

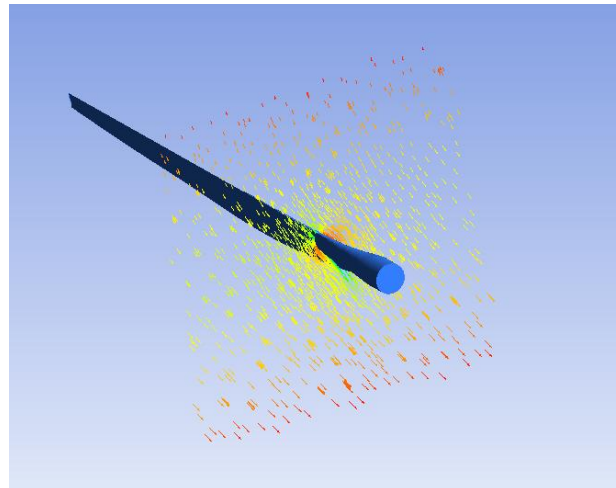


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΤΕΡΩΤΗΣ  
ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ



ΟΝΟΜΑ: ΝΙΚΗΤΑΣ

ΕΠΩΝΥΜΟ: ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ

ΑΜ: 6679

ΟΝΟΜΑ: ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΕΠΩΝΥΜΟ: ΠΑΥΛΑΤΟΣ

ΑΜ: 6687

Επιβλέπων Καθηγητής : Ευγένιος Σκούρας

Πάτρα 2020

### **Ευχαριστίες,**

Θα θέλαμε αρχικά να ευχαριστήσουμε τον επιβλέποντα καθηγητή μας, κύριο Ευγένιο Σκούρα που με την καθοδήγηση και τις υποδείξεις του οποίου εκπονήθηκε η συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία. Επίσης, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τις οικογένειάς μας για όλη τη στήριξη που έχουμε λάβει κατά τα φοιτητικά μας χρόνια αλλά και όλους όσους στάθηκαν στο πλευρό μας κατά τα φοιτητικά μου χρόνια, φίλους και συμφοιτητές. Η συνεισφορά τους ήταν πολύτιμη.

# Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 .....	7
1.1 Εισαγωγή .....	7
1.2 Προϊστορία .....	8
1.3 Τύποι Ανεμογεννητριών .....	11
1.3.1 Οριζόντιου Άξονα .....	11
1.3.2 Κάθετου Άξονα .....	13
1.4 Μη συμβατικοί τύποι Ανεμογεννητριών .....	15
1.5 Σχεδίαση και Κατασκευή .....	16
1.6 Λειτουργία Ανεμογεννήτριας Οριζόντιου άξονα .....	17
Κεφάλαιο 2 Υπολογισμός ισχύος Ανεμογεννήτριας .....	20
2.1 Βασικές θεμελιώδεις εξισώσεις για την ισχύ του ανέμου .....	20
2.2 Απόδοση εξαγωγής ισχύος από τον άνεμο .....	21
2.3 Ισχύς καμπύλης της ανεμογεννήτριας .....	22
2.4 Δυνάμεις Άνωσης και οπισθέλκουσας .....	24
2.5 Παράδειγμα υπολογισμού ισχύος ανεμογεννήτριας .....	25
Κεφάλαιο 3 Πεπερασμένα στοιχεία για Ρευστά .....	28
Γενικά για τα πεπερασμένα στοιχεία .....	28
3.1 Μέθοδοι πεπερασμένων διαφορών .....	31
3.2 Μέθοδοι πεπερασμένου όγκου .....	32
3.3 Φασματική μέθοδος .....	33
3.4 Υβριδική μέθοδος .....	36
3.5 Εξισώσεις Poisson: Πίεση σε Navier – Stoke .....	37
3.6 Εξισώσεις Poisson .....	37
3.7 Οριακές συνθήκες για αδύναμες εξισώσεις .....	37
3.8 Φυσικές οριακές Συνθήκες .....	38
3.9 Βασικές εξισώσεις πεπερασμένων στοιχείων .....	38
3.10 Προσέγγιση Galerkin .....	39
3.11 Από τοπικό σε ολικό ( Global to Local) .....	39
3.12 Πρόβλημα πεπερασμένης διαφοράς Poisson Matrix .....	40
3.13 Πρόβλημα Poisson Matrix Πεπερασμένου Όγκου .....	40
Κεφάλαιο 4 σχεδίαση Φτερού Ανεμογεννήτριας στο Ansys Modeler .....	41
4.1 Λεπτομέρειες ανάλυσης .....	43
4.1.1 Μαθηματικό Μοντέλο .....	43
4.1.2 Συνοριακές συνθήκες .....	44

4.2 Διακριτοποίηση .....	46
4.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων .....	47
Συμπεράσματα .....	58
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	59

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Ανεμογεννήτριες .....	8
Εικόνα 2: Τα εξαρτήματα μιας ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα (κιβώτιο ταχυτήτων, άξονας ρότορα και συγκρότημα φρένων) ανυψώνονται στη θέση τους. ....	11
Εικόνα 3: Οι τρεις κύριοι τύποι: VAWT Savonius, HAWT towered; VAWT Darrieus καθώς εμφανίζονται σε λειτουργία.....	13
Εικόνα 4: Ανεμογεννήτρια κάθετου άξονα .....	14
Εικόνα 5: Ανεμογεννήτρια αντίθετης περιστροφής.....	15
Εικόνα 6: Ανεμογεννήτρια αυτοκινητόδρομου .....	15
Εικόνα 7: Ανεμογεννήτρια ελαφρού πόλου.....	16
Εικόνα 8: Εξαρτήματα ανεμογεννήτριας .....	17
Εικόνα 9: Σχηματικό σύστημα παραγωγής ανεμογεννητριών .....	18
Εικόνα 10: Από κοινού συμφωνημένος τύπος ανεμογεννητριών και η απόκρισή του.....	19
Εικόνα 11: Καμπύλη ισχύος στροβίλου 1500 kW .....	23
Εικόνα 12: Κατανομή συχνότητας ανέμου .....	23
Εικόνα 13: Δυνάμεις ανυψώσεις και οπισθέλκουσας σε μια ανεμογεννήτριας .....	24
Εικόνα 14: Παράδειγμα υπολογισμού ισχύος ανεμογεννήτριας .....	25
Εικόνα 15: Παράδειγμα υπολογισμού ισχύος ανεμογεννήτριας .....	26
Εικόνα 16: Παράδειγμα υπολογισμού ισχύος ανεμογεννήτριας .....	27
Εικόνα 17: Παράδειγμα υπολογισμού ισχύος ανεμογεννήτριας .....	27
Εικόνα 18: Παράδειγμα χρήσεις πεπερασμένων στοιχείων .....	30
Εικόνα 19: Φασματική μέθοδος.....	34
Εικόνα 20: Φασματική μέθοδος.....	34
Εικόνα 21: Φασματική μέθοδος.....	35
Εικόνα 22: Φασματική μέθοδος.....	36
Εικόνα 23: Matrix Poisson .....	40
Εικόνα 24: Poisson Matrix Πεπερασμένου Όγκου .....	40
Εικόνα 25: Σχεδίαση μοντέλου στο Ansys Modeler .....	41
Εικόνα 26.....	42
Εικόνα 27: Περιοδικά Πλευρικά όρια .....	45
Εικόνα 28: Διακριτοποίηση μοντέλου.....	46
Εικόνα 29: Τομή στο mesh .....	46
Εικόνα 30: Παρουσίαση όλου του μοντέλου .....	47
Εικόνα 31: Παρουσίαση όλου του μοντέλου .....	47
Εικόνα 32: Κατανομή της ταχύτητας πάνω στην Ανεμογεννήτρια .....	48
Εικόνα 33: Κατανομή ταχύτητας πάνω στην Ανεμογεννήτρια .....	48
Εικόνα 34: Κατανομή ταχύτητας πάνω στην Ανεμογεννήτρια .....	49
Εικόνα 35: Ροή αέρα γύρω από τα φτερά .....	49
Εικόνα 36: Ροή αέρα γύρω από τα φτερά .....	50
Εικόνα 37: Κατανομή πίεσης πάνω στα φτερά.....	50
Εικόνα 38: Κατανομή πίεσης πάνω στα φτερά.....	51
Εικόνα 39: Κατανομή πίεσης στην πίσω πλευρά των φτερών .....	52
Εικόνα 40: Δημιουργώντας τομή πάνω στα αποτελέσματα .....	52
Εικόνα 41: Δημιουργώντας τομή πάνω στα αποτελέσματα .....	53
Εικόνα 42: Κατανομή πίεσης πάνω στην τομή στα 10m.....	53
Εικόνα 43: Κατανομή πίεσης πάνω στην τομή στα 10m.....	54
Εικόνα 44: Κατανομή ταχύτητας πάνω στην τομή στα 10m.....	54

Εικόνα 45: Κατανομή ταχύτητας πάνω στην τομή στα 10m.....	55
Εικόνα 46:Αλικόνειση ταχύτητας και πίεσης.....	55
Εικόνα 47: Αναπτυσσόμενη ροπή .....	56
Εικόνα 48: Αναπτυσσόμενες δυνάμεις .....	57
Εικόνα 49: Παροχή μάζας πάνω στα φτερά.....	57

# Κεφάλαιο 1

## 1.1 Εισαγωγή

Μια ανεμογεννήτρια, ή εναλλακτικά αναφέρεται ως μετατροπέας αιολικής ενέργειας, είναι μια συσκευή που μετατρέπει την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια.

Οι ανεμογεννήτριες κατασκευάζονται σε ένα ευρύ φάσμα κατακόρυφου και οριζόντιου άξονα. Οι μικρότερες τουρμπίνες χρησιμοποιούνται για εφαρμογές όπως φόρτιση μπαταρίας για βοηθητική ισχύ για σκάφη ή τροχόσπιτα ή για την τροφοδοσία προειδοποιητικών σημείων κυκλοφορίας. Μεγαλύτεροι στρόβιλοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη συνεισφορά σε εγχώρια παροχή ηλεκτρικού ρεύματος, ενώ πωλούν αχρησιμοποίητη ισχύ πίσω στον προμηθευτή κοινής ωφέλειας μέσω του ηλεκτρικού δικτύου.

Οι συστοιχίες μεγάλων στρόβιλων, γνωστών ως αιολικών πάρκων, γίνονται ολοένα και πιο σημαντική πηγή διαλείπουσας ανανεώσιμης ενέργειας και χρησιμοποιούνται από πολλές χώρες ως μέρος μιας στρατηγικής για τη μείωση της εξάρτησής τους από τα ορυκτά καύσιμα. Μια εκτίμηση ισχυρίστηκε ότι, από το 2009, ο άνεμος είχε τις «χαμηλότερες σχετικές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου, τις λιγότερες απαιτήσεις κατανάλωσης νερού και ... τις πιο ευνοϊκές κοινωνικές επιπτώσεις» σε σύγκριση με τα φωτοβολταϊκά, τα υδροηλεκτρικά, τα γεωθερμικά, τον άνθρακα και το αέριο.



Εικόνα 1: Ανεμογεννήτριες

## 1.2 Προϊστορία

Ο ανεμοφράκτης του Ήρωα της Αλεξάνδρειας (10 μ.Χ. - 70 μ.Χ.) σηματοδοτεί μία από τις πρώτες καταγεγραμμένες περιπτώσεις αιολικής ενέργειας ενός μηχανήματος στην ιστορία. Ωστόσο, τα πρώτα γνωστά πρακτικά εργοστάσια αιολικής ενέργειας κατασκευάστηκαν στο Σιστάν, μια ανατολική επαρχία της Περσίας (τώρα Ιράν), από τον 7ο αιώνα.

Αυτοί οι "Panemone" ήταν ανεμόμυλοι κάθετου άξονα, οι οποίοι είχαν μακρούς κατακόρυφους άξονες κίνησης με ορθογώνια πτερύγια. Κατασκευασμένα από έξι έως δώδεκα πανιά καλυμμένα με ψάθα καλαμιού ή ύφασμα, αυτοί οι ανεμόμυλοι χρησιμοποιήθηκαν για να αλέσουν κόκκους ή να αντλήσουν νερό και χρησιμοποιήθηκαν στις βιομηχανίες αλέσματος και ζαχαροκάλαμου.

Η αιολική ενέργεια εμφανίστηκε για πρώτη φορά στην Ευρώπη κατά τη διάρκεια του Μεσαίωνα. Τα πρώτα ιστορικά αρχεία σχετικά με τη χρήση τους στην Αγγλία χρονολογούνται στον 11ο ή 12ο αιώνα, υπάρχουν αναφορές για τους Γερμανούς σταυροφόρους να μεταφέρουν τις δεξιότητές τους στον ανεμόμυλο στη Συρία γύρω στο 1190.



Μέχρι τον 14ο αιώνα, οι ολλανδικοί ανεμόμυλοι είχαν χρησιμοποιηθεί για την αποστράγγιση περιοχών του δέλτα του Ρήνου. Οι προηγμένες ανεμογεννήτριες περιγράφηκαν από τον Κροάτη εφευρέτη Fausto Veranzio. Στο βιβλίο του *Machinae Novae* (1595) περιέγραψε τις ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα με καμπύλες ή σχήματος V λεπίδες.

Η πρώτη ανεμογεννήτρια που παράγει ηλεκτρική ενέργεια ήταν μια μηχανή φόρτισης μπαταρίας που εγκαταστάθηκε τον Ιούλιο του 1887 από τον Σκωτσέζικο ακαδημαϊκό James Blyth για να φωτίσει την εξοχική του κατοικία στο Marykirk της Σκωτίας.

Μερικούς μήνες αργότερα, ο Αμερικανός εφευρέτης Charles F. Brush κατάφερε να κατασκευάσει την πρώτη αυτόματη ανεμογεννήτρια μετά από διαβούλευση με τους τοπικούς καθηγητές και τους συναδέλφους του Πανεπιστημίου Jacob S. Gibbs και Brinsley Coleberd και με επιτυχία να αξιολογήσει τα σχέδια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο Κλίβελαντ του Οχάιο.

Αν και ο στρόβιλος της Blyth θεωρήθηκε μη οικονομικός στο Ηνωμένο Βασίλειο, [7] η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανεμογεννήτριες ήταν πιο αποδοτική από πλευράς κόστους σε χώρες με ευρέως διασκορπισμένους πληθυσμούς. [6]

Στη Δανία έως το 1900, υπήρχαν περίπου 2500 ανεμόμυλοι για μηχανικά φορτία, όπως αντλίες και μύλοι, παράγοντας εκτιμώμενη συνδυασμένη ισχύ αιχμής περίπου 30 MW. Τα μεγαλύτερα μηχανήματα ήταν σε πύργους 24 μέτρων (79 πόδια) με ρότορες διαμέτρου 23 μέτρων (75 πόδια) τεσσάρων λεπίδων. Μέχρι το 1908, λειτουργούσαν 72 αιολικές ηλεκτρικές γεννήτριες στις Ηνωμένες Πολιτείες από 5 kW έως 25 kW. Περίπου την εποχή του Α΄ Παγκοσμίου Πολέμου, οι Αμερικανοί κατασκευαστές ανεμόμυλων παράγααν 100.000 ανεμόμυλους αγροκτήματος κάθε χρόνο, κυρίως για άντληση νερού.

Μέχρι τη δεκαετία του 1930, οι ανεμογεννήτριες ηλεκτρικής ενέργειας ήταν κοινές σε αγροκτήματα, κυρίως στις Ηνωμένες Πολιτείες όπου δεν είχαν εγκατασταθεί ακόμη συστήματα διανομής. Σε αυτήν την περίοδο, ο χάλυβας υψηλής αντοχής ήταν φθηνός και οι γεννήτριες τοποθετήθηκαν πάνω σε προκατασκευασμένους πύργους δικτυωτού πλέγματος.

Πρόδρομος των σύγχρονων ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα ήταν σε λειτουργία στη Γιάλτα της ΕΣΣΔ το 1931. Ήταν μια γεννήτρια 100 kW σε έναν πύργο 30 μέτρων (98 πόδια), συνδεδεμένος με το τοπικό σύστημα διανομής 6,3 kV. Αναφέρθηκε ότι έχει ετήσιο συντελεστή χωρητικότητας 32 τοις εκατό, όχι πολύ διαφορετικό από τα τρέχοντα αιολικά μηχανήματα.

Το φθινόπωρο του 1941, η πρώτη ανεμογεννήτρια κατηγορίας μεγαβάτ συγχρονίστηκε με ένα δίκτυο κοινής ωφέλειας στο Βερμόντ. Η ανεμογεννήτρια Smith – Putnam έτρεξε μόνο για 1.100 ώρες πριν υποστεί κρίσιμη αποτυχία. Η μονάδα δεν επισκευάστηκε, λόγω έλλειψης υλικών κατά τη διάρκεια του πολέμου.

Η πρώτη ανεμογεννήτρια συνδεδεμένη στο δίκτυο που λειτουργεί στο Ηνωμένο Βασίλειο κατασκευάστηκε από την John Brown & Company το 1951 στα νησιά Orkney.

Παρά τις ποικίλες αυτές εξελίξεις, οι εξελίξεις στα συστήματα ορυκτών καυσίμων σχεδόν εξάλειψαν όλα τα συστήματα ανεμογεννητριών μεγαλύτερα από το υπερμεγέθη. Στις αρχές της δεκαετίας του 1970, ωστόσο, οι αντιπυρηνικές διαμαρτυρίες στη Δανία ώθησαν τους τεχνίτες να αναπτύξουν γεννήτριες 22 kW.

Η οργάνωση ιδιοκτητών σε ενώσεις και συνεταιρισμούς οδήγησε στην άσκηση πίεσης της κυβέρνησης και των επιχειρήσεων κοινής ωφέλειας και παρείχε κίνητρα για μεγαλύτερες τουρμπίνες κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1980 και αργότερα. Τοπικοί ακτιβιστές στη Γερμανία, νεοεμφανιζόμενοι κατασκευαστές στροβίλων στην Ισπανία και μεγάλοι επενδυτές στις Ηνωμένες Πολιτείες στις αρχές της δεκαετίας του 1990 άσκησαν πιέσεις για πολιτικές που ενθάρρυναν τη βιομηχανία σε αυτές τις χώρες.

Έχει υποστηριχθεί ότι η επέκταση της χρήσης της αιολικής ενέργειας θα οδηγήσει σε αυξανόμενο γεωπολιτικό ανταγωνισμό έναντι των κρίσιμων υλικών για ανεμογεννήτριες, όπως στοιχεία σπάνιας γης, νεοδύμιο, πρασεοδύμιο και δυσπόσιο. Αλλά αυτή η προοπτική έχει επικριθεί για το γεγονός ότι δεν αναγνωρίζει ότι οι περισσότερες ανεμογεννήτριες δεν χρησιμοποιούν μόνιμους μαγνήτες και ότι υποτιμούν τη δύναμη των οικονομικών κινήτρων για διευρυμένη παραγωγή αυτών των ορυκτών.

## 1.3 Τύποι Ανεμογεννητριών

### 1.3.1 Οριζόντιου Άξονα

Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να περιστρέφονται γύρω από έναν οριζόντιο ή κατακόρυφο άξονα, ο πρώτος είναι παλαιότερος και πιο συνηθισμένος. Μπορούν επίσης να περιλαμβάνουν λεπίδες, ή να είναι χωρίς λεπίδες. Τα κάθετα σχέδια παράγουν λιγότερη ισχύ και είναι λιγότερο κοινά.



Εικόνα 2: Τα εξαρτήματα μιας ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα (κιβώτιο ταχυτήτων, άξονας ρότορα και συγκρότημα φρένων) ανυψώνονται στη θέση τους.

Οι μεγάλες ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα τριών πτερυγίων (HAWT) με τις λεπίδες προς τα πάνω του πύργου παράγουν τη συντριπτική πλειοψηφία της αιολικής ενέργειας στον κόσμο σήμερα. Αυτές οι τουρμπίνες έχουν τον κύριο άξονα του ρότορα και την ηλεκτρική γεννήτρια στην κορυφή ενός πύργου και στρέφονται προς τον άνεμο.

Οι μικρές τουρμπίνες επισημαίνονται με ένα απλό ανεμοδείκτη, ενώ οι μεγάλες ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούν γενικά έναν αισθητήρα ανέμου σε συνδυασμό με ένα σύστημα εκτροπής. Τα περισσότερα έχουν κιβώτιο ταχυτήτων, το οποίο μετατρέπει την αργή περιστροφή των λεπίδων σε ταχύτερη περιστροφή που είναι πιο κατάλληλη για την οδήγηση μιας ηλεκτρικής γεννήτριας

Ορισμένες ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούν έναν διαφορετικό τύπο γεννήτριας κατάλληλης για πιο αργή ταχύτητα περιστροφής. Αυτά δεν χρειάζονται κιβώτιο ταχυτήτων και ονομάζονται άμεσης κίνησης, που σημαίνει ότι συνδέουν τον ρότορα απευθείας στη γεννήτρια χωρίς να υπάρχει κιβώτιο ταχυτήτων στο μεταξύ.

