

T.C.
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI



ÇİFT ROTORLU ZİT DEVİNİMLİ RÜZGÂR TÜRİNİNİN
SAYISAL VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ DOKTORA TEZİ

KADİR ÖZBEK

TEZ DANIŞMANI

Prof. Dr. Ömer ÖZYURT

İKİNCİ TEZ DANIŞMANI

Doç. Dr. Kadir GELİŞ

BOLU, NİS - 25

KABUL VE ONAY SAYFASI

Kadir ÖZBEK tarafından hazırlanan “ÇİFT ROTORLU ZİT DEVİNİMLİ RÜZGÂR TÜRBİNİNİN SAYISAL VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ” adlı tez çalışması jürimiz tarafından Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı Doktora Programında Doktora Tezi olarak oy birliği ile kabul edilmiştir. 18/04/2025

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman
Prof. Dr. Ömer ÖZYURT
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

.....

Üye
Prof. Dr. Ali Naci ÇELİK
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

.....

Üye
Prof. Dr. Alaattin Osman EMİROĞLU
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

.....

Üye
Prof. Dr. Yusuf Ali KARA
Bursa Teknik Üniversitesi

.....

Üye
Doç. Dr. Fevzi Çakmak BOLAT
Kocaeli Üniversitesi

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Onayı

Prof. Dr. İbrahim KÜRTÜL

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kılavuzu ve Şablonuna uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir
- aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Teze ilişkin Turnitin adlı programında enstitü müdürlüğünce belirlenen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan benzerlik raporuna göre, tezin benzerlik oranı %30'u geçmemektedir.

.....

KADİR ÖZBEK

ÖZET

ÇİFT ROTORLU ZİT DEVİNİMLİ RÜZGÂR TÜRBİNİNİN SAYISAL VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

KADİR ÖZBEK

BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ DOKTORA PROGRAMI

(TEZ DANIŞMANI: PROF.DR. ÖMER ÖZYURT)

(İKİNCİ DANIŞMAN: DOÇ.DR. KADİR GELİŞ)

BOLU, NİSAN- 2024

XV + 178 sayfa

Giderek artan küresel enerji talebi ve yenilenebilir enerji kaynaklarına geçişin hızlı bir şekilde gerçekleşmesi gerektiği günümüzde, rüzgâr türbini teknolojisinde daha yüksek verim arayışı büyük önem kazanmıştır. Bu bağlamda, son yıllarda çift rotorlu rüzgâr türbinleri, rüzgâr enerjisi üretiminde verimliliği artırmak amacıyla geliştirilmiştir. Bu çalışmada, çift rotorlu zıt devinimli bir rüzgâr türbini tasarlanmış, imal edilmiş ve kapsamlı deneylere tabi tutulmuştur. Çalışmanın temel amacı, çift rotorlu sistemlerin performansını anlamak ve bu sistemlerin tasarımında dikkate alınması gereken faktörleri belirlemektir. Aerodinamik verimlilik ve yapısal bütünlük dikkate alınarak, NREL S822 profiline sahip kanatlar tasarlanmış ve üretilmiştir. Tasarımda ön ve arka rotorların birbirine zıt yönlerde dönmesi sağlanarak, akış karakteristikleri ve enerji dönüşüm performansı optimize edilmeye çalışılmıştır. Deneyler laboratuvar koşullarında açık kanallı rüzgâr tüneline yapılmıştır. Çalışmada, kanat açıları 0° - 24° arasında değiştirilerek sistem performansına olan etkileri araştırılmıştır ve hangi açı kombinasyonlarında çift rotorlu sistemin çalıştığı belirlenmiştir. Deneylerde, rüzgâr hızı aralığı 6-10 m/s olarak belirlenmiş ve çeşitli hızlarda türbin performansı incelenmiştir. Elde edilen tork değerleri ve güç katsayıları, sayısal analizlerden elde edilen verilerle karşılaştırılmış ve deney sonuçlarının doğruluğu değerlendirilmiştir. Ayrıca, farklı açılarda ve hızlarda yapılan testlerin sonuçları istatistiksel yöntemlerle analiz edilerek, çift rotorlu sistemin sınırları ve optimum çalışma koşulları belirlenmiştir. Doğrudan tahrikli jeneratör ve NREL S822 kanat profiline sahip çift rotorlu rüzgâr türbini sisteminin 12° - 3° kanat konfigürasyonunda, 10 m/s rüzgâr hızında 189.50 W güç çıktısı ve 178.44 kJ/kg ekserji yıkımı ile en verimli performansı sergilediği belirlenmiştir. Tek rotorlu sisteme göre %23 ile %66 arasında daha yüksek güç çıktısı sağlayan çift rotorlu rüzgâr türbini, enerji verimliliği ve aerodinamik denge açısından önemli kazanımlar sunmuştur. Hem deneysel hem de sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar, çift rotorlu sistemlerin daha geniş çaplı uygulamalarda kullanımına yönelik önemli veriler sağlamıştır. Çalışma, rüzgâr türbini teknolojilerinin gelecekteki geliştirme süreçlerine katkı sunmayı ve yenilenebilir enerji dönüşümünde önemli bir adım atmayı amaçlamaktadır.

ANAHTAR KELİMELELER: Çift Rotorlu Rüzgâr Türbini, NREL S822, Zıt Devinimli Rotor, Doğrudan Tahrikli, Rüzgâr Türbini, Ekserji Analizi

ABSTRACT

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF COUNTER-ROTATING TWIN-ROTOR WIND TURBINE

PHD THESIS

KADİR ÖZBEK

BOLU ABANT İZZET BAYSAL UNIVERSITY

INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

(SUPERVISOR: PROF.DR. ÖMER ÖZYURT)

(CO-SUPERVISOR: ASSOCIATE DR. KADİR GELİŞ)

BOLU, APRIL 2024

XV + 178 pages

With the ever-increasing global energy demand and the need for a rapid transition to renewable energy sources, the search for higher efficiency in wind turbine technology has gained great importance. In this context, in recent years, twin rotor wind turbines have been developed to increase the efficiency of wind power generation. In this study, a twin rotor counter-circulating wind turbine is designed, fabricated and subjected to extensive experiments. The main objective of the study is to understand the performance of twin rotor systems and to identify the factors that should be considered in the design of these systems. Considering aerodynamic efficiency and structural integrity, blades with NREL S822 profile were designed and manufactured. In the design, flow characteristics and energy conversion performance were tried to be optimized by ensuring that the front and rear rotors rotate in opposite directions. The experiments were carried out under laboratory conditions in an open channel wind tunnel. In the study, the blade angles were varied between 0° - 24° and their effects on the system performance were investigated and it was determined at which angle combinations the twin rotor system works. In the experiments, the wind speed range was determined as 6-10 m/s and the turbine performance was analyzed at various speeds. The obtained torque values and power coefficients were compared with the data obtained from numerical analysis and the accuracy of the experimental results was evaluated. The dual-rotor wind turbine system equipped with a direct-drive generator and NREL S822 blade profile demonstrated its most efficient performance in the 12° - 3° blade configuration, achieving a power output of 189.50 W and an exergy destruction of 178.44 kJ/kg at a wind speed of 10 m/s. Compared to the single-rotor system, the dual-rotor configuration provided 23% to 66% higher power output, offering significant advantages in terms of energy efficiency and aerodynamic stability. The results obtained from both experimental and numerical analyses provide valuable insights for the potential large-scale applications of dual-rotor systems. This study aims to contribute to the future development of wind turbine technologies and represents an important step toward advancing renewable energy conversion.

KEYWORDS: Double Rotor Wind Turbine, NREL S822, Counter Rotor, Direct Drive, Wind Turbine, Exergy Analysis

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
TABLO LİSTESİ	xi
FOTOĞRAF LİSTESİ	xii
KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ	xiv
TEŞEKKÜR	xv
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Problem Durumu	2
1.2 Çalışmanın Amacı ve Önemi.....	6
1.3 Rüzgâr Enerjisine Genel Bakış.....	10
1.4 Çift Rotorlu Rüzgâr Türbinleri	20
1.4.1 Çift rotorlu rüzgâr türbinlerinin tarihi gelişimi ve ilk çalışmalar.	22
1.4.2 Çift rotorlu rüzgâr türbinleri ile ilgili çalışmalar	24
2. MATERYAL ve YÖNTEM.....	36
2.1 Kuramsal Temeller	36
2.1.1 Rüzgâr Türbinlerinde Aerodinamiğin Temelleri.....	36
2.1.2 Çift Rotorlu Rüzgâr Türbinlerinde Aerodinamik	43
2.1.3 Rüzgâr Türbinlerinde Ekserji	44
2.2 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği.....	45
2.2.1 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) ve Rüzgâr Türbini Analiz Süreçleri.....	45
2.2.2 CFD Analizleri için Kuramsal Temeller	48
2.2.3 Çift Rotorlu Rüzgâr Türbininin CFD Çözümlemesi	54
2.3 Materyal.....	64
2.3.1 Deney Düzeneği	64
2.3.2 Kanat Tasarımı ve İmalatı	67
2.3.3 Alternatör Tasarımı, İmalatı ve Montajı.....	73
2.3.4 Diğer mekanik ekipmanlar	77
2.3.5 Açık Döngülü Rüzgâr Tüneli	83
2.3.6 Ölçüm Ekipmanları	84
2.4 Yöntem	87
3. BULGULAR	93
3.1 Deneysel Verilerin Analizi ve Elde Edilen Bulgular.....	93

3.2 Ekserji Analizi ve Elde Edilen Bulgular.....	116
3.3 Çift Rotorlu Rüzgâr Türbini CFD Analizleri.....	124
3.4 Sonuçların istatistiksel olarak incelenmesi	148
3.5 Çift Rotorlu ve Tek Rotorlu Rüzgâr Türbinleri için Maliyet Analiz.....	158
4. TARTIŞMA	164
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	171
KAYNAKLAR	173



