

T.C.
BİLECİK ŐEHY EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**OPENFAST TABANLI SİMÜLASYONLARLA RÜZGAR TÜRBİNİ
KONFIGÜRASYONLARININ AERODİNAMİK VE YORULMA DAYINIMI
AÇISINDAN OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

OĞUZHAN CARUS

TEZ DANIŐMANI

DR. ÖĞR. ÜYESİ GÜLCAN ÖZEL EROL

İKİNCİ DANIŐMAN

DOÇ. DR. MUSA ÖZKAN

BİLECİK, 2025

10717127

T.C.
BİLECİK ŐEHY EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**OPENFAST TABANLI SİMÜLASYONLARLA RÜZGAR TÜRBİNİ
KONFIGÜRASYONLARININ AERODİNAMİK VE YORULMA DAYINIMI
AÇISINDAN OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

OĞUZHAN CARUS

TEZ DANIŐMANI

DR. ÖĞR. ÜYESİ GÜLCAN ÖZEL EROL

İKİNCİ DANIŐMAN

DOÇ. DR. MUSA ÖZKAN

BİLECİK, 2025

10717127

BEYAN

“OpenFAST Tabanlı Simülasyonlarla Rüzgar Türbini Konfigürasyonlarının Aerodinamik ve Yorulma Dayınımı Açısından Optimizasyonu” adlı yüksek lisans projesinin hazırlık ve yazım sırasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığımı, aksinin tespit edilebileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Bu çalışmanın, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda; projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte, ETİK KURUL onayı alınması durumunda ise ETİK KURUL tarih karar ve sayı bilgilerinin beyan edilmesi gerekmektedir.			
DESTEK ALINMIŞTIR		DESTEK ALINMAMIŞTIR	X
Destek alındı ise;			
Destekleyen kurum;			
Desteğin Türü		Proje Numarası	
1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)			
2- TÜBİTAK			
Diğer;.....			
ETİK KURUL onayı var ise;			
ETİK KURUL karar tarih/sayı:	/.....	

Oğuzhan CARUS

Tarih

İmza

ÖN SÖZ

Bu tez çalışmasında, kurgulanan bir rüzgar çiftliği için güç yoğunluğu optimizasyonu yapılmış ve optimizasyon sonucu türbülanslı art izi bölgelerinde kalan aşağı akış türbin kanatlarının yorulma analizleri gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın yürütülmesinde, bilimsel rehberliği ve yol göstericiliğiyle süreci sahiplenen değerli danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Gülcan ÖZEL EROL'a, yüksek lisans sürecim boyunca her zaman destek olan, bilgi ve tecrübesini esirgemeyen kıymetli hocam Sayın Doç. Dr. Musa ÖZKAN'a katkı ve emekleri için en içten teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Son olarak bu günlere ulaşmamdaki emekleri adına değerli aileme teşekkür ederim.

Oğuzhan CARUS

2025

ÖZET

OPENFAST TABANLI SİMÜLASYONLARLA RÜZGAR TÜRBİNİ KONFIGÜRASYONLARININ AERODİNAMİK VE YORULMA DAYINIMI AÇISINDAN OPTİMİZASYONU

Bu tez kapsamında, bir rüzgar çiftliği formasyonunda güç yoğunluğu ile türbin yerleşim konfigürasyonu ve sapma açısı arasındaki etkileşimi incelemek amacıyla Taguchi tabanlı bir optimizasyon modeli önerilmiştir. Rüzgar hızı, Türkiye'nin Bandırma bölgesinde 100 m yükseklikteki ortalama verilere dayanarak tek yönlü ve sabit kabul edilmiştir. Numerik analizlerde OpenFAST yazılımının rüzgar çiftliği modülü Fast.FARM kullanılarak tandem yerleşimli üç türbinden oluşan bir model oluşturulmuştur. Çalışmada, aşağı akış türbinleri arasındaki mesafe rotor çapı cinsinden 3D, 4D ve 5D olarak; her türbinin sapma açıları ise -20° ile 20° arasında 5° 'lik artışlarla tanımlanmıştır. Bu parametrelerin kombinasyonu ile 81 farklı senaryodan oluşan bir deney tasarımı (DOE) kurgulanmıştır. En küçük kareler yöntemiyle analiz sonuçlarına bir matematiksel model uyarlanmış ve en uygun dizilim için $57,30 \text{ W/m}^2$ güç yoğunluğu elde edilmiştir. Üçüncü türbinin sapma açısının etkisi düşük olduğundan 0° 'de sabitlenmesi önerilmiştir. Ayrıca, sapma açısının 10° 'lik artışlarla değerlendirildiği yeni senaryolar oluşturulmuştur. Mesafe faktörünün alt ve üst sınırlarını belirlemek amacıyla iki ek deney tasarımı yapılmıştır. Bu tasarımlarda türbinler arası mesafe sırasıyla 3D–8D ve 1D–5D arasında olacak şekilde kurgulanmış ve her biri 25 senaryodan oluşmuştur. En yüksek güç üretimi 8D mesafede, birinci türbinin 20° , ikinci türbinin 10° sapma açısında $8,454 \text{ MW}$ olarak elde edilmiştir. En yüksek güç yoğunluğu ise 1D mesafede, sapma açıları birinci ve ikinci türbin için sırasıyla 10° ve -20° iken $151,42 \text{ W/m}^2$ olarak hesaplanmıştır. Bu iki senaryo için türbin köklerinde oluşan yükler MLife yazılımı ile değerlendirilmiş, yorulma analizleri yapılmıştır. En kritik yorulma ömrü, birinci türbinde dönme düzlemine paralel yönde olup maksimum güç yoğunluğu senaryosu için 33,9 yıl, maksimum güç senaryosu için ise 38,4 yıl olarak hesaplanmıştır. Her iki durumda da 20 yıllık ömrü karşıladığı görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: OpenFAST, Rüzgar Çiftliği, Taguchi Metodu, Yerleşim Optimizasyonu, Yorulma Analizi

ABSTRACT

OPENFAST-BASED OPTIMIZATION OF WIND TURBINE CONFIGURATIONS CONSIDERING AERODYNAMIC PERFORMANCE AND FATIGUE LIFE

In this thesis, a Taguchi-based optimization model was proposed to investigate the interaction of power density with turbine layout configurations and yaw angles in a wind farm setup. The wind speed was assumed to be unidirectional and constant, based on the average wind data at 100 meters height in the Bandırma region of Turkey. For numerical analyses, a three-turbine tandem layout was modeled using the wind farm module Fast.FARM of the open-source aero-servo-elastic solver OpenFAST. In the study, the spacing between downstream turbines was defined as 3D, 4D, and 5D in terms of rotor diameter, while yaw angles for each turbine ranged from -20° to 20° in 5° increments. A design of experiment (DOE) consisting of 81 different scenarios was generated based on these parameters. A mathematical model was fitted to the analysis results using the least squares method, and the optimal configuration yielded a power density of 57.30 W/m^2 . Since the yaw angle of the third turbine had minimal influence on the output, it was recommended to fix it at 0° . Additionally, new scenarios were created by evaluating yaw angles with 10° increments. To define the limits of the spacing factor, two additional experimental designs were developed. For the new designs, the inter-turbine spacing was defined within the ranges of 3D–8D and 1D–5D, each consisting of 25 scenarios. The highest power output, 8.454 MW, was achieved at an 8D spacing, with yaw angles of 20° for the first turbine and 10° for the second. The highest power density, 151.42 W/m^2 , was obtained at a 1D spacing, with yaw angles of 10° and -20° for the first and second turbines, respectively. For both scenarios, fatigue analyses were conducted based on root loads obtained from FAST simulations and evaluated using MLife. The most critical fatigue life was observed in the first turbine in the edgewise direction, with estimated lifespans of 33,9 years for the maximum power density scenario and 38,4 years for the maximum power scenario. In both cases, the intended operational lifespan of 20 years is not exceeded.

Keywords: OpenFAST, Wind Farm, Taguchi Method, Layout Optimization, Fatigue Analysis

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖN SÖZ.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Motivasyon.....	5
1.2. Amaç.....	5
1.3. Kapsam.....	6
2. RÜZGAR.....	8
2.1. Rüzgar Enerjisi.....	8
2.2. Rüzgar Terminolojisi.....	14
2.2.1. Rüzgar Dağılımı.....	17
3. YATAY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİNİ.....	19
3.1. Yatay Eksenli Türbinin Yapısı - Temel Unsurları ve Alt Unsurları.....	19
3.2. Yatay Eksenli Türbinde Serbestlik Dereceleri.....	20
3.3. Yatay Eksenli Türbinde Güç Düzenleme Sistemleri.....	22
3.3.1. Kontrol Stratejileri.....	22
3.3.2. Kontrol Sistemleri.....	23
3.4. Tasarım Yük Durumu (Design Load Case – DLC).....	24
3.5. Yatay Eksenli Rüzgar Türbini Aerodinamiği.....	26
3.5.1. Aktüator Disk ve Betz Limiti.....	27

3.5.2.	Art İzi Dönmesinin Betz Limitine Etkisi.....	32
3.5.3.	Kanat Elemanı / Momentum Teorisi.....	36
3.5.4.	Kanat Elemanı / Momentum Teorisi Düzeltme Metotları.....	44
3.6.	Yatay Eksenli Rüzgar Türbinlerinde Art İzi Oluşumunun İncelenmesi	47
3.6.1.	Akış Ayrılması	49
3.6.2.	Salınımlı Akış.....	51
4.	NUMERİK ANALİZ	53
4.1.	NREL 5 MW Referans Türbini.....	53
4.1.1.	Rijit Tekil Türbin Analizi ve Sonuçların Doğrulanması	56
4.2.	Aeroelastik Tekil Türbin Analizi	59
4.3.	Rüzgar Çiftliği Analizi	71
5.	TANDEM YERLEŞTİRİLMİŞ RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE GÜÇ YOĞUNLUĞU OPTİMİZASYONU	76
5.1.	Bandırma Bölgesi Rüzgar Özellikleri.....	76
5.2.	Taguchi Metodu.....	76
5.3.	Deney Tasarımı.....	78
5.4.	Bulgular ve Tartışma	79
6.	TÜRBİN KANATLARINDA YORULMA.....	89
6.1.	Mlife	94
6.2.	Yorulma Yüklerinin Değerlendirilmesi.....	97
6.2.1.	Yorulma Analizi: Maksimum Güç Yoğunluğu	100
6.2.2.	Yorulma Analizi: Maksimum Güç Üretimi	103
7.	SONUÇLAR VE YORUMLAR.....	108

TABLULAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Farklı arazi tipleri için pürüzlülük yüksekliği ve güç katsayısı değerleri	16
Tablo 3.1. Rüzgar türbini alt sistem ve bileşenleri	20
Tablo 3.2. Yatay eksenli bir türbin serbestlik derecesi.....	21
Tablo 3.3. Kontrol Stratejisi	24
Tablo 3.4. IEC 61400 Güç üretimi için nihai ve yorulma koşulları	26
Tablo 4.1. NREL 5MW türbinine ait temel özellikler.....	54
Tablo 4.2. NREL 5MW kanat profilleri ve kesit bilgileri	56
Tablo 5.1. A grubu deney tasarımına ait faktör ve seviyeleri.....	78
Tablo 5.2. A grubu deney tasarımında yer alan ve güç yoğunluk değerinin en yüksek olduğu üç senaryo.....	81
Tablo 5.3. B grubu deney tasarımına ait faktör ve seviyeleri.....	83
Tablo 5.4. B gurubu deney tasarımında yer alan ve güç yoğunluk değerinin en yüksek olduğu üç senaryo.....	84
Tablo 5.5. B grubu deney tasarımında yer alan en yüksek güç üretiminin gerçekleştiği üç senaryo	85
Tablo 5.6. C grubu deney tasarımına ait faktör ve seviyeleri.....	86
Tablo 5.7. C grubu deney tasarımında güç yoğunluk değerinin en yüksek olduğu üç sonuç .	87
Tablo 6.1. Türbin kanat kesiti kabuğunda meydana gelen hasar tipleri	90
Tablo 6.2. Kısmi kesitteki veter uzunluğu ve katman kalınlığına karşılık gelen nihai moment değerleri (kN-m).....	99
Tablo 6.3. Kanat kökü için belirlenen nihai tasarım yükü değerleri	99
Tablo 6.4. NREL 5MW tekil türbini için yorulmaya kadar geçen süre (s)	100
Tablo 6.5. Maksimum güç yoğunluğu; kökte meydana gelen mutlak maksimum değerler..	103
Tablo 6.6. Maksimum güç yoğunluğu; türbinlerde yorulmaya kadar geçen süre (s)	103
Tablo 6.7. Maksimum güç yoğunluğu; türbinlerdeki DEL tahmin değerleri	103
Tablo 6.8. Maksimum güç senaryosu; kökte meydana gelen mutlak maksimum kuvvet-moment değerleri.....	106
Tablo 6.9. Maksimum güç senaryosu için türbinlerde yorulmaya kadar geçen süre (s)	106
Tablo 6.10. Maksimum güç senaryosu için türbinlerdeki DEL tahmin değerleri	107

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1. Yukarı akış türbininden oluşan art izinin aşağı akış türbinine ulaşması.....	1
Şekil 2.1. a) 1985-2023 Türkiye enerjisi üretim kaynaklarının değişimi b) 1985-2023 Dünya genelinde enerji üretim kaynaklarının değişimi	9
Şekil 2.2. 1978-2023 Tarihleri arasında kara ve deniz üstü temelli rüzgar enerjisi üretimindeki gelişim	10
Şekil 2.3. 2023 yılı itibari ile dünya genelinde rüzgar enerjisi üretimi (TWh bazında)	10
Şekil 2.4. Türkiye’de illere göre kurulu RES gücü (MWm).....	11
Şekil 2.5. Türkiye de RES kurulumu en çok olan 3 ile ait rüzgar hızları a) Çanakkale b) Balıkesir c) İzmir	12
Şekil 2.6. Çanakkale, Balıkesir ve İzmir illerine ait Weibull dağılımı	13
Şekil 2.7. Kurulabilecek rüzgar enerji santrallerine ait güç kapasitesi a) Balıkesir b) Çanakkale c) İzmir	13
Şekil 2.8. Doğal rüzgar karakteristiği	15
Şekil 3.1. Aeroelastite dâhil edilmiş yatay eksenli 3 kanatlı bir rüzgar türbininin 10 serbestlik derecesi.....	21
Şekil 3.2. Rüzgar türbini güç-rüzgar hızı eğrisi	23
Şekil 3.3. Akım tüpü modeli	27
Şekil 3.4. Akım tüpü modeli, hız ve basınç dağılımı.....	29
Şekil 3.5. C_p ve CT aksenal indüksiyon faktörü olan a ile değişimi	32
Şekil 3.6. Art izi dönmesi (Lysen, 1982)	33
Şekil 3.7. Kanat profili kesitinde oluşan teğetsel kuvvet.....	35
Şekil 3.8. Teorik maksimum güç katsayısı	37
Şekil 3.9. Kanat profili üzerindeki basınç dağılımı	37
Şekil 3.10. Kanat üzerinde r uzaklığında alınan dairesel kontrol hacmi.....	38
Şekil 3.11. Genel bir kanat profili üzerindeki geometrik ve aerodinamik parametreler.....	40
Şekil 3.12. Prandtl’in uç kaybı için art izi-disk modeli	45
Şekil 3.13. Glauert ampirik düzeltme	47
Şekil 3.14. Art izi bölgeleri.....	48
Şekil 3.15. Art izi oluşumu	49
Şekil 3.16. Kanat profili üzerinde oluşan akış bölgeleri	50
Şekil 3.17. Akış ayrılması.....	51

Şekil 3.18. Bir kanat profili yüzeyi üzerinde değişen hücum açılarında statik ve dinamik durma (stall) olayının gösterimi	52
Şekil 4.1. NREL 5MW türbine ait özellikler a) göbek yüksekliği ve kanat uzunluğu b) koniklik açısı c) şaft eğim açısı	55
Şekil 4.2. FAST sonuçlarının karşılaştırılması a) C_p değeri için BEM ve CFD sonuçlarının karşılaştırması b) C_p değeri farklı BEM çözücü sonuçları c) güç çıktıları d) tork çıktıları.....	58
Şekil 4.3. Farklı başlangıç pitch açısı değerlerinde rijit türbin analiz sonuçları.....	59
Şekil 4.4. C_p yüzey grafiği: TSR ve Pitch açısının etkisi	60
Şekil 4.5. Kara temelli bir rüzgar türbini için OpenFAST modüllerinin birbiri arasındaki dinamik etkileşimi	61
Şekil 4.6. OpenFAST içerisinde modellenen bir türbin için serbestlik dereceleri.....	67
Şekil 4.7. AeroDyn çıktıları	68
Şekil 4.8. Kanat kökünde oluşan kuvvetler a) moment b) kuvvet	68
Şekil 4.9. Kanat 1'e ait düzlem dışı (OoPDefl) ve düzlem içi (IPDefl) uç sapması a) rotorun ilk hareketi sonucu oluşan çevrim b) ilk hareket sonrası çevrimler	69
Şekil 4.10. Tipik yatay eksenli rüzgar türbini için yük şeması	70
Şekil 4.11. Kanat uzunluğu boyunca oluşan kuvvetler ve momentler a) kuvvetler b) momentler	71
Şekil 4.12. FAST.Farm akış diyagramı.....	72
Şekil 4.13. FAST.Farm art izi etkileşimi	73
Şekil 4.14. Art izi düzlemleri ve düzlem üzerinde oluşturulan radyal sonlu elemanlar	74
Şekil 5.1. Bandırma bölgesinde seçilen konuma ait 100m'deki ortalama rüzgar değeri.....	77
Şekil 5.2. Deney tasarımında tanımlanan mesafe ve sapma açısı faktörleri.....	79
Şekil 5.3. A grubu deney tasarım modeline ait tahmin performansı	80
Şekil 5.4. A grubu deney tasarımındaki faktörlerin güç yoğunluğu üzerindeki yüzdelerdeki etkileri	82
Şekil 5.5. A grubu deney tasarımı için tahmin profili, maksimize edilmiş tahmin değeri ve istenirlik fonksiyonu.....	82
Şekil 5.6. B grubu deney tasarımının modeline ait tahmin performansı.....	83
Şekil 5.7. B grubu deney tasarımındaki faktörlerin güç yoğunluğu üzerindeki yüzdelerdeki etkileri	85
Şekil 5.8. B grubu deney tasarımı için tahmin profili, maksimize edilmiş tahmin değeri ve istenirlik fonksiyonu.....	85
Şekil 5.9. C grubu deney tasarım modeline ait tahmin performansı	86

Şekil 5.10. C grubu deney tasarımındaki faktörlerin güç yoğunluğu üzerindeki yüzdellik etkileri	87
Şekil 5.11. C grubu deney tasarımı için tahmin profili, maksimize edilmiş tahmin değeri ve istenirlik fonksiyonu.....	88
Şekil 6.1. Kanat kesiti kabuğunda meydana gelen hasar tiplerinin bulunduğu bölgelerin görselleştirilmesi; yapışkan tabakalardaki hasarlar	91
Şekil 6.2. Gerinme-ömür grafiği	92
Şekil 6.3. Gerinim genliği ve hataya kadar geçen süredeki dönüş sayısı.	93
Şekil 6.4. Gerilim döngülerinin yağmur akış ile modellenerek gerilim-gerinim eğrisindeki çevrimleri	94
Şekil 6.5. Maksimum güç yoğunluğu; rüzgar türbinleri kanat köklerindeki rüzgar hızları...	101
Şekil 6.6. Maksimum güç yoğunluğu; türbin kanat köklerindeki kuvvet ve momentler.....	102
Şekil 6.7. Maksimum güç senaryosu; rüzgar türbinleri kanat köklerindeki rüzgar hızları	104
Şekil 6.8. Maksimum güç senaryosu; türbin kanat köklerindeki kuvvet ve momentler.....	105
Şekil 7.1. Normalize edilmiş türbin güç değerlerinin dağılımı.....	110
Şekil 7.2. Türbin bileşenleri için yoruma süresi karşılaştırması	112

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

- A_{∞} : Akım tüpü yukarı akış kesit alanı (m^2)
- A_{ad} : Akım tüpü aktüatör disk alanı (m^2)
- A_{art} : Akım tüpü art izindeki kesit alanı (m^2)
- a : Akış indüksiyon faktörü
- a' : Açısal indüksiyon faktörü
- c : Veter uzunluğu (m)
- C_d : Sürüklenme katsayısı
- C_l : Kaldırma katsayısı
- C_p : Güç katsayısı
- C_T : İtme katsayısı
- D_{Life} : Birikimli ömür boyu hasar faktörü
- f : Rüzgar frekansı (Hz)
- F_r : Kane denklemi genelleştirilmiş aktif kuvvetler (N)
- F_r^* : r numaralı serbestlik derecesinde atalet kuvvetleri (N)
- F_{UK} : Prandtl uç ve kök doğrulama faktörü
- I_t : Türbülans yoğunluğu (%)
- k : Weibull Şekil parametresi
- L : İntegral uzunluk skalası
- L_i^{RF} : Zaman serisi için yük aralığı
- L_{MF} : Sabit yük ortalaması
- L_{ult} : Nihai yük değeri
- m : Wöhler üssü
- \dot{m} : Kütle akış hızı (kg/s)
- N : S/N eğrisi için çalışma ömrü
- N_0 : Referans döngü sayısı

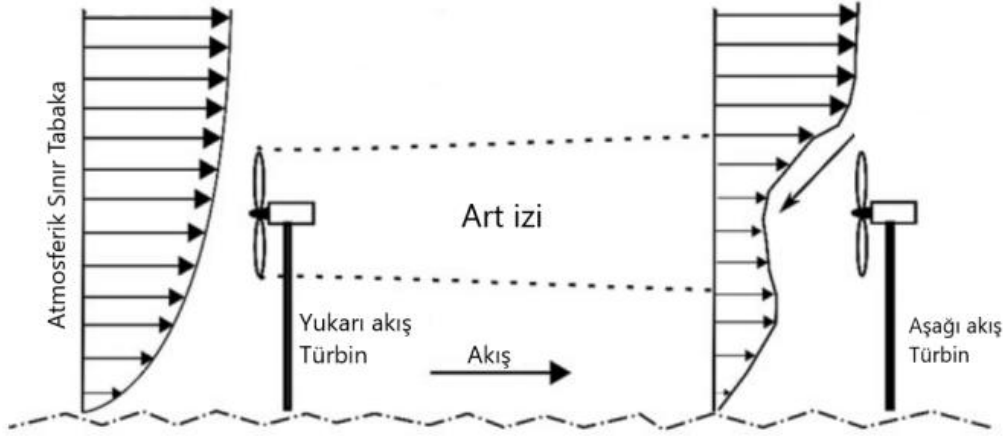
- P** : Basınç (N/m^2)
- P_{ad}^+** : Akım tüpü aktüatör disk ön basıncı (N/m^2)
- P_{ad}^-** : Akım tüpü aktüatör disk arka basıncı (N/m^2)
- P_G** : Güç (Watt)
- Q** : Rotor torku ($N \cdot m$)
- R** : Rotor yarıçapı (m)
- Re** : Reynold sayısı
- R_H** : Göbek yarıçapı (m)
- R_i** : i rijit gövdedeki dış kuvvet vektörü
- S** : Rotordaki kanat sayısı
- Sc** : Schmidt sayısı
- T** : İtke kuvveti (N)
- T_{Fail}** : Tasarım ömrü (s)
- T_j** : j rijit gövdedeki moment vektörü
- u** : x yönündeki hız bileşeni (m/s)
- $u(z)$** : z yüksekliğindeki rüzgar hızı (m/s)
- u_*** : z yüksekliğindeki rüzgarın sürtünme hızı (m/s)
- U_{ad}** : Akım tüpü aktüatör disk rüzgar hızı (m/s)
- U_{art}** : Akım tüpü art izindeki rüzgar hızı (m/s)
- U_{rel}** : Göreceli rüzgar hızı (m/s)
- U_∞** : Akım tüpü yukarı akış rüzgar hızı (m/s)
- v** : y yönündeki hız bileşeni (m/s)
- V_ζ** : Türbin devreden çıkış rüzgar hızı (m/s)
- V_g** : Türbin devreye giriş rüzgar hızı (m/s)
- V_h** : Rotor göbeğindeki rüzgar hızı (m/s)
- V_{ref}** : Referans konumdaki rüzgar hızı (m/s)

- z_0 : yüzey pürüzlülük uzunluğu (m)
- α : Kanat profili hücum açısı ($^\circ$)
- ε_e : Elastik gerinim
- ε_f' : Yorulma sünekliği katsayısı
- ε_t : Toplam gerinim
- ε_p : Plastik gerinim
- φ : Göreceli rüzgar açısı ($^\circ$)
- κ : von Kármán sabiti
- λ : Uç hızı oranı
- λ_r : Yerel hız oranı
- μ : Dinamik viskozite ($Pa \cdot s$)
- ω : Açısal hız (rad/s)
- Ω : Rotor açısal hızı (rad/s)
- σ : Standart Sapma
- σ' : Bölgesel doluluk oranı
- σ_f' : Yorulma dayanım katsayısı
- σ_r : S/N eğrisi için gerinme aralığı
- ρ : Hava yoğunluğu (kg/m^3)
- θ_p : Kanat profili kesit pitch açısı ($^\circ$)
- $\theta_{p,0}$: Kanat pitch açısı ($^\circ$)
- θ_t : Kanat profili kesit burulma açısı ($^\circ$)
- ABL** : Atmospheric Boundary Layer
- BEM** : Blade Element Momentum
- BEMT**: Blade Element Momentum Theory
- DLC** : Design Load Case
- DOF** : Degree of Freedom

DWM : Dynamic Wake Meandering
IEA : International Energy Agency
IRENA: International Renewable Energy Agency
MFoR : Moving Frame of Reference
MPP : Maximum Power Point
MRF : Multiple Reference Frame
NREL : National Renewable Energy Laboratory
PDF : Probability Density Function
RANS : Reynold Average Navier-Stokes
REPA : Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası
RES : Rüzgar Enerji Santrali
TSR : Tip Speed Ratio
TUREB : Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği
2B : 2 Boyutlu
3B : 3 Boyutlu

1. GİRİŞ

Rüzgar enerjisi sektörü, enerji üretimindeki emisyonların azaltımına katkı sağlaması, iklim değişikliğiyle mücadeleyi desteklenmesi ve yenilenebilir kaynak olması nedeniyle küresel ölçekte önemli bir rol oynamaktadır (Tsetkova ve Ouarda, 2021). Bu doğrultuda rüzgar enerjisi yatırımları artarken, enerji üretiminin sağlandığı rüzgar türbini çiftliklerinde enerji üretim optimizasyonu kaçınılmaz bir ihtiyaç haline gelmiştir. Rüzgar türbini çiftlikleri, belirli bir alan içerisinde birden fazla türbinin konumlandırıldığı formasyonu temsil etmektedir. Ancak türbinlerin çalışması sırasında oluşan iz etkisi (wake effect), özellikle aşağı akışta düşük rüzgar hızı ve yüksek türbülansla karakterize edilen olumsuz akış koşullarına neden olmaktadır (Bknz Şekil 1.1). İz etkilerinin oluşmasında, çiftlik düzeninde önde yer alan yukarı akış (upstream) türbinlerinin etkisi büyüktür ve iz bölgesinde yer alan aşağı akış türbinlerinde (downstream) hem güç üretiminde azalma hem de izin sahip olduğu türbülanslı yapı sebebiyle yapısal bileşenlerde dinamik yük artışıyla sonuçlanan yorulma etkilerine yol açmaktadır (Bader vd., 2018; Barthelmie vd., 2009).



Şekil 1.1. Yukarı akış türbininden oluşan art izinin aşağı akış türbinine ulaşması

Kaynak: (Bader vd., 2018)

Rüzgar türbini izi, bir rüzgar türbini ardında rüzgarın hızının düştüğü ve türbülansın arttığı bölge olarak nitelendirilir. Doğrusal olarak iz bölgesindeki hava akışı daha az enerjiye sahiptir (Archer vd., 2018). Büyük ölçekli rüzgar çiftliklerinde, türbinlerin oluşturduğu art iz etkileri, aşağı akıştaki türbinlere gelen rüzgar hızını ve bu türbinlerin çalışma verimliliğini azaltabilir. Archer vd., (2018) Danimarka'daki Nørrekær kara rüzgar çiftliğinde yaptıkları saha ölçümleri sonucunda arka arkaya hizalanmış türbinlerde art izi etkisi nedeniyle %40'tan fazla güç kaybı gözlemlediklerini belirtmiştir.

Rüzgardaki mevcut güç, rüzgar hızının küpü ile orantılıdır. Rüzgar hızındaki küçük bir artış/azalış, buna bağlı türbinde üretilecek gücü büyük ölçüde artırabilir/azaltabilir. Bu nedenle art izinin konumu ve rüzgar hızındaki küçük iyileştirmeler, aşağı akışta yer alan türbinler için güç üretimi üzerinde büyük bir etki yaratabilir. Aşağı akış türbinlerinde güç üretimini iyileştirmek adına yapılan çalışmalarda sapma açısı (yaw) kontrolü ve mesafe faktörüyle yapılan yerleşim optimizasyonu popüler konulardır.

Rüzgar çiftliklerinde türbinler arası mesafenin kısaltılması aşağı akış türbinleri için üretimsel kayıplara yol açarken mesafelerin arttırılması geniş yerleşim alanı ihtiyacına ve rüzgar kaynağının potansiyel olarak yetersiz kullanımına yol açmaktadır. Ayrıca art izi etkisinde kalan türbinlerde, türbülans kaynaklı mekanik stresler oluşurken mesafenin artması ile yüksek alt yapı maliyetleri oluşmaktadır. Yakınlık ve uzaklık arasında giden bu döngüde, türbin yerleşimlerinde optimizasyon çalışması yapılması gerekmektedir. Çiftliğin belli bir alana kurulması gerekliliği, hakim rüzgar yönüne dik olacak şekilde türbin yerleşimi, çiftliğin toplam enerji çıktısı ve türbin sayısı gibi etmenler türbinler arasındaki mesafenin belirlenmesini etkileyen unsurlardır. Literatürde, türbinler arası optimum mesafe tayini için birçok çalışma bulunmaktadır. Belirli rüzgar yönlerinde türbinlerin aşağı akış türbin mesafesi rotor çapı cinsinden 5D olarak çoğunlukla ele alınırken, yan rüzgar (crosswind) mesafesi daha kısa (örneğin 3D) tutulabilmektedir (Sun vd., 2019).

Hoxha vd. (2022) yerleşim optimizasyonu için Priştine yakınlarında dağlık bir alan olan Koznica'da 3,4 MW güce sahip türbinler için 2D-3D-5D mesafelerini baz alarak yerleşim optimizasyonu için çalışmalar gerçekleştirmiş, bu bağlamda istikrarlı bir çalışmayı sağlamak için en az üç çap (3D) mesafe gerekli olduğu sonucunu vurgulamıştır. Choi vd. (2013) tarafından yapılan çalışmada, 2 MW'lık türbinleri içeren rüzgar çiftliğinde, türbinler arası mesafenin 3D olduğu durumda aşağı akış türbininde güç çıkışı yukarı akış türbininin %35'i olduğu, mesafenin 5D ye çıkarılmasıyla güç çıkışının %60 oranına ulaşarak önemli ölçüde iyileştiğini ve art izi etkilerinde azalma gözlemlendiği sonucuna ulaşmıştır. Bartl vd. (2012) 3D ve 5D'lik iki mesafelerde performans değerlendirmesi yaparak, 5D mesafesinde güç çıkışında iyileşme olduğunu ve türbülans yoğunluğunun azaldığını belirtmiştir. Ye vd. (2024), 3x5 konfigürasyonunda NREL 5MW türbinlerden oluşan bir çiftlik modelinde, art izi etkisinin güç üretimi ve yorulma üzerindeki etkilerini incelemiştir. FLORIS ile belirlenen optimal sapma açıları ve yanal mesafe 3D değerinde sabit tutularak, türbinler arası eksenel mesafe 4D'den 12D'ye kadar 2D'lik adımlarla değiştirilmiştir. Eksenel mesafe arttıkça, toplam güç üretiminin %56,6 oranında arttığı görülmüş; bu artış, art izinin zayıflaması ve aşağı akış türbinlerinin daha

yüksek rüzgar hızlarına maruz kalmasıyla açıklanmıştır. Özellikle 8D ve sonrası mesafelerde art izinin neredeyse tamamen kaybolduğu ve türbülansın azaldığı rapor edilmiştir.

Sapma açısı kontrolünde ise art izi yukarı akış türbini tarafından manipüle edilerek yanal olarak yönlendirildiğinden aşağı akış türbinlerinde oluşacak art izi etkinliği azalır. Ayrıca sapma açısı verilmeden önce yukarı akış türbini için serbest akışın rotor eksenine dik olduğu varsayımıyla sapma açısından sonraki durum değerlendirildiğinde, artık sapma açısına sahip olan yukarı akış türbininde de serbest akışın kuvvet bileşeni oluşacağından efektif rüzgar hızındaki düşüş nedeniyle güç üretiminde de düşüş yaşanır. Bu kaybın aşağı akış türbinlerde sağlanan güç artışıyla dengelenmesi hedeflenir. Bu nedenle sapma açısı kontrol stratejileri geliştirilirken yukarı akış türbinindeki güç kaybı ile aşağı akış türbininde yaşanacak güç kazancı arasındaki denge analiz edilmeli ve uygun sapma açısı optimize edilmelidir.

Bastankhah ve Agel (2019) tarafından üç kanatlı küçük ölçekli türbinlerin kullanımıyla yapılan deneysel çalışmada rüzgar tüneline tandem sıralanmış 5 farklı türbin için sapma açılarının 0°'den 35°'ye kadar 210 farklı senaryo test edilmiştir. Yukarı akış türbinine büyük bir sapma açısı verilerek aşağı akış türbinlerinde kademeli olarak bu sapma açısının azaltılmasıyla yapılan senaryolarda %0,5 ila %17 arasında güç artışı sağlandığı olgusuna saptanmıştır. Sapma açısının güç üzerindeki etkisinin 5'inci türbin sonrasında arttığını belirtmiştir. Ayrıca büyük ölçekli çiftliklerde yanal saptanmış art izlerinin etkileşiminin kazançları sınırlayabileceği belirtilmiştir. Lei vd. (2020) yaptığı çalışmada sapma açısının optimizasyonunun etkinliği, türbinler arasındaki mesafeye bağlı olduğunu, türbinler arasındaki eksenel mesafenin daha küçük olması durumunda sapma açısı ayarlamalarından daha fazla güç kazancı elde edilebileceği saptamıştır. Buna karşılık daha büyük türbin aralıkları, art izlerin yanal etkileşimlerini artırarak sapma açısı kontrolünün etkinliğini sınırlayabileceğini belirtmektedir. Ma vd. (2023) hizalı 5 türbini içeren bir çiftlik formasyonunda sapma kontrolünün güç üretimi üzerindeki etkisini incelemiş ve son türbin sabit olmakla birlikte diğer türbinler için aynı yönlü optimum sapma açısı tanımlandığında (20,32°, 31,55°, 31,55°, 31,55°, 0°) toplam güç üretiminin %17,5 oranında arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, hizalanmış yerleşimlerde ilk türbinin sahip olduğu sapma açısının oluşturduğu art izinin tüm diğer türbinleri etkilemesi, bu türbinin çalışma koşullarının rüzgar çiftliği performansı açısından kritik bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Zong ve Agel (2021) yaptığı çalışmada sapma açısının güç üretimi üzerindeki etkilerini, 5D mesafeli sabit sıra aralığında sıralanmış üç küçük ölçekli türbin için deneyler gerçekleştirmiştir. Deneysel bulgular, yukarı akıştaki sapma açısının art izi yönlendirme etkisini doğrudan belirlediğini ve aşağı akış türbinlerinin daha

düşük sapma açılarıyla benzer art izi sapması elde edebildiğini göstermiştir. Tam art izi koşullarında yapılan ölçümler, sapma açısının güç üretimi üzerindeki etkisinin simetrik olduğunu, pozitif ve negatif sapma açılarının art izi yönlendirme açısından benzer etkinlikte olduğunu ortaya koymuştur. Parametrik analizler, türbülans şiddeti ve türbinler arası aksel mesafenin, art izi etkileşimlerinin gücünü değiştirerek aktif sapma kontrolünün etkinliğini doğrudan etkilediğini göstermiştir. Ayrıca Horns Rev rüzgar çiftliği için ölçeklendirilerek yapılan simülasyonlar, belirli türbülans ve rüzgar hızlarında aktif sapma kontrolünün güç artışını %15,7'ye kadar çıkarabileceğini ve yıllık enerji üretiminde %1,8'lik bir iyileşme sağlayabileceğini ortaya koymuştur.

Türbülansın neden olduğu dinamik yüklemeler ve türbine sapma açısının verilmesinin yapısal yükler üzerinde olumsuz etkileri vardır. Sapma açısı bu sebeple genellikle $\pm 30^\circ$ aralığında sınırlandırılır (Meng vd., 2020). Dijk vd. (2017) yaptıkları çalışmada, sapma açısının güç çıktısı üzerindeki olumlu etkilerine odaklanırken sapma açısının kısmi art izi örtüşmesi kaynaklı oluşacak yorulma yüklerinin de dikkate alınması gerektiğini ve optimizasyonun bu doğrultuda yapılması gerektiğini bildirmektedir. Türbin kanatlarının, artan doğal frekanslarıyla birlikte, rüzgarın neden olduğu yük çevrimlerinin sayısındaki artışa bağlı olarak (rüzgar hızıyla doğru orantılı) yorulmayı arttırmaktadır. Ayrıca aerodinamik yükler nedeniyle kanadın tamamı boyunca oluşan kuvvet dağılımları, köke doğru artan moment değeri sonucunda kökte yorulmanın en fazla meydana gelmesine neden olmaktadır (Liao vd., 2022).

Lin ve Agel (2023), 3 türbinli bir dizilimde (her biri 7D mesafeyle yerleştirilmiş NREL 5MW türbinleri) aktif sapma kontrolünün güç üretimi ve kanat yorulma davranışına etkisini incelemiştir. İlk iki türbin sapma kontrolüne tabi tutulurken, son türbin sabit bırakılmıştır. Simülasyonlar sonucunda, tam art-iz etkisinin bulunduğu durumda (sapma açıları 0 ve rüzgar yönüne dik yerleşim) pozitif sapma açıları (saat yönü tersi) ile uygulanan lokal güç-optimal stratejinin, negatif açılı stratejiye göre biraz daha düşük güç üretimi sağlasa da, daha az flapwise (kanat düzlemine dik) yorulma yüküne ve biraz daha fazla edgewise (kanat düzleminde) yorulmaya yol açtığı tespit edilmiştir. Pozitif sapma, özellikle yukarı akış türbininde flapwise yorulmayı azaltırken, aşağı akış türbininde de bu etkinin hissedildiği görülmüştür. Buna karşın, negatif sapmalı türbinlerin oluşturduğu art-iz yapısı, aşağı akış türbinlerinde daha yüksek flapwise yorulma yüklerine neden olmuştur. Tao vd. (2023), yukarı akış türbinine uygulanan sapma açısı sonrasında oluşan art izinin türbülans seviyesi ve yönelme bozukluklarında meydana gelen artışın, aşağı akıştaki türbinlerde yük çevrimlerinin sıklığını artırarak yorulma hasarını belirgin şekilde yükselttiğini ortaya koymaktadır.

1.1. Motivasyon

Rüzgar enerjisi üzerine gerçekleşen teknolojik gelişmelerin türbin verimliliği esasında geliştiği söylenebilir. Tekil bir türbin için düşünecek olursak, türbin verimliliğini etkileyen en büyük olgu tasarım olarak karşımıza çıkarken rüzgar çiftliği verimi bütünüyle değerlendirildiğinde türbin tasarım faktörünün yanı sıra rüzgar çiftliğindeki yerleşimde ön plana çıkmaktadır.

Hakim rüzgar yönüne dik kurulum, türbinler için genel olarak ideal durumu tanımlarken bu durum aşağı akış türbinlerince farklılaşmaktadır. Yukarı akış türbinin daimi akışta aerodinamik şekli itibariyle oluşturduğu iz bölgesi aşağı akış türbinlerince istenmeyen durumu tanımlar. Aşağı akış türbinin art izi bölgesinde çalışması o türbin için güç kaybı ve türbülans kaynaklı ek yüklemelerine maruz kalmasıyla sonuçlanır. Atmosferik sınır tabakadaki rüzgar doğası gereği türbülanslı olsa da art izinin sahip olduğu ek türbülans, yukarı akış türbinlerine kıyasla aşağı akış türbin yapısında fazladan dinamik yüklemelere ve sonucunda yorulma yüklerinin oluşmasına neden olur. Bu sebeple çiftlik verimi ve türbin dinamiği düşünüldüğünde art izi etkinliğinin azaltılmasına ihtiyaç duyulur. Türbin kanatlarının aktif pitch açısı kontrolü, akış yönünde veya yanlamasına dizilim mesafe farklılıkları ve sapma açısı kontrolü gibi birçok faktör karşımıza çıkar. Türbin arkasında oluşan art izi türbin mekaniği ile saptırılabilir veya yönlendirilebilir. Bu faktörler birlikte ele alındığında, optimum tasarımı belirlemek için bir optimizasyon problemine temel oluşturur.

Belirlenen optimum tasarım doğrultusunda, çiftlik formasyonunda yer alan her bir türbin için, öngörülen çalışma ömrü süresince maruz kalacağı yorulma yükleri tanımlanması gereklidir. Özellikle aşağı akış türbinlerinde iz bölgesine bağlı olarak ortaya çıkan düzensiz akış koşulları, kanat ve kule gibi yapısal bileşenlerde zamanla yorulma kaynaklı hasar birikimine yol açar. Bu nedenle, türbinin dinamik davranışını temsil eden aeroelastik etkileşimlerin dikkate alınması gerekir. Aeroelastik çözümler sayesinde, aerodinamik kuvvetlerin yapısal deformasyonlar üzerindeki etkileri ile bu deformasyonların yeniden akış alanını nasıl değiştirdiği arasındaki çift yönlü etkileşim detaylı biçimde modellenilebilir.

1.2. Amaç

Bu tez, rüzgar türbini çiftlik yerleşimlerinin güç yoğunluğu üzerindeki etkilerini incelemekte ve aşağı akışta, art izi koşulları altında çalışan türbinlerde meydana gelen yorulma yüklerinin tahminine yönelik sayısal bir yaklaşım sunmaktadır. Çalışmanın temel amacı, yukarı akış türbinlerinden kaynaklanan türbülanslı akışın, aşağı akışta konumlanan türbinler

üzerindeki etkilerini değerlendirmek ve bu etkilerin performansa ve yapısal yüke olan katkısını ortaya koymaktır. Bu hedef doğrultusunda, yukarı akış türbininin oluşturduğu art izinin aşağı akış türbinlerine maksimum etkide bulunabilmesi için tandem dizilime sahip bir çiftlik yerleşimi tercih edilmiştir. Tanımlanan alan için bir optimizasyon problemi kurgulanmış ve maksimum güç yoğunluğuna ulaşmayı hedefleyen farklı deney tasarımları geliştirilmiştir. Önerilen senaryolar için türbin kanatlarının en kritik bölgesi olan kanat köklerinde oluşan kuvvetler dikkate alınarak yorulma analizleri yapılmış ve senaryolar karşılaştırılmıştır.

Sayısal analizlerde, yapıya etki eden rüzgar yükleri aero-servo-elastik çözücü OpenFAST kullanılarak hesaplanmış; elde edilen sonuçlar doğrultusunda, belirli bir zaman aralığında ortalama birikmiş yorulma hasarlarını tahmin etmek amacıyla, yağmur akışı metoduna dayanan ve istatistiksel analiz kabiliyetine sahip MLife yazılımı kullanılmıştır.

1.3. Kapsam

Bu tez çalışması, yedi ana bölümde yapılandırılmıştır ve rüzgar türbini çiftliklerinin yerleşim optimizasyonu ile art izi etkilerinin hem performans hem de yapısal yükler üzerindeki etkilerini detaylı şekilde incelemektedir. İlk bölüm olan giriş kısmında, tez kapsamında literatüre yer verilirken, tezin motivasyonu ile ele alınan problemin önemine ve amaca yer verilmiştir.

İkinci bölümde, rüzgar enerjisi ve potansiyeline hem küresel hem de Türkiye için değinilmiş, çalışma doğrultusunda ilgili olan rüzgar terminolojileri detaylandırılarak teknik alt yapı oluşturulmuştur.

Üçüncü bölümde, türbin terminolojileri, özellikle yatay eksenli türbinlerin yapısı, serbestlik dereceleri ve yükleme durumları gibi alt başlıklarla birlikte sunulmuş türbinin aerodinamik davranışı detaylandırılmıştır. Betz limiti, aktüatör disk modeli ve art izi dinamikleri üzerine bilgiler verilmiştir. Bu bölümde ayrıca, kanat elemanları için momentum teorisi ve düzeltme metotları ile rüzgar türbinlerinde art izi oluşumu ayrıntılı biçimde ele alınmıştır.

Dördüncü bölümde, aero-servo-elastik hesaplamalar için kullanılan OpenFAST ve Fast.FARM yazılımları tanıtılmış, NREL 5 MW referans türbiniyle yapılan simülasyonlar sunulmuştur. Ayrıca, OpenFAST ile elde edilen rijit ve aeroelastik türbin verilerinin analizi yapılmıştır.

Beşinci bölümde tandem yerleştirilmiş rüzgar türbinleri için güç yoğunluğu optimizasyonu konusu ele alınmıştır. Bandırma bölgesine özgü rüzgar verileri kullanılarak

oluşturulan deney tasarımı çerçevesinde, Taguchi yöntemiyle optimizasyon yapılmış ve farklı yerleşim senaryolarının sonuçları karşılaştırılmıştır.

Altıncı bölümde ise, türbin kanat köklerinde oluşan yorulma yükleri MLife yazılımı ile değerlendirilmiş; güç yoğunluğu ve güç üretimi odaklı iki farklı senaryo için elde edilen yorulma analiz sonuçları sunulmuştur.

Yedinci bölümde ise çalışma kapsamında incelenen ve ulaşılan bulgulara değinilip sonuçlar yorumlanmıştır.

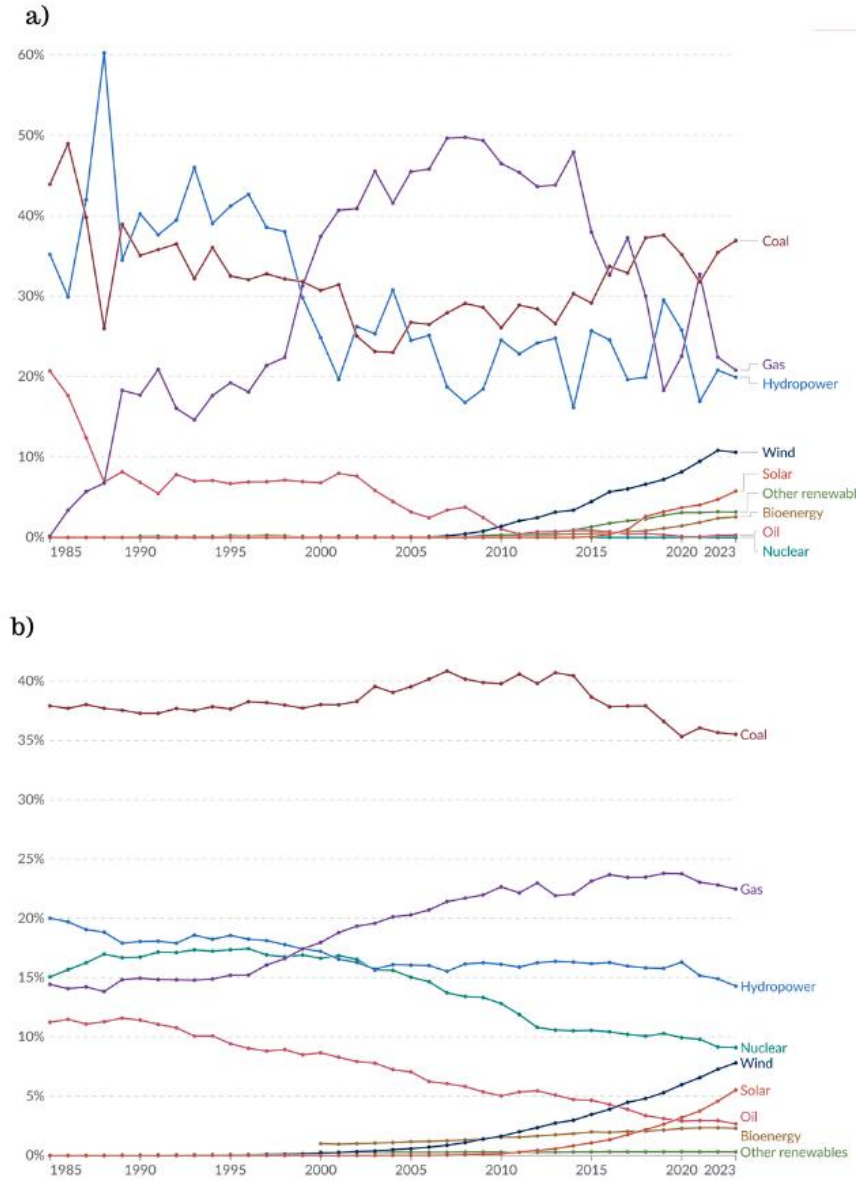
2. RÜZGAR

2.1. Rüzgar Enerjisi

Fosil yakıt rezervlerinin sınırlı oluşu ve hızla tükenmesi, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimi kaçınılmaz hale getirmiştir. Bu bağlamda rüzgar enerjisi, fosil yakıt tüketimindeki artışla paralel olarak yenilenebilir enerjiye olan talebin yükselmesi sayesinde enerji sektöründe her geçen gün daha fazla önem kazanmaktadır. Yapılan araştırmalar, günümüzdeki fosil yakıt tüketim hızının, bu kaynakların doğal oluşum hızının yaklaşık 300.000 katına ulaştığını; bir günde tüketilen fosil yakıt miktarının, bin yıllık bir sürede oluşan rezervlere denk geldiğini ortaya koymaktadır (Şenel ve Koç, 2015). Yapılan araştırmalarda, 500 kWh'lık bir rüzgar türbininin 57.000 ağacın yaptığı CO₂ temizleme işine eşdeğer bir iş yaptığı, rüzgar enerjisinden daha çok yararlanılması durumunda, örneğin toplam elektrik enerjisi kullanımının %10'luk civarındaki kısmın rüzgar enerjisinden sağlandığında atmosfere salınan CO₂ emisyonunun yılda 1,41 Gton azalacağı öngörülmektedir (Şenel ve Koç, 2015). Bu durum, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi artırmış ve birçok ülkede rüzgar enerjisi gibi kaynakların kullanımına yönelik politikalar geliştirilmesine de neden olmuştur. Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (International Renewable Energy Agency - IRENA) ve Uluslararası Enerji Ajansı'nın (International Energy Agency - IEA) geçen yıl yayınladığı 1,5°C yol haritasında, rüzgar enerjisinin 2050 yılına kadar küresel enerji sisteminin merkezi bir ayağı haline geleceği ve dünya genelinde 8.000 GW'den fazla rüzgar kapasitesinin diğer tüm enerji kaynaklarından daha fazla elektrik üreteceğini belirtiliyor. Bu yol haritaları, geniş çaplı elektrifikasyon, enerji verimliliği, şebeke ve yeşil altyapı inşası ve yenilenebilir enerji dağıtım önlemleri kapsamında 2050 yılına kadar küresel karbon nötrlüğüne ulaşma yolunda ilerliyor (Global Wind Report, 2022). Türkiye ve Dünya'nın enerji üretiminde kullanıldığı kaynaklardaki değişim Şekil 2.1'de görüldüğü üzere geçmişten günümüze kadar olan süreçte yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen güç miktarlarında artışın yaşandığı gözlemlenmektedir. Ayrıca rüzgar enerjisinde üretimin 2000'li yıllardan sonra güç kazandığı, Çin'de yeşil enerji üretiminde alınan kararlarla hava kirliliğinin önüne geçmek adına yapılan çalışmalar sonucunda açık ara farkla dünyada en çok enerji üreten ülke olduğu Şekil 2.2'de görülmektedir.

Rüzgar enerjisi, hava kitlesinin kinetik enerjisinin mekanik enerjiye dönüşmesiyle elde edilen bir enerji kaynağıdır. Aynı zamanda güneş enerjisinin bir türevi olarak da kabul edilir ve Dünya'ya ulaşan güneş enerjisinin yaklaşık %2'si rüzgar enerjisine dönüşür. Enerji sektöründe gerçekleşen yatırımlar ve bir ülkede gerçekleşen rüzgar kaynaklı enerji üretimi, o ülkenin

elverişli rüzgar alma potansiyeli ile doğru orantılı olacak şekilde gerçekleşmektedir. Uluslararası Enerji Ajansı'nın araştırmalarına göre, dünyanın teknik rüzgar potansiyeli, 5,1 m/s üzerindeki rüzgar kapasitesine sahip bölgelerin %4'ü kullanılabilir kabul edilerek, 53.000 TWh/yıl olarak hesaplanmıştır (Mutlu vd., 2009).