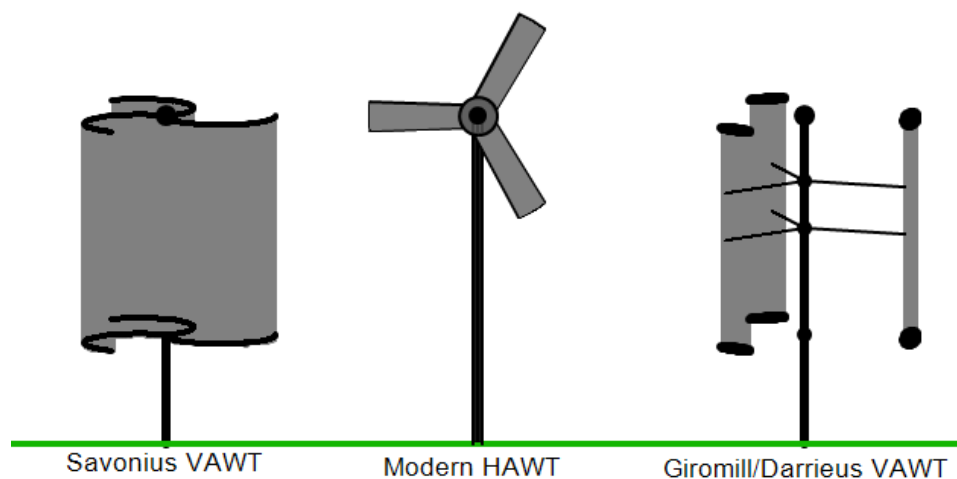
Ενώ οι γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη μπορεί να είναι πιο δαπανηρές λόγω των απαιτούμενων υλικών σπάνιων γαιών, αυτές οι στρόβιλοι χωρίς γρανάζια προτιμούνται μερικές φορές από τις γεννήτριες κιβωτίων ταχυτήτων επειδή "εξαλείφουν την αύξηση ταχύτητας ταχυτήτων, η οποία είναι ευαίσθητη σε σημαντική φόρτωση ροπής συσσωρευμένης κόπωσης, σχετική αξιοπιστία ζητήματα και κόστος συντήρησης. Υπάρχει επίσης ο ψευδό-μηχανισμός άμεσης κίνησης, ο οποίος έχει ορισμένα πλεονεκτήματα έναντι του μηχανισμού άμεσης κίνησης μόνιμου μαγνήτη.

Οι περισσότεροι στρόβιλοι οριζόντιου άξονα έχουν τους ρότορες τους πάνω από τον πύργο στήριξης. Οι μηχανές Downwind έχουν κατασκευαστεί, επειδή δεν χρειάζονται έναν πρόσθετο μηχανισμό για να τις διατηρούν σύμφωνα με τον άνεμο. Σε υψηλούς ανέμους, οι λεπίδες μπορούν επίσης να αφεθούν να κάμψουν, γεγονός που μειώνει την περιοχική σάρωσή τους και συνεπώς την αντίσταση στον άνεμο.

Παρά αυτά τα πλεονεκτήματα, προτιμώνται τα σχέδια προς τα πάνω, επειδή η αλλαγή φόρτωσης από τον άνεμο καθώς κάθε λεπίδα περνά πίσω από τον πύργο στήριξης μπορεί να προκαλέσει ζημιά στην τουρμπίνα.

Οι ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούνται σε αιολικά πάρκα για εμπορική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι συνήθως τρεις λεπίδες. Αυτά έχουν χαμηλή ροπή στρέψης, η οποία συμβάλλει στην καλή αξιοπιστία. Τα πτερύγια είναι συνήθως λευκά για ορατότητα κατά τη διάρκεια της ημέρας από αεροσκάφη και έχουν μήκος από 20 έως 80 μέτρα (66 έως

262 πόδια). Το μέγεθος και το ύψος των στροβίλων αυξάνεται κάθε χρόνο. Οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες κατασκευάζονται έως και 8 MW σήμερα και έχουν μήκος λεπίδας έως 80 μέτρα (260 ft). Προετοιμάζονται σχέδια με 10 έως 12 MW. Οι συνηθισμένοι στρόβιλοι πολλαπλών μεγαβάτ έχουν σωληνοειδείς πύργους από χάλυβα με ύψος από 70 m έως 120 m και σε ακραίες έως 160 m.



Εικόνα 3: Οι τρεις κύριοι τύποι: VAWT Savonius, HAWT towered; VAWT Darrieus καθώς εμφανίζονται σε λειτουργία

### 1.3.2 Κάθετου Άξονα

Οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα (ή VAWTs) έχουν τον κύριο άξονα του ρότορα διατεταγμένο κάθετα. Ένα πλεονέκτημα αυτής της διάταξης είναι ότι ο στρόβιλος δεν χρειάζεται να κατευθύνεται στον άνεμο για να είναι αποτελεσματικός, πράγμα που αποτελεί πλεονέκτημα σε μια τοποθεσία όπου η κατεύθυνση του ανέμου είναι πολύ μεταβλητή.

Είναι επίσης ένα πλεονέκτημα όταν η τουρμπίνα ενσωματώνεται σε ένα κτίριο επειδή είναι εγγενώς λιγότερο διευθυντή. Επίσης, η γεννήτρια και το κιβώτιο ταχυτήτων μπορούν να τοποθετηθούν κοντά στο έδαφος, χρησιμοποιώντας μια άμεση κίνηση από το συγκρότημα του ρότορα στο κιβώτιο ταχυτήτων στο έδαφος, βελτιώνοντας την προσβασιμότητα για συντήρηση. Ωστόσο, αυτά τα σχέδια παράγουν πολύ λιγότερη ενέργεια κατά μέσο όρο με την πάροδο του χρόνου, κάτι που αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα.

Τα βασικά μειονεκτήματα περιλαμβάνουν τη σχετικά χαμηλή ταχύτητα περιστροφής με την επακόλουθη υψηλότερη ροπή και συνεπώς το υψηλότερο κόστος της κίνησης, τον εγγενώς χαμηλότερο συντελεστή ισχύος, την περιστροφή 360 μοιρών του αεροπλάνου μέσα στη ροή του ανέμου κατά τη διάρκεια κάθε κύκλου και συνεπώς την εξαιρετικά δυναμική φόρτιση στη λεπίδα, την παλμική ροπή που δημιουργείται από ορισμένα σχέδια ρότορα στην αμαξοστοιχία κίνησης και τη δυσκολία μοντελοποίησης της ροής του ανέμου με ακρίβεια και ως εκ τούτου οι προκλήσεις της ανάλυσης και του σχεδιασμού του ρότορα πριν από την κατασκευή ενός πρωτοτύπου.

Όταν ένας στρόβιλος τοποθετείται σε ταράτσα, το κτίριο ανακατευθύνει γενικά τον άνεμο πάνω από την οροφή και αυτό μπορεί να διπλασιάσει την ταχύτητα του ανέμου στην τουρμπίνα. Εάν το ύψος ενός πύργου στρόβιλου που βρίσκεται στον τελευταίο όροφο είναι περίπου 50% του ύψους του κτιρίου, είναι κοντά στο βέλτιστο για μέγιστη αιολική ενέργεια και ελάχιστη αναταραχή. Ενώ οι ταχύτητες του ανέμου στο δομημένο περιβάλλον είναι γενικά πολύ χαμηλότερες από τις εκτεθειμένες αγροτικές περιοχές, ο θόρυβος μπορεί να είναι ανησυχητικός και μια υπάρχουσα δομή ενδέχεται να μην αντιστέκεται επαρκώς στις παραμένουσες τάσεις.



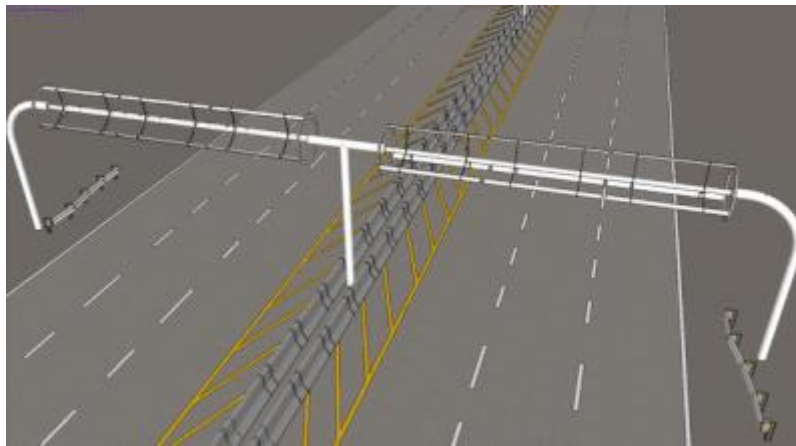
Εικόνα 4: Ανεμογεννήτρια κάθετου άξονα

Πηγή: <https://www.leadingedgepower.com/le-v150-vertical-axis-wind-turbine-1121392.html>

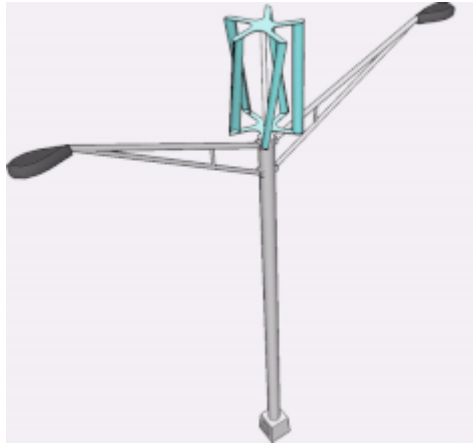
#### 1.4 Μη συμβατικοί τύποι Ανεμογεννητριών



*Εικόνα 5: Ανεμογεννήτρια αντίθετης περιστροφής*



*Εικόνα 6: Ανεμογεννήτρια αυτοκινητόδρομου*



Εικόνα 7: Ανεμογεννήτρια ελαφρού πόλου

## 1.5 Σχεδίαση και Κατασκευή

Ο σχεδιασμός της ανεμογεννήτριας είναι μια προσεκτική ισορροπία κόστους, παραγωγής ενέργειας και κόπωσης.

### Εξαρτήματα

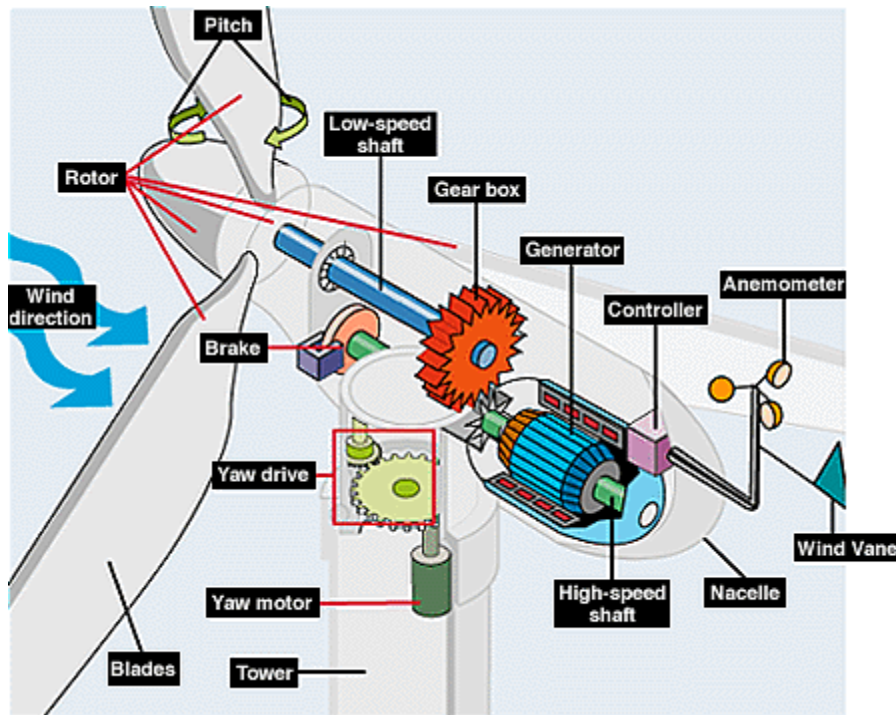
Οι ανεμογεννήτριες μετατρέπουν την αιολική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια για διανομή.

Οι συμβατικοί στρόβιλοι οριζόντιου άξονα μπορούν να χωριστούν σε τρία εξαρτήματα:

- ✚ Ο ρότορας, που είναι περίπου το 20% του κόστους της ανεμογεννήτριας, περιλαμβάνει τις λεπίδες για τη μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε χαμηλή ταχύτητα περιστροφικής ενέργειας.
- ✚ Η γεννήτρια, που αντιπροσωπεύει περίπου το 34% του κόστους της ανεμογεννήτριας, περιλαμβάνει την ηλεκτρική γεννήτρια, τα ηλεκτρονικά στοιχεία ελέγχου, και πιθανότατα ένα κιβώτιο ταχυτήτων (π.χ., πλανητικό κιβώτιο ταχυτήτων), ρυθμιζόμενη ταχύτητα κίνησης, ή συνεχώς μεταβαλλόμενο στοιχείο μετάδοσης για τη μετατροπή της εισερχόμενης περιστροφής χαμηλής ταχύτητας σε περιστροφή υψηλής ταχύτητας κατάλληλο για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- ✚ Η περιβάλλουσα δομή, που αντιπροσωπεύει περίπου το 15% του κόστους της ανεμογεννήτριας, περιλαμβάνει τον μηχανισμό πύργου και εκτροπής ρότορα.



Μια ανεμογεννήτρια 1,5 (MW) τύπου που παρατηρείται συχνά στις Ηνωμένες Πολιτείες έχει έναν πύργο ύψους 80 μέτρων. Το συγκρότημα ρότορα (λεπίδες και πλήμνη) ζυγίζει 22.000 κιλά . Το κουβούκλιο (nacelle), το οποίο περιέχει τη γεννήτρια, ζυγίζει 52.000 κιλά . Η βάση από σκυρόδεμα για τον πύργο κατασκευάζεται χρησιμοποιώντας ενισχυτικό χάλυβα 26.000 κιλών και περιέχει 190 κυβικά μέτρα σκυροδέματος. Η βάση έχει διάμετρο 15 μέτρα (50 πόδια) και πάχος 2,4 μέτρα κοντά στο κέντρο.



Εικόνα 8: Εξαρτήματα ανεμογεννήτριας

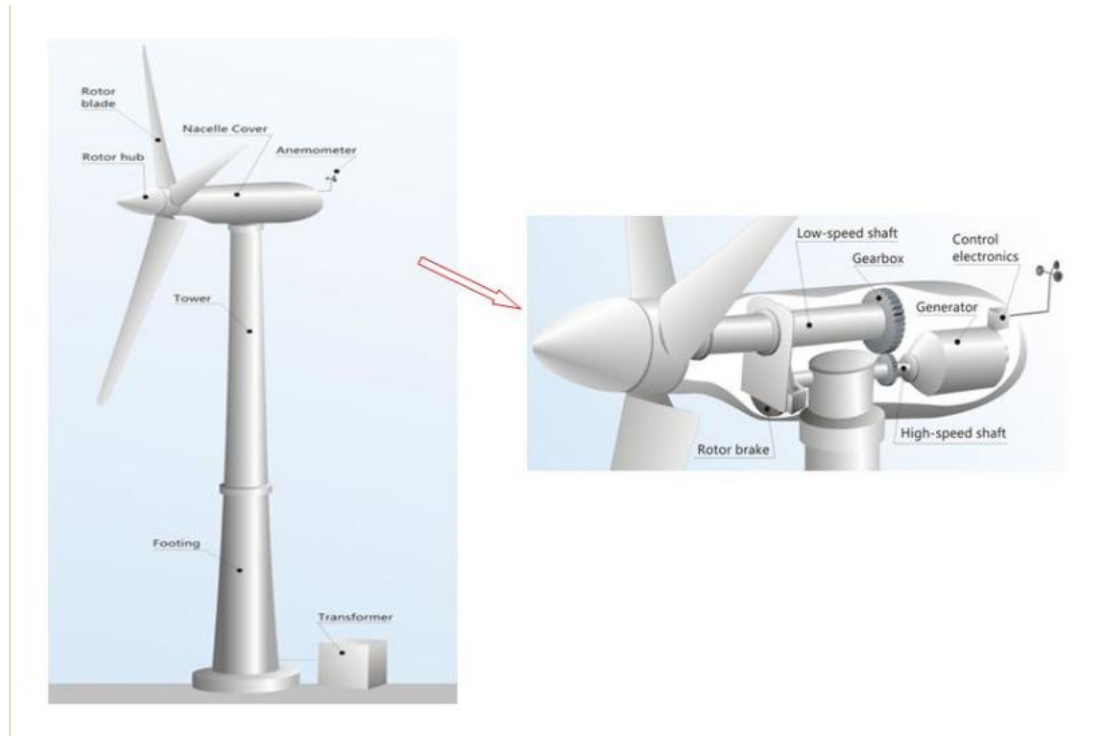
## 1.6 Λειτουργία Ανεμογεννήτριας Οριζόντιου άξονα

Οι ανεμογεννήτριες διαθέτουν διαφορετικές τοπολογίες, αρχιτεκτονικές και σχεδιαστικά χαρακτηριστικά. Το σχήμα ενός συστήματος παραγωγής ανεμογεννητριών φαίνεται στην εικόνα 9. Ορισμένες επιλογές τοπολογίας ανεμογεννητριών έχουν ως εξής:

- ✓ Προσανατολισμός άξονα ρότορα: οριζόντιος ή κατακόρυφος.
- ✓ Θέση ρότορα: προς τα πάνω ή προς τα κάτω του πύργου.
- ✓ Ταχύτητα ρότορα: σταθερή ή μεταβλητή.
- ✓ Πλήμνη: άκαμπτα, σφιχτά, ζιζανίων ή αρθρωτά πτερύγια.
- ✓ Ακαμψία: ακίνητη ή ευέλικτη.
- ✓ Αριθμός λεπίδων: ένα, δύο, τρία ή ακόμα περισσότερα
- ✓ Έλεγχος ισχύος: επιφάνειες στάβλου, βήματος, εκτροπής ή αεροδυναμικής.

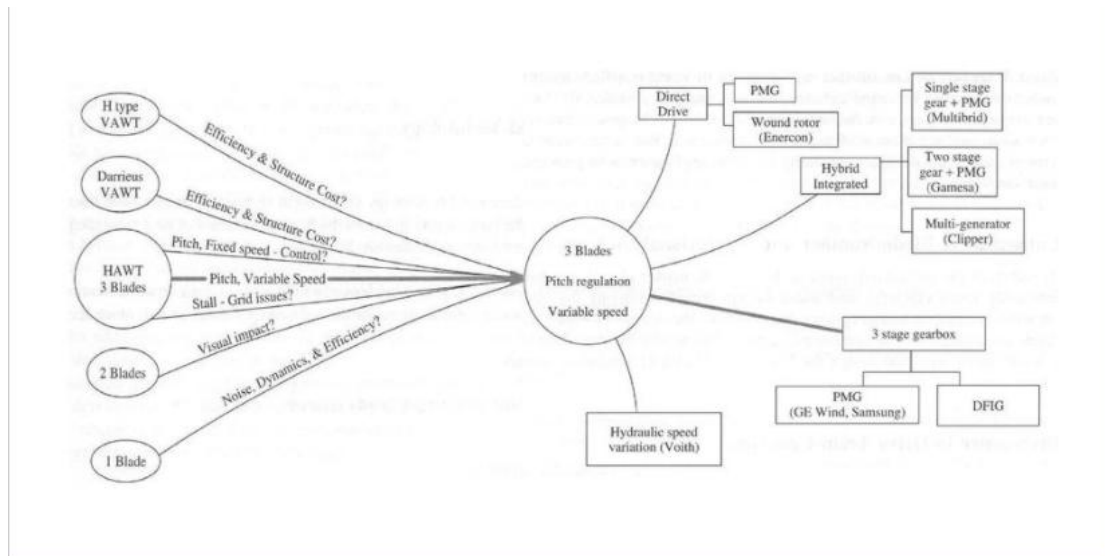
✓ Έλεγχος εκτροπής: ενεργό ή ελεύθερο.

Αυτό το κεφάλαιο εστιάζει μόνο σε ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα (HAWTs), οι οποίες είναι ο επικρατέστερος τύπος τοπολογίας ανεμογεννητριών, όπως επιβεβαιώνεται στην εικόνα 9.



Εικόνα 9: Σχηματικό σύστημα παραγωγής ανεμογεννητριών

Οι ανεμογεννήτριες περιλαμβάνουν κρίσιμα μηχανικά εξαρτήματα όπως πτερύγια στροβίλου και ρότορες, συρμό κίνησης και γεννήτριες. Γενικά, οι ανεμογεννήτριες προορίζονται για σχετικά απρόσιτες τοποθεσίες, θέτοντας ορισμένους περιορισμούς στα σχέδια με διάφορους τρόπους.



