας τον αέρα λιγότερο αποδοτικό.

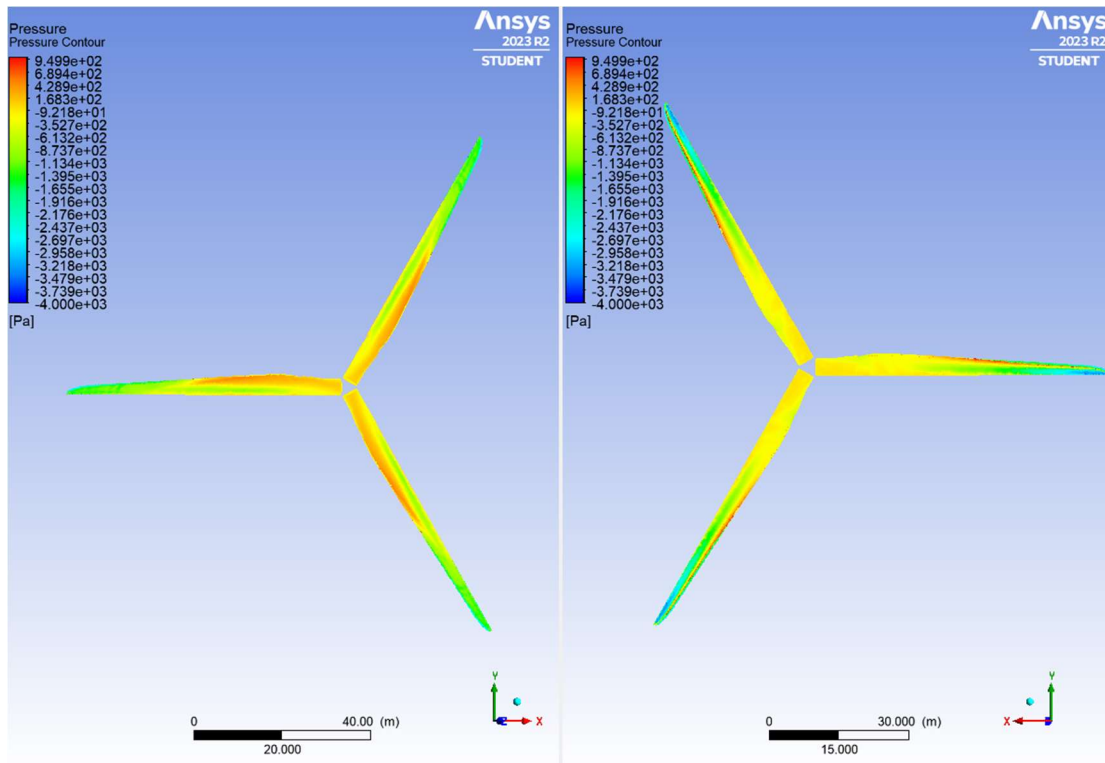
Η κατανόηση του φαινομένου του απορροεύματος είναι ζωτικής σημασίας για τη βελτιστοποίηση της τοποθέτησης των ανεμογεννητριών σε ένα αιολικό πάρκο. Οι μηχανικοί επιδιώκουν να ελαχιστοποιήσουν τον αντίκτυπο των κυμάτων αυτών με την κατάλληλη χωροθέτηση των ανεμογεννητριών και τη χρήση προηγμένων υπολογιστικών μοντέλων για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των κυμάτων. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε βελτιωμένους σχεδιασμούς αιολικών πάρκων που μεγιστοποιούν την παραγωγή ενέργειας και ταυτόχρονα μειώνουν τη φθορά των ανεμογεννητριών.