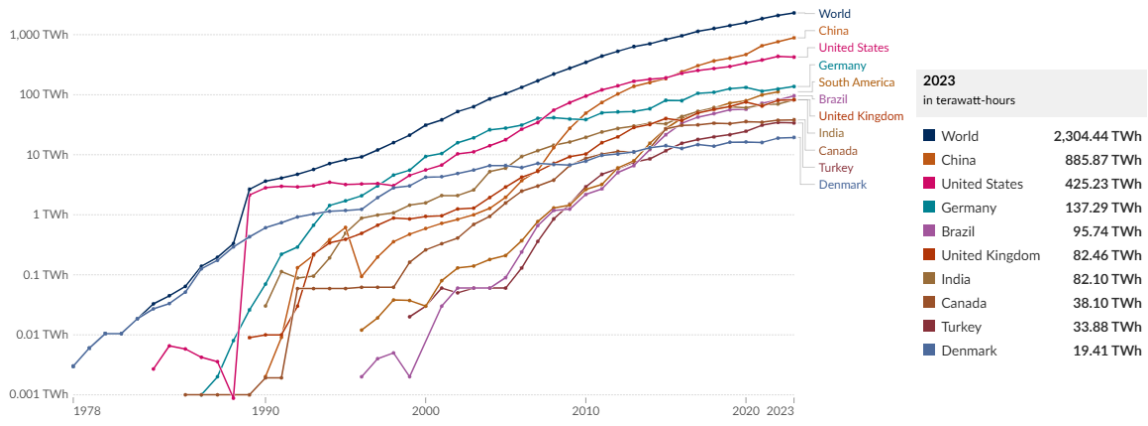


Şekil 2.1. a) 1985-2023 Türkiye enerjisi üretim kaynaklarının değişimi b) 1985-2023 Dünya genelinde enerji üretim kaynaklarının değişimi

Kaynak: (Ember, 2024)

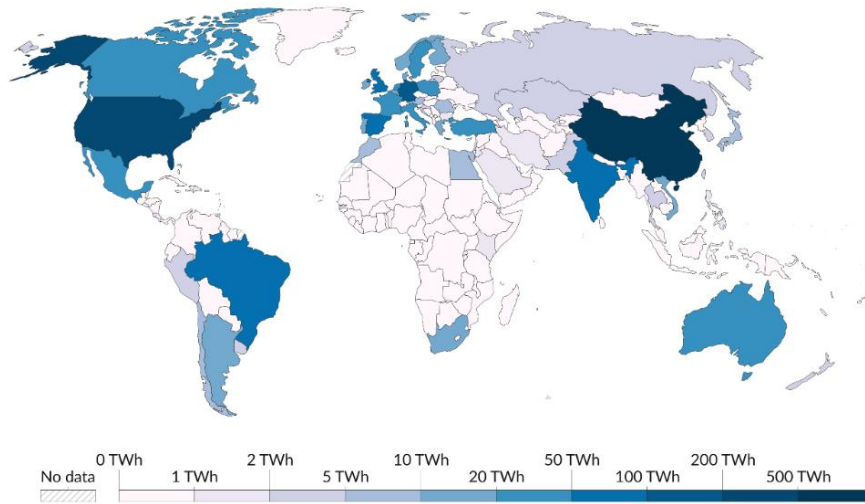
Bu potansiyelin yüksek olduğu bölgelerden bazıları Kuzey Amerika, Doğu Avrupa, Afrika ve Asya olarak belirlenmiştir. Öte yandan, Türkiye, rüzgar enerjisi potansiyeli açısından zengin bir coğrafya özelliği taşımaktadır. Marmara, Güneydoğu Anadolu ve Ege bölgeleri bu açıdan öne çıkmaktadır. Yapılan ölçümler, Türkiye’de 7,5 m/s’nin üzerindeki rüzgar hızlarına

sahip alanlarda kilometrekare başına 5 MW gücünde santrallerin ekonomik olarak uygulanabilir olduğunu göstermiştir ve bu bağlamda ülkemizin rüzgar enerjisi potansiyeli de 48.000 MW olarak belirlenmiştir (REPA, 2022). Şekil 2.3’de 2023 yılında dünya genelindeki rüzgar enerjisi üretimini, yıllık terawatt-saat (TWh) bazında göstermektedir. Şekil 2.3 hem kara (onshore) hem de deniz üstü (offshore) temelli rüzgar enerjisi üretimini içermektedir. Aynı zamanda ülkeler bazında rüzgar enerjisinin kullanımını kıyaslamaktadır. Haritanın renk tonları, ülkelerin ürettiği enerji miktarını temsil eder; daha koyu mavi tonları daha yüksek üretim miktarlarını ifade ederken, açık tonlar düşük üretimi göstermektedir. Görselden de görüleceği üzere rüzgar enerjisinden en çok elektrik enerji üretimi Çin, ABD ve Almanya gelmektedir.



Şekil 2.2. 1978-2023 Tarihleri arasında kara ve deniz üstü temelli rüzgar enerjisi üretimindeki gelişim

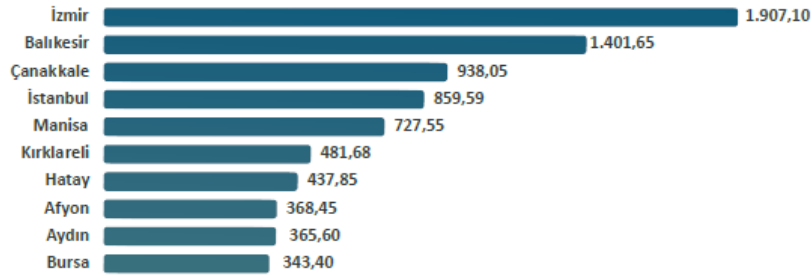
Kaynak: (Ember, 2024)



Şekil 2.3. 2023 yılı itibari ile dünya genelinde rüzgar enerjisi üretimi (TWh bazında)

Kaynak: (Ember, 2024)

Türkiye'nin coğrafi özelliklerine bakıldığında, rüzgar enerjisinin önemli bir enerji kaynağı olduğu söylenebilir. Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'na bağlı Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü tarafından yapılan ölçümlerde Marmara, Güneydoğu Anadolu ve Ege Bölgelerinin rüzgar gücü açısından diğer bölgelerle göre daha zengin olduğu tespit edilmiştir. Özellikle Çanakkale-Balıkesir, Manisa-İzmir ve Hatay bölgeleri bu açıdan ön plana çıkmaktadır. TUREB'den alınan veri sonucunda ülkemizde rüzgar gücünün zengin olduğu ve Rüzgar Enerji Santrali (RES) yerleşimlerinin bulunduğu illerde üretilen gücün MW cinsinden değeri Şekil 2.4'de görülmektedir.

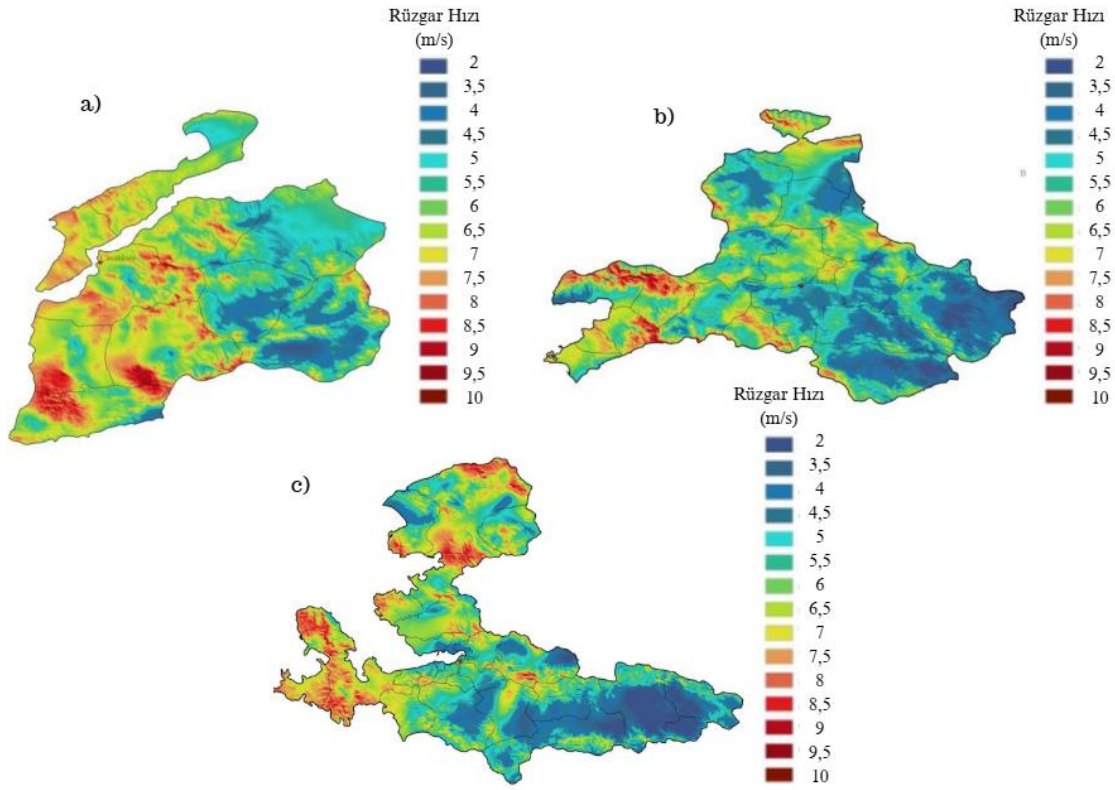


Şekil 2.4. Türkiye’de illere göre kurulu RES gücü (MWm)

Kaynak: (TUREB, 2022)

Ertürk tarafından yapılan araştırmada, Türkiye'nin yaklaşık 13 GW bir kara rüzgar enerjisi potansiyelinin olduğunu ve rüzgar hızının 7,5 m/s veya daha yüksek olduğunu tespit etmiştir. 100 GW'den az rüzgar kapasitesine sahip durumlarda rüzgar enerjisi santrallerinin ekonomik olarak kullanılamayacağını belirtmiştir (Ertürk, 2012). Elektrik İşleri Etüt İdaresi tarafından hazırlanan Türkiye atlasına göre rüzgar hızları; Marmara, Batı Karadeniz ve Doğu Akdeniz kıyılarında 6,0 – 7,0 m/s olarak tespit edilmiştir. İç kesimlerinde ise 5,5 – 6,5 m/s arasında, Batı Akdeniz kıyılarında 5,0 – 6,0 m/s, iç kesimlerinde ise 4,5 – 5,5 m/s arasında, Ege kıyılarında 7,0 – 8,5 m/s, iç kesimlerinde ise 6,5 – 7,0 m/s arasında olduğu tespit edilmiştir (REPA, 2022).

Türkiye’de bulunan RES’ler Şekil 2.4’de görüldüğü üzere İzmir için ciddi bir potansiyel bulunmaktadır. Türkiye’nin rüzgar enerjisi başkenti olarak nitelendirilen İzmir, rüzgar enerjisinden elektrik üretimi alanındaki lider pozisyonunu rüzgar türbini ekipmanları imalatı konusunda da sürdürmektedir. Bugün 1.907 MW RES kurulu gücüne sahip olan İzmir, Türkiye’nin ilk rüzgar ölçüm direğine, rüzgar türbinine ve rüzgar enerjisi santraline de ev sahipliği yaptığı gibi Türkiye’nin ilk kanat ve kule fabrikasına, türbin bakım ve onarım tesisi ile Ar-Ge Merkezi’ne de ev sahipliği yapmaktadır. (TUREB, 2022).



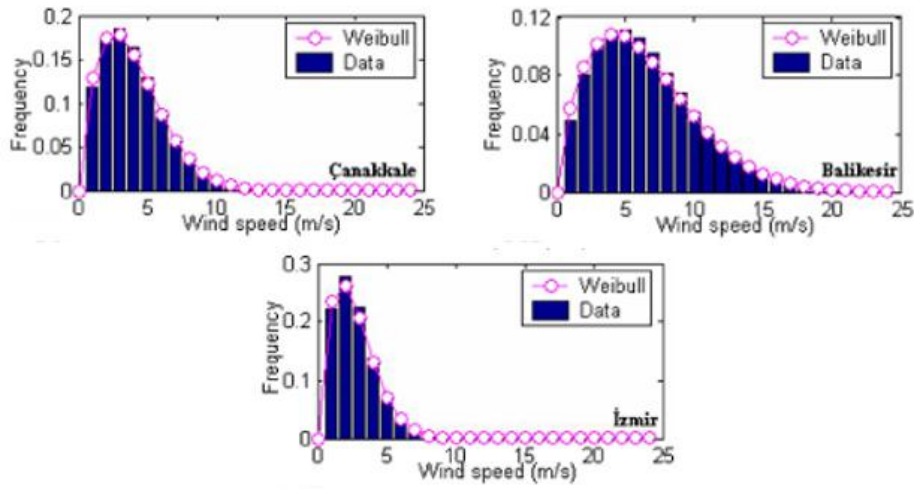
Şekil 2.5. Türkiye de RES kurulumu en çok olan 3 ile ait rüzgar hızları a) Çanakkale b) Balıkesir c) İzmir

Kaynak: (REPA, 2025)

Şekil 2.5’de yer alan haritalar, Türkiye’de rüzgar enerjisi santrali kurulumunun en yoğun olduğu Çanakkale, Balıkesir ve İzmir illerinin rüzgar hız dağılımını göstermektedir. Haritalarda, farklı renklerle gösterilen rüzgar hızları, bu bölgelerdeki rüzgar potansiyelini değerlendirmek açısından önemli veriler sunmaktadır. Bu bölgelerdeki rüzgar hızlarının yanı sıra, rüzgar enerjisi üretim kapasitesinin tahmini için Weibull dağılım analizleri de önemlidir. Uçar ve Balo (2010) yaptığı çalışmada kıyı bölgelerinde bulunan ve Şekil 2.6’da da yer alan iller için rüzgar enerjisi kaynaklarının fizibilite temelli analizini yapmıştır. Sonuçlar yıllık ortalamalar arasında Balıkesir ve Çanakkale’nin daha yüksek ortalama rüzgar hızı değerine İzmir’in ise Tekirdağ ve İstanbul sonrasında beşinci en iyi ortalama hız değerlerine sahip olduğunu göstermiştir. Balıkesir ve Çanakkale illeri için sırasıyla rüzgar hızındaki düzenliliği anlamlandıran Weibull şekil parametresi k’nin 1,82 ve 1,83, ortalama rüzgar hızına yakın bir değeri temsil eden ölçek parametresi c’nin ise 8,34 m/s ve 5,46 m/s olduğunu saptamıştır. Burada Balıkesir için ortalama rüzgar hızının daha yüksek olduğu ve verilen k değerleriyle iki il içinde yıl boyunca rüzgar hızında değişkenlik gözlemlendiği anlaşılabilmektedir. Ayrıca, 70 m’deki ölçüm verilerine göre Çanakkale ile Balıkesir için yıllık ortalama rüzgar hızının sırasıyla

9,02 m/s, 12,3 m/s olduğunu belirtmiştir. 50 m’de ölçülen verilerin yıllık ortalamasında ise Bandırma 6,9 m/s ve Bozcaada ise 8,4 m/s hızlarına sahiptir (Oğulata, 2003).

Yıllık ortalama rüzgar hızının Weibull grafiğine göre 8,34 m/s etrafında toplandığı ve Ağustos ayında 8,38 m/s ile maksimum ortalama rüzgar hızına ulaşan Balıkesir ili göz önünde bulundurulduğunda (Ucar ve Balo, 2010), 100 m’de ölçülen rüzgar hızının yıllık ortalaması 8,38 m/s ulaşmaktadır (Global Wind Atlas, 2024). Çanakkale ve İzmir için ise 100 m’de bu değer 8,63 m/s ye ulaşmaktadır. Bu iki ile ait 50 m’de yer alan rüzgar hızları ve alınabilecek rüzgar güçleri Balıkesir, Çanakkale ve İzmir illeri için sırasıyla Şekil 2.7’de verilmektedir.



Şekil 2.6. Çanakkale, Balıkesir ve İzmir illerine ait Weibull dağılımı

Kaynak: (Ucar ve Balo, 2010)

a)				b)			
50 m’de Rüzgar Gücü (W/m ²)	50 m’de Rüzgar Hızı (m/s)	Toplam Alan (km ²)	Toplam Kurulu Güç (MW)	50 m’de Rüzgar Gücü (W/m ²)	50 m’de Rüzgar Hızı (m/s)	Toplam Alan (km ²)	Toplam Kurulu Güç (MW)
300 - 400	6.8 - 7.5	1.511,42	7.557,12	300 - 400	6.8 - 7.5	863,70	4.318,48
400 - 500	7.5 - 8.1	850,96	4.254,80	400 - 500	7.5 - 8.1	802,99	4.014,96
500 - 600	8.1 - 8.6	284,51	1.422,56	500 - 600	8.1 - 8.6	761,09	3.805,44
600 - 800	8.6 - 9.5	115,23	576,16	600 - 800	8.6 - 9.5	174,74	873,68
> 800	> 9.5	3,34	16,72	> 800	> 9.5	0,00	0,00
		2.765,47	13.827,36			2.602,51	13.012,56

c)			
50 m’de Rüzgar Gücü (W/m ²)	50 m’de Rüzgar Hızı (m/s)	Toplam Alan (km ²)	Toplam Kurulu Güç (MW)
300 - 400	6.8 - 7.5	933,09	4.665,44
400 - 500	7.5 - 8.1	868,30	4.341,52
500 - 600	8.1 - 8.6	317,68	1.588,40
600 - 800	8.6 - 9.5	251,78	1.258,88
> 800	> 9.5	0,02	0,08
		2.370,86	11.854,32

Şekil 2.7. Kurulabilecek rüzgar enerji santrallerine ait güç kapasitesi a) Balıkesir b) Çanakkale c) İzmir

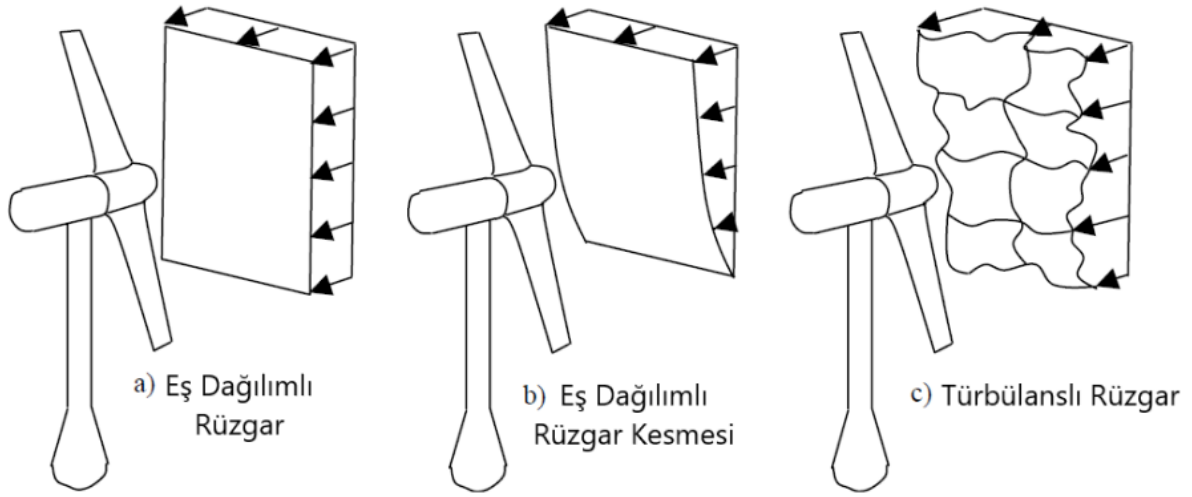
Kaynak: (REPA, 2025)

2.2. Rüzgar Terminolojisi

Güneş ışınlarının atmosferde dengesiz dağılımı bölgesel sıcaklık farklılıklarına yol açar. Soğuk bölgelerde atmosferik basınç artarken daha fazla ışınım altında kalan bölgeler ısınır ve atmosferik basınçta azalma gözlemlenir. Basınç farklılığı ise atmosferde konveksiyonel akım oluşturur. Bu akımlar basıncın yüksek olduğu bölgelerden alçak bölgelere doğru gerçekleşir. Dengelenme durumundaki hava kütlelerinin hareketi rüzgarları oluşturur ve basınç farkı rüzgar kuvvetiyle doğru orantılıdır.

Atmosferik sınır tabakası (Atmospheric Boundary Layer - ABL), rüzgar özelliklerinin yer yüzeyinden güçlü bir şekilde etkilendiği atmosferin önemli bir kısmıdır. Bu tabaka, yüzeyden yaklaşık 1-2 kilometre yüksekliğe kadar uzanır ve rüzgar hızı ile yönü, yüzey sürtünmesi ve termal etkiler nedeniyle yükseklikle değişiklik gösterir. Türbülans, özellikle kısa zaman ölçeklerinde (bir saat veya daha az) bu tabakada hâkimdir ve hava karışımını sağlayarak momentum, ısı ve nem taşınımını yatay ve dikey olarak etkiler. Sınır tabakasının en alt kısmı olan yüzey tabakası yaklaşık 50-100 metre kalınlığındadır ve rüzgar hızı, sıcaklık ve nemde en keskin değişimlerin görüldüğü yerdir. Yüzey pürüzlülüğü, atmosferik kararlılık ve termal tabakalaşma gibi faktörler rüzgar hızında büyük değişkenliklere neden olabilir. Örneğin düz yüzeyler üzerinde rüzgar hızları genellikle ormanlık veya kentsel alanlara göre daha yüksektir. Ayrıca günlük sıcaklık değişimleri ABL'deki rüzgar özelliklerini etkiler. Gündüz saatlerinde termal konveksiyon türbülansı artırarak rüzgar hızını yükseltirken gece daha kararlı koşullar türbülansı ve rüzgar hızını azaltır. Tepeler ve vadiler gibi yüzey şekilleri de rüzgar akışını karmaşık hale getirerek rüzgar kesmesi ve yerel türbülans gibi fenomenlere yol açabilir (Kaimal ve Finnigan, 1994).

Pratik nedenlerle yer seviyesine yakın konumlandırılan türbinlerden geçen havada yeryüzünde etkileşen sınır tabakası etkileri gözlemlenir. Bu hava akışını sabit, tek yönlü ve homojen düşünmek basit bir yaklaşımdır (Bknz Şekil 2.8.a). Sınır tabakasında akış viskozite ve yeryüzüne temas nedeniyle bu tanımlardan uzaktadır. Bu etkiler sonucunda sınır tabakasında akış yükseklikle değişen bir hız gradyeni oluşturur ve bu durum basit bir kayma modeliyle temsil edilmektedir (Bknz Şekil 2.8.b). Türbinden geçen sınır tabakası akışı, doğal olarak homojen olmayan, zamana bağlı ve türbülanslı bir yapıya sahiptir. Bunun sonucunda akışta hız ve basınç dalgalanmaları oluşur (Bknz Şekil 2.8.c). Küçük akış bozulmalarıyla bile türbülanslı hale gelebilen kararsız bir akışa yol açar. Düzensiz arazi koşulları veya arazideki engeller türbülans oluşma olasılığını artırır.



Şekil 2.8. Doğal rüzgar karakteristiği

Kaynak: (Jonkman, 2003)

Rüzgar ölçümü yapılırken, ölçüm yapılan bölgenin yüzey hızı sıfır kabul edilirken bu rüzgar hızı yükseltiyle beraber artar. Bu değişim, yüzeye olan sürtünmeden ve yüzey pürüzlülüğünden etkilenir. Ortalama rüzgar hızı ise *Logaritmik Yasa* ve *Güç Yasası* ile ifade edilmektedir. *Logaritmik Yasa* yüzey hızının bir fonksiyonu olarak rüzgar hızının yükseklikle değişimini ifade eder:

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (2.1)$$

Burada $u(z)$ z yüksekliğindeki rüzgar hızı, u_* sürtünme hızı, κ von Kármán sabiti ve z_0 ise yüzey pürüzlülük uzunluğunu ifade eder. *Güç Yasasını* formüle edersek:

$$u(z) = u_{ref} \left(\frac{z}{z_{ref}}\right)^{\alpha_g} \quad (2.2)$$

Burada α_g güç katsayısı olup yüzey pürüzlülüğüne bağlıdır. Farklı arazi tipleri için güç katsayısı, yüzey pürüzlülük yüksekliği için değerler Tabloda 2.1'de yer verilmiştir.

Atmosferik sınır tabakada yer alan rüzgarın en önemli özelliklerinden biride türbülanslı yapısıdır. Bir bölge için elde edilmiş rüzgar verileri için zaman serilerinde, rüzgar hızının anlık değişimi türbülanslı tanımlayabilir ve bu zaman serisinden istatistiksel parametreler hesaplanabilir. Bu parametreler, ortalama rüzgar hızı ve standart sapma olarak örneklendirebilir ve nihayetinde standart sapmanın ortalama rüzgar hızına oranı şeklinde de yazılarak türbülans

yoğunluğu elde edilebilir. Standart sapma σ ve ortalama hız u_{ort} olmak üzere türbülans yoğunluğu:

$$I_t = \frac{\sigma}{u_{ort}} [\%] \quad (2.3)$$

Tablo 2.1. Farklı arazi tipleri için pürüzlülük yüksekliği ve güç katsayısı değerleri

Yüzey tipi	$z_0[m]$	α_g
Şehir merkezi	1-10	0,40
Şehirler ve ormanlar	0,7	
Mahalleler ve ağaçlı alanlar	0,3	0,30
Köyler ve kırsal alanlar	0,1	
Açık tarım alanları ve az sayıda ağaçlı alanlar	0,03	0,16
Düz ve çimenli ovalar	0,01	
Dalgalı deniz ve çöl	0,001	0,012
Deniz ve okyonus	0,0002	

Kaynak: (Burton vd., 2001)

Rüzgar spektrumları, rüzgar hızının zamansal veya frekans bazlı dağılımını ve özelliklerini inceleyen bir kavramdır. Türbülans rüzgarın düzensiz ve kaotik hareketlerini ifade ederken, rüzgar spektrumu bu türbülansın hangi frekanslarda ne kadar enerjiye sahip olduğunu gösterir. Rüzgar spektrumu, türbülansın istatistiksel özelliklerini tanımlayarak bu karmaşıklığı anlamayı kolaylaştırır. Von Kármán ve Kaimal spektrumları en yaygın kullanılan modellerdir (Kaimal ve Finnigan 1994). Kaimal spektrumu özellikle IEC 61400 standartlarında türbin yük analizlerinde kullanılır. Türbülans teorisine dayanır ve izotropik türbülans ilkelerinden türetilmiştir. Rüzgar dalgalanmalarının farklı frekanslarında enerjinin nasıl dağıldığını matematiksel olarak temsil eder (Kaimal ve Finnigan 1994).

$$\text{Kaimal Spektrum:} \quad (f) = \frac{4\sigma^2 L/u}{(1 + 6f \cdot L/u)^{5/3}} \quad (2.4)$$

$$\text{von Kármán Spektrum:} \quad (f) = \frac{4\sigma^2 L/u}{(1 + 70,8f^2 \cdot (L/u)^2)^{5/6}} \quad (2.5)$$

Burada f rüzgar frekansını (Hz), σ standart sapmayı, L uzanım yönündeki integral uzunluk skalası (türbülans ölçeği) ve u ise belli bir aralıktaki (süre bazlı) rüzgarın ortalama hızını temsil etmektedir.

2.2.1. Rüzgar Dağılımı

Rüzgarın temel özelliğinden biri hızının değişken olmasıdır. Bu değişkenlik hem zaman hem mekanda gözlemlenebilir. Rüzgar hızı bir vektör olarak, bir doğrultuda belirli bir zaman periyodunda ortalama değer olarak ele alınabilir. Belirli zaman periyodu için tipik bir olasılık yoğunluk fonksiyonu oluşturulabilir ve zamana bağlı sürekli bir fonksiyon olarak düşünülebilir. Bu sebeple rüzgar hızı belirli konumda Weibull dağılımı ile kümülatif olarak temsil edilebilir (Feijóo ve Villanueva, 2016). Rüzgar potansiyelinin tahmini, rüzgar santrali planlaması, fizibilite çalışmaları ve türbin tasarımı gibi birçok alanda önemlidir. Bu süreçte, rüzgar rejimini doğru şekilde modellemek için uygun dağılım fonksiyonlarının seçimi kritik bir rol oynar. Kullanılan dağılım fonksiyonu, analiz edilen bölgenin rüzgar modeline en iyi uyumu sağlamalıdır. Geçmişte rüzgar hızı dağılımını modellemek için birçok Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu (Probability Density Function - PDF) geliştirilmiştir. Bunlar arasında Üstel, Weibull, Rayleigh, Gamma, Normal, Lognormal, Lojistik, Beta, Nakagami, Burr Tipi XII, Uç Değer, Ters Gauss, Log-Lojistik, Laplace, Yarı-Normal, Genelleştirilmiş Uç Değer, Genelleştirilmiş Pareto ve T Konum-Ölçek gibi fonksiyonlar yer almaktadır. Ancak bunlar arasında Weibull dağılımı, rüzgar hızı analizlerinde en yaygın kullanılan yöntemdir (Wadi vd., 2022).

Weibull rastgele değişkeninin olasılık yoğunluk fonksiyonu:

$$f(x; \lambda, k) = \begin{cases} \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-(x/\lambda)^k}, & x \geq 0, \\ 0, & x < 0, \end{cases} \quad (2.6)$$

Burada k şekil parametresi ($k > 0$) ve λ ölçek parametresini ($\lambda > 0$) temsil etmektedir. Weibull dağılımı esnek bir model olup farklı şekil parametreleri ile çok çeşitli olasılık dağılımlarını modelleyebilir. Örneğin $k = 1$ olduğunda üstel dağılıma, $k = 2$ olduğunda ise Rayleigh dağılımına yönelir. Rayleigh dağılımı ise belirtildiği üzere Weibull dağılımı için özel bir durumdur. Rayleigh dağılımı, genellikle düzlemde bir vektörün büyüklüğü, yönel bileşenleriyle ilişkili olduğunda gözlemlenir. Rayleigh dağılımının doğal olarak ortaya çıktığı bir örnek, rüzgar hızının iki boyutta analiz edilmesidir. Eğer her bir bileşen birbirinden bağımsız, sıfır ortalamalı, eşit varyansa sahip ve normal dağılımlıysa (ki bu nadirdir), toplam

rüzgar hızı (vektör büyüklüğü) Rayleigh dağılımı ile karakterize edilir (Papoulis, 1965). Ölçek parametresi σ 'nın bir fonksiyonu olarak Rayleigh dağılımı:

$$f(x; \sigma) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-x^2/(2\sigma^2)}, \quad x \geq 0 \quad (2.7)$$

3. YATAY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİNİ

Rüzgar enerjisi dönüştürücüleri, *aerodinamik işlevlerine* ve *yapısal tasarımlarına* göre sınıflandırılabilir. Aerodinamik işlev sınıflandırılmasında dönüştürücü, gücünü sadece hava akımının sürüklenme etkisinden mi yoksa yüzeylerin şekline bağlı olarak oluşan kaldırma kuvvetinden mi aldığıyla belirlenir. Bu doğrultuda, *sürüklenme tipi rotorlar* ve *aerodinamik kaldırma kuvvetini kullanan rotorlar* olarak iki ana kategoriye ayrılır. Yapısal tasarımlarına göre yapılan sınıflandırma da ise daha yaygın ve uygulanabilir bir yaklaşım karşımıza çıkar. Bu sınıflandırmada dikkat çeken en belirgin özellik ise rüzgar rotorunun dönme ekseninin konumudur. Bu nedenle, *dikey dönme eksenine sahip rotorlar* ile *yatay dönme eksenine sahip rotorlar* arasında yapısal tasarım sınıflandırılması gerçekleştirilir. Yatay konumda dönen eksene sahip rüzgar enerjisi dönüştürücüleri neredeyse tamamen *pervane benzeri* tasarımlara dayanmaktadır. Pervane tasarımlarında, rotor hızını ve güç çıkışını, rotor kanatlarını uzunlamasına eksen etrafında döndürerek, yani kanat eğimi ile kontrol etmek mümkündür. Ayrıca, rotor kanatlarının eğimi, özellikle büyük rüzgar türbinlerinde kuvvetli rüzgarların yol açtığı aşırı rotor hızına karşı en etkili koruma yöntemidir. Rotor kanadının şekli aerodinamik olarak optimize edilebilir ve en yüksek verimlilik, kaldırma kuvvetinden maksimum düzeyde yararlanıldığında elde edildiği kanıtlanmıştır. Bunun yanında kanat tasarımı konusundaki teknolojik üstünlük de belirleyici bir faktördür (Hau, 2013).

3.1. Yatay Eksenli Türbinin Yapısı - Temel Unsurları ve Alt Unsurları

Yatay eksenli rüzgar türbinleri günümüzde en yaygın kullanılan türbin türü olarak karşımıza çıkmaktadır. Yatay eksenli rüzgar türbinlerini mekanik ve yapısal anlamda üç farklı bileşene kule, nasel ve rotor olarak ayırabiliriz. Kule, sistemin yüksekliğini belirlerken aynı zamanda rotor ve naseli desteklemektedir. Nasel, kule tepesinde bulunan ve rüzgar türbini için en kritik bileşenleri barındıran kısımdır. İçerisinde jeneratör, dişli kutusu, miller ve yatakları, kontrol sistemleri gibi hem mekanik hem de elektriksel sistemleri barındırır. Rotor ise rüzgar enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren bileşendir. Kompozit yapıda ve genelde 3 adet bulunan kanatlardan oluşmaktadır. Rotor ana mil aracılığıyla nasel içerisindeki sisteme bağlanmaktadır. Yatay eksenli bir rüzgar türbinin alt sistemleri ve bileşenleri Tablo 3.1’de belirtilmiştir.

Cisim akışkan içerisinde hareketi esnasında farklı kuvvetlerin tesiri altında kalmaktadır. Oluşan bu kuvvetler genel ismiyle aerodinamik kuvvet olarak, tasarımda planlanan ve hareketini bu doğrultuda gerçekleştirebilen cismin sahip olduğu şekil ise aerodinamik şekil olarak nitelendirilir. Akış sırasında cismin yüzeyinde oluşan basınç dağılımı, sürüklenme kuvveti ve iz bölgesindeki girdap kopmaları ise cismin aerodinamik özelliklerini belirler

(Akçadircı, 2006). Bu bağlamda, rüzgar türbinleri de hareketli akışkanlar içerisinde çalışan aerodinamik sistemlerdir ve türbin yapısı ile özellikleri aerodinamik etkiler göz önünde bulundurularak incelenmesi gerekmektedir. Türbin aerodinamiği, rüzgar ile türbinler arasındaki etkileşimi ve bu etkileşimin sonuçlarını tanımlar. Bu da aerodinamiği ve ilişkili konuları, rüzgar türbini tasarımı ve araştırması için merkezi bir alan haline getirir (Stoevesandt vd., 2022).

Tablo 3.1. Rüzgar türbini alt sistem ve bileşenleri

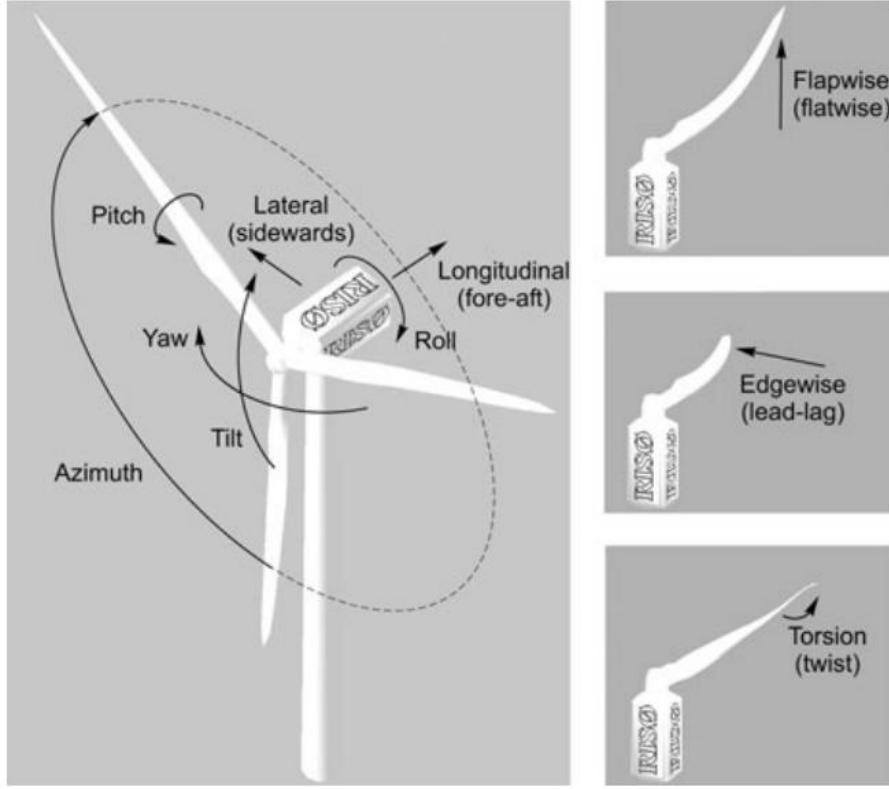
Rüzgar Türbini Alt Sistemleri	Rüzgar Türbini Bileşenleri
Göbek (Hub)	Göbek gövdesi, kanat açısı ayar (pitch) mekanizması ve mekanizma yatakları
Yapı	Temeller, kule/kule cıvataları, nasel çerçevesi, nasel kaplaması ve merdiveni
Rotor Kanatları	Kanat cıvataları, kanat kabuğu ve aerodinamik frenler
Mekanik Fren	Fren diski, fren balataları ve fren pabucu
Güç Aktarım Sistemi	Rotor yatakları, tahrik milleri ve kaplinler
Dişli Kutusu	Yataklar, tekerlekler, dişli mili ve sızdırmazlık elemanları
Jeneratör	Jeneratör sargıları, jeneratör fırçaları ve yatakları
Yaw Sistemi	Yaw yatakları, yaw motoru, tekerlekler ve pinyonlar
Sensörler	Anemometre/rüzgargülü, titreşim sensörü, sıcaklık, yağ basıncı sensörü, güç sensörü ve devir sayacı
Hidrolik Sistem	Hidrolik pompa, pompa motoru, vanalar ve hidrolik borular/bağlantılar
Elektrik Sistemi	Konvertör, sigortalar, anahtarlar ve kablolar/bağlantılar
Kontrol Sistemi	Elektronik kontrol ünitesi, röle, ölçüm kabloları ve bağlantılar

Kaynak: (Öztürk vd., 2018)

3.2. Yatay Eksenli Türbinde Serbestlik Dereceleri

Bir sistemin serbestlik derecesi, sistem elemanlarının hareketini tanımlamak için gerekli bağımsız koordinatların sayısını temsil etmektedir ve uzayda serbestçe hareket edebilen bir kütle noktasının x-y-z yönünde olmak üzere 3 serbestlik derecesi vardır. Dolayısıyla katı bir cismin de 6 serbestlik derecesine sahip olması gerekir ki bunlar üç eksenel hareket ve her bir eksen etrafındaki üç dönme olasılığıdır (Greiner, 2009). Rijit rüzgar türbinleri 6 serbestlik derecesi ile tanımlanır, 3 doğrusal (ileri-geri, yukarı-aşağı, sağa-sola) ve 3 açısal (yaw, pitch, roll). Ancak aeroelastite dikkate alındığında kanat ve kule üzerindeki elastik deformasyonlar gibi ek etkiler nedeniyle serbestlik derecesi önemli ölçüde artar. Rüzgar türbinlerinin serbestlik

dereceleri, çeşitli hareket ve dönüşleri ifade eder. Aeroelastite dâhil edilmiş yatay eksenli bir rüzgar türbin rotoru için serbestlik dereceleri Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Rotor, kule ve kanatların serbestlik dereceleri ve yükleme esnasındaki hareketleri ayrıca Tablo 3.2’de detaylandırılmaktadır.



Şekil 3.1. Aeroelastite dâhil edilmiş yatay eksenli 3 kanatlı bir rüzgar türbininin 10 serbestlik derecesi

Kaynak: (Hansen, 2007)

Tablo 3.2. Yatay eksenli bir türbin serbestlik derecesi

Bölüm	Hareket	Açıklama
Nasel ve Rotor Hareketi	Yaw	Yaw, Türbinin nasele kısmının rüzgar yönüne göre dönme hareketidir. Türbin, maksimum enerji üretimi için rotor yüzeyini rüzgara dik konumlandırılır
	Pitch	Kanatların uzun eksenleri etrafında dönme hareketidir. Rüzgar hızına ve enerji üretim gereksinimlerine bağlı olarak kanat açıları sistem tarafından ayar ve optimize eder
	Roll	Nasel ve rotorun ekseni boyunca dönme hareketidir.
	Tilt	Rotorun yatay eksene göre eğilme açısıdır.
	Azimuth	Rotorun saat yönünde veya ters yönde dönme hareketidir.

Tablo 3.2. (Devamı) Yatay eksenli bir türbin serbestlik derecesi

Kulenin Hareketi	Lateral (Sideways)	Türbin kulesinin rüzgar etkisiyle yanlara doğru esnemesi veya salınımıdır.
	Longitudinal (Fore-aft)	Kule boyunca, ileri-geri hareket eden rüzgar yüklerinden kaynaklanan salınımlardır.
Kanatların Lokal Deformasyonları	Flapwise (Flatwise)	Kanadın rüzgar yüküne paralel düzlemde yukarı-aşağı eğilme hareketidir.
	Edgewise (Lead-lag)	Kanadın uçtan köke, rüzgar doğrultusuna dik düzlemdeki ileri-geri hareketidir.
	Torsion (Twist)	Kanadın uzun eksenli boyunca burulma hareketi; rüzgar yükü ve aerodinamiğiyle ilişkilidir.

3.3. Yatay Eksenli Türbinde Güç Düzenleme Sistemleri

3.3.1. Kontrol Stratejileri

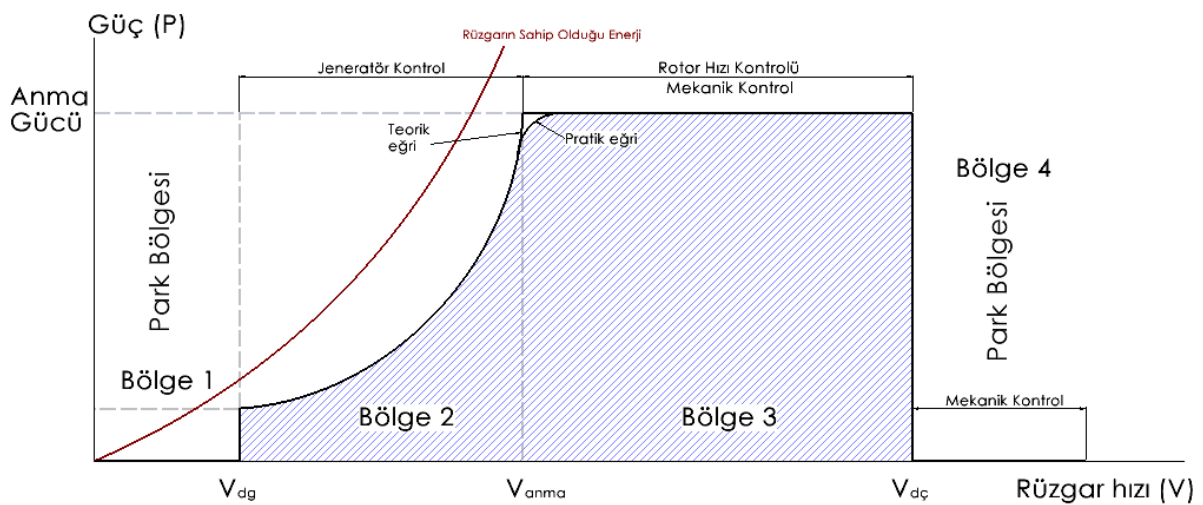
Rüzgar türbinlerinin kontrol stratejileri, iki ana bağımsız özellik çerçevesinde (rüzgar hızı ve türbin gücü) sınıflandırılabilir ve bu özellikler, istenen uygulama gereksinimlerine göre birleştirilebilir. İlk yaklaşım, rotor hızının uyarlanabilirliğine dayanan üç farklı konsepti içerir. Sabit hız konseptinde türbin şebekeye bağlı olduğu sürede tek bir sabit hızda çalışır. Bu konsept, düşük maliyetli ve basit tasarımıyla öne çıkar ancak aerodinamik verimlilik özellikle düşük rüzgar hızlarında sınırlıdır (Garcia-Sanz vd., 2011). Çift hız konsepti, rotor hızı, mevcut rüzgar koşullarına bağlı olarak iki farklı hız arasında değiştirilebilir. Hız değişimi genellikle rüzgar hızının ani artışlarına cevap vermez, bunun yerine ortalama rüzgar hızına göre ayarlanır. Bu yöntem, performansı artırırken mekanik yükleri sınırlı ölçüde azaltır (Garcia-Sanz vd., 2011). Değişken hız konsepti, rotor hızının mevcut rüzgar hızına veya türbinin güç çıkışına göre bir kontrolör tarafından sürekli olarak uyarlandığı durumu içerir. Bu esneklik, daha yüksek aerodinamik verimlilik sağlar ve yıllık enerji üretimini artırır (Garcia-Sanz vd., 2011). Güç, bir güç dönüştürücü aracılığıyla şebekeye iletilir ve rotor hızı geniş bir bant aralığında değişebilir. İkinci yaklaşım, rüzgardan alınan gücün sınırlandırılmasına odaklanan üç temel kontrol konseptini içerir. Stall kontrol konseptinde rotor kanatlarının hücum açısının türbinin kurulum aşamasında sabit bir açıyla ayarlanır. Rüzgar hızı, türbinin tasarlandığı nominal rüzgar hızını aştığında, kanatlar pasif olarak stall durumuna girerek gücü sınırlar. Bu yöntem, düşük maliyeti ve basitliği nedeniyle geçmişte yaygın olarak kullanılmıştır. Aktif stall kontrol konseptinde kanatların eksenleri etrafında döndürülerek aktif olarak stall oluşturulur. Bu yöntem, pasif stall kontrolüne göre daha hassas bir güç kontrolü sağlar ve düşük rüzgar hızlarında performansı artırabilir. Ancak, daha karmaşık bir kontrol mekanizması gerektirir. Pitch kontrol konseptinde

ise kanatların hücum açısı aerodinamik kuvvetleri ve güç çıkışını kontrol etmek için aktif olarak değiştirilir. Kanatlar, eksenleri etrafında döndürülerek fazla güç çıktısını sınırlamak için rüzgarı kesme (feather) pozisyonuna getirilir veya düşük hızlarda maksimum güç yakalamak için ince bir açıyla ayarlanır. Bu yöntem, özellikle değişken hız konsepti ile birlikte kullanıldığında, yüksek verimlilik ve güvenilirlik sağlar. Bu kontrol stratejileri, rüzgar türbinlerinin tasarımında aerodinamik verimlilik, mekanik yükler ve maliyet gibi kritik faktörler arasında bir denge sağlamayı hedefler. Günümüzde, değişken hız konsepti ve pitch kontrol kombinasyonu, daha fazla enerji üretimi nedeniyle en yaygın kullanılan yöntemler arasındadır (Garcia-Sanz, 2011; Hoffmann, 2002).

3.3.2. Kontrol Sistemleri

Değişken hızda pitch kontrollü bir rüzgar türbini için genel bir niteliksel güç eğrisi ve işletim bölgeleri Şekil 3.2’de olduğu gibi karşımıza çıkmaktadır. Şekil üzerinde dört bölge ve iki ana alan (Bölge 2 - Bölge 3) vurgulanmaktadır. Türbinin anma gücü (P_{anma}) yani şebekeye sağlanan gerçek güç, grafiği anma gücünün altı ve üstü olmak üzere iki ana alana ayırır. Anma gücünün altında, rüzgar türbini toplam tasarım gücünün yalnızca bir kısmını üretir; bu nedenle bir optimizasyon stratejisi uygulanması gerekir. Anma gücünün üstünde ise, bir güç sınırlama stratejisi gereklidir.

Devreye giriş hızı, türbinin çalışmaya başladığı ve aktif güç üretmeye başladığı hızdır ki bu hızda türbinin enerji kayıplarınının telafi edilecek kadar gücü yakalaması gerekmektedir. Anma hızı, sistemin nominal güç ürettiği hızdır, jeneratörün nominal çıkış gücüyle aynıdır.



Şekil 3.2. Rüzgar türbini güç-rüzgar hızı eğrisi

Kaynak: (Sohoni vd., 2016)

Devreden çıkış hızı ise kapanmadan çalışabileceği maksimum sınır hızı göstermektedir. Türbin bu hızı aştığında durdurulur (Bölge 4) ve rüzgarın neden olabileceği hasarlardan türbin korunmuş olur. Yüksek hızlarda türbinin kapatılması, aşırı mekanik yüklerin (aerodinamik yük kaynaklı), dönüş hızı arttıkça santrifüj yüklerin artmasının, şebeke kararlılığının bozulması ve jeneratör kapasite sınırları gibi bağıl nedenlerden dolayı gerçekleştirilir (Deshmukh vd., 2015; Jargalsaikhan vd., 2022). Yeterli rüzgar hızının olmadığı veya aşırı hızın bulunduğu bölgeler, park bölgesi olarak adlandırılır. Yeterli rüzgar hızının sağlandığı ikinci bölge ise geçiş bölgesidir. Burada rotor hızı maksimum değerlere yaklaşır ancak istenen uç hız oranını elde etmek mümkün değildir. Türbinin anma gücüne ulaşabilmesi için tork artırılmalıdır. Bu genellikle, yüksek eğimli bir tork/rotor hızı referansı izlenerek veya kapalı döngü bir kontrolör kullanılarak sağlanır. Türbin, jeneratör üzerindeki elektriksel torku düzenleyerek rotor hızını optimize eder. Bu süreç, özellikle düşük ve orta rüzgar hızlarında türbinin sürekli olarak maksimum güç noktası (MPP) etrafında çalışmasını sağlar. Üçüncü bölge ise *pitch kontrolünün* aktif olduğu bölgedir. Bu bölgede, gelen gücü sınırlamak, rotor hızını kontrol etmek ve mekanik yükleri en aza indirmek için kanat açısının değiştirilmesi gerekir. Yük azaltımının kontrolör tasarımında birincil hedef olarak belirlenmesi veya yükleri azaltmak amacıyla kanat bağımsız kontrol stratejilerinin uygulanması, önemli maliyet tasarrufu sağlarken türbinin ömrünü de uzatabilir (Garcia-Sanz, 2011). Bu iki bölgeye ait strateji Tablo 3.3’de özetlenmektedir.

Tablo 3.3. Kontrol Stratejisi

Özellik	Bölge 2 (MPPT Kontrol)	Bölge 3 (Pitch Kontrol)
Amaç	Maksimum güç üretimi	Güç ve yük sınırlaması
Kontrol Yöntemi	Elektriksel tork kontrolü	Kanat açısı (pitch) kontrolü
Verimlilik	Maksimum aerodinamik verimlilik	Güvenlik ve kararlılık ön planda
Hedeflenen Çıkış	Maksimum güç noktası	Nominal güç

3.4. Tasarım Yük Durumu (Design Load Case – DLC)

Bir türbinde çalışma koşulları altında aşağıda listelenen yük tipleri gözlemlenebilir (Khalid, 2019):

- Sabit yükler; davranışı tahmin edilebilir, destek yapısının ağırlığı gibi iç yüklerdir.
- Döngüsel yükler; tekrarlı davranış sergileyen ve tahmin edilebilen yüklerdir. Çalışan bir türbinin kanat ağırlığı örnek verilebilir.

- Geçici yükler; bilinen veya tahmin edilebilir yoğunlukta fakat kısa süreli. Tahrik milindeki fren yükleri gibi mekanik yüklerdir.
- Stokastik yükler; sayısal modelleme ile tahmin edilen rastgele yüklerdir. Türbin üzerindeki türbülanslı rüzgar yükleri örnek olarak verilebilir.

Yapısal analiz için, olası yük türleri ayrı ayrı ve birleştirilerek ele alınmalı ve bunların etkileşimleri dikkate alınmalıdır. Farklı yük kombinasyonları, yapı için benzersiz koşullar oluşturur ve bu koşullar *yük durumları* (load cases) olarak adlandırılır. Bu yük durumları için çalışma durumu, farklı *DLC* olarak *IEC 61400* standartında sunulmaktadır. *DLC*'ler, türbinin ömrü boyunca karşılaşılabileceği tüm olası yükleme koşullarını simüle etmek ve bu koşullara dayanabilecek şekilde türbin tasarımını optimize etmek için kullanılır. *DLC*, rüzgar türbinlerinin tasarım ve analiz sürecinde, standartlara (*IEC 61400*) uygun olarak belirlenen belirli yükleme durumlarını ifade eder. Bu yükleme durumları, türbinin hem normal çalışma koşullarında hem de aşırı durumlarda karşılaşılabileceği tüm olası çevresel ve operasyonel koşulları temsil eder. Bu yük durumları, türbin performansının farklı senaryolarda değerlendirilmesini sağlayarak, mühendislerin olası arıza noktalarını tespit etmesine ve bu koşullara dayanabilecek türbinler tasarlamasına olanak tanır.

Ayrıca, *DLC*'lerin hesaplamalı analizlerde kullanımı, yapısal modellerin doğruluğunu ve maliyet etkinliğini artırırken tasarım sürecini optimize etmek için büyük önem taşır. Düzenleyici uyumluluğu sağlamak için *DLC*'lere uymak genellikle zorunlu olup, türbinlerin sertifikasyon ve uluslararası pazarlarda onay alabilmesi için gereklidir. (Gozcu ve Verelst, 2019).