Εικόνα 10: Από κοινού συμφωνημένος τύπος ανεμογεννητριών και η απόκρισή του

Ένα από τα βασικά στοιχεία της ανεμογεννήτριας είναι η σχέση μετάδοσης κίνησης, η οποία συνδέει αεροδυναμικούς ρότορες και ηλεκτρικούς ακροδέκτες εξόδου. Η βελτιστοποίηση των γεννητριών ανεμογεννητριών δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί χωρίς να ληφθεί υπόψη η μηχανική, δομική, υδραυλική και μαγνητική απόδοση του κινητήρα. Μια επισκόπηση των τεχνολογιών κίνησης παρουσιάζεται στην εικόνα 11 για σύγκριση. Γενικά, μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις τύπους ανάλογα με τις δομές τους:

- Συμβατικό: κιβώτιο ταχυτήτων και γεννήτρια υψηλής ταχύτητας με λίγα ζεύγη πόλων.
- Άμεση κίνηση: κάθε τρένο κίνησης χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων και γεννήτρια χαμηλής ταχύτητας με πολλά ζεύγη πόλων.
- Υβριδική: κάθε τρένο κίνησης με κιβώτιο ταχυτήτων και ταχύτητα, γεννήτρια μεταξύ των δύο παραπάνω τύπων
- Πολλαπλές γεννήτριες: κάθε τρένο κίνησης με περισσότερες από μία γεννήτριες.

## Κεφάλαιο 2 Υπολογισμός ισχύος Ανεμογεννήτριας

### 2.1 Βασικές θεμελιώδεις εξισώσεις για την ισχύ του ανέμου

Η ισχύς του ανέμου εξαρτάται από:

- ποσότητα αέρα (όγκος)
- ταχύτητα αέρα (ταχύτητα)
- μάζα αέρα (πυκνότητα) που ρέει μέσω της περιοχής ενδιαφέροντος (ροή)

Κινητική ενέργεια:

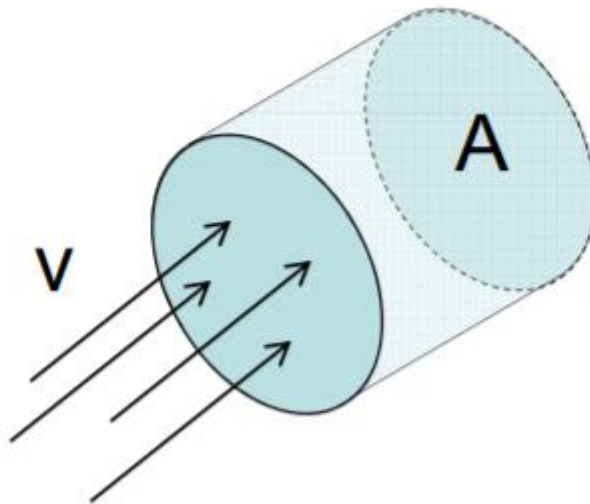
$$KE = \frac{1}{2} * m * v^2$$

Η ισχύς είναι η KE ανά μονάδα χρόνου:

$$P = \frac{1}{2} * \rho * A * v^3$$

Η μηχανική ρευστού δίνει ρυθμό ροής μάζας:

- Ισχύς  $\sim$  κύβος ταχύτητας
- Ισχύς  $\sim$  πυκνότητα αέρα
- Δύναμη  $\sim$  περιοχή σάρωσης ρότορα  $A = \pi r^2$



## 2.2 Απόδοση εξαγωγής ισχύος από τον άνεμο

Όριο Betz & συντελεστής ισχύος:

- Συντελεστής ισχύος,  $C_p$ , είναι ο λόγος ισχύος που εξάγεται από την γεννήτρια στο σύνολο που περιέχεται στην αιολική γεννήτρια  $C_p = P$  στο σύνολο που περιέχεται στον αιολικό δυναμικό  $C_p = P_T / P_w$

- Έξοδος ισχύος γεννήτριας

- \*

Το όριο Betz είναι το μέγιστο δυνατό  $C_p = 16/27$

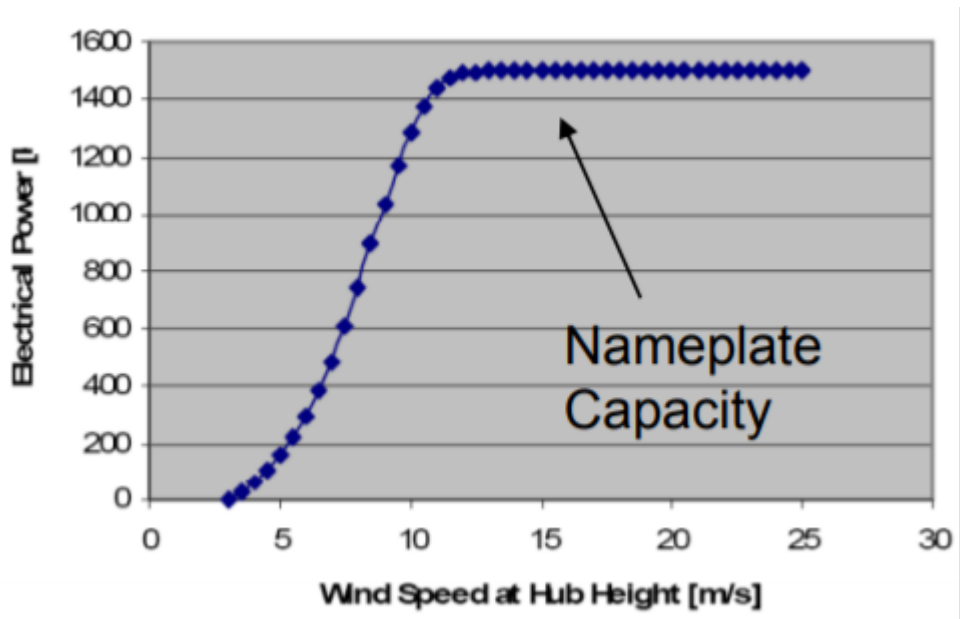
Η απόδοση 59% είναι η ΚΑΛΥΤΕΡΗ που μπορεί να πετύχει μια συμβατική ανεμογεννήτρια ισχύος από τον άνεμο.



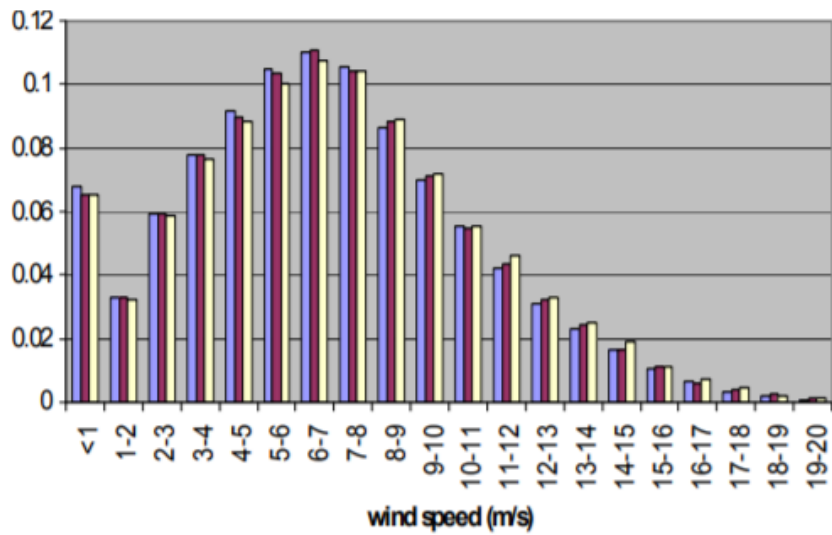
## 2.3 Ισχύς καμπύλης της ανεμογεννήτριας

Παράγοντας χωρητικότητας (CF):

- Το κλάσμα του έτους που λειτουργεί η γεννήτρια στροβίλων ονομαστική (μέγιστη) ισχύς ονομαστική (αιχμή) ισχύς Συντελεστής χωρητικότητας = Μέση έξοδος / Μέγιστη έξοδος  $\approx$  30%.
- Το CF βασίζεται τόσο στα χαρακτηριστικά της τουρμπίνας όσο και στα χαρακτηριστικά της τοποθεσίας (συνήθως 0,3 ή παραπάνω για μια καλή τοποθεσία)



Εικόνα 11: Καμπύλη ισχύος στροβίλου 1500 kW



Εικόνα 12: Κατανομή συχνότητας ανέμου

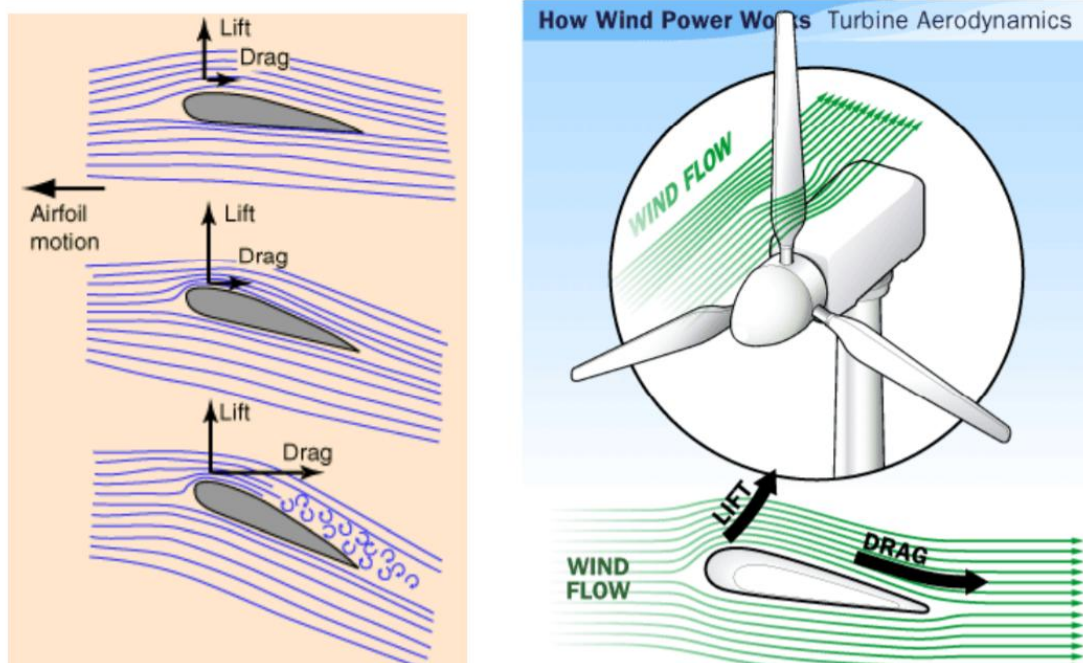
## 2.4 Δυνάμεις Άνωσης και οπισθέλκουσας

Οι ανεμογεννήτριες εκμεταλλεύονται τις αεροδυναμικές δυνάμεις που προκύπτουν όταν ο άνεμος φυσά στις λεπίδες του ρότορα και οι λεπίδες κινούνται σε σχέση με τον άνεμο. Κάθε σώμα που βυθίζεται σε ρεύμα ρευστού υπόκειται σε δυνάμεις και ροπές (δυνάμεις στροφής). Οι δυνάμεις και οι στιγμές εξαρτώνται από το σχήμα του σώματος και τον προσανατολισμό του και την κίνηση ή περιστροφή του σε σχέση με το ρεύμα.

Η δύναμη οπισθέλκουσας (Drag) έχει θετική φορά, όταν τραβά προς την ίδια κατεύθυνση με τη ροή. Το Drag είναι μια απώλεια που πρέπει να ξεπεραστεί με μια άλλη δύναμη, εάν ένα αντικείμενο είναι να κινηθεί ενάντια σε μια ροή.

Μια δύναμη κάθετη στο ρεύμα ονομάζεται άνωση ή ανύψωση (lift).

Όταν η δύναμη ανύψωσης τραβά προς τα πάνω τότε θεωρείτε ότι έχει θετική φορά. (Η ανύψωση σε ένα ιστιοφόρο με ιστιοφόρο συνήθως μετριέται προς τα πλάγια). Η άνωση (Lift) εκτελεί συχνά κάποια χρήσιμη λειτουργία, όπως η μεταφορά του βάρους ενός αεροσκάφους ή η οδήγηση ενός σκάφους προς τα εμπρός. Η δύναμη κάθετα προς τις άλλες δύο ονομάζεται πλευρική δύναμη.



Εικόνα 13: Δυνάμεις ανυψώσεως και οπισθέλκουσας σε μια ανεμογεννήτρια [48]



## 2.5 Παράδειγμα υπολογισμού ισχύος ανεμογεννήτριας

Αυτή η ταχύτητα ανέμου χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της στιγμιαίας εξόδου αιολικής ενέργειας ή για τον καθορισμό της ονομαστικής εξόδου της ανεμογεννήτριας (συνήθως μεταξύ 11 και 12 m / s.)

### Wind power and energy potential :

$$E_c = \frac{1}{2} \rho * V * v^2 \quad \left[ \text{Nm or joules} \right] \quad \text{Kinetic energy}$$

$$V = A * v \quad \left[ \text{m}^3 / \text{s} \right] \quad \text{Air flowing through area A in one second}$$

$$P = \frac{1}{2} \rho * A * v^3 \quad \left[ \text{W} \right] \quad \text{Wind power}$$

A : area swept by the blades

V : wind flow through the area in m<sup>3</sup>/s

ρ : density of air 1,23 kg/m<sup>3</sup>

v : wind speed 11 m/s  
39,6 km/h  
24,75 mph

*This wind speed is used to calculate instantaneous wind power output or to define the rated output of wind turbine (usually between 11 and 12 m/s.)*

Rotor diameter 20 m

Area covered 314 m<sup>2</sup>

kinetic power 257.160 W 257 kW (hypothesis of constant wind)

Annual potential wind energy : 2.254.263 kWh

Εικόνα 14: Παράδειγμα υπολογισμού ισχύος ανεμογεννήτριας

**Electric power in output of wind turbines :**

Betz limit	59%
Pmax according to Betz limit (16/27)	152 kW
Yield losses :	
Blades	67% between 0,2 and 0,85
Gear box	90% between 0,7 and 0,98
Generator	90% between 0,8 and 0,98
Transformer :	95% between 0,85 and 0,98
Rectifier :	100% between 0,9 and 0,98 (1 if no batteries)
Batteries :	100% between 0,7 and 1 (1 if no batteries)
Wire losses :	97% between 0,9 and 0,99
Total yield losses :	50%
Average performance ratio	0,30
Power, losses included	76,2 kW <i>instantaneous output power</i>

**Annual wind turbine energy :**

Average annual Wind speed	5 m/s
Capacity factor :	50%
<i>(in relation with angles of attack, turbulences, annual wind distribution, cut in, cut out...)</i>	
Real annual electricity production :	333 802 kWh
Ratio kWh/kW/y	4.380 kWh/kW.y
Global wind turbine yield : Electric energy/kinetic energy	15%

Εικόνα 15: Παράδειγμα υπολογισμού ισχύος ανεμογεννήτριας

Όπως βλέπουμε στις παραπάνω εικόνες 13 και 14 οι ισχύς που παράγεται από μια ανεμογεννήτρια με διάμετρο ρότορα 20 m ο οποίος καλύπτει μια επιφάνεια 314m<sup>2</sup> παράγει τελικά ισχύς η οποία ισούται 257.16 kw.

Αν αλλάξουμε την διάμετρο του ρότορα από 20 m που είναι στο προηγούμενο παράδειγμα στα 15 παρατηρούμε ότι για μείωση 75% στον ρότορα και με τις ίδιες πάντα συνθήκες ανέμου η μείωση της ισχύος είναι λίγο πιο πάνω από το 50% είναι δηλαδή 56.2%.

**Wind power and energy potential :**

$$E_c = \frac{1}{2} \rho * V * v^2 \quad \left[ \text{Nm or joules} \right] \quad \text{Kinetic energy}$$

$$V = A * v \quad \left[ \text{m}^3 / \text{s} \right] \quad \text{Air flowing through area A in one second}$$

$$P = \frac{1}{2} \rho * A * v^3 \quad \left[ \text{W} \right] \quad \text{Wind power}$$

A : area swept by the blades

V : wind flow through the area in m<sup>3</sup>/s

ρ : density of air 1,23 kg/m<sup>3</sup>

v : wind speed 11 m/s  
39,6 km/h  
24,75 mph

Rotor diameter 15 m

Area covered 177 m<sup>2</sup>

kinetic power 144.652 W (hypothesis of constant wind)  
145 kW

Annual potential wind energy : 1.268.023 kWh

Εικόνα 16: Παράδειγμα υπολογισμού ισχύος ανεμογεννήτριας

**Electric power in output of wind turbines :**

Betz limit 59%  
Pmax according to Betz limit (16/27) 88 kW

Yield losses :

Blades	<span style="background-color: #FFD700;">67%</span> between 0,2 and 0,85
Gear box	<span style="background-color: #FFD700;">90%</span> between 0,7 and 0,98
Generator	<span style="background-color: #FFD700;">90%</span> between 0,8 and 0,98
Transformer :	<span style="background-color: #FFD700;">95%</span> between 0,85 and 0,98
Rectifier :	<span style="background-color: #FFD700;">100%</span> between 0,9 and 0,98 (1 if no batteries)
Batteries :	<span style="background-color: #FFD700;">100%</span> between 0,7 and 1 (1 if no batteries)
Wire losses :	<span style="background-color: #FFD700;">97%</span> between 0,9 and 0,99

Total yield losses : 50%

Average performance ratio 0,30

Power, losses included 42,9 kW *instantaneous output power*

**Annual wind turbine energy :**

Average annual Wind speed 5 m/s

Capacity factor : 50%  
(in relation with angles of attack, turbulences, annual wind distribution, cut in, cut out...)

Real annual electricity production : 187.763 kWh

Ratio kWh/kW/y 4.380 kWh/kW.y

Global wind turbine yield : Electric energy/kinetic energy 15%

Εικόνα 17: Παράδειγμα υπολογισμού ισχύος ανεμογεννήτριας

## Κεφάλαιο 3 Πεπερασμένα στοιχεία για Ρευστά

### Γενικά για τα πεπερασμένα στοιχεία

Η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων είναι μια έννοια προσομοίωσης που αναπτύχθηκε από τη θεωρητική βάση που καθιερώθηκε με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (FEM), η οποία ιδρύθηκε με τη δημοσίευση ενός συνόλου επιστημονικών εργασιών τη δεκαετία του 1940.

Δημιουργήθηκε ως αριθμητική τεχνική για την εξεύρεση λύσεων κατά προσέγγιση για προβλήματα οριακής τιμής για μερικές διαφορικές εξισώσεις, η FEM βασίζεται στην υποδιαίρεση ενός προβληματικού τομέα σε απλούστερα μέρη - που ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία - και στον λογισμό των μεθόδων παραλλαγής για την ελαχιστοποίηση μιας σχετικής λειτουργίας σφάλματος.

Οι επιστημονικοί πυλώνες της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων είναι άμεσο αποτέλεσμα της ανάγκης επίλυσης πολύπλοκων προβλημάτων ελαστικότητας και δομικής ανάλυσης στην πολιτική και αεροναυτική μηχανική. Η πρώτη εξέλιξη μπορεί να εντοπιστεί στο έργο του A. Hrennikoff το 1941 και του R. Courant το 1943 .

Αν και αυτοί οι πρωτοπόροι χρησιμοποίησαν διαφορετικές προοπτικές στις προσεγγίσεις πεπερασμένων στοιχείων τους, ο καθένας αναγνώρισε το ένα κοινό και ουσιαστικό χαρακτηριστικό: διακριτοποίηση πλέγματος ενός συνεχούς τομέα σε ένα σύνολο διακριτών υποτομών, που συνήθως ονομάζονται στοιχεία.

Μια άλλη θεμελιώδης μαθηματική συνεισφορά στο FEM αντιπροσωπεύεται από το βιβλίο «Μια ανάλυση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων» των Gilbert Strang και George Fix, που δημοσιεύθηκε για πρώτη φορά το 1973. Από τότε, η FEM έχει γενικευτεί για την αριθμητική μοντελοποίηση φυσικών συστημάτων σε πολλούς μηχανικούς κλάδους, όπως ηλεκτρομαγνητισμός, μεταφορά θερμότητας και δυναμική ρευστού.

#### **Οφέλη της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (FEM)**

Πολλές εξειδικεύσεις υπό την αιγίδα της μηχανολογίας, όπως η αεροναυτική, η βιομηχανική και η αυτοκινητοβιομηχανία, χρησιμοποιούν συνήθως ενσωματωμένο FEM στο σχεδιασμό και την ανάπτυξη προϊόντων. Αρκετά σύγχρονα πακέτα FEM περιλαμβάνουν συγκεκριμένα εξαρτήματα όπως θερμικά, ηλεκτρομαγνητικά, ρευστά και δομικά

περιβάλλοντα εργασίας. Για παράδειγμα, σε μια δομική προσομοίωση, η FEM βοηθά στην «παραγωγή οπτικοποιήσεων ακαμψίας και αντοχής και επίσης στην ελαχιστοποίηση του βάρους, των υλικών και του κόστους».