Σχήμα 9.2 Γραμμές ροής ταχύτητας γύρω από την λεπίδα

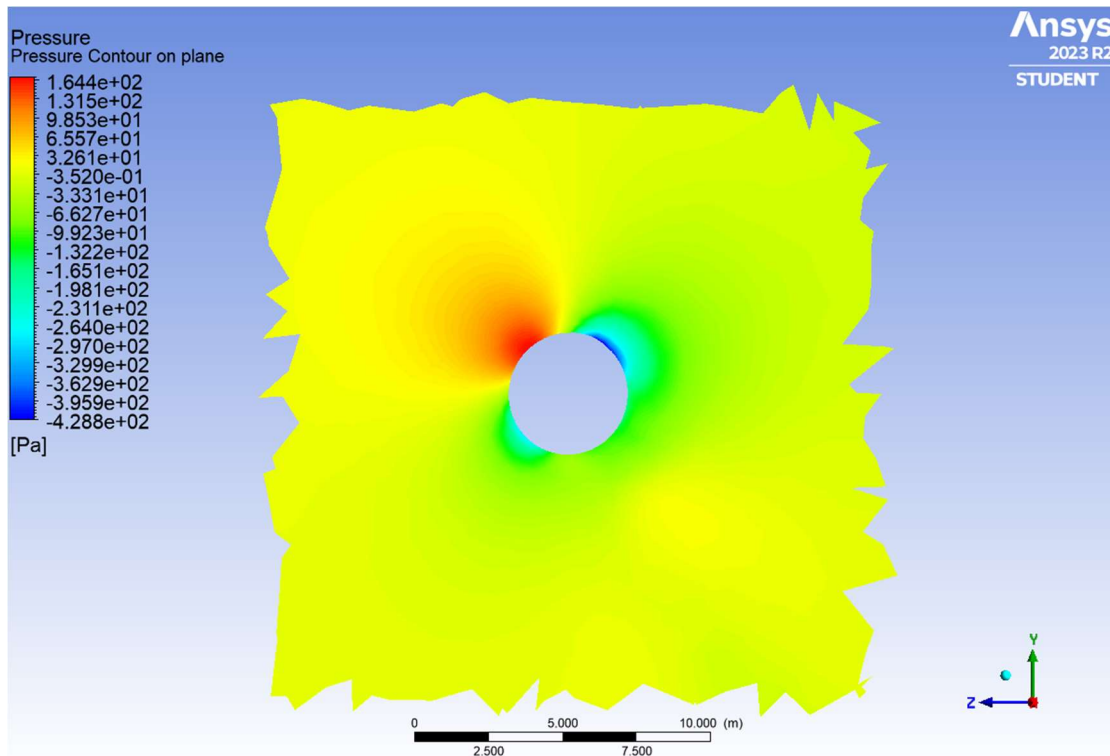
Η ενέργεια του ανέμου που απορροφάται από τις ανεμογεννήτριες μειώνει την ταχύτητα του αέρα και αυξάνει την αναταραχή, επηρεάζοντας την απόδοση της και της επόμενης ανεμογεννήτριας στην πορεία του ρεύματος. Η κατανόηση και η διαχείριση αυτού του φαινομένου είναι ζωτικής σημασίας για τη βέλτιστη χωροθέτηση των ανεμογεννητριών σε ένα αιολικό πάρκο, με στόχο τη μέγιστη παραγωγή ενέργειας και ελαχιστοποίηση της φθοράς.

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η πίεση που ασκείται πάνω στις λεπίδες της ανεμογεννήτριας στην προσήνεμη και στην υπήνεμη πλευρά της αντίστοιχα



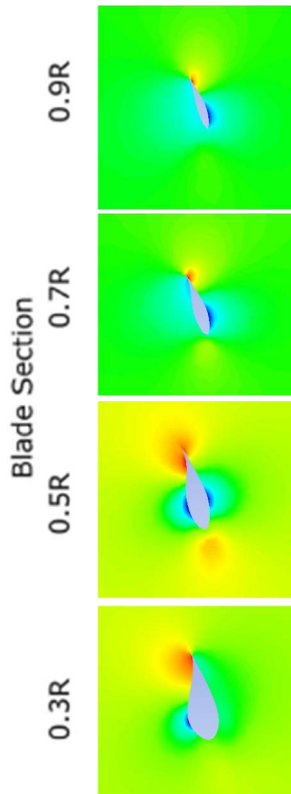
Σχήμα 9.3 Περίγραμμα στατικής πίεσης που ασκείται στις λεπίδες