DLC'ler tarafından öngörülen tasarım senaryoları, amaçlanan kurulum sahasının rüzgar hızı ve türbülans parametreleri açısından tanımlanan *IEC* standart sınıfına bağlıdır. Örneğin, *IB* sınıfı bir türbin 50,0 m/s'lik bir saha referans rüzgar hızı ve orta türbülans çalışma koşullarında tanımlanır. *IEC* standardına göre bu sınıfa ait bir türbin, türbin göbeği yüksekliğinde 50 yıllık tekrarlama periyoduna sahip aşırı 10 dakikalık ortalama rüzgar hızının, V_{ref} ile gösterilen, 50,0 m/s'den düşük veya eşit olduğu iklimlere, 15 m/s'lik 10 dakikalık ortalama rüzgar hızında, I_{ref} ile gösterilen, 0,14'e eşit bir göbek yüksekliği türbülans yoğunluğuna dayanacak şekilde tasarlanır (Sorensen vd., 2002). Başka bir örnekleme yapıcak olursak, *IA* sınıfı *IB* sınıfı ile bir fark dışında aynı koşulları temsil eder. *IA* yüksek türbülans bölgelerinde çalışan türbinler için tanımlanmıştır. Nihai ve yorulma analizi altında tanımlanan standart Tablo 3.4 üzerinde gösterilmektedir. Analiz tipi olarak *N* ve *Y* sırasıyla nihai ve yorulma durumlarını temsil eder.

Bu tanımlamalarda türbinin çalışma koşullarını belirten ifadeler; V_g başlangıç hızı V_h türbin rotor göbeğindeki hızı ve V_c ise türbinin çalışmayı sonlandırdığı hızları temsil etmektedir.

Tablo 3.4. IEC 61400 Güç üretimi için nihai ve yorulma koşulları

	DLC	Rüzgar şartları	Analiz tipi
Güç Üretimi	1.1	NTM $V_g \text{ m/s} < V_h < V_c \text{ m/s}$	N
	1.2	NTM $V_g \text{ m/s} < V_h < V_c \text{ m/s}$	Y

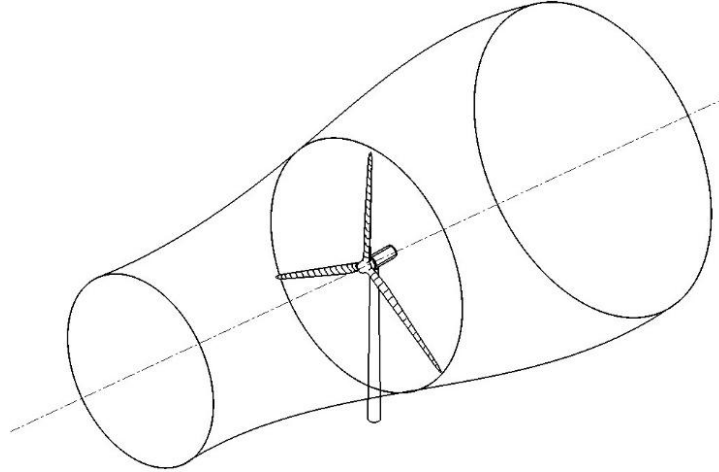
Kaynak: (IEC 61400-1)

3.5. Yatay Eksenli Rüzgar Türbini Aerodinamiği

Rüzgar türbini, rüzgarın kinetik enerjisinden yararlanılmak için tasarlanmış sistemlerdir. Hava kütlesi, türbin rotorunun dönüşüyle çizdiği diskten geçerken kinetik enerjisinin bir kısmını kaybeder. Burada enerji kaybı, rüzgar türbininin rotor diskinden geçen hava kütlesinin bir kısmının kinetik enerjisinin türbin kanatları tarafından alınmasından kaynaklanır. Pratik yatay eksenli rüzgar türbini tasarımlarında, rüzgardan kinetik enerjiyi faydalı enerjiye dönüştürmek için kanat profilleri (airfoil) kullanılır. Kanatlar, rüzgar akışıyla etkileşime girerek kinetik enerjiyi mekanik enerjiye dönüştürür. Bu dönüşüm sırasında, kanatların rüzgar akışını saptırması ve enerji çekmesi nedeniyle rüzgar hızında düşüş gözlemlenir. Rotor diskinden geçen hava kütlesi, diskin dışındaki hava ile karışmaz ve sonucunda ayrışma gerçekleşir. Etkilenen bu hava kütlesinin tanımlanması için rotor diski boyunca uzanan bir yüzey çizilebilir ve bu yüzey yukarı ve aşağı akışa kadar uzanan dairesel kesitli uzun bir akış tüpü (streamtube) oluşturur (Bknz Şekil 3.3). Akış tüpünün içerisindeki havanın kinetik enerjisi azaldığı için hızında yavaşlama gözlemlenirken, akış tüpünün dışında yani rotor diski yakınından geçen havada ise hem yavaşlama hem de hızlanma etkileri gözlemlenir. Türbinler düşük Mach sayısında çalıştıkları için (Genellikle ses hızının %30'u veya daha azı olacak şekilde) akış tüpü içerisindeki koşullarda havanın sıkıştırılabilirlik etkisi küçük olur ve yoğunluk değişimleri ihmal edilir. Bu sebeple pratikte akış, sıkıştırılamaz akış olarak kabul edilir ve havanın yavaşlaması nedeniyle akış tüpünün kesit alanı genişler. Bernoulli İlkesi gereği, aynı zamanda rotor diski öncesi akıştaki bu yavaşlama kinetik enerjinin azalmasına bağlı olarak statik basıncın artmasına yol açar. Rotor diskinden geçen havanın (tasarım gereği, türbin kanatları üzerinde bir kuvvet oluşturmak için statik basınç farkına ihtiyaç

duyar) statik basıncı düşer ve diskten ayrılmasıyla birlikte art izi oluşturur. Diskten ayrılan bu hava özelliğinde, atmosferik basıncın altında bir statik basınç ve yavaşlamış bir rüzgar hızına sahiptir. Türbinden uzakta, iz bölgesinde statik basınç tekrar atmosferik seviyeye ulaşır, ancak bu süreçte kinetik enerji azalır. Sonuç olarak, türbinin yukarı akışından aşağı akışına kadar statik basınç değişmez, ancak kinetik enerji azalır (Burton vd., 2001; Manwell vd., 2006).

Özet olarak, rotor diski öncesi, rüzgar türbininin varlığı akış hattında bir engel oluşturur. Yavaşlayan hava kinetik enerjisi kaybeder ve bu enerji, statik basıncı artırır. Rotor diskinden geçen hava türbin kanatları üzerinde bir kuvvet oluşturmak için statik basınç farkına ihtiyaç duyar. Bu basınç farkı sayesinde türbin kinetik enerjisi alır. Enerji dönüşümü sırasında rotor kanatları etrafındaki düşük basınçlı bölgenin varlığı, statik basınçta ani bir düşüş oluşturur. Rotor diskinden geçen hava, düşük hız ve düşük basınç ile art izi bölgesine girer. Statik basınç yeniden yükselir ve atmosferik basınca ulaşır ancak kinetik enerji düşer.



Şekil 3.3. Akım tüpü modeli

Kaynak: (Burton vd., 2001)

3.5.1. Aktüatör Disk ve Betz Limiti

Betz Limiti (Betz, 1920), Momentum Teorisine (Aktüatör Disk) (Rankine, 1865) dayanır ve rüzgar türbinlerinin verimliliği için önemli bir teorik üst sınır oluşturur. Genellikle aerodinamik rotor modellerini doğrularken bir kılavuz olarak kullanılır (Sørensen vd., 2022). Momentum teorisi, rüzgar türbinlerinin performansını değerlendirmek için kontrol hacmi yaklaşımını kullanır. Kontrol hacmi üzerinde, kütle korunumu, aksel ve açısal momentum dengeleri ile enerjinin korunumu gibi fiziksel prensipler dikkate alınır.

Momentum teorisi akış hızındaki değişimlerin rüzgar türbin rotorunda üretilen itme kuvvetine ve güce nasıl etki ettiğini açıklayarak aerodinamik tasarım için önemli bir çerçeve

sunar. Bu kapsamda, akışın rotor düzlemi öncesinde ve sonrasındaki hız ve basınç değişimleri analiz edilerek, tasarımda maksimum verimliliği hedefleyen aerodinamik optimizasyon stratejileri geliştirilebilir. Temelinde aktüatör disk teorisi akış için şu koşulları kabul eder (Burton vd., 2001):

1. Akış sıkıştırılmaz ve kararlıdır.
2. Aktüatör disk, türbin kanatlarını temsil eder ve akıştan enerji çeker.
3. Disk boyunca bir basınç süreksizliği oluşur.
4. Akış, diskten geçerken ve arkasındaki art izde düzgün dağılır.
5. Disk, akışta dönel bileşen (swirl) oluşturmaz.

Yukarı akışta (upstream) akım tüpünün kesit alanı, aktüatör disk kesit alanından daha küçüktür ve aşağı akışa (downstream) doğru, kütleli debinin sabit kalmasından dolayı, büyümektedir. Akış tüpünde birim zamanda geçen hava kütlesi:

$$\rho A_{\infty} U_{\infty} = \rho A_{ad} U_{ad} = \rho A_{art} U_{art} \quad (3.1)$$

şeklinde ifade edilir. Burada ρ hava yoğunluğunu, A kesit alanını ve U akış hızını temsil etmektedir. Ayrıca indislerde ∞ sembolü akış tüpünden çok uzaktaki, ad aktüatör diskteki, art ise uzak art izi koşullarını temsil eder. Diskin yukarı ve aşağı kısmındaki hız değişikliği, serbest akış hızına bindirilen indüklenmiş hız bileşeni olarak düşünülebilir.

$$U_{ad} = U_{\infty}(1 - a) \quad (3.2)$$

Diskteki indüklenmiş hızın akış yönündeki (eksenel) bileşeni $-aU_{\infty}$ ile ifade edilir. Burada a aksenal akış indüksiyon faktörü olup akışın ne kadar yavaşlatıldığını gösteren boyutsuz bir parametredir. Aksenal indüksiyon faktörü a , türbin güç katsayısı C_p ve türbin tork katsayısı C_t arasındaki ilişki momentum teorisi kullanılarak türetilir (Betz, 1920).

Türbinden geçen hava $U_{\infty} - U_{art}$ hızındaki genel bir değişikliğe uğrar ve momentum değişim hızı şu şekilde ifade edilir:

$$\text{Momentum değişim hızı} = (U_{\infty} - U_{art}) \rho A_{ad} U_{ad} \quad (3.3)$$

Momentum değişikliğine neden olan kuvvet, aktüatör diskin üzerindeki basınç farkından $P_{ad}^+ - P_{ad}^-$ ve diskin aksenal bileşeninden kaynaklanır. Burada P_{ad}^+ diskin yukarı tarafındaki basınç olup P_{ad}^- ise diskin aşağı tarafındaki basıncı temsil eder. Diskin yukarı ve aşağı yüzeyindeki basınç farkı, akışkanın türbin tarafından yavaşlatılmasına ve momentum kaybetmesine yol açar. Bu da türbinin üreteceği güçle doğrudan ilişkilidir. Akım tüpünün

(streamtube) sınırındaki eğimli yüzeylerde bir basınç etkisi oluşur. Genellikle bu basınç etkisi, ortam basıncı (ambient pressure) olduğu varsayılır. Ortam basıncı olduğu varsayıldığı için, bu yüzeyin basınca bağlı katkısının sıfır olduğu kabul edilir ve detaylı inceleme yapılmaz. Bu yüzey basıncı, aslında hızın aksenal değişiminden dolayı ortam basıncından farklıdır (Bknz Şekil 3.4). Yani, yüzey boyunca küçük basınç değişimleri gerçekleşir. Diskin yukarı akış bölgesinden aşağı akış bölgesine kadar basıncın integrali alındığında (yani toplamı hesaplandığında), bu basınç etkisinin sıfır olduğu gösterilebilir.

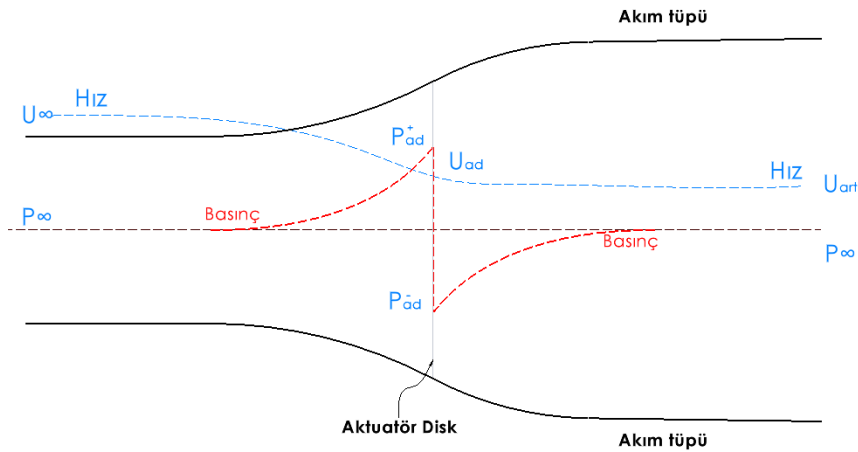
Yukarı akışta türbinin akışa karşı yaptığı katkı, aşağı akışta tam olarak dengelenir. Bu, akım tüpünün eğimli yüzeyinin toplam etkisinin sıfır olacağı kabul edilir:

$$(P_{ad}^+ - P_{ad}^-)A_{ad} = (U_{\infty} - U_{art})\rho A_{ad}U_{ad} \quad (3.4)$$

Bernoulli denklemi şunu ifade eder: durağan koşullar altında, birim akışkan hacmindeki toplam enerji (kinetik enerji, statik basınç enerjisi ve potansiyel enerji) akışkan üzerinde herhangi bir iş yapılmadığı veya akışkan tarafından iş yapılmadığı sürece sabit kalır (Batchelor, 2000). Bu yüzden Bernoulli denklemini yukarı akış ve aşağı akış için ayrı ayrı yazılması gerekir:

Bernoulli denklemi:

$$\frac{1}{2}\rho U^2 + p + \rho gh = sbt. \quad (3.5)$$



Şekil 3.4. Akım tüpü modeli, hız ve basınç dağılımı

Kaynak: (Burton vd., 2001)

Yukarı uzak akış (far upstream):

$$\frac{1}{2}\rho_{\infty}U_{\infty}^2 + P_{\infty} + \rho_{\infty}gh_{\infty} = \frac{1}{2}\rho_{ad}U_{ad}^2 + P_{ad}^+ + \rho_{ad}gh_{ad} \quad (3.6)$$

Eğer akış hızı düşük Mach sayısında ($M < 0,3$) ise, akış sıkıştırılmaz ($\rho_{\infty} = \rho_{ad}$) olarak kabul edilebilir ve kaldırma etkisinden bağımsızdır ($\rho gh_{\infty} = \rho gh_{ad}$)

$$\frac{1}{2}\rho U_{\infty}^2 + P_{\infty} = \frac{1}{2}\rho U_{ad}^2 + P_{ad}^+ \quad (3.7)$$

Aşağı akış (far downstream) benzer şekilde hesaplanır:

$$\frac{1}{2}\rho U_{art}^2 + P_{\infty} = \frac{1}{2}\rho U_{ad}^2 + P_{ad}^- \quad (3.8)$$

Bu iki denklemi birbirinden çıkartarak basınç farkını elde edilir:

$$P_{ad}^+ - P_{ad}^- = \frac{1}{2}\rho(U_{\infty}^2 - U_{art}^2) \quad (3.9)$$

Denklem (3.4)'de yer alan aktüatör disk boyunca basınç değişiminden:

$$(U_{\infty} - U_{art})\rho A_{ad}U_{\infty}(1 - a) = \frac{1}{2}\rho(U_{\infty}^2 - U_{art}^2)A_{ad} \quad (3.10)$$

Sadeleştirilirse,

$$U_{art} = (1 - 2a)U_{\infty} \quad (3.11)$$

Bunun sonucunda eksenel hız kaybının yarısı aktüatör diskinin yukarısında, yarısı da aşağısında gerçekleştiği gözlemlenir. Buradan bir türbin için güç katsayısı elde edilebilmektedir. Denklem 3.4'ü ele alırsak itki kuvveti şuna eşit olur:

$$T = (P_{ad}^+ - P_{ad}^-)A_{ad} = 2\rho A_{ad}U_{\infty}^2 a(1 - a) \quad (3.12)$$

Kuvvet aktüatör diski üzerinde yoğunlaştığından, kuvvet tarafından yapılan işin hızı TU_{ad} 'dir. Dolayısıyla türbinde elde edilen güç şu şekilde ifade edilir

$$P_G = TU_{ad} = 2\rho A_{ad}U_{\infty}^3 a(1 - a)^2 \quad (3.13)$$

P_G burada gücü temsil etmektedir ve güç katsayısı olan C_P şu şekilde tanımlanır

$$C_P = \frac{P_G}{\frac{1}{2}\rho U_{\infty}^3 A_{ad}} \quad (3.14)$$

Bu denklemdeki payda, aktüatör diski olmadığı durumdaki havadaki mevcut güç miktarını temsil eder. Dolayısıyla şu şekilde yazılabilir:

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (3.15)$$

Betz limiti, aynı zamanda Lanchester–Betz limiti veya Betz–Joukowski limiti olarak da adlandırılır. Ayrıca güç katsayısının ulaşabileceği maksimum değer Betz limiti olarak bilinir. Güç katsayısının (C_p) maksimum değeri, aşağıdaki türev sifira eşitlendiğinde ortaya çıkar (De Lellis vd., 2018):

$$\frac{dC_p}{da} = 4(1 - a)(1 - 3a) = 0 \quad (3.16)$$

Bu denklemin çözümünde, $a = \frac{1}{3}$ değeri elde edilir. Böylece maksimum güç katsayısı şu şekilde ifade edilir:

$$C_{pmax} = \frac{16}{27} \cong 0,593 \quad (3.17)$$

Denklem (3.12) ile verilen basınç düşüşünden kaynaklanan aktüatör diski üzerindeki kuvvet, itme katsayısı C_T 'yi verecek şekilde boyutsuzlaştırılabilir. Maksimum değer için $a = \frac{1}{3}$ yazıldığında C_{Tmax} elde edilir.

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 A_{ad}} \quad (3.18)$$

$$C_T = 4a(1 - a) \quad (3.19)$$

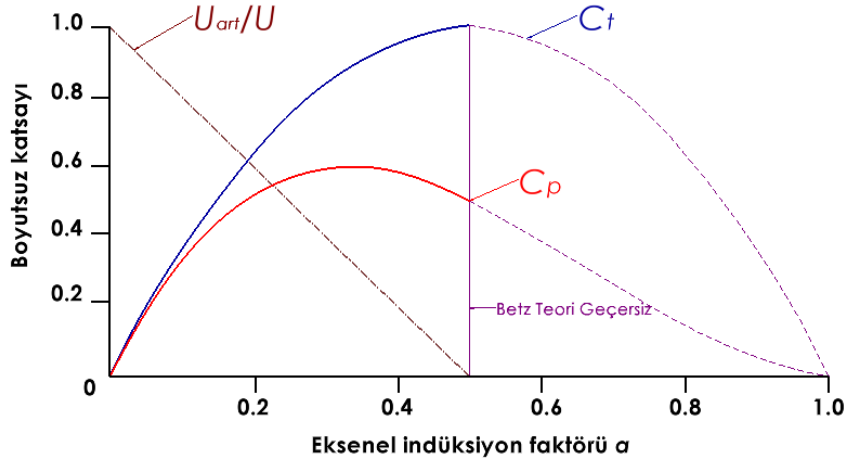
$$C_{Tmax} = \frac{8}{9} \cong 0,89 \quad (3.20)$$

Güç katsayısının (C_p) ve itme katsayısının indüksiyon faktörüyle (a) değişimi Şekil 3.3'de gösterilmiştir. Kesikli çizgiler teorinin belirli sınırlar içerisinde geçerliliğinin olmadığı bölgeyi ifade etmektedir ($a \geq \frac{1}{2}$). Art izi hızında yani $U_{art} = (1 - 2a)U_\infty$ için $a \geq \frac{1}{2}$ değerinde denklemde belirsizlik ortaya çıkar (negatif veya sifira eşit olma durumu). Bu koşullarda tarif edilen momentum teorisi artık geçerli olmaz ve ampirik bir düzenlemeye ihtiyaç duyar. Bu ifadeye ilerleyen bölümlerde değinilecektir.

3.5.2. Art İzi Dönmesinin Betz Limitine Etkisi

Lineer momentum teorisi, akışta dönme etkilerini ihmal eder ve gerçekçi bir analiz için bu etkilerin ele alınması önem arz etmektedir. Dönen rotorun oluşturduğu açıl momentum, art izdeki açıl momentum değişimine eşit olmalıdır. Rotorun arkasındaki akış ise, rotora uygulanan torka tepki olarak rotorun tersi yönünde döner. Akışta oluşan art izi dönüşünü gösteren halka şeklindeki bir akış tüpü modeli, Şekil 3.5’de resmedilmektedir.

Türbinin arkasında dönen art izi, rotasyonel yönde kinetik enerji içerir. Bu enerji, rüzgar türbininin faydalı iş olarak çıkarabileceği toplam enerjiden bir kayıp anlamına gelir. Yani türbin, rüzgarın enerjisini maksimum verimle dönüştüremez çünkü bir kısmı rotasyon hareketin enerjisine dönüşür. Düşük hızda yüksek tork üreten türbinler, genellikle daha az enerji elde eder. Bu çalışma koşulları, art izi rotasyonunu artırır ve daha fazla kinetik enerji kaybına neden olur. Buna karşılık, yüksek hızda düşük tork üreten türbinler, art izi rotasyonunun etkisini azaltabilir ve daha fazla güç üretebilir. Çok kanatlı çiftlik rüzgar türbinleri, genellikle düşük hızlarda çalışır ve yüksek tork üretir. Bu durum, art izi rotasyonunun etkisini artırarak verimliliği ciddi şekilde sınırlar. Bu tür türbinler, modern yüksek hızlı rüzgar türbinlerine kıyasla daha düşük bir verimle enerji üretir (Jonkman, 2003).



Şekil 3.5. C_p ve C_T eksenel indüksiyon faktörü olan a ile değişimi

Kaynak: (Manwell vd., 2006)

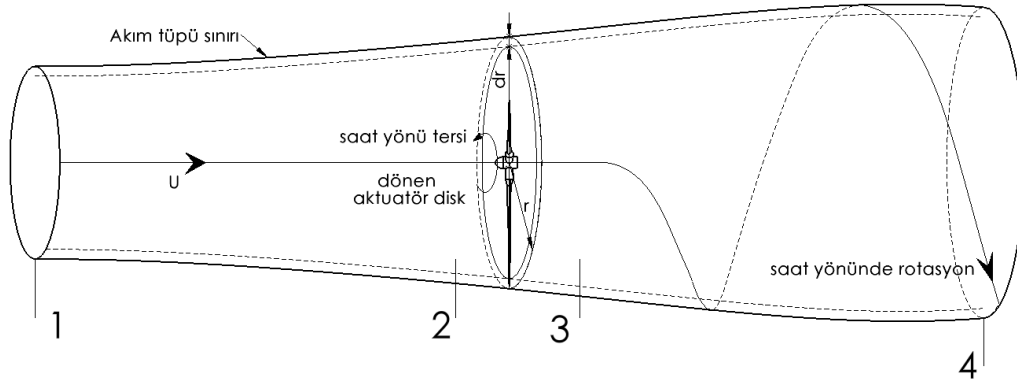
Akışta aktarılan açıl hızın (ω) rüzgar türbini rotorunun açıl hızına (Ω) göre küçük olduğu varsayılırsa, *uzak art izdeki basıncın serbest akımdaki basınca eşit olduğu da varsayılabilir*. Yarıçapı r , kalınlığı dr ve kesit alanı $2\pi r dr$ olan bir halkasal akış tüpü elemanı göz önünde bulundurulur (Bknz. Şekil 3.6). Basıncın, art iz rotasyonunun ve indüksiyon faktörlerinin tümünün yarıçapın bir fonksiyonu olduğu varsayılmıştır. Kanatların açıl hızıyla

hareket eden bir kontrol hacmi kullanılırsa, enerji denklemi, kanatlardan önceki ve sonraki kesitlerde uygulanarak kanatlar boyunca basınç farkı için bir ifade türetilebilir. Akış disk boyunca, kanatlara göre havanın açısal hızı Ω 'den $\Omega + \omega$ 'ya artarken (art izi hızına eşittir), hızın eksenel bileşeni sabit kalır.

$$P_2 - P_3 = \rho \left(\Omega + \frac{1}{2} \omega \right) \omega r^2 \quad (3.21)$$

Kalınlığı dr olan halkasal elemandaki itme kuvveti

$$dT = (P_2 - P_3)dA = \left[\rho \left(\Omega + \frac{1}{2} \omega \right) \omega r^2 \right] 2\pi r dr \quad (3.22)$$



Şekil 3.6. Art izi dönmesi (Lysen, 1982)

Açısal indüksiyon faktörü olan α' tanıma eklenmelidir (Glauert, 1926). Açısal indüksiyon faktörü α' , ω ile orantılı olarak tanımlanır ve $\omega = 0$ özel durumunda açısal indüksiyon faktörünün sıfıra indiği ve rotor diski modelinin orijinal aktüatör diski modeline dönüştüğü açıktır. Açısal indüksiyon faktörü α' :

$$\alpha' = \omega / 2\Omega \quad (3.23)$$

Art izi rotasyonu dâhil edilir ve indüklenen hızın yalnızca eksenel bileşenden değil (Ua), aynı zamanda rotor düzlemindeki bir bileşeni içerdiğini de hesaba katılması gerekmektedir ($r\Omega\alpha'$). Bu durumda itme kuvveti:

$$dT = 4\alpha'(1 + \alpha') \frac{1}{2} \rho \Omega^2 r^2 2\pi r dr \quad (3.24)$$

Önceki doğrusal momentum analizini takiben, halkasal kesit üzerindeki itme, eksenel indüksiyon faktörü α' 'yi kullanan aşağıdaki ifade ile de belirlenebilir

$$dT = 4a(1 - a) \frac{1}{2} \rho U^2 2\pi r dr \quad (3.25)$$

İtme kuvveti için indüksiyon faktörlerini eşitlersek şu ifadeyi elde ederiz

$$\frac{a(1 - a)}{a'(1 + a')} = \left(\frac{\Omega r}{U} \right)^2 = \lambda_r^2 \quad (3.26)$$

Denklemden λ_r , yerel hız oranıdır. Uç hızı oranı λ ise kanadın uç hızının serbest akış hızına oranıdır ve şöyle ifade edilir

$$\lambda = \frac{\Omega R}{U} \quad (3.27)$$

Yerel hız oranı (λ_r) rotor yarıçapındaki belirli bir ara noktadaki hızın rüzgar hızına olan oranıdır.

$$\lambda_r = \frac{\Omega_r}{U} = \frac{\lambda_r}{R} \quad (3.28)$$

Açısal momentum korunumunu uygulayarak rotor üzerindeki tork için ifade türetilebilir. Rotora uygulanan tork Q , art izinin açısal momentumundaki değişime eşit olmalıdır. Rotor diskinde hava tarafından bir tork uygulanması, hava üzerine eşit ve zıt yönde bir torkun uygulanmasını gerektirir. Bu tepki torkunun sonucu olarak hava, rotorun dönüş yönünün tersine dönmeye başlar; hava açısal momentum kazanır ve rotor diskinin art izinde hava parçacıklarının dönüş teğetsel bir hız bileşeni ile aksel bir hız bileşeni oluşur. Aktüatör diskinde giren akışın başlangıçta hiçbir dönüş hareketi yoktur. Ancak diskten çıkan akış bir rotasyona sahiptir ve bu rotasyon art izi boyunca sabit kalır. Havaya bu dönüş hareketinin aktarımı tamamen disk kalınlığı boyunca gerçekleşir. Teğetsel hız kademeli olarak kazanılır, kanat profiline gelen akışa göre profilin hücum açısı nedeniyle ürettikleri kaldırma kuvvetleri arasında yönlendirildiğinden, aktüatör disk boyunca teğetsel yönde hızlanır. Bu olay farklı profil yapısına sahip kanat kesiti üzerinde Şekil 3.7'de resmedilmiştir.

$$dQ = d\dot{m}(\omega r)(r) = (\rho U_2 2\pi r dr)(\omega r)(r) \quad (3.29)$$

Disk öncesi hız bileşeni U_2 ve açısal indüksiyon faktörü yerine yazılarak denklem tekrardan düzenlenir

$$dQ = 4a'(1 - a) \frac{1}{2} \rho U \Omega r^2 2\pi r dr \quad (3.30)$$

Her elemanda üretilen güç değeri $dP_G = \Omega dQ$, yerel hız cinsinden yazılabilir

$$dP_G = \frac{1}{2} \rho A U^3 \left[\frac{8}{\lambda^2} a' (1-a) \lambda_r^3 d\lambda_r \right] \quad (3.31)$$

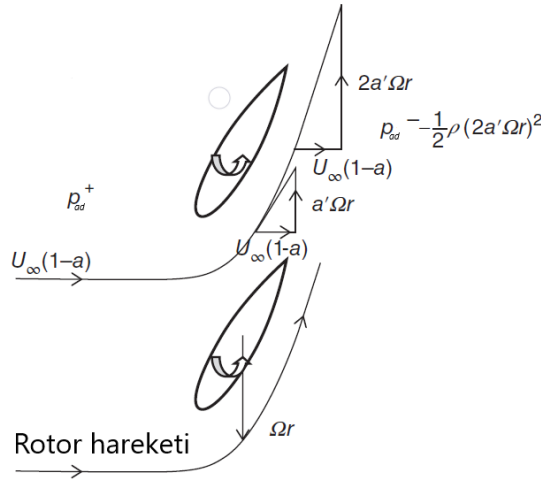
Bu formülden anlaşıldığı gibi, akım tüpünde yer alan dairesel kısmi kesit eksenel ve açısız indüksiyon faktörünün bir fonksiyonudur. Eksenel ve açısız indüksiyon faktörleri, rotor düzlemindeki hava akışının büyüklüğünü ve yönünü belirler. Yerel hız oranı ise uç hız oranıyla yarıçapın bir fonksiyonu olarak karşımıza çıkar. Bir önceki Betz Limiti kuramında açıklanan güç katsayısı, akım tüpündeki kısmi dairesel kesit için şu şekilde tanımlanabilir:

$$dC_p = \frac{dP_G}{\frac{1}{2} \rho A U^3} \quad (3.32)$$

$$C_p = \frac{8}{\lambda^2} \int_0^\lambda a' (1-a) \lambda_r^3 d\lambda_r \quad (3.33)$$

Yerel hız oranı λ_r , denklem. (3.28) tekrardan denklem. (3.27) de yazılırsa, açısız indüksiyon faktörü a' , yerel hız oranı ve eksenel indüksiyon faktörü türünden:

$$a' = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{\left[1 + \frac{4}{\lambda_r^2} a(1-a) \right]} \quad (3.34)$$



Şekil 3.7. Kanat profili kesitinde oluşan teğetsel kuvvet

Kaynak: (Burton vd., 2001)

Maksimum güç üretimi, $a'(1-a)$ teriminin maksimum olduğu durumda gerçekleşir. Bu durum, eksenel indüksiyon faktörü a' 'nin yerel hız oranı λ_r 'ye bağlı bir ifadeyle tanımlanır:

$$\lambda_r^2 = \frac{(1-a)(4a-1)^2}{1-3a} \quad (3.35)$$

Yukarıdaki denklemden görüldüğü üzere denklemin sol tarafının sifıra eşit olma durumu, eksenel indüksiyon faktörünün $a = 0,25$ olduğu durumdur.

Her dairesel kısmi kesit için maksimum güç denklem 3.26 dan elde edilir. Maksimum güç için eksenel indüksiyon faktörünü, her kısmi dairesel kesit için yerel uç hız oranının bir fonksiyonu olarak tanımlar:

$$a' = \frac{1-3a}{4a-1} \quad (3.36)$$

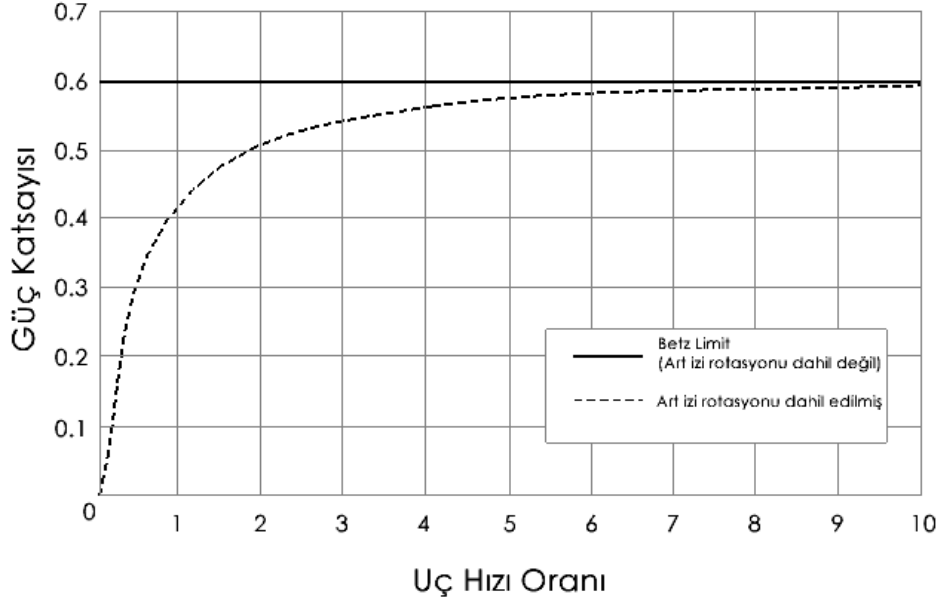
Eksenel indüksiyon faktörü a 'nın maksimum güç üretimi için nasıl değiştiğini anlamak amacıyla λ_r ile a arasındaki ilişkiye bakılır. Bunun için denklem (3.35) türevi alınır. Türev, maksimum güç koşullarında yerel hız oranındaki değişim ile ($d\lambda_r$) eksenel indüksiyon faktöründeki değişim (da) arasındaki ilişkiyi verir. Bu ilişki denklem (3.33) olan güç formülünde yazarsak maksimum güç ($C_{p,max}$) aşağıdaki integralle ifade edilir

$$C_{p,max} = \frac{24}{\lambda^2} \int_{a_1}^{a_2} \left[\frac{(1-a)(1-2a)(1-4a)}{(1-3a)} \right]^2 da \quad (3.37)$$

İntegralin alt limiti eksenel, yerel hız oranının sıfır olduğu duruma ($\lambda_r = 0$) integralin üst limiti ise yerel hız oranının uç hızı oranına eşit olduğu ($\lambda_r = \lambda$) durumdur. Üst limit için denklem (3.35) düzenlenirse, üst limit $a_2 = 1/3$ değeri için eksenel indüksiyon faktörünün üst sınırı olduğu ve bu değer için sonsuz derecede büyük bir uç hızı oranı verdiği görülür. Bu analiz sonuçları, önceki lineer momentum analizine dayanan ideal türbinin Betz limitini de gösteren Şekil 3.8'de grafiksel olarak temsil edilmiştir. Sonuçlar, uç hız oranı ne kadar yüksek olursa, C_p 'nin teorik maksimumuna o kadar yaklaşabileceğini göstermektedir.

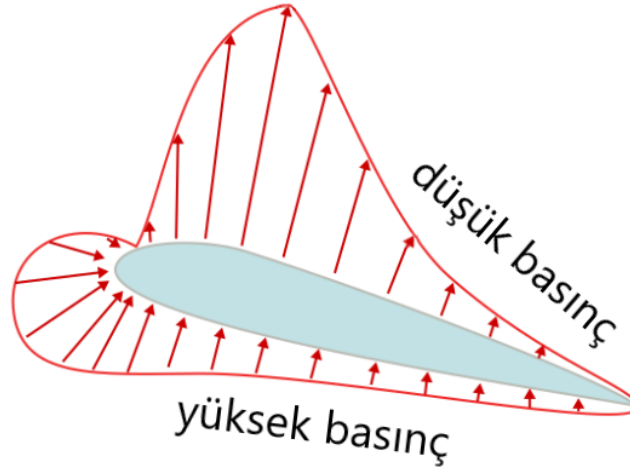
3.5.3. Kanat Elemanı / Momentum Teorisi

Türbin aerodinamiğinin anlaşılması için, rotor performansı ve aerodinamiğini etkileyen en büyük değişken, kanat profilleri ve şekillerinin aerodinamiği öncelikle anlaşılmalıdır. Türbin rotoru, hava akımı boyunca kanat profilinde oluşan basınç farkı sayesinde kaldırma kuvveti üreten bir sistemdir (Bknz Şekil 3.9). Bu basınç değişimi aktüatör disk ile temsil edilen basınç değişimine eşittir. Rotor güç üretimi ve itki kuvvetine bağlı olan eksenel ve açıl indüksiyon faktörleriyle karakterize ve Betz Limiti dâhilinde anlatılan aktüatör disk ile temsil edilen akış alanı, rotor kanat profillerindeki hava akışını tanımlamak için kullanılacaktır.



Şekil 3.8. Teorik maksimum güç katsayısı

Kaynak: (Tyagi ve Schmitz, 2025)

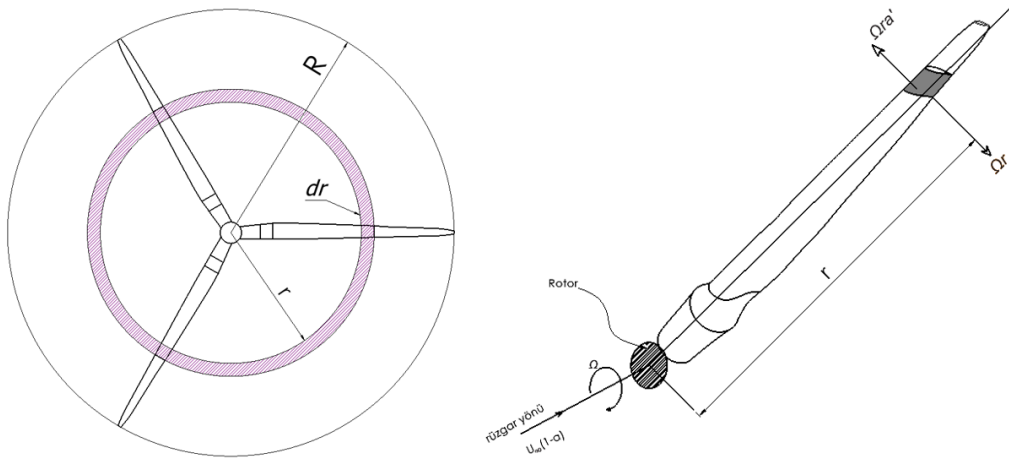


Şekil 3.9. Kanat profili üzerindeki basınç dağılımı

Kaynak: (Hau, 2013)

Rüzgar türbini kanatlarının üzerindeki aerodinamik kaldırma ve sürükleme kuvvetleri, dairesel kesitten geçen havanın aksenal ve açısıl momentumundaki değişimi sağlar. Bu değişim, kanatların yarıçapı r ve uzunluğu dr olan dilimler tarafından süpürülen kısmi dairesel alandan geçen tüm hava için geçerlidir (Bknz Şekil 3.10). Ayrıca, art izdeki dönme hareketi nedeniyle oluşan basınç düşüşü de bu kuvvetlerle dengelenir. Rotorun arkasında oluşan basınç düşüşü aksenal momentum değişimini etkilerken, uzak art izdeki dönme hareketine bağlı basınç düşüşü aksenal momentuma katkıda bulunmaz (Burton vd., 2001)

Kanat Elemanı ve Momentum Teorisi (BEMT) (Froude, 1878) temelinde momentum teorisinin kanat elemanında tanımlanmasıyla oluşur. Momentum teorisi *doğrusal* ve *açısal momentumun korunumu denklemleri* temel alınarak kanattaki kuvvetlerin kontrol hacmi analiziyle incelenmesini ifade eder, kanat eleman teorisi ise kanat geometrisine bağlı olarak kanat kesitindeki kuvvetlerin analizini ifade eder. Akış dairesel kontrol hacimlerine (Bknz Şekil 3.10) ayırarak her birinde momentum dengesi ve enerji korunumu uygulayan BEM teorisinde dairesel kesitler, rotorun etrafını çevreleyen ve akışın ilerleyip geri döndüğü akım yüzeyleri ile sınırlıdır.



Şekil 3.10. Kanat üzerinde r uzaklığında alınan dairesel kontrol hacmi

Kaynak: (Hansen, 2008; Raghavendra vd., 2020)

Bu yöntemde, rotor düzlemindeki indüklenen hızın nihai *art izi*ndeki hızın yarısına eşit olduğu ve kanatların bağımsız elemanlara bölünerek analiz edilebileceği kabul edilir. Ayrılan her dairesel kontrol hacmi diğerlerinden bağımsız olduğu varsayılır ve art izi genişlemesi hesaba katılmaz. Akış temelinde türbülanssız akıştır. Pratikte karşılaşılan farklı akış durumlarını tam olarak temsil etme konusunda sınırlamaları vardır (Zhao vd., 2019; Olczak vd., 2016). Ayrıca kanat elemanları, hava akışına karşı olan kanat profilleri ve bu akışa göre olan yönlendirmeleri temel alınarak analiz edilir. Burada kaldırma ve sürükleme kuvvetleri yalnızca iki boyutlu akış karakteristiklerine dayandırılır. Yani, elemanların çevresinde gerçekleşebilecek üç boyutlu akış etkileri (uç vorteksleri, çapraz akışlar gibi) göz ardı edilir (Jonkman vd., 2003). Bu varsayımlar nedeniyle, dinamik akış, sapma hatası, uç kaybı ve aşırı yüklenen rotora ilişkin çeşitli ampirik düzeltmeler uygulanmaktadır. Bu düzeltmelere bölümün ilerleyen kısımlarında değinilecektir.

Eksenel ve açısal indüksiyon faktörlerinin bir fonksiyonu olarak rotorun dairesel kesitindeki itki ve tork elde edilebilir. Lineer momentumun korunumu, yarıçapı r ve kalınlığı dr olan kontrol hacmine uygulanarak itki kuvvetine yapılan diferansiyel katkı dT türetilebilir:

$$dT = \rho U^2 4a(1-a)rdr \quad (3.38)$$

Benzer şekilde, açısal momentumun korunumu ile kanatlara aktarılan diferansiyel tork dQ ifadesi geliştirilebilir:

$$dQ = 4a'(1-a)\rho U r^3 \Omega dr \quad (3.39)$$

Kanat elemanı teorisinde, kanatlarda oluşan kuvvetler, kanat profili aerodinamik kuvvetleri olan *kaldırma* ve *sürüklenme kuvveti* ile *hücum açısının* bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir. Şekil 3.8'de kanat üzerinde taralı alan kanat elemanını temsil etmekte ve kanat N adet *elemana bölünerek* temsil edilmektedir. Elemanlar arasında aerodinamik etkileşim yoktur. Kanatlardaki kuvvetler yalnızca kanat profil şeklinin kaldırma ve sürüklenme özellikleri tarafından belirlenir. Kuvvet analizinde, kaldırma kuvveti etkin rüzgar doğrultusuna dik, sürüklenme kuvveti ise etkin rüzgar doğrultusuna paralel olarak hesaba katılır. Etkin rüzgar hızı, rotordaki rüzgar hızıyla ($U(1-a)$) kanadın dönüş hızından (Ωr) kaynaklanan bileşenin vektörel toplamıdır. Etkin rüzgar bileşeni, indüklenmiş açısal hız (kanadın dönme hareketi sonucu oluşur) ile ifade edilir:

$$\Omega r + (\omega/2)r = \Omega r + \Omega a' r = \Omega r(1+a') \quad (3.40)$$

Kanat profili üzerindeki çeşitli kuvvetlerin, açıların ve hızların kanat üzerindeki ilişkileri, Şekil 3.11'de detaylandırılmıştır. Ayrıca şekil üzerinde kanat burulma açısının (θ_t) tanımı, kanat ucuna göre yapılmıştır. Tanım için $\theta_t = \theta_p - \theta_{p,0}$ eşitliği de yazılabilmektedir. $\theta_{p,0}$, kanat ucu için pitch açısını ifade etmektedir. Burulma açısı kanat geometrisinin bir fonksiyonu olduğundan kanat pozisyonu değiştiğinde doğal olarak $\theta_{p,0}$ için de değişim gözlemlenecektir.

Kanat profili üzerinde belirtilen değişkenlerden yararlanılarak bir kanat profili için kuvvetler ve ilişkileri:

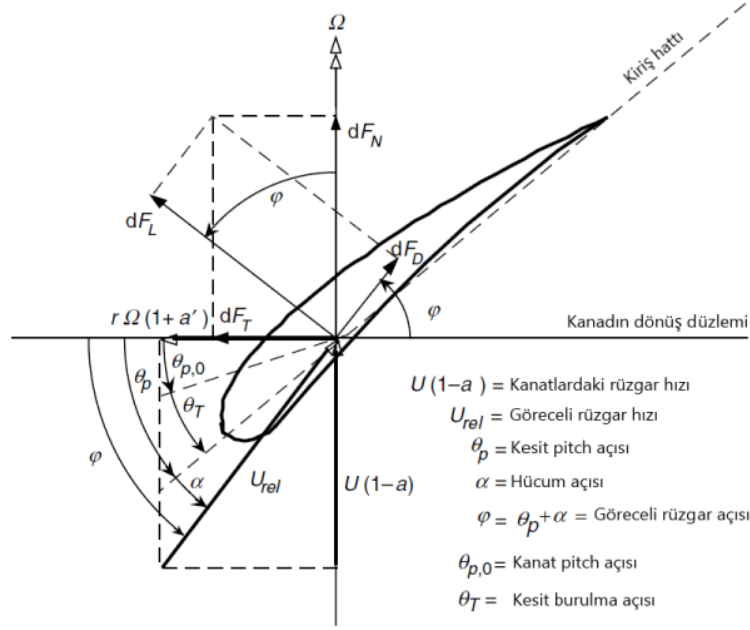
$$\tan\varphi = \frac{U(1-a)}{\Omega r(1+a')} = \frac{1-a}{(1+a')\lambda_r} \quad (3.41)$$

$$U_{rel} = \frac{U(1-a)}{\sin\varphi} \quad (3.42)$$

$$F_{Normal} = F_{Kaldırma} \times \cos(\varphi) + F_{Sürükleme} \times \sin(\varphi) \quad (3.43)$$

$$F_{Teğetsel} = F_{Kaldırma} \times \sin(\varphi) - F_{Sürükleme} \times \cos(\varphi) \quad (3.44)$$

Burada $\tan\varphi$ göreceli hız vektörünün bileşenlerini U_{rel} göreceli rüzgar hızını ifade etmektedir. Kanat elemanının üzerindeki kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri, eleman



Şekil 3.11. Genel bir kanat profili üzerindeki geometrik ve aerodinamik parametreler

Kaynak: (Manwell vd., 2006)

uzunluğunun dr diferansiyel birim uzunluğuna bölünmesiyle hesaplanır. Veter uzunluğu (c) burada elemanın aerodinamik özelliklerini normalize etmek ve etkili alanı tanımlamak için kullanılır. Genelde hesaplamalar üç boyutlu kanatlar için (bunlar sonlu açıklığa sahiptir ve kuvvet ile moment katsayıları kanat ucundaki akıştan etkilenir) yapılır. Buna karşılık iki boyutlu kanat verileri sonsuz açıklığa sahip olduğu için uç etkileri yok varsayılır ve ölçülen kuvvetler birim uzunluk başıdır. Böylece, elde edilen katsayılar, bağımsız bir referansla ilişkilendirilebilir (Manwell vd., 2006). Buradan kaldırma ve sürüklenme katsayıları C_l ve C_d boyutsuz olarak tanımlanabilir:

$$C_l = \frac{F_{Kaldırma}/birim\ uzunluk}{F_{Dinamik}/birim\ uzunluk} = \frac{F_l/birim\ uzunluk}{\frac{1}{2}\rho U_{rel}^2 c} \quad (3.45)$$

$$C_d = \frac{F_{Sürükleme}/birim\ uzunluk}{F_{Dinamik}/birim\ uzunluk} = \frac{F_d/birim\ uzunluk}{\frac{1}{2}\rho U_{rel}^2 c} \quad (3.46)$$

Aynı şekilde *normal kuvvet*, *teğetsel kuvvet* ve *pitching moment* eşitliği yazılabilir. Boyutsuz katsayılar (kaldırma katsayısı, sürüklenme katsayısı ve moment katsayısı) kanat profili üzerinde oluşan kuvvetleri akış hızı, akışın yoğunluğu ve kanadın geometrik özellikleri gibi faktörlere bağlı olarak normalize eder ve bu şekilde gerçek boyutlardan bağımsız analiz yapma imkânı sunar. Kanat profillerinin şekli akışın davranış biçimini etkilediğinden kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri de büyük ölçüde değişir. Profillerin aerodinamik performansları da bu katsayılar üzerinden belirlenir. Kanat profiline gelen akış yönüyle profil arasındaki açı (hücum açısı), bu kuvvetleri doğrudan etkiler (Manwell vd., 2006). Kanat profili ile akış hızının etkisi genellikle *Reynolds Sayısı* (Re) ile açıklanır. Reynold sayısı akışın durumu hakkında önemli, boyutsuz bir parametredir. Yüksek Re değerlerinde atalet kuvvetlerinin baskın olduğu türbülanslı akış olarak nitelendirilirken, düşük Re değerlerinde ise akış laminar akış olarak kabul edilir (Manwell vd., 2006):

$$Re = \frac{\text{Atalet Kuvvet}}{\text{Viskoz Kuvvet}} = \frac{\rho U_{rel} c}{\mu} \quad (3.47)$$

Diferansiyel birim uzunluğa sahip kanat elemanındaki kuvvetler, aerodinamik katsayılar ve akış parametreleri kullanılarak hesaplanır. Diferansiyel birim uzunluğa sahip kanat elemanındaki kuvvetler şu şekilde elde edilir:

$$dF_L = C_l \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 c dr \quad (3.48)$$

$$dF_D = C_d \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 c dr \quad (3.49)$$

$$dF_N = dF_L \cos(\varphi) + dF_D \sin(\varphi) \quad (3.50)$$

$$dF_T = dF_L \sin(\varphi) - dF_D \cos(\varphi) \quad (3.51)$$

Merkezden r uzaklıktaki kısmi dairesel kesitte S adet kanada sahip rotor için toplam normal kuvvet şu şekildedir:

$$dF_N = S \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 [C_l \cos(\varphi) + C_d \sin(\varphi)] c dr \quad (3.52)$$

Merkezden r uzaklıktaki kısmi dairesel kesitte, teğetsel kuvvetten dolayı oluşan diferansiyel tork şu şekildedir:

$$dQ = S r dF_T \quad (3.53)$$

$$dQ = S \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 [C_l \sin(\varphi) - C_d \cos(\varphi)] cr dr \quad (3.54)$$

Bölgesel doluluk oranı (local solidity) σ' ile ifade edilip bir kanat profiline sahip rotorun kesit düzlemindeki doluluk miktarını ifade eden boyutsuz parametredir ve $\sigma' = Sc/2\pi r$ olarak ifade edilir. Akış alanındaki kuvvet ve torku belirlemek için bölgesel doluluk oranı cinsinden normal kuvvet ve tork:

$$dF_N = \sigma' \pi \rho \frac{U^2 (1-a)^2}{\sin^2 \varphi} [C_l \cos(\varphi) + C_d \sin(\varphi)] r dr \quad (3.55)$$

$$dQ = \sigma' \pi \rho \frac{U^2 (1-a)^2}{\sin^2 \varphi} [C_l \sin(\varphi) - C_d \cos(\varphi)] r^2 dr \quad (3.56)$$

İndüksiyon faktörleri hesaplarırken (a ve a') pratikte kabul görmüş olan uygulama sürüklenme katsayısını sıfıra eşit almaktır ($C_d = 0$). Momentum ve kanat elemanı teorisinden elde edilen tork denklemi için sürüklenmeyi sıfıra eşitlersek:

$$a'/(1-a) = \sigma' C_l / (4\lambda_r \sin \varphi) \quad (3.57)$$

Aynı işlem elde edilen normal kuvvet denklemine uygulanırsa:

$$a/(1-a) = \sigma' C_l \cos \varphi / (4\sin^2 \varphi) \quad (3.58)$$

$$a/a' = \lambda_r / \tan \varphi \quad (3.59)$$

Denklem 3.57 ve denklem 3.58'den kaldırma katsayısı yerel hız oranı cinsinden aşağıdaki gibi elde edilir:

$$C_l = 4\sin \varphi \frac{(\cos \varphi - \lambda_r \sin \varphi)}{\sigma' (\sin \varphi + \lambda_r \cos \varphi)} \quad (3.60)$$

BEM teorisine göre her bir kanat elemanı için kaldırma katsayısı (C_l) ve hücum açısı (α), iki farklı eğrinin kesiştiği noktada belirlenir. Çözüm metodu olarak şu iki yöntem kullanılır:

1. BEM teorisinin tahmin ettiği C_l - α ilişkisini tanımlayan eğri (teorik model).
2. Kanat profilinin gerçek aerodinamik özelliklerini tanımlayan C_l - α eğrisi (deneysel veya hesaplamalı).