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1. 2019-2023 yılları arasında kurulan rüzgâr enerji santralleri kapasiteleri	11
Şekil 1.2. 2023 Yılında Bölgelere Göre Kurulan Yeni Rüzgâr Enerjisi Kapasitesi ve Pazar Payları (GWEC, 2024)	12
Şekil 1.3. Rüzgâr Türbini Kurulumlarının yıllara göre değişimi (GWEC, 2024)	20
Şekil 2.1. s809 kanat profili için hücum açısına bağlı olarak kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerindeki değişim (kutuplar grafiği)(Volikas & Nikas, 2019)	38
Şekil 2.2. Farklı kanat profilleri için kaldırma ve sürüklenme katsayıları	39
Şekil 2.3. Ön ve Arka rotor tasarımları	55
Şekil 2.4. Kanatların yandan görünüşü	55
Şekil 2.5. Akış alanı	56
Şekil 2.6. Ağ yapısı kesit görüntüleri	58
Şekil 2.7. Ağ yapısının çarpıklık değeri dağılımları	58
Şekil 2.8 Ağ yapısının orthogonal kalitesi değerlerinin dağılımları	59
Şekil 2.9. Türbülans modeli ve model sabitleri	61
Şekil 2.10 Türbin etrafındaki bölgedeki ağ hareketi ayarları	62
Şekil 2.11. Çift Rotorlu Rüzgâr Türbini Deney Setinin Yandan Görünüşü ve Bileşenleri	65
Şekil 2.12. Deney düzeneği bağlantı şeması	65
Şekil 2.13. Çift Rotorlu Rüzgâr Türbini Deney Düzeneğinde Kanat Açısı Ayar Mekanizması ve Bileşenleri	66
Şekil 2.14. Kanat profillerinin farklı hücum açılarındaki kaldırma-sürüklenme oranları	69
Şekil 2.15. Farklı kanat tasarımları ve optimizasyon yöntemleri için Kanat Uç Hız Oranı (TSR)- C_p grafikleri	67
Şekil 2.16. Kanat imalat süreçleri	68
Şekil 2.17. Optimize edilmiş kanat tasarımının katı modeli	68
Şekil 2.18. Alternatörün devir sayısına bağlı güç ve açık devre voltajı grafikleri	74
Şekil 2.19. Alternatör montajı kesit görünümü	75
Şekil 2.20. Alternatör tasarımının yandan görünüşü	76
Şekil 2.21. Kanat açısı ayar mekanizması kesiti	78
Şekil 2.22. Vidalı mil ile kanat mili arasındaki bağlantı kolu	78
Şekil 2.23 Üçgen parça çizim ve imalat sonrası görüntüleri	79
Şekil 2.24. Vidalı mil bağlantısı tasarımı	79
Şekil 2.25. Kanat ayna tasarımı ve kanat montajı tasarımı	81
Şekil 2.26. Deney düzeneği alt tabla ve gövde plakaları tasarımı	82
Şekil 2.27. Deneysel parametreler	88
Şekil 2.28. Deney Akış Şeması	89
Şekil 3.1. 12° ön kanat açısı için farklı rüzgâr hızı ve konfigürasyonlarda elde edilen güç değerleri	98
Şekil 3.2. 12° ön kanat açısı için farklı rüzgâr hızı ve konfigürasyonları için tek rotorlu rüzgâr türbinine göre güç çıkışındaki artış miktarı	99
Şekil 3.3. 12° ön kanat için elde edilen toplam tork değerleri	100

Şekil 3.4. 15° ön kanat açısı için farklı rüzgâr hızı ve konfigürasyonlarda elde edilen güç değerleri.....	101
Şekil 3.5. 15° ön kanat açısı için farklı rüzgâr hızı ve konfigürasyonları için tek rotorlu rüzgâr türbinine göre güç çıkışındaki artış miktarı	102
Şekil 3.6. 12° ön kanat için elde edilen toplam tork değerleri.....	103
Şekil 3.7. 18° ön kanat açısı için farklı rüzgâr hızı ve konfigürasyonlarda elde edilen güç değerleri.....	104
Şekil 3.8. 18° ön kanat açısı için farklı rüzgâr hızı ve konfigürasyonları için tek rotorlu rüzgâr türbinine göre güç çıkışındaki artış miktarı	105
Şekil 3.9. 18° ön kanat için elde edilen toplam tork değerleri.....	106
Şekil 3.10. 21° ön kanat açısı için farklı rüzgâr hızı ve konfigürasyonlarda elde edilen güç değerleri	107
Şekil 3.11. 21° ön kanat açısı için farklı rüzgâr hızı ve konfigürasyonları için tek rotorlu rüzgâr türbinine göre güç çıkışındaki artış miktarı	108
Şekil 3.12. 21° ön kanat açısı için elde edilen toplam tork değerleri	109
Şekil 3.13. 24° ön kanat açısı için farklı rüzgâr hızı ve konfigürasyonlarda elde edilen güç değerleri	110
Şekil 3.14. 24° ön kanat açısı için farklı rüzgâr hızı ve konfigürasyonları için tek rotorlu rüzgâr türbinine göre güç çıkışındaki artış miktarı	111
Şekil 3.15. 24° ön kanat açısı için elde edilen toplam tork değerleri	112
Şekil 3.16. 24° Ön kanat açısı için çift rotorlu rüzgâr türbinlerinde ekserji yıkımı ve enerji üretimi	120
Şekil 3.17. 21° Ön kanat açısı için çift rotorlu rüzgâr türbinlerinde ekserji yıkımı ve enerji üretimi	120
Şekil 3.18. 18° Ön kanat açısı için çift rotorlu rüzgâr türbinlerinde ekserji yıkımı ve enerji üretimi	121
Şekil 3.19. 15° Ön kanat açısı için çift rotorlu rüzgâr türbinlerinde ekserji yıkımı ve enerji üretimi	121
Şekil 3.20. 12° Ön kanat açısı için çift rotorlu rüzgâr türbinlerinde ekserji yıkımı ve enerji üretimi	122
Şekil 3.21. En yüksek güç üretimine sahip konfigürasyonlar için ekserji yıkımı ve enerji üretimi	122
Şekil 3.22. Ön kanat için deneysel ve CFD analizi tork çıktıları.....	128
Şekil 3.23. Arka kanat için deneysel ve CFD analizi tork çıktıları.....	129
Şekil 3.24. Ön ve arka kanatların toplam güç çıktısına olan katkı oranları	130
Şekil 3.25. Toplam deneysel ve sayısal güç değerleri	131
Şekil 3.26. Kanat yüzeylerindeki basınç dağılımlarının önden görünüşü (a: 12°-3° konfigürasyonu; b: 24°-0° konfigürasyonu).....	133
Şekil 3.27. Kanat yüzeylerindeki basınç dağılımlarının arkadan görünüşü (a: 12°-3° konfigürasyonu; b: 24°-0° konfigürasyonu).....	135
Şekil 3.28. Kanat yüzeylerindeki hız dağılımlarının önden görünüşü (a: 12°-3° konfigürasyonu; b: 24°-0° konfigürasyonu).....	137
Şekil 3.29. Kanat yüzeylerindeki vektörel hız dağılımı: Sol görsel ön rotor için, sağ görsel arka rotor için gösterilmektedir.	138
Şekil 3.30. Farklı konfigürasyonlar için kanat yüzeylerindeki maksimum hızlar	139
Şekil 3.31. Hız büyüklüğü kesit görünümü- Kontür Grafiği (a: 12°-3° konfigürasyonu; b: 24°-0° konfigürasyonu).....	141
Şekil 3.32. Hız büyüklüğü alanı analizi (a: 12°-3° konfigürasyonu; b: 24°-0° konfigürasyonu)	142

Şekil 3.33. Kanat profilleri ve akış alanı için basınç dağılımları (a: 12°-3° konfigürasyonu; b: 24°-0° konfigürasyonu).....	144
Şekil 3.34. Akış alanı basınç dağılımı (a: 12°-3° konfigürasyonu; b: 24°-0° konfigürasyonu)	146
Şekil 3.35. Artık (Residual) Analizi	152
Şekil 3.36. Oluşturulan modelin Pareto grafiği	153
Şekil 3.37. Ön ve Arka kanat açılarının güç çıktısı üzerindeki etkisi.....	156
Şekil 3.38. Ön kanat açısı ve yük değerinin değişiminin güç çıktısı üzerindeki etkisi	157



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. CFD'de kullanılan türbülans modelleri ve performans karşılaştırması	50
Tablo 2.2. Ağ yapısı (Mesh) özellikleri	57
Tablo 2.3. CFD çözümlemesinde kullanılan genel ayarlar	60
Tablo 2.4. CFD Zaman ilerlemesi ayarları	62
Tablo 2.5. Çözüm yönteminde kullanılan ayırıklaştırma türleri	63
Tablo 2.6. Artık İzleme ve Yakınsama Kriteri Parametreleri	63
Tablo 2.7. Kanatların farklı optimizasyon yöntemlerine göre kord uzunlukları ve burulma açıları	66
Tablo 2.8. PETG ve ABS Filamentlerinin karşılaştırılması	69
Tablo 2.9. Alternatör teknik özellikleri	74
Tablo 2.10. Deney düzeneği ölçüm ekipmanları	85
Tablo 3.1. Kanat Açısı Değişimlerinin Çift Rotorlu Rüzgâr Türbinlerinde Çalışma Durumu Üzerindeki Etkileri	94
Tablo 3.2. Ön ve arka rotorlar arasındaki tork farklarının dağılımı	96
Tablo 3.3. Sayısal Analiz Girdi Parametreleri	125
Tablo 3.4. Deneysel ve sayısal analiz sonuçları	125
Tablo 3.6. Deneysel sonuçlar için Varyans Analizi (ANOVA)	149
Tablo 3.7. Model Özeti	151
Tablo 3.8. Hedef Parametre tablosu ve tanımlamalar	154
Tablo 3.9. Optimizasyon sonuçları	155
Tablo 3.10. Tahmin edilen yanıtlar ve güven aralıkları	155
Tablo 3.11. 2 kW kapasitesinde Tek Rotorlu ve Çift Rotorlu Rüzgâr Türbini Maliyetleri	159