Από το παραπάνω σχήμα είναι κατανοητό ότι εφόσον η συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια είναι προσήνεμη (Upwind) θα δημιουργηθούν ορισμένες μεταβολές πίεσης. Συγκεκριμένα, η πίεση που δέχεται η λεπίδα από την προσήνεμη πλευρά θα είναι μεγαλύτερη από αυτήν της υπήνεμης πλευράς. Μια περιοχή χαμηλής πίεσης σχηματίζεται πάνω από την επιφάνεια αναρρόφησης του πτερυγίου (υπήνεμη πλευρά) και μια περιοχή υψηλής πίεσης σχηματίζεται πάνω από την επιφάνεια πίεσης του πτερυγίου (προσήνεμη πλευρά του πτερυγίου) ως αποτέλεσμα των τοπικών επιταχύνσεων της ροής. Μια περιοχή χαμηλής πίεσης δημιουργείται επίσης από τη δίνη που σχηματίζεται καθώς ο αέρας ρέει γύρω από το άκρο από την πλευρά πίεσης του πτερυγίου προς την πλευρά αναρρόφησης. Ο στρόβιλος της κορυφής διαδίδεται προς τα κάτω στην κατεύθυνση του ανέμου, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

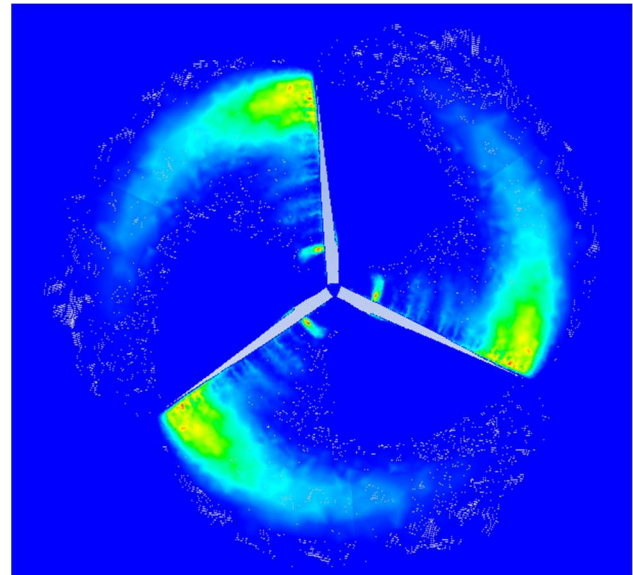


Σχήμα 9.4 Περίγραμμα πίεσης «εδάφους» γύρω από την λεπίδα

Φαίνεται επίσης στο σχήμα 9.5 η πίεση κατά μήκος του ανοίγματος της λεπίδας, όπου παρατηρείται σε λεπτομέρεια το φαινόμενο που περιγράφηκε παραπάνω.



Σχημα 9.5 Πίεση κατά μήκος λεπίδας



Σχημα 9.6 Κατανομή ιξώδους δινών

Επιπλέον, το σχήμα 9.6 απεικονίζει την κατανομή του τυρβώδης ιξώδους γύρω από τις λεπίδες της υπεράκτιας ανεμογεννήτριας, όπως προκύπτει από τις προσομοιώσεις CFD. Το τυρβώδης ιξώδες είναι μια βασική παράμετρος στη μοντελοποίηση της τύρβης, καθώς ποσοτικοποιεί το αποτελεσματικό ιξώδες που οφείλεται στις τυρβώδεις δίνες, επηρεάζοντας τη μεταφορά ορμής εντός της ροής.