Bu kesişim noktası, kanadın hangi aerodinamik koşullar altında çalışacağını gösterir. Bu noktayı bulmak için iki yöntem kullanılır:

1. **Grafiksel Yöntem:** Elle yapılan hesaplamalar için daha uygundur. Ayrıca, modeldeki zayıf noktaları görselleştirme açısından fayda sağlar. Ancak büyük ölçekte veya karmaşık sistemlerde zaman alıcı olabilir.
2. **Sayısal Yöntem:** Genellikle bilgisayar destekli analizlerde tercih edilir ve iteratif bir süreçle kesişim noktası bulunur. Bu yöntem, hassas ve otomatik sonuçlar için daha uygundur.

Her bir kanat elemanındaki C_l - α değerleri belirlendikten sonra, kanat üzerindeki toplam aerodinamik kuvvetler hesaplanır. Bu hesaplama şu amaçlar için yapılır:

- Türbinin toplam ürettiği güç belirlenmesi.
- Türbin kanatlarının ve diğer yapısal bileşenlerinin maruz kaldığı aerodinamik kuvvetlerin analizi.

Bu işlem genellikle şu şekilde gerçekleştirilir:

- Kuvvetler, kanat boyunca yapılan bir integrasyon yoluyla hesaplanır.
- Eğer sınırlı sayıda kanat elemanı varsa, bu kuvvetler toplamı bir yaklaşım yöntemiyle belirlenir.

Rotorun rüzgardan elde ettiği güç ve her dairesel kesit için genel rotor güç katsayısı aşağıdaki denklemden hesaplanabilir:

$$dP_G = \Omega dQ \quad (3.61)$$

Yukarıdaki denklemde Ω ifadesi rotor için dönüş hızını temsil etmektedir. Rotordan elde edilen toplam güç ise:

$$P_G = \int_H^R dP = \int_H^R \Omega dQ \quad (3.62)$$

Burada, integralde alt sınır olarak ifade edilen H rotor göbeğinin yarıçapını ifade etmektedir. Yerel hız oranı ve diferansiyel tork tanımlamasını güç katsayısı için uygularsak (C_p burada rotorda elde edilen gücün rüzgar gücüne oranıdır $C_p = P_G/P_{rüzgar}$):

$$C_p = \frac{2}{\lambda^2} \int_{\lambda_H}^{\lambda} \sigma' C_l (1 - a)^2 \left(\frac{1}{\sin\phi} \right) [1 - (C_d/C_l) \cot\phi] \lambda_r^2 d\lambda_r \quad (3.63)$$

H indisinden de anlaşılacağı üzere λ_H , rotor göbeğindeki yerel hız oranını ifade eder. Denklem 3.58 ve 3.59, denklem 3.63’de yerine yazılırsa güç katsayısı en sade şekliyle aşağıdaki gibi elde edilir:

$$C_p = \frac{8}{\lambda^2} \int_{\lambda_H}^{\lambda} \lambda_r^3 a' (1 - a) [1 - (C_d/C_l) \cot \varphi] d\lambda_r \quad (3.64)$$

3.5.4. Kanat Elemanı / Momentum Teorisi Düzeltme Metotları

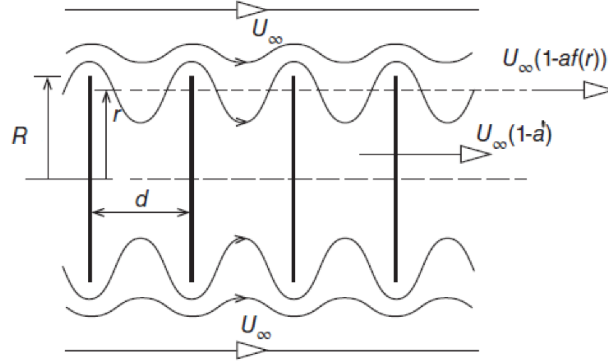
BEM teorisi akış alanını her zaman dengede olup türbin çalışma koşullarının akıştaki anlık değişikliklere uyum sağladığını varsayar. Ancak gerçekte akış alanının kararlı duruma ulaşması zaman alır. Düzensiz aerodinamik etkiler de türbinin çalışma koşullarını önemli ölçüde etkiler. Bu sınırlamayı ortadan kaldırmak için alternatif yöntemler kullanımına ihtiyaç duyulur. Ayrıca BEM teorisi momentum dengesinin rotorla paralel düzlemde sağlandığını varsayar ancak kanat sapmaları (blade deflections) gerçekleştiğinde bu varsayımın doğruluğu giderek azalır. Teori nihayetinde kuvvetlerin esasen 2B olduğunu kabul ettiği için kanat dönüşlerinde meydana gelen 3 boyutlu fenomenleri de ayrıca ihmal eder (Caboni, 2016; Sørensen vd., 2002). BEM teorisinin neden düzeltmelere ihtiyaç duyduğunu anlayabilmek için sınırlamaları anlamak gerekmektedir. BEM teorisi için daha geniş bir sınırlama listesi aşağıda verilmiştir (Hjort, 2019):

1. Dairesel elemanların bağımsız olduğu varsayılır.
2. Sapma açısı ve eğik gelen akış (skew inflow) ihmal edilir.
3. Akışın hızı ve yönü akış alanında herhangi bir noktada değişkenlik göstermez ve akış özellikleri sabit olduğu varsayılır.
4. Türbülans etkileri ihmal edilir.
5. Kanat ucu kayıpları dikkate alınmaz.
6. Kanat kökü kayıpları dikkate alınmaz.
7. Kanadın geçici (transient) dinamik etkileri ihmal edilir.
8. Rotor veya kanadın düzlem dışı (out-of-plane) etkileri ihmal edilir.
9. Kanat stall durumunun santrifüj etkileri ihmal edilir.
10. Art izi geçici etkileri ve stall etkileri dikkate alınmaz.
11. Açısal momentum korunumu uygulanmaz.

12. Eksenel momentum korunumu basitleştirilir.

Kanat ucu kaybı, sonsuz kanatlı ideal bir aktüatör diskine kıyasla sonlu sayıda kanat nedeniyle rüzgar türbini kanatlarının uçlarında oluşan indüklenen hızlardaki azalmayı ifade eder. (Clifton-Smith, 2009). Bu kavram, Ludwig Prandtl tarafından rüzgar türbinleri ve pervaneler için performans tahminlerinin doğruluğunu artırmak amacıyla ortaya atılmıştır. Prandtl'in yaklaşımı, girdap levhalarının, art izi akışını etkileyemeyecek şekilde art izinin belirlediği hızda hareket eden materyal levhalarla değiştirilebileceği fikrinden ilham almıştır. Teori yalnızca gelişmiş art izine uygulanabilir (Burton vd., 2001).

Şekil 3.12'de gösterildiği gibi bir parçacık yolu, rotor diskinden belirli bir yarıçapta geçen bir parçacığın ortalama yolu olarak yorumlanabilir. Gerçek durumdaki art izi, çeşitli yarıçaplardaki parçacıkların eksenel hız varyasyonlarını içermektedir. Yaklaşımında diskler ($U_\infty(1 - a)$) hızıyla eksenel hareket eder ve art izi sınırında rüzgar hızına ulaşır. Diskler arası mesafe arttıkça, disk çevresindeki akış serbest akıma karışmaya başlar. Ortalama rüzgar hızı ($U_\infty(1 - af(r))$) olarak ifade edilir. Burada $f(r)$ uç kaybı fonksiyonudur ve art izi sınırında serbest akıma karışan hava için sıfır değeri, serbest akıma sızamayan durumlar için 1 değeri kabul edilir:



Şekil 3.12. Prandtl'in uç kaybı için art izi-disk modeli

Kaynak: (Burton vd., 2001)

$$f(r) = \frac{2}{\pi} \arccos \left\{ e^{-\pi \left(\frac{R-r}{d} \right)} \right\} \quad (3.65)$$

$R - r$ art izi kenar hattı, d diskler arası mesafe olup ardışık girdap levhaları arasındaki akış tarafından kat edilen mesafeye eşit olmalıdır.

$$d = \frac{2\pi R}{S} \sin\varphi = \frac{2\pi R (U_\infty(1 - a))}{S U_{rel}} \quad (3.66)$$

$$F_{uç} = \left(\frac{2}{\pi}\right) \arccos \left[\exp \left(- \left\{ \frac{S(R-r)}{2r \sin \varphi} \right\} \right) \right] \quad (3.67)$$

Kanat kökü kayıpları, kanat kökünde dolaşım, kanat ucunda olduğu gibi sıfıra düşmelidir. Benzer bir sürecin gerçekleştiği varsayılabilir. Kanat kökü rotor ekseninden belirli bir mesafede yer alacak ve kanat kök yarıçapının içindeki diske giren hava akışı serbest akış hızında olacaktır. Kanat kökü kayıp düzeltmesi $F_{kök}$:

$$F_{kök} = \left(\frac{2}{\pi}\right) \arccos \left[\exp \left(- \left\{ \frac{S(r-R_H)}{2R_H \sin \varphi} \right\} \right) \right] \quad (3.68)$$

İle ifade edilir ve burada R_H göbek yarıçapıdır. Kök ve uç kayıpları Prandtl'in doğrulama faktörü F_{UK} :

$$F_{UK} = F_{uç} F_{kök} \quad (3.69)$$

Denklem 3.38 ve 3.39'dan yola çıkarak, itki ve tork kuvveti için uç ve kök kayıplarının dâhil edilmiş formülasyonu şu şekilde oluşur:

$$dT = F_{UK} \rho U^2 4a(1-a)rdr \quad (3.70)$$

$$dQ = F_{UK} 4a'(1-a)\rho U r^3 \Omega dr \quad (3.71)$$

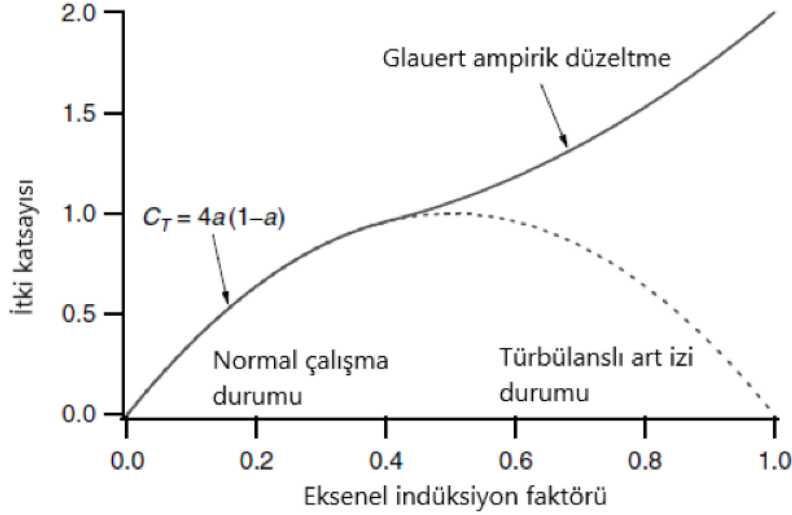
Denklem 3.64'den BEM için türbin güç katsayısı, uç ve kök kayıplarının dâhil edilmiş formülasyonu:

$$C_p = \frac{8}{\lambda^2} \int_{\lambda_H}^{\lambda} F_{UK} \lambda_r^3 a'(1-a) [1 - (C_d/C_l) \cot \varphi] d\lambda_r \quad (3.72)$$

Eksenel indüksiyon faktörü 0,5'i aştığında, momentum teorisine göre bu çalışma durumu, art izindeki akışın bir kısmının yukarı akışa doğru ilerlemeye başladığını gösterir. Ancak fiziksel olarak akış tersine dönemez; gerçekte olan, rüzgar türbini boyunca oluşan akış desenlerinin momentum teorisinin öngördüğünden çok daha karmaşık hale gelmesidir. Eksenel indüksiyon faktörünün 0,5'i aşması durumunda, ölçülen veriler, itme katsayısının eksenel indüksiyon faktörü 1'e ulaştığında yaklaşık 2'ye kadar arttığını göstermektedir. Bu sınırlamayı telafi etmek için Glauert (1926), deneysel ölçümlere dayalı olarak rotor itme katsayısına bir düzeltme geliştirmiştir. Şekil 3.13'de gösterildiği gibi, *Normal çalışma durumunda* eksenel indüksiyon faktörü yaklaşık 0,5 değerinin altında, C_t (itme katsayısı) ile a (indüksiyon faktörü) arasındaki matematiksel ilişki klasik momentum denklemi ile ifade edilir. Ancak eksenel indüksiyon faktörünün 0,5 değerini aşması durumunda, Glauert düzeltmesi devreye girer ve

klasik momentum eğrisine teğet olarak kesişir (Anderson, 1995). Uç ve kök düzeltmesinin yanında Glauert düzeltmesinin dâhil edilmesiyle oluşan itki katsayısı denklemi şu şekildedir:

$$C_t = \frac{8}{9} + \left(4F_{UK} - \frac{40}{9}\right)a + \left(\frac{50}{9} - 4F_{UK}\right)a^2 \quad (3.73)$$



Şekil 3.13. Glauert ampirik düzeltme

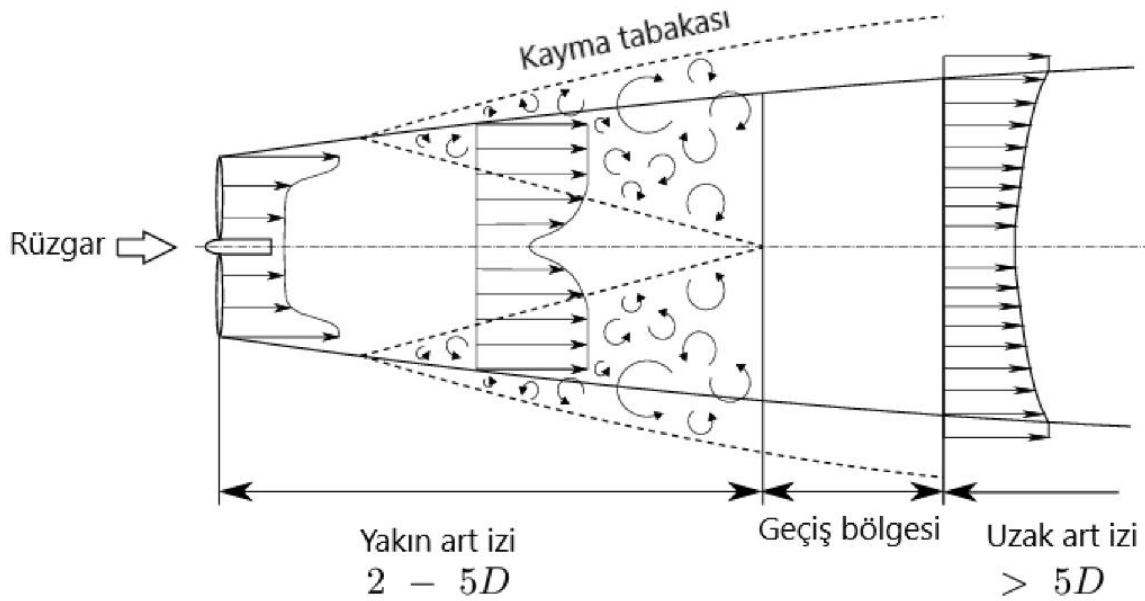
Kaynak: (Anderson, 1995)

3.6. Yatay Eksenli Rüzgar Türbinlerinde Art İzi Oluşumunun İncelenmesi

Daimi akışta, küt cisim arkasındaki izlerin iki temel akım olayı tarafından etkilendiği anlaşılmıştır. Bunlar *Sınır Tabaka Ayrılması* ve *Salınımlı Akış* (vorteks shedding) olayıdır. Bir cismin aerodinamik problemlerinin saptanması ve mevcut performansının artırılabilmesi için bu cismin hareketi esnasında etrafında meydana gelen akım alanı incelenmelidir. Akım ayrılması, cismin arkasında iz bölgesi oluşturur ve hücum açısına sahip eksenel simetrik bir cismin iz bölgesi üç boyutludur. İz bölgesine etki eden faktörler sürüklenmeye de etki eder, iz bölgesi büyükse sürüklenme de büyümektedir (İlday, 1991; Ohya, 2004). Türbin tarlasında aşağı akıştaki türbin ise ayrıca yukarı akıştaki türbinin art izinde çalışır ve art izlerinin bulunduğu hacimdeki rüzgar daha az kinetik enerjiye sahiptir, rüzgar hızları düşüktür fakat türbülans gözlemlenir. Art izinde oluşan ek türbülans (wake added turbulence), aşağı akıştaki türbinin maruz kaldığı yükleri artırır ve bu yükler yorulmaya neden olduğu için türbin ömrünü kısaltır. Türbinin ardındaki art izi türbin tarafından oluşturulan aerodinamik yapılarla şekillenir.

Kanatlarda oluşan uç ve kök girdapları helisel yol boyunca art izinde taşınır. Kök girdapları kararsız yapıda olduğu için naselin arkasında yakın bir konumda bozulurken uç girdapları daha kararlı yapıda olup akış yönünde art izinde helisel uç girdap tabakası oluşturur.

Serbest akış ile art izi hızı arasındaki fark, art izi ve çevresi arasında ince bir kayma tabakası geliştirir ve art izi genişler. Kayma tabakasında enerji transferi ve karışma meydana gelir. Karışma türbülansın artmasına yol açar ve sonuç olarak kayma tabakası ve art izinin genişlemesine katkı sağlar. Bu süreç uç girdapların kararlılığını kaybetmesine neden olurken çevredeki daha hızlı akışla karışarak hızını yeniden kazanmasına yardımcı olur. Türbülanslı karışım süreci, kayma tabakalarının art izinin merkezinde birleşmesine kadar devam eder ve bu noktada türbülans maksimum seviyeye ulaşır. Bu, art izinin toparlanmasının başladığı kritik bir evredir (Neunaber vd., 2020). Kayma tabakasında türbinin çevresindeki akışın hızı veya özelliklerinin konuma bağlı olarak değiştiği için (gradyanlı çevre akışı) karışım tabakasında türbülans yoğunluğu her nokta için farklılaşır. Bu durum, türbin rotorunun üst yarısındaki türbülans yoğunluğunun alt yarısındaki türbülans yoğunluğundan yüksek olmasına neden olur. Art izi eksenine karışım katmanının kesiştiği nokta, yakın art izinin sonu olarak kabul edilir (Bknz Şekil 3.14).

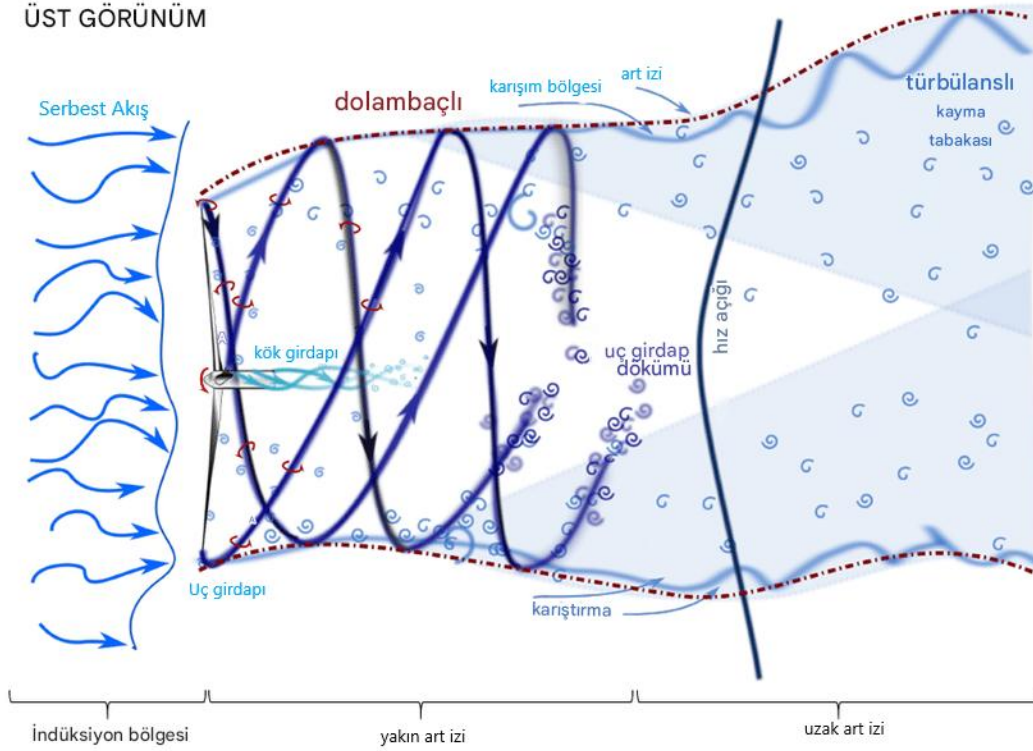


Şekil 3.14. Art izi bölgeleri

Kaynak: (Mühle, 2018)

Yüksek itki seviyelerinde, sabit akış hızı ile art izi alanındaki rüzgar hız farkı büyük olacağından karışım katman büyüklüğü daha büyük olacaktır ve bu genişleme, türbülanslı karışımı destekler. Türbülans, serbest akış ile iz bölgesindeki yavaş akış arasında momentum transferini arttıran bir etkidir. Türbülansın artmasıyla iz bölgesine çevredeki hızlı akıştan daha fazla momentum taşınır ve iz bölgesindeki rüzgar hızında artış gözlenir. Bu olguda iz bölgesinin daha hızlı toplanmasına ve serbest akış hızı seviyesine daha kısa mesafede ulaşmasını sağlar.

Düşük türbülans seviyelerinde, momentum transferi sınırlı kalacağından iz bölgesindeki rüzgarın serbest akışa karışması uzun sürer ve bu durum art izi etkisinin daha kalıcı olmasına neden olur (Sanderse, 2009) (Bknz Şekil 3.15).



Şekil 3.15. Art izi oluşumu

Kaynak: (Neunaber, 2021)

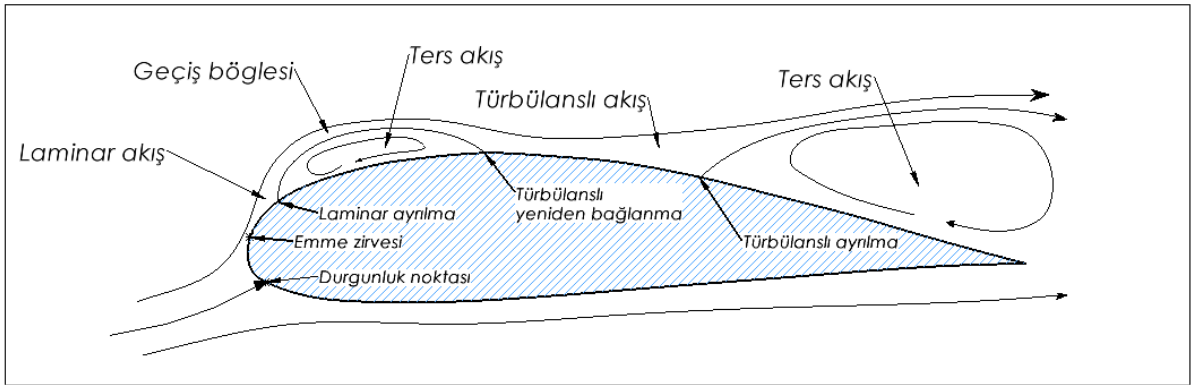
Yakın iz bitiminden sonra basınç gradyanı daha az etkilidir ve izdeki rüzgar şiddetinin serbest akışa oranı gittikçe azalır. Uzak iz bölgesinde iz tamamen gelişmiş kabul edilir. Mesafe arttıkça rüzgar hızının serbest akışa yaklaşmasındaki gelişim hızı, türbülans yoğunluğunun değişiminden daha hızlıdır. Uzak iz bölgelerinde türbülans yoğunluğunun varlığının gözlemlenmesi bu nedendir.

3.6.1. Akış Ayrılması

Akış ayrılması (flow separation) akışkanlar dinamiğinde, bir akışın bir yüzeyden bir iz halinde ayrılmasını teşkil etmektedir. İz bölgesinin olduğu bölgede, akışkanın yavaşlaması ve viskoz etkilerin hissedilmesi nedeniyle basınç azalır. Ancak, bu yavaşlama ve viskoz etkiler, akışkanın iz bölgesindeki hareketini etkiler ve bazı durumlarda akışkanın yüzeyden ayrılmasına neden olabilir. Özellikle sınır tabakanın kalınlaşması veya yüzey şeklinin belirli bir noktada ani bir değişiklik göstermesi durumunda, akışkanın yüzeyden ayrılma eğilimi artar. Bu noktada, yüzeye yakın akışın davranışını belirleyen en önemli faktörlerden biri sınır tabakasıdır. Bir

kanat yapısı için konuşacak olursak, kanat profili üzerindeki hava akışı ile katı yüzey arasında bağıl hareket olduğunda yüzeye yakın kısımlarda viskoz etkilerinden dolayı sınır tabaka gelişir. Sınır tabaka içerisinde hücum açısından kanat profilinin en arka kısmı olan firar kenarına kadar akışını sürdüremediğinde veya bu doğrultuda akışı takip edemediğinde akışkan katı yüzeyden ayrılır (ki bu sınır tabakanın ters basınç gradyanından yeteri kadar uzakta hareket etmesi durumunda oluşur ve sınır tabakasının hızı neredeyse sıfıra düşer) ve bu durumda akışta girdaplar ile kopmalar gözlemlenir (Corten, 2001).

Sınır tabakasının ayrılması, hava akışının yavaşlamasıyla daha belirgin hale gelir. Bu, sınır tabakanın dışındaki serbest akış bölgesindeki basınç gradyanının negatif veya pozitif olduğu bir durumdur ki bu da olumsuz basınç gradyanına işaret eder. Bu durum, sınır tabakası yakınındaki sıkıştırılmış viskoz kuvvetleri güçlendirir ve sonuç olarak yüzeye yakın akış hızı ile serbest akış hızı arasındaki sapma hızlı sınır tabakasının büyümesine yol açar. Laminar sınır tabakasında akışın ayrılması ve ardından türbülanslı bir akışın oluşması, yerel yüzey basıncındaki düşüşle birlikte gerçekleşir. Bu sırada hava akışı, enerjinin korunumu prensibi gereği yavaşlar. Ancak viskoz etkiler nedeniyle oluşan enerji kayıpları, akışın kinetik enerjisinin tamamen geri kazanılamamasına neden olur. Bu enerji kaybı sonucunda, ayrılma noktasında ters akış hareketi gözlemlenir (Bknz Şekil 3.16) (Mudimeli, 2018).



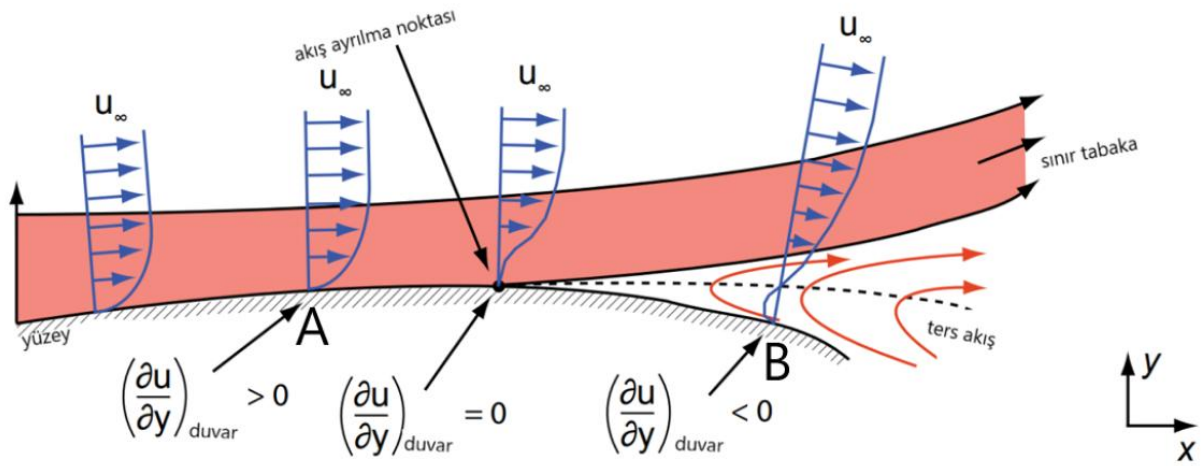
Şekil 3.16. Kanat profili üzerinde oluşan akış bölgeleri

Kaynak: (Corten, 2001)

Şekil 3.16'da görüldüğü gibi sınır tabaka, laminar ve türbülanslı sınır tabaka olmak üzere iki kısımda incelenir. Durgunluk noktası (stagnation point), akışkanın cisimle ilk temas ettiği yerde oluşur. Akışkan burada yavaşlar, basınç artışı gözlemlenir ve bunun sonucunda iz bölgesinin başlamasına neden olur. Laminar akışta akışkanın cismin yüzeyine yakın katmanları, sıralı katmanlar halinde hareket eder ve her bir katman önceki katmana göre, viskoz etkileri

nedeniyle, daha yavaş hareket eder. Bu durumda, iz bölgesi daha düzgün bir yapıya sahiptir. Türbülanslı akış, rastgele dönme ve karışma hareketleri gösterir, bu nedenle iz bölgesi içinde hız ve basınç değişimleri daha büyük olabilir.

$\frac{\partial P}{\partial x}$ sıfırdan büyük ya da küçük olabilir. $\frac{\partial P}{\partial x} < 0$ koşulu için Şekil 3.17’de ki A noktasında yer alan negatif basınç gradyeni oluşur. Bu durumda ayrılma olmadığı gözlemlenir ve cisim üzerinde gerçekleşen akış istenilen durumdadır, stabildir. $\frac{\partial P}{\partial x} > 0$ koşulu için ise B noktasındaki pozitif basınç gradyeni oluşur. Akış enerjisini giderek kaybeder ve hız gradyanı önce sıfıra düşer ve ardından negatife döner. Enerji kaybı, akışın yüzeye tutunamamasına neden olur. Bu nokta ayrılma noktası olarak tanımlanır ve artık ters akış gözlemlenir. A noktasından B noktasına doğru basınç artarken hızda azalma gözlenir



Şekil 3.17. Akış ayrılması

Kaynak: (Sturm vd., 2012)

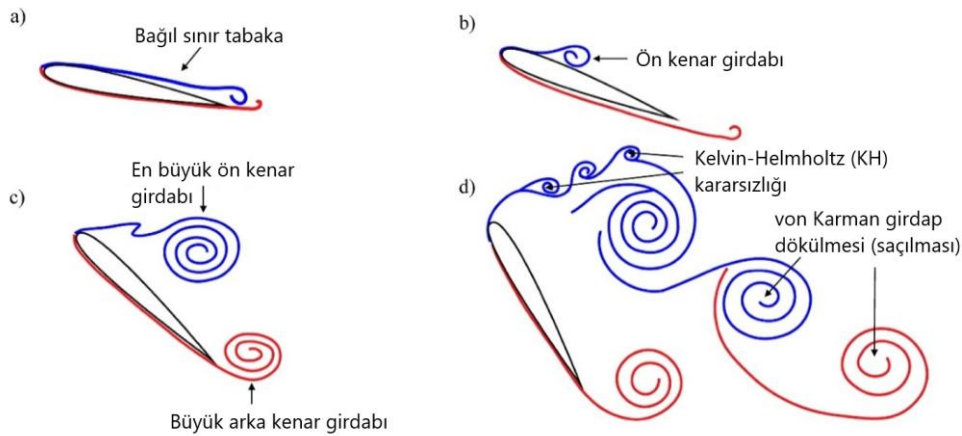
3.6.2. Salımlı Akış

Art izi bölgesinde düzenli olarak salınan girdaplar, salımlı akış olarak adlandırılır. Salımlı akış, ayrılma noktalarının cisim geometrisinin her iki tarafta simetrik olmaması nedeniyle gelişir. Bir tarafın girdabı diğerine göre farklı bir anda oluşur, bu da periyodik bir kuvvet yaratır. Oluşum sürecinde etkili olan bağıl değişkenler şu şekildedir; akışın engelle karşılaşması; bir akışkan, bir engelin ön yüzüne çarptığında, akışkanın hızı yavaşlar ve basıncı artar. Bu, akışın engelin etrafından dolanmasına neden olur. Basınç farkı ve ayrılma; engelin etrafındaki akış, yüksek basınçlı bölgeden düşük basınçlı bölgeye doğru hareket eder. Engelin arkasında düşük basınçlı bir bölge (art izi) oluşur. Akışkan bu bölgede yavaşlar ve türbülanslı hale gelir (Lee vd., 2021). Girdap oluşumu; engelin arkasındaki düşük basınçlı bölgede,

akışkanın farklı noktalarından gelen akımlar birleşir ve döner akış yapıları oluşturur. Bu dönen yapılar, engelin arkasında periyodik olarak birikir ve sonra akışın etkisiyle serbest kalır. Alternatif girdap salınımı; girdaplar, engelin her iki tarafından dönüşümlü olarak salınır. Bu, engelin arkasında karakteristik bir çift girdap izi (vortex street) oluşturur. Düzenli Kármán girdap sokağı, tipik olarak 60 ile 5000 arasındaki Reynolds sayılarında gözlemlenebilir (Chang, 1970). Bu etkileri dinamik ayrılma altında incelenen bir kanat profili üzerinde daha detaylı şekilde gözlemlemek mümkündür. Bu fenomenin oluşumunda geometrik şekil, Reynolds sayısı ve kanat profilinin hücum açısı gibi faktörlerin etkisi büyüktür. Nguyen vd., (2023) yaptığı çalışma kapsamında, sabit Reynolds sayısında farklı hücum açıları için kanat profili üzerinde akış incelenmiş ve girdap oluşumlarını görselleştirmişlerdir (Bknz Şekil 3.18).

Burada, şekilde yer alan dört farklı durumu incelersek:

- Akış sınır tabakasının kanat yüzeyine bağlı olduğu ve ayrılma noktasının arka kenara yakın olduğu görülmüştür.
- Hücum açısının artmasıyla birlikte, ayrılma noktası ön kenara doğru kaymış ve ön kenar girdapları oluşmaya başlamıştır.
- Ayrılma noktası daha da öne kayarak ön kenar girdabının büyümesine neden olmuş; bu süreçte arka kenar girdapları da gelişmiştir.
- Hücum açısının daha da artırılmasıyla ön ve arka kenar girdapları aşağı akışa taşınmış ve bu doğrultuda Kelvin-Helmholtz girdabı ve Kármán girdap izi oluşumu gözlemlenmiştir.



Şekil 3.18. Bir kanat profili yüzeyi üzerinde değişen hücum açılarında statik ve dinamik durma (stall) olayının gösterimi

Kaynak: (Nguyen vd., 2023)

4. NUMERİK ANALİZ

Bu bölüm içerisinde referans türbine ait tasarımsal, istatistiksel ve yapısal özelliklerin anlatımına yer verilmiştir. Hesaplama maliyeti ve kolaylığı açısından, BEM çözücüsü OpenFAST, referans türbin olarak ise NREL 5MW türbini kullanılmıştır.

Rüzgar türbinlerinin güç üretimi ve kanatlar üzerindeki yükleri doğru bir şekilde belirlemek için türbin rotorlarının aero-servo-elastik tepkisinin değerlendirilmesi gerekir. Aeroelastisite, esnek bir cismin akışkan bir akıma maruz kaldığında meydana gelen atalet, elastik ve aerodinamik kuvvetler arasındaki etkileşimleri inceleyen bir disiplindir. Kontrol teorisi ile aeroelastisitenin birleşimi, aero-servo-elastisite olarak adlandırılır. Aerodinamik analizin yapısal analizle birleştirilmesi ve türbin çalışma koşullarını düzenlemek için gereken kontrol stratejisinin entegre edilmesiyle gerçekleştirilir. Bu amaçla, rüzgar türbini endüstrisinde kullanılan bazı aeroelastik yazılımlar geliştirilmiştir: FLEX4, Bladed, Phatas, OpenFAST ve BHawC. Bu yazılımlar, rüzgar türbin rotorlarının dinamik davranışını modellemek için aerodinamik ve yapısal tepkileri rüzgar akış koşullarıyla birleştirir ve türbin rotorunun her rüzgar hızında hangi dönüş hızında çalışacağını belirleyen bir kontrolörü içerir.

Aeroservoelastik analizler, genellikle aerodinamik ve yapısal bileşenlerin yükleri ile deformasyonlarını içeren zaman serisi verileri sağlar. Bu analiz için şu tanımlar gerekir:

- Kanadın kiriş boyu (veter) ve burulma (twist) dağılımları,
- Kanat profillerinin aerodinamik özellikleri,
- Kanatların mod şekilleri, çapraz rijitlik ve atalet gibi yapısal özellikleri.

Kanatların yapısal özellikleri genellikle yapısal modeller kullanılarak hesaplanır, aerodinamik özellikler ise kanat profillerine dayalı analizlerle belirlenir. Yukarıda belirtilen tüm koşullar OpenFAST içerisinde kullanıcıya sunulur ve bir türbin için bu değişkenleri hesaba katarak analiz yapılabilir.

4.1. NREL 5 MW Referans Türbini

NREL 5MW türbin tasarımı, araştırmalarda sıklıkla büyük kanat sapmaları ve bunların türbin performansına etkileri incelendiği için sektörde yaygın olarak kullanılan bir referans modeli haline gelmiştir. Larsen vd. (2004) tarafından NREL 5MW türbin kanatları özellikle büyük kanat sapmalarının türbin performansına ve yüklerine olan etkileri incelenmiştir ve bu çalışma rotor alanındaki değişikliklerin türbin yüklerini nasıl etkilediğini anlamada önemli bir referans sağlamıştır. Riziotis (2008), NREL 5MW kanadı için doğrusal modellerin, özellikle

burulma yüklerini yeterince dikkate almadığını ve bükülme-burulma bağlantısının bu tasarımda önemli bir doğrusal olmayan etki oluşturduğunu göstermiştir. Bu durum, NREL 5 MW türbinini doğrusal olmayan etkilerin araştırılmasında uygun bir model yapmıştır. Manolas vd., (2015) NREL 5 MW'nin, daha esnek ve büyük sapmalara sahip gelecekteki türbin tasarımları için önemli bir başlangıç noktası olduğunu belirtmiştir.

NREL tarafından geliştirilmiş bu model, büyük kara ve deniz üstü rüzgar türbinleri için mühendislik çalışmaları yapmak amacıyla tasarlanmıştır. Günümüzde HAWT (yatay eksenli rüzgar türbini) sistemindeki en son teknolojiyi temsil ettiği için en yaygın kullanılan rüzgar türbini modellerinden biridir. Modelin geliştirilmesi sırasında Multibrid M5000 ve REpower 5M gibi ticari türbinlerin verileri ile DOWEC, WindPACT ve RECOFF projelerinden elde edilen konsept modellerin özellikleri birleştirilmiştir (Jonkman vd., 2009). Bu model, üç kanatlı ve rüzgar yönüne bakan bir rüzgar türbinidir ve nominal rüzgar hızı 11,4 m/s'dir. Bu, ortalama rüzgar hızının 11,4 m/s'ye ulaşması durumunda rüzgar türbininin 5 MW güç ürettiği anlamına gelir. Nominal ve kesme rüzgar hızları arasında, jeneratör hızını düzenlemek ve aşırı yükleri azaltmak için kanatlar rüzgar hızına göre pozisyon alır. Kesme rüzgar hızı olan 25,0 m/s'nin üzerinde ise rüzgar türbini kapatılır ve kanatlar park pozisyonu oluşturmak için 90 dereceye döndürülür. Türbine ait detaylı bilgi özellik Tablo 4.1'de verilmiştir. Jeneratör tork kontrolörü ve temel türbinin tam açıklıklı rotor-kollektif kanat açısı kontrolörü birbirinden bağımsız çalışır. Nominal hızın altında, türbin esas olarak güç üretimini maksimize etmek için tork kontrolörü tarafından kontrol edilirken, nominal hızın üzerinde kanatların açılması jeneratör hızının düzenlenmesini sağlar. Türbinin tahrik sistemi, 1173,7 rpm nominal hıza sahip bir jeneratör ve 97:1 oranında dişli kutusundan oluşan bir sistem olarak modellenmiştir. Türbin spesifikasyonlarındaki tam rotor çapı (kanatların eğimsiz olduğu varsayıldığında) aslında $((126 \text{ m}) \times \cos(2,5^\circ))$ 125,88 m'dir (Bknz Şekil 4.1 koniklik açısından) ve gerçek süpürülen alan $((\pi/4) \times (125,88 \text{ m})^2)$ 12.445,3 m²'dir.

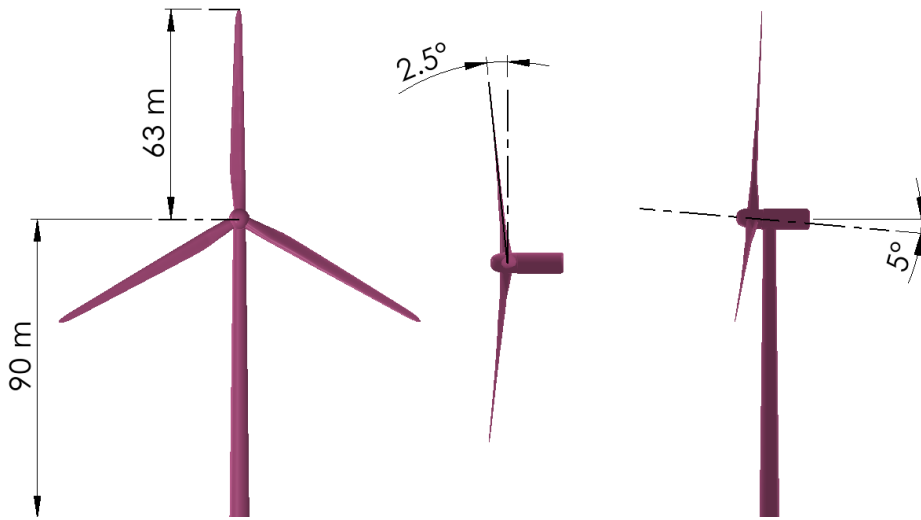
Tablo 4.1. NREL 5MW türbinine ait temel özellikler

Genel Tanım	Maks. Anma gücü	5 MW
	Rotor konfigürasyonu	3 kanat
	Rotor çapı	126 m
	Göbek(Hub) yüksekliği	90 m

Tablo 4.1. (Devamı) NREL 5MW türbinine ait temel özellikler

	Başlama, anma, durma rüzgar hızları	3 m/s, 11,4 m/s, 25 m/s
	Başlama, anma rotor hızları	6,9 rpm, 12,1 rpm
	Uzunluk	61,5 m
	Toplam kütle	11.740 kg
Kanat (LM 61.5 P)	İkinci kütle atalet momenti	11.746 kgm^2
	Birinci düzlem içi doğal frekans	1,066 Hz
	Birinci düzlem dışı doğal frekans	0,6767 Hz
	Yapısal sönüm oranı (tüm modlar)	%0,48
	Göbek yarıçapı	1,5 m
Göbek + Nasel	Göbek kütlesi	56.780 kg
	Nasel kütlesi	240.000 kg
	Kule yüksekliği	87,6 m
	Toplam kütle	347.460 kg
Kule	Birinci ileri-geri doğal frekans	0,324 Hz
	Birinci yan-yana doğal frekans	0,312 Hz
	Yapısal sönüm oranı (tüm modlar)	%1,0

Kaynak: (Jonkman vd., 2009)



Şekil 4.1. NREL 5MW türbine ait özellikler a) göbek yüksekliği ve kanat uzunluğu b) koniklik açısı c) şaft eğim açısı

4.1.1. Rijit Tekil Türbin Analizi ve Sonuçların Doğrulanması

Rijit türbin, yapısal sapmaları ve aktif kontrol sisteminin simülasyona etkisini göz ardı edildiği durumlar için tanımlanır. Bu çalışmada rijit bir türbinin BEM tarafından çözümünden elde edilen sonuçlara ulaşılması için “stand-alone AeroDyn” yapısı kullanılmıştır. Bu yapı OpenFAST içerisinde bulunan modüllerin kullanımının haricinde (ServoDyn, BeamDyn, SubDyn ve ElastoDyn) içindeki tüm yapısal serbestlik derecelerinin devre dışı bırakılması ve kontrolcü sistemlerin devre dışı edilmesi ile elde edilen çözümle aynı koşulları oluşturmaktadır.

OpenFAST yazılımı kanat profili performansını değerlendirirken profilin sahip olduğu aerodinamik özellikleri *lookup table* üzerinden okur. BEM modelinde kaldırma ve sürüklenme katsayıları kullanarak eksenel ve teğetsel kuvvetler hesaplanır. FAST içerisinde NREL 5 MW referans modeline ait kanat profillerinin aerodinamik özellikleri *lookup table* içeriğinde OpenFAST girdisi olarak sunulması gerekir ve bu değerler XFOIL gibi 2D analiz yazılımları ile elde edilebilmektedir. Tablo 4.2’de yer alan kanat profillerin aerodinamik özelliklerini incelediğimizde, Cylinder1 ve Cylinder 2 profilleri için sırasıyla 0,50 ve 0,35 değerinde yalnızca sürüklenme katsayısı değerleri elde edilmiştir.

Tablo 4.2. NREL 5MW kanat profilleri ve kesit bilgileri

Node	Rnodes (m)	AeroTwst (°)	DRNodes (m)	Veter(m)	Kanat Profilleri
1	2,8667	13,308	2,7333	3,542	Cylinder1
2	5,6	13,308	2,7333	3,854	Cylinder1
3	8,3333	13,308	2,7333	4,167	Cylinder2
4	11,75	13,308	4,1	4,557	DU40_A17
5	15,85	11,48	4,1	4,652	DU35_A17
6	19,95	10,126	4,1	4,456	DU35_A17
7	24,05	9,011	4,1	4,249	DU30_A17
8	28,15	7,795	4,1	4,007	DU25_A17
9	32,25	6,544	4,1	3,748	DU25_A17
10	36,35	5,361	4,1	3,478	DU21_A17

Tablo 4.2. (Devamı) NREL 5MW kanat profilleri ve kesit bilgileri

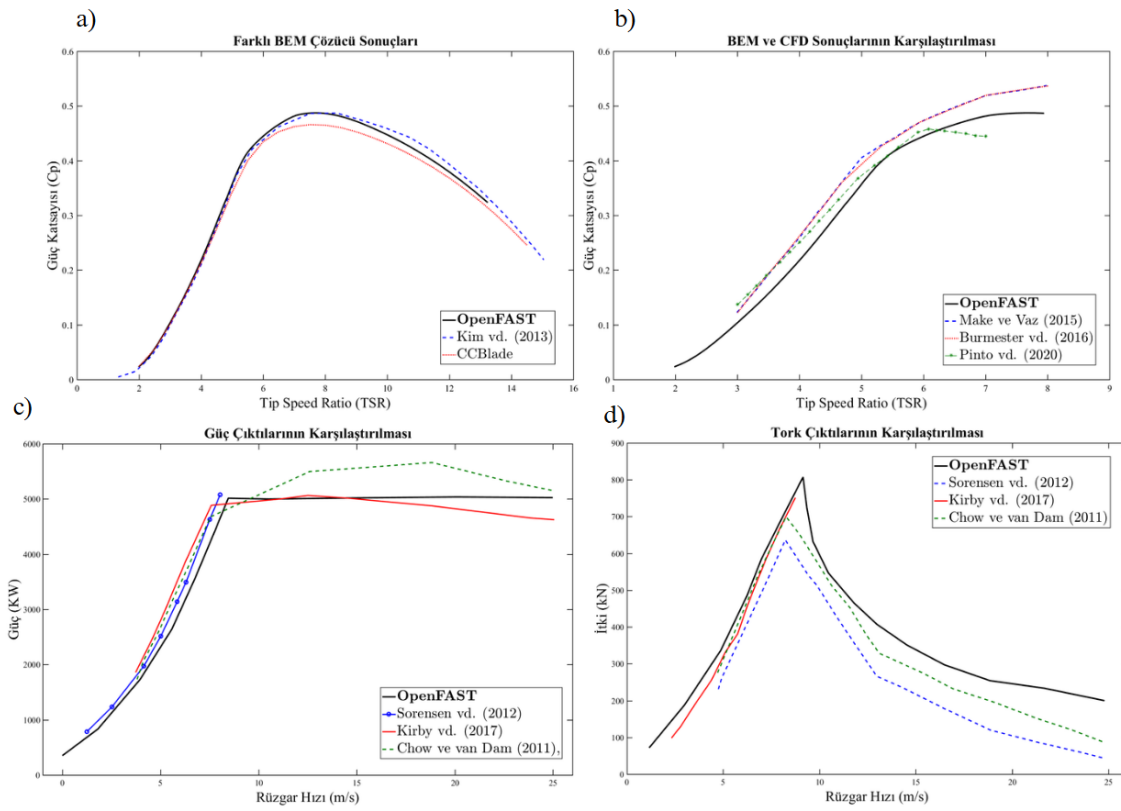
11	40,45	4,188	4,1	3,256	DU21_A17
12	44,55	3,125	4,1	3,01	NACA64_A17
13	48,65	2,319	4,1	2,739	NACA64_A17
14	52,75	1,526	4,1	2,518	NACA64_A17
15	56,1667	0,863	2,7333	2,303	NACA64_A17
16	58,9	0,37	2,7333	2,086	NACA64_A17
17	61,6333	0,106	2,7333	1,419	NACA64_A17

Kaynak: (Jonkman vd., 2009)

Bu bilgiler doğrultusunda, NREL 5MW için rijit türbin analizinin OpenFAST çıktıları alınabilmektedir. Literatürde yer alan CFD ve BEM methodology yapılan çalışma sonuçları NREL 5MW aerodinamik performans açısından Şekil 4.2’de kıyaslanmaktadır. Anma rüzgar hızı (rated speed) rüzgar türbini için maksimum C_p değerini elde ettiği rüzgar hızı değeridir. NREL 5MW sonuçları değerlendirildiğinde anma rüzgar hızı 11,4 m/s’de maksimum güç üretimi 5 MW’a ulaşmakta ve maksimum verim 7,65 λ (TSR, Tip Speed Ratio) değerinde C_p değeri 0,48’e ulaşmaktadır. Burada TSR ifadesi uç hız oranını belirtmekle birlikte denklem 3.27’de detaylandırılmıştır. FAST çözümünde sistem dinamiğini 2B düzlem olarak modellemektedir. Farklı BEM sonuçlarının C_p değerlerinin kıyaslanması Şekil 4.2.a’ da görülmektedir. CCBlade (Ning, 2013) için optimum 0,48’lik C_p değerine λ ’ın 8’e eşit olduğu değerde ulaşılmaktadır. Kim vd. (2013) oluşturdukları rüzgar türbini kanatlarının optimum şekli ve performansının analizi BEM modelinde maksimum 0,48’lik C_p değerini λ ’nın 7,8’e eşit olduğu değerde elde etmektedir ve bu değerleri *GH-Bladed* yazılımıyla doğrulamıştır.

3B etkileşimin incelendiği CFD modelleriyle karşılaştırıldığında (Bknz Şekil 4.2.b); Burmester vd. (2016) RANS-BEMT modeli temel alınırken, ReFRESKO yazılımında basınç ve kayma gerilimi dağılımı incelenmiştir. Bu dağılımlar kullanılarak eksensel ve teğetsel kuvvet bileşenleri elde edilip kaldırma ve sürüklenme katsayıları hesaplanmıştır (*tersine BEMT*). Bu değerler OpenFAST içerisine aktarılıp model çözümü elde edilmiştir. Aynı şekilde Make ve Vaz (2015) ReFRESKO yazılımını kullanarak optimum C_p değerini λ ’nın 8’e eşit olduğu durumda elde etmişlerdir. Ayrıca çalışmada baz aldığı yüzer açık deniz rüzgar

türbinleri (FOWT) için BEM modellerinin tasarım dışı (off-design) ve yüksek dinamiklere maruz kalan türbinler için doğru bir biçimde ele alınamayacağı ve CFD tabanlı yazılımlarla bu durumun daha doğru incelenebileceğini belirtmişlerdir. Pinto vd. (2020) RANS yaklaşımının kullanıldığı açık kaynaklı CFD yazılımı OpenFoam içerisinde $k-\omega$ SST türbülans modelini kullanarak türbin rotorunun etrafındaki türbülanslı akış özelliklerini doğru bir şekilde yakalamayı hedeflemiştir. Türbinin dönel hareketini modellemek için ise rotorun çevresindeki hava akışı üzerindeki etkilerini simüle ederken hesaplama verimliliğini korumaya yardımcı olan MRF (çoklu referans çerçevesi) yöntemi uygulanmıştır. Optimum C_p değeri λ 'nın 6'ya eşit olduğu durumda elde edilmiştir.