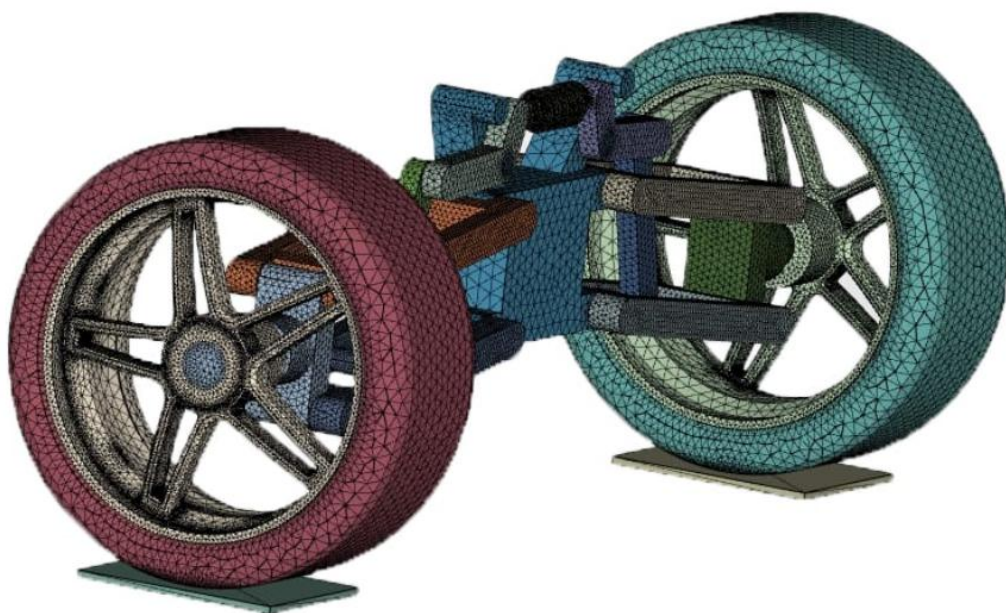
Η κύρια ικανότητα των FEM είναι η λεπτομερής οπτικοποίηση των καμπύλων και στρέψιμων θέσεων για μια δομή, που δείχνει τάσεις και κατανομή μετατόπισης. Το σύγχρονο λογισμικό εφαρμογών FEM προσφέρει μια ποικιλία επιλογών προσομοίωσης για μοντελοποίηση και ανάλυση.

Μερικά από τα βασικά οφέλη του FEM περιλαμβάνουν «αυξημένη ακρίβεια, βελτιωμένο σχεδιασμό και καλύτερη εικόνα σχετικά με κρίσιμες παραμέτρους σχεδιασμού, εικονικό πρωτότυπο, λιγότερα πρωτότυπα υλικού, έναν ταχύτερο και λιγότερο ακριβό κύκλο σχεδίασης, αυξημένη παραγωγικότητα και αυξημένα έσοδα».

Κατά τη διάρκεια της σύγχρονης ιστορικής μηχανικής, οι αλγόριθμοι FEM ενσωματώθηκαν σε πολλά ισχυρά εργαλεία σχεδίασης, συμβάλλοντας στην αύξηση των προτύπων της μηχανικής και βελτιώνοντας σημαντικά τη διαδικασία σχεδιασμού.

Χρησιμοποιώντας αλγόριθμους FEM ενσωματωμένους σε εφαρμογές FEA, οποιοσδήποτε σχεδιασμός μηχανικής δομής μπορεί να αναπτυχθεί, να δοκιμαστεί και να τροποποιηθεί εκ των προτέρων, πολύ πριν από την κατασκευή πρωτοτύπων προϊόντων.

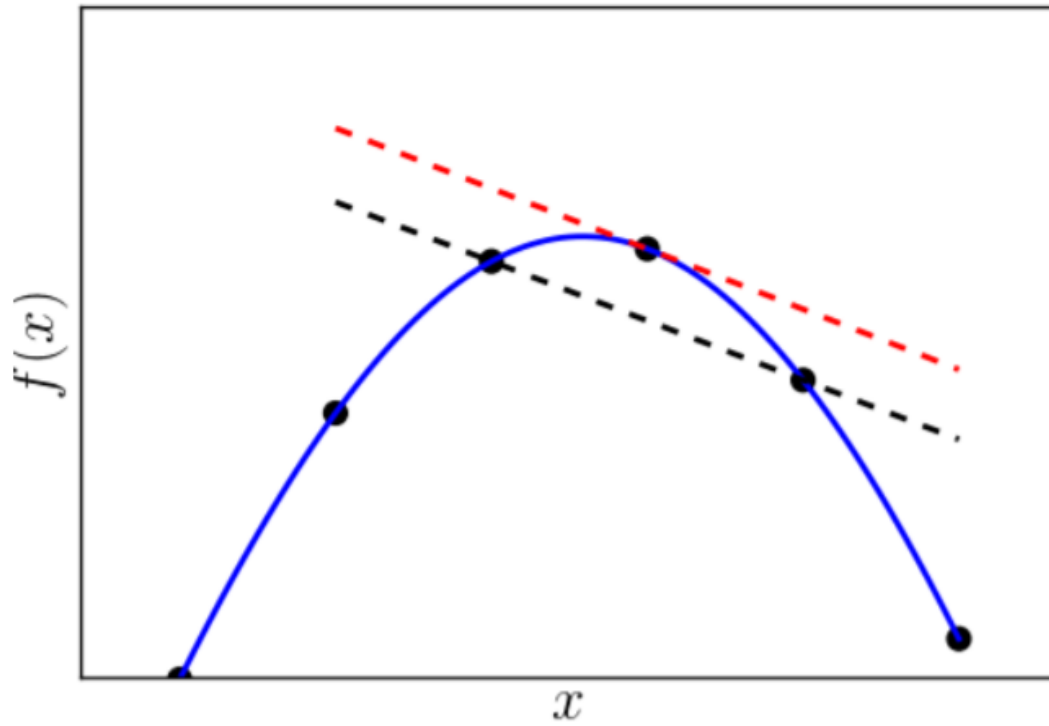
Επιπλέον, χρησιμοποιώντας την ίδια ψηφιακή μορφή, οποιοδήποτε προϊόν μπορεί να βελτιστοποιηθεί σε οποιαδήποτε φάση της διαδικασίας ροής εργασίας, από το στάδιο της μηχανικής έως το σχεδιασμό και τις δοκιμές στο εργαστήριο. Έχει επίσης προταθεί ότι το FEA θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στη στοχαστική μοντελοποίηση για την αριθμητική επίλυση μοντέλων πιθανότητας.



*Εικόνα 18: Παράδειγμα χρήσεις πεπερασμένων στοιχείων [13]*

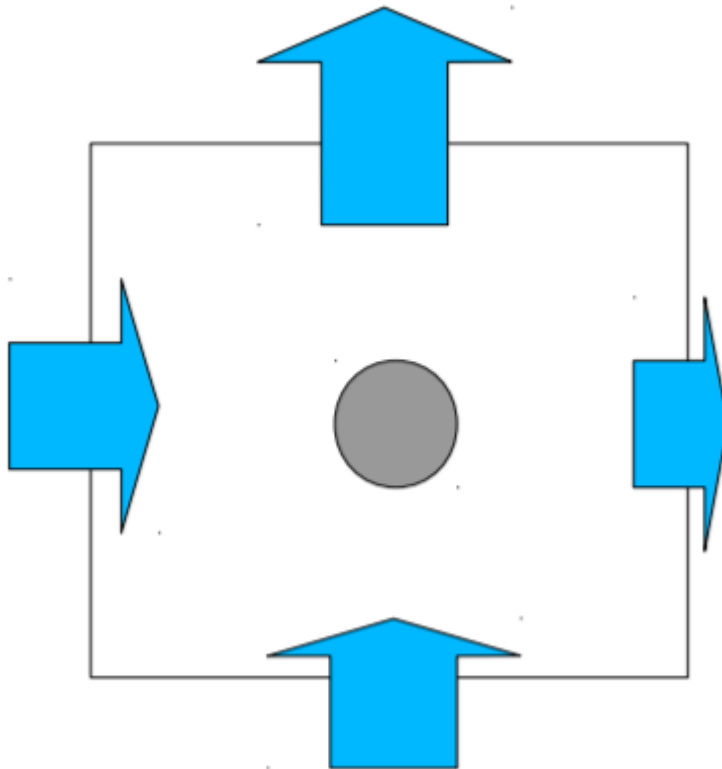
### 3.1 Μέθοδοι πεπερασμένων διαφορών

- ✓ Μειώνει τον προβληματικό τομέα σε πεπερασμένο σύνολο σημείων
- ✓ Αντικαθιστά τα ακριβή παράγωγα με εξισώσεις διαφοράς κατά προσέγγιση



### 3.2 Μέθοδοι πεπερασμένου όγκου

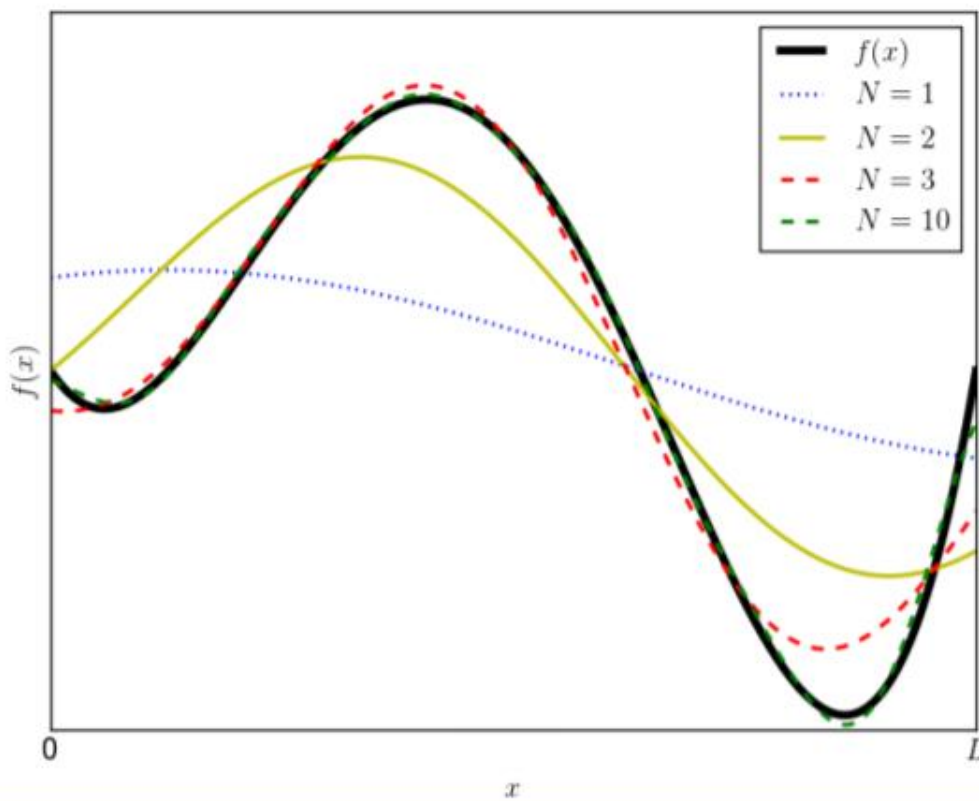
- Διαχωρίζει τον προβληματικό τομέα σε ένα πεπερασμένο σύνολο δευτερευόντων {τομών}.
- Λύνει για ολοκλήρωση όγκου ποσοτήτων στο εσωτερικό. Συνήθως μειώνει πρόβλημα στον υπολογισμό ροής σε όλες τις όψεις του τόμου
- Εάν οι ροές εξαρτώνται από παράγωγα, τότε άλλο μέθοδος (π.χ. πεπερασμένες διαφορές) πρέπει να χρησιμοποιηθεί για να βρεθούν αυτές.

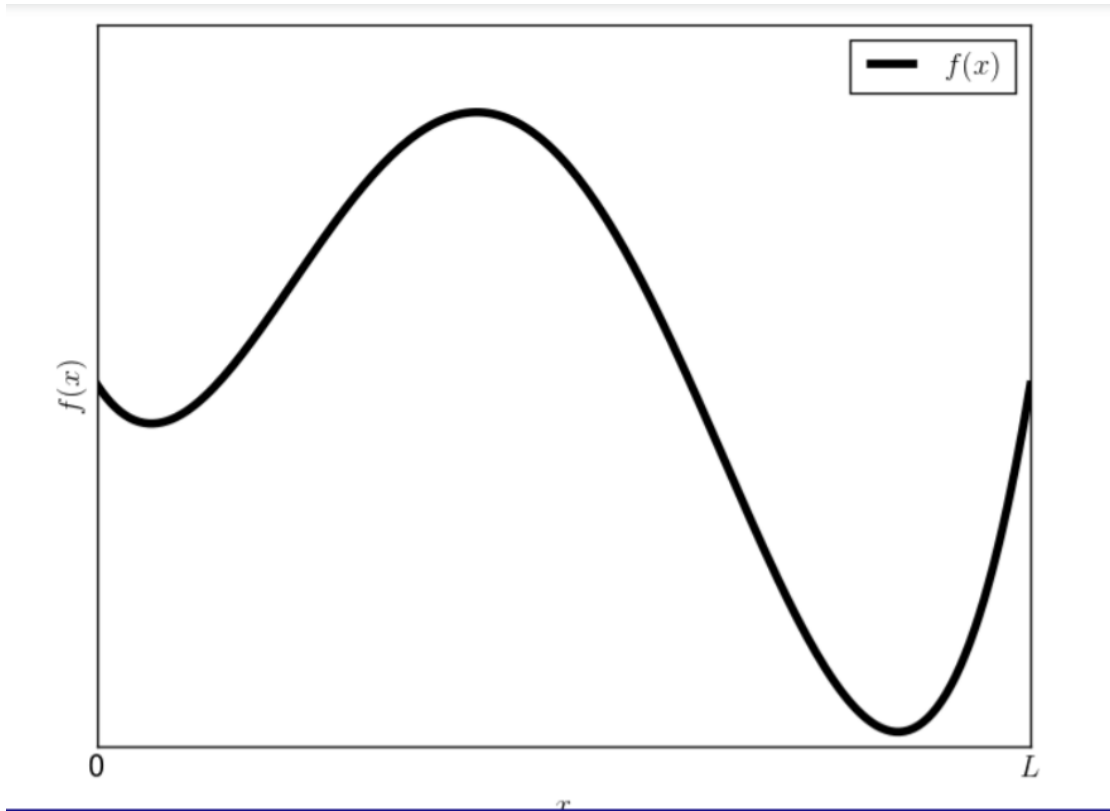




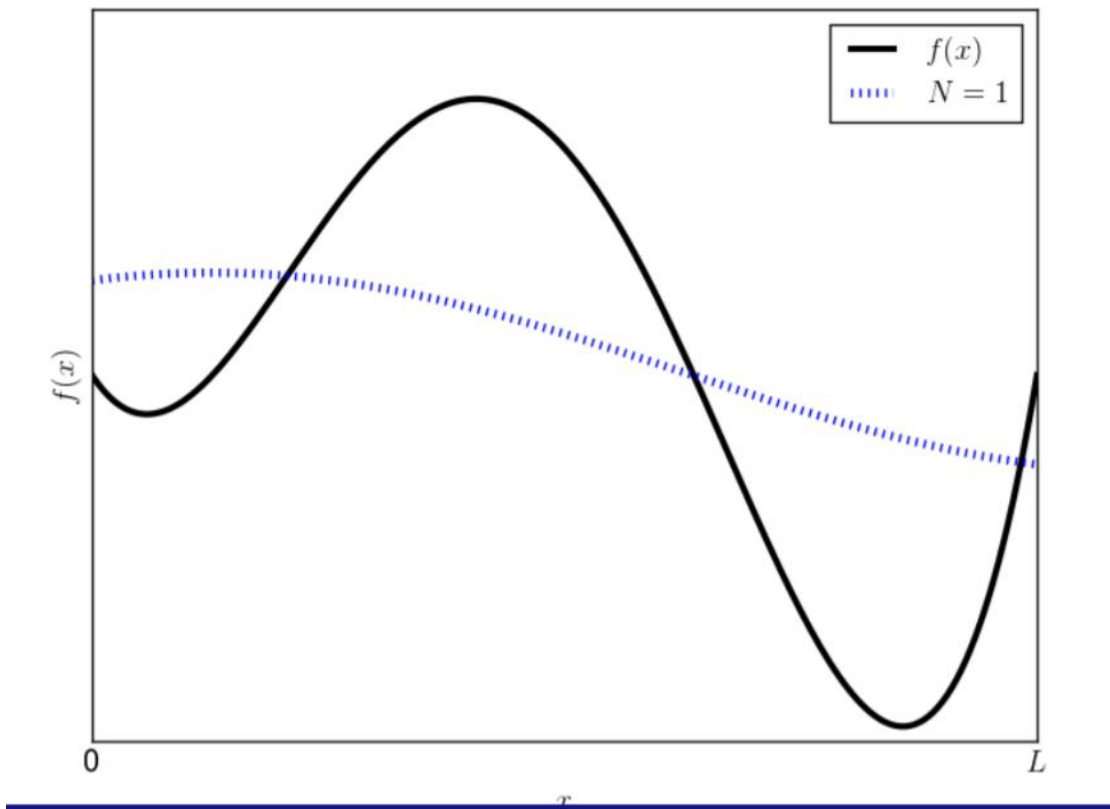
### 3.3 Φασματική μέθοδος

- Αντιπροσωπεύει τις μεταβλητές ως (όριο) συνόλων ορθογώνιων συναρτήσεων βάσης
- Οι λειτουργίες global basis διαφέρουν σε ολόκληρο τον τομέα
- Περιορίζει τις άπειρες σειρές και υπολογίζει τη συμπεριφορά των πεπερασμένων συντελεστών

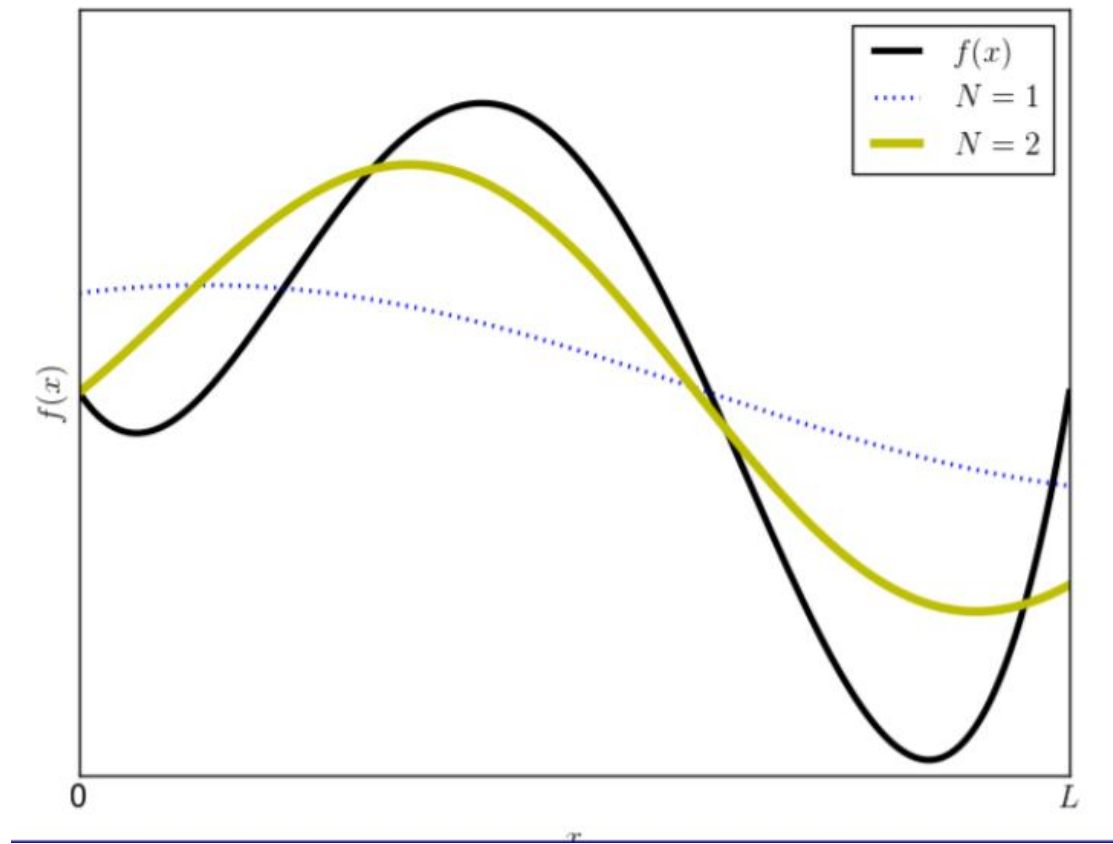




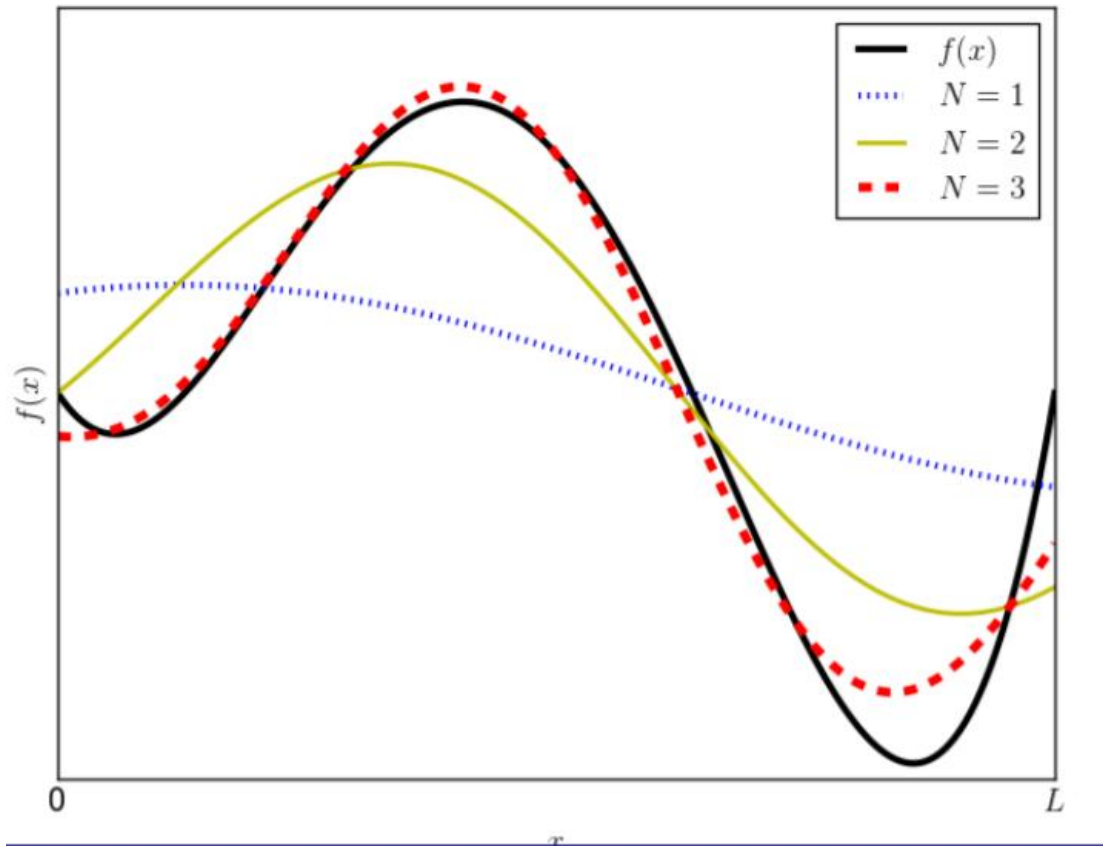
Εικόνα 19: Φασματική μέθοδος



Εικόνα 20: Φασματική μέθοδος



Εικόνα 21: Φασματική μέθοδος



Εικόνα 22: Φασματική μέθοδος

### 3.4 Υβριδική μέθοδος

- ✚ Μέθοδος πεπερασμένου όγκου για global διατηρημένη ποσότητα - μέθοδος πεπερασμένων διαφορών για τον υπολογισμό των ροών
- ✚ Επίλυση ταχύτητας ρευστότητας: Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, για πεπερασμένη διαφορά στο χρόνο

### 3.5 Εξισώσεις Poisson: Πίεση σε Navier – Stokes

—  $u$ , (ορμή)

(συνέχεια)

Λαμβάνοντας την απόκλιση

—

### 3.6 Εξισώσεις Poisson

Η γενική μορφή της εξίσωσης είναι:

Αυτή είναι η ισχυρή μορφή της εξίσωσης Poisson.