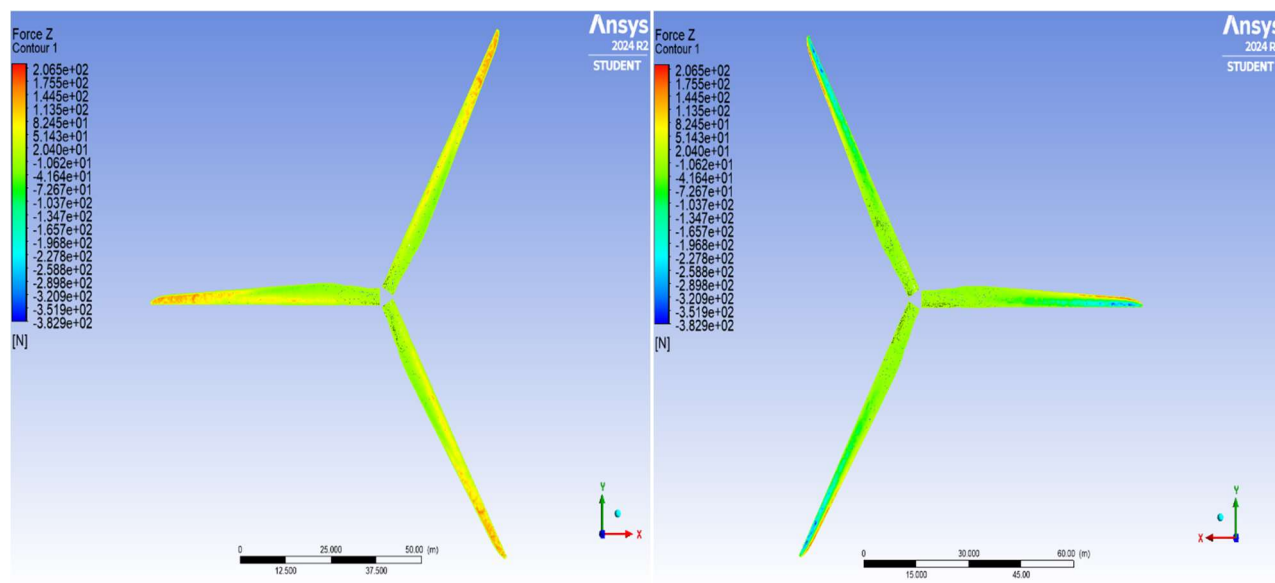
Συγκεκριμένα, στο σχημα 9.6 παρατηρείται υψηλό ιξώδες κοντά στις κορυφές των λεπίδων καθώς, οι περιοχές κοντά στις άκρες των λεπίδων παρουσιάζουν σημαντικά υψηλότερο ιξώδες, όπως υποδεικνύεται από τα έντονα χρώματα. Η αύξηση αυτή οφείλεται στους στροβίλους των άκρων των λεπίδων, οι οποίοι αποτελούν κοινή πηγή αναταράξεων στις περιστρεφόμενες μηχανές.

Παρατηρείται επίσης και διάχυση του στροβιλισμού, καθώς το ιξώδες των στροβίλων μειώνεται σταδιακά καθώς απομακρυνόμαστε από τις λεπίδες, γεγονός που υποδεικνύεται από τη μετάβαση σε πιο σκούρες μπλε περιοχές. Αυτό υποδηλώνει αποτελεσματική διάχυση της τύρβης μακριά από τις ζώνες υψηλής ενέργειας.

Η ανάλυση του ιξώδους των στροβίλων παρέχει εικόνα των επιδράσεων της τύρβης, οι οποίες είναι ζωτικής σημασίας για την κατανόηση της αεροδυναμικής απόδοσης του στροβίλου. Το υψηλό ιξώδες δινών κοντά στα άκρα των πτερυγίων υποδεικνύει περιοχές όπου οι απώλειες ενέργειας λόγω

τύρβης είναι πιο σημαντικές, υποδεικνύοντας πιθανές περιοχές για βελτιστοποίηση στο σχεδιασμό των πτερυγίων.