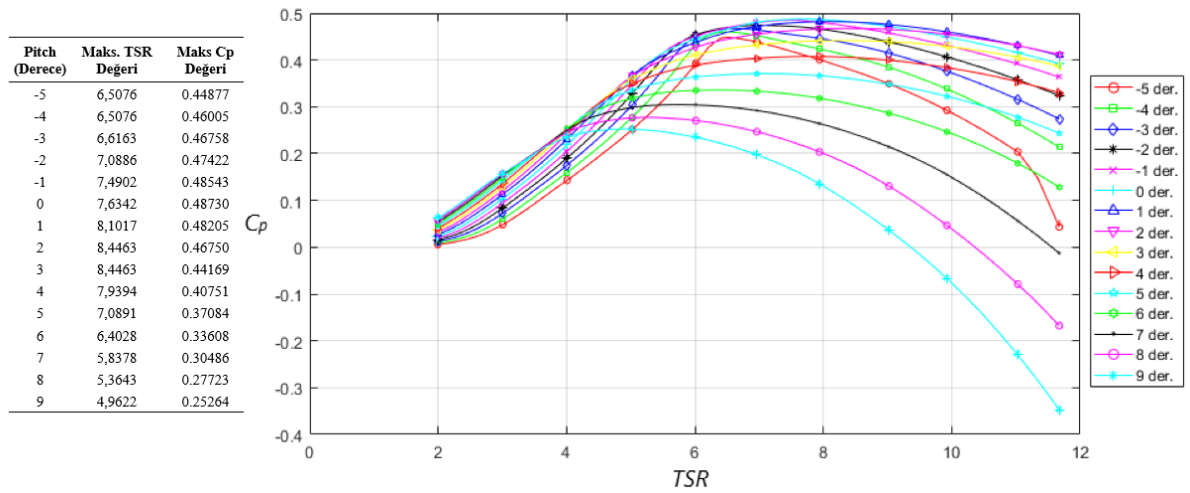


Şekil 4.2. FAST sonuçlarının karşılaştırılması a) C_p değeri için BEM ve CFD sonuçlarının karşılaştırması b) C_p değeri farklı BEM çözücü sonuçları c) güç çıktıları d) tork çıktıları

Güç ve tork çıktıları değerlendirildiğinde (Bknz Şekil 4.2.c ve Şekil 4.2.d); Kirby vd. (2017) blade-resolved çözüm modelini kullanarak türbin kanatları ve çevresindeki akışı detaylı olarak çözmüşlerdir. Bunun için birden fazla ağ yapısını ifade eden dinamik overset ağ yapısı kullanılmıştır. Sonlu hacim ve hp-adaptif sonlu eleman yöntemleri ile birlikte adaptif ağ teknikleri uygulanarak, türbinin yakın gövde bölgesinde yapısal olmayan ağlar, gövde dışı bölgelerde ise dinamik kartezyen ağlar kullanılmıştır. Ayrıca, modelin doğruluğunu test etmek için NREL tarafından geliştirilen ve rüzgar çiftliği simülasyon aracı olan SOWFA ile büyük

ölçekli atmosferik akışları modellemek için kullanılan ve SOWFA yapısında rüzgar çiftliklerinin geniş alanlardaki meteorolojik etkilerini anlamak için kullanılabilen NCAR WRF çözücülerinden yararlanmışlardır. Sørensen ve Johansen (2007) CFD tabanlı çalışmalarında, rotor eksenini etrafında merkezlenen küresel bir akış hacmi tanımlayarak, uniform giriş akışı ve şiddetli dikey kesme (severe vertical shear) durumları için güç çıktısının FAST sonuçlarına yakın olduğunu saptamışlardır. Maksimum güç çıktısı NREL 5MW türbinin anma rüzgar hız değeri olan 11,4 m/s değerine yakın bir değerde elde edilmiştir. İtke çıktısı ise FAST ile elde edilen değer altında kalmıştır. Maksimum itke kuvveti Chow ve van Dam (2012) tarafından RANS tabanlı yazılım olan OVERFLOW2 kullanılarak incelenmiştir. Optimum güç çıktısına 20 m/s hızda ulaşılırken maksimum tork değeri anma hızına yakın bir değerde elde edilmiştir.

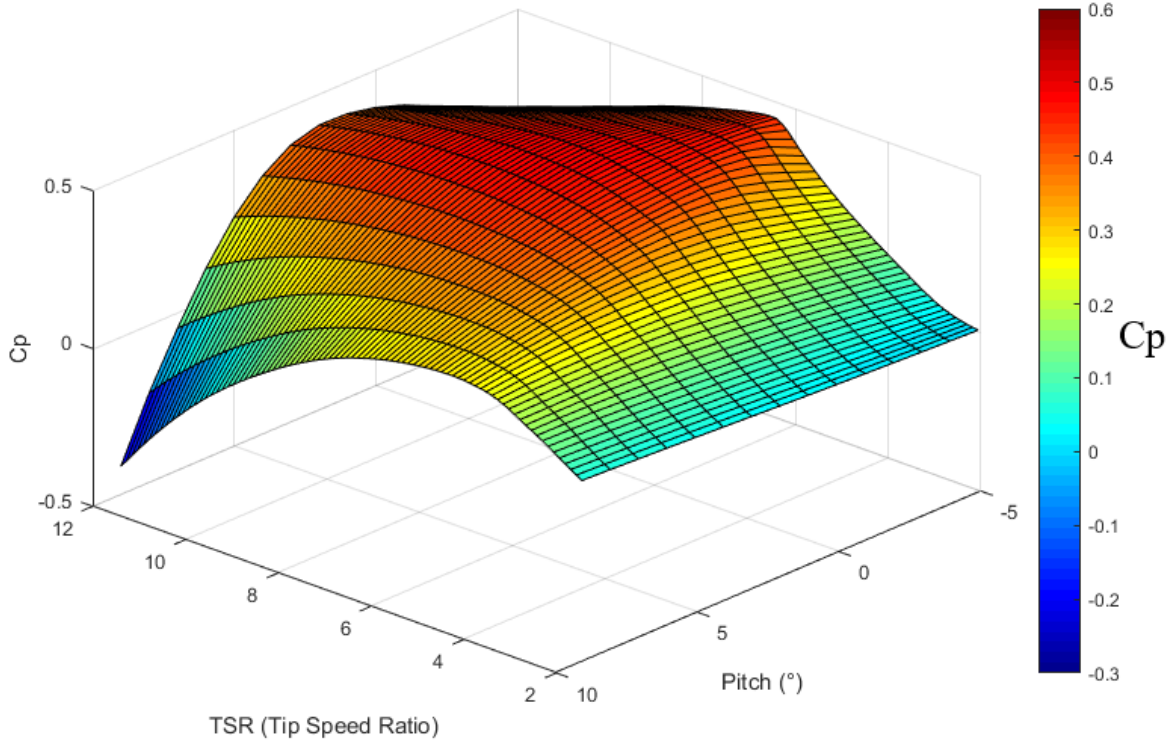
NREL 5 MW rüzgar türbini için başlangıç koşullarında sabit pitch açısı tanımlanarak farklı açı değerleri için sonuçlar elde edilebilmektedir. -5° ile 9° aralığında C_p - TSR (λ) sonuçları Şekil 4.3’de verilmektedir. Pitch değerinin artmasıyla birlikte verimin düştüğü gözlemlenmektedir ve maksimum C_p değeri 0° ’de alınmaktadır. Ayrıca bu değişimin daha iyi anlaşılabilmesi için C_p değişimindeki pitch açısı ve TSR değişiminin etkisi 2B yüzey grafiğiyle Şekil 4.4’de modellenmiştir.



Şekil 4.3. Farklı başlangıç pitch açısı değerlerinde rijit türbin analiz sonuçları

4.2. Aeroelastik Tekil Türbin Analizi

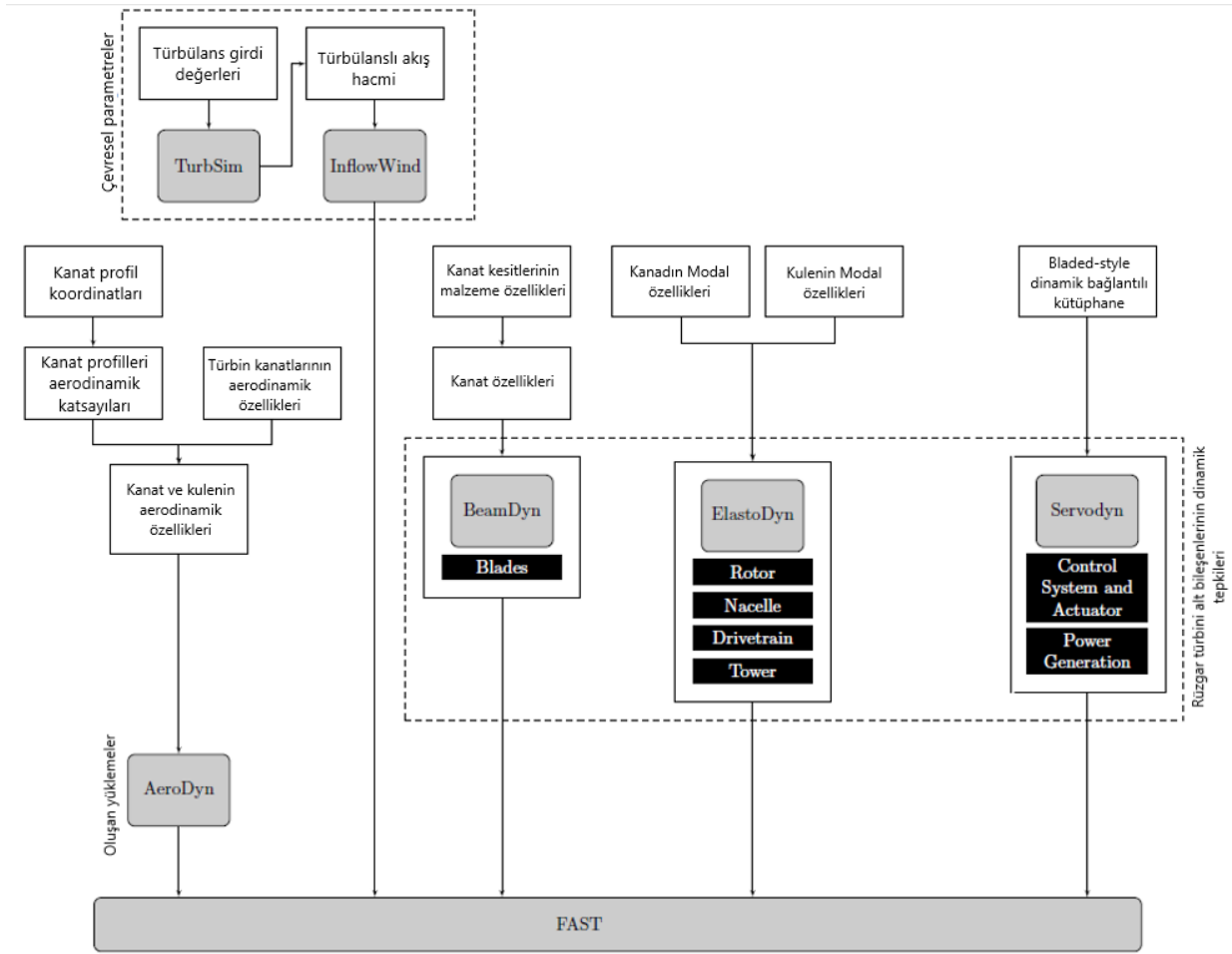
Seçilen referans türbini için elastite etkilerinin dahilinde aerodinamik analizi OpenFAST yazılımı içerisinde yapılmıştır. OpenFAST içerisinde yapılan simülasyonlarda BEM çözücüsü içerisinde kurgulanan türbin modeli yapısal sapmaları ve aktif kontrol sisteminin simülasyona etkisini göz önünde bulundurarak çözüm yapmaktadır (aero-servo-elastik). OpenFAST, rüzgar türbinlerinin dinamik davranışlarını simüle etmek için kullanılan



Şekil 4.4. C_p yüzey grafiği: TSR ve Pitch açısının etkisi

açık kaynaklı bir aero-hidro-servo-elastodinamik simülasyon aracıdır. NREL (National Renewable Energy Laboratory) tarafından geliştirilmiştir ve FAST yazılımının (Fatigue, Aerodynamics, Structures, and Turbulence) geliştirilmiş bir sürümüdür. OpenFAST, belirli bir zaman diliminde türbinin dinamik davranışını analiz etmek için zamana bağlı simülasyonlar gerçekleştirir ve bunu alt modüllerinin birbiriyle bağlantısıyla gerçekleştirir (Bknz Şekil 4.5). Bu sayede, rüzgar türbini üzerindeki yükler, titreşimler ve diğer dinamik etkiler detaylı bir şekilde analiz edilebilir. Ayrıca OpenFAST oluşturucuları hâlihazırda tekil türbin, model türbinler ve türbin çiftliklerinin simülasyon sonuçlarını farklı çözüm metotları ve deneysel çalışma sonuçlarıyla karşılaştırmıştır (Shaler ve Jonkman, 2020; Shaler vd., 2020; Shaler vd., 2019, Jonkman vd., 2019; Doubrawa vd., 2018).

Aerodinamik yükler, rüzgar giriş verilerini kullanan aerodinamik modeller AeroDyn aracılığıyla hesaplanır. AeroDyn iki art izi çözüm modeline sahiptir; bunlar kanat elemanı momentum teorisi ve genelleştirilmiş dinamik art izi teorisidir. Kullanıcı kanat elemanı momentum teorisini seçerse, uç kayıpları, göbek kayıpları ve eğik art izi gibi aerodinamik etkileri de dâhil etme seçenekleri vardır. Genelleştirilmiş dinamik art izi ile bu etkilerin tümü otomatik olarak dâhil edilir. Bu iki yöntem de rotor düzleminde art izinden kaynaklanan aksel indüklenmiş hızları hesaplamak için kullanılır. Kullanıcı rotor torkunu etkileyen döner (veya



Şekil 4.5. Kara temelli bir rüzgar türbini için OpenFAST modüllerinin birbiri arasındaki dinamik etkileşimi

Kaynak: (Khalid, 2019)

teğetsel) indüklenmiş hızı hesaplama seçeneğine de sahiptir. AeroDyn ayrıca yarı ampirik Beddoes-Leishman modeline dayanan dinamik stall için başka bir önemli model içerir (Jonkman vd., 2015). Kontrol cihazları, sensörler, diğer kontrol makineleri ve elektrikli sürücünün jeneratörü, kontrol ve elektrik sistem modelleri (ServoDyn) ile simüle edilir. Tüm yapının esnekliği, yapısal, aerodinamik ve hidrodinamik yükler kullanılarak simüle edilir. FAST'ın modüler arayüzü ve bağlayıcı sistemi, tüm modellerin birbirine bağlanması için kullanılır (Jonkman vd., 2015). ElastoDyn, kanatları düz ve izotropik kirişler olarak modelleyerek Euler-Bernoulli kiriş teorisini kullanır. Model, yalnızca flap yönlü ve kenar yönlü eğilme deformasyonlarını (torsiyon olmadan) dikkate alır ve sınırlı geometrik lineerliklerle varsayılan modları kullanır. (Rinker vd., 2020). Fast içerisinde rüzgar türbinin dinamikleri modellenirken çoklu gövde formülasyonu kullanılır (Guo vd., 2024). Çoklu gövde simülasyonu, çoklu gövde sistemlerinin çeşitli sert veya elastik gövdelerden oluştuğu bir sayısal

simülasyon yöntemidir. Gövdeler arasındaki bağlantılar kinematik kısıtlamalar (eklemler gibi) veya kuvvet elemanları (yaylı sönümleyiciler gibi) ile modellenebilir (Wittenburg, 1977). Yapıdaki gövdelerin, altta bir kök ve üstte yapraklar bulunan ağaç benzeri bir yapılandırma oluşturduğu varsayılır ve böylelikle bir serbestlik derecesinin sanal yer değiştirmesi yalnızca üstündeki yapıyı etkilemiş olur (Branlard ve Geisler, 2022). Çok gövdeli bir sistemde bir referans cismi seçildiğinde, önce o cismi yöneten denklemler uygulanır. Daha sonra referans gövdeye göre göreceli hareketlerine dayanarak diğer gövdeler için denklemler türetilir. Bu yapılandırılmış yaklaşım, rüzgar türbinleri gibi karmaşık sistemlerin dinamiklerini doğru bir şekilde modellemek için önemlidir. Kara temelli bir rüzgar türbini için referans sistemleri, global koordinat sistemi, kule, kule için n'inci eleman, nasele merkezi, rotor göbeği, kanat kökü ve kanadın n'inci elemanı olarak ele alınabilir. Burada referans sistemi, diğer koordinat sistemleri için göreceli olarak türetilir.

ElastoDyn, çok gövdeli sistemlerin hareketini yöneten hareket denklemlerini türetmek için *Kane* formülasyonuna dayanan *kısmi yükler* yaklaşımını kullanır. Bu yöntem, hareket denklemleri için gereken benzer terimleri kullanarak çok gövdeli bir sistemdeki gövdelerin uçlarındaki tepki yüklerinin veya nokta yüklerinin hesaplanmasını basitleştirir. Kanat için toplam nodal kuvvetler x-y-z doğrultuda aerodinamik kaldırma kuvveti, sürüklenme kuvveti, santrifüj kuvvetleri ve kütle kuvvetlerini içermektedir. ElastoDyn hesabı için bu değerler AeroDyn tarafından otomatik çekilir (Jonkman vd., 2022).

Newton-Euler formülasyonu, rijit bir gövde için hareket denklemlerinin oluşturulmasının basit bir yolu olsa da tüm kısıtlayıcı kuvvetlerin (constraint forces) ve momentlerin hesaplanması gerekir. Kısıtlayıcı kuvvetler mekanik sistemlerde hareketi sınırlayan veya belirli bir ilişkiyi zorunlu kılan kuvvetler veya denklemler anlamına gelir. Tüm bu kısıtlayıcı kuvvetlerin hesabı ve farklı gövdelerin varlığı sistemi karmaşıklaştırmaktadır. Kane metodu bu noktada çoklu gövde sistemin hareket denklemlerini oluşturmak için etkili bir alternatif yol sağlar. Temelinde sistemin enerji dengesi açısından denklemleri kuran Euler-Lagrange denklemine dayanmaktadır. Kane denklemi, genelleştirilmiş koordinatları q olan sistem için aşağıdaki gibi ifade edilir (Branlard ve Geisler, 2022):

$$F_r + F_r^* = 0, \quad r = 1 \dots n \quad (4.1)$$

Genelleştirilmiş aktif kuvvetler F_r , r numaralı serbestlik derecesi için genelleştirilmiş atalet kuvvetleri ise F_r^* ile temsil edilmektedir. Genelleştirilmiş aktif kuvvetler:

$$F_r = \sum_i G v_i^r \cdot R_i + \sum_j G \omega_j^r \cdot T_j \quad (4.2)$$

İle hesaplanır. Burada R_i , rijit gövde i üzerine etki eden global veya ataletsel çerçevedeki dış kuvvet vektörüdür, T_j , ise j için dış moment vektörüdür. $G v_i^r$ ve $G \omega_j^r$ vektörleri i ve j gövdeleri için r numaralı genelleştirilmiş hız \dot{q}_r ise ilgili kısmi öteleme ve açısız hız bileşenleridir:

$$G v_i^r = \frac{\partial G v_i}{\partial \dot{q}_r}, \quad G \omega_j^r = \frac{\partial G \omega_j}{\partial \dot{q}_r} \quad (4.3)$$

Önceki denklemlere dayanarak genelleştirilmiş kuvvetlerin yalnızca genelleştirilmiş koordinat ve hızlarla (q ve \dot{q}) ilişkili olduğu görülebilir. Genelleştirilmiş atalet kuvveti, r numaralı serbestlik derecesi için şu şekilde yazılır:

$$F_r^* = \sum_i G v_i^r \cdot R_i^* + \sum_j G \omega_j^r \cdot T_j^* \quad (4.4)$$

R_i^* ve T_j^* sırasıyla i ve j rijit gövdeleri içindeki ataletsel kuvvet vektörü ve ataletsel moment vektörüdür. Ataletsel kuvvet vektörü şu şekilde ifade edilir:

$$R_i^* = -m_i G a_i \quad (4.5)$$

m_i , i rijit gövdesinin kütlesi ve $G a_i$ ise global çerçevede i rijit gövdenin ivmesidir. Ataletsel moment vektörü ise şu şekilde hesaplanır:

$$T_j^* = -(G \alpha^j \cdot I_j + (G \omega^j)^2 \cdot I_j) \quad (4.6)$$

$G \alpha^j$ global çerçevede j rijit gövdesinin açısız ivmesi, I_j ise kütle merkezi etrafındaki atalet tensörüdür. Taylor teoremi uygulanarak genelleştirilmiş atalet kuvvetlerinin birinci dereceden lineer yaklaşık ifadesi $M(\dot{q}, q, t) \cdot \ddot{q}(t) + M_0(\dot{q}, q, t) + F(\dot{q}, q, t) = 0$ şeklinde aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial F_1^*}{\partial \ddot{q}_1} & \dots & \frac{\partial F_1^*}{\partial \ddot{q}_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial F_n^*}{\partial \ddot{q}_1} & \dots & \frac{\partial F_n^*}{\partial \ddot{q}_n} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \vdots \\ \ddot{q}_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_1^* |_{\ddot{q}=0} \\ \vdots \\ F_n^* |_{\ddot{q}=0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_n \end{bmatrix} = 0 \quad (4.7)$$

Burada $M(\dot{q}, q, t)$ ile ifade edilen matris genelleştirilmiş *atalet kuvvetlerinin Jacobian matrisidir* ve $M_0(\dot{q}, q, t)$ ile ifadenen matris ise *santrifüj ile Coriolis kuvvetleri gibi ivmelenme terimiyle ilgili olmayan tüm ataletsel kuvvetleri* içerir. $F(\dot{q}, q, t)$ ise *genelleştirilmiş aktif*

kuvvetler vektörüdür. Belirli başlangıç değerleri verilerek bu denklem, sayısal integrasyon yöntemleriyle çözülebilir. Böylece hareket denklemleri ElastoDyn çözücüsündeki aşağıdaki sıra ile çözülür:

- Referans çerçeveleri için birim vektörlerin sayısal olarak hesaplar; türbin bileşenlerinin her biri için koordinat sistemi tanımlar ve bu çerçevelerin yönelimlerini ve birim vektörlerini hesaplar.
- Konum vektörlerini sayısal olarak hesaplar; türbinin farklı noktalarının uzayda nerede olduğunu belirlemek için konum vektörlerini hesaplar
- $M_0(\dot{q}, q, t)$ matrisi sayısal olarak hesaplanır; M_0 sistem için başlangıç koşullarını ve kütle özelliklerini içeren bir matristir. Bu matrisi hareket denklemlerinin çözümünde kullanır.
- Kuvvet ve momentlerin hesaplanması ile hareket denkleminin kurulması; Türbinin üzerindeki tüm yükler hesaplanır (aerodinamik ve yerçekimsel gibi). Sistemin hareket denklemlerini oluşturan kütle matrisi $M(\dot{q}, q, t)$ ve ardından harici kuvvetleri içeren vektör oluşturulur.
- Hareket denkleminin çözülerek serbestlik derecesi tekrar güncellenir; hareket denkleminin çözülmesiyle \dot{q} yani hız elde edilir ve sayısal integrasyon yöntemiyle hızlar ve konumlar zaman içinde güncellenir.

Türbinin esnek kanatları veya ana milleri gibi rijit olmayan elemanlarla ilişkili serbestlik dereceleri için elastik ve sönümleyici kuvvetler de hesaba katılmalıdır ve denklem şu şekilde genişletilir:

$$M(\dot{q}, q, t) \cdot \ddot{q}(t) + M_0(\dot{q}, q, t) + F(\dot{q}, q, t) + K_e q + C_e \dot{q} = 0 \quad (4.8)$$

Burada K_e ve C_e sırasıyla modal analiz kullanılarak belirlenen genelleştirilmiş rijitlik ve sönümleme matrisleridir. Bu terimler, dönen kanatlar için santrifüj rijitlik etkisi ve kuleler için yerçekimsel yumuşama (gravity-induced softening) gibi geometrik doğrusal olmayan terimleri içerebilir. Brandlard ve Geisler (2022), kanatların santrifüj etkilerini hesaba katarak bir rüzgar türbini için kinematik denklemler türetmek adına sembolik bir çerçeve sunmaktadır. Ayrıca ElastoDyn kanat modeli birçok doğrusal olmayan terimi halihazırda hesaba katmaktadır (santrifüj ve Coriolis gibi). Ancak model basitleştirici birkaç varsayım sunar (NREL Forum, 2024);

- Kanat, yüklenmemişken düz bir yapı sergiler ancak flap ve kenar arasındaki etkileşimi içermek için yapısal bir ön döndürme dikkate alınmaktadır.

- Kullanılan malzeme izotropiktir ve dönme ekseninden kütle veya sertlikte kaydırmalar yoktur bu da modelin doğruluğunu artırır.
- Model yalnızca eğilme davranışını hesaba katar, diğer deformasyon türlerini göz ardı eder.
- Ayrıca, modelin kullanımı yaklaşık 15 dereceyi aşan eğimlere izin vermeyecek şekilde orta düzeltmelerle sınırlıdır.

Ek olarak sınırlamaların geçersiz olduğu durumları içeren koşullar için, analizin BeamDyn ile yürütülmesi daha uygun bir seçenektir ve şu özellikler tercih kapsamındadır:

- Yüklenmemişken belirli bir yapılandırılmış kıvrıma sahip olan kanatlar.
- Kompozit malzemelerden kaynaklanan bağlantılar veya dönme ekseninden kütle veya sertlikte kaydırmalar bulunan kanatlar.
- Eğilmenin yanı sıra burulma, kesme ve gerilme gibi diğer deformasyon türlerini de dikkate alarak daha karmaşık bir analiz gerektiren durumlar.
- Büyük düzeltmelerin meydana geldiği durumlar, BeamDyn'in kapsamına girer ve daha doğru sonuçlar elde edilmesine olanak tanır.

Ek olarak ElastoDyn doğrudan bir sertlik matrisi (stiffness matrix) kullanarak hesaplama yapmak yerine modeli kütle, sönümlenme ve rijitlik etkilerini dolaylı olarak içeren modal bir yaklaşımla sonuca ulaşır. Modal yaklaşım, sistemin titreşim davranışını doğal modları (eigenmode) ve frekansları üzerinden analiz eden yaklaşımdır. Hareket denklemleri modal koordinatlara dönüştürülerek çözülür böylelikle serbestlik derecesi belirli sayıda modal şekli olduğundan dolayı çözümden sonra azalır (He ve Fu, 2001). ElastoDyn'daki temel varsayımlar nedeniyle bükülme rijitliği modal şekillerle temsil edilir. Bunun yanında ElastoDyn, kanada ait bazı bilgilere ihtiyaç duyar bunlar; kütleli dağılım (BMassDen -kg/m), eğilme rijitliği (FlpStff ve EdgStff -Nm²), yapısal burulma (StrcTwst - °) ve sönümlenme katsayılarıdır (BldFIDmp ve BldEdDmp - %). Kütleli dağılımda kanadın her bir istasyonunda (BIFract) kütle yoğunluk değeri, malzemelerin yoğunluğuna ve kesitteki katman dağılıma göre belirlenir. Eğilme rijitliğinde flapwise (kanadın rüzgar yönündeki eğilme sertliği – FlpStff) ve edgewise (kanat düzleminde eğilme sertliği – EdgStff) rijitlikleri malzemelerin elastite modülü, kesit alan momentleri ve katman kalınlıkları dikkate alınarak hesaplanır. Yapısal burulma hesabı için kanadın her istasyonunda burulma açısı verilmektedir. Flapwise ve edgewise modlar için kritik sönümlenme oranları tanımlanır.

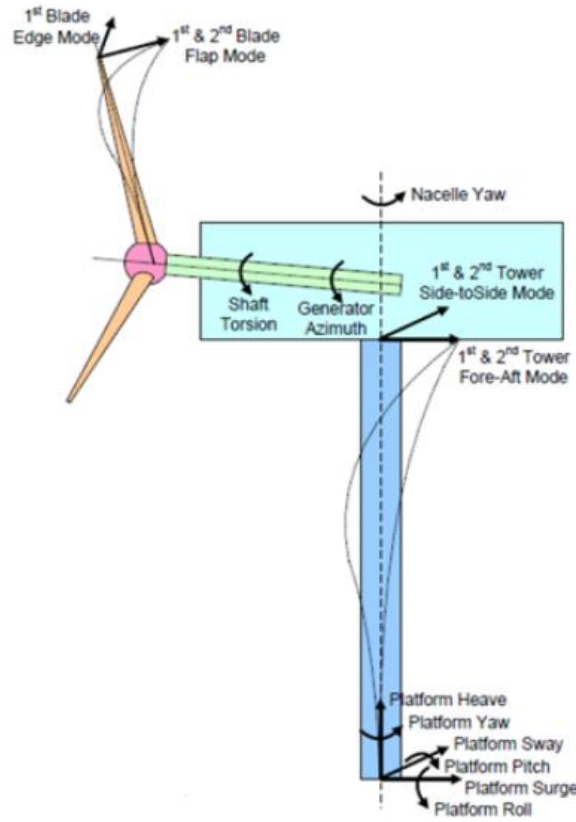
BeamDyn ise geometriyi kiriş modeliyle ifade ederken 6x6'lık rijitlik matrisi kullanarak kesme, burulma ve eksenel deformasyonları içeren çözüm üretir. BeamDyn, kompozit malzemelerden yapılmış, başlangıçta eğri ve burulmuş olan ve büyük yer değiştirme ve dönme deformasyonlarına maruz kalan kirişlerin analiz edilmesi için tasarlanmıştır. Ayrıca BeamDyn, kirişlerin statik analizi için de kullanılabilir. ElastoDyn ve BeamDyn sonuçlarının kıyaslanması adına literatürde çalışmalar yapılmıştır (Bay vd., 2019; Qu vd., 2021; Guntur vd., 2017). Küçük deformasyonlar, doğrusal esneklik ve düşük frekanslı dinamiklerde ElastoDyn ve BeamDyn sonuçları birbirlerine yakındır. Büyük deformasyonlar, kesme deformasyonları, burulma ve kompozit etkisi altındaki sistemlerin analizinde ise BeamDyn daha hassas sonuçlar vermektedir ve ElastoDyn ile farklılık gösterebilir.

FAST, rüzgar türbini dinamiklerini modellemek için 24 serbestlik derecesine (DOF) ihtiyaç duyar (Bknz Şekil 4.6). İlgili serbestlik dereceleri aşağıda verilmektedir:

- 6 DOF: Atalet çerçevesine göre platformun 3 doğrusal (surge, sway, heave) ve 3 dönme (roll, pitch, yaw) hareketi.
- 4 DOF: Kule hareketleri: 2 boylamasına mod (fore-aft) ve 2 yanal mod (side-side).
- 1 DOF: Nasil'in sapma hareketi.
- 1 DOF: Jeneratörün azimut açısı.
- 1 DOF: Jeneratör ve hub/rotor arasındaki tahrik sistemi (drivetrain) esnekliği.
- 3 DOF: İlk mod için kanat uçlarının flap yönündeki hareketi.
- 3 DOF: Her bir kanadın ikinci mod için uç yer değiştirmesi.
- 3 DOF: İlk mod için kanat uçlarının kenar yönündeki yer değiştirmesi.
- 2 DOF: Rotor ve kuyruk yönelme/kaçma (furl) hareketi.

Rüzgar türbinlerinin aerodinamik analizlerinde, türbinin etrafındaki akış alanının doğru bir şekilde temsil edilmesi büyük önem taşır. Bu amaçla, analiz hacmini temsil eden ve zamanla değişen türbülanslı bir rüzgar alanı oluşturmak için sanal rüzgar tüneli görevi gören simülasyon araçları kullanılır. Bu tür simülasyonlarda, belirli bir ortalama rüzgar hızı etrafında zamanla değişen, üç bileşenli hız verileri oluşturulur. TurbSim yazılımı, IEC 61400 standartlarına uygun olarak Kaimal (IECKAI) ve von Karman (IECVKM) spektral modellerini kullanarak doğrusal olmayan, tam alan türbülanslı rüzgar verisi sentezler (Jonkman & Buhl, 2006). Kaimal modelinde, hız spektrumu ve standart sapmalar, yalnızca boylamasına bileşendeki uzaysal

korelasyonu tanımlayan parametrelerle değişmekte olup diğer bileşenlerde sabit kabul edilir (Khalid, 2019).

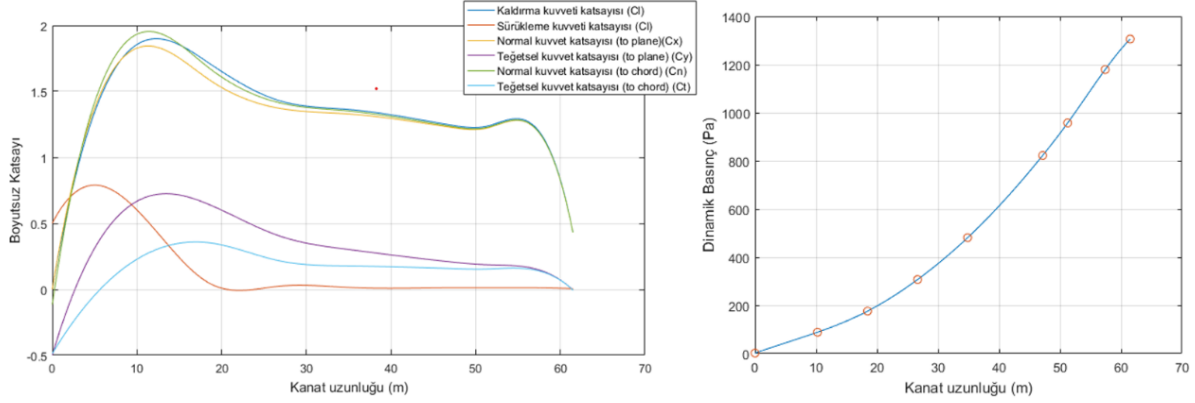


Şekil 4.6. OpenFAST içerisinde modellenen bir türbin için serbestlik dereceleri

Kaynak: (Jonkman vd., 2015)

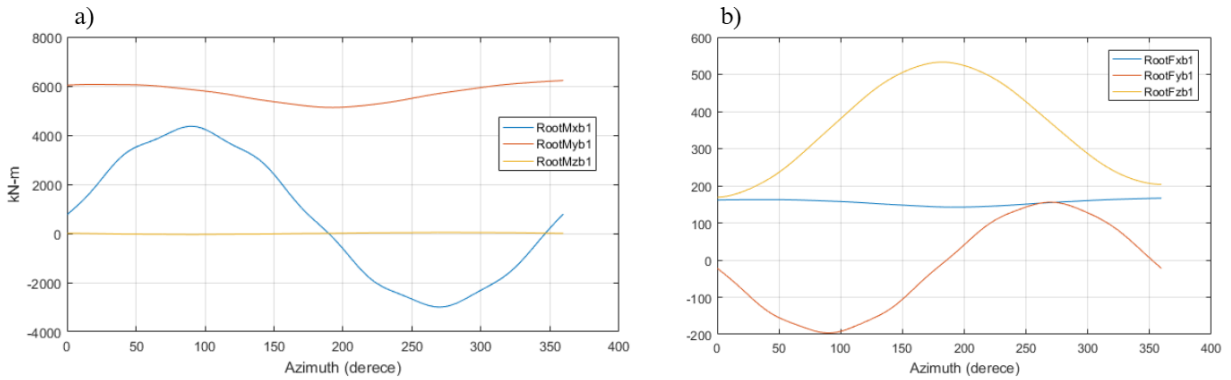
InflowWind, rüzgar dosyaları için geniş giriş seçenekleri sunar ve bu dosyalar arasında TurbSim kullanılarak oluşturulan tam alan rüzgar verileri de bulunur. Rüzgar verileri ortalama bir hız kullanılarak iki boyutlu (yatay ve dikey düzlemde), eşit aralıklı bir ağ (grid) yapısında tanımlanır. Her bir ağ yapısındaki noktada, belirli bir zaman adımı boyunca üç bileşenli rüzgar hızları tanımlanır. Bu yapı, üç boyutlu rüzgar akışının hem zamansal hem de mekânsal temsilini sağlar. Burada bahsedilen iki boyutlu ağ yapısı, rüzgarın geldiği doğrultuya dik olan (yani enine ve dikey düzlemdeki) sabit bir düzlemde yer alan noktalardan oluşur; zaman boyunca bu düzlemin türbin üzerinden geçtiği varsayılır. Akış yönündeki değişim, Taylor'un donmuş türbülans hipotezi temel alınarak modellenir; bu hipoteze göre, türbülans yapıları zaman içinde yer değiştirmez, yalnızca akış yönünde taşınır (Khalid, 2019). InflowWind, bu rüzgar alanını işlerken, üçlü-lineer interpolasyon yöntemiyle ağ yapısı üzerindeki hız bileşenlerini belirli türbin noktalarına uyarlayarak simülasyonda kullanıma sunar.

Türbinin kanat şeklinin ve şekil optimizasyonunun nihai sonucu olan aerodinamik özellikler, türbinin güç üretimini ve verimliliğini etkileyen öncül parametrelerdir. FAST için bunu değerlendirirsek, Şekil 4.7’de ele alınan aerodinamik özellikler kanat uzunluğu boyunca atanan noktalarda çözüm yapılmasıyla elde edilebilmektedir. Çevresel hızın artışıyla kanat uçlarına doğru basınç etkileri artmaktadır ve türbin kanatları için önemli bir olgu olan dinamik



basınç, istenilen noktalar için kanat üzerindeki dağılımı ve değerleri FAST içerisinde elde edilebilmektedir.

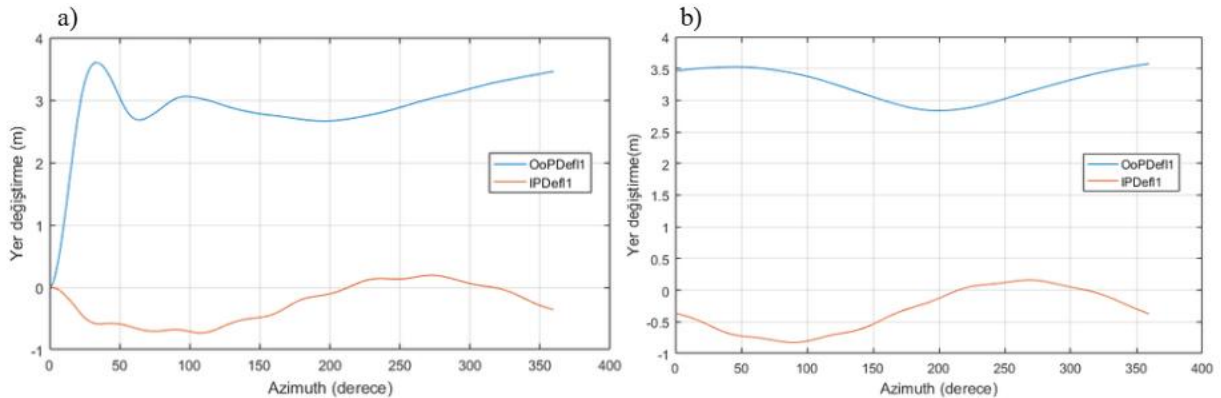
Kanat nihayetinde rotora, kanat kökünden bağlı olan yapıdır ve kanat üzerinde oluşan kuvvetler kök mesnetinde oluşan kuvvetleri de etkilemektedir. Sürekli değişen çevresel ve aerodinamik koşullar içerisinde çalışan türbinler için kanat üzerinde oluşan kuvvetler, kanadın rotor eksenine etrafında dönerken sahip olduğu her derece için farklı bir sonuç oluşturacaktır. Böylelikle kanadın yorulma etkileri göz önünde bulundurulurken kanat kökünde oluşan kuvvet ve momentlerin minimum ve maksimum değerleri doğrultusunda azimuth ile değişimi Şekil 4.8’de görüleceği üzere FAST içerisinde elde edilebilmektedir.



Şekil 4.8. Kanat kökünde oluşan kuvvetler a) moment b) kuvvet

Çoğu yazılımda türbinler rijit olarak kabul edilmektedir ve türbin yapısında gerçekleşen elastite göz ardı edilmektedir. Özellikle kanat üzerinde oluşan kuvvetler sonucu gerçekleşen yer değiştirmeler, kanat şeklinde değişikliğe neden olacağı için güç üretimi ve oluşturduğu art izini etkilemektedir. Fast içerisinde elastite dahil edilebilmektedir. Şekil 4.9'da yer alan *OoPDefl1*, birinci kanat için kanadın uç noktasındaki dönme düzleminin dışındaki sapmayı ifade eder (flapwise yönünde). Türbin kanadı dönerken, rüzgar yükleri nedeniyle kanat ileriye veya geriye doğru (dönme düzlemine dik olarak) eğilir. Bu eğilme *out-of-plane deflection* (OoP) olarak adlandırılır. Genellikle rüzgar yüklerinin etkisini ve aerodinamik momentlerin oluşturduğu sapsmaları incelemek için kullanılır. *IPDefl1*, birinci kanat için kanadın uç noktasındaki dairesel hareket düzlemi boyunca meydana gelen sapmayı temsil eder (edgewise yönünde). Santrifüj kuvvetleri veya aerodinamik yükler nedeniyle kanadın dönme yönüne paralel bir şekilde eğilmesi *in-plane deflection* (IP) olarak adlandırılır.

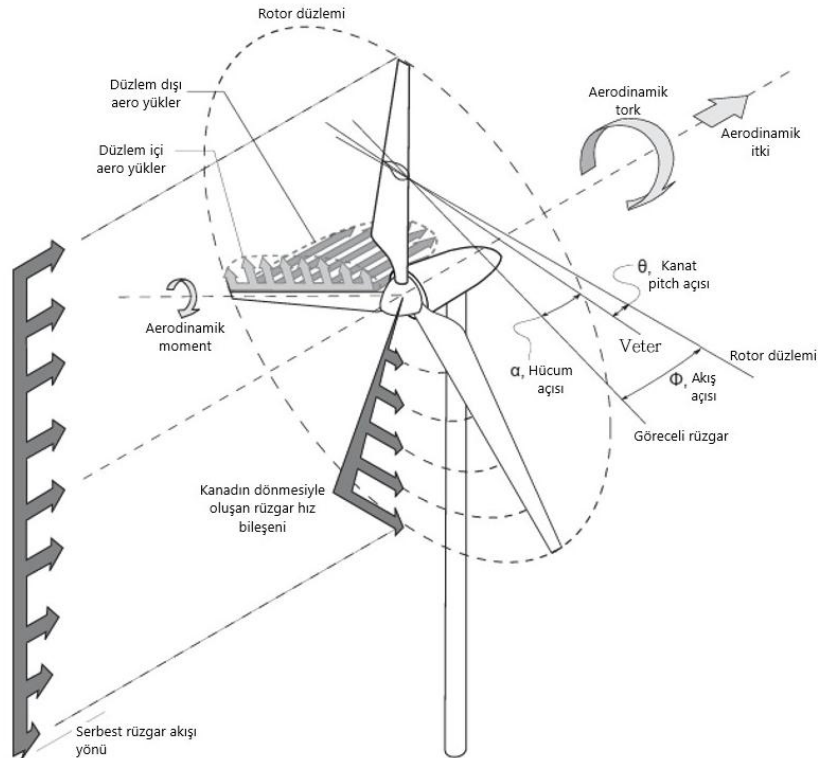
Bir yatay eksenli rüzgar türbin kanadı üzerinde tanımlanan aerodinamik kuvvetler ve açılal ilişkileri, bu kuvvetlerin ilgili olduğu düzlemler Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Serbest rüzgar akışı, rotor düzlemine doğru ilerlerken, türbin kanatlarının dönmesiyle oluşan dönme kaynaklı hız bileşeniyle birleşir ve kanat üzerinde bir bağıl rüzgar bileşeni oluşur. Bu bağıl rüzgar, kanat profilinin veter çizgisiyle belirli bir açı yapar ve bu açı hücum açısı olarak adlandırılır. Hücum açısı, kanat üzerindeki kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerini dolayısıyla da aerodinamik momentini belirler. Şekilde ayrıca, rüzgarın kanada çarpma açısı olan akış açısı ve yüklerin oluşturduğu aerodinamik momentin yönünü de görmek mümkündür. Bu aerodinamik etkileşimler, hem enerji üretimini hem de türbin yapısının maruz kaldığı zorlamaları belirleyen temel faktörlerdir.



Şekil 4.9. Kanat 1'e ait düzlem dışı (OoPDefl) ve düzlem içi (IPDefl) uç sapsması a) rotorun ilk hareketi sonucu oluşan çevrim b) ilk hareket sonrası çevrimler

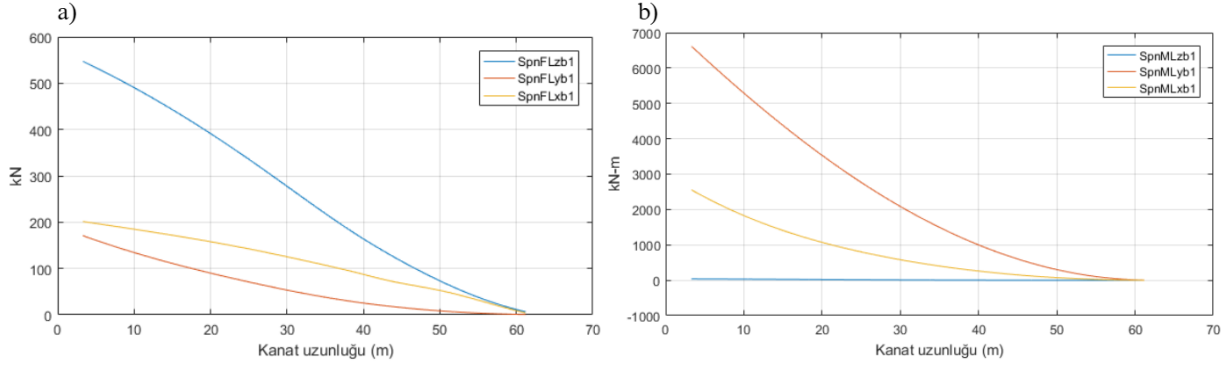
Ayrıca türbin analizlerinde kanat üzerinde oluşan kuvvetler ve momentler değerlendirilirken oluşan kesme kuvvetleri ve kanat ekseninde oluşan bükülmeler göz önünde bulundurulmalıdır. FAST ile elde edilen $SpnMLxb1$, $Spn1MLyb1$ ve $Spn1MLzb1$ sırasıyla *edgewise moment* (kanat ekseninde bükülme momenti), *flapwise moment* (kanadın yukarı/aşağı bükülme momenti) ve *torsional moment* (kanadın burulma momenti) değerlerini temsil eden değişkenler birinci kanat üzerindeki ilgili span noktalarında (kanat boyunca 9 farklı nokta) hesaplanmıştır ve şekil 4.11’de verilmiştir. $Spn1FLxb1$, $Spn1FLyb1$ ve $Spn1FLzb1$ ise aynı noktadaki sırasıyla *edgewise shear force* (kanat ekseninde kesme kuvveti), *flapwise shear force* (kanadın yukarı/aşağı hareketine neden olan kesme kuvveti) ve *axial shear force* (kanadın genişliği boyunca, veter yönünde etkili olan kesme kuvveti) değerlerini ifade eder.

Bu değişkenlerin bağlı olduğu yerel eksen sistemi şu şekildedir; *xb eksen*i, kanat boyunca (spanwise) ileri doğru uzanır; *yb eksen*i, kanat yüzeyine dik ve dönme düzlemine paralel olacak şekilde yukarı/aşağı yönlendirilmiştir; *zb eksen*i ise veter yönünde, kanadın genişliği boyunca uzanır.



Şekil 4.10. Tipik yatay eksenli rüzgar türbini için yük şeması

Kaynak: (Cormier, 2017)

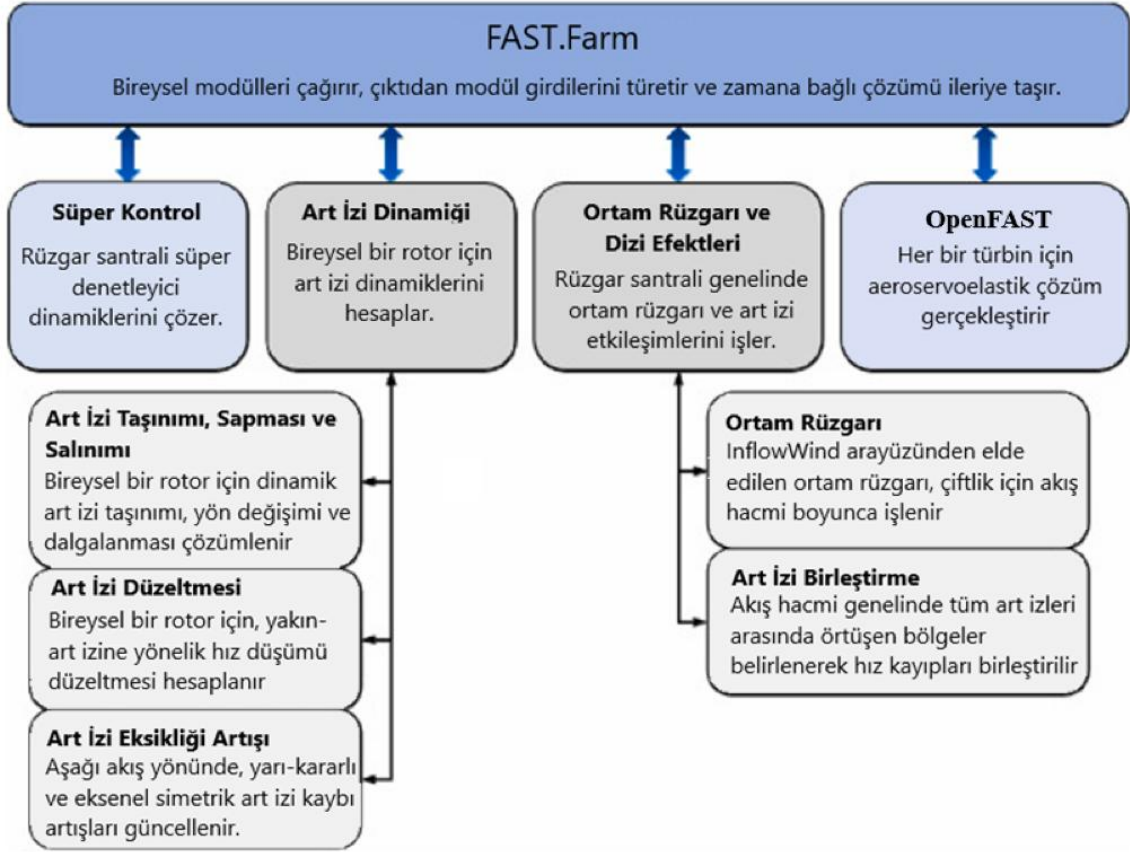


Şekil 4.11. Kanat uzunluğu boyunca oluşan kuvvetler ve momentler a) kuvvetler b) momentler

4.3. Rüzgar Çiftliği Analizi

Rüzgar çiftliği analizinde FAST.Farm kullanılmaktadır. FAST.Farm rüzgar türbini çiftliklerinde, türbinlerin güç performanslarını ve oluşan yapısal yükleri öngörmek amacıyla geliştirilmiş orta hassasiyetli (midfidelity) bir mühendislik aracıdır. Bireysel türbinlerin aero-servo-hidro-elastik dinamiklerini çözerken OpenFAST, atmosferik sınır tabakadaki rüzgar alanı ve rüzgarın tüm çiftliğe yayılımını ve türbinlerle etkileşimini dikkate alır. Art izi etkileri, ve art izi özellikleri; adveksiyonu, saptırılması, dolambaçlı hareketi (wake meandering) ve art izi birleşimlerini de işleme katmaktadır. FAST.Farm, DWM (Dynamic Wake Meandering) ilkelerinde tasarlanmıştır (Jonkman ve Shaler, 2021). Şekil 4.12’de görüldüğü gibi farklı fiziksel bileşenleri modül tabanlı bir yaklaşımla ele almaktadır ve bunlar şöyledir:

- OpenFAST Modülü:** Her bir türbinin çiftlik içindeki dinamiklerini (yük ve hareket) hesaplar ve girdiler olarak rüzgar, dalga gibi çevresel uyarıları kullanır.
- Art İzi Dinamiği Modülü:** Bireysel rotorlar için art izi adveksiyonu, saptırılması, meandering ve wake-deficit artışı gibi hesaplamaları yapar. Wake-deficit evrimini RANS denklemlerinin ince kayma tabakası yaklaşımıyla hesaplar ve eksenel simetrik koordinat sisteminde zamana bağlı olarak çözer. Ayrıca art izi salınımı hareketinin eksenel ve akış yönünde dik bölümde modellenmesine olanak tanır ve art izi sıkışması gibi fiziksel iyileştirmeleri gerçekleştirir.
- Ortam Rüzgarı ve Dizi Etkileri Modülü:** Ortam rüzgarının ve art izi etkileşimlerinin tüm çiftlik genelindeki etkilerini modeller.
- Süper Kontrolcü Modülü:** Tüm rüzgar çiftliği üzerinde kontrol algoritmalarını uygular.