### 3.7 Οριακές συνθήκες για εξισώσεις ασθενούς μορφής

Δύο πιθανές μορφές οριακής συνθήκης για μια καλή λύση στην εξίσωση Poisson είναι:

1. Dirichlet:
2. Neumann: —

Στην εξίσωση Galerkin, οι συνθήκες ορίου Dirichlet συνήθως απαιτούν ρητή τροποποίηση της δομής του προβλήματος για να λυθεί, ενώ οι συνθήκες Neumann αντιμετωπίζονται φυσικά ως μέρος της διατύπωσης.

### 3.8 Φυσικές Οριακές Συνθήκες

Η μορφή της εξίσωσης είναι:

—

Ολοκληρώνοντας έχω:

—

—

Επιλέγω  $\phi$  για να απαλείψω στις Dirichlet συνθήκες (και έχω  $\Psi = \alpha(0)$ ), και χρησιμοποιώ ότι  
— στις Neumann συνθήκες και έχω:

—

$b(1)$

### 3.9 Βασικές εξισώσεις πεπερασμένων στοιχείων

Χρειάζεται διακριτή πεπερασμένη διαστατική αναπαράσταση του προβλήματος που πρέπει να γίνει αριθμητικός υπολογισμός σε υπολογισμός (σε  $H^1/\gamma$ ).

Όπου ανήκει στους πραγματικούς αριθμούς και  $\rightarrow \Omega \rightarrow \mathbb{R}$  είναι μια σταθερή εξίσωση που καθορίζει τη χωρική εξάρτηση.

### 3.10 Προσέγγιση Galerkin

Για να αποκτήσουμε την προσέγγιση Galerkin της εξίσωσης Poisson, βρίσκουμε τη (μοναδική) λύση της εξίσωσης αδύναμης μορφής όταν είναι τα  $\gamma$  και  $f$  προσεγγίζονται από τις επεκτάσεις πεπερασμένων στοιχείων μας,

Οι  $\phi_i$  ονομάζονται δοκιμαστικές συναρτήσεις και ο χώρος λειτουργίας που προέρχονται από αυτές είναι ο δοκιμαστικός χώρος. Το  $\phi_i$  ονομάζεται λειτουργίες δοκιμής και βρίσκεται στο δοκιμαστικό χώρο. Ο υπολογισμός περιλαμβάνει τη λήψη του πεπερασμένου αριθμού  $N$ .

Αντικαθιστώντας τις πεπερασμένες παραστάσεις σε (\*) έχουμε:

$$\int_{\Omega} \nabla \phi_i \cdot \nabla u_h + \int_{\Omega} \phi_i u_h = \int_{\Omega} \phi_i f_h$$

### 3.11 Από τοπικό σε ολικό ( Global to Local)

$$\int_{\Omega} \nabla \phi_i \cdot \nabla u_h + \int_{\Omega} \phi_i u_h = \int_{\Omega} \phi_i f_h$$

Όπου το  $\int_{\Omega} \nabla \phi_i \cdot \nabla u_h$  συνεισφέρει μόνο εάν:

$$\int_{\Omega} \nabla \phi_i \cdot \nabla u_h \neq 0$$

### 3.12 Πρόβλημα πεπερασμένης διαφοράς Poisson Matrix

$$\begin{array}{cccccc|l}
 \frac{-2}{h^2} & \frac{1}{h^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & \psi_1 \\
 \frac{1}{h^2} & \frac{-2}{h^2} & \frac{1}{h^2} & 0 & 0 & 0 & \psi_2 \\
 0 & \frac{1}{h^2} & \frac{-2}{h^2} & \frac{1}{h^2} & 0 & 0 & \psi_3 \\
 0 & 0 & \frac{1}{h^2} & \frac{-2}{h^2} & \frac{1}{h^2} & 0 & \psi_4 \\
 0 & 0 & 0 & \frac{1}{h^2} & \frac{-2}{h^2} & \frac{1}{h^2} & \psi_5 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{h^2} & \frac{-1}{h^2} & \psi_6
 \end{array}
 =
 \begin{array}{l}
 \hat{f}_2 - \frac{a(0)}{h^2} \\
 \hat{f}_3 \\
 \hat{f}_4 \\
 \hat{f}_5 \\
 \hat{f}_6 \\
 \frac{1}{2}\hat{f}_6 - b(1)
 \end{array}$$

Εικόνα 23: Matrix Poisson

### 3.13 Πρόβλημα Poisson Matrix Πεπερασμένου Όγκου

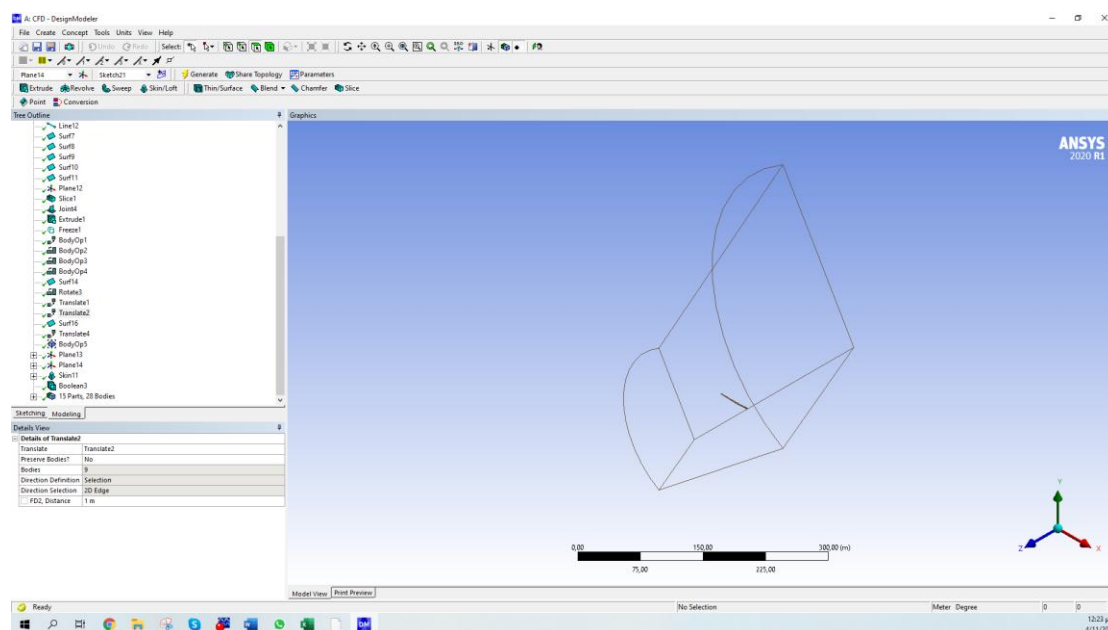
$$\begin{array}{cccccc|l}
 \frac{-3}{h} & \frac{1}{h} & 0 & 0 & 0 & 0 & \psi_{\frac{1}{2}} \\
 \frac{1}{h} & \frac{-2}{h} & \frac{1}{h} & 0 & 0 & 0 & \psi_{\frac{3}{2}} \\
 0 & \frac{1}{h} & \frac{-2}{h} & \frac{1}{h} & 0 & 0 & \psi_{\frac{5}{2}} \\
 0 & 0 & \frac{1}{h} & \frac{-2}{h} & \frac{1}{h} & 0 & \psi_{\frac{7}{2}} \\
 0 & 0 & 0 & \frac{1}{h} & \frac{-2}{h} & \frac{1}{h} & \psi_{\frac{9}{2}} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{h} & \frac{-1}{h} & \psi_{\frac{11}{2}}
 \end{array}
 =
 \begin{array}{l}
 h\hat{f}_{1/2} - 2\frac{a(0)}{h} \\
 h\hat{f}_{3/2} \\
 h\hat{f}_{5/2} \\
 h\hat{f}_{7/2} \\
 h\hat{f}_{9/2} \\
 h\hat{f}_{11/2} - b(1)
 \end{array}$$

Εικόνα 24: Poisson Matrix Πεπερασμένου Όγκου



## Κεφάλαιο 4 σχεδίαση Φτερού Ανεμογεννήτριας στο Ansys Modeler

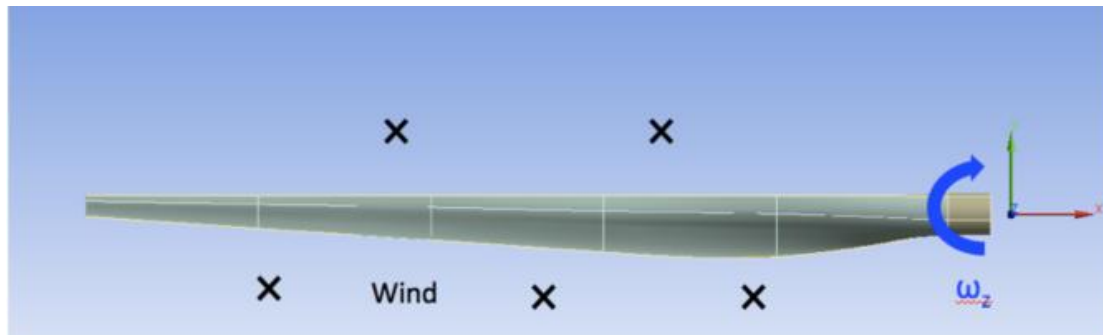
Αυτή η προσομοίωση εξετάζει την παραμόρφωση λόγω της αεροδυναμικής φόρτωσης ενός πτερυγίου ανεμογεννήτριας πραγματοποιώντας ανάλυση FSI (Fluid-Structure Interaction) σταθερής κατάστασης μονής κατεύθυνσης. Το μέρος 1 της μελέτης χρησιμοποιεί το ANSYS Fluent για την ανάπτυξη της αεροδυναμικής φόρτωσης στη λεπίδα. Στο μέρος 2, οι πιέσεις στις σε επαφή με ρευστό περιοχές της λεπίδας περνούν καθώς η πίεση φορτώνεται στην ANSYS Mechanical για τον προσδιορισμό των τάσεων και των παραμορφώσεων στη λεπίδα.



Εικόνα 25: Σχεδίαση μοντέλου στο Ansys Modeler

Το φτερό έχει μήκος 43,2 μέτρα και ξεκινά με κυλινδρικό σχήμα στη ρίζα και μετά μεταβαίνει στα αεροτομή S818, S825 και S826 για τη ρίζα, το σώμα και το άκρο, αντίστοιχα. Το φτερό έχει επίσης βήμα να ποικίλει ανάλογα με την ακτίνα, δίνοντάς του μια συστροφή και η γωνία βήματος στο άκρο της λεπίδας είναι 4 μοίρες. Αυτό το φτερό δημιουργήθηκε για να είναι παρόμοιου μεγέθους με ένα στρόβιλο GE 1.5XLE.

Το φτερό είναι κατασκευασμένο από ένα ορθοτροπικό σύνθετο υλικό, έχει ποικίλο πάχος και έχει επίσης ένα άκρο στο εσωτερικό της λεπίδας για δομική ακαμψία. Αυτές οι προδιαγραφές, οι οποίες είναι σημαντικές για την προσομοίωση FEA, περιγράφονται λεπτομερέστερα στο δεύτερο μέρος της μελέτης.



Εικόνα 26

Ο τυρβώδης άνεμος ρέει προς την αρνητική κατεύθυνση  $z$  (στη σελίδα στο παραπάνω διάγραμμα εικόνα 26) στα  $12 \text{ m/s}$ , η οποία είναι μια τυπική ονομαστική ταχύτητα ανέμου για μια γεννήτρια αυτού του μεγέθους. Αυτή η εισερχόμενη ροή θεωρείται ότι κάνει τη λεπίδα να περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα  $-2,22 \text{ rad/s}$  γύρω από τον άξονα  $z$  (η λεπίδα περιστρέφεται έτσι δεξιόστροφα όταν την κοιτάζουμε από μπροστά, όπως οι περισσότερες πραγματικές ανεμογεννήτριες). Ο λόγος ταχύτητας / άκρου (ο λόγος της ταχύτητας του άκρου της λεπίδας προς την ταχύτητα του εισερχόμενου ανέμου) είναι συνεπώς ίσος με 8 που είναι μια λογική τιμή για μια μεγάλη ανεμογεννήτρια.

## 4.1 Λεπτομέρειες ανάλυσης

Σε αυτήν την ενότητα της εργασίας, εισάγεται η γεωμετρία της λεπίδας, δημιουργείται ένα πλέγμα γύρω από τη λεπίδα και στη συνέχεια το Fluent solver χρησιμοποιείται για να βρει την αεροδυναμική φόρτωση στη λεπίδα, τα ρευστά ρεύματα και τη ροπή που δημιουργείται. Θα χρησιμοποιήσουμε αέρα σε κανονικές συνθήκες (15 βαθμούς Κελσίου). Η πυκνότητά του είναι  $1,225 \text{ kg / m}^3$  και το ιξώδες του είναι  $1,7894 \times 10^{-5} \text{ kg / (m * s)}$ .

Χρησιμοποιώντας περιοδικότητα, θα προσομοιώσουμε τη ροή γύρω από ένα φτερό και θα παρέχουμε τη λύση σε δύο ακόμη φτερά, προκειμένου να απεικονίσουμε τα αποτελέσματα για έναν ρότορα 3 φτερών.

### 4.1.1 Μαθηματικό Μοντέλο

Οι εξισώσεις που διέπουν είναι οι εξισώσεις συνέχειας και Navier-Stokes. Αυτές οι εξισώσεις γράφονται σε ένα πλαίσιο αναφοράς που περιστρέφεται με το φτερό. Αυτό έχει το πλεονέκτημα ότι η προσομοίωσή μας δεν απαιτεί κινούμενο πλέγμα για να ληφθεί υπόψη η περιστροφή του φτερού.

Οι εξισώσεις που θα χρησιμοποιήσουμε ως εξής:

Διατήρηση μάζας (Εξίσωση συνέχειας):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

Διατήρηση της ορμής (Navier-Stokes):

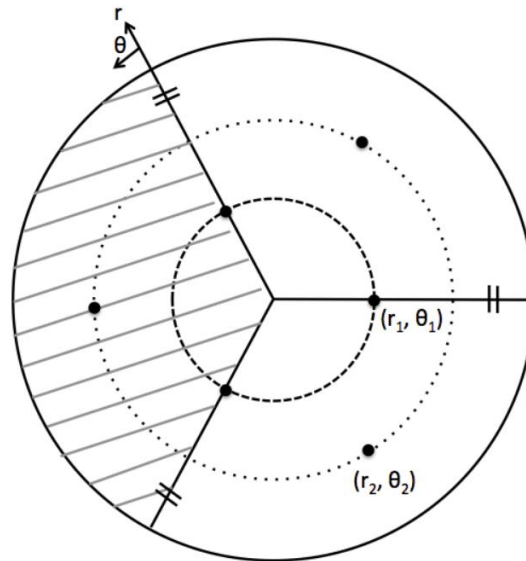
$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \otimes \mathbf{v}) + \rho (\mathbf{2}\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v} + \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}$$

Όπου  $\mathbf{v}$  είναι η σχετική ταχύτητα (η ταχύτητα που φαίνεται από το κινούμενο πλαίσιο) και  $\boldsymbol{\omega}$  είναι η γωνιακή ταχύτητα.

#### 4.1.2 Συνοριακές συνθήκες

Μοντελοποιούμε μόνο το 1/3 του πλήρους τομέα χρησιμοποιώντας παραδοχές περιοδικότητας:

$$v(r_1, \theta) = v(r_1, \theta - 120^\circ n), n=1, 2, \dots$$



$$\begin{aligned} \vec{v}(r_1, \theta) &= \vec{v}(r_1, \theta_1 - 120^\circ n) \quad \text{For } n = 1, 2, 3, \dots \\ &= \vec{v}(r_1, 240^\circ - 120^\circ(1)) = \vec{v}(r_1, 120^\circ) \\ &= \vec{v}(r_1, 240^\circ - 120^\circ(2)) = \vec{v}(r_1, 0^\circ) \end{aligned}$$

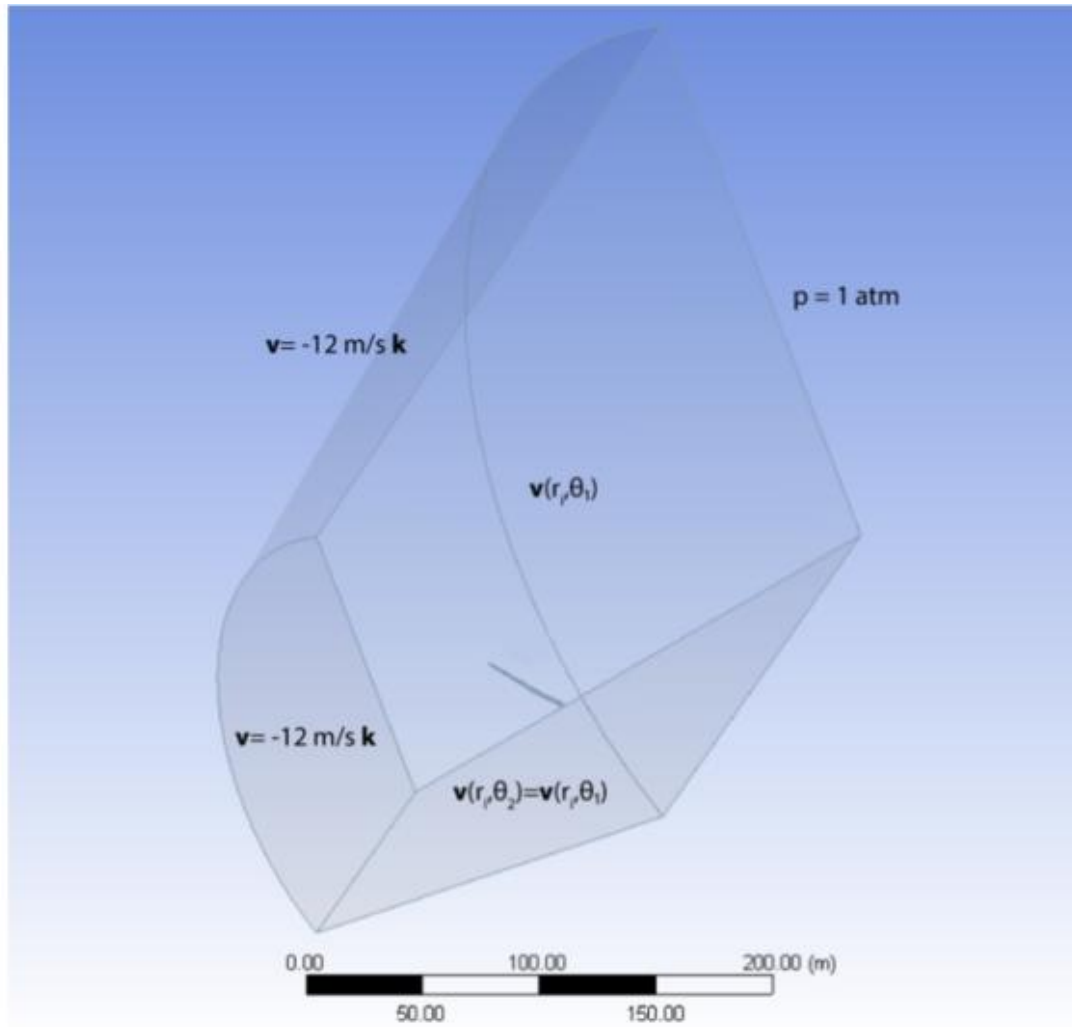
$$\begin{aligned} \vec{v}(r_2, \theta) &= \vec{v}(r_2, \theta_2 - 120^\circ n) \quad \text{For } n = 1, 2, 3, \dots \\ &= \vec{v}(r_2, 180^\circ - 120^\circ(1)) = \vec{v}(r_2, 60^\circ) \end{aligned}$$