FOTOĞRAF LİSTESİ

Sayfa

Fotoğraf 1.1 1980-2030 yılları arasında karasal ve açık deniz rüzgâr türbinlerinin boyutlarındaki eğilimler (GWEC, 2024).....	13
Fotoğraf 1.2. İtalya Apulia şehrinde kurulan ilk açık deniz yüzer rüzgâr türbini (Institute, 2008)	17
Fotoğraf 1.3 Siemens Gamesa- Geri dönüştürülebilir kanat kesiti (Siemens Gamesa, 2024).....	19
Fotoğraf 1.4. Çift rotorlu rüzgâr türbini (Z. Wang ve ark., 2018)	22
Fotoğraf 1.5. Ushiyama ve ark. tarafından geliştirilen; eş eksenli, zıt devinimli, iki aşamalı rüzgâr türbini (Ushiyama ve ark., 1996).....	23
Fotoğraf 1.6. 30 kW kapasiteli çift rotorlu zıt devinimli rüzgâr türbini (Jung ve ark., 2005)	24
Fotoğraf 1.7. (Kanemoto & Galal, 2006)'ın çalışmasında kullanılan tasarım	25
Fotoğraf 1.8. (Cho ve ark., 2017) çalışmasında kullanılan çift rotorlu rüzgâr türbini tasarımı	26
Fotoğraf 1.9 (Romanski ve ark., 2016) çalışmasında kullanılan çift rotorlu rüzgâr türbini tasarımı	26
Fotoğraf 1.10. (Cai ve ark., 2024) çalışmasında kullanılan 3kW kapasitesindeki rüzgâr türbini	27
Fotoğraf 1.11 (Kubo & Kanemoto, 2008) çalışmasında kullanılan çift rotorlu tasarım	28
Fotoğraf 1.12. (Wei ve ark., 2017)'ın yaptığı çalışmada kullanılan kanat ve sistem tasarımı	30
Fotoğraf 1.13 (Kubo ve ark., 2010) yapmış olduğu çalışmada kullanılan alternatör tasarımı	32
Fotoğraf 1.14. Gelgit türbinlerinde kullanılan çift rotorlu kanatlar (Wei ve ark., 2015).....	33
Fotoğraf 1.15. (Huang & Kanemoto, 2015)'nın çalışmasında kullanılan tasarım	34
Fotoğraf 2.1. Bir kanat profili boyunca akım çizgilerinin şematik görünümü (Sharma & Bartaria, 2015).....	36
Fotoğraf 2.2. Kanat kesiti, tanımlamalar ve kuvvetler (Houghton ve ark., 2012).....	37
Fotoğraf 2.3. Rüzgâr türbini performansını belirlemede kullanılan akış modeli (Biber, 2019)	40
Fotoğraf 2.4. Akış çözümlerinde kullanılan farklı türbülans modelleri ve çözüm yaklaşımlarının karşılaştırılması (Hart, 2016).....	50
Fotoğraf 2.5. Deney düzeneğinin imalat sonrası görseli (yandan görünüş)	66
Fotoğraf 2.6. Deney düzeneğinin imalat sonrası görseli (perspektif).....	67
Fotoğraf 2.7. Deney düzeneğinin imalat sonrası görseli (açıklamalı görsel) ..	67
Fotoğraf 2.8. İncelenen kanat profilleri ve kesit görüntüleri	68
Fotoğraf 2.9 NREL S822 için farklı optimizasyon yöntemlerine göre kanat tasarımları.....	70
Fotoğraf 2.10. Kanat modeli için 3D baskı ile alınan kanat parçaları	70
Fotoğraf 2.11. Modelin yapıştırıldıktan sonraki görseli	70
Fotoğraf 2.12. Model yüzey hazırlama işlemleri-Zımparalama	71

Fotoğraf 2.13. Model üzerinde yapılan çelik macun ve zımpara işlemleri.....	71
Fotoğraf 2.14. Kalıp imalat süreçleri	72
Fotoğraf 2.15. Kanat imalat aşamaları ile ilgili görseller	73
Fotoğraf 2.16. Tez çalışmasında kullanılan PMG alternatörün rotor ve statoru	75
Fotoğraf 2.17. Alternatör gövde imalatı aşamaları ve imalat sonrası görüntüler	76
Fotoğraf 2.18. Alternatör Montaj Aşamaları	77
Fotoğraf 2.19. Vidalı mil bağlantısı imalat ve montaj sonrası görseli.....	79
Fotoğraf 2.20. Ön ve arka kanatların mil tasarımları ve imalat sonrası görselleri	80
Fotoğraf 2.21. Kanat hareket mekanizması kolu montaj aşamaları.....	80
Fotoğraf 2.22. Kanat aynası ve kanat bağlantı ekipmanları imalat sonrası görselleri	81
Fotoğraf 2.23. Kanat bağlantı aynası montaj aşamaları.....	82
Fotoğraf 2.24. Alt tabla ve gövde plakaları imalat sonrası görselleri	83
Fotoğraf 2.25. Rüzgâr Fanları Montaj Sonrası	84
Fotoğraf 2.26. Veri toplama ekipmanları.....	86



KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ

A	: Alan
a	: Eksenel Azalma Faktörü
BEM	: Pala Elemanı Momentum Teoremi
CFD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
C_l	: Kaldırma Katsayısı
C_d	: Sürüklenme Katsayısı
C_m	: Momentum Katsayısı
C_p	: Güç Katsayısı
CRWT	: Zıt Devrimli Rüzgâr Türbini
DNS	: Doğrudan Sayısal Simülasyon
F_d	: Sürüklenme Kuvveti
F_l	: Kaldırma Kuvveti
FDM	: Sonlu Fark Yöntemi
FEM	: Sonlu Eleman Yöntemi
FVM	: Sonlu Hacim Yöntemi
GWEC	: Küresel Rüzgâr Enerjisi Konseyi
IEC	: Uluslararası Enerji Ajansı
LES	: Büyük Girdap Simülasyonları
Ma	: Mach Sayısı
P	: Güç
PIV	: Parçacık Görüntüleme Velosimetresi
PISO	: Operatörlerle Ayrık Basınç Yöntemi
PISO	: Operatörlerle Ayrık Basınç Yöntemi
R	: Rotor Yarıçapı
RANS	: Reynolds- Ortalama Navier-Stokes
SIMPLE	: Basınç Bağlantılı Yarı Örtük Yöntem
T	: Tork
URANS	: Belirsiz Reynolds- Ortalama Navier-Stokes
V_∞	: Rüzgâr Hızı
WCT	: Rüzgâr Soğutma Sıcaklığı
ρ	: Yoğunluk
λ	: Uç Hız Oranı
ω	: Açısal Hız
Ψ	: Ekserji Verimliliği

TEŞEKKÜR

Öncelikle, değerli bilgi ve rehberliğiyle tez sürecimde bana yol gösteren, bilimsel katkıları ve desteğiyle her zaman yanımda olan danışmanım Prof. Dr. Ömer Özyurt’a en derin teşekkürlerimi sunarım. Kendisi, akademik gelişimime büyük katkı sağlamış ve çalışmamın her aşamasında kıymetli fikirleriyle bana destek olmuştur.

Özel olarak, tez sürecimde sadece akademik anlamda değil, aynı zamanda her aşamada rehberliği, yönlendirmeleri ve desteği ile büyük bir katkı sağlayan eş danışmanım Doç. Dr. Kadir GELİŞ’e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Kendisi, araştırma sürecinin her aşamasında karşılaştığım zorlukları aşmamda bana yol göstermiş, değerli akademik katkılarının yanı sıra, teşvik edici ve motive edici tutumuyla sürecimi çok daha verimli hale getirmiştir.

Doktora sürecim boyunca bilgi ve deneyimlerinden faydalandığım Prof. Dr. Ali Naci ÇELİK ve Doç. Dr. Fevzi Çakmak BOLAT’a katkılarından dolayı teşekkür ederim. Görüşleri ve önerileri, tezimin daha nitelikli hale gelmesine büyük katkı sağlamıştır.

“121R080” kodlu TÜBİTAK 1001 projesinde görev alma fırsatı sundukları için proje yürütücüsü Doç. Dr. Fevzi Çakmak Bolat’a ve proje ekibine teşekkür ederim. Doktora tez çalışmam süresince şahsıma TÜBİTAK-BİDEB 2211-Yurt İçi Doktora Burs Programı kapsamında sağladığı destek için TÜBİTAK’a teşekkür ederim. ANSYS yazılımının kullanım imkânı için Kocaeli Üniversitesi’ne teşekkür ederim.

Bu uzun ve zorlu süreçte en büyük destekçilerim olan eşim, hayat arkadaşım, can yoldaşım Emine ve kıymetli oğullarım Kerem ile Akın’a en derin teşekkürlerimi sunarım. Onlar, tez sürecimin sadece tanıkları değil, en büyük dayanakları oldular. Sabırları, anlayışları, sonsuz sevgileri ve fedakârlıklarıyla her an yanımda durdular. Onlardan ödünç aldığım zaman içinde gösterdikleri hoşgörü, bana verdikleri güç ve her koşulda hissettirdikleri sevgi, bu süreci daha anlamlı ve katlanılabilir kıldı. Bana olan inançları, verdikleri bir tebessüm, bir kucaklaşma bile karşılaştığım tüm zorlukları aşmam için yeterli oldu. Varlıklarıyla her an yanımda oldukları için sonsuz minnettarım.

Kadir Özbek

1. GİRİŞ

Küresel enerji sektörü, sera gazı emisyonlarını azaltma ve yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş zorunluluğu ile şekillenen köklü bir dönüşüm yaşamaktadır. Çeşitli yenilenebilir enerji kaynaklı teknolojiler arasında rüzgâr enerjisi, artan küresel enerji talebini karşılama potansiyeline sahip, umut verici çözümler arasında yer almaktadır. Küresel Rüzgâr Enerjisi Konseyi tarafından hazırlanan 2023 Rüzgâr Enerjisi Raporuna göre, günümüzde rüzgâr enerjisi küresel enerji talebinin %7'sinden fazlasını karşılamaktadır. 2023 yılının sonu itibarıyla kurulu rüzgâr enerji santrallerini kapasitesi 945.5 GW'yi aşmıştır(GWEC, 2024). Bu artış 2018'de 593 GW olan kapasiteye kıyasla keskin bir artışı temsil etmekte ve dünya genelinde rüzgâr enerji santrallerinin hızlı bir şekilde genişlediğini göstermektedir.

Küresel Rüzgâr Enerjisi sektörü 2023 yılında 117 GW'lık kurulumla tüm zamanların en yüksek kapasite artışını sağlamıştır. Çin ve Brezilya, özellikle kara rüzgârı alanında büyümeye önemli katkılar sağlamıştır. Küresel Rüzgâr Enerjisi Konseyi 2028'e kadar 791 GW'lık rüzgâr enerji kapasitesinde artış öngörmekte ve deniz üstü rüzgârın yıllık büyüme oranının %28 olması beklenmektedir. Güçlü bir büyüme öngörülse de, izin süreçleri, tedarik zinciri, finansman ve şebeke kapasitesi gibi alanlarda iyileştirmeler yapılmadan, Paris Anlaşması'nın 2030 Net Sıfır Emisyon hedeflerine ulaşılması mümkün olmayacaktır (GWEC, 2024).

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA), Rüzgâr gücünün 2050 yılına kadar küresel enerji talebinin %25'ini karşılamasını beklediğini ve bunun "2050'ye Kadar Net Sıfır Emisyon" senaryosu kapsamında Rüzgâr türbinlerinin maliyetlerindeki sürekli azalma ve türbin teknolojilerindeki ilerlemeler ile mümkün olduğunu belirtmektedir (International Energy Agency, 2021).

Rüzgâr türbini teknolojisinde önemli ilerlemeler kaydedilmiş olmasına rağmen, geleneksel tek rotorlu rüzgâr türbinleri iz etkisi kayıpları ve verimlilik ile ilgili sınırlamalar nedeniyle hala belirli zorluklar ile karşılaşmaktadır. Rüzgâr, dönen bir türbinin kanatlarından geçtiğinde hızı azalır ve türbülanslı bir duruma gelir. Bu akış değişimi, rüzgâr çiftliklerinde aerodinamik performansın azalmasına neden olan bir etki yaratır ve bu etkiye "iz etkisi" denir. Rüzgâr çiftliklerindeki türbinler, birden fazla iz etkisine maruz kalabilmektedir. Bu etkiler, toplam rüzgâr çiftliği enerji üretiminde %23'e varan kayıplara yol açabilmektedir (Barthelmie ve

ark., 2009). Bu etkileşimler, enerji verimliliğini düşürmenin yanı sıra, türbin bileşenleri üzerindeki mekanik yükleri arttırarak, yorulmayı hızlandırır ve çalışma ömürlerini azaltır.