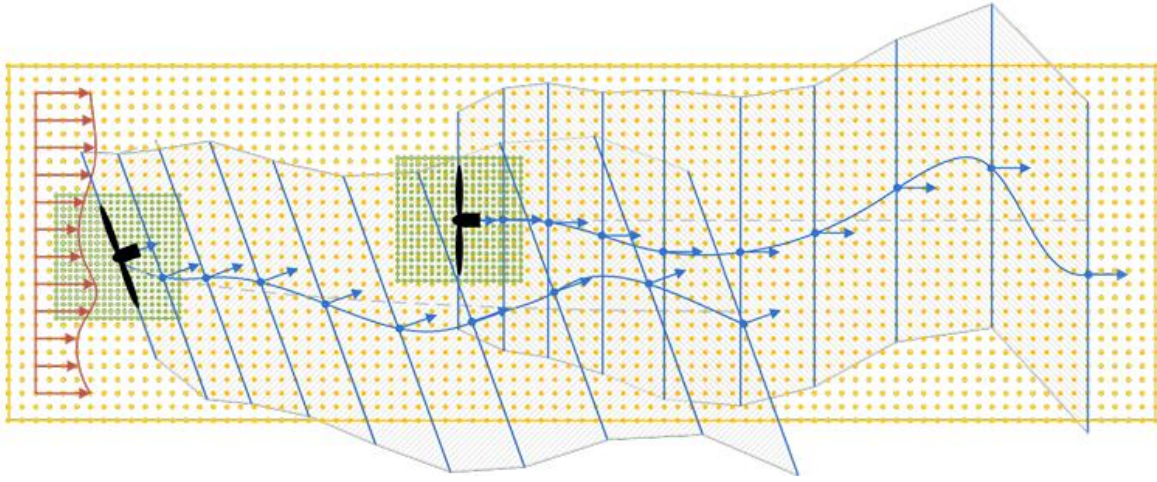
Şekil 4.12. FAST.Farm akış diyagramı

Kaynak: (Ye vd., 2024)

OpenFAST, BEMT modelini kullanırken türbini aktüatör disk olarak ele alır ve rotor düzlemi boyunca kanat elemanları tanımlanır. Tanımlanan her bir eleman için yerel aerodinamik kuvvetler hesaplanır. Bununla birlikte, model uç ve kök düzeltmeleri, eğrilik düzeltmeleri gibi iyileştirmeleri bünyesinde barındırır. FAST.Farm bu bilgileri temel olarak art izi etkileşimlerini hesaba katmaktadır. Akış alanında bulunan tandem dizilmiş iki cisim birbirini etkilemektedir. (Jonkman ve Shaler, 2021).

FAST.Farm'da analiz iki türbinin rüzgar çiftliğindeki art izi etkileşimi Şekil 4.13'de gösterilmektedir. Görselde iki türbinli bir rüzgar çiftliği için art izi düzlemleri, art izi hacimleri ve art izi örtüşme bölgeleri yukarı akış türbininin belli bir sapma açısındaki değerince modellenmiştir. Sarı noktalar düşük çözünürlüklü rüzgar alanını (akış hacmini), yeşil noktalar ise her bir türbinin etrafında yer alan yüksek çözünürlüklü rüzgar alanlarını temsil etmektedir. Mavi noktalar ve vektörler art izi merkezlerini ve yönelimlerini, mavi çizgiler ise art izi düzlemlerinin temsil etmektedir. Gri kesikli çizgiler art izinin ortalama akış yolunu ve çevresinde bulunan mavi eğriler ise anlık art izi salınımını temsil etmektedir. Yukarı akış

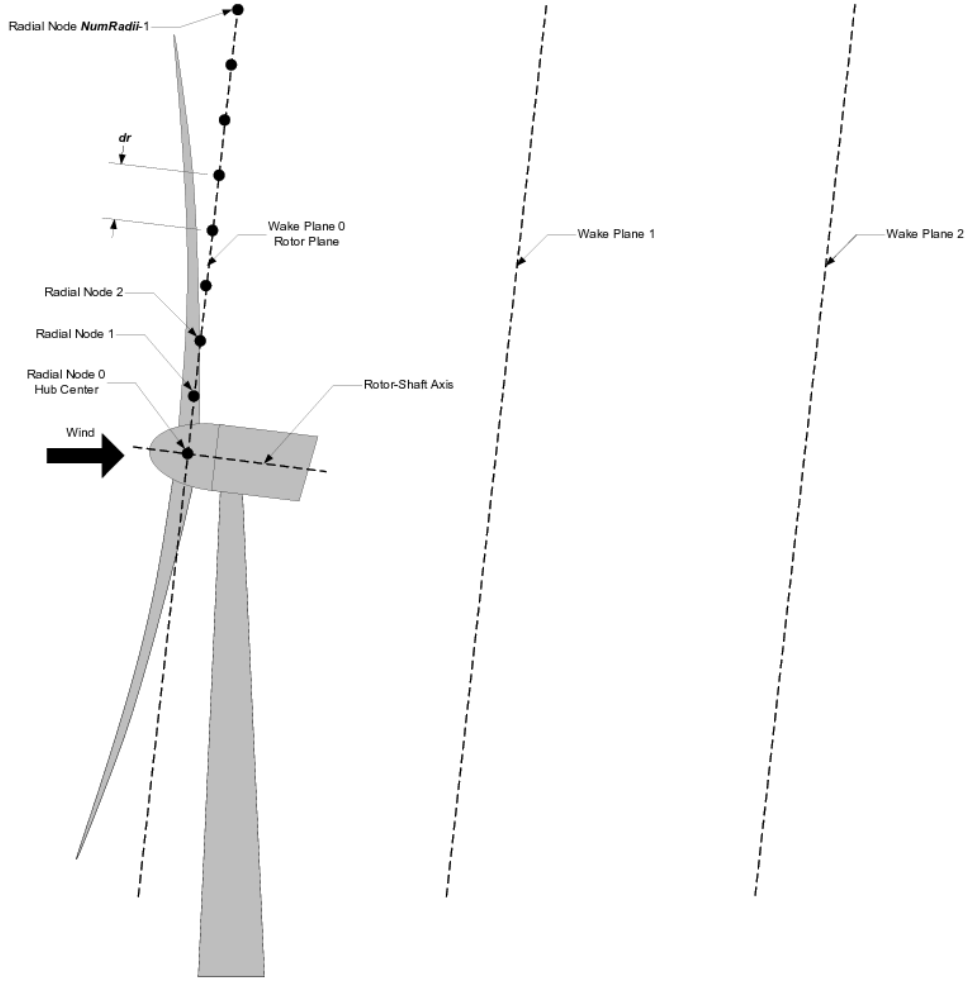
türbinine ait art izi yukarı yönlü tarama desenleriyle, aşağı akış türbinine ait art izi ise aşağı yönlü tarama desenleriyle temsil edilmiştir. Art izi düzlemleri ve hacimleri art izi çapının iki katı kadar bir çap ile temsil edilsede yerel çap hesaplamalara bağlı değiştiğinden bu değişkenlik göz önünde bulundurulur. Ayrıca simülasyonda tanımlanan akış hacmi, art izi hacminin tamamını kapsamayabilir buda art izi hacminin akış hacmi dışına taşıdığı durumları temsil eder (sarı bölge dışına resmedilen salınım çizgileri bu durumu temsil etmektedir). Simülasyon sırasında art izinin akış alanı sınırlarını aşması durumunda, sistem bu durumu kullanıcıya bilgi mesajı olarak iletir ve simülasyon kesintiye uğramadan devam eder.



Şekil 4.13. FAST.Farm art izi etkileşimi

Kaynak: (Jonkman ve Shaler, 2021)

FAST.Farm art izi modelleme yaklaşımında, art izini belirli düzlemler boyunca takip eden bir yöntem metodunu izlemektedir. Art izi oluşumu, rotor düzleminde (Wake Plane 0) itibaren başlayarak (Bknz Şekil 4.14) rüzgar yönünde ilerledikçe belirli mesafelerde art izi düzlemleri oluşturur. Her art izi düzlemi radyal olarak bölünmüş ağ yapısı (grid) içermektedir. Yani art izini modellemek için her düzlem radyal olarak sonlu elemana bölünür. Bu oluşturulan düzlemler ve düzlem üzerindeki sonlu elemanlar boyunca art izi bozulması, genişlemesi salınımı ve türbülans etkisi hesaplanmaktadır. Radyal yöndeki mesafede gerçekleşen artış miktarı dr küçüldükçe art izi çözünürlüğü artmaktadır. Görselde bulunan *NumRadii* (Nr) ise radyal nokta sayısını belirtmektedir. Art izi düzleminin çapı bu değişkene bağlı olduğundan, art izi düzlemi modellenirken art izi etkilerinin yakalanması için düzlem çapının rotor çapından büyük seçilmesi gerekmektedir. Art izi izlenimi boyunca atanan düzlem sayısı Np art izinin takip mesafesini belirler, art izinin serbest akışa geçiş bölgesine kadar gözlem yapılabilmesi için takip mesafesi tayini dikkatli yapılmalıdır.



Şekil 4.14. Art izi düzlemleri ve düzlem üzerinde oluşturulan radyal sonlu elemanlar

Kaynak: (Jonkman ve Shaler, 2021)

Art izi etkilerinin analizi DWM ve pasif izleyici modeli (passive tracer modeling) ile gerçekleştirilmektedir (Jonkman ve Shaler, 2021). DWM modeli, art izini zamanla değişen ve hareket eden bir akış yapısı olarak ele alır (art izinde oluşan türbülansın doğası gereği) ve art izinin genişlemesini türbülans yoğunluğu ile türbin özelliklerine bağlı olarak tahmin eder. Art izi bölgesindeki rüzgar hızı düşüşünü ve yukarı akış türbinde oluşumundan sonra aşağı akış türbinine doğru yayılımını momentum korunumu ilkelerine göre hesaplanır. Böylelikle art izinin yayılım süresince enerji kaybı (wake deficit) ve aşağı akış türbinlerine etkisi modellenebilmektedir (wake meandering ve wake-added turbulence).

Art izi akışı ölçek ayrımı (splitting of scales) prensibiyle modellenir, art izi kaybı küçük türbülans girdaplarınınca etkilenirken (ilgili türbin için 2 rotor çapı değerince etkileri izlenir), art izi salınımı ise büyük türbülans girdaplarında etkilenir. Art izi kaybı evrimi (wake-deficit evolution), RANS çözücünde ince kayma tabakası (thin shear-layer) yaklaşımı ile aksenal simetri

altında neredeyse kararlı (quasi-steady-state) koşullarda modellenir. Türbülans etkileri ise eddy-viscosity modeli ile temsil edilir. Bu model sadece uzak art izi bölgesi için geçerli olsa da art izi kaybı modeli rotor düzleminde başladığı için yakın art izi bölgesinde bir düzeltme uygulanarak uzak art izi için çözüm doğruluğu arttırılır. Art izi salınımı, art izi kaybının büyük ölçekli türbülans girdapları tarafından taşınarak hareket ettirilmesidir ve pasif izleyici (passive tracer) modeli ile ele alınır. Art izi kaybı hareketli referans çerçevesine (Moving Frame of Reference-MFoR) taşınarak yatay ve dikey hareket ettirilir. MFoR, büyük ölçekli türbülans girdaplarının art izi üzerindeki etkisini yansıtacak şekilde oluşturulur. Wake-added turbulence ise art izinin türbülans seviyesini arttıran mekanizmadır, arka plan türbülansının ölçeklendirilmesiyle modellenir. Rüzgar çiftliğinde, art izi olmadan mevcut olan atmosferik türbülansı ifade eder. Art izinin içerisinde üretilen ek türbülans yapısı, arka plan türbülansının bir katsayı ile ölçeklendirilerek modellenir (Jonkman ve Shaler, 2021).

Pasif izleyici model, akışkanlar mekaniğinde, bir ortamda hareket eden ancak akışın kendisini etkilemeyen bir madde veya parçacığı tanımlamak için kullanılan bir kavramdır. Pasif izleyiciler, buldukları akışkanın özelliklerini değiştirmezler ve akışın hızı veya yönü üzerinde etkileri yoktur sadece akış ile birlikte taşınırlar. Böylelikle maddelerin akış ortamında nasıl dağıldığı anlaşılabilir. Etkin maddelerin veya ısının akış içerisindeki hareketini izlemek için kullanılır böylelikle akış dinamiğini ve oluşan türbülansı anlamaya yardımcı olur. Hareketlerini etkileyebilecek herhangi bir momentum değişimi oluşturmazlar yani akışta sabit bir momentuma sahiptir. DWM içerisinde kullanılan pasif izleyici modelinde de türbinin oluşturduğu art izi pasif izleyiciler gibi davranarak büyük ölçekli türbülanslar tarafından taşınır ve genellikle stokastik süreçtir. Yani izleyici hareketi rastgele türbülans desenlerinden etkilenir. Bu durum art izi salınım sürecinin modellenmesinde izleyicinin rastgele hareketini simüle etmek için kullanılır. Aşağı akış adveksiyonu çevresel rüzgarın ortalama hızıyla kontrol edilir böylece model basitleşirken art izi profilinin taşınma sürecini pasif izleyicinin taşınma süreciyle benzer hale getirilir (Larsen vd., 2007; Larsen vd., 2008). Buradaki aşağı akış adveksiyonu terimi, türbinin arkasındaki art izi eksikliğini yani türbin tarafından oluşturulan rüzgar hızındaki düşüşün serbest rüzgar akımı tarafından aşağı akış yönünde taşınması anlamına gelmektedir.

5. TANDEM YERLEŞTİRİLMİŞ RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE GÜÇ YOĞUNLUĞU OPTİMİZASYONU

Bu bölümde, tandem yerleşimli üç rüzgar türbininden oluşan bir rüzgar çiftliği için türbin konumu ve sapma açısının farklı senaryolar altında tanımlanan alandaki güç yoğunluğuna etkisi incelenmektedir. Çalışmada, Bandırma bölgesi için 100 m yükseklikteki ortalama rüzgar hızı referans alınarak sabit rüzgar hızıyla simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Türbinler arasındaki mesafe ve sapma açısı değişkenleri kullanılarak toplam güç yoğunluğu üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Bu amaçla, sistemin farklı konfigürasyonlarını kapsayan bir deney tasarımı oluşturulmuş ve Taguchi yöntemi kullanılarak 81 farklı senaryo belirlenmiştir. Simülasyonlar FAST.Farm yazılımı ile gerçekleştirilmiŐ ve elde edilen sonuçlar en küçük kareler yöntemi ile matematiksel bir model oluşturularak değerlendirilmiştir. Son olarak, her senaryo, türbinler arası mesafe ve yerleşim alanına bağlı olarak güç yoğunluğu (power density) açısından karşılaŐtırılarak en iyi sonuca ulaşılmıştır.

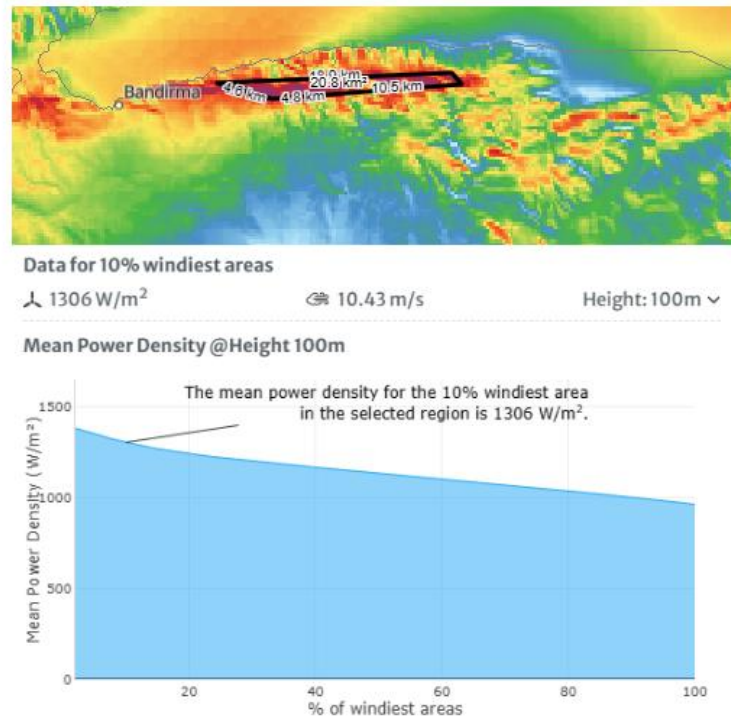
5.1. Bandırma Bölgesi Rüzgar Özellikleri

Önceki bölümde gerçekleştirilen rijit türbin ve tek türbin için aero-elastik çözümler, bir türbin için gereksinimlerin anlaşılması, FAST çıktı sonuçlarının doğruluğu ve yorumlanması üzerine gerçekleştirilmiştir. Bu bölüm içerisinde, bir önceki bölümlerden edinen bilgiler doğrultusunda, Türkiye’de kuvvetli rüzgar alan ve yıllık rüzgar hızı ortalaması yüksek olan Bandırma bölgesi rüzgar çiftliğinin konumu olarak seçilmiŐtir (Bknz Şekil 5.1). TUREB 2022 Enerji İstatistik Raporuna göre (TUREB, 2022) Bandırma ilinde 4 Adet RES bulunmaktadır ve bunların 3 tanesi seçilen bölgede yer almaktadır (Bknz Şekil 5.1). Bu bölgede sırasıyla Yapısan El. Ür. A.Ő. tarafından yürütölen Bandırma RES Ext., Bandırma Enerji ve El. Ür. Tic. A.Ő. tarafından yürütölen Bandırma Res ve Galata Wind. En. Ltd. Őti. tarafından yürütölen Őah RES rüzgar enerji santralleri bulunmaktadır (TÜRSAT, 2019). Bu bölgenin kurulu RES gücü 267,7 MW olmakla birlikte bölgede farklı işletmelerce GE marka GE2.75-103 ve GE1.5se modelleri, Nordex marka N90 ve N100 modelleri ve VESTAS marka V90-3.0 ve V112-3.45 rüzgar türbini modelleri kullanılmaktadır ve hali hazırda aktif olarak çalışmaktadır.

5.2. Taguchi Metodu

Genichi Taguchi tarafından önerilen Taguchi metodu, çok faktörlü durumlar için kullanılan ve istatistiksel bir teknik olan Deney Tasarım (DOE, Design of Experiment) yöntemidir (Roy, 2001). Taguchi yöntemi, az sayıda deneyle birden fazla değişkenin etkisini

analiz etmek için kullanılır ve bu sayede geleneksel deney tasarım yöntemlerine göre daha verimli bir çözüm sunar (Türkmen vd., 2008).



Şekil 5.1. Bandırma bölgesinde seçilen konuma ait 100m'deki ortalama rüzgar değeri

Kaynak: (Global Wind Atlas, 2024)

Süreç parametrelerinin etkisini analiz etmek amacıyla, hem ortalamayı hem de değişkenliği göz önünde bulunduran sinyal-gürültü (S/N) oranı adı verilen istatistiksel bir performans metriği kullanır. Bu oran, ortalamanın (sinyal) standart sapmaya (gürültü) bölünmesiyle elde edilir ve optimize edilecek sistemin kalite kriterlerine göre belirlenir. Yaygın olarak kullanılan S/N oranları arasında N tipi (nominal the better), L tipi (larger the better) ve S tipi (smaller the better) yöntemleri bulunur (Ghosh vd., 2017; Kumsal, 1994). Bu üç tip yöntem aşağıdaki gibi formüle edilir:

$$L \text{ tipi: } \eta_L = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right) \quad (5.1)$$

$$S \text{ tipi: } \eta_S = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right) \quad (5.2)$$

$$N \text{ tipi: } \eta_N = -10 \log \left(\frac{\bar{y}_l}{s^2} \right) \quad (5.3)$$

Burada η_L, η_S ve η_N performans istatistikleridir, n deneysel kombinasyon için yapılan tekrar sayısı ve Y_i ise deneyin performans değeridir. Nominal performans istatistiğinde kullanılan \bar{y}_i ve s^2 terimleri sırasıyla ölçümlerin ortalamasını ve varyansını ifade etmektedir. Bu çalışmada, tandem yerleştirilmiş rüzgar türbinlerinden elde edilen güç yoğunluğunun maksimum değeri hedeflendiği için larger the better (L tipi) yani en büyük en iyi kriteri kullanılmıştır.

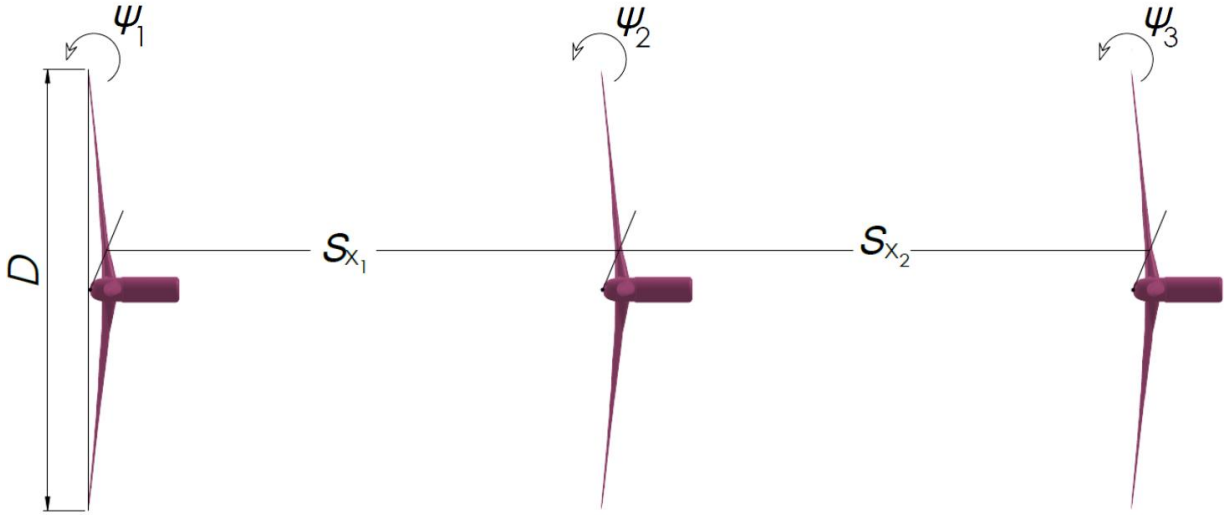
5.3. Deney Tasarımı

Bu çalışmada akış yönünde türbinler arası mesafe değerleri olan S_{X_1} ve S_{X_2} için rotor çapı cinsinden 3D, 4D ve 5D mesafeleri dikkate alınmıştır. Türbinler için tanımlanan sapma açısı değerleri, yukarı akış yönündeki türbin indisi 1 olacak şekilde sırasıyla ψ_1, ψ_2 ve ψ_3 'dir. Bu sapma açıları, pozitif yön saat yönü tersi olacak şekilde, -20° 'den 20° 'ye 5° 'lik adım aralıklarıyla değiştirilerek simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Modele ait faktörler Şekil 5.2'de tanımlanmış ve sahip olduğu seviyeler Tablo 5.1'de gösterilmiştir.

Tablo 5.1. A grubu deney tasarımına ait faktör ve seviyeleri

Seviye									
Faktör	1	2	3	4	5	6	7	8	9
S_{X_1}	3D	4D	5D						
S_{X_2}	3D	4D	5D						
ψ_1	-20°	-15°	-10°	-5°	0°	5°	10°	15°	20°
ψ_2	-20°	-15°	-10°	-5°	0°	5°	10°	15°	20°
ψ_3	-20°	-15°	-10°	-5°	0°	5°	10°	15°	20°

Deney tasarımında tam faktöriyel tasarımlar tüm faktör ve seviyelerin her birini içerdiğinden, özellikle çok sayıda değişkenin bulunduğu durumlarda yüksek hesaplama maliyeti ve kaynak gereksinimi doğurmaktadır. Bu noktada, Taguchi deney tasarımı gibi verimli deney planlama yöntemleri devreye girerek daha az sayıda deney ile optimum sonuçlara ulaşmayı mümkün kılmaktadır. Bu bağlamda tüm değişkenler düşünüldüğünde zaman ve kaynak maliyeti açısından tam faktöriyel deney tasarımı yapmak mümkün olmadığı için, bir istatistik programı olan JMP kullanılarak, mümkün merteye simetrik ve tüm faktöriyeli temsil edecek şekilde 81 farklı senaryodan oluşan Deney Tasarımı oluşturulmuştur.



Şekil 5.2. Deney tasarımında tanımlanan mesafe ve sapma açı faktörleri

5.4. Bulgular ve Tartışma

Deney tasarımında oluşan senaryolar için, IEC 61400 standardında bir türbinin kısa vadeli simülasyonu için belirlenen 600 saniye simülasyon süresi ele alınarak numerik analizler yürütülmüştür. Seçilen NREL 5 MW rüzgar türbini tekil olarak analizi gerçekleştirildiğinde 10,4 m/s'lik rüzgar hızında 3,78 MW'lık enerji ürettiği görülmüştür.

Çalışmanın devamında bu tasarım sonucunda oluşan farklı senaryoların değerlendirilmesi üzerinden ilerletilip değerlendirmeler kurgulanan rüzgar çiftliğinde güç yoğunluğu üzerinden yapılmıştır. Farklı senaryolar için güç alanı ve yoğunluğu tanımı şu şekildedir:

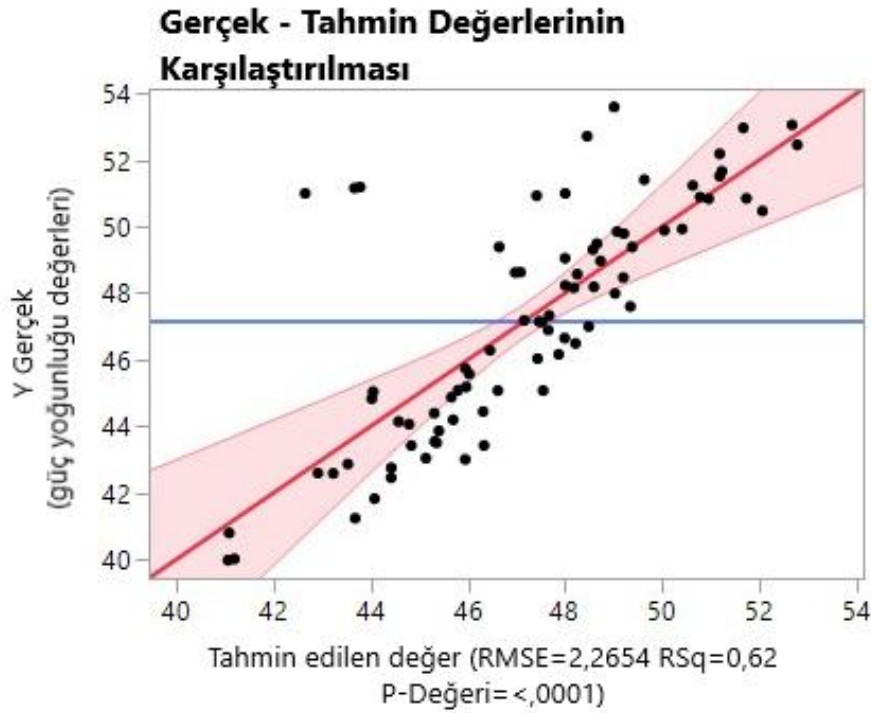
$$A_G = D \times (S_{X_1} + S_{X_2}) \quad (5.4)$$

$$P_D = \frac{\text{Güç (W)}}{A_G (m^2)} \quad (5.5)$$

Burada A_G güç alanını, P_D ise çiftlikte elde edilen toplam gücün güç alanına bölümüyle elde edilen güç yoğunluğunu temsil etmektedir.

Simülasyon sonuçlarında bağımsız değişkenler (mesafe ve sapma açısı) ile bağımlı değişken (güç yoğunluğu) arasındaki ilişkiyi tahmin etmek için en küçük kareler yöntemine dayalı lineer regresyon modeli oluşturulmuştur. Bu model belirli koşullar için elde edilen verilerden genel bir matematiksel model çıkararak farklı senaryolar için tahmin yapma olanağı sunar.

Şekil 5.3’de A grubu deney tasarımındaki güç yoğunluğu değerleri için analiz sonuçlarına ait gerçek ve istatiki tahmin değerleri kıyası görülmektedir. Görselde bulunan siyah noktalar veri noktalarını temsil etmektedir. Her bir nokta, bir gözlem için gerçek (y eksen) ve tahmin edilen (x eksen) değerleri temsil eder. Mükemmel bir tahmin sonucunda veriler 45°’lik eğime sahip olan kırmızı regresyon doğrusu üzerinde toplanmaktadır. Regresyon doğrusunun pozitif eğimli olması tahmin edilen değer arttıkça gerçek değerinde arttığını göstermektedir. Regresyonun üst ve alt bölgesini kapsayan kırmızı bölge ise güven aralığını temsil eder. Tahmin değerlerinin belirli bir güven aralığında değişebileceğini göstermektedir. Alanın genişliği, belirsizliğin derecesini temsil eder. Geniş alanlar, modelin tahmin doğruluğunun daha düşük olduğu bölgeleri işaret eder. Mavi yatay çizgi ise genellikle ortalama veya belirli bir referans değerini gösterir.



Şekil 5.3. A grubu deney tasarım modeline ait tahmin performansı

Model %62’lik bir açıklayıcılık katsayısına R^2 sahiptir. Bu durum modelin bağımlı değişkendeki değişimin %62’sini açıkladığı (determination coefficient) anlamına gelmektedir. RMSE (Root Mean Square Error) değeri, modelin ortalama hata büyüklüğünü gösterir ve bu değer $2,2654 W/m^2$ olarak görülmektedir. Bu modelin tahmin ettiği güç yoğunluğu, gerçek güç yoğunluğundan ortalama olarak $\mp 2.2654 W/m^2$ sapma gösterdiği anlamına gelir. Değerin sıfırdan uzak olması tahminlerin belli bir hata payına sahip olduğunu göstermektedir. P-Değeri modelin anlamlı olup olmadığını test eden bir değerdir. Küçük bir P-Değeri ($<0,05$), modelin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu gösterir.

A grubu deney tasarımında yer alan senaryo sonuçlarına ait maksimum güç yoğunluğunun elde edildiği 3 konfigürasyon Tablo 5.2’de verilmiştir. P_D için en yüksek değer, $53,60 W/m^2$ iken çiftlik için toplam güç çıkışı $6,8 MW$ değerine ulaşmaktadır. Maksimum güç çıkışı senaryosunda ise türbinler maksimum mesafe $5D$ değerine sahipken sapma açıları sırasıyla 20° , 20° , -10° olduğu durumda gerçekleşir. Bu senaryoda türbin güç çıktıları sırasıyla $3,165 MW$, $1,81 MW$ ve $2,51 MW$ olup çiftlikteki toplam güç çıkışı $7,485 MW$ olmaktadır. Ayrıca hakim rüzgar yönüne dik yönde çalışan türbin $10,40 m/s$ rüzgar hızında $3,78 MW$ güç üretimi gerçekleştirirken sapma açısı değeri arttıkça türbinde gerçekleşen güç üretimi azalmaktadır. Temel sebebi, türbinin maruz kalacağı rüzgar hızının türbine dik doğrultudaki bileşenini azaltmasıdır.

Tablo 5.2. A grubu deney tasarımında yer alan ve güç yoğunluk değerinin en yüksek olduğu üç senaryo

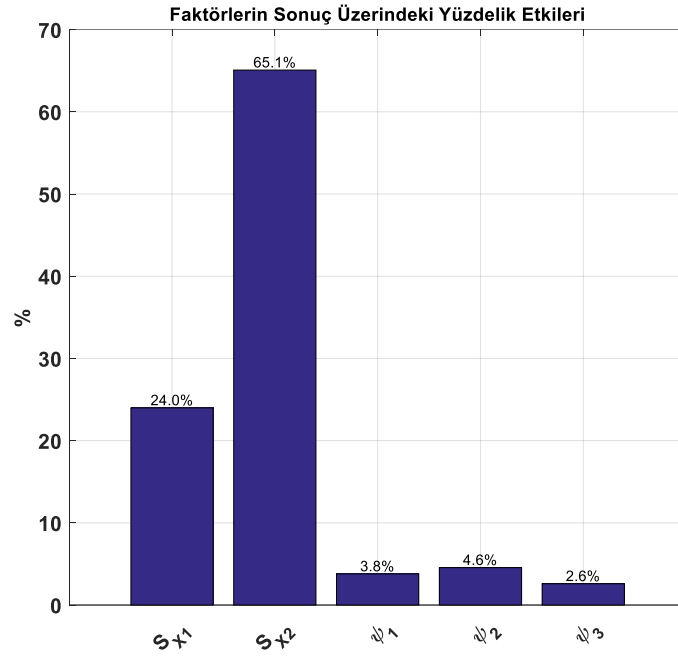
Senaryo	S_{X_1}	S_{X_2}	ψ_1	ψ_2	ψ_3	WT1 (MW)	WT2 (MW)	WT3 (MW)	TOTAL (MW)	$P_D (\frac{W}{m^2})$
5	4D	4D	10°	15°	10°	3,62	1,454	1,733	6,807	53,60
13	5D	3D	20°	20°	20°	3,165	1,813	1,75	6,728	52,97
26	5D	3D	10°	20°	20°	3,62	1,515	1,604	6,739	53,06

Modeldeki faktörlerin etkilerini incelemek ve konfigürasyondaki değişkenlerin davranışını anlamak için *Sum of Squares* (SS) kullanılabilir. Böylece modelde yer alan her bir faktörün model üzerindeki yüzdeler etkisi hesaplanabilir. Üç seviyeli bir değişken için SS’in hesaplanması (Funkenbusch, 2004):

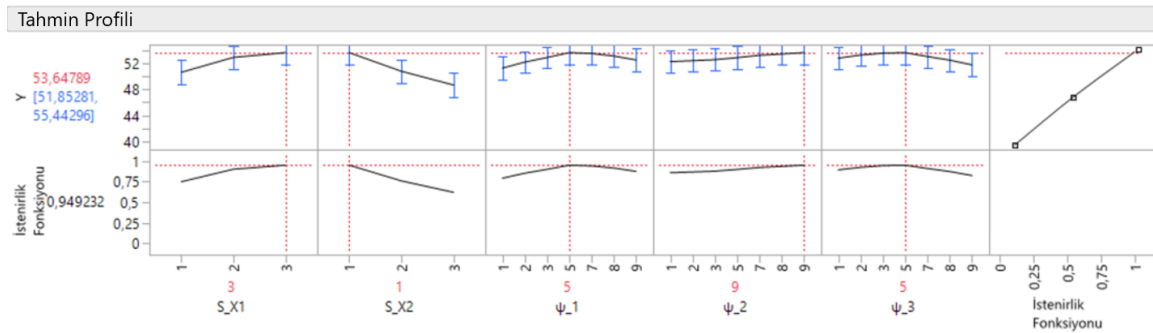
$$SS = n_{-1}(m_{-1} - m^*)^2 + n_0(m_0 - m^*)^2 + n_{+1}(m_{+1} - m^*)^2 \quad (5.6)$$

gibidir. Burada n_{-1} , n_0 ve n_{+1} her seviyede bulunan gözlem sayılarını ifade eder. Bu seviyelerdeki ortalama yanıt değerleri ise m_{-1} , m_0 ve m_{+1} ile ifade edilmektedir. Tüm gözlemlerin genel ortalaması ise m^* olarak ifade edilir. Şekil 5.4’de A grubu için SS sonucunda modele ait faktörlerin sonuca etkileri yüzdeler olarak verilmektedir. Şekilden yola çıkarak; S_{X_1} ve S_{X_2} faktörlerinin güç yoğunluğu değişimi üzerindeki etkisi sırasıyla %24 ile %65,1 değerlerine sahipken türbinlerin sapma açılarındaki değişim etkisinin az olduğu görülmektedir. Modelin iyileştirilmesi adına en düşük etkiye sahip ψ_3 faktörü deney tasarımından çıkarılabilir.

Sonuçlar maksimizasyon hedeflenerek tahmin edilmiş ve bir model önerisi oluşturulmuştur. Önerilen senaryo Şekil 5.5’de verilmektedir. Bu konfigürasyon değerlendirildiğinde ikinci türbin için maksimum mesafeyi önerirken son türbin için en küçük mesafe değeri önerilmiştir. Ayrıca sapma açıları ilk ve son türbin için 0° ’yi önerirken ikinci türbin için 20° önerilmektedir. Önerilen senaryo için sayısal analizi yapıldığında, türbinler sırasıyla 3,78 MW, 1,468 MW ve 1,65 MW güç üretmektedir. Çiftliğin toplam güç üretimi bu senaryo doğrultusunda 6,898 MW değerine ulaşırken birim alan için güç yoğunluğu $54,31 W/m^2$ değerine ulaşmaktadır.



Şekil 5.4. A grubu deney tasarımındaki faktörlerin güç yoğunluğu üzerindeki yüzdeler etkileri



Şekil 5.5. A grubu deney tasarımı için tahmin profili, maksimize edilmiş tahmin değeri ve istenirlik fonksiyonu

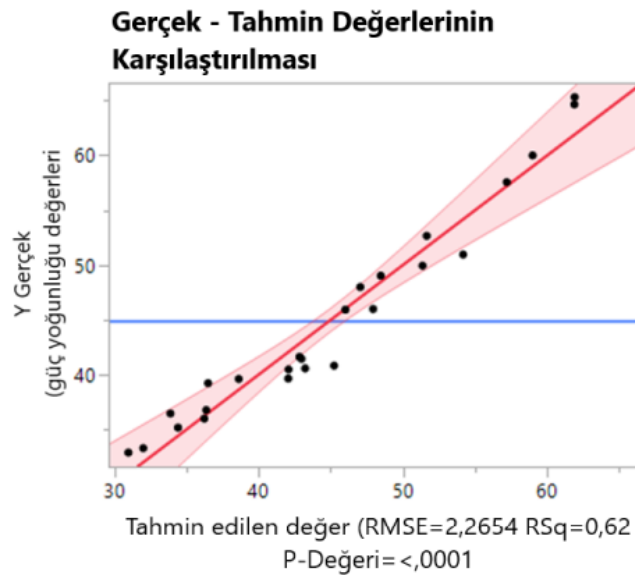
Çıktılar değerlendirildiğinde üçüncü türbindeki sapma açı değişimi, deney tasarımındaki düşük yüzdeler etkisi nedeniyle ihmal edilerek ikinci bir deney tasarımı olan B grubu oluşturulmuştur. Ayrıca tahmin profilinden ulaşılan bulgular sonucunda türbin

mesafelerindeki artışın oluşabilecek uzak mesafe değerlerinde daha iyi sonuç oluşturabileceği düşünülmüştür ve değerlendirmek için yeni mesafe değerlerini içeren deney tasarımı modellenmiştir. Ye vd. (2024) 8D'lik bir mesafe ve sonrası için art izi etkilerinin sonlanabileceğini öngörmektedir. B grubu deney tasarımında maksimum mesafe için bu bilgi dikkate alınmıştır. Oluşturulan B grubu deney tasarımı faktör ve seviyeleri Tablo 5.3'de gösterilmektedir.

Tablo 5.3. B grubu deney tasarımına ait faktör ve seviyeleri

Faktör \ Seviye	Seviye				
	1	2	3	4	5
S_{X_1}	3D	4D	5D	6D	8D
S_{X_2}	3D	4D	5D	6D	8D
ψ_1	-20°	-10°	0°	10°	20°
ψ_2	-20°	-10°	0°	10°	20°

Model doğrultusunda faktör ve seviyeleri ele alındığında, Taguchi yöntemiyle 25 farklı senaryodan oluşan deney tasarımı önermiştir. Modele ait tahmin dağılımı ve R^2 değerinde ilk deney tasarımına kıyasla iyileşme görülmektedir. Model %95'lik bir R^2 değerine sahiptir. Bu durum modelin bağımlı değişkendeki değişimin %95'ini açıkladığı anlamına gelmektedir. RMSE değeri, modelin ortalama hata büyüklüğünü gösterir ve bu değer $2,4831 W/m^2$ olarak görülmektedir (Bknz Şekil 5.6).



Şekil 5.6. B grubu deney tasarımının modeline ait tahmin performansı

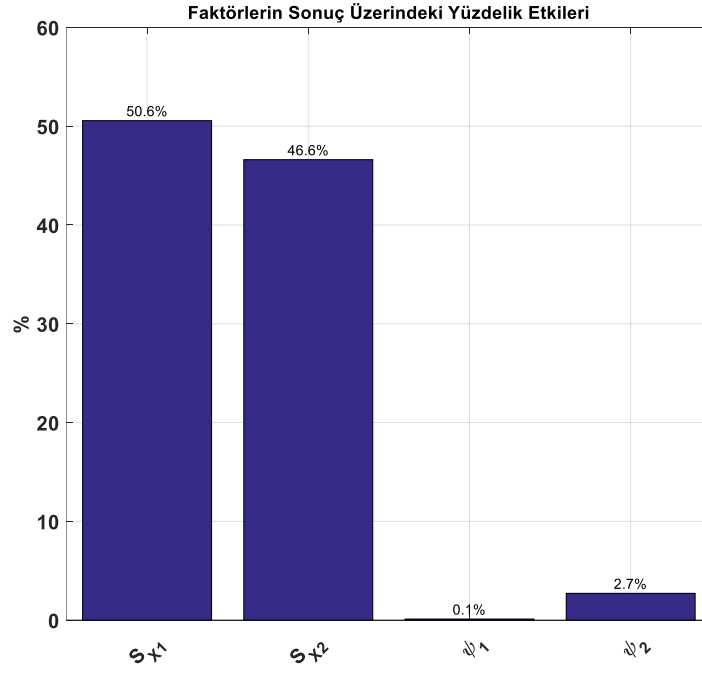
B grubunda yer alan 25 farklı senaryoya ait maksimum güç yoğunluğuna ulaşan 3 konfigürasyon Tablo 5.4’de gösterilmektedir. P_D için en yüksek değer, tanımlanan alan için 65,31 W güç üretimi sunarken kurgulanan çiftlik için toplam güç çıkışı 6,221 MW değerine ulaşmaktadır.

Tablo 5.4. B gurubu deney tasarımında yer alan ve güç yoğunluk değerinin en yüksek olduğu üç senaryo

Senaryo	S_{X_1}	S_{X_2}	ψ_1	ψ_2	ψ_3	WT1 (MW)	WT2 (MW)	WT3 (MW)	TOTAL (MW)	$P_D \left(\frac{W}{m^2} \right)$
1	3D	3D	-10°	10°	0°	3,62	1,198	1,34	6,158	64,65
2	3D	3D	20°	0°	0°	3,165	1,659	1,397	6,221	65,31
8	4D	3D	10°	20°	0°	3,62	1,252	1,795	6,667	59,99

Ayrıca Tablo 5.5’de ise tüm senaryo sonuçları içerisinde yer alan maksimum güç üretiminin gerçekleştiği 3 durum verilmektedir. Maksimum güç çıkışının maksimum mesafede gerçekleştiği ve kurgulanan çiftlik için 8,454 MW’lık bir değere ulaşıldığı görülmektedir. Şekil 5.7’de SS sonucunda B grubuna ait faktörlerin maksimum güç yoğunluğuna etkileri yüzdelik olarak verilmektedir. Şekilden yola çıkarak; türbinler arası mesafenin artmasıyla S_{X_1} faktörünün güç yoğunluğu üzerindeki etkisi %50,6’ya ulaşmıştır. S_{X_2} faktörünün güç yoğunluğu değişimi üzerindeki etkisi ise %46,6’lık değere sahipken türbinlerin sapma açılarındaki değişimin modele etkisinde azalma görülmektedir. Mesafenin artışıyla aşağı akış türbinlerinde art izi etkinliğinin azalması, sapma açılarındaki değişimin sonuçlar üzerindeki etkinliğin düşmesine neden olmuştur. Sapma açılarındaki değişimin sonuç üzerindeki etkinliğinin anlaşılması için türbinler arası mesafe değerlerinin azaltılarak yeni bir deney tasarımı modeliyle genel bir kıyaslama önerisi sunulabilir.

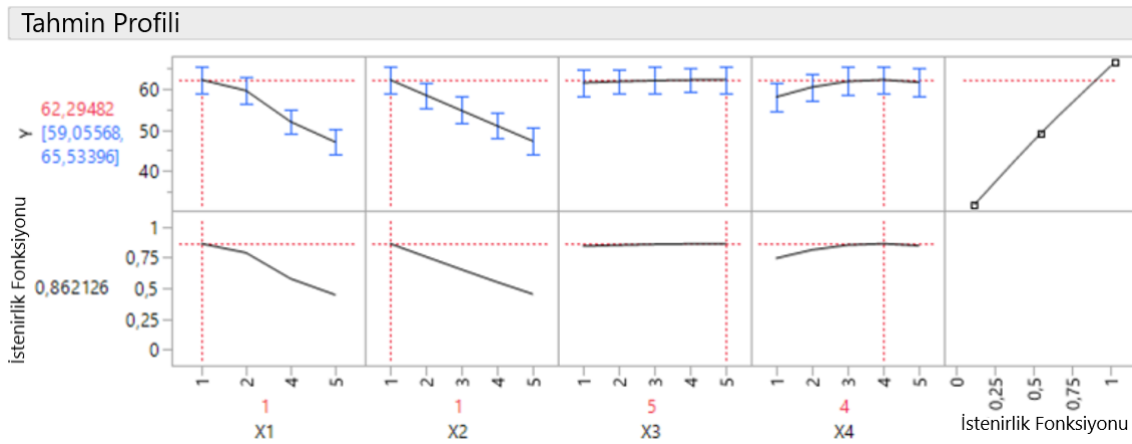
B grubu için sonuçlar maksimizasyon hedeflenerek tahmin edilmiş ve bir model önerisi oluşturulmuştur. Önerilen senaryo Şekil 5.8’de verilmektedir. Bu konfigürasyon değerlendirildiğinde mesafe değerleri minimum değerde (3D) önerilmektedir. Ayrıca sapma açıları ilk türbin için 20°’yi önerirken ikinci türbin için 10° önerilmektedir. Önerilen senaryo için sayısal analizi yapıldığında, türbinler sırasıyla 3,165 MW, 1,51 MW ve 1,63 MW güç üretmektedir. Çiftliğin toplam güç üretimi bu senaryo doğrultusunda 6,305 MW değerine ulaşırken tanımlanan alan için güç yoğunluğu $66,2 W/m^2$ değerine ulaşmaktadır.



Şekil 5.7. B grubu deney tasarımındaki faktörlerin güç yoğunluğu üzerindeki yüzdilik etkileri

Tablo 5.5. B grubu deney tasarımında yer alan en yüksek güç üretiminin gerçekleştiği üç senaryo

Senaryo	S_{X_1}	S_{X_2}	ψ_1	ψ_2	ψ_3	WT1 (MW)	WT2 (MW)	WT3 (MW)	TOTAL (MW)	$P_D (\frac{W}{m^2})$
17	6D	8D	20°	20°	0°	3,165	2,004	3,001	8,17	36,76
24	8D	8D	-10°	20°	0°	3,62	2,094	2,638	8,352	32,88
25	8D	8D	20°	10°	0°	3,165	2,632	2,657	8,454	33,28



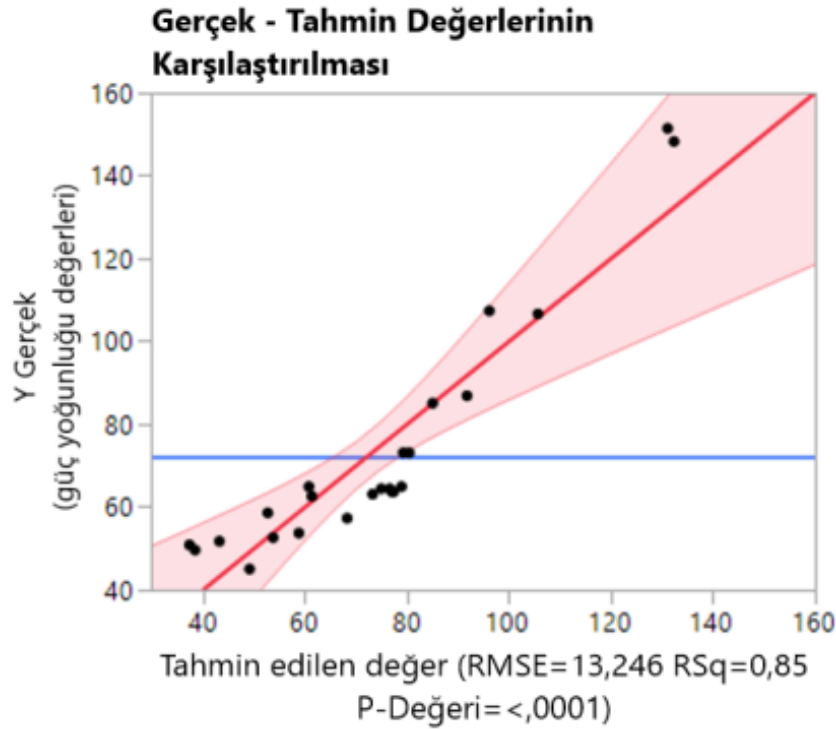
Şekil 5.8. B grubu deney tasarımı için tahmin profili, maksimize edilmiş tahmin değeri ve istenirlik fonksiyonu

Çiftlik modeli için C grubunda, mesafe faktörünün azaldığı durum için ayrıca bir değerlendirme yapılmıştır. Bu modelde bir önceki deney tasarımında benzer olarak sapma açısı değerleri aynı tutulmuş, mesafe değerleri azaltılarak sonuç üzerindeki etkileri incelenmiştir. C grubu için faktör ve seviyeleri Tablo 5.6’da gösterilmektedir.

Tablo 5.6. C grubu deney tasarımına ait faktör ve seviyeleri

Faktör \ Seviye	Seviye				
	1	2	3	4	5
S_{X_1}	1D	2D	3D	4D	5D
S_{X_2}	1D	2D	3D	4D	5D
ψ_1	-20°	-10°	0°	10°	20°
ψ_2	-20°	-10°	0°	10°	20°

Model doğrultusunda faktör ve seviyeleri ele alındığında, Taguchi yöntemi 25 farklı senaryodan oluşan deney tasarımı önermiştir. Modele ait tahmin dağılımı ve R^2 değerinde A grubuna kıyasla iyileşme görülmektedir. Modelde ortalama güç yoğunluğu tahmin değeri büyüdüğünden RMSE değerinde de doğru orantıda bir artış gözlemlenmiştir. Model %85’lik bir R^2 değerine sahiptir (Bknz Şekil 5.9). Bu durum modelin bağımlı değişkendeki



Şekil 5.9. C grubu deney tasarım modeline ait tahmin performansı

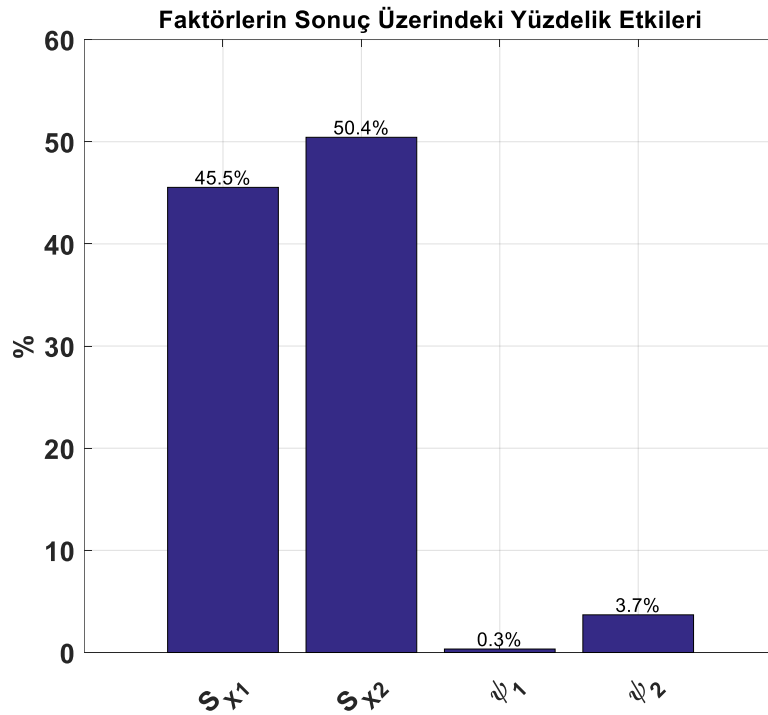
değişimin %85'ini açıklar ve B grubu deney tasarımına göre tahmin değerleri daha az anlamlı olduğu anlamıdır. Bu durum Modelin istatistiksel olarak anlamlı olduğu P-Değeri değeriyle görülebilmektedir.

C grubunda yer alan her senaryo için sayısal analiz yapıldığında en yüksek güç alanı değerlerinin minimum mesafe seviyesinde gerçekleştiği Tablo 5.7'de görülmektedir. En yüksek P_D değeri, $151,42 W/m^2$ iken toplam güç çıkışı $4,808 MW$ değerine gerilemiştir.