Οι οριακές συνθήκες στην περιοχή ρευστού είναι οι εξής:

Είσοδος: Ταχύτητα 12 m/s με ένταση στροβιλώδους 5% και αναλογία τυρβώδους ιξώδους 10

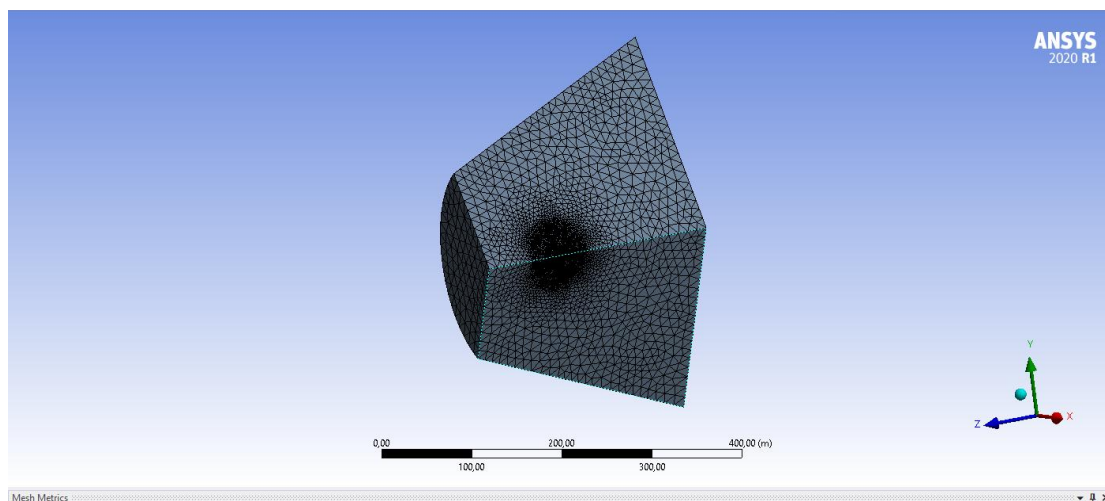
Έξοδος: Πίεση 1 atm

Blade: No-slip

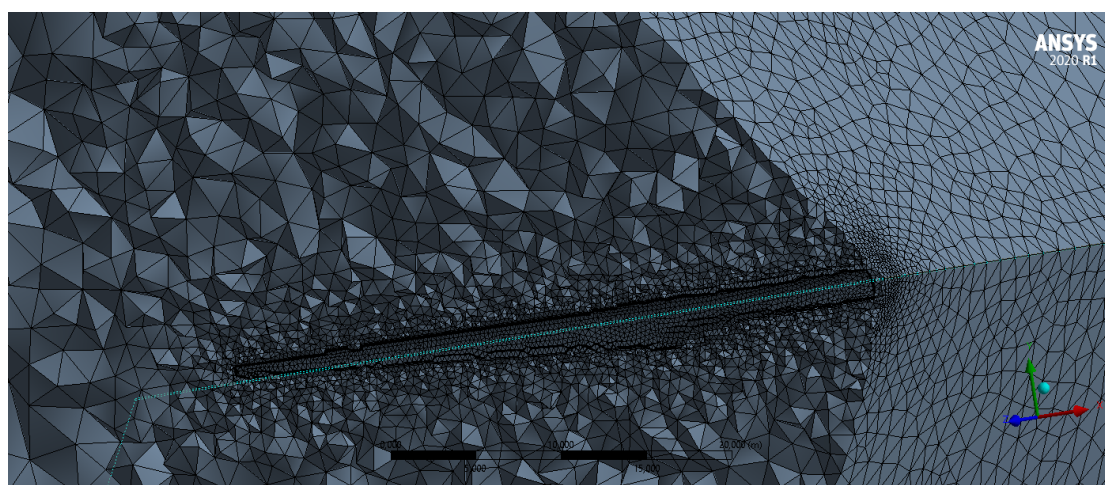


Εικόνα 27: Περιοδικά Πλευρικά όρια

## 4.2 Διακριτοποίηση

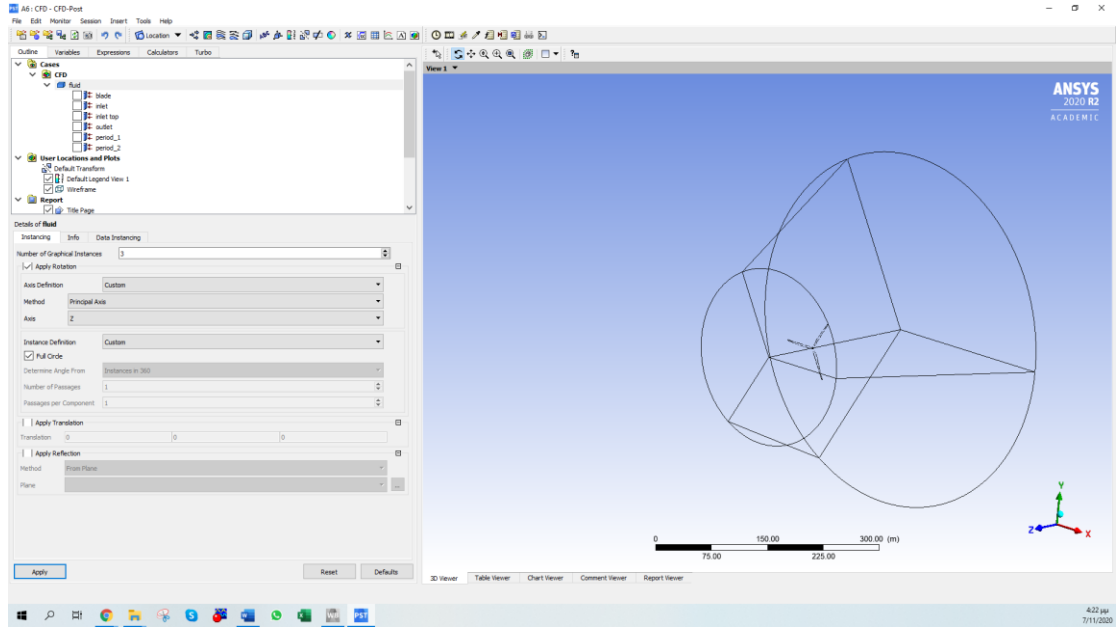


Εικόνα 28: Διακριτοποίηση μοντέλου

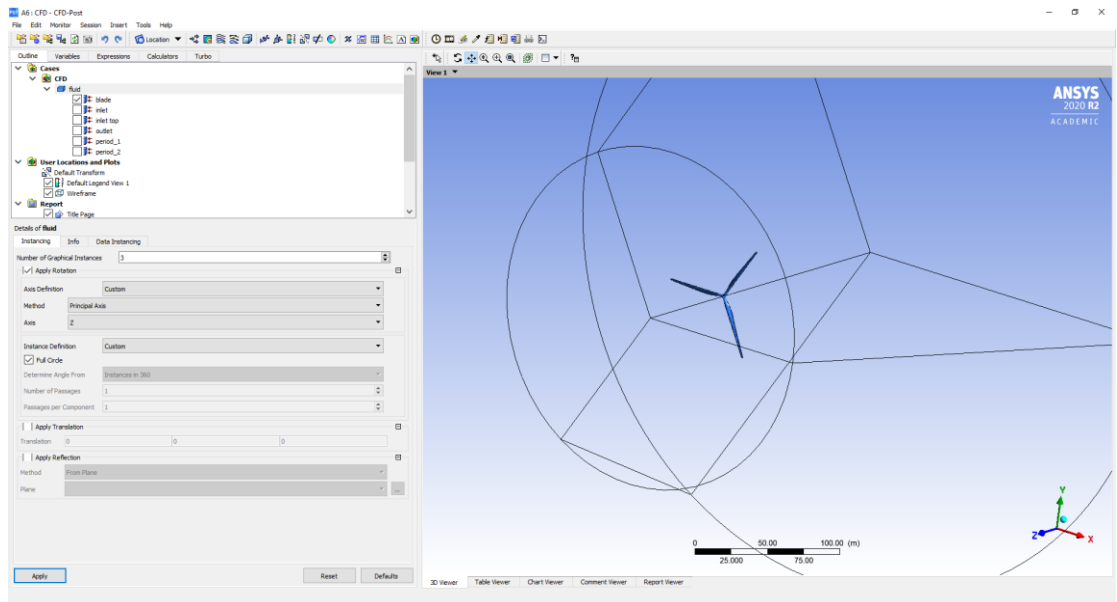


Εικόνα 29: Τομή στο mesh

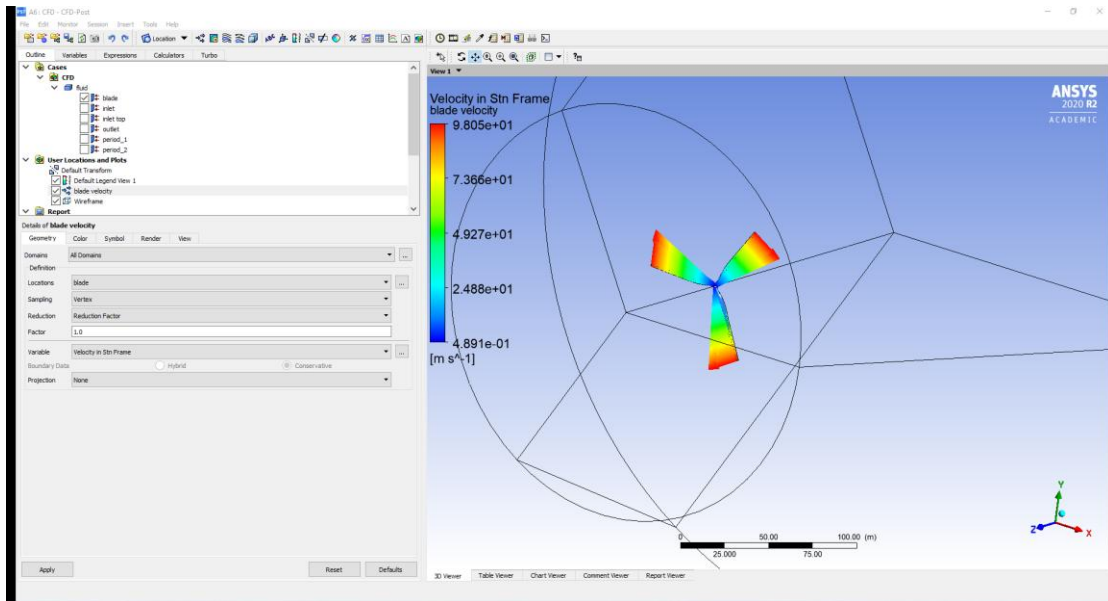
## 4.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων



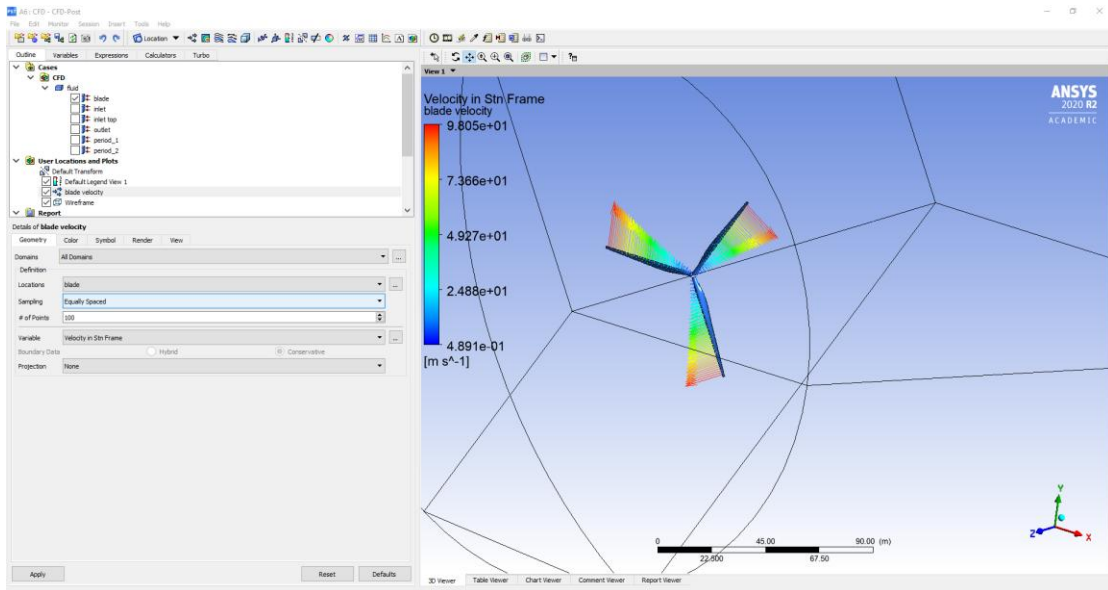
Εικόνα 30: Παρουσίαση όλου του μοντέλου



Εικόνα 31: Παρουσίαση όλου του μοντέλου

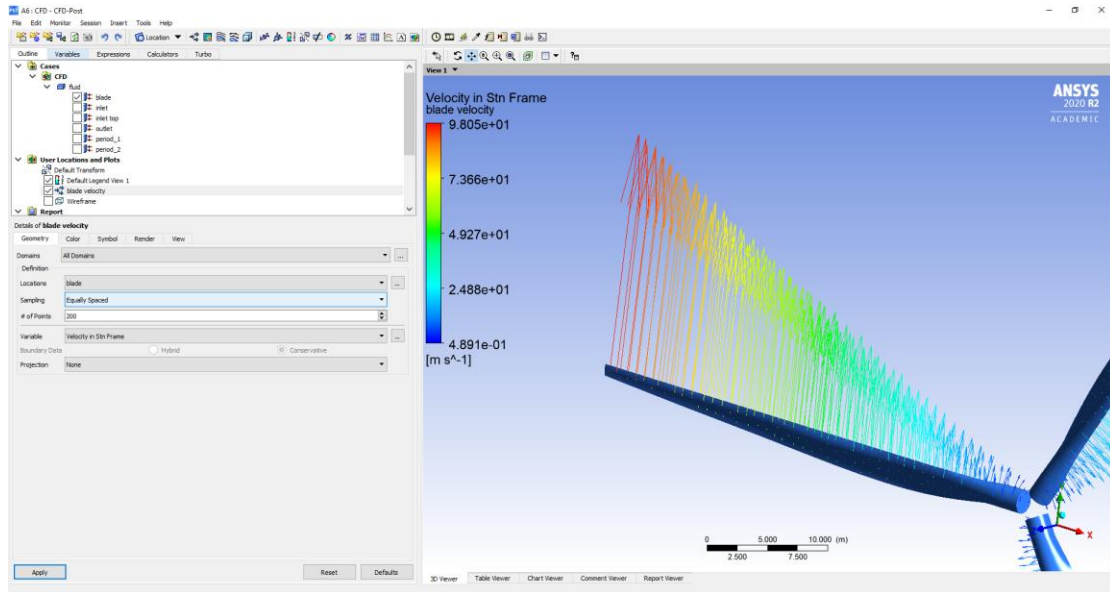


Εικόνα 32: Κατανομή της ταχύτητας πάνω στην Ανεμογεννήτρια

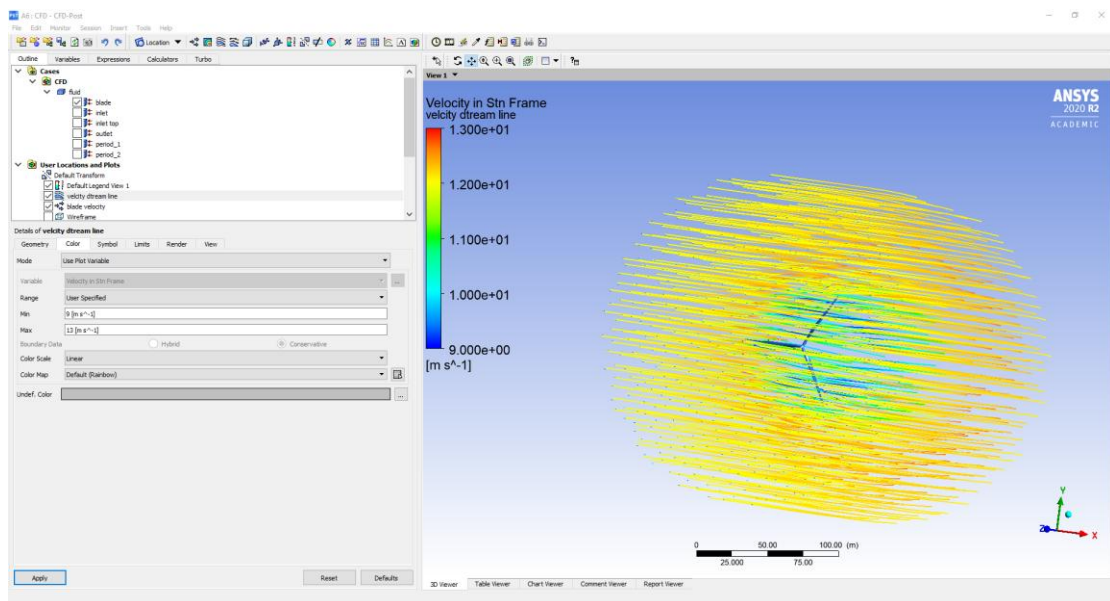


Εικόνα 33: Κατανομή ταχύτητας πάνω στην Ανεμογεννήτρια

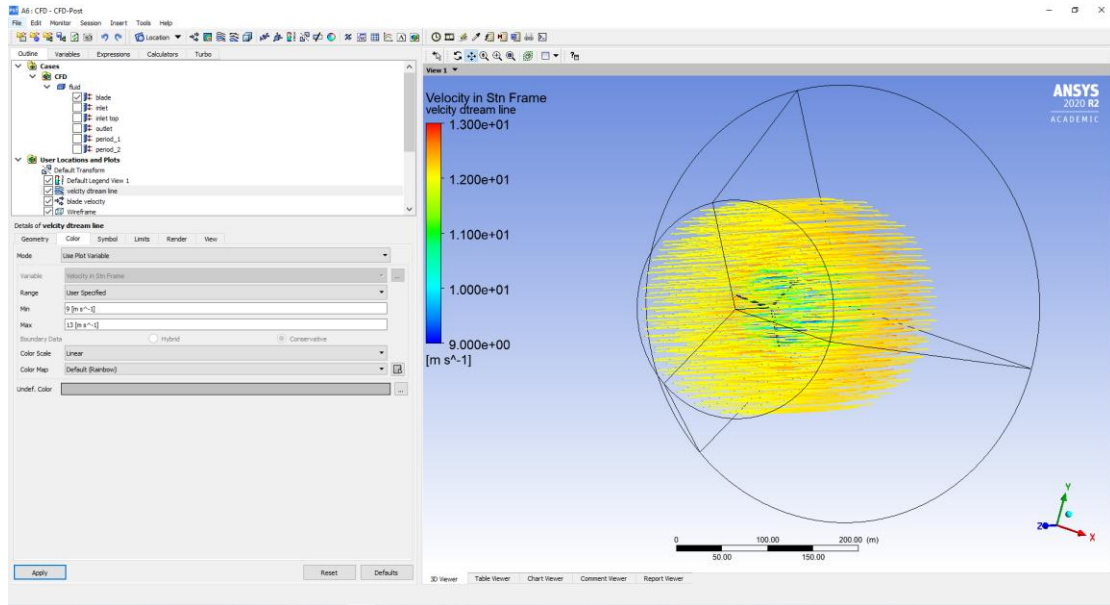




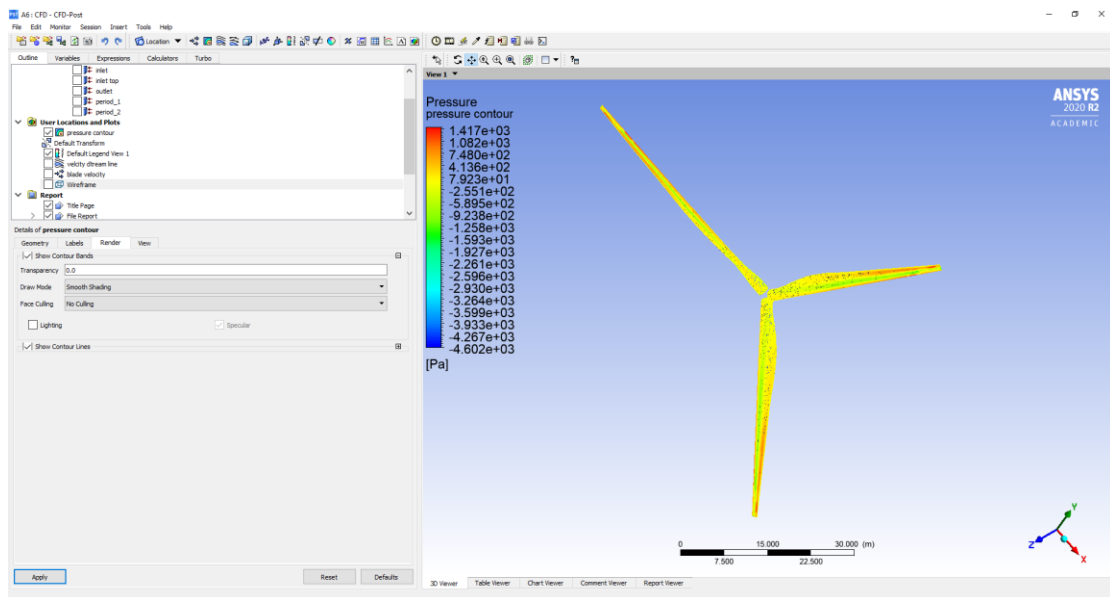
Εικόνα 34: Κατανομή ταχύτητας πάνω στην Ανεμογεννήτρια