Προκειμένου να γίνει κατανοητή η αεροδυναμική φόρτιση των λεπίδων της ανεμογεννήτριας, διεξήχθη λεπτομερής ανάλυση των δυνάμεων που δρουν κατά μήκος του άξονα Z. Η κατανομή των δυνάμεων απεικονίστηκε τόσο για το προφίλ προς τον άνεμο (με κατεύθυνση προς την είσοδο) όσο και για το προφίλ προς τον άνεμο (με κατεύθυνση προς την έξοδο), όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 9.7.



Σχήμα 9.7 Κατανομή των δυνάμεων στην προσήνεμη (αριστερά) και υπήνεμη (δεξιά) πλευρά των λεπίδων

Στο Σχήμα 9.7 παρουσιάζεται η κατανομή των δυνάμεων στην προσήνεμη πλευρά των πτερυγίων, όπου ο εισερχόμενος άνεμος προσκρούει απευθείας στις επιφάνειες των λεπίδων. Όπως αναμενόταν, τα μπροστινά άκρα των λεπίδων, τα οποία συναντούν πρώτα τον άνεμο, δέχονται τις υψηλότερες δυνάμεις, όπως υποδεικνύεται από τις κόκκινες περιοχές στο διάγραμμα περιγραμμάτων. Οι δυνάμεις μειώνονται σταδιακά κατά μήκος της λεπίδας, ιδίως προς τα ακραία άκρα, λόγω της μείωσης της ταχύτητας του ανέμου καθώς περνάει πάνω από τη λεπίδα.

Αντίθετα, η δεξιά εικόνα, αναπαριστά την κατανομή των δυνάμεων στην προσήνεμη πλευρά, όπου ο άνεμος έχει ήδη περάσει από το πτερύγιο. Οι δυνάμεις εδώ είναι αισθητά χαμηλότερες, ιδίως στις πρόσθιες ακμές, καθώς ο άνεμος έχει χάσει σημαντική ενέργεια. Αυτό το μοτίβο είναι σύμφωνο με την αναμενόμενη αεροδυναμική συμπεριφορά, όπου η προσήνεμη πλευρά υφίσταται υψηλότερα φορτία λόγω της άμεσης πρόσκρουσης του ανέμου, ενώ η υπήνεμη πλευρά αντιμετωπίζει τα φαινόμενα απορρεύματος και τη μειωμένη ενέργεια του ανέμου.

Αυτές οι απεικονίσεις είναι ζωτικής σημασίας για την αξιολόγηση της δομικής ακεραιότητας και της απόδοσης της ανεμογεννήτριας υπό συνθήκες λειτουργίας. Επιβεβαιώνουν ότι ο σχεδιασμός του πτερυγίου διαχειρίζεται κατάλληλα τα αεροδυναμικά φορτία και ευθυγραμμίζεται με τις θεωρητικές προβλέψεις για τη δέσμευση και τη διανομή της αιολικής ενέργειας.

10. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο πρωταρχικός στόχος της παρούσας έρευνας ήταν να χρησιμοποιηθούν προσομοιώσεις υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) για τη διερεύνηση των αεροδυναμικών και δομικών χαρακτηριστικών μιας λεπίδας υπεράκτιας ανεμογεννήτριας 5MW, τηρώντας τα πρότυπα που έχει θέσει το National Renewable Energy Laboratory (NREL). Οι προσομοιώσεις παρείχαν πολύτιμες γνώσεις σχετικά με τη συμπεριφορά της λεπίδας υπό συνθήκες λειτουργίας υπεράκτιων ανεμογεννητριών, οι οποίες είναι ζωτικής σημασίας για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και των επιδόσεων.