Tablo 5.7. C grubu deney tasarımında güç yoğunluk değerinin en yüksek olduğu üç sonuç

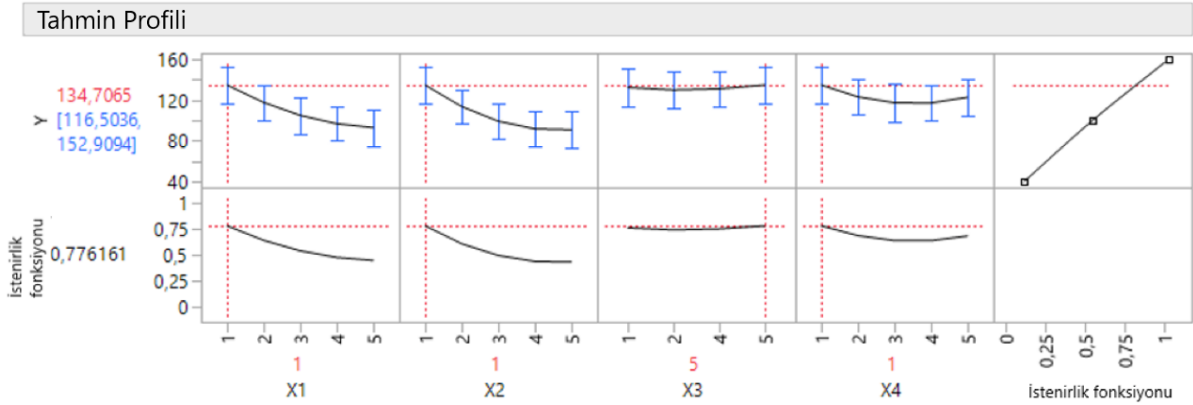
Senaryo	S_{X_1}	S_{X_2}	ψ_1	ψ_2	ψ_3	WT1 (MW)	WT2 (MW)	WT3 (MW)	TOTAL (MW)	$P_D (\frac{W}{m^2})$
1	1D	1D	-20°	-20°	0°	3,165	0,574	0,969	4,708	148,27
2	1D	1D	10°	-20°	0°	3,62	0,627	0,561	4,808	151,42
3	1D	2D	10°	20°	10°	3,165	0,784	1,166	5,115	107,39

Şekil 5.10'da görüldüğü üzere, türbin mesafelerindeki değişimle oluşturulan C grubu deney tasarımı için, B grubu deney tasarımı modeline kıyasla S_{X_2} faktöründe tekrar bir artış gözlemlenmiştir. Ayrıca sapma açılarındaki değişimin modelin sonuçları üzerindeki etkisi



Şekil 5.10. C grubu deney tasarımındaki faktörlerin güç yoğunluğu üzerindeki yüzdeler etkileri

düşük bir orana sahip olsa da B grubuna kıyasla yüzdelik olarak artış gözlemlenmiştir. Buradan şu sonuca ulaşılabilir, türbinler arası mesafe etkileri model sonucu üzerindeki değişim için ana etkenken, türbinlerin birbirine yaklaştığı durumlarda sapma açılarındaki değişim küçük bir yüzdelik etkiye sahip olsa da önem kazanmaktadır. Kısa mesafeli yerleşimlerde art izi manipülasyonu yapılarak aşağı akış türbinlerinin maruz kaldığı art izi etkinliğinin azaltılması güç yoğunluğunu olumlu yönde etkilemektedir. Şekil 5.11’de tanımlanan tahmin modelinin önerisi ise türbin mesafeleri için minimum değerde olurken sapma açılarındaki değişim ise maksimum değerlerde olmuştur. Bu senaryo için sayısal analiz yapıldığında sonuç Tablo 5.7’de yer alan ilk senaryonun sahip olduğu değerler ile aynı çıkmaktadır. Fakat deney tasarımı içerisinde yer alan ve maksimum güç yoğunluğu değeri, tanımlanan alan için $151,42 \frac{W}{m^2}$ olan ikinci senaryo sonuçlarından daha az bir sonuca ulaştırmaktadır. Dolayısıyla, mesafenin azalmasıyla birlikte simülasyon ve model tahminleri arasındaki uyumun zayıfladığı ve sonuçların doğruluk seviyesinin azaldığı söylenebilir. Bu bağlamda, yakın mesafelerde elde edilen sonuçların değerlendirilmesi sırasında, FAST.Farm modelinin kısıtları ve yakınsama problemleri göz önünde bulundurulmalıdır.



Şekil 5.11. C grubu deney tasarımı için tahmin profili, maksimize edilmiş tahmin değeri ve istenirlik fonksiyonu

6. TÜRBİN KANATLARINDA YORULMA

Rüzgar türbinleri, çalışma ömürleri boyunca rüzgar ve rüzgardaki ani değişimler, dalga (deniz temelli türbinler için), deprem ve kanadın dönmesiyle meydana gelen döngüsel yükler gibi birçok yüke maruz kalır. Oluşan yükler yorulma ve nihai mukavemet açısından önem taşımaktadır. IEC 61400 standardına göre rüzgar türbinlerinin en az 20 yıl çalışabilecek düzeyde tasarlanması ve tasarım sürecinde yorulma ve nihai mukavemet esaslarını aşarak oluşabilecek arıza durumları da dikkate alınmalıdır. Oluşan yükler genellikle stokastik olduğu için ve durağan bir yapı bulunmadığından ayrıca yüklemelerin önem arz ettiği yapı olan kanatların kompozit malzemelerden yapılması da ömür tahminini son derece karmaşıklştırmaktadır. Malzeme yorgunluğu kaynaklı hasar, yapı statik dayanımının çok altında döngüsel yüklere maruz kaldıktan sonra çatladığında meydana gelir. Bu tekrarlayan gerilim seviyesi değişimleri, özellikle keskin köşeler veya şekil bozuklukları gibi süreksizlik noktalarında, malzemede çatlakların oluşumuna ve ilerlemesine neden olur.

Kanatlar dikkate alındığında, genel olarak kanat kökünde en yüksek kesme kuvveti ve eğilme momenti meydana gelir. Ayrıca, kök bölgesi ile aerodinamik bölge arasındaki geçiş bölgesi, kesit değişiminin keskin olması nedeniyle yorulma açısından özel bir öneme sahiptir. (Matis, 2016; Koçan, 2019). Kanatlarda meydana gelen kuvvetler, eğilme gerilmelerini ve normal gerilmeleri oluşturur. Bu gerilmelerin güvenli sınırı aşması sonucunda deformasyon meydana gelir. Deformasyonun önüne geçmek için kanatların yapımındaki faktörlerin dikkate alınması gerekir. Rüzgar türbinlerinde en yaygın hasar türü rotor veya kanat hasarlarıdır. Bir kanadın maliyeti, bir rüzgar türbininin toplam maliyetinin %15 ila %20'sini temsil edebilir ve kanat hasarının onarım maliyeti en pahalı olan onarım türüdür. Bu sebeple kanatların yapısal sağlık izleme sistemine büyük önem verilmiştir. Ayrıca, kanatta meydana gelen bir hasarın neden olduğu dönen kütle dengesizliği, tüm rüzgar türbini sisteminde ciddi bir hasara yol açabilir ve zamanında onarım yapılmazsa tüm kule çökmeye sonuçlanabilir. Rüzgar türbinlerinde kanat kesiti kabuğunda meydana gelen hasar tipleri Tablo 6.1'de listelenmiştir. Türbin kanat kesiti kabuğunda meydana gelen hasar tiplerinin bazıları Şekil 6.1'de görselleştirilmiştir. Yapışkan tabakadaki hasarlar farklı tip olarak adlandırılmıştır; Tür 1 yüzey/yapışkan ayrılması ve Tür 2 yüzeyler arasındaki yapışkan bağlantı arızası, hem önde hem de arkada hasar oluşumu olarak nitelendirilir. Rüzgar altı yüzeyindeki basma yükü hasarlarında Tür 4 burkulma yüküyle tetiklenen katman ayrılması, Tür 5 basma altında laminat arızası, Tür 7 jel kaplama çatlaması ve jel kaplama/yüzey ayrılmasını temsil etmektedir.

Tablo 6.1. Türbin kanat kesiti kabuğunda meydana gelen hasar tipleri

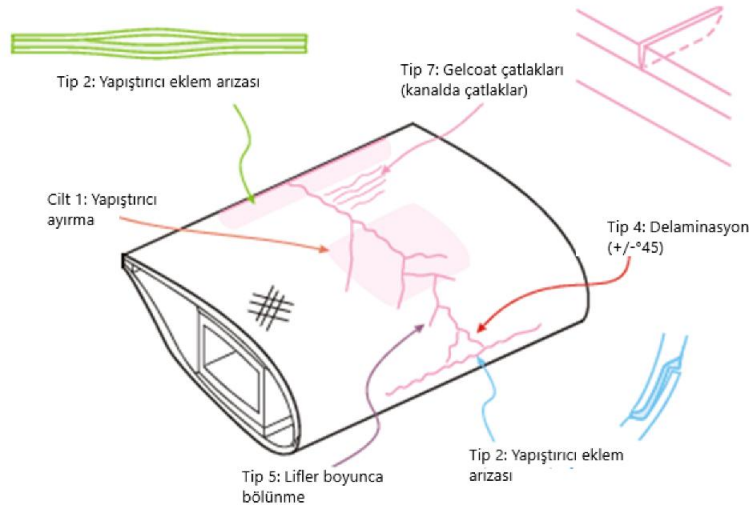
Tür	Açıklama
Tür 1	Yapışkan tabaka içerisinde, yüzey ile ana kiriş flanşlarını birleştiren bölgede hasar oluşumu ve büyümesi (yüzey/yapışkan ayrılması ve/veya ana kiriş/yapışkan ayrılması).
Tür 2	Rüzgar üstü ve rüzgar altı yüzeylerini, önde ve/veya arkada birleştiren yapışkan tabakada hasar oluşumu ve büyümesi (yüzeyler arasındaki yapışkan bağlantı arızası).
Tür 3	Yüzey ve çekirdek arasındaki sandviç panellerde, yüzeylerde ve ana kiriş ağında hasar oluşumu ve büyümesi (sandviç panel yüzey/çekirdek ayrılması).
Tür 4	Yüzeyde ve/veya ana kiriş flanşlarında, çekme veya basma yükü altında laminatlar içinde iç hasar oluşumu ve büyümesi (çekme veya burkulma yüküyle tetiklenen katman ayrılması).
Tür 5	Yüzey ve ana kiriş laminatlarında, ayrı liflerin ayrılması ve kırılması (çekme altında lif arızası; basma altında laminat arızası).
Tür 6	Basma yükü altında yüzey ile ana kiriş arasındaki bağda hasar oluşumu ve büyümesine bağlı olarak yüzeyin burkulması (burkulma ile tetiklenen yüzey/yapışkan ayrılması; özel bir Tür 1 durumu).
Tür 7	Jel kaplamasında çatlak oluşumu ve büyümesi; jel kaplamanın yüzeyden ayrılması (jel kaplama çatlaması ve jel kaplama/yüzey ayrılması).

Kaynak: (Ciang vd., 2008)

Yorulma genellikle bir sinüzoidal dalga formu ile temsil edilen, döngüsel bir yük nedeniyle malzemenin zayıflaması olarak tanımlanır. Wöhler yasası olarak adlandırılan ilk yorulma hasarının döngüsel gerilime bağlılığı keşfi, tablo halinde yayımlanmış sonradan grafiksel olarak sonuçlar logaritmik ölçekte sunularak S-N eğrileri geliştirilmiştir. S-N eğrisi, bir malzemenin belirli bir gerilme seviyesinde kaç yük döngüsüne dayanabileceğini grafiksel olarak gösterir. Ancak, gerçek dünyada malzemeler genellikle sabit genlikli döngüsel yükler yerine değişken genlikli yükler altında çalışır. Bu durumda, S-N eğrileri doğrudan kullanışlı olmamaktadır. Örneğin türbülanslı hava koşullarında uçuş sırasında uçak kanatlarının dinamik olarak yüklendiğini ve değişken genliklerle çok sayıda yük döngüsüne maruz kalmaktadır. Önceleri yorulma sürecini tanımlamak için iki parametrelili bir sayma yöntemi geliştirilmiş ardından *yağmur akışı sayımı (reinflow counting)*, yalnızca 30 yıl sonra Matsuishi ve Endo tarafından yayınlanmıştır. Bu değişken genlikli yüklerin yorulma ömrüne etkisini

değerlendirmek için kullanılan bir analiz tekniğidir. Yağmur Akışı Sayımı yöntemi, yük zaman serisini anlamlı döngülere ayırır ve bu döngülerin genliklerini belirler. Daha sonra, bu döngülerin etkisi, S-N eğrisine dayalı hasar birikim modelleri (ör. Miner Kuralı) kullanılarak hesaplanır (Teixeira, 2014).

Gerilme-ömür yöntemi, döngüsel gerilimin yorulma ömrü ile ilişkisini tanımlar. Malzemelerin yorgunluk davranışını analiz etmek için sıkça kullanılan bir yaklaşımdır. Bu yöntem, yorgunluk ömrünü uygulanan döngüsel gerilime bağlı olarak inceler ve yorgunluk davranışını belirlemek için S-N (gerilme-döngü) eğrileri kullanır. S-N eğrisi, uygulanan gerilme (σ) ile malzemenin başarısızlık öncesindeki döngü sayısı (N) arasındaki ilişkiyi gösterir. Bu eğri genellikle logaritmik bir eksenle görüntülenir ve uygulanan gerilme arttıkça yorgunluk ömrü azalma gösterir. Döngüde yorulma sınıflandırılması olup, düşük döngü yorgunluğu için 1000 döngüye kadar olan yorgunluk durumları yüksek döngü yorgunluğu ise 1000 döngüden fazla olan ve milyonlarca döngüye kadar dayanabilen yorgunluk durumlarını ifade eder. Bu tür yorgunlukta malzeme elastik sınır içerisinde çalışır.



Şekil 6.1. Kanat kesiti kabuğunda meydana gelen hasar tiplerinin bulunduğu bölgelerin görselleştirilmesi; yapışkan tabakalardaki hasarlar

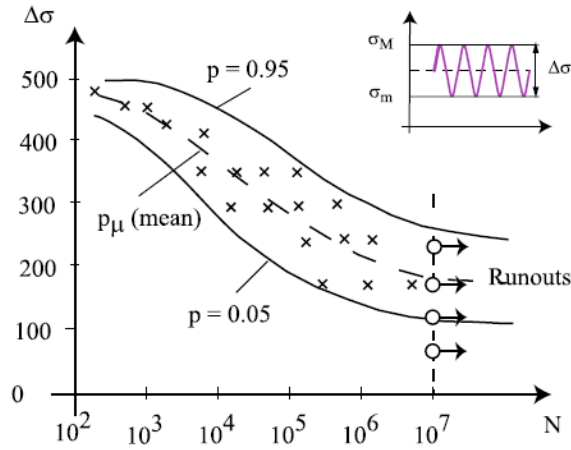
Kaynak: (Sørensen, 2004).

$$\log N = a + b \log \sigma_r \quad (6.1)$$

Burada N çalışma ömrünü a ve b malzeme özelliklerine bağlı sabitler ve σ_r ise gerime aralığı olup maksimum ve minimum noktaların farkına eşittir. Şekil 6.2’de deneysel olarak elde edilen tipik bir gerilme-ömür verisi gösterilmektedir. Bu grafikten yola çıkarak şu yorumlamalar yapılabilir:

- Gerilme aralığının artmasıyla birlikte yorgunluk ömrü azalır.
- Alt bölgede, veriler asimptotik bir davranış sergiliyor gibi görünmektedir.
- Belirli bir gerilme aralığı değerinin altında, yorgunluk hasarı oluşmaz.
- Wöhler eğrisi, nihai mukavemetle ilişkili bir σ_f değeri ile üst sınırlandırılmıştır, σ_f nihai mukavemet (ultimate strength) ile ilişkili bir gerilme değerini temsil etmektedir. Yani, malzemenin maksimum gerilme seviyesini ifade eder.
- Yorgunluk ömrü rastgele bir değişkendir.

Gerilme-ömür yöntemi (strain-life method), gerilme genliği ile yorgunluk başarısına yol açan ters çevrimler arasındaki ilişkiyi kurar. Gerilme-ömür yönteminin aksine *düşük döngü yorgunluğu (low cycle fatigue)* bölgesinde doğru sonuçlar üretebilme yeteneğine sahiptir.



Şekil 6.2. Gerilme-ömür grafiği

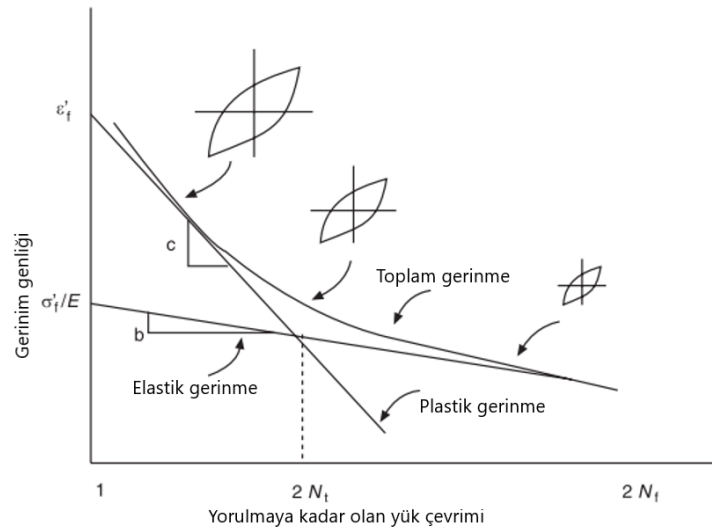
Kaynak: (Castillo ve Fernández, 2009)

Gerilme-ömür yöntemi, malzeme üzerinde *yerel akma (local yielding)* meydana geldiği durumlarda kullanılır. Yani, yük altında malzemenin elastik sınırını aşmış plastik deformasyona girdiği durumları ele alır. Elastik ve plastik bölümlerin toplam deformasyonunu hesaplayarak yorulma ömrünü belirlemeye çalışır aşağıdaki toplam gerilme aralığı formunda verilir (Ramulu ve Kobayashi, 2001):

$$\varepsilon_t = \varepsilon_e + \varepsilon_p = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K}\right)^n = \frac{\sigma_f'}{E} \left(\frac{2N}{N_0}\right)^b + \varepsilon_f' \left(\frac{2N}{N_0}\right)^c \quad (6.2)$$

Burada alt indis olan e ve p sırasıyla elastik ve plastik gerilmeleri ifade eder, N döngü sayısı olup N_0 referans döngü sayısıdır. σ_f' Yorulma dayanımı katsayısı, c yorulma sünekliği üssünü, b yorulma dayanı üssünü ve son olarak ε_f' ise yorulma sünekliği katsayısı üssünü ifade

eder. Elastik ve plastik bileşenler log-log ölçeğinde düz çizgilerle belirtilirken toplan gerinim düz bir çizgi olarak gösterilmez. Dört model parametresini elde etmek için elastik gerinime karşılık gelen bir regresyon çizgisinin ve plastik gerinime karşılık gelen bir regresyon çizgisinin uyumu yapılır ve toplam gerinim her iki bileşenin toplanmasıyla elde edilir. Şekil 6.3’de elastik ve plastik gerinim bileşenlerinin yorulma ömrü üzerindeki etkilerini ve stabilize olmuş histerezis döngülerini gösterilmektedir. Şekilden yola çıkarak şu bilgiler söylenebilir; geçiş yorulma ömrü (N_t) elastik ve plastik deformasyonların eşit olduğu noktadır. Elastik gerinim yüksek yorulma ömrü bölgelerinde baskınken, plastik gerinim düşük yorulma ömrü bölgelerinde daha baskındır.



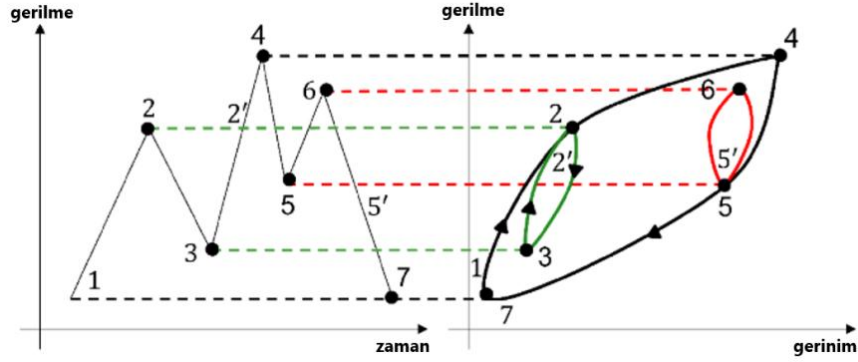
Şekil 6.3. Gerinim genliği ve hataya kadar geçen süredeki dönüş sayısı.

Kaynak: (Ramulu ve Kobayashi, 2001)

Yağmur akış sayısı, bir önceki metotlarda anlatılanın aksine iki parametrelili bir döngü sayma yöntemidir. Malzemenin döngüsel yüklemeye altındaki davranışını açıklar. Pik ve dip yapan gerilim-zaman düzlemindeki noktalar, gerilme-gerinim grafiğinde bir döngü olarak nitelendirilir buna *Hasar Eşdeğerliliği (Damage Equivalence)* denmektedir. Hasar Eşdeğerliliği, iki zaman serisinin aynı *yağmur akışı sayısı* sonucunu verme durumudur, neden oldukları hasar eşdeğerdir (Bknz Şekil 6.4).

Damage Equivalent Load (DEL), belirli bir süre boyunca (genellikle 10 dakika veya daha fazla) değişken yük çevrimlerinin yol açtığı eşdeğer hasarı temsil eden bir yük ölçütüdür. Yapılar, zaman içinde operasyonel yüklerden kaynaklanan yorulma hasarını bu ölçüt ile nitelendirilebilir. DEL, rüzgar türbülansı gibi rastgele süreçlerden etkilendiği için stokastik bir değişken olarak ele alınır. Bu değişkenlik, yapıların yorulma ömrünü doğru bir şekilde tahmin

etmek açısından önemlidir. Önem sebebiyeti gerçek dünya koşulları zamanla önemli ölçüde değişmesinden kaynaklanmaktadır (Natarajan, 2022).



Şekil 6.4. Gerilim döngülerinin yağmur akış ile modellenerek gerilim-gerinim eğrisindeki çevrimleri

Kaynak: (MathWorks, 2025)

Bu sebeple DEL tahmini, türbinde yapıların yorulma ömrünü anlamak ve tahmin etmek için önem taşımaktadır. Tasarım aşamasındaki simülasyon sonuçlarıyla doğrudan karşılaştırılabilir nicel ölçü sağlar ve zamanla oluşan yorulma hasarının daha kolay değerlendirilmesine imkan sunar. Belirli bir aşılma olasılığındaki DEL büyüklüğü, rüzgar türbinlerinin bir sonraki yıl için yapısal bütünlüğünün bir göstergesi olarak hizmet eder. Bu öngörü yeteneği bakım planlaması ve türbin yapıların dayanıklılığının sağlanması açısından kritik öneme sahiptir. Ömür boyu DEL hesaplamasında olasılık dağılımı ile uzun vadeli yorulma etkileri dikkate alınırken, kısa dönem DEL hesaplamaları sadece mevcut zaman serisindeki yük çevrimleri üzerinden değerlendirilir.

6.1. MLife

MLife (Hayman, 2012), aeroelastik ve dinamik simülasyonlardan elde edilen sonuçları post işleme için geliştirilmiş Matlab tabanlı bir araçtır. Simülasyon sonuçları için istatistiksel analizler ve yorulma yükü tahminleri gerçekleştirilir. İstatistiksel çıktılar arasında minimum ve maksimum değer, ortalama, standart sapma, çarpıklık (skewness), basıklık (kurtosis) ve maksimum aralık bulunur. Yorulma hesaplamaları ise tek bir zaman serisine dayalı kısa dönem DEL'leri ve hasar oranları; bir dizi zaman serisine dayalı yaşam ömrü *DEL*, toplam hasar ve bileşenin arıza süresini içerir. Ayrıca türbinin tasarım ömrü boyunca maruz kaldığı değişken yüklerin neden olduğu yorulma hasarını da biriktirir. Bu değişken yükler minimum-maksimum değerlerin eşleştirilmesiyle yağmur akış döngü sayımının kullanıldığı döngülere ayrılır. Her bir döngü ile doğrusal olarak hasarın biriktiği varsayılır.

DEL, N döngüsü boyunca aynı hasarı oluşturan sabit yük aralığıdır yani rüzgar türbininin karşılaştığı tüm simüle edilmiş yüklerin eşdeğer projeksiyonudur. N değeri 1 olarak belirtilirse, DEL tek bir döngünün eşdeğer yükünü temsil eder (Freebury ve Musial, 2000). DEL, kanatların malzeme veya yapısal özellikleri hakkında kesin bilgiye ihtiyaç duymadan yorulma hasarını değerlendirmek için daha basit bir yol sağlamak amacıyla geliştirilmiştir. Yöntem, Palmgren-Miner'ın doğrusal hasar ilkelerine dayanır (Hayman, 2012).

Yağmur akışı sayımında, bir sayımda daha yüksek veya daha düşük bir tepe değeriyle karşılaşıldığında bu bir yarım çevrim sayılır ve bu yarım çevrimler yük ortalama ve aralık değerlerine göre matris oluşturur. EC 61400-1' e göre belirli bir konumdaki hasar bu yarım çevrimlerle doğrusal olarak birikir. Bu durumda tüm sayılmış çevrimlerden kaynaklanan toplam hasar şu şekilde verilir (Hayman, 2012):

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} (L_i^{RF})^m \quad (6.3)$$

N_i S-N eğrisine göre belirli bir yük durumu için arıza çevrim sayısını, n_i yük çevrim sayısını, L_i^{RF} verilen zaman serisi için yük aralığını ve D toplam hasarı ifade eder.

$$N_i = \left(\frac{L_{ult} - |L_{MF}|}{\frac{1}{2} L_i^{RF}} \right)^m \quad (6.4)$$

L_{ult} bileşenin nihai yük değerini, L_{MF} sabit yük ortalamasını ve m ise Wöhler üssünü ifade eder. Çelik kuleler için m genellikle 3, cam elyaf takviyeli kompozitler için ise 10 olarak alınır. Yukarıdaki denklem çevrimlerin sabit ortalama bir yük altında gerçekleştiğini varsayar ancak gerçekte bu ortalama değişebilir. Durumun telafisi için yüklerin ortalama yük etrafında değiştiği varsayılarak L_i^R , i-inci çevrimin yük aralığı olmak üzere Goodman düzeltmesi uygulanır:

$$L_i^{RF} = L_i^R \left(\frac{L_{ult} - |L_{MF}|}{L_{ult} - |L_i^R|} \right) \quad (6.5)$$

Pratikte rüzgar türbininin ömür boyu hasar tahmini, kısa dönem simülasyonundan elde edilen verilerin ömür boyuna yayılmasıyla yapılır. Burada yük tahminleri için Weibull dağılımı kullanılır:

$$n_{ji}^{Life} = f_j^{Life} \cdot n_{ji} \quad (6.6)$$

f_j^{Life} belirli zaman serisi için ömür faktörünü, n_{ji} yük bloklarının sayısını temsil etmektedir. Böylelikle i -inci çevrim ve j -inci zaman serisi için öngörülen hasar sayısı bulunarak toplam birikimli ömür boyu hasarı elde edilir:

$$D_{Life} = \sum_j \sum_i \frac{n_{ji}^{Life}}{N_{ji}} \quad (6.7)$$

N_{ji} j -inci zaman serisindeki i -inci yük bloğunun arıza çevrim sayısını ifade eder. Arıza koşulu; $D_{Life} \geq 1.0$ koşulunda gerçekleşir. Bu durum, tasarım ömrünün toplam birikimli hasara bölünmesiyle arızaya kadar geçen süreyi ifade eder:

$$T_{Fail} = \frac{T_{Life}}{D_{Life}} \quad (6.8)$$

T_{Fail} tasarım ömrünü, D_{Life} ise birikimli ömür boyu hasarı ifade etmektedir. Yukarıda da bahsedildiği üzere MLife, türbinlerin yorulma yüklerinin tahminini DEL hesaplayarak gerçekleştirir ve bu oldu ilk olarak NREL tarafından gerçekleştirilmiştir. DEL, tek bir zaman serisine dayalı yorulma yükünü temsil eden kısa dönem DEL ve olasılık dağılımına göre yüklerin ömür boyu tahmin edildiği ömür boyu DEL olarak iki şekilde tanımlanabilir. Ayrıca DEL, belirli bir frekansta zaman serisiyle aynı hasarı oluşturan sabit genlikli bir yük olarak tanımlanır:

$$D_j^{ST} = \sum_i \frac{n_{ji}}{N_{ji}} = \frac{n_j^{STeq}}{N_j^{eq}} \quad (6.9)$$

Burada D_j^{ST} j -inci zaman serisinden kaynaklanan kısa dönem hasarı, n_{ji} zaman serisindeki yük çevrim sayısını, N_{ji} arıza çevrim sayısını, n_j^{STeq} eşdeğer kısa dönem çevrim sayısını ve son olarak N_j^{eq} ise eşdeğer çevrim sayısını temsil etmektedir. Bu ifade zaman serisinin oluşturduğu hasarı simüle eden eşdeğer yükü ifade etmektedir. Sonraki aşamalarda kısa dönem hasar eşitliğini ifade eden değişkenleri tanımlayabiliriz. Eşdeğer kısa dönem çevrim sayısı olan n_j^{STeq} ise şu şekilde tanımlanır:

$$n_j^{STeq} = f^{eq} T_j \quad (6.10)$$

f^{eq} zaman serisi j için DEL'in eşdeğer frekansını, T_j ise zaman serisinin toplam süresini ifade eder. Arızaya kadar geçen eşdeğer çevrim sayısı N_j^{eq} şu denklem ile ifade edilir:

$$N_j^{eq} = \left(\frac{L^{ult} - |L^{MF}|}{\frac{1}{2} DEL_j^{ST}} \right)^m \quad (6.11)$$

L^{ult} bileşenin maksimum yük kapasitesini, L^{MF} sabit yük ortalamasını, m Wöhler üssünü ifade etmektedir. Kısa dönem DEL ifadesi DEL_j^{ST} şu formül ile hesaplanır:

$$DEL_j^{ST} = \left(\frac{\sum_i (n_{ji} (L_{ji}^{RF})^m)}{n_j^{STeq}} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (6.12)$$

Tüm zaman serileri dikkate alınarak sabit yük ortalaması şu eşitlik ile verilir:

$$DEL^{Life} = \left(\frac{\sum_i \sum_j (n_{ji}^{Life} (L_{ji}^{RF})^m)}{n^{Life,eq}} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (6.13)$$

Eşdeğer ömür boyu çevrim sayısı $n^{Life,eq}$ şu şekilde tanımlanır:

$$n^{Life,eq} = \sum f_j^{Life} n_j^{ST,eq} \quad (6.14)$$

DEL tahmini için her yük türünün nihai tasarım yükü L^{ult} değerinin belirlenmesi gerekir. Nihai yükü tanımlamak için bileşenin sonlu eleman modeli veya rüzgar türbini için belirlenmiş deneysel veriler gereklidir. Ayrıca nihai tasarım yükü değerinin DEL sonuçlarını ciddi orantıda değiştirmeyecek şekilde seçilmesi gerekir. Bu değerler oldukça kaba tahminlerdir ve çok önemli değildir; çünkü farklı durumlar birbirine göre karşılaştırılır. Bu nedenle, göreceli büyüklükler daha fazla önem taşır (Khalid, 2019). MLife yapısal bileşenin yorulma ömrünü belirlemek için nihai tasarım yük girdisi L^{ult} 'ye ihtiyaç duyar. Bu bileşen kesitinin nihai mukavemetine göre dayanabileceği en yüksek yüküdür. Kuvvet unsuru için nihai kuvvet, moment unsuru içinse nihai momenti tanımlar. Sonlu eleman analizi olmadığı durumlarda analitik yaklaşımlar önerilir (NREL Forum, 2024)

6.2. Yorulma Yüklerinin Değerlendirilmesi

Sabit rüzgar hızında çalışan bir türbinde belirli bir ortalama yükün tekrarı ve bunun sonucunda stabil bir yük döngüsü oluşmaktadır. Bu durumda malzemede yorulma etkisi yavaş ilerlemektedir. Türbülanslı ortamda ise kuvvetler değişkendir, ani azalma ve pik atma durumları gözlemlenir. Bu durumda yük spektrumu daha geniş olup düzensiz bir yapıya sahiptir ve malzemede yorulma hızla ilerlemektedir. İstenmeyen durum olan kuvvetlerdeki ani değişimler,

malzemede hasara ve bu hasarın sonucunda ise malzeme yorulmasına neden olmaktadır. Bu düzensizlik ise yorulma etkenini hızlandırmaktadır. Dinamik değişken yapı, malzemedeki dinamik stres odaklarının ortaya çıkmasına sebebiyet vermektedir. Büyük genlikli ancak düşük olasılıkla meydana gelen yük çevrimleri, küçük genlikli ancak sık gerçekleşen yük çevrimlerine göre daha fazla yorulma hasarı oluşturabilir. Bu durumda türbin çiftliğinde ek türbülans ve rüzgar hızındaki ani değişime maruz kalan aşağı akış türbinleri için yorulma etkinliği değerlendirilmelidir.

NREL 5MW referans türbinin tekil yorulma analizi değerlendirildiğinde, sonuçların farklı durumlar için değerlendirildiği birçok çalışma bulunmaktadır. Meng (2018) yaptığı çalışmada, Resor'un (2013) NREL 5 MW için tanımladığı kompozit yapısını dikkate alarak kanadı oluşturan farklı malzemeler için yorulma ömrü analizini, NREL 5 MW için tanımlanan ancak rüzgar hızı değeri olan 11,4 m/s'de 0,1 türbülans yoğunluğunda gerçekleştirmiştir. Sonuçlar, Gerinim yoğunlaşma bölgesinin kökten kanat ucuna doğru 10,25 m uzaklıkta yer aldığını ve kökte 10^6 yılı aşan çalışma ömrünün bu noktada 400 yıla kadar düştüğünü gözlemlemiştir. Resor'un (2013) bulguları ise en kritik durumun 15° 'lik sapma açısında 22.700 kN-m kök eğilme momenti gerçekleştiği ve SNL (Triax) malzemesinde kök için en kritik değer olarak $7,55E-07$ 'lik bir ömür boyu hasar oranı değeri elde etmiştir. Bu değer sonsuz bir çalışma ömrünü temsil etmektedir ($20/7,55E-07$ yıl). Kanat yapısındaki sertlik veter uzunluğu ve kompozit layup kalınlığına bağlıdır. Bu değerlerin artması sertliği ve doğru orantılı olarak kanat mukavemetini de arttırmaktadır. Caboni (2016) ise Resor'un (2013) kanat için tanımladığı layup yapısına değinerek, içyapı kalınlığı (s) ve veter uzunluğu (c) olacak şekilde bu iki değişken cinsinden kanat kökünde mukavemet sınırları içinde karşılanabilecek nihai moment değeri Tablo 6.2'de gösterildiği üzere hesaplamıştır. Böylece kanat kökünde sıfırıncı noktanın sahip olduğu 3,5 m çap ve 0,1 s değeri için 64.298 kN-m nihai moment değerini karşılayabileceğini söyleyebiliriz. Ayrıca tekil türbin için 3-25 m/s türbülanslı rüzgar aralığında tekil türbin için OpenFAST'den aldığı çıktıları MLife içerisinde değerlendirmiş ve belirlenen 20 yıllık çalışma koşulu altında en kötü durum için ömür boyu çalışma oranını 0,015 olarak bulmuştur ($20/0,015 = 1.333$ yıl). Thomas vd. (2023), 10 m/s'lik rüzgar hızında, 527,16 kN DEL değerini elde etmiş ve MLife ömür sonuçlarında maksimum yükleme koşullarının ele alınacağı L_{ult} için güvenlik faktörünün 1,5 seçilmesiyle kanadın 30 yıllık çalışma ömrüne sahip olduğu bilgisine ulaşmıştır. Teixeira (2014) ise 10,5-11,5 m/s ortalama rüzgar aralığında %13-15 türbülans yoğunluğunda tekil türbin için 20 yıl çalışma ömrü olarak değerlendirildiğin 1'inci kanattaki yorulma yük oranını $2,19 \times 10^{-10}$ olarak bulmuştur. Ayrıca elde ettiği sonuçlardan

yola çıkararak her 3 kanat için yorulma yükleri kıyaslandığında üçüncü kanadın yorulma yüklerine daha fazla dirençli olduğunu saptamıştır.

Tablo 6.2. Kısmi kesitteki veter uzunluğu ve katman kalınlığına karşılık gelen nihai moment değerleri (kN-m)

s[-]	c[m]			
	0.1	1.9	3.7	5.5
0.1	28,367	16.453	64.298	139.940
0.9	283,67	119.140	510.600	1.172.500
1.7	3.782,3	179.660	869.920	2.042.400
2.5	14.562	213.700	1.134.700	2.798.900

Kaynak: (Caboni, 2016)

Bu kapsamda güvenli sınırlar içerisinde çalışma koşullarını gerçekleştirdiği kuvvet ve moment değerleri için seçilen L^{ult} değerleri Tablo 6.3’de verilmiştir. Yorulma tahmininde tanımlanması gereken diğer bir husus ise Wöhler üssü m ’dir. Kompozit kanatlar için 8, 10 ve 12 olarak değiştiği bir parametrik çalışma olarak ele alınır ve m değerine olan yorulma hassasiyetini değerlendirmek için bu değer aralığı varsayılır. Bu çalışmada ise Wöhler üssü m , 10 alınmıştır. Daha büyük bir m değeri, belirli bir yük genliği için yorulma hasarının oluşması için daha fazla döngü gerektiği anlamına gelir. Bu durum, daha düşük bir m değerine göre farklıdır.

Tablo 6.3. Kanat kökü için belirlenen nihai tasarım yükü değerleri

	RootFxb1 (kN)	RootFyb1 (kN)	RootMxb1 (kN-m)	RootMyb1 (kN-m)
L^{ult}	1.000	1.000	22.700	22.700

Belirlenen rüzgar hızı ve nihai tasarım yükü değerleri dikkate alındığında, NREL 5MW referans türbini için 0° sapma açısında gerçekleştirilen tekil yorulma analizinde en kritik durumun RootMyb1 noktasında meydana geldiği tespit edilmiştir (Bkz. Tablo 6.4). Yapılan hesaplamalara göre, belirlenen 20 yıllık çalışma süresi boyunca yorulma kaynaklı bir hasar oluşmadığı ve 0° ’lik sapma açısında söz konusu kritik nokta için tanımlanan nihai tasarım yükünün altında, güvenli çalışma süresinin en kritik değer RootFyb1 için 39,6 yıl (YawDOF

kapalı) olduğu belirlenmiştir. Burada flapwise yönündeki kuvveti RootFxb1, edgewise yönündeki kuvveti RootFyb1, flapwise yönündeki kuvvetlerin neden olduğu momenti RootMyb1 ve edgewise yönündeki kuvvetlerin neden olduğu moment ise RootMxb1 ile temsil edilmektedir.

Tablo 6.4. NREL 5MW tekil türbini için yorulmaya kadar geçen süre (s)

RootFxb1	RootFyb1	RootMxb1	RootMyb1
2,96e+12	1,25e+09	2,67e+09	2,18e+09

6.2.1. Yorulma Analizi: Maksimum Güç Yoğunluğu

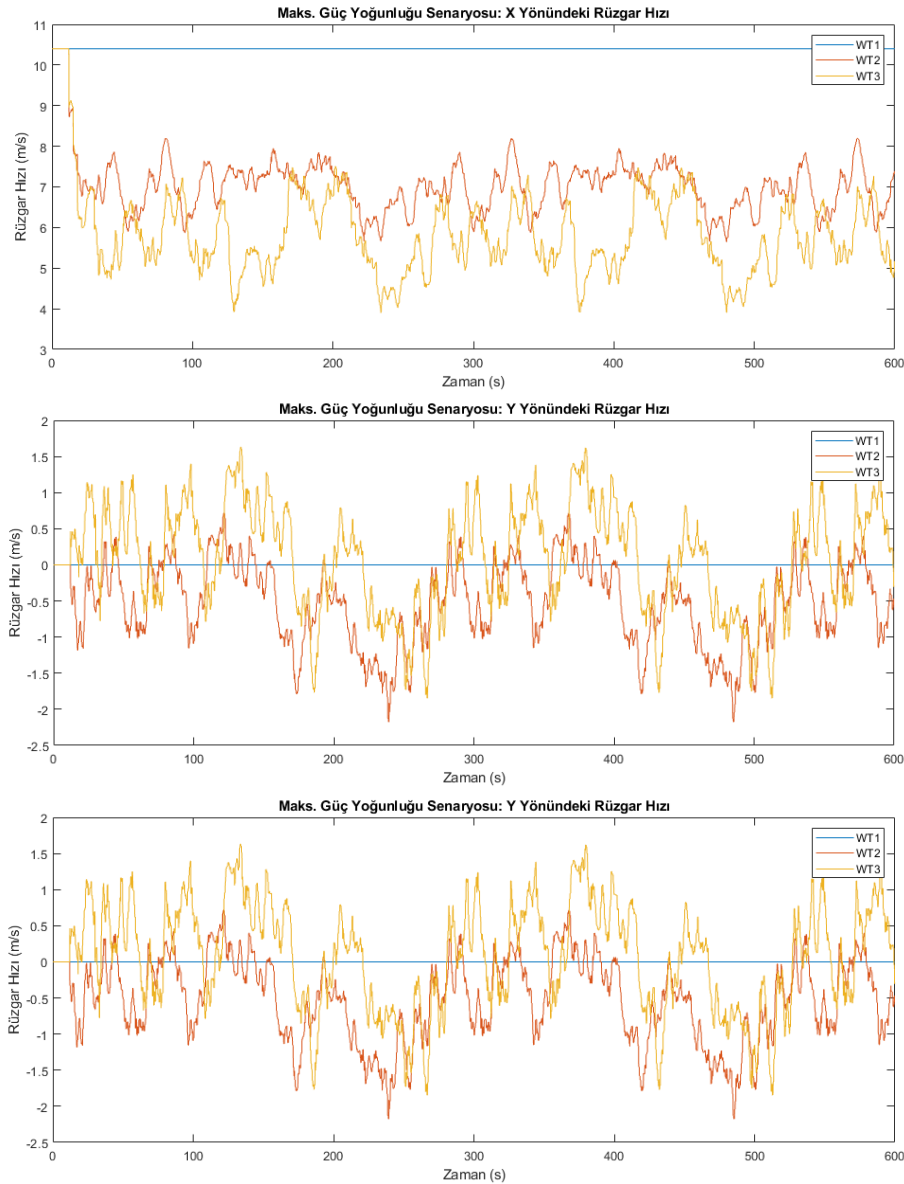
Deney tasarımında maksimum güç yoğunluğuna sahip önerilen bu konfigürasyonda mesafe faktöründe sırasıyla 1D ve 1D mesafe seviyelerine sahipti. Sapma açısı faktöründe ise birinci türbin sapma açısı değeri için -20° , ikinci türbin için 10° ve üçüncü türbin için ise 0° olarak tanımlanmıştı.

Analiz için simülasyon koşulları x yönünde sabit 10,40 m/s'lik hız olarak tanımlanırken, art izine maruz kalan ikinci ve üçüncü türbinin akış alanında türbülans oluşumu Şekil 6.5'de gözlemlenmektedir. Birinci türbinin maruz kaldığı rüzgar yalnızca x yönündeyken aşağı akış türbinleri için rüzgarın artık x bileşeni dışında y ve z bileşeni olduğu görülebilmektedir. Değerler x yönünde olacak şekilde ortalama rüzgar hızları şu şekildedir; ikinci türbin 5,9 m/s ortalama rüzgar hızında üçüncü türbin ise 7,05 m/s rüzgar hızı altında çalışmaktadır. Rüzgar hızlarındaki değişim aralarındaki mesafe aynı olmasına rağmen sahip oldukları sapma açısı değerlerinden kaynaklanmaktadır.

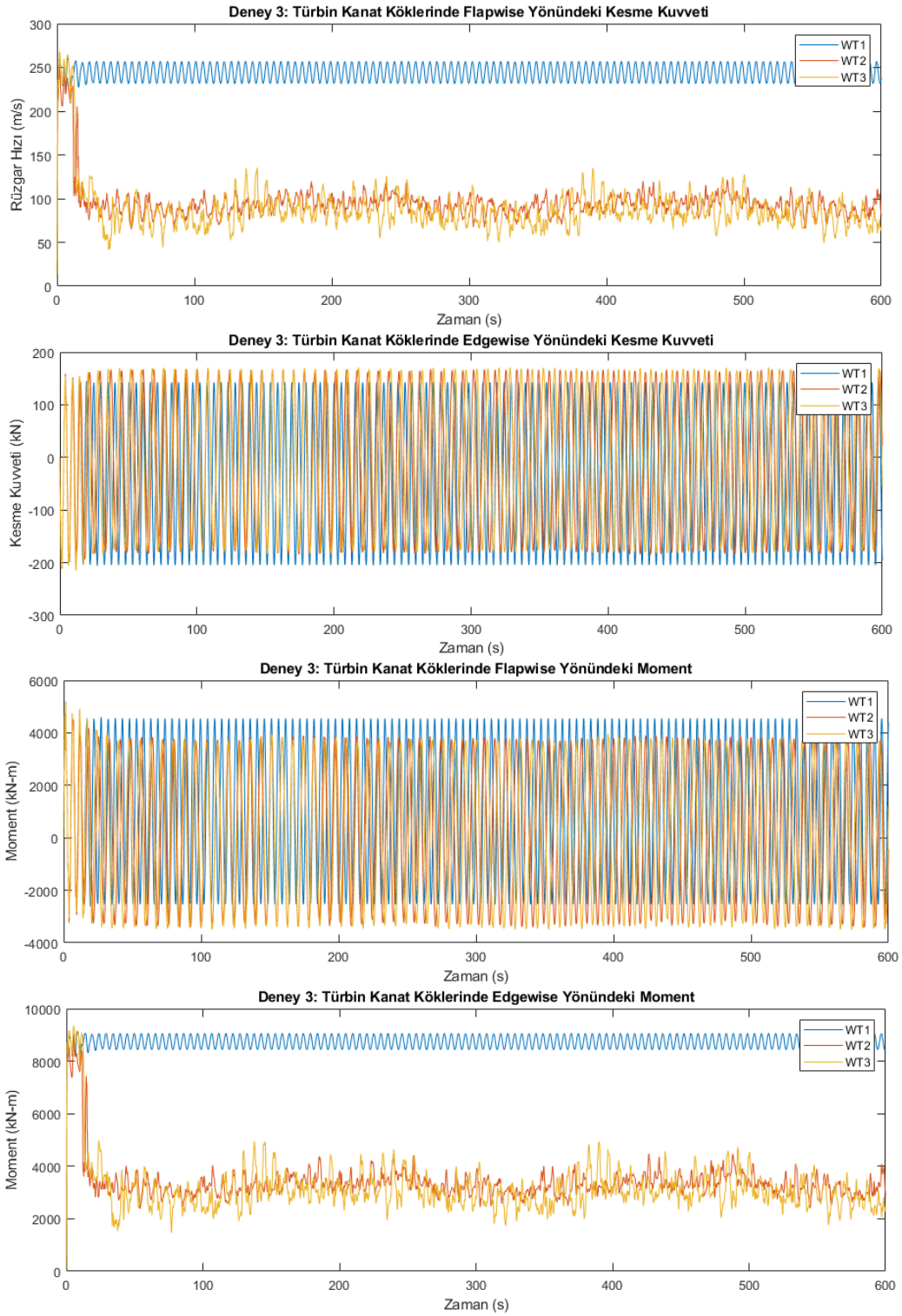
C Grubu oluşumuna göre tandem sıralanmış rüzgar türbinleri için kökte meydana gelen kuvvet-momentler ise Şekil 6.6'da gösterilmektedir. Sabit rüzgar hızında çalışan yukarı türbini için meydana gelen yüklemeler sabit genlikte ve düzenli salınımlar yaparken art izi etkisinde gelişen türbülanslı akışta çalışan aşağı akış türbinleri için düzensiz salınımların gerçekleştiği ve pik noktalarıyla kaotik bir yapının oluştuğu görülebilmektedir. Ayrıca kökte meydana gelen kuvvet ve momentlerdeki mutlak maksimum değerler Tablo 6.5'de verilmektedir.

Art izi, rüzgarın yön ve büyüklük açısından düzensiz bileşenler içermesine yol açar. Yani zaman içinde rüzgar hızında ani yükselişler gözlemlenir. Bu durum, türbin kanatlarında ani ve düzensiz yük değişimlerine sebep olarak maksimum yapısal yüklemelerin oluşmasına zemin hazırlar. Örneğin ikinci türbin birinci türbine kıyasla %43,3 daha az rüzgar hızında çalışmasına rağmen edgewise yönünde %9, üçüncü türbin ise %32,22 daha az rüzgar hızında

edgewise yönünde %9,1 daha fazla kuvvete maruz kalmaktadır. Kanat kökünde meydana gelen kuvvet ve momentler sonucunda yorulmaya kadar geçen süre Tablo 6.6'da verilmektedir. Değerler kıyaslandığında flapwise yönünde oluşan kuvvetler ve edgewise yönündeki moment sonucu yorulmaya kadar geçen sürenin üçüncü türbinde daha az olduğu görülmektedir. Bu durumun nedeni türbülansın çalkantılı yapısı aşağı akış türbinlerinde dinamik yükleri arttırmakta ve aşağı akış türbinleri için yorulma etkilerinin oluşmasına neden olmaktadır. C grubuna ait konfigürasyon sonucunda tasarlanan çiftlik için 3 türbininde çalışma koşullarını sağladığı söylenebilir. Planlanan 20 yıl içerisinde herhangi bir türbinde yorulma gerçekleşmez. Belirlenen nihai yük değerleri sonucunda tahmin edilen en kritik durum değerlendirildiğinde ise birinci türbinde edgewise yönünde kaynaklanan kuvvetlerin neden olduğu ve yorulmanın 33,9 yılda gerçekleştiği sonucuna ulaşılmaktadır.



Şekil 6.5. Maksimum güç yoğunluğu; rüzgar türbinleri kanat köklerindeki rüzgar hızları



Şekil 6.6. Maksimum güç yoğunluğu; türbin kanat köklerindeki kuvvet ve momentler

Üçüncü deney için DEL değerleri Tablo 6.7’de verilmiştir. DEL değerleri, türbin bileşenlerinin zaman içerisinde maruz kaldığı değişken yüklemelerin neden olduğu yorulma hasarını tek bir sabit genlikli yük çevrimine indirgeme amacı taşır. Bu bağlamda DEL, sadece yük büyüklüğünü değil, aynı zamanda çevrimlerin sayısını ve karakterini de göz önünde

bulundurarak yorulma analizlerinde daha güvenilir ve karşılaştırılabilir bir metrik sunar. Üçüncü türbin için flapwise yönünde oluşan DEL kuvvetinin %6,3 ve momentin ise %6,1 fazla olduğu görülmektedir. Bu durum, yüklerin genel olarak düşük genlikli olmasına karşın, zaman zaman ortalama değer çok üzerinde ani piklerin oluşmasından kaynaklanmaktadır. Art izi etkisiyle oluşan türbülanslı akış yapısının, farklı yönlerdeki rüzgar bileşenlerini aşağı akış türbinlerine etkisi, bu türbinlerde yukarı akış türbinine kıyasla ek dinamik yüklemelere neden olur.

Tablo 6.5. Maksimum güç yoğunluğu; kökte meydana gelen mutlak maksimum değerler

	RootFxb1 (kN)	RootFyb1(kN)	RootMxb1(kN-m)	RootMyb1(kN-m)
WT1	261	154	5070	9127
WT2	122	168	3894	4482
WT3	136	171	3994	4950

Tablo 6.6. Maksimum güç yoğunluğu; türbinlerde yorulmaya kadar geçen süre (s)

	RootFxb1	RootFyb1	RootMxb1	RootMyb1
WT1	2,22e+12	1,07e+09	2,64e+09	9,17e+09
WT2	2,79e+12	1,91e+09	4,86e+09	1,35e+10
WT3	1,21e+12	2,08e+09	4,78e+09	5,11e+09

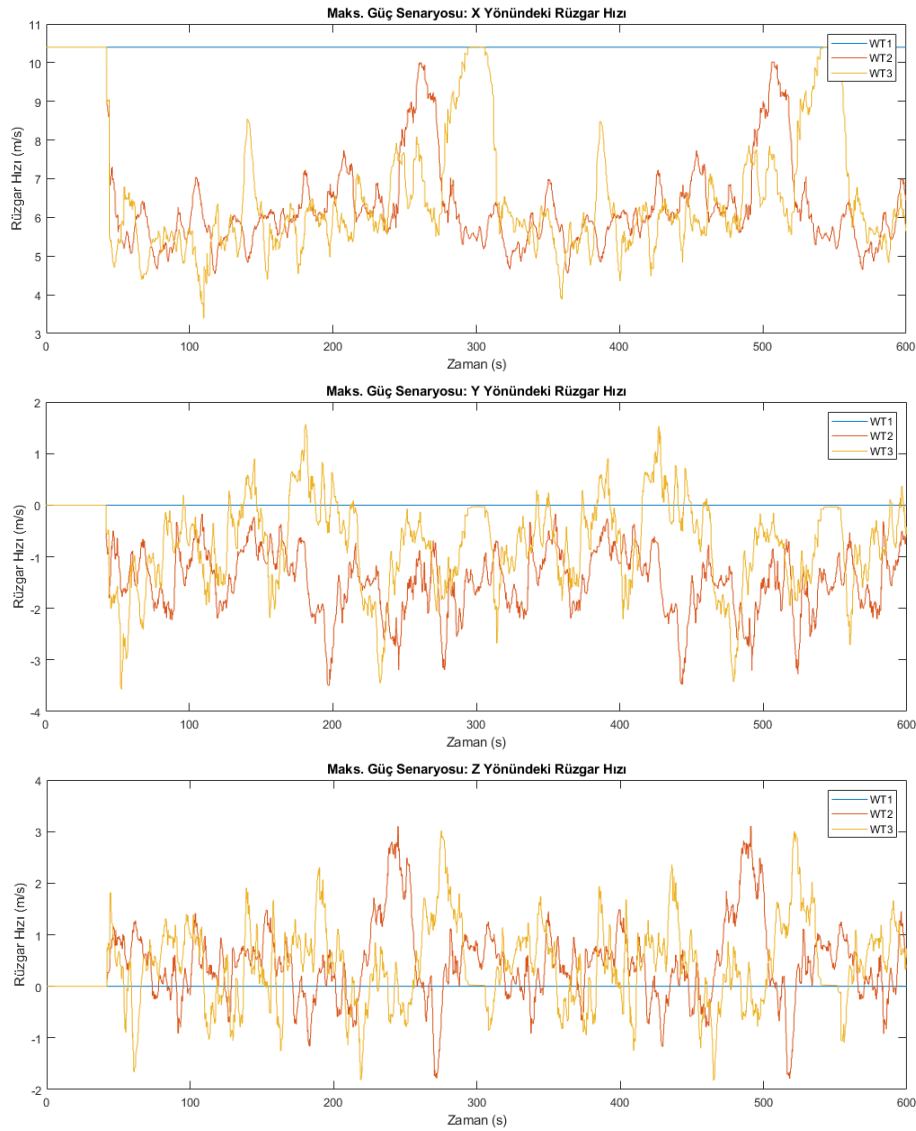
Tablo 6.7. Maksimum güç yoğunluğu; türbinlerdeki DEL tahmin değerleri

	RootFxb1 (kN)	RootFyb1 (kN)	RootMxb1 (kN-m)	RootMyb1 (kN-m)
WT1	142	304	6300	5560
WT2	138	285	5890	5320
WT3	151	285	5950	5900

6.2.2. Yorulma Analizi: Maksimum Güç Üretimi

İkinci deney tasarımında 25 farklı senaryon değerlendirildiğinde maksimum güç üretimini veren konfigürasyon, mesafe aralığı olarak maksimum değer olan 8D'lik mesafe seviyesi önerilmişti. Ayrıca sapma açısı değeri için yapılan öneri ise ilk iki türbin için 20° iken üçüncü türbin için ise 10°'lik bir değer olmuştur.