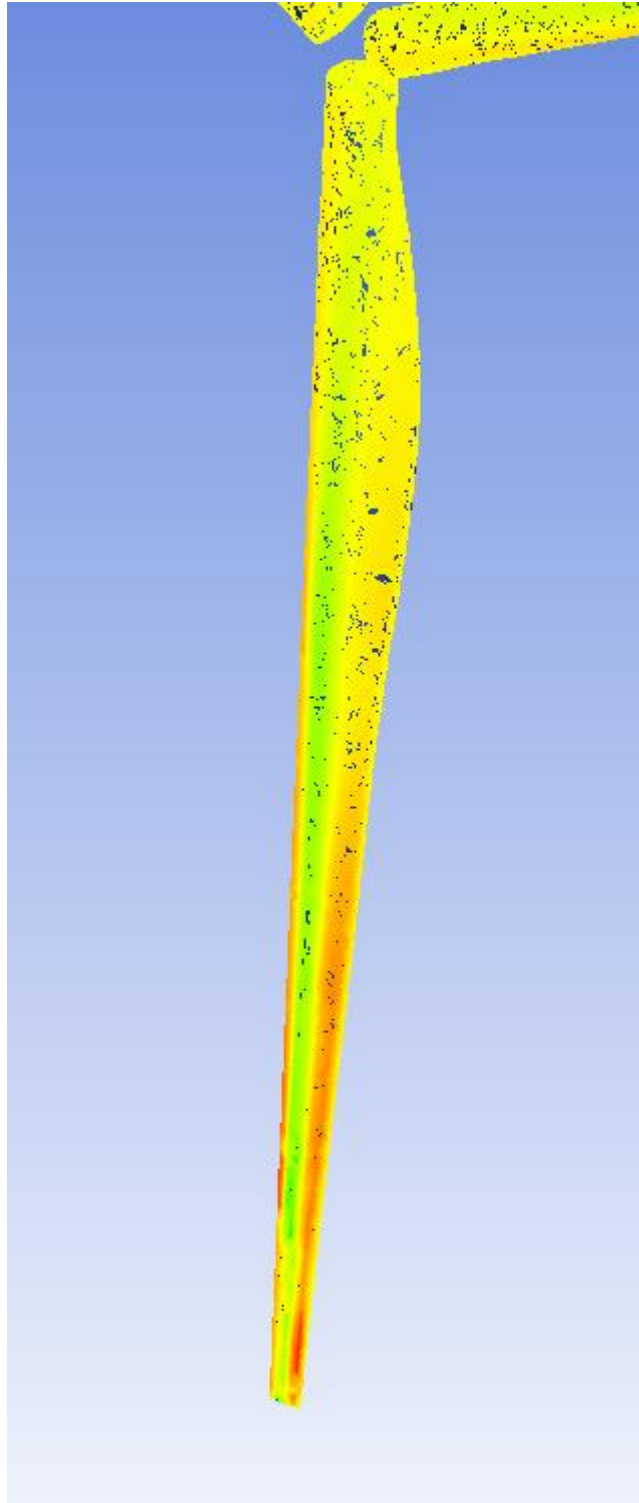
Εικόνα 35: Ροή αέρα γύρω από τα φτερά



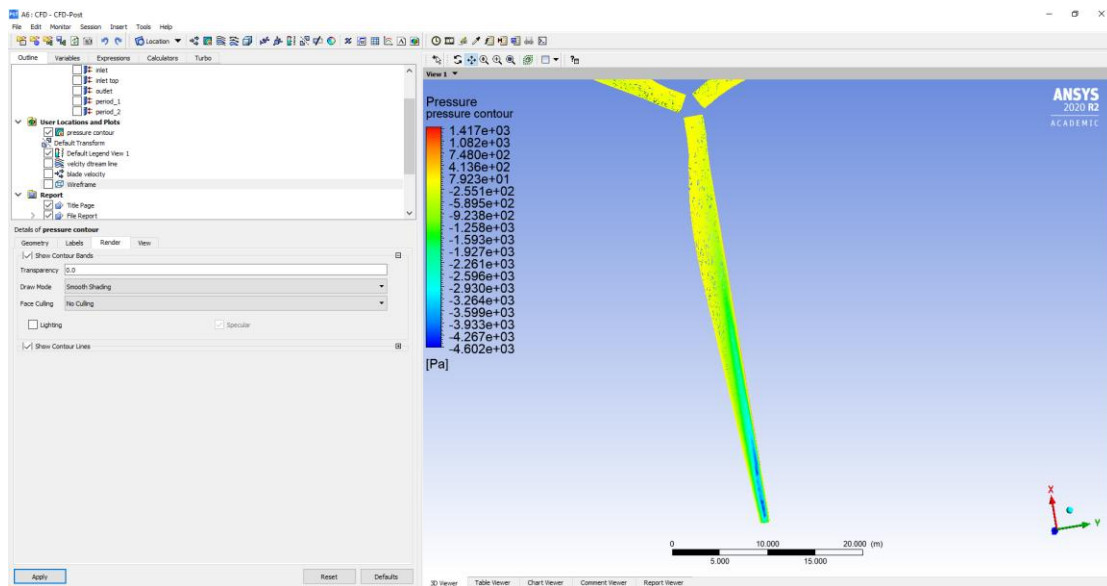
Εικόνα 36: Ροή αέρα γύρω από τα φτερά



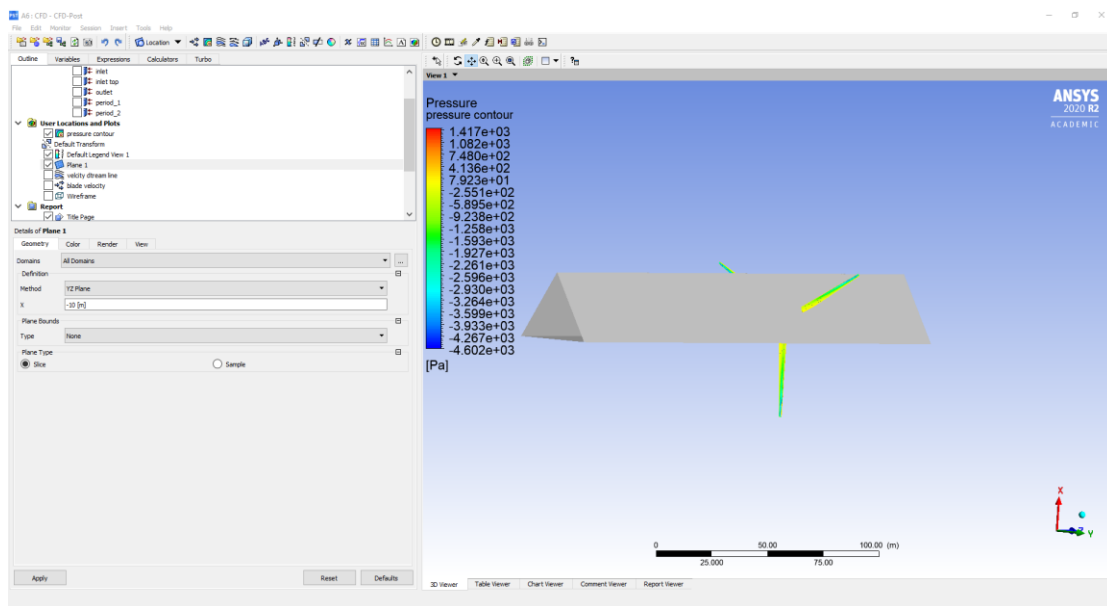
Εικόνα 37: Κατανομή πίεσης πάνω στα φτερά



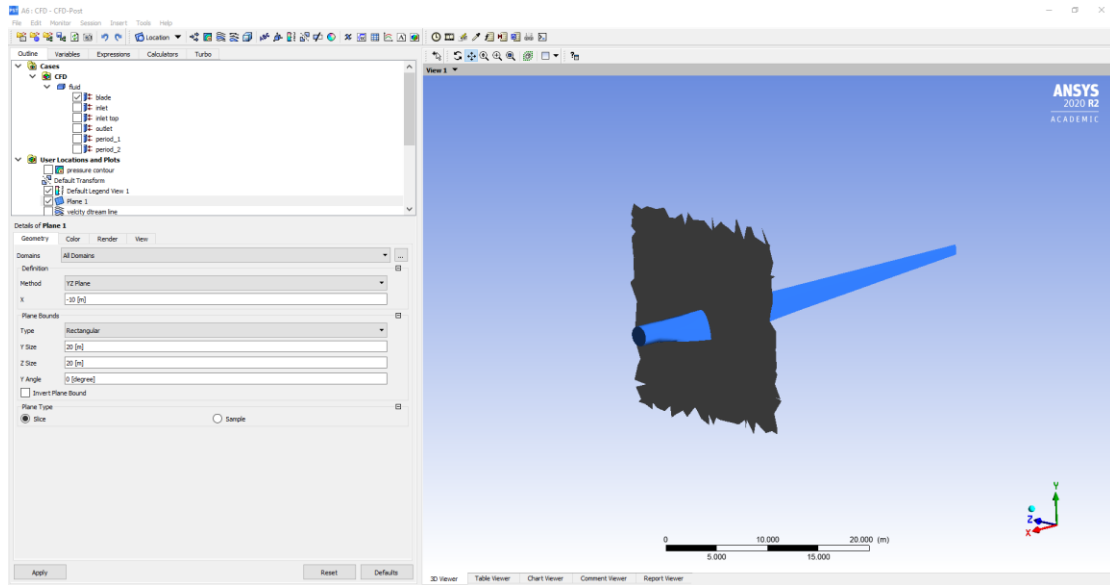
*Εικόνα 38: Κατανομή πίεσης πάνω στα φτερά*



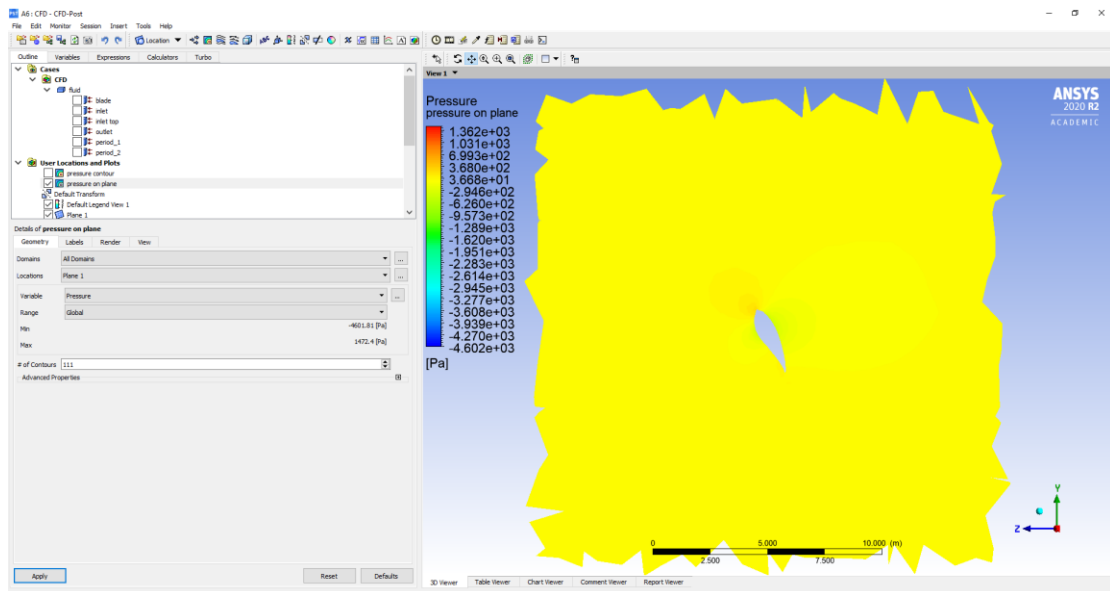
Εικόνα 39: Κατανομή πίεσης στην πίσω πλευρά των φτερών



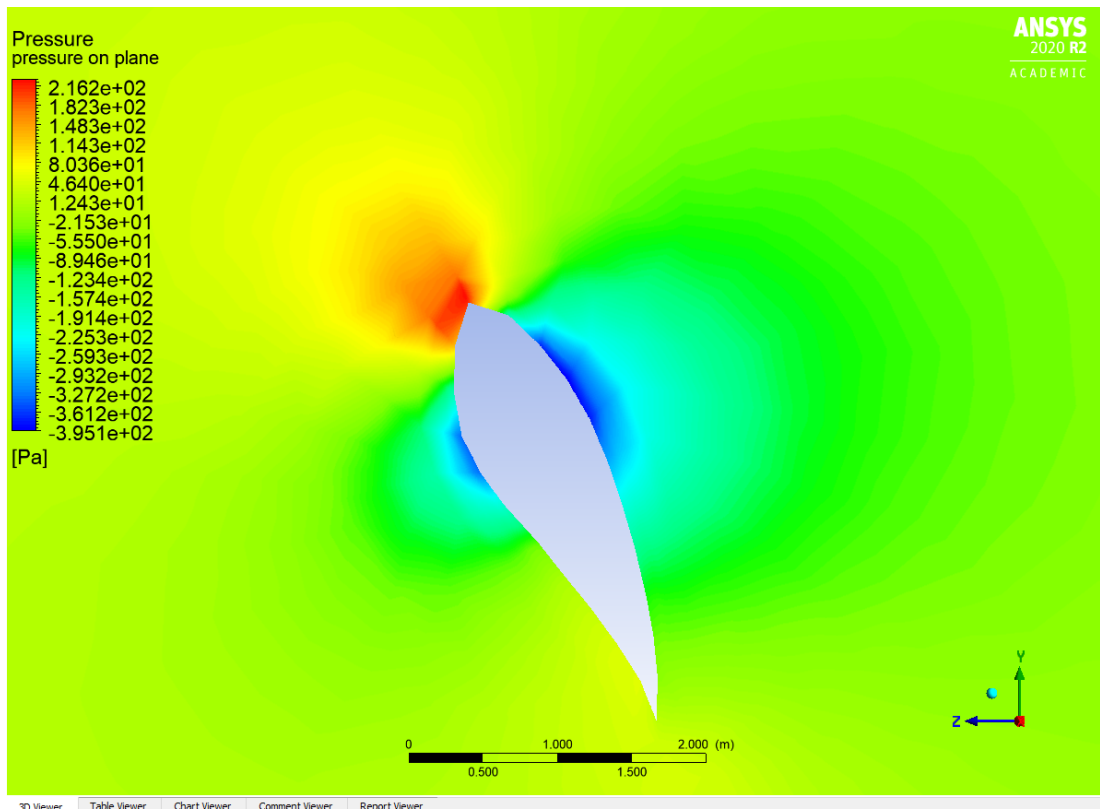
Εικόνα 40: Δημιουργώντας τομή πάνω στα αποτελέσματα



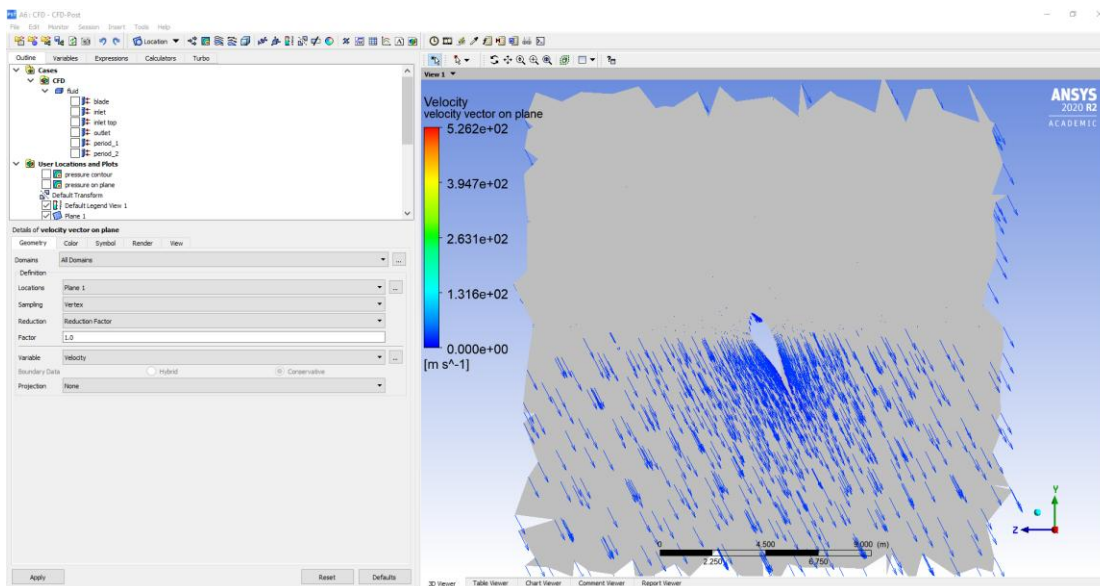
Εικόνα 41: Δημιουργώντας τομή πάνω στα αποτελέσματα



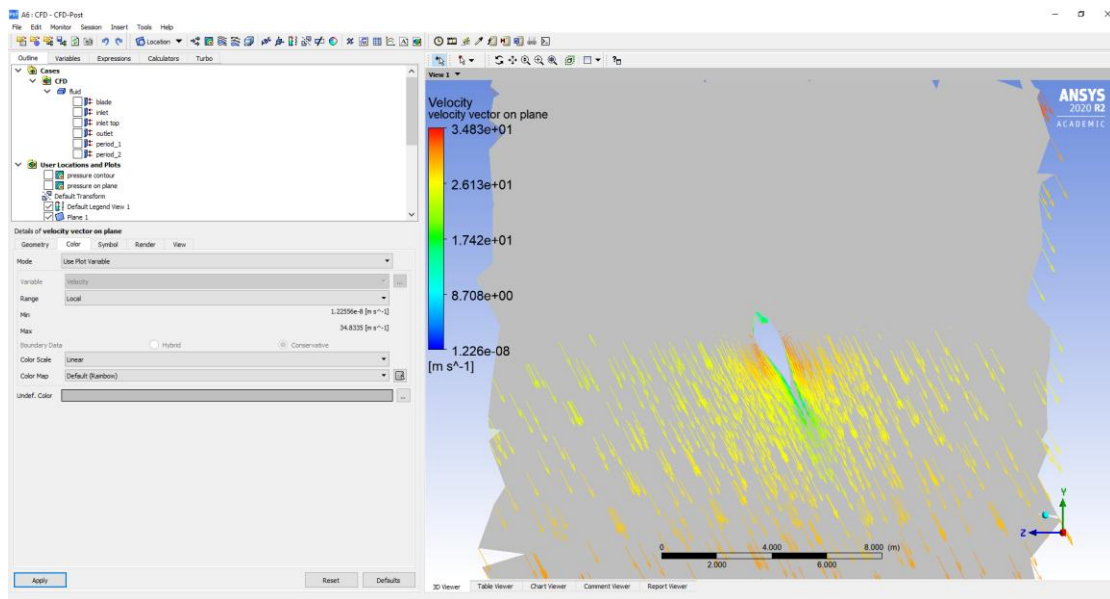
Εικόνα 42: Κατανομή πίεσης πάνω στην τομή στα 10m