Bu zorlukların üstesinden gelebilmek adına araştırmacılar, optimize edilmiş rüzgâr türbini aralığı, kanat açısı kontrol teknikleri ve türbülans yönlendirmesi dahil olmak üzere çeşitli stratejileri araştırmışlardır. Bu araştırmaların tamamı, türbülansın genel rüzgâr çiftliği verimliliği üzerindeki olumsuz etkisini azaltmayı amaçlamaktadır. Ancak, bu yöntemler genellikle yüksek maliyet, artan karmaşıklık veya enerji verimliliğinde azalma gibi belirli ödümler gerektirmekte olup, uzun vadeli sürdürülebilirlik ve uygulanabilirlik açısından dikkatli bir değerlendirme gerektirmektedir. Bu nedenle, her bir yöntemin uygulanabilirliği dikkatli bir şekilde değerlendirilmelidir. Bu sınırlamalar doğrultusunda, çift rotorlu rüzgâr türbin sistemleri gibi yenilikçi tasarım konseptleri, rüzgârdan enerji elde etme verimliliğini arttırırken, aynı zamanda iz etkisini en aza indirme kabiliyeti ile öne çıkmaktadır (Koehuan ve ark., 2017).

Çift rotorlu rüzgâr türbinleri teknolojilerinin yaygın olarak benimsenmesi, aerodinamik karmaşıklık, mekanik yük dağılımı ve rotor yapılandırmalarının optimizasyonu gibi yeni zorlukları beraberinde getirmektedir. Şu ana kadar çift rotorlu rüzgâr türbini sistemleri alanında yapılan çalışmalar sınırlı olup, çoğunlukla teorik analizler veya basitleştirilmiş modeller üzerine yoğunlaşmıştır. Ayrıca bu tür sistemlerin pratikte uygulanabilmesi, tasarımın güvenilirliği ve ölçeklenebilirliğini sağlamak amacıyla kapsamlı deneyler ile doğrulamaları gerektirmektedir. Bu tez, çift rotorlu zıt devinimli rüzgâr türbinlerinin performansını detaylı sayısal ve deneysel inceleme ile ele almayı ve bu yenilikçi teknolojinin rüzgâr enerji verimliliğini önemli ölçüde arttırma potansiyelini araştırmayı hedeflemektedir

1.1 Problem Durumu

Rüzgâr enerjisi, iklim değişikliğiyle mücadele ve sera gazı emisyonlarını azaltılması gerekliliği doğrultusunda, yenilenebilir enerjiye geçişte kilit bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Rüzgâr enerjisinin kümülatif kurulu kapasitesindeki büyümeye rağmen, rüzgâr çiftlikleri hâlâ geleneksel tek rotorlu rüzgâr türbinlerinin verimliliğiyle ilgili önemli zorluklarla karşı karşıyadır. Bu zorluklar genel olarak aerodinamik verimsizlikle, iz etkisi ve enerji dönüşüm sınırlamaları ile

bağlantılıdır. İz Etkisi geleneksel tek rotorlu rüzgâr türbinlerindeki başlıca sınırlamalardan biridir. Türbin kanatları döndükçe, akış altı bölgesinde bulunan diğer türbinler için rüzgâr hızını azaltan ve türbülansı arttıran bir iz oluşmaktadır. Akış altı, rüzgârın türbin kanatlarından geçtikten sonra izlediği bölgeyi ifade etmektedir. Bu bölge, türbülansın en yoğun olduğu yerdir. Bu durum özellikle türbinlerin sık yerleştirildiği rüzgâr çiftliklerinde önemli bir sorun oluşturmakta ve türbinlerin enerji üretim verimliliğinde kayda değer bir düşüşe yol açmaktadır.

İz etkisi ve Betz limiti gibi kısıtlamalar, geleneksel tek rotorlu rüzgâr türbinlerinin enerji üretim verimliliğini sınırlandırmaktadır. Bu nedenle, araştırmacılar ve mühendisler, rüzgâr türbinlerinin aerodinamik verimliliğini artırmak ve rüzgârın kinetik enerjisinden daha fazla faydalanabilmek için alternatif tasarımlar geliştirmeye yönelmişlerdir. Bu alternatiflerden biri de çift rotorlu rüzgâr türbinleridir. Çift rotorlu sistemler, rüzgârın kinetik enerjisinden daha fazla yararlanmayı ve iz etkisini azaltarak akış altı bölgesindeki türbülansı en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Geleneksel tek rotorlu sistemlere kıyasla daha fazla enerji üretme potansiyeline sahip olan bu tasarım, rüzgâr enerjisinden maksimum düzeyde faydalanma yolunda önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir.

Geleneksel tek rotorlu rüzgâr türbinlerindeki sınırlamalar sadece iz etkisi ile sınırlı değildir. Tek rotorlu rüzgâr türbinlerindeki temel sınırlamalarından biri, rüzgârın kinetik enerjisinin yalnızca belirli bir kısmını yakalayabilme kapasitesidir. Bu kısıtlama Alman fizikçi Albert Betz'in adıyla anılan Betz Limiti tarafından belirlenmektedir (Betz, 1926). Betz Limiti, bir rüzgâr türbininin rüzgâr enerjisini mekanik enerjiye dönüştürme konusundaki teorik maksimum verimliliği ifade etmektedir. Bu ilkeye göre, bir rüzgâr türbini tasarımından bağımsız olarak, rüzgârın kinetik enerjisinin %59.3'ünden fazlasını yakalayamaz. Bu limit, eğer bir türbin rüzgârın enerjisinin tamamını yakalarsa, türbinin arkasındaki rüzgârın hızının sıfıra düşeceği ve daha fazla rüzgârın türbin rotorundan geçmesini engelleyerek enerji üretimini durduracağı gerçeğinden türetilmiştir. Betz limiti göz önüne alındığında, bir türbinin rüzgâr enerjisinden yakalayabileceği maksimum miktar ideal koşullar altında bile sınırlıdır. Endüstriyel rüzgâr türbinleri, mekanik verimsizlikler, kanat kusurları ve uygun olmayan rüzgâr koşulları gibi ek kayıplar nedeniyle bu limitin oldukça altında çalışmaktadır.

Tek rotorlu rüzgâr türbinleri, rüzgâr yönü ve türbülans nedeniyle enerji dönüşüm verimliliğinde dalgalanmalar yaşamaktadır. Endüstriyel uygulamalarda

rüzgâr nadiren sabit hızlarda veya yönlerde dönmektedir. Türbinler maksimum güç üretimini sağlayabilmek ve rotoru rüzgâr ile hizalamak için yönlendirme (yaw) ayarı yapmaktadır. Bu dinamik değişiklikler verimliliği düşürür ve tek rotorlu rüzgâr türbinlerinin enerji dönüşüm kapasitesini sınırlandırmaktadır.

Bu bağlamda, tek rotorlu rüzgâr türbinlerinin enerji üretim verimliliğini etkileyen temel kısıtlamalar, yalnızca kara rüzgâr çiftlikleriyle sınırlı kalmamakta, açık deniz rüzgâr santralleri için de geçerli olmaktadır. Açık deniz rüzgâr türbinleri, daha istikrarlı ve güçlü rüzgâr kaynaklarına sahip olmalarına rağmen, türbülans etkileri, rüzgâr yönü değişimleri ve altyapı maliyetleri gibi çeşitli teknik ve ekonomik zorluklarla karşılaşmaktadır. Bu nedenle hem kara hem de deniz tabanlı rüzgâr enerjisi sistemlerinin daha verimli hale getirilmesi için yeni tasarım yaklaşımlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Çift rotorlu rüzgâr türbinleri gibi yenilikçi çözümler, bu zorlukların üstesinden gelmek ve rüzgâr enerjisinden daha yüksek verim elde etmek amacıyla geliştirilen alternatifler arasında öne çıkmaktadır. Açık deniz rüzgâr enerji santralleri ise özellikle sınırlı araziye sahip bölgelerde, deniz üzerindeki güçlü ve sürekli rüzgâr potansiyelini kullanarak, yenilenebilir enerjiye geçişte önemli bir rol oynamaktadır. Ancak bu büyük potansiyele rağmen, açık deniz rüzgâr çiftliklerinin kurulumu ve ölçeklendirilmesi teknolojik, çevresel, finansal ve yönetsel boyutlarda zorluklar ile karşı karşıyadır. Açık deniz rüzgâr türbinleri, karadaki rüzgâr türbinlerine göre daha fazla sermaye gerektirmektedir. Daha büyük çaplarda bulunan türbinlerin, temel yapımı, türbin montajı ve şebeke bağlantısı, karmaşık mühendislik problemleri oluşturmaktadır. Ayrıca açık deniz rüzgâr çiftliklerinin nüfus merkezlerinden uzakta olması nedeniyle üretilen enerjinin ana güç şebekesine bağlanması için geniş denizaltı kabloları ve iletim kayıplarını minimuma indiren yüksek voltajlı doğru akım teknolojisi gerekmektedir. Yüksek korozyon olasılığı ve aşırı hava koşullarına maruz kalması açık deniz rüzgâr türbinlerinin diğer bir kısıtlamalarıdır.

Rüzgâr enerjisi teknolojisi geliştikçe, araştırmacılar geleneksel tek rotorlu rüzgâr türbinlerinin tasarım sınırlarını aşmak ve türbinlerin verimliliğini arttırmak için yenilikçi çözümler aramaktadır. Bu çözümlerden en umut verici olanlarından biri, çift rotorlu rüzgâr türbinleridir. Çift rotorlu rüzgâr türbinleri, iki rotorun zıt veya aynı yönlü dönmesi ile rüzgâr enerjisinin yakalanma ve kullanılmasını önemli bir ölçüde değiştirmektedir. Bu sayede enerji üretimi artmakta ve iz etkileri azalmaktadır. Henüz geliştirme aşamasında olmasına rağmen çift rotorlu rüzgâr

türbinleri hem sayısal simülasyonlarda hem de küçük ölçekli deneylerde umut verici sonuçlar göstermektedir. Geleneksel tek rotorlu sistemlerde iz etkisi rüzgâr türbinlerinin verimliliklerinde %40'a varan enerji kaybına neden olmaktadır. Çift rotorlu rüzgâr türbinleri daha düzenli ve daha az türbülanslı bir iz bırakarak bu kayıpları en aza indirmektedir (Z. Wang ve ark., 2018). İkinci bir rotorun kullanılması ile aynı rüzgâr alanından daha etkili bir enerji elde edilebilmektedir. Yapılan çalışmalar çift rotorlu rüzgâr türbinlerinin verimliliklerinin tek rotorlu rüzgâr türbinlerine kıyasla %10-15 oranında daha yüksek olduğunu ifade etmektedir (Hollands ve ark., 2020; Jung ve ark., 2005; Mitulet ve ark., 2015; Sundararaju ve ark., 2017). Çift rotorlu rüzgâr türbinleri aerodinamik yükleri iki rotor arasında daha dengeli bir şekilde dağıtarak mekanik bileşenlerdeki stresi azaltmakta, verimliliği arttırmakta ve türbin çalışma ömrünü uzatmaktadır. Çift rotorlu rüzgâr türbinlerinin avantajlarının yanında, uygulamada karşılaşılan bazı mühendislik zorlukları bulunmaktadır. Bunlardan birincisi mekanik karmaşıklığıdır. İki rotorun olduğu sistemlerin bazılarında öndeki ve arkadaki rotor dişliler vasıtasıyla alternatör miline bağlanırken bazı sistemlerde alternatörün rotoruna ve statoruna doğrudan bağlanmaktadır. Bu da türbinlerin mekanik ve yapısal tasarımını karmaşık hale getirmektedir. İki rotorun stabil ve senkronize bir şekilde çalışması gelişmiş kontrol sistemleri ve sağlam mekanik bileşenler ile mümkün olmaktadır. Diğer bir zorluk ise alternatör tasarımıdır. Her iki rotorun bir jeneratöre bağlanması karmaşık bir tahrik sistemi tasarımı gerektirmektedir. Hem maliyet etkin hem de güvenilir çözümler üretmek çift rotorlu teknolojilerin başarıları için kritik bir araştırma alanıdır.