Τα ευρήματα υπογραμμίζουν τη σημασία της συνεκτίμησης των φαινομένων των απορρευμάτων κατά το σχεδιασμό και τη διάταξη των ανεμογεννητριών σε ένα αιολικό πάρκο. Η μείωση της ταχύτητας του ανέμου εντός της ζώνης των απορρευμάτων μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένη παραγωγή ενέργειας για τις κατάντη ανεμογεννήτριες, ενώ η αυξημένη τύρβη μπορεί να επιβάλει πρόσθετα μηχανικά φορτία, οδηγώντας ενδεχομένως σε ταχύτερη φθορά. Η σωστή χωροθέτηση και η στρατηγική τοποθέτηση των ανεμογεννητριών είναι απαραίτητες για τον μετριασμό αυτών των επιπτώσεων και τη βελτιστοποίηση της συνολικής απόδοσης του αιολικού πάρκου.

Η μελέτη εντόπισε επίσης κρίσιμες περιοχές δομικής καταπόνησης στη λεπίδα, αναδεικνύοντας πιθανά σημεία κόπωσης. Η κατανομή της αεροδυναμικής πίεσης μεταφράστηκε σε διαφορετικά επίπεδα τάσης, υποδεικνύοντας περιοχές που είναι επιρρεπείς σε φθορά και αστοχία. Οι πληροφορίες αυτές είναι ζωτικής σημασίας για τον σχεδιασμό πτερυγίων που μπορούν να αντέξουν μακροχρόνιες λειτουργικές καταπονήσεις.

Η ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των αποτελεσμάτων προσομοίωσης και της αναμενόμενης συμπεριφοράς στον πραγματικό κόσμο επικυρώνει την ακρίβεια του μοντέλου CFD. Παρέχοντας μια κατανόηση της αεροδυναμικής και της δομικής δυναμικής, η μελέτη συμβάλλει στην πρόοδο της τεχνολογίας της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας, προωθώντας πιο αποδοτικά και αξιόπιστα συστήματα.

11. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) S.L. Dixon and C.A. Hall, Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery, Chapter 10,
- 2) The Crown Estate, Offshore Wind Report, 2022
- 3) Aoife Foley PhD, Foundations of offshore wind turbines: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 104
- 4) Lijin Thomasa, Ramachandra Ma Advanced materials for wind turbine blade- A Review, 2016
- 5) Sathyajith Mathew, Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics, Springer, 2006
- 6) A.G. Olabi, Selection Guidelines for Wind Energy Technologies, energies, 2021
- 7) Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins, Ervin Bossanyi, WIND ENERGY Handbook, 2nd Edition, John Wiley & Sons Ltd., 2011
- 8) J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial, and G. Scott, Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development, NREL, 2009
- 9) ANSYS Help; 2010
- 10) A Hands-on Introduction to Engineering Simulations, Cornell University
- 11) Alik Ismail-Zadeh and Paul Tackley, Computational Methods for Geodynamics, Cambridge University, 2010
- 12) H.K Versteeg and W. Malalasekera, An Introduction to Computational Fluid Dynamics, 2nd Edition, Pearson Education, 2007
- 13) Ji-Won Jin and Ki-Weon Kang, Ultimate load characteristics of NREL 5-MW offshore wind turbines with different substructures, Article in International Journal of Energy Research, 2015
- 14) <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node361.htm>
- 15) Mohammad Ali Aseman Bakhsh and Omid Karimi, The Comparison of Numerical Simulations of Offshore and Onshore Wind Turbines with Experimental Data, 2023
- 16) Lorenzo Cottura, Riccardo Caradonna, Alberto Ghigo, Riccardo Novo, Giovanni Bracco and Giuliana Mattiazzo, Dynamic Modeling of an Offshore Floating Wind Turbine for Application in the Mediterranean Sea, 2021
- 17) Titus Petrilă and Damian Trif, Basics of Fluid Mechanics and Introduction to Computational Fluid Dynamics, 2005
- 18) Pope, S. B. Turbulent Flows. Cambridge University Press, 2000

19) Mariana L. Pinto, Guilherme R. Franzini, Alexandre N. Simos, A CFD analysis of NREL's 5MW wind turbine in full and model scales, 2020