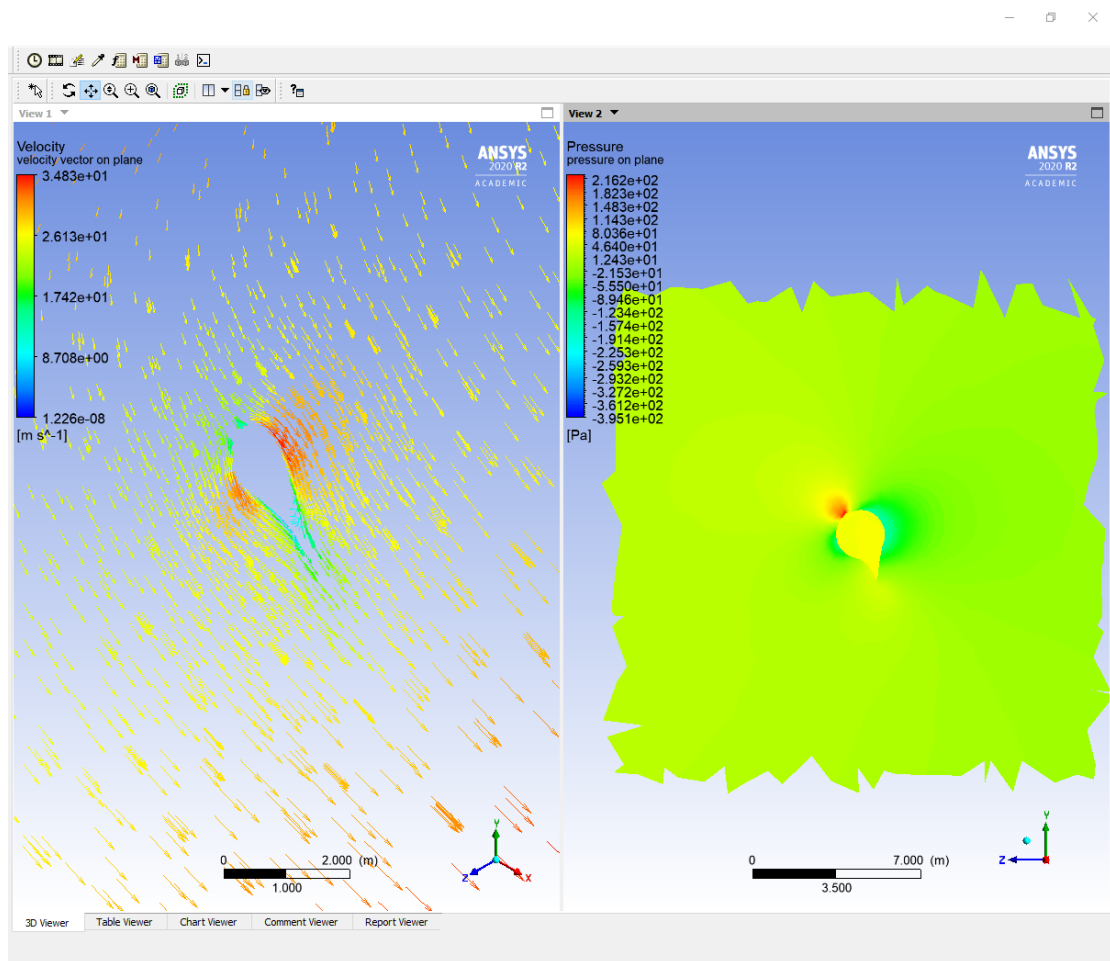
Εικόνα 43: Κατανομή πίεσης πάνω στην τομή στα 10m



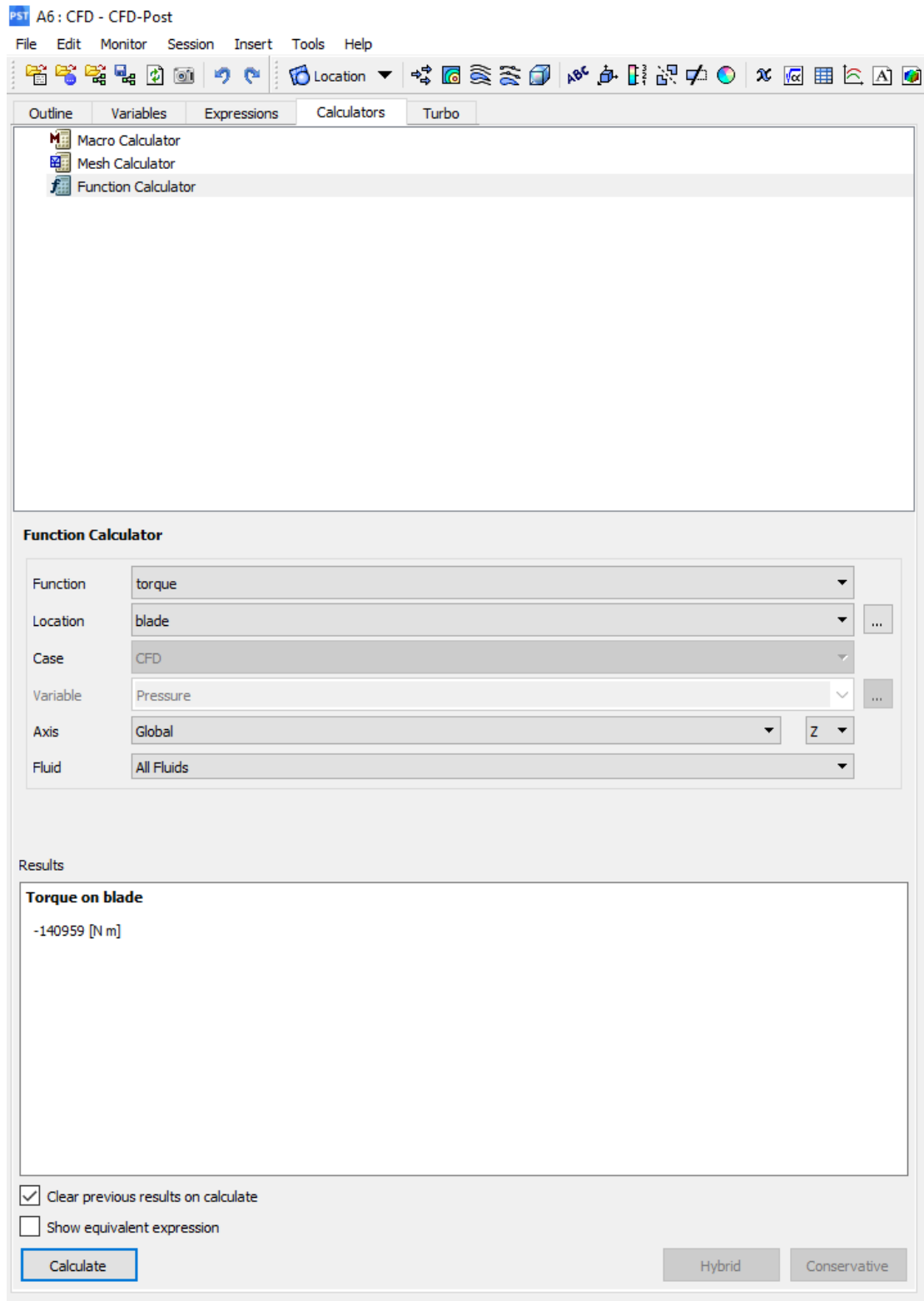
Εικόνα 44: Κατανομή ταχύτητας πάνω στην τομή στα 10m



Εικόνα 45: Κατανομή ταχύτητας πάνω στην τομή στα 10m



Εικόνα 46: Απεικόνιση ταχύτητας και πίεσης



Εικόνα 47: Αναπτυσσόμενη ροπή



Forces							
Coefficients	Forces (n)						
Zone	Pressure		Viscous		Total		
blade	(-1607.3365	6766.365	-83758.087)	(-15.471493	-579.49196	-105.00859)	(-1622.808 6186.873
-83863.096)	(-2624.2229	11047.126	-136747.9)	(-25.25958	-946.10931	-171.44259)	(-2649.4825 10101.017
-136919.34)	-----						
Net	(-1607.3365	6766.365	-83758.087)	(-15.471493	-579.49196	-105.00859)	(-1622.808 6186.873
-83863.096)	(-2624.2229	11047.126	-136747.9)	(-25.25958	-946.10931	-171.44259)	(-2649.4825 10101.017
-136919.34)	-----						
Forces - Direction Vector (0 0 1)							
Zone	Forces (n)			Coefficients			
blade	Pressure	Viscous	Total	Pressure	Viscous	Total	
blade	-83758.087	-105.00859	-83863.096	-136747.9	-171.44259	-136919.34	
Net	-83758.087	-105.00859	-83863.096	-136747.9	-171.44259	-136919.34	

Εικόνα 48: Αναπτυσσόμενες δυνάμεις

Στην εικόνα 48 βλέπουμε τις δυνάμεις που προέρχονται λόγω διαφοράς πίεσης και τις δυνάμεις που καταπονούν τα φτερά της ανεμογεννήτριας λόγω ιξώδους. Παρατηρούμε ότι οι μεγαλύτερες δυνάμεις παρουσιάζονται λόγω διαφοράς πίεσης.

Mass Flow Rate	(kg/s)
inlet	221221.14
Net	221221.14

Εικόνα 49: Παροχή μάζας πάνω στα φτερά

## Συμπεράσματα

Στην εργασία ήρθαμε αντιμέτωποι και προσπαθήσαμε να προσομοιώσουμε ένα σημαντικό και ρεαλιστικό πρόβλημα στον τομέα του μηχανικού. Η μέθοδος που ακολουθήθηκε είναι : μελέτη του προβλήματος και κατανόηση του , μελέτη των βασικών στοιχείων της ρευστομηχανικής και μελέτη και εκμάθηση του λογισμικού ANSYS FLUENT. Τα Αποτελέσματα που προέκυψαν από την εργασία είναι:

- ✚ Η προσομοίωση δίνει μια εξαιρετική εικόνα στον μηχανικό για το τι πρόκειται να συμβεί σε σχέση με αυτό που μελετάει
- ✚ Η προσομοίωση δίνει ακριβής αριθμητικά αποτελέσματα
- ✚ Οι δυνάμεις που παρουσιάζονται πάνω στα φτερά λόγω του ιξώδους είναι πολύ μικρές και μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες
- ✚ Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται λόγω διαφοράς πίεσης είναι πολύ μεγάλες και είναι αυτές που πρέπει να μελετηθούν για να υπολογιστεί η στατική επάρκεια της ανεμογεννήτριας
- ✚ Η συγκεκριμένη μελέτη αποτελεί βάση για περαιτέρω έρευνα και μελέτη για το στατικό της κομμάτι από άλλους συναδέλφους

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Evans, Annette; Strezov, Vladimir; Evans, Tim (June 2009). "Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. **13** (5): 1082–1088. doi:10.1016/j.rser.2008.03.008.
2. <sup>^</sup> Drachmann, A.G. (1961). "Heron's Windmill". *Centaurus*. **7**: 145–151. [mailto:https://en.wikipedia.org/wiki/Wind\\_turbine#cite\\_ref-Drachmann\\_2-0](mailto:https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_turbine#cite_ref-Drachmann_2-0)
3. <sup>^</sup> Lohrmann, Dietrich (1995). "Von der östlichen zur westlichen Windmühle". *Archiv für Kulturgeschichte* (in German). Bohlau Verlag. **77** (1): 1–32. doi:10.7788/akq.1995.77.1.1. ISSN 0003-9233. S2CID 130600717.
4. <sup>^</sup> Ahmad Y. al-Hassan; Donald R. Hill (1992). *Islamic Technology: An Illustrated History*. Cambridge University Press. p. 54. ISBN 978-0-521-42239-0.
5. <sup>^</sup> Donald Routledge Hill, "Mechanical Engineering in the Medieval Near East", *Scientific American*, May 1991, pp. 64–69. (cf. Donald Routledge Hill, [Mechanical Engineering](#))
6. <sup>^</sup> [Jump up to:](#)<sup>a b</sup> Morthorst, Poul Erik; Redlinger, Robert Y.; Andersen, Per (2002). *Wind energy in the 21st century: economics, policy, technology and the changing electricity industry*. Houndmills, Basingstoke, Hampshire: Palgrave/UNEP. ISBN 978-0-333-79248-3.
7. <sup>^</sup> [Jump up to:](#)<sup>a b c d</sup> Price, Trevor J. (2004). "Blyth, James (1839–1906)". *Oxford Dictionary of National Biography* (online ed.). Oxford University Press. doi:10.1093/ref:odnb/100957. (Subscription or [UK public library membership](#) required.)
8. [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/ba/Windmills\\_D1-D4 %28Thornton Bank%29.jpg/800px-Windmills\\_D1-D4 %28Thornton Bank%29.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/ba/Windmills_D1-D4_%28Thornton_Bank%29.jpg/800px-Windmills_D1-D4_%28Thornton_Bank%29.jpg)
9. <sup>^</sup> [A Wind Energy Pioneer: Charles F. Brush](#). Danish Wind Industry Association. Archived from [the original](#) on 8 September 2008. Retrieved 28 December 2008.
10. <sup>^</sup> ["Quirky old-style contraptions make water from wind on the mesas of West Texas"](#). Archived from [the original](#) on 3 February 2008.

11. [^ Alan Wyatt \(1986\). \*Electric Power: Challenges and Choices\*. Book Press. ISBN 978-0-920650-01-1.](#)
12. [^ "Bauer, Lucas. "Krasnovsky WIME D-30 – 100,00 kW – Wind turbine"". en.wind-turbine-models.com.](#)
13. <https://www.simscale.com/blog/2015/11/75-years-of-the-finite-element-method-fem/>
14. <https://www.simscale.com/docs/simwiki/fea-finite-element-analysis/what-is-fea-finite-element-analysis/>
15. [^ Anon. "Costa Head Experimental Wind Turbine". Orkney Sustainable Energy Website. Orkney Sustainable Energy Ltd. Retrieved 19 December 2010.](#)
16. [^ Overland, Indra \(1 March 2019\). "The geopolitics of renewable energy: Debunking four emerging myths". \*Energy Research & Social Science\*. \*\*49\*\*: 36–40. doi:10.1016/j.erss.2018.10.018. ISSN 2214-6296.<sup>\[\*verification needed\*\]</sup>](#)
17. [^ "NREL: Dynamic Maps, GIS Data, and Analysis Tools – Wind Maps". Nrel.gov. 3 September 2013. Retrieved 6 November 2013.](#)
18. [^ Appendix II IEC Classification of Wind Turbines. \*Wind Resource Assessment and Micro-siting, Science and Engineering\*. 2015. pp. 269–270. doi:10.1002/9781118900116.app2. ISBN 9781118900116.](#)
19. [^ "The Physics of Wind Turbines Kira Grogg Carleton College, 2005, p. 8" \(PDF\). Retrieved 6 November 2013.](#)
20. [^ "Wind Energy Basics". \*Bureau of Land Management\*. Archived from \*the original\* on 9 May 2019. Retrieved 23 April 2016.](#)
21. [^ "Enercon E-family, 330 Kw to 7.5 MW, Wind Turbine Specification" \(PDF\). Archived from \*the original\* \(PDF\) on 16 May 2011.](#)
22. [^ Tony Burton; David Sharpe; Nick Jenkins; Ervin Bossanyi \(12 December 2001\). \*Wind Energy Handbook\*. John Wiley & Sons. p. 65. ISBN 978-0-471-48997-9.](#)
23. [^ Sanne Wittrup \(1 November 2013\). "11 års vinddata afslørede overraskende produktionsnedgang" \[11 years of wind data shows surprising production decrease\]. \*Ingeniøren\* \(in Danish\).](#)

24. [^ Barber, S.; Wang, Y.; Jafari, S.; Chokani, N.; Abhari, R. S. \(28 January 2011\). "The Impact of Ice Formation on Wind Turbine Performance and Aerodynamics". \*Journal of Solar Energy Engineering\*. \*\*133\*\* \(1\): 011007–011007–9. doi:10.1115/1.4003187. ISSN 0199-6231.](#)
25. [^ E. Hau., \*Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics\*. Springer. Germany. 2006](#)
26. [^ Han, Xingxing; Liu, Deyou; Xu, Chang; Shen, Wen Zhong \(2018\). "Atmospheric stability and topography effects on wind turbine performance and wake properties in complex terrain". \*Renewable Energy\*. Elsevier BV. \*\*126\*\*: 640–651. doi:10.1016/j.renene.2018.03.048. ISSN 0960-1481.](#)
27. [^ Ozdamar, G. \(2018\). "Numerical Comparison of the Effect of Blade Material on Wind Turbine Efficiency". \*Acta Physica Polonica A\*. \*\*134\*\*: 156–158. doi:10.12693/APhysPolA.134.156.](#)
28. [^ "Wind Energy Basics". American Wind Energy Association. Archived from \[the original\]\(#\) on 23 September 2010. Retrieved 24 September 2009.](#)
29. [^ Elizabeth Stinson \(15 May 2015\). "The Future of Wind Turbines? No Blades". \*Wired\*.](#)
30. [^ <sup>a</sup> <sup>b</sup> Jump up to: Paul Gipe \(7 May 2014\). "News & Articles on Household-Size \(Small\) Wind Turbines". \*Wind-works.org\*.](#)
31. [^ "Wind Turbine Components". Danish Wind Industry Association. 10 May 2003. Archived from \[the original\]\(#\) on 7 June 2008.](#)
32. [^ G. Bywaters; P. Mattila; D. Costin; J. Stowell; V. John; S. Hoskins; J. Lynch; T. Cole; A. Cate; C. Badger; B. Freeman \(October 2007\). "Northern Power NW 1500 Direct-Drive Generator" \(PDF\). National Renewable Energy Laboratory. p. iii.](#)
33. [^ "T 3.2 - Magnetic Pseudo direct drive generator -". \*innwind.eu\*.](#)
34. [^ "Innwind: Overview of the project and research" \(PDF\).](#)
35. [^ "MHI Vestas Launches World's First\\* 10 Megawatt Wind Turbine". 26 September 2018.](#)
36. [^ Michael Barnard \(7 April 2014\). "Vertical Axis Wind Turbines: Great In 1890, Also-rans In 2014". \*CleanTechnica\*.](#)

37. [^ Michael C Brower; Nicholas M Robinson; Erik Hale \(May 2010\). "Wind Flow Modeling Uncertainty" \(PDF\). AWS Truepower. Archived from the original on 2 May 2013.](#)
38. [^ Hugh Piggott \(6 January 2007\). "Windspeed in the city – reality versus the DTI database". Scoraigwind.com. Retrieved 6 November 2013.](#)
39. [^ "Urban Wind Turbines" \(PDF\).](#)
40. [^ "Vertical-Axis Wind Turbines". Symscape. 7 July 2008. Retrieved 6 November 2013.](#)
41. [^ Exploit Nature-Renewable Energy Technologies by Gurmit Singh, Aditya Books, pp 378](#)
42. [^ Eric Eggleston & AWEA Staff. "What Are Vertical-Axis Wind Turbines \(VAWTs\)?". American Wind Energy Association. Archived from \[the original\]\(#\) on 3 April 2005.](#)
43. [^ Marloff, R.H. \(January 1978\). "Stresses in turbine-blade tenons subjected to bending". \*Experimental Mechanics\*. \*\*18\*\* \(1\): 19–24. doi:10.1007/BF02326553. S2CID 135685029.](#)
44. [^ Rob Varnon \(2 December 2010\). "Derektor converting boat into hybrid passenger ferry". Connecticut Post. Retrieved 25 April 2012.](#)
45. [^ "Modular wind energy device – Brill, Bruce I". Freepatentsonline.com. 19 November 2002. Retrieved 6 November 2013.](#)
46. [^ Navid Goudarzi \(June 2013\). "A Review on the Development of the Wind Turbine Generators across the World". \*International Journal of Dynamics and Control\*. \*\*1\*\* \(2\): 192–202. doi:10.1007/s40435-013-0016-y.](#)
47. [^ Navid Goudarzi; Weidong Zhu \(November 2012\). "A Review of the Development of Wind Turbine Generators Across the World". ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. 4 – Paper No: IMECE2012-88615: 1257–1265.](#)
48. [^ "Hansen W4 series". Hansentransmissions.com. Archived from \[the original\]\(#\) on 15 March 2012. Retrieved 6 November 2013.](#)
49. [^ John Gardner; Nathaniel Haro & Todd Haynes \(October 2011\). "Active Drivetrain Control to Improve Energy Capture of Wind Turbines" \(PDF\). Boise State University. Retrieved 28 February 2012.](#)

50. <https://www.intechopen.com/books/advances-in-wind-power/wind-turbine-generator-technologies>
51. <http://web.mit.edu/windenergy/windweek/Presentations/Wind%20Energy%20101.pdf>
52. [^ ""Wind Turbine Design Cost and Scaling Model", Technical Report NREL/TP-500-40566, December, 2006, page 35, 36" \(PDF\). Retrieved 6 November 2013.](#)
53. [^ "Pomeroy Wind Farm" \(PDF\). Archived from \[the original\]\(#\)\(PDF\) on 15 July 2011.](#)
54. [^](#) Baqersad, Javad; Niezrecki, Christopher; Avitabile, Peter (2015). "Full-field dynamic strain prediction on a wind turbine using displacements of optical targets measured by stereophotogrammetry". *Mechanical Systems and Signal Processing*. 62–63: 284–295. [Bibcode:2015MSSP...62..284B](#). [doi:10.1016/j.ymssp.2015.03.021](#).
55. [^](#) Lundstrom, Troy; Baqersad, Javad; Niezrecki, Christopher; Avitabile, Peter (4 November 2012). "Using High-Speed Stereophotogrammetry Techniques to Extract Shape Information from Wind Turbine/Rotor Operating Data". In Allemang, R.; De Clerck, J.; Niezrecki, C.; Blough, J.R. (eds.). *Topics in Modal Analysis II, Volume 6. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*. Springer New York. pp. 269–275. [doi:10.1007/978-1-4614-2419-2\\_26](#). [ISBN 978-1-4614-2418-5](#).