Çift rotorlu rüzgâr türbinleri teknolojisi, rüzgâr enerjisi üretiminde önemli bir dönüşüm potansiyeline sahip olmasına rağmen, bu sistemlerin özellikle gerçek dünya işletim koşullarındaki ayrıntılı aerodinamik davranışlarına dair yeterli ve net bilgi bulunmamaktadır. Mevcut literatür, büyük ölçüde teorik ve sayısal çalışmalara odaklanmakta olup, deneysel doğrulamalar ise sınırlıdır. Özellikle rotorlar arasındaki ideal mesafe, kanat tasarımı ve rotorlar arasındaki dinamik yük dağılımı konusunda daha fazla bilgiye ihtiyaç vardır. Bu tasarım parametreleri, kapsamlı büyük ölçekli deneysel veriler olmadan yetersiz kalmakta ve çift rotorlu sistemlerin pratik uygulamalar için tam olarak optimize edilmesini zorlaştırmaktadır. Hem karada hem de denizde çift rotorlu rüzgâr türbinlerinin tam potansiyelini keşfetmek

için sayısal simülasyonları deneysel testler ile birleştiren kapsamlı bir araştırmaya ihtiyaç vardır.

Ekonomik açıdan, çift rotorlu rüzgâr türbinlerinin uygulanabilirliği kapsamlı bir şekilde incelenmemiş olup, maliyet-etkinliği ve yatırım geri dönüşü konusunda daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır. İlk çalışmalar bu türbinlerin enerji çıktısını artırabileceğini göstermiş olsa da mekanik tasarımın daha karmaşık olması, çift rotor senkronizasyonun gerekliliği, sermaye ve işletme maliyetlerindeki potansiyel artış gibi unsurlar incelenmesi gereken önemli noktalar olarak öne çıkmaktadır. Verimlilik kazançları ile artan maliyetler arasındaki denge net bir şekilde anlaşılmadıkça, çift rotorlu rüzgâr türbinleri teknolojisinin ticarileştirilmesi engeller ile karşılaşabilmektedir.

Küresel rüzgâr enerjisi sektörü, özellikle net sıfır emisyon hedeflerine yanıt olarak genişlemeye devam ederken, enerji üretimini en üst düzeye çıkarabilecek ve maliyetleri azaltabilecek yeni teknolojilerin araştırılması giderek önemli hale gelmektedir. Çift rotorlu rüzgâr türbini tasarımı yüksek potansiyele sahip olup, ARGE için umut verici bir yol sunmaktadır. Teknik ve ekonomik zorluklar çözülebildiği takdirde, çift rotorlu rüzgâr türbini teknolojisi rüzgâr enerjisinin verimliliğini ve ölçeklenebilirliğini arttırmada önemli bir rol oynayabilir. Bu da sürdürülebilir ve maliyet etkin bir yenilenebilir enerji geleceğine katkı sağlayabilir.

1.2 Çalışmanın Amacı ve Önemi

Literatürde çift rotorlu rüzgâr türbinlerinin hangi koşullar altında dengeli ve verimli bir şekilde çalıştığı net bir şekilde ortaya konulmamış olup, özellikle ön ve arka rotorların torklarının birbirine yakın olması gerektiği ifade edilse de bu durum deneysel olarak yeterince kanıtlanmamıştır. Mevcut çalışmalar, karşıt dönen rotorların akış etkileşimlerini düzenleyerek aerodinamik verimi artırabileceğini öne sürse de bu sistemlerin performansına etki eden kritik parametrelerin belirlenmesi konusunda kapsamlı bir değerlendirme eksikliği bulunmaktadır. Bu doğrultuda, çalışmamızda çift rotorlu rüzgâr türbinlerinin çalışma kriterlerini belirlemek amacıyla hem sayısal hem de deneysel yöntemler kullanılarak kapsamlı bir analiz gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın temel hipotezi, çift rotorlu rüzgâr türbinlerinde ön ve arka rotorlar arasındaki tork dengesinin sağlanmasının sistemin aerodinamik verimini ve enerji üretim kapasitesini artıracaktır. Bu doğrultuda, çift rotorlu

rüzgâr türbinlerinin performansını etkileyen temel dinamikler incelenerek, sistemin verimli ve kararlı bir şekilde çalışmasını sağlayacak koşullar belirlenmiştir.

Bu çalışmanın temel amacı, zıt yönlerde dönen çift rotorlu rüzgâr türbinlerinin aerodinamik performansını ve verimliliğini, sayısal, deneysel (güç, tork, ekserji) ve istatistiksel yöntemlerin kombinasyonunu kullanarak incelemektir. Çift rotorlu rüzgâr türbinlerinin aerodinamik davranışını kapsamlı bir şekilde analiz ederek rotor etkileşimlerinin daha iyi anlaşılmasını sağlamayı ve tasarım parametrelerini optimize ederek enerji verimliliğini arttırmayı hedeflemektedir.

Çalışmanın amaçları aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- 1. Sayısal Modelleme:** Farklı rüzgâr koşulları ve rotor konfigürasyonları için çift rotorlu rüzgâr türbinlerinin davranışlarını simüle etmek için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) kullanarak doğrulanmış bir model oluşturmak. Bu model, farklı çalışma koşulları altında hava akışı özelliklerini, iz etkilerini ve enerji dönüşüm verimliliğini simüle edecektir.
- 2. Deneysel Testler Gerçekleştirme:** Zıt devinimli çift rotorlu rüzgâr türbini sisteminin tasarlanıp üretilmesi ve prototip üzerinden deneysel testlerin gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu testler kapsamında, sistemin çalıştığı açılar belirlenerek hipotezin doğrulanması hedeflenmiş, güç çıkışı, tork değerleri ve ekserji yük dağılımları gibi performans parametreleri detaylı olarak değerlendirilmiştir.
- 3. Performans Analizi:** Çift rotorlu rüzgâr türbini sisteminin güç üretimi, yük dağılımı, tork değerleri ve ekserji açısından performansını değerlendirmek. Bu analiz, enerji dönüşümünü maksimum seviyeye çıkarmak için farklı kanat açıları, rüzgâr hızları ve yük değerleri gibi tasarım parametrelerini incelemeyi içerecektir.
- 4. Tek Rotorlu Sistemlerle Karşılaştırma:** Zıt devinimli çift rotorlu rüzgâr türbininin performansını geleneksel tek rotorlu rüzgâr türbinleri ile karşılaştırarak, Zıt devinimli çift rotorlu rüzgâr türbini sistemlerinin mevcut teknolojiyi hangi alanlarda aştığı ve temel avantajlarını belirlemek.
- 5. Optimizasyon:** Zıt devinimli çift rotorlu rüzgâr türbini sistemlerinin verimliliğini ve güvenilirliğini artırmak amacıyla optimum çalışma koşullarının belirlenmesi hedeflenmiştir. Ayrıca, farklı parametrelerin enerji ve tork üretimi üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmiş ve

sistemin davranışını öngörebilmek için matematiksel bir model oluşturulmuştur.

Bu çalışmanın önemi, rüzgâr enerjisi teknolojilerine sağlayabileceği yenilikçi katkılarla önem kazanmakta ve daha yüksek verimliliğe sahip rüzgâr türbini tasarımlarının geliştirilmesine ön ayak olmaktadır. Geleneksel tek rotorlu türbinlerin sınırlamalarını aşmayı hedefleyen zıt yönlerde dönen çift rotorlu sistemler, bu alanda öne çıkan yenilikçi bir çözüm olarak görülmektedir. Bu sistemler, verim kayıplarını azaltma ve enerji çıktılarında karşılaşılan kısıtlamaları aşma potansiyeli sunmaktadır. Ancak, bu teknoloji üzerinde yapılan çalışmalar geniş kapsamlı değildir. Özellikle deneysel doğrulama ve sistemin gerçek dünya koşullarındaki uygulanabilirliği konularında daha fazla çalışma gerekmektedir. Bu kapsamda, çalışmanın önemi maddeler halinde aşağıda sunulmuştur.

1. **Küresel Enerji Sorunlarına Çözüm:** Dünya genelinde yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş sürecinde, rüzgâr türbinlerinin verimliliğini arttırmak, artan enerji taleplerini karşılamak için hayati öneme sahiptir. Zıt devinimli çift rotorlu rüzgâr türbinleri konsepti, rüzgâr türbini performansını önemli ölçüde artırma potansiyeline sahiptir ve küresel yenilenebilir enerji payının genişletilmesinde katkı sağlayacaktır.
2. **Yenilikçi Rüzgâr Türbini Tasarımı:** Zıt devinimli çift rotorlu rüzgâr türbini tasarımı, rüzgârdan enerji çıkarımını arttırmaya yönelik yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır. Bu çalışma Zıt devinimli çift rotorlu rüzgâr türbini sistemlerinin aerodinamiği ve verimliliği hakkında yeni bilgiler sağlayarak, mevcut tek rotorlu sistemlere kıyasla daha verimli ve maliyet etkin türbin tasarımlarının geliştirilmesine yol açacaktır.
3. **Sürdürülebilirlik ve Çevresel Etki:** Rüzgâr enerjisi, karbon emisyonlarını azaltmak ve iklim değişikliğiyle mücadele etmek için küresel stratejinin önemli bir bileşenidir. Türbinlerin verimliliğini arttırarak, sera gazı emisyonlarının azaltılmasında katkıda bulunulacaktır. Bu sistem, rüzgâr enerjisi projelerinin çevresel karbon ayak izini en aza indirerek doğrudan çevresel faydalar sağlayacaktır.
4. **Bilimsel Katkı:** Çalışma, çift rotorlu rüzgâr türbinleri alanında rüzgâr türbini aerodinamiği üzerine bilgi birikimine katkıda bulunacaktır. Sayısal, deneysel ve istatistiksel yaklaşımın birleşimi, zıt devinimli rüzgâr türbinleri

teknolojilerini geliştirmek ve iyileştirmek için kullanılabilecek değerli veriler üretecektir. Bu çalışmanın bulguları, iz etkisi optimizasyonu ve ileri trbın malzemeleri gibi ilgili alanlardaki gelecek araştırmalara rehberlik etme potansiyeline sahiptir. Zıt devinimli çift rotorlu rüzgâr türbini sistemlerinde rotor ve statorun zıt yönlü dönmesini sağlayacak olan parametrelerin deneysel ve sayısal sonuçlar ile doğrulanarak belirlenmesi ve literatüre kazandırılması.

5. **Ekonomik Katkı:** Rüzgâr trbınlerinin verimliliğinin arttırılması, rüzgâr enerjisi üretim maliyet etkinliğini doğrudan etkilemektedir. Daha verimli trbın tasarımlarının geliştirilmesi, enerji üretim maliyetlerini düşürebilir ve rüzgâr enerjisini geleneksel enerji kaynaklarına kıyasla daha rekabetçi hale getirebilir. Bu ekonomik avantaj, dünya genelinde rüzgâr enerjisinin benimsenmesini hızlandırabilir ve sürdürülebilir enerjiye geçişi teşvik edebilir.

Bu çalışmanın hedefleri ve önemi, teknolojik yenilikleri teşvik etmek, sürdürülebilir enerji hedeflerini destekleme ve rüzgâr enerjisi sistemlerinin verimliliğini arttırmaya yönelik pratik çözümler sunma potansiyelini vurgulamaktadır. Zıt yönlerde dönen çift rotorlu rüzgâr türbini konseptine odaklanarak, trbın aerodinamiği, performans optimizasyonu ve enerji sürdürülebilirliği konularında literatüre yeni bilgiler sağlayacak, daha verimli rüzgâr enerji sistemlerinin gelişimine katkıda bulunacaktır.

Çalışmanın Kapsamı

Bu tez çalışması, zıt devinimli çift rotorlu rüzgâr trbınlerinin sayısal, deneysel ve istatistiksel olarak incelenmesine odaklanmakta olup, aerodinamik performanslarını ve enerji verimliliklerini iyileştirmeyi amaçlamaktadır. Çalışma, bir çift rotorlu rüzgâr türbini prototipinin tasarlanması ve imal edilmesi, kanat tasarımı ve imalatlarının yapılması, mekanik sistem tasarım ve imalatı, kontrollü bir rüzgâr tünelinde test edilmesi ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) modelinin geliştirilmesi gibi unsurları içermektedir. Kanat tasarımı ve optimizasyonu çalışma kapsamında yapılmış ve farklı optimizasyon yöntemleri (Betz ve Schmitz) karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Araştırmada parametre olarak n kanat açısı ($0^\circ, 3^\circ, 6^\circ, 9^\circ, 12^\circ, 15^\circ, 18^\circ, 21^\circ$ ve 24°); arka kanat açısı ($0^\circ, 3^\circ, 6^\circ, 9^\circ, 12^\circ, 15^\circ, 18^\circ, 21^\circ$ ve 24°); rüzgâr hızı (7 m/s, 8 m/s, 9 m/s ve 10 m/s) ; Yük (100 Ω , 150 Ω , 200 Ω , 250 Ω , 300 Ω , 350 Ω , 400 Ω , 450 Ω , 500 Ω , 550 Ω , ve

600 Ω) olarak belirlenerek temel parametreler incelenmiş, türbin performansı optimize edilmiştir. Elde edilen sonuçlar istatistiksel yöntemler kullanılarak incelenmiştir.

Sayısal simülasyonlar, rotorlar arasındaki akış davranışını ve etkileşimlerini incelerken, deneysel sonuçlar simülasyonların doğrulanması için kritik veriler sağlamıştır. Ayrıca bu çalışma zıt devinimli çift rotorlu rüzgar türbini sistemlerinin performansını geleneksel tek rotorlu rüzgâr türbinleri ile karşılaştırarak çift rotorlu rüzgâr türbinlerinin potansiyel avantajlarını vurgulamayı amaçlamaktadır. Ayrıca çalışmada girdi parametrelerinin çıktı parametreleri üzerindeki etki oranları da incelenmiş ve analiz edilmiştir. Test düzeneğinde 3 farklı bölgeden alınan rüzgâr hızı ve rüzgâr basıncı verileri ile çift rotorlu rüzgâr türbinlerinin ekserji verimlilikleri de karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

1.3 Rüzgâr Enerjisine Genel Bakış

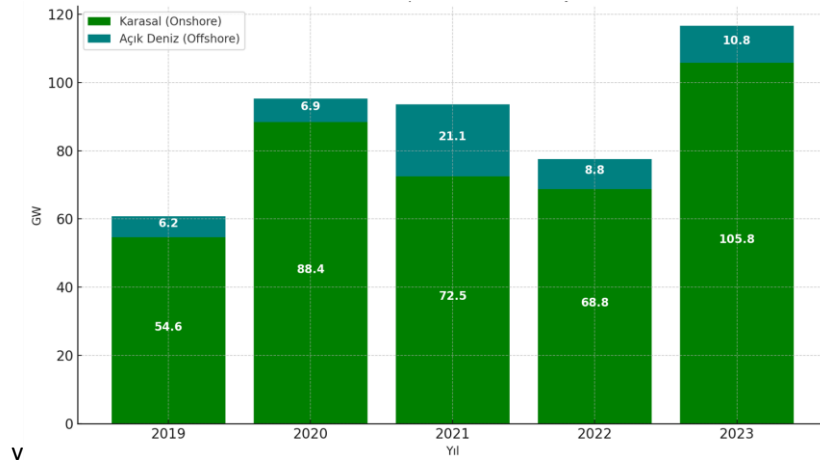
Rüzgâr enerjisi, dünya genelinde en hızlı büyüyen ve en yaygın kullanılan yaygın kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir. Fosil yakıtlara olan küresel bağımlılığın azaltılmasında ve iklim değişikliği etkilerini hafifletmede kritik bir rol oynamakta ve elektrik üretimi için temiz ve sürdürülebilir bir alternatif sunmaktadır. Rüzgârdan kinetik enerji elde etme ve bunu alternatörler vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştürme yeteneği, son yıllardaki teknolojik gelişmeler, politika desteği ve düşen maliyetler ile birlikte önemli ölçüde gelişmiştir.

Küresel Rüzgâr Enerjisi Komitesinin (GWEC) hazırlamış olduğu Küresel Rüzgâr Raporu 2023'e göre 2022 yılı sonunda dünya çapında kurulu rüzgâr kapasitesi 945.5 GW'ı aşmış bulunmakta ve bu kapasitenin 2025 yılına kadar 1200 GW'a ulaşması beklenmektedir (GWEC, 2024). Günümüzde rüzgâr enerjisi, küresel elektrik üretiminin %7'sinden fazlasını karşılamakta olup, ülkelerin karbonsuzlaşma hedefleri doğrultusunda bu oranın önümüzdeki yıllarda daha da artması beklenmektedir. Özellikle Amerika Birleşik Devletleri, Çin, Almanya ve Birleşik Krallık gibi ülkelerde, hem karasal hem de açık deniz rüzgâr çiftliklerinin kurulumu önemli ölçüde artmış, bu da yenilenebilir enerji kapasitesinin hızla genişlemesine katkı sağlamıştır. Teknolojik gelişmeler ve enerji politikalarındaki destekleyici düzenlemeler, rüzgâr enerjisinin daha verimli ve sürdürülebilir bir şekilde büyümesini teşvik etmektedir(International Energy Agency, 2021).

Küresel Rüzgâr Enerjisi Trendleri

Rüzgâr enerjisinin genişlemesi, yeni teknolojiler, elverişli hükümet politikaları ve rüzgâr enerjisinin artan ekonomik rekabetçiliği gibi birkaç faktör tarafından desteklenmektedir. Son yıllarda, rüzgâr enerjisi maliyetleri, türbin tasarımı ve üretimindeki gelişmeler doğrultusunda azalmaktadır. Rüzgâr enerjisi, birçok bölgede geleneksel fosil yakıt kaynaklı enerji santralleri ile rekabet edebilir bir hale gelmiştir.

Karasal rüzgâr enerjisi, özellikle Kuzey Amerika, Avrupa ve Asya gibi bölgelerde önemli bir büyüme göstermiştir. Karasal rüzgâr enerjisi maliyetleri son on yılda %50'den fazla düşmüştür (IRENA, 2019). Açık deniz rüzgâr enerjisi, özellikle yüksek kıyı rüzgâr hızlarına sahip ve sınırlı kara alanı bulunan ülkelerde tercih edilmektedir. Açık deniz rüzgâr enerjisi şu anda toplam yeni küresel rüzgâr kurulumlarının %9'unu oluşturmaktadır. Bu oranın, açık deniz rüzgâr pazarının hızlı bir şekilde büyümeye devam etmesiyle birlikte 2028 yılına kadar %20'ye ulaşması öngörülmektedir. Dünyanın en büyük açık deniz rüzgâr çiftlikleri arasında, Çin 38 GW ile 2023 yılı sonunda en fazla kapasiteye sahip ülke konumundadır. Çin'i Avrupa'nın önde gelen pazarlarından Birleşik Krallık, Almanya ve Hollanda takip etmektedir. Öne çıkan rüzgâr çiftlikleri arasında Birleşik Krallık- Seagreen (1.1 GW) ve Dogger Park (1.2 GW), Hollanda ise Kust Zuid (1.5 GW) projeleri bulunmaktadır. Şekil 1.1'de son 5 yılda yeni kurulan rüzgâr türbinlerinin kapasiteleri sunulmuştur.

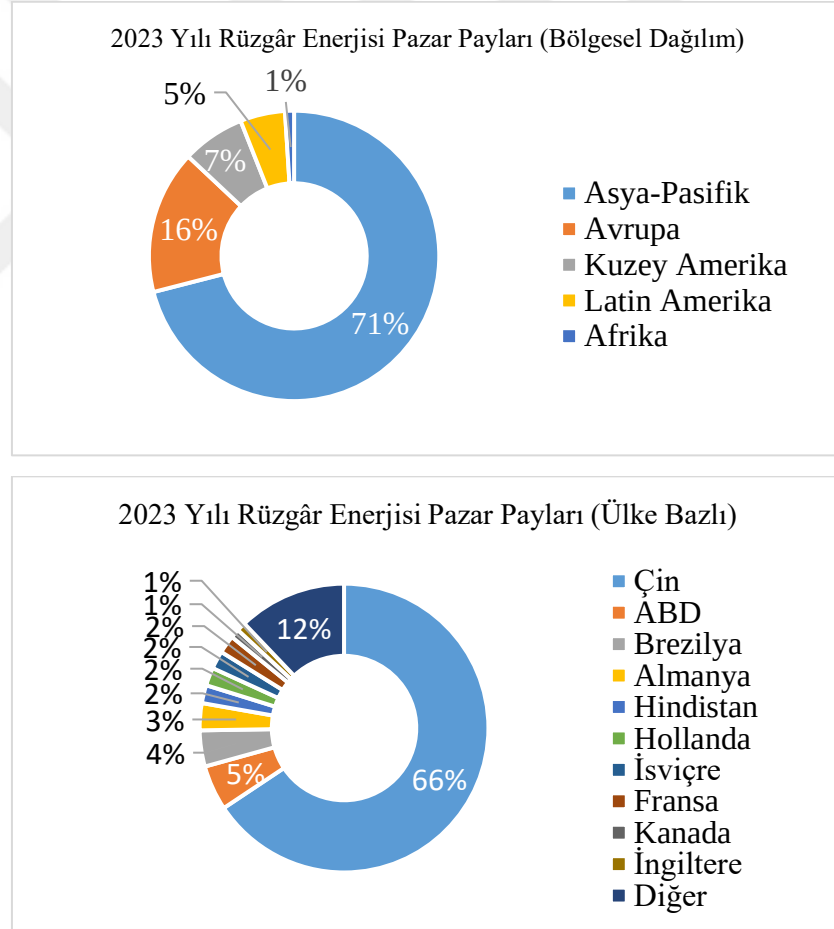


Şekil 1.1. 2019-2023 yılları arasında kurulan rüzgâr enerji santralleri kapasiteleri

Açık deniz rüzgâr enerjisi, özellikle yüksek kıyı rüzgârlarına sahip ve kara alanı sınırlı olan ülkelerde tercih edilmektedir. Uluslararası Enerji Ajansının

Raporuna göre, 2022 yılı sonu itibari ile açık deniz rüzgâr santralleri kapasitesi, toplam küresel rüzgâr kapasitesinin %12'sini oluşturduğunu belirtmiştir. Özellikle Avrupa ve Asya bölgesinde hızlı bir büyüme beklenmektedir (IEA, 2023). Açık deniz rüzgâr türbinleri, genellikle karasal rüzgâr türbinlerine göre daha büyük ve daha verimlidir. Bu da denizlerdeki güçlü ve düzenli rüzgâr kaynaklarının daha etkili bir şekilde kullanılmasına olanak sağlamaktadır.

Kurulu pazarlara ek olarak, rüzgâr enerjisi özellikle Latin Amerika, Afrika ve Güneydoğu Asya'daki gelişmekte olan ekonomilerde ivme kazanmaktadır. Brezilya, Hindistan ve Güney Afrika gibi ülkeler, enerji portföylerini çeşitlendirme ve ithal yakıtlara bağımlılığı azaltma stratejilerinin bir parçası olarak rüzgâr enerjisine giderek daha fazla yatırım yapmaktadır. Şekil 1.2'de 2023 yılında bölgelere göre kurulan yeni kapasite ve en büyük pazar payları sunulmuştur.



Şekil 1.2. 2023 Yılında Bölgelere Göre Kurulan Yeni Rüzgâr Enerjisi Kapasitesi ve Pazar Payları (GWEC, 2024)

Küresel ölçekte yenilenebilir enerji altyapısının büyük ölçüde Asya-Pasifik bölgesinde ve özellikle Çin'de yoğunlaştığı görülmektedir. Bu bölgenin hızlı

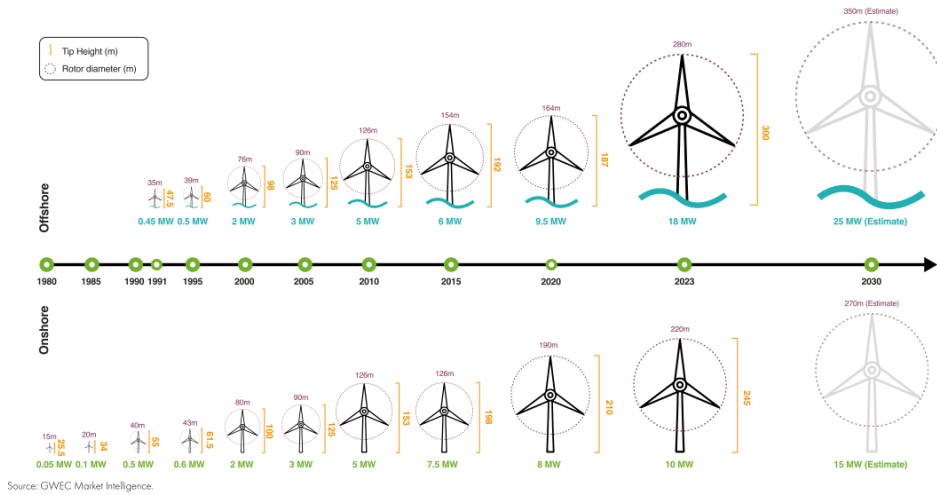
ekonomik büyüme ve enerji talebi artışına yanıt olarak yenilenebilir enerjiye yoğun yatırım yaptığını göstermektedir. Diğer bölgeler daha küçük paylara sahip olmak ile birlikte yenilenebilir enerjiye geçişin küresel olarak ele alındığı görülmektedir.

Rüzgâr Türbini Tasarımındaki Teknolojik Gelişmeler

Rüzgâr türbini teknolojilerindeki hızlı ilerleme, küresel ölçekte rüzgâr enerjisinin kullanılmasında anahtar bir rol oynamaktadır. Türbin tasarımı, malzeme bilimi ve kontrol sistemlerindeki yenilikler sayesinde verimlilik, güvenilirlik ve maliyet etkinliği açısından önemli gelişmeler meydana gelmiştir. Bu gelişmeler, rüzgâr enerjisinin fosil yakıtlar ile rekabet edebilmesini sağlamaktadır. Aşağıda rüzgâr türbinleri tasarımlarındaki teknolojik gelişmeler sunulmuştur.

Daha büyük türbin ve kanatlar

Rüzgâr türbinleri teknolojisinde en belirgin gelişmelerden biri, türbin boyutlarının artmasıdır. Daha büyük rüzgâr türbinlerinin tercih edilmesi, özellikle alan kısıtlamasının olmadığı açık deniz rüzgâr çiftliklerinde, daha az kurulum ile daha fazla enerji dönüşümü sağlanmasının önünü açmaktadır. 2023 yılı itibarı ile karasal rüzgâr türbinleri için ortalama rotor çapı 220 metreye ulaşmış ve türbin başına kapasite 10 MW seviyesine çıkmıştır. Açık deniz türbinleri ise 280 metre rotor çapı ve 18 MW'ı aşan kapasiteye sahiptir. Fotoğraf 1.1'de 1980-2030 yılları arasında karasal ve açık deniz rüzgâr türbinlerinin boyutlarındaki eğilimler sunulmuştur.



Fotoğraf 1.1 1980-2030 yılları arasında karasal ve açık deniz rüzgâr türbinlerinin boyutlarındaki eğilimler (GWEC, 2024)

Küresel rüzgâr enerjisindeki yönelimler doğrultusunda, 2030 yılı itibarı ile, açık deniz rüzgâr türbini kapasitelerinin 25 MW seviyelerine; karasal rüzgâr

türbinlerinin ise 15 MW seviyelerinde olması öngörülmektedir. Bu gelişim, sadece daha büyük türbinler inşa etmenin teknik olarak mümkün olduğunu değil, aynı zamanda sektörün küresel enerji ihtiyaçlarını karşılamak için rüzgâr enerjisine verdiği önemi de göstermektedir.

Değişken Hızlı Türbinler

Modern rüzgâr türbinleri, rüzgâr koşullarına daha iyi uyum sağlamak için değişken hızlarda çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Türbinlerin aerodinamik verimliliğini optimize edilmesi ile uç hız oranının optimal seviyede kalması sağlanmaktadır. Kanat ucu hızının, rüzgâr hızına oranına uç hız oranı denilmektedir. Değişken hızlı çalışma, değişen rüzgâr koşulları altında enerji üretimini maksimize eder ve genel enerji verimini arttırmaktadır.

Değişken hızlarda çalışma, türbinlerde verimliliği arttırmanın yanı sıra türbin bileşenleri üzerindeki mekanik stresi de azaltmaktadır. Rotor hızını rüzgâr hızına uygun hale getirerek, ekipmanlarını kullanım ömrünü uzatır ve bakım maliyetlerini düşürmektedir. Özellikle bakımın zor olduğu açık deniz rüzgâr türbinlerinde bu özellik ciddi bir avantaj oluşturmaktadır.

Gelişmiş Kontrol Sistemleri

Kontrol sistemlerindeki gelişmeler, rüzgâr türbinlerinin performansını ve güvenilirliğini daha da arttırmıştır. Modern türbinler, rüzgâr türbinlerinin enerji dönüşüm kapasitesini en üst seviyeye çıkarmak için gelişmiş kanat eğim açısı (pitch) kontrolü, sapma açısı (yaw) kontrolü ve gerçek zamanlı izleme sistemleri kullanmaktadır.

Kanat Eğim Açısı Kontrolü: Kanat eğim açısı kontrol sistemleri, kanat açısını rüzgâra göre ayarlayarak, rotorun aerodinamik yüklerini düzenlemektedir. Bu, yüksek rüzgâr hızlarında türbininin zarar görmesini engellerken, normal çalışma koşullarında maksimum güç üretimi için kanat açısını optimize etmektedir.

Kanat Eğim Açısı, kanat kort çizgisi ile dönme düzlemi arasındaki açıdır. Bu açının ayarlanması ile türbin, kanatlar tarafından üretilen aerodinamik kaldırma kuvvetini kontrol edebilmektedir. Eğim açısı kontrolünün iki amacı vardır:

1. Orta rüzgâr hızlarında güç çıkışını maksimize etmek
2. Yüksek rüzgâr hızlarında güç çıkışını azaltarak, türbin bileşenlerini olası hasarlardan korumaktır.

Kanat eğim açısı kontrolü pasif ve aktif kontrol olmak üzere sınıflandırılabilir (Y. J. Chen ve ark., 2014). Pasif kontrol yaklaşımında,

kanat tasarımı ile pasif olarak kanat eğim açısı kontrol edilmektedir. Genellikle merkezkaç kuvveti veya aerodinamik unsurlar yardımıyla rüzgâr hızına bağlı olarak kanat açısı değişmektedir. Aktif kontrol yaklaşımında, rüzgâr hızı, rotor devir sayısı ve güç çıktısı gibi parametreler ölçülerek, elektrikli veya hidrolik aktüatörlerle kanat eğim açısı ayarlanmaktadır.

Sapma Açısı Kontrolü: Rotor sapma açısı kontrolü ile rüzgâr türbininin motor gövdesi rüzgâr yönüne döndürülerek, rotorun doğrudan rüzgâr ile hizalanması sağlanmaktadır. Bu sistemler özellikle rüzgâr yönünün sık değiştiği yerlerde yüksek enerji verimliliği için önemli bir faktördür.

Gerçek zamanlı izleme ve önleyici bakım: Modern rüzgâr türbinleri, rüzgâr hızı, titreşim ve bileşen sıcaklıkları gibi parametreleri sürekli izleyen sensörler ile donatılmışlardır. Gerçek zamanlı veriler, potansiyel sorunların belirlenmesine ve çözülmesine imkân sağlayan, önleyici bakım stratejilerine olanak sağlamaktadır. Makine Öğrenmesi ve Yapay Zekâ algoritmaları ile bakım ihtiyaçlarının doğru tahmin edilmesi ve performans optimizasyonu sağlanmaktadır.

Doğrudan Tahrikli Türbinler

Türbin tasarımındaki önemli bir yenilik, dişli kutusuna ihtiyaç duymayan direkt tahrik teknolojisinin kullanılmasıdır. Geleneksel rüzgâr türbinleri, yavaş dönen rotoru yüksek hızlı bir jeneratöre bağlamak için bir dişli kutusu kullanmaktadır. Ancak dişli kutuları karmaşık, maliyetli ve aşınmaya karşı hassas olup, yüksek bakım maliyetleri oluşturmaktadır. Ayrıca dişlilerdeki sürtünmeden kaynaklı kayıplar ve sıcaklık artışı da verimi doğrudan etkilemektedir (Yaramasu ve ark., 2015).

Doğrudan tahrikli türbinler, rotora doğrudan bağlı olup, düşük hızlı ve yüksek torklu jeneratörler kullanılmaktadır. Bu tasarım ile mekanik kayıplar azaltılır ve bakım gereksinimleri düşürülmektedir. Dişli kutusunun olmaması, direkt tahrikli türbinleri daha sessiz bir hale getirmektedir. Özellikle bakımın zor olduğu açık deniz rüzgâr türbinlerinde tercih edilmektedir.

Malzeme ve Yapısal Yenilikler

Malzeme bilimindeki gelişmeler, daha hafif ve dayanıklı türbin kanatlarının imal edilmesine olanak sağlamıştır. Türbin kanatları genellikle karbon fiber ve reçine gibi kompozit malzemelerde yapılmaktadır. Bu malzemeler, sisteme aşırı ağırlık eklemeyen daha uzun kanatların üretilmesini sağlamaktadır. Kanat malzemelerinin yanı sıra, kule tasarımları da gelişmeye devam etmektedir. Daha

yüksek kulelerin imal edilmesi ile birlikte, rüzgâr türbinlerinin daha yüksek irtifalarda daha güçlü ve istikrarlı rüzgârlara erişmesine olanak sağlamaktadır. Modüler kule tasarımları ve beton-çelik gibi hibrit yapılar, hem üretim hem de kurulum maliyetlerini optimize ederek daha büyük türbinlerin inşasını kolaylaştırmaktadır. Ayrıca, bu gelişmeler türbinlerin daha zorlu arazi ve açık deniz koşullarında daha dayanıklı olmasını sağlamakta, böylece rüzgâr enerjisi santrallerinin daha geniş coğrafi alanlarda kurulmasına imkân tanımaktadır.

Yüzer Rüzgâr Türbinleri

Yüzer Rüzgâr Türbinleri, sabit tabanlı sistemlerin uygulanamadığı derin sularda rüzgâr enerjisinin kullanılmasına olanak tanıyan, gelişmekte olan bir teknolojidir (Equinor, 2024). Geleneksel açık deniz rüzgâr türbinleri yaklaşık olarak 50 metre derinliğe kadar olan bölgelerde kullanılabilirken, yüzer rüzgâr türbinleri 100 metre veya daha fazla derinliklere kurulabilmektedir. Bu durum, özellikle Amerika Birleşik Devletleri'nin batı kıyıları, Japonya ve Avrupa'nın bazı bölgeleri gibi derin sulara sahip kıyılar boyunca büyük potansiyele sahip rüzgâr kaynaklarının kullanılmasının önünü açmaktadır. Bu yüzer yapılar, deniz tabanına bağlanan halatlarla sabitlenerek, derin sularda rüzgâr türbinlerinin sabit kalması sağlanmaktadır. İlk yüzer rüzgâr türbini 2007 yılında Blue H Technologies tarafından İtalya'nın Apulia şehrine kıyıdan 21.3 km uzaklığa kurulmuştur (Fotoğraf 1.2). Prototip 80 kW kapasitesine sahip olup, 2008 yılında enerji üretmeye başlamıştır.



Fotoğraf 1.2. İtalya Apulia şehrinde kurulan ilk açık deniz yüzer rüzgâr türbini
(Institute, 2008)

Yüzer rüzgâr türbinleri teknolojisi henüz gelişme aşamasında olsa da daha önce erişilemeyen bölgelerde açık deniz rüzgâr kapasitesini geliştirme açısından önemli bir potansiyele sahiptir.

Dijitalleşme ve Yapay Zekâ Entegrasyonu

Yapay Zekâ ve Makine Öğrenmesi algoritmaları, rüzgâr türbinlerini geliştirmek için büyük miktardaki gerçek zamanlı veriyi analiz etmek üzere geliştirilmektedir. Bu algoritmalar, türbinlerin, mevcut rüzgâr koşullarına göre ayarlarını dinamik bir şekilde optimize etmeye olanak sağlamaktadır. Kanat rotor açılarının ve sapma pozisyonunun yapay zeka ile optimize edilmesi ile performans artışı sağlanması ve böylelikle enerji üretiminin maksimize edilmesi sağlanabilmektedir (S. Chen ve ark., 2024).

Yapay zekânın rüzgâr enerjisindeki en umut verici uygulamalarından biri öngörücü bakımdır. Yapay zekâ sistemleri, sensörler aracılığıyla türbin bileşenlerini sürekli olarak izleyerek performanslarını analiz eder ve olası arızaları önceden tahmin edebilir. Böylece, bakım işlemleri arızalar meydana gelmeden planlanarak gerçekleştirilebilir. Bu sistemler yalnızca kesinti sürelerini azaltmakla kalmaz, aynı zamanda türbin ömrünü uzatarak işletme maliyetlerini düşürür ve enerji üretim verimliliğini artırır (Sakarvadia ve ark., 2024).

Yapay zekâ, yalnızca tek bir türbinin performansını analiz etmekle kalmaz, aynı zamanda rüzgâr çiftliklerindeki çoklu türbin performanslarını eş zamanlı

olarak değerlendirerek genel operasyonları optimize etmek için de kullanılmaktadır. Bu teknoloji, rüzgâr türbinleri arasındaki iz etkilerini ve etkileşimleri modelleyerek, enerji üretimini ve verimliliği maksimize etmek için en uygun türbin yerleşimini ve operasyonel ayarları belirleyebilir. Böylece, rüzgâr çiftliklerinin genel performansı artırılarak daha istikrarlı ve verimli bir enerji üretim süreci sağlanmaktadır (Al-Othman ve ark., 2022).

İleri veri analizi ve yapay zekâ ile rüzgâr tahminlerinin doğruluğu artırılarak, türbinlerinin enerji üretimini daha iyi tahmin etmesi sağlanabilmektedir. Tarihsel hava durumu verilerini, gerçek zamanlı çevresel koşulları ve farklı yapay zeka destekli modellerin kullanılması ile rüzgâr çiftliklerinin enerji çıktısının daha kesin bir şekilde tahmin edilebilmesi sağlanabilmektedir (Jiang ve ark., 2021).

Hibrit Yenilenebilir Enerji Sistemleri

Rüzgâr enerjisinin diğer yenilenebilir kaynaklarla entegrasyonu, rüzgâr enerjisindeki değişkenlik sorunlarını çözmek için önemli bir strateji olarak gözükmektedir. Hibrit yenilenebilir enerji sistemleri, iki veya daha fazla enerji kaynağını birleştirerek, bir enerji kaynağındaki değişkenliği diğeri ile telafi ederek daha tutarlı ve güvenilir bir enerji arzı sağlanmasıdır (Olatomiwa ve ark., 2016).

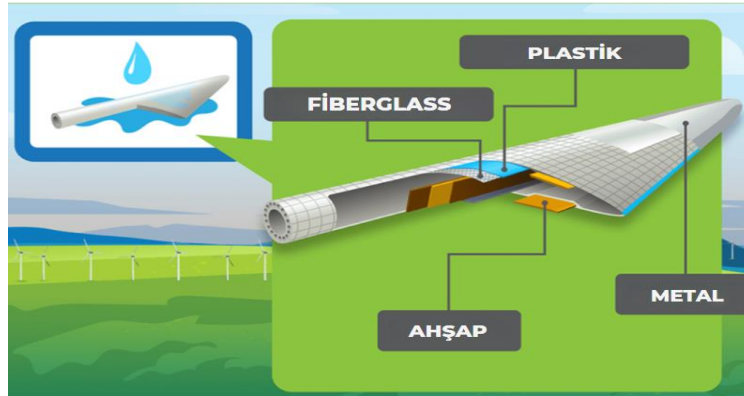
Güneş-rüzgâr hibrit sistemleri, en umut verici sistemleri arasında yer almaktadır. Güneş enerjisi özellikle gündüz saatlerinde zirve yaparken, rüzgâr enerjisi genellikle gece en yüksek üretime ulaşmaktadır. Bu durum tamamlayıcı bir enerji üretim profili oluşturmaktadır. Her iki sistemin entegrasyonu, rüzgâr-güneş hibrit sistemlerinin daha dengeli ve istikrarlı bir enerji çıktısı sağlamasını olanak vermektedir. Bu durum, enerji depolama ihtiyacını azaltmakta ve şebeke stabilitesini arttırmaktadır (Khare ve ark., 2016).

Enerji depolama teknolojileri, rüzgâr türbinleri tarafından üretilen fazla enerjinin depolanmasını ve talep yüksek olduğunda veya düşük rüzgâr hızlarında depolanan enerjinin şebekeye verilmesi ile sağlanmaktadır (Bin Abu Sofian ve ark., 2024). Lityum-iyon piller gibi Batarya Enerji Depolama Sistemleri (BESS) (da Silva Lima ve ark., 2021), rüzgâr enerjisinin güvenilirliğini arttırmak için rüzgâr türbinleri ile gün geçtikçe daha fazla entegre edilmektedir. Pillerin yanı sıra, pompalı hidro depolama (Rehman ve ark., 2015), sıkıştırılmış hava enerjisi depolama (Venkataramani ve ark., 2016) ve hidrojen üretimi ve depolanması (Luo ve ark., 2022) gibi diğer depolama çözümleri de araştırılmaktadır.

Geri Dönüştürülebilir ve Sürdürülebilir