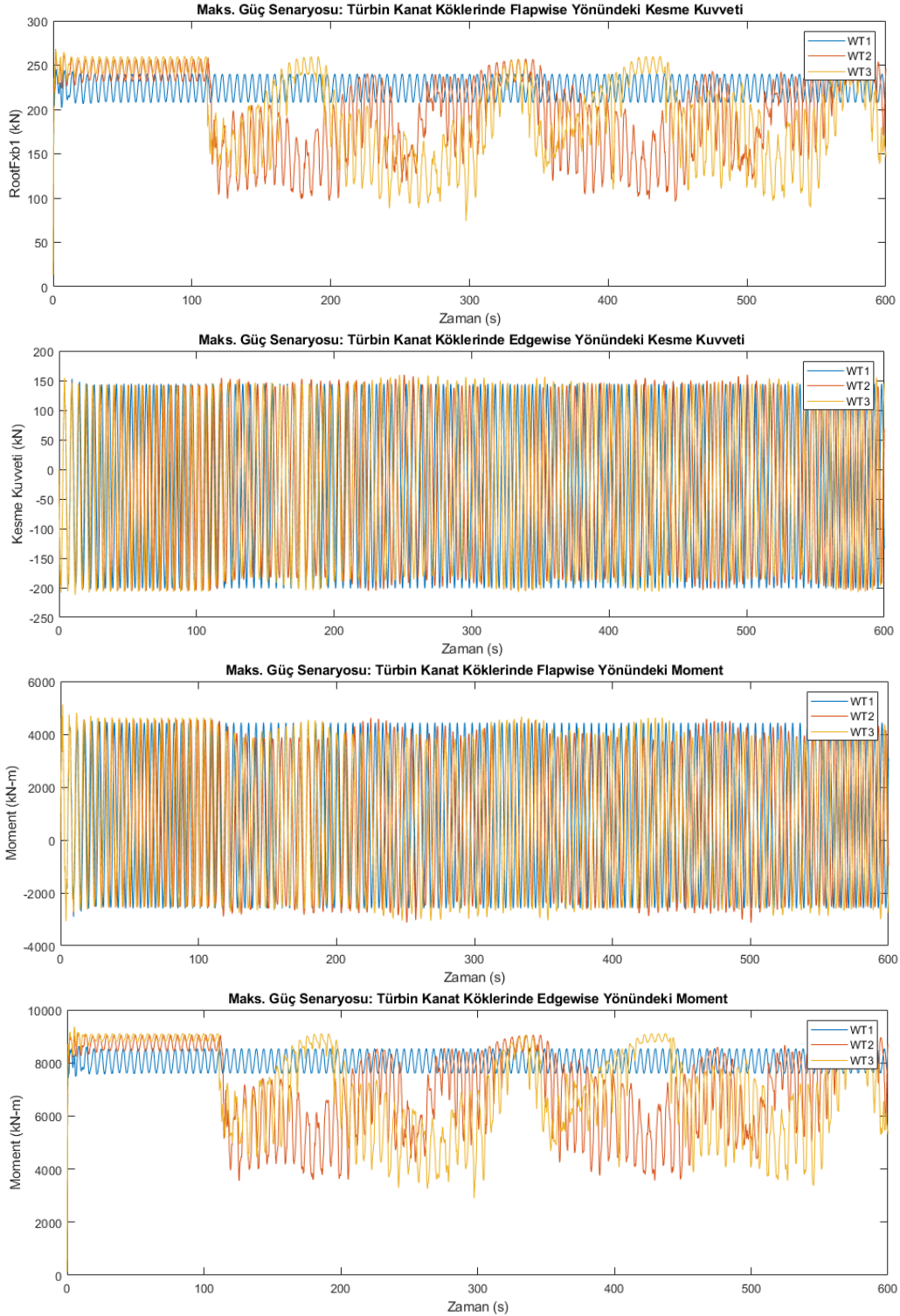
Analiz için simülasyon koşulları x yönünde sabit 10,40 m/s'lik hız olarak tanımlanırken, art izine maruz kalan ikinci ve üçüncü türbinin akış alanında türbülans oluşumu Şekil 6.7'de gözlemlenmektedir. Birinci türbinin maruz kaldığı rüzgar yalnızca x yönündeyken aşağı akış türbinleri için rüzgarın artık x bileşeni dışında y ve z bileşeni olduğu görülebilmektedir. Değerler x yönünde olacak şekilde ortalama rüzgar hızları şu şekildedir; ikinci türbin 9,03 m/s ortalama rüzgar hızında üçüncü türbin ise 8,81 m/s rüzgar hızı altında çalışmaktadır. Türbinlerin arasındaki mesafenin artışıyla birlikte etkiyen rüzgar şiddetinde de doğru orantılı olarak artış gözlemlendiği söylenebilir.



Şekil 6.7. Maksimum güç senaryosu; rüzgar türbinleri kanat köklerindeki rüzgar hızları

Maksimum güç senaryosunun oluşumuna göre tandem sıralanmış rüzgar türbinleri için kökte meydana gelen kuvvet-momentler ise Şekil 6.8'de gösterilmektedir. Sabit rüzgar hızında çalışan yukarı türbini için meydana gelen yüklemeler sabit genlikte ve düzenli salınımlar

yaparken art izi etkisinde gelişen türbülanslı akışta çalışan aşağı akış türbinleri için düzensiz salınımların gerçekleştiği ve pik noktalarıyla kaotik bir yapının oluştuğu görülebilmektedir.



Şekil 6.8. Maksimum güç senaryosu; türbin kanat köklerindeki kuvvet ve momentler

Kökte meydana gelen mutlak maksimum değerler Tablo 6.8’de verilmektedir. Flapwise ve edgewise yönündeki oluşan kuvvetler değerlendirildiğinde maksimum kuvvetlerin üçüncü türbinde gerçekleştiği görülmektedir.

Tablo 6.8. Maksimum güç senaryosu; kökte meydana gelen mutlak maksimum kuvvet-moment değerleri

	RootFxb1 (kN)	RootFyb1 (kN)	RootMxb1 (kN-m)	RootMyb1 (kN-m)
WT1	245	154	5021	8628
WT2	259	160	4624	9059
WT3	260	159	4672	9107

Kanat kökünde meydana gelen kuvvet ve momentler sonucunda yorulmaya kadar geçen süre Tablo 6.9’da verilmektedir. İkinci türbin için durum değerlendirildiğinde %13,2’lik daha az rüzgar hızında çalışmasına rağmen flapwise yönünde %5,71’lik, edgewise yönünde ise %3,89’luk fazladan kuvvete maruz kalmaktadır. Flapwise yönündeki momentum değerinde ise %5’lik bir artış gözlemlenmektedir. Üçüncü türbinde ise etkiyen rüzgar şiddeti birinci türbine kıyasla %15,29 daha az olmasına rağmen flapwise yönünde %6,1 ve edgewise yönünde %3,24 daha fazla kuvvete maruz kalmaktadır. Flapwise yönünde gerçekleşen moment değerinde ise %5,5’lik bir artış gözlemlenmektedir. Değerler kıyaslandığında flapwise yönünde oluşan kuvvetler ve flapwise yönündeki moment sonucu yorulmaya kadar geçen sürenin üçüncü türbinde daha az olduğu görülmektedir. Maksimum güç senaryosuna ait konfigürasyon sonucunda tasarlanan çiftlik için 3 türbininde çalışma koşullarını sağladığı söylenebilir. Planlanan 20 yıl içerisinde herhangi bir türbinde yorulma gerçekleşmez. Belirlenen nihai yük değerleri sonucunda tahmin edilen en kritik durum değerlendirildiğinde ise birinci türbinde edgewise yönünde kaynaklanan kuvvetlerin neden olduğu ve yorulmanın 38,4 yılda gerçekleştiği sonucuna ulaşılmaktadır.

Tablo 6.9. Maksimum güç senaryosu için türbinlerde yorulmaya kadar geçen süre (s)

	RootFxb1	RootFyb1	RootMxb1	RootMyb1
WT1	4,66e+12	1,21e+09	3,17e+09	1,85e+10
WT2	2,02e+12	1,49e+09	3,94e+09	8,35e+09
WT3	1,2e+12	1,33e+09	3,3e+09	5,21e+09

Maksimum güç senaryosunun değerlendirildiği durum için DEL değerleri Tablo 6.10'da verilmiştir. İkinci türbinde birinci türbine kıyasla flapwise yönünde %9,16, flapwise yönünde oluşan momentde ise %8,2'lik bir artış gözlemlenmektedir. Üçüncü türbin için DEL hesaplandığında birinci türbine kıyasla flapwise yönündeki kuvvet için %14,5 ve flapwise yönündeki moment için ise %12,7'lik bir artış gözlenmektedir. Bu artış, türbinin farklı akış koşulları altında maruz kaldığı daha düzensiz veya pik atan yüklemeleri işaret edebilir. Bu da yük çevrimlerinin varyansının yüksek olması ve daha hasar verici çevrimlerin oluşması anlamına gelir. DEL'in artması, yapısal bileşenlerin daha hızlı yorulma hasarına uğrayabileceği riskini gösterir. Dolayısıyla DEL analizleri, sadece maksimum yükleri değil, yük spektrumunun tamamını dikkate alarak bileşen ömrü tahmininde daha gerçekçi bir bakış sunar.

Tablo 6.10. Maksimum güç senaryosu için türbinlerdeki DEL tahmin değerleri

	RootFxb1 (kN)	RootFyb1 (kN)	RootMxb1 (kN-m)	RootMyb1 (kN-m)
WT1	131	300	6190	5190
WT2	143	294	6050	5620
WT3	150	296	6130	5850

7. SONUÇLAR VE YORUMLAR

Bu çalışmada, rüzgar türbini çiftlik yerleşimlerinin performansını etkileyen temel parametreler incelenmiş ve özellikle güç yoğunluğu üzerine etkileri sayısal yöntemlerle analiz edilmiştir. Ayrıca, aşağı akışta yer alan türbinlerde art izi kaynaklı türbülans etkisinin yarattığı yorulma yükleri ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. Çalışma, tasarlanan farklı deneysel senaryoların karşılaştırmalı analiziyle birlikte hem enerji verimliliği hem de yapısal güvenilirlik açısından optimum tasarım kriterlerinin ortaya konulmasını hedeflemiştir. Bu bağlamda, önerilen çiftlik tasarımı için güç yoğunluğu parametresini odağına alan Taguchi tabanlı bir optimizasyon modeli kurgulanmıştır. Geliştirilen deneysel tasarım yapısı, belirlenen 3D, 4D ve 5D'lik mesafe ve -20° 'den 20° 'ye her 5° 'lik değişim için tanımlanan sapma açısı faktör seviyeleri üzerinden toplamda 81 senaryoluk deney tasarımı oluşturulmuş ve ardından modelde yer alan faktör seviyelerinin sadeleştirilmesiyle birlikte iki aşamalı yeni deney grupları oluşturulmuştur.

A grubu deney tasarım modelinin belirleyicilik katsayısı (R^2) %62 olup, modelin ortalama hata değeri (RMSE) 2,2654'tür. Bu deney kapsamında maksimum güç yoğunluğu $53,60 \text{ W/m}^2$ olarak gerçekleşmiş ve çiftliğin toplam güç çıkışı 6,8 MW seviyesine ulaşmıştır. Faktörlerin etki düzeyine bakıldığında, üçüncü türbin mesafe değeri S_{X2} %65,1 ile en baskın parametre olurken, ikinci türbin mesafe değeri S_{X1} %24 etki göstermiştir. Sapma açısı ise görece düşük etkiye sahiptir. Bu nedenle etkisi düşük olan üçüncü türbinin sapma açısındaki değişim ψ_3 faktörü deney yapısının iyileştirilmesi adına yapıdan çıkarılmıştır.

Bu analizlerden elde edilen çıktılarla, B grubu deney tasarım modeli kurgulanmış ve toplam 25 senaryo ile daha odaklı bir deneysel yapı kurulmuştur. Ayrıca mesafe değerindeki artış etkisinin gözlemlenmesi için mesafe seviyeleri 8D'lik mesafeye arttırılırken sapma açısı değişimi 10° 'lik farklarla ele alınmıştır. Yeni modelin R^2 değeri %95'e yükselmiş, RMSE değeri 2,4831 olarak hesaplanmıştır. Bu aşamada güç yoğunluğu $65,31 \text{ W/m}^2$ 'ye kadar çıkmış, en yüksek toplam güç bu deney tasarımı içerisinde 25'inci senaryo içerisinde 8,454 MW olarak kaydedilmiştir. Bu durum, türbinler arası mesafe arttıkça art izi etkisinin zayıfladığını ve daha şiddetli rüzgar hızının aşağı akıştaki türbinlere ulaştığını ortaya koymuştur.

C grubu deney tasarımında ise daha kısa mesafeli bir yerleşim kurgulanmıştır. Bu değişimin nedeni, türbinler arası mesafe arttıkça güç çıkışında olumlu etki görülmesine rağmen güç yoğunluğunda negatif etki oluşturmasından kaynaklıdır. Bu bağlamda faktör seviyesine eklenen en küçük mesafe olan 1D'lik uzaklıkta güç yoğunluğu $151,42 \text{ W/m}^2$ gibi oldukça

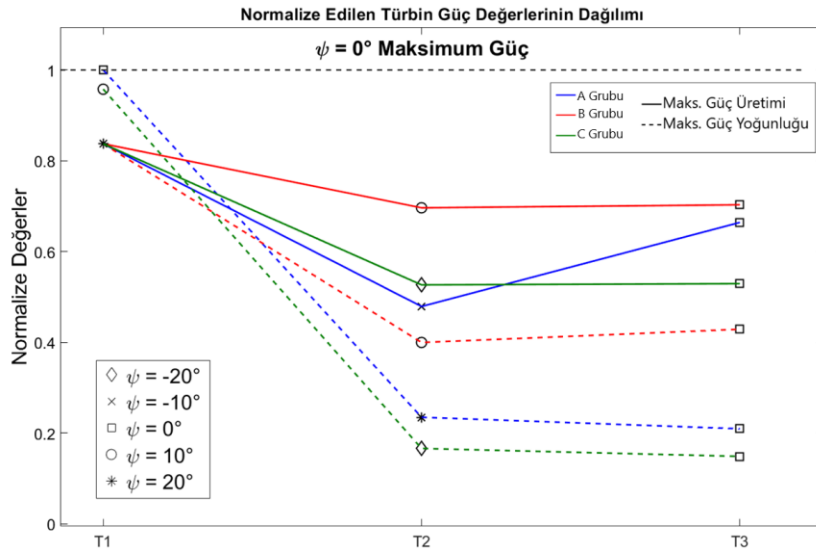
yüksek değerlere ulaştığı kaydedilmiştir. Ancak bu durumda toplam güç 4,808 MW'a gerilemiştir. Bu durum, yüksek güç yoğunluğunun daha küçük alana sıkıştırılmış ancak toplam üretim kapasitesinin görece düşük olduğu bir yerleşim modeline karşılık geldiğini göstermektedir. Bu modelde sapma açılarının etkisi yeniden artış göstermiştir. Özellikle kısa mesafeli yerleşimlerde, sapma açısı manipülasyonu ile art izi etkisinin azaltılmasının güç yoğunluğu üzerinde olumlu etkileri olduğu gözlemlenmiştir.

Güç çıktısı olarak değerlendirme yapacak olursak, yukarı akış türbini, 10,40 m/s'lik rüzgar hızı ve 0°'lik sapma açısı altında 3,78 MW'lık bir güç üretmektedir. Çalışma içerisinde farklı deney tasarımlarında yukarı akış türbini için farklı sapma açıları tanımlanmış ve analiz edilmiştir. Analizler sonucunda ise sapma açısındaki değer artışının güç üzerindeki etkisinin ilgili türbin için negatif yönde olurken art izi yönlendirmesi sebebiyle aşağı akış türbinlerinin güç çıkışında iyileşme gözlemlenmiştir. Sapma açısındaki artışın güç çıkışı üzerindeki etkisi, normalize edilmiş değerlere göre Şekil 7.1'de gösterilmiştir. Serbest rüzgar akımı altında çalışan yukarı akış türbini için, sapma açısı arttıkça güç üretiminde belirgin azalmalar meydana gelmektedir. Örneğin, 5°'lik bir sapma açısında güç çıkışı yaklaşık %1,21 oranında azalırken, 10° için %4,39, 15° için %9,5 ve son olarak 20°'lik sapma durumunda ise bu kayıp %16,4 seviyelerine ulaşmaktadır. Bu düşüşün temel nedeni, rüzgar türbinlerinin aerodinamik verimlilik açısından rüzgar yönüne dik olacak şekilde tasarlanmış ve konumlandırılmış olmalarıdır. İdeal hizalanma durumunda, rüzgar akışı türbin kanatlarına simetrik bir şekilde dağılır ve türbin önündeki hava akışı minimum blokaj etkisiyle türbinin içinden geçer. Ancak sapma açısındaki değişiklikler, yani türbinin rüzgar yönüne tam olarak hizalanmaması durumu bu aerodinamik dengeyi bozar. Bu durumda, rüzgar akışı kanatlara açılı olarak çarpar; bu hem aerodinamik kuvvetlerin dağılımında dengesizlik yaratır hem de türbinin önündeki blokaj etkisini artırarak güç çıkışında düşüşe neden olur.

Farklı mesafelerin ve sapma açıların değerlendirildiği iki ayrı deney tasarımı kapsamında aşağı akışta yer alan türbinler üzerinden sonuçları değerlendirecek olursak; B grubu deney tasarımında, 8D mesafeyle konumlandırılmış ve maksimum güç çıkışı elde edilen senaryoda, 20° sapma açısına sahip ikinci türbinin güç çıkışında %30,4, 10° sapma açısına sahip üçüncü türbinin güç çıkışında ise %29,82 oranında bir azalma gözlemlenmiştir. Buna karşın, maksimum güç yoğunluğunun elde edildiği ve türbinler arası mesafenin 1D olarak belirlendiği B grubu deney tasarımında sapma açısının etkisi çok daha belirgin hale gelmiştir. Bu tasarımda, 10° sapma açısına sahip ikinci türbinin güç çıkışında %83,4, -20° sapma açısına sahip üçüncü türbinin güç çıkışında ise %85,2 oranında bir düşüş meydana gelmiştir. Bu sonuçlar, türbinler

arası mesafenin azalmasıyla birlikte art izi etkinliğinin artmasının güç üzerindeki olumsuz etkisinin belirgin şekilde arttığını ve özellikle yoğun yerleşim senaryolarında sapma kontrolünün kritik önem taşıdığını göstermektedir.

Kurgulanan çiftlik modelinin tamamı için düşünüldüğünde ise, türbinlerin sahip olduğu sapma açısı değerleri ve art izi etkinliğinden kaynaklı ciddi güç düşüşleri gözlemlenmiştir. Örneğin, kurgulanan türbin için belirlenen rüzgar hızındaki anma güç değeri olan 3,786 MW değerini ele alacak olursak en ideal koşulda bu çiftliğin 11,358 MW güç üretebileceği varsayılabilir. Maksimum güç üretiminin gerçekleştiği ikinci deney tasarımındaki senaryoda ise toplam güç çıkışı 8,454 MW değerinde olurken ideal koşula göre kıyaslırsak güç üretiminde %25,6'lık bir azalma gözlemlenir. Maksimum güç yoğunluğunun gerçekleştiği üçüncü deney tasarımındaki senaryoda ise bu kayıp %57,7 değerine ulaşmaktadır.



Şekil 7.1. Normaliz edilmiş türbin güç değerlerinin dağılımı

Güç üretimine yönelik analizlere ilave olarak, önerilen maksimum güç yoğunluğu ve maksimum güç üretimi sağlayan konfigürasyonlar için yorulma yükleri ayrıca değerlendirilmiştir. Simülasyon koşulları altında yapılan analizlerde, türbinlerin art izi etkisiyle karşı karşıya kaldığı durumlarda rüzgar hızlarının yön bileşenlerinin değiştiği ve özellikle aşağı akış türbinlerinde türbülanslı akış koşullarının ortaya çıktığı belirlenmiştir. Ele alınan rüzgar hızı ve nihai tasarım yükü değerleri doğrultusunda, NREL 5MW referans türbini için 0° sapma açısında gerçekleştirilen tekil yorulma analizinde en kritik durumun RootMyb1 noktasında olduğu ve yorulmanın 39,6 yıl çalışma süresinde meydana geldiği analiz sonucunda ulaşılmıştır.

Maksimum güç yoğunluğunun gerçekleştiği senaryoda ise ortalama rüzgar hızları ilk türbin için sabit 10,40 m/s iken, ikinci ve üçüncü türbinlerde mesafe seviyesi aynı olmasına karşın bu değer sırasıyla 5,9 m/s ve 7,05 m/s'ye düşmüştür. Aşağı akış türbinlerindeki ortalama rüzgar farkının temel sebebi sapma açılarına bağlı yönlü değişkenliktir. Yapısal yük analizlerinde, üçüncü türbine etkiyen rüzgar hızı birinci türbine göre %32,22 düşük olmasına rağmen, edgewise yönünde %9,1 daha yüksek kuvvet oluştuğu tespit edilmiştir. Bu durum, türbülansın dinamik yüklemeleri artırdığını ve yorulma açısından risk yarattığını göstermektedir. DEL analizleri de bu sonuçları desteklemekte; üçüncü türbinin flapwise yönündeki DEL kuvveti %6,3 ve moment ise %6,1 daha yüksek çıkmıştır. Bu da türbülans kaynaklı ani yük piklerinin yorulma hasarına neden olabileceğini ortaya koymaktadır. Belirlenen nihai yük değerleri sonucunda tahmin edilen en kritik durum değerlendirildiğinde ise birinci türbinde edgewise yönünde kaynaklanan kuvvetlerin neden olduğu ve yorulmanın 33,9 yılda gerçekleştiği sonucuna ulaşılmaktadır.

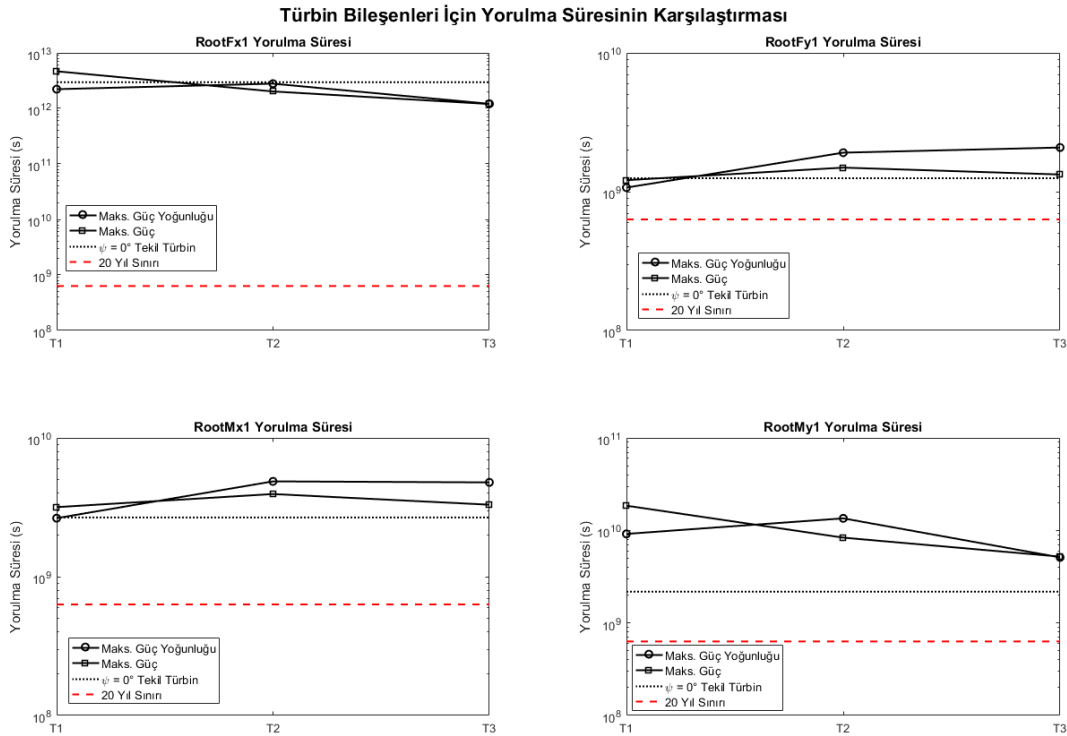
Maksimum güç senaryosunda önerilen konfigürasyonda ise türbinler arası mesafe 8D seviyesine çıkarılmış, sapma açıları ilk iki türbin için 20°, üçüncü türbin için 10° olarak belirlenmiştir. Bu durumda, ikinci türbin 9,03 m/s, üçüncü türbin 8,81 m/s ortalama rüzgar hızı altında çalışmıştır. Daha yüksek mesafe sayesinde art izi etkisinin azaldığı ve rüzgar hızının yeniden kazanıldığı görülmüştür. Fakat, aşağı akış türbinlerinde flapwise ve edgewise yönünde artan kuvvetler tespit edilmiştir. İkinci türbin için durum değerlendirildiğinde %13,2'lik daha az rüzgar hızında çalışmasına rağmen flapwise yönünde %5,71'lik, edgewise yönünde ise %3,89'luk fazladan kuvvete maruz kalmaktadır. Flapwise yönündeki momentum değerinde ise %5'lik bir artış gözlemlenmektedir. Üçüncü türbinde ise etkiyen rüzgar şiddeti birinci türbine kıyasla %15,29 daha az olmasına rağmen flapwise yönünde %6,1 ve edgewise yönünde %3,24 daha fazla kuvvete maruz kalmaktadır. Flapwise yönünde gerçekleşen moment değerinde ise %5,5'lik bir artış gözlemlenmektedir. Değerler kıyaslandığında flapwise yönünde oluşan kuvvetler ve flapwise yönündeki moment sonucu yorulmaya kadar geçen sürenin üçüncü türbinde daha az olduğu görülmektedir. Bu artışlar, yüksek varyanslı yük çevrimlerinin yorulma ömrünü kısaltabileceğini göstermektedir. Ancak her iki senaryoda da türbinlerin 20 yıllık ömrü boyunca yorulma açısından bir sınır aşımı beklenmemektedir. En kritik yorulma durumu, birinci türbin için edgewise yönünde 38,4 yılda meydana gelmektedir.

Şekil 7.2'de, türbin bileşenlerine ait dört farklı yapısal yük üzerinden gerçekleştirilen yorulma analizlerinin sonuçları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Bu analiz, hem tekil türbin

konfigürasyonu hem de ele alınan maksimum güç ve güç yoğunluğu senaryolarında yukarı ve aşağı akışta yer alan türbinler için yürütülmüştür. Grafik yorumlanacak olursa:

- Genel olarak, her bir türbin bileşeni için elde edilen yorulma ömrü, referans alınan 20 yıllık sürede yorulmanın gerçekleşmeyeceğini göstermektedir.
- RootFxb1 ve RootMxb1 bileşenleri incelendiğinde, özellikle yukarı akış türbinin, sapma açısı sebebiyle daha yüksek yorulma yüklerine maruz kaldığı ve bu nedenle yorulma süresinin bir miktar azaldığı görülmektedir.
- RootFyb1 bileşeninde, yukarı akış türbinini yine en düşük yorulma süresine sahip olmakla birlikte, aşağı akış türbinleri ile kıyaslandığında bu fark daha belirgindir.
- RootMyb1 bileşeni açısından ise, yukarı akış türbininin diğer türbinlere kıyasla daha yüksek bir yorulma ömrüne sahip olduğu gözlemlenmektedir.

Ayrıca, aşağı akışta yer alan türbinlerin daha düşük rüzgar hızlarına maruz kalmalarına rağmen, artan türbülans ve art izi etkileri nedeniyle bazı bileşenlerde yorulma yüklerinin arttığı ve buna bağlı olarak yorulma ömründe azalmalar meydana geldiği de grafikler üzerinden çıkarılabilmektedir. Bu durum, art izi etkilerinin sadece aerodinamik performans üzerinde değil, aynı zamanda yapısal dayanım üzerinde de önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 7.2. Türbin bileşenleri için yorulma süresi karşılaştırması

Maksimum güç yoğunluğu ve maksimum güç değerinin elde edildiği senaryo için genel bir değerlendirme yapılırsa;

- Maksimum güç üretimi sağlayan konfigürasyonda $33,28 W/m^2$ 'lik güç yoğunluğu değerine karşılık $8,454 MW$ güç elde edilmiş ve ideal anma gücüne göre değerlendirildiğinde %25,56 oranında güç üretiminde bir kayıp meydana gelmiştir. En kritik yorulma durumu, birinci türbinin edgewise yönünde 38,4 yıllık bir sürede gerçekleşmekte olup; konfigürasyonda yer alan hiçbir türbin bileşeninin, planlanan 20 yıllık tasarım ömrü içerisinde yorulma sınırını aşmadığı belirlenmiştir.
- Maksimum güç yoğunluğunu sağlayan konfigürasyonda $151,42 W/m^2$ 'lik güç yoğunluğu değerine karşılık $4,808 MW$ güç elde edilmiş ve ideal anma gücüne göre değerlendirildiğinde %57,66 oranında güç üretiminde bir kayıp meydana gelmiştir. En kritik yorulma durumu, birinci türbinin edgewise yönünde 33,9 yılda oluşmaktadır ve konfigürasyonda yer alan hiçbir türbin bileşeni planlanan 20 yıllık ömür süresi içerisinde yorulma sınırını aşmadığı tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, bu çalışma rüzgar türbini çiftliklerinde güç yoğunluğu optimizasyonu ile yorulma yüklerinin birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Türbin yerleşimi, mesafe ve sapma açısı faktörleri hem enerji üretimini hem de yapısal güvenliği doğrudan etkilemektedir. Kısa mesafeli yerleşimlerde sapma açısı manipülasyonları artıran etkisini azaltarak güç yoğunluğunu artırırken, uzun mesafelerde enerji verimi artsa da yapısal yüklerdeki düzensizlik daha kontrollüdür. Bu bağlamda, enerji üretim performansı ile yapısal dayanım arasında çok kriterli bir optimizasyon yaklaşımının benimsenmesi önerilmektedir. Ayrıca, tez içerisinde yer alan simülasyonların başlangıç koşulunda sabit rüzgar hızı ve yönü olarak varsayımı, atmosferik rüzgarın doğası gereği sahip olduğu türbülanslı yapıyı göz ardı etmektedir. Bu türbülans, yön sapmaları ve ani hız değişimleri gibi faktörlere sahip olduğu için tüm çiftlik sonuçlarını etkilemekle birlikte sabit rüzgar hızına kıyasla özellikle ilk türbin bakımından güç üretimindeki stabiliteyi ve yorulma ömrünü etkileyecektir. Bu nedenle, statik rüzgar koşullarına dayalı analizlerin, sonuçların gerçek atmosfer koşullarındaki geçerliliğini sınırlayabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. İlerleyen çalışmalarda zamana bağlı rüzgar verileri veya gelişmiş atmosferik modellemeler kullanılarak daha gerçekçi sonuçlara ulaşılması mümkün olacaktır.

KAYNAKÇA

- Akçadırcı, E.** (2006). *Dairesel Silindir Etrafındaki Akım Parametrelerinin Deneysel Olarak İncelenmesi*, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Anderson, J.** (1995). *Computational Fluid Dynamic Sixth Edition*. Mc-Graw Hill Inc.
- Archer, C.L., vd.** (2018). Review and Evaluation of Wake Loss Models for Wind Energy Applications. *Appl. Energy* 226, 1187-107
- Bader, S. H., Inguva, V., & Perot, J. B.** (2018). Improving the Efficiency of Wind Farms via Wake Manipulation. *Wind Energy*. 21(5), 1239-1253.
- Barthelmie, R. vd.** (2009). Modelling and Measuring Flow and Wind Turbine Wakes in Large Wind Farms Offshore. *Wind Energy*, 12(5), 431-444.
- Bartl, J., Pierella, F., & Sætrana, L.** (2012). Wake Measurements Behind an Array of Two Model Wind Turbines. *Energy Procedia*, 24, 305-312.
- Bastankhah, M., & Agel, F.** (2019). Wind Farm Power Optimization via Yaw Angle Control: A Wind Tunnel Study. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 11(2), 023301
- Batchelor, G.K.** (2000). *An Introduction to Fluid Dynamics*. Cambridge University Press.
- Bay, C. vd.** (2019). Design and Testing of A Scaled Demonstrator Turbine at The National Wind Technology Center. *AIAA Scitech 2019 Forum*.
- Betz, A.** (1920). Das Maximum der Theoretisch Moglichen Auswendung des Windes Durch Windmotoren. *Zeitschrift fur Gesamte Turbine Wesen*, 26.
- Branlard, E., & Geisler, J.** (2022). A Symbolic Framework to Obtain Mid-Fidelity Models of Flexible Multibody Systems with Application to Horizontal-Axis Wind Turbines. *Wind Energ. Sci.*, 7, 2351-2371.
- Burton, S. vd.** (2001). *The Wind Energy Handbook Third Edition*. Wiley.
- Caboni, M.** (2016). *Probabilistic Design Optimization of Horizontal Axis Wind Turbine Rotors*. University of Glasgow, Scotland.
- Castillo, E., & Fernández, A.** (2009). *A Unified Statistical Methodology for Modeling Fatigue Damage*. Springer Dordrecht.
- Chang, P.K.** (1970). *Separation of Flow*, Pergamon Press.

- Choi, N.** (2013). Numerical Study on The Horizontal Axis Turbines Arrangement in a Wind Farm: Effect of Separation Distance on The Turbine Aerodynamic Power Output. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 117, 11-17.
- Chow, R., & van Dam, C.** (2012). Verification of Computational Simulations of the NREL. *Wind Energy*, 15(8), 967-981.
- Ciang, C., Lee, J.-R., & Bang, H.-J.** (2008). Structural Health Monitoring for a Wind Turbine System: A Review of Damage Detection Methods. *Measurement Science and Technology*, 19(12), 122001.
- Clifton-Smith, M.** (2009). Wind Turbine Blade Optimisation with Tip Loss Corrections. *Wing Engineering*, 33(5), 477-496.
- Corten, G.** (2001). Flow Separation on Wind Turbine Blades. Universiteit Utrecht, Netherlands.
- De Lellis vd.** (2018). The Betz Limit Applied to Airborne Wind Energy. *Renew. Energy* 127, 32–40.
- Deshmukh, A., & Allison, J.** (2015). Multidisciplinary Dynamic Optimization of Horizontal Axis Wind Turbine Design. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 53(1), 15-27.
- Dijk, M.** (2016). Yaw-Misalignment and Its Impact on Wind Turbine Loads and Wind Farm Power Output. *Journal of Physics: Conference Series*, 753(6), 062013
- Dijk, M. vd.** (2017). Wind Farm Multi-Objective Wake Redirection for Optimizing Power Production and Loads. *Energy*, 121(5), 561-569.
- Doubrawa, P., Annoni, J., & Jonkman, J.** (2018). Optimization-Based Calibration of FAST.Farm Parameters Against SOWFA. *American Institute of Aeronautics and Astronautics SciTech Forum*.
- Ember.** (2024). Statistical Review of World Energy. [Erişim 20.12.2024, <https://ourworldindata.org/grapher/share-of-electricity-production-from-renewable-sources>]
- Ergano, W.** (2020). *Optimization of Wind Turbine Loads for Maximum Power Output and Low Fatigue Loading*. Royal Institute of Technology, Sweden.
- Ertürk, M.** (2012). The Evaluation of Feed-In Tariff Regulation of Turkey for Onshore Wind Energy Based on the Economic Analysis. *Energy Policy*, 45, 359-367.

- Feijóo, A., & Villanueva, D.** (2016). Assessing Wind Speed Simulation Methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 473-483.
- Freebury, G., & Musial, W.** (2000). Determining Equivalent Damage Loading for Full-Scale Wind Turbine Blade Fatigue Tests. *ASME Wind Energy Symposium*.
- Froude, W.**, (1878). On the Elementary Relation Between Pitch, Slip and Propulsive Efficiency, *Transaction of the Institute of Naval Architects*, 19, 22–33.
- Garcia-Sanz, M., Barreras, M., & Vital, P.** (2011). Power Regulation Strategies for Wind Turbines. *Advances in Wind Energy Conversion Technology*, 159-176
- Glauert, H.** (1926). *The Elements of Aerofoil and Airscrew Theory*. Cambridge University Press
- Global Wind Atlas**, Wind resource map: Balıkesir, Turkey [Erişim: 02.01.2025, <https://globalwindatlas.info/en/area/Turkey/Balikesir>]
- Global Wind Report**, (2022). Global Wind Energy Council. [Erişim: 02.01.2025, <https://gwec.net/global-wind-report-2022>]
- Gözcü, O., & Verelst, D.** (2019). The Effects of Blade Structural Model Fidelity on Wind Turbine Load Analysis and Computation Time. *Wind Energy Science Discussions*, 5(2), 503-517.
- Greiner, W.** (2009). *Degrees of Freedom*. Springer.
- Guntur, S.** (2017). A Validation and Code-to-Code Verification of FAST for a Megawatt-Scale Wind Turbine with Aeroelastically Tailored Blades. *Wind Energy Science Discussions*, 2(2), 443-468.
- Guo, F., Gao, Z., & Schlipf, D.** (2024). TorqTwin—An Open-Source Reference Multibody Modeling Framework for Wind Turbine Structural Dynamics. *Renewable Energy*, 235(8), 121268
- Hansen, M.** (2007). Aeroelastic Instability Problems for Wind Turbines. *Wind Energy*, 10(6), 551-577.
- Hansen, M.** (2008). *Aerodynamics of Wind Turbines: Second Edition*. Earthscan.
- Hau, E.** (2013). *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application and Economics*. Springer.

- Hayman, G.** (2012). *MLife Theory Manual for Version 1.00*. National Renewable Energy Laboratory, Springfield.
- He, J., & Fu, Z.-F.** (2001). Modal Analysis Methods – Frequency Domain. *Modal Analysis*, 159-179.
- Hjort, S.** (2019). Non-Empirical BEM Corrections Relating to Angular and Axial Momentum Conservation. *Energies*, 12(2), 320.
- Hoffmann, R.** (2002). A Comparison of Control Concepts for Wind Turbines in Terms of Energy Capture. Technische Universität Darmstadt, Germany.
- Hoxha, B., Shesho, I., & Filkoski, R.** (2022). Analysis of Wind Turbine Distances Using a Novel Techno-Spatial Approach in Complex Wind Farm Terrains. *Sustainability*, 14(20), 13688.
- IEC 64100-1** (1999). *Wind Turbine Generator Systems – Part 1: Safety Requirements*.
- İlday, Ö.** (1991). İz Bölgesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Jargalsaikhan, N.** (2022). A Control Algorithm to Increase The Efficient Operation of Wind Energy Conversion Systems Under Extreme Wind Conditions. *Energy Reports*, 8, 11429-11439.
- Jonkman, B. vd.** (2022). OpenFAST v3.1.0. *Zenodo*.
- Jonkman, B., & Buhl, M.** (2006). TurbSim User’s Guide. Technical Report. *National Renewable Energy Laboratory*.
- Jonkman, J.** (2007). Dynamics Modeling and Loads Analysis of an Offshore Floating Wind Turbine. Technical Report. *National Renewable Energy Laboratory*.
- Jonkman, J.** (2009). “Definition of a 5-MW NREL Reference Wind Turbine for Offshore System Development. Technical Report. *National Renewable Energy Laboratory*.
- Jonkman, J.** (2015). AeroDyn v15 User’s Guide and Theory Manual. Technical Report. *National Renewable Energy Laboratory*.
- Jonkman, J. M.** (2003). Modeling of the UAE Wind Turbine for Refinement of FAST_AD. *National Renewable Energy Laboratory*.
- Jonkman, J. v.** (2018). Validation of FAST.Farm Against Large-Eddy Simulations. *Journal of Physics: Conf. Series*, 1037(6), 062005.

- Jonkman, J., & Shaler, K.** (2021). FAST.Farm User's Guide and Theory Manual. *National Renewable Energy Laboratory*.
- Kaimal, J., & Finnigan, J.** (1994). *Atmospheric Boundary Layer Flows: Their Structure and Measurement*. Oxford University Press.
- Khalid, F.** (2019). *Reliability Assessment Approach Through Geospatial Mapping for Offshore Wind Energy*. University of Exeter, England.
- Kirby, A. vd.** (2017). Wind Farm Simulations Using an Overset hp-Adaptive Approach with Blade-Resolved Turbine Models. *The International Journal of High Performance Computing Applications*, 33(5):897-923.
- Koçan, Ç.** (2019). *Structural Vibration Control in Wind Turbines*. Graduate School of Natural and Applied Sciences, Middle East Technical University, Türkiye.
- Laersen, G.** (2007). Dynamic Wake Meandering Modeling. *Risø National Laboratory*.
- Laersen, G.** (2008). Wake Meandering: A Pragmatic Approach. *Wind Energy*, 11, 377-395.
- Larsen, T., Hansen, A., & Buhl, T.** (2004). Aeroelastic Effects of Large Blade Deflections for Wind Turbines. *Special Topic Conference: The 35th Science of Making Torque from Wind*, 238-246.
- Lee, Y. Tsung, Ramesh, K., & Gopalarathnam, A.** (2021). Study of Edge Suction in Airfoils with Round Trailing Edges in Unsteady Flow. Conference: AIAA Aviation 2021 Forum.
- Lei, L.** (2020). Optimization of Wind Turbine Yaw Angles in a Wind Farm Using a Three-Dimensional Yawed Wake Model. *Energy*, 209(5), 118415.
- Liao, D., vd.** (2022). Fatigue Reliability of Wind Turbines Historical Perspectives, Recent Developments and Future Prospects. *Renewable Energy*, 200, 724-742.
- Lin, M. & Porté-Agel, P.** (2023). Power Production and Blade Fatigue of a Wind Turbine Array Subjected to Active Yaw Control. *Energies*, 16, 2542.
- Lysen, E. H.** (1982) *Introduction to Wind Energy*. Steering Committee Wind Energy Developing Countries. Amersfoort, NL.
- Ma, H., vd.** (2021). Formulas of the Optimized Yaw Angles for Cooperative Control of Wind Farms with Aligned Turbines to Maximize the Power Production. *Applied Energy*, 303, 117691.
- Make, M., & Vaz, G.** (2015). Analyzing Scaling Effects on Offshore Wind Turbines Using CFD. *Renewable Energy*, 83, 1326-1340.

- Manolas, D., Riziotis, V., & Voutsinas, S.** (2015). Assessing the Importance of Geometric Nonlinear Effects in the Prediction of Wind Turbine Blade Loads. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 10(4), 041008.
- Manwell, J., Mcgowan, J., & Rogers, A.** (2006). *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application, Second Edition*. John Wiley and Sons.
- MathWorks.** Practical Introduction to Fatigue Analysis Using Rainflow Counting. [Erişim: 25.12.2024, <https://au.mathworks.com/help/signal/ug/practical-introduction-to-fatigue-analysis-using-rainflow-counting.html>]
- Matis, K.** (2016). *Structural Optimization of a Horizontal Axis Wind Turbine Blade*. University of Aristotle. Greek.
- Meng, H.** (2018). *Elastic Actuator Line Modelling for the Wake-Induced Fatigue Analysis of Horizontal Wind Turbine*. University of Waterloo, Canada.
- Meng, H., Li, L., & Zhang, J.** (2020). A Preliminary Numerical Study of the Wake Effects on the Fatigue Load for Wind Farm Based on Elastic Actuator Line Model. *Renewable Energy*, 162, 788-801.
- Mudimeli, D.** (2018). *Boundary Layer Separation from A Circular Cylinder*. University of Witwatersrand. South Africa.
- J. Wittenburg,** (1977). *Dynamics of Systems of Rigid Bodies*, Teubner.
- Mutlu, Ö., Akpınar, S., & Balıkcı, A.** (2009). Power Quality Analysis of Wind Farm Connected to Alaçatı Substation in Turkey. *Renewable Energy*, 34(5), 1312-1318.
- Mühle, F.V.** (2018). *An Experimental Study on Rotor-Wake Interactions of Wind Turbines*. Technical University of Munich, Germany.
- Natarajan, A.** (2022). Damage Equivalent Load Synthesis and Stochastic Extrapolation for Fatigue Life Validation. *Wind Energy Science*, 7(3), 1171-1181.
- Neunaber, I.** (2020). Distinct Turbulent Regions in the Wake of a Wind Turbine and Their Inflow-Dependent Locations: The Creation of a Wake Map. *Energies*, 13(20), 5392.
- Neunaber, I.** (2021). *Turbulence of Wakes*. Springer.
- Nguyen, V.** (2023). Low Order Modeling of Dynamic Stall Using Vortex Particle Method and Dynamic Mode Decomposition. *International Journal of Micro Air Vehicles*, 15.

- Ning, S.** (2013). CCBlade Documentation Release 0.1.0. *National Renewable Energy Laboratory*.
- NREL Forum.** (2024). OpenFAST. [Erişim: 05.02.2024, <https://forum.nrel.gov/>]
- Oğulata, R.** (2003). Energy Sector and Wind Energy Potential in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 7(6), 469-484.
- Ohya, Y.** (2004). Drag of Circular Cylinders in the Atmospheric Turbulence. *Fluid Dynamics Research*, 34(2), 135-144.
- Olczak, A.** (2016). Comparison of RANS Blade Element Model for Tidal Turbine Arrays With Laboratory Scale Measurements of Wake Velocity and Rotor Thrust. *Journal of Fluids and Structures*, 64, 87-106.
- Öztürk, S., Fthenakis, V., & Faulstich, S.** (2018). Failure Modes, Effects and Criticality Analysis for Wind Turbines Considering Climatic Regions and Comparing Geared and Direct Drive Wind Turbines. *Energies*. 11(9), 2317.
- Papoulis, A.** (1965). *Random Variables and Stochastic Processes*. McGraw Hill.
- Qu, X., Li, Y., & Moan, Y.** (2021). Comparative Study of Short-Term Extreme Responses and Fatigue Damages of a Floating Wind Turbine Using Two Different Blade Models. *Marine Structures*, 75, 102888.
- Raghavendra S. vd.** (2020). Design of Wind Blades for the Development of Low-Power Wind Turbines Using Betz and Schmitz Methods. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 8(4), 1-20.
- Ramulu, M., & Kobayashi, A.** (2001). Fatigue. *Encyclopedia of Vibration*, 505-512.
- REPA** (2022). Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü Rüzgar Enerji Potansiyeli Atlası. [Erişim: 17.02.2025, <http://www.yegm.gov.tr/>]
- REPA** (2025). Yenilenebilir Enerji Projeleri İzleme ve Değerlendirme, İllere Göre Rüzgar Dağılımları. [Erişim: 17.01.2025, <https://repa.enerji.gov.tr/REPA/>]
- Resor, B. R.** (2013). Definition of a 5MW/61.5m Wind Turbine Blade Reference Model. *Sandia National Laboratories*.
- Rinker, J.** (2020). Comparison of Loads from HAWC2 and OpenFAST for the IEA Wind 15 MW Reference Wind Turbine. *Journal of Physics: Conference Series*, 1618, 052052.

- Riziotis, V.** (2008). Identification of Structural Non-Linearities due to Large Deflections on a 5 MW Wind Turbine Blade. *Proceedings of the EWEC*, 8.
- S., Burmester, S., Gueydon, & M., Make** (2016). Determination of Scaled Wind Turbine Rotor Characteristics from Three Dimensional RANS Calculations. *J. Phys.: Conf. Ser.* 753, 082003.
- Sanderse, B.** (2009). *Aerodynamics of Wind Turbine Wakes*. ECN.
- Shaler, K., & Jonkman, J.** (2020). FAST.Farm Development and Validation of Structural Load Prediction Against Large Eddy Simulations. *Wind Energy*, 24(5), 428-449.
- Shaler, K., Debnath, M., & Jonkman, J.** (2020). Validation of FAST.Farm Against Full-Scale Turbine SCADA Data for a Small Wind Farm. *Journal of Physics: Conference Series*, 1618, 062061.
- Shaler, K., Jonkman, J., & Paula, D.** (2019). FAST.Farm Response to Varying Wind Inflow Techniques. *National Renewable Energy Laboratory*.
- Sohoni, V., Gupta, S. C., & Nema, R. K.** (2016). A Critical Review on Wind Turbine Power Curve Modelling Techniques and Their Applications in Wind Based Energy Systems. *Journal of Energy*, 2016, 1–18.
- Sørensen, B.** (2004). *Improved Design of Large Wind Turbine Blade of Fibre Composites Based on Studies of Scale Effects (Phase 1)*. Technical University of Denmark.
- Sørensen, J., Okulov, V., & Ramos-García, N.** (2022). Analytical and Numerical Solutions to Classical Rotor Designs. *Progress in Aerospace Sciences*, 130, 100793.
- Sørensen, J., Sørensen, S., & Wen, Z.** (2002). Numerical Modeling of Wind Turbine Wakes. *Journal of Fluids Engineering*, 124(2), 393-399.
- Sørensen, N., & Johansen, J.** (2007). UpWind: Aerodynamics and Aero-Elasticity Rotor Aerodynamics in Atmospheric Shear Flow. *2007 European Wind Energy Conference & Exhibition*.
- Stoevesandt, B., Schepers, G., & Fuglsang, P.** (2022). *Handbook of Wind Energy Aerodynamics*. Springer.
- Sturm, H.** (2012). Boundary Layer Separation and Reattachment Detection on Airfoils by Thermal Flow Sensors. *Sensors*, 12(11), 14292-14306.

Sun, H., Yang, H., & Gao, X. (2019). Investigation into Spacing Restriction and Layout Optimization of Wind Farm with Multiple Types of Wind Turbines. *Energy*, 168, 637-650.

Şenel, M., & Koç, E. (2015). Dünya'da ve Türkiye'de Rüzgar Enerjisinin Durumu ve Genel Değerlendirme. *Mühendis ve Makine*, 56, 46-56.

Tao, T., vd. (2023). Quantitative Assessment on Fatigue Damage Induced by Wake Effect and Yaw Misalignment for Floating Offshore Wind Turbines. *Ocean Engineering*, 288, 116004.

Teixeira, R. (2014). *Fatigue Analysis of Wind Turbine Blades Rainflow Algorithm*. Faculty of Engineering, University of Porto. Italy.

Thomas, M., vd. (2023) Prediction of Wind Turbine Blade Fatigue and Life Using the National Renewable Energy Laboratory Open-Source Software. *14th International Renewable Energy Congress*.

Thomsen, K., & Soerensen, P. (1999). Fatigue Loads for Wind Turbines Operating in Wakes. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 80(1-2), 121-136.

Tsvetkova, O., & Ouarda, T. (2021). A Review of Sensitivity Analysis Practices in Wind Resource Assessment. *Energy Conversion and Management*, 238, 114112.

TUREB (2022). Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği (TUREB) Türkiye rüzgar enerjisi istatistik raporları. [Erişim: 01.05.2025, <https://tureb.com.tr/yayinlar/turkiye-ruzgar-enerjisi-istatistik-raporlari/5>]

TÜRSAT (2019). Türkiye Rüzgar Santralleri Atlası (TÜRSAT). [Erişim: 05.01.2025, <https://tureb.com.tr/eng/lib/uploads/a894074504a33b99>]

Tyagi, D. ve Schmitz, S. (2025). Glauert's Optimum Rotor Disk Revisited – a Calculus of Variations Solution and Exact Integrals for Thrust and Bending Moment Coefficients, *Wind Energ. Sci.*, 10, 451–460.

Ucar, A., & Balo, F. (2010). Assessment of Wind Power Potential for Turbine Installation in Coastal Areas of Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 1901-1912.

Vermeer, L., Sørensen, J., & Crespo, A. (2003). Wind Turbines Wake Aerodynamics. *Progress in Aerospace Sciences*, 39(6), 467-510.

Wadi, M., Elmasry, W., & Tamyiğit, F. (2022). Rüzgar Enerjisi Potansiyelini Değerlendirirken Önemli Hususlar. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 38(2), 947-962.

Ye, S., vd. (2024). Loads and Fatigue Characteristics Assessment of Wind Farm Based on Dynamic Wake Meandering Model. *Renewable Energy*, 236, 121419.

Zhao, D., vd. (2019). Offshore Wind Turbine Aerodynamics Modelling and Measurements. *Wind Turbines and Aerodynamics Energy Harvesters*, s. 373-400.

Zong, H., & Agel, F. (2021). Experimental Investigation and Analytical Modelling of Active Yaw Control for Wind Farm Power Optimization. *Renewable Energy*. 170, 1228-1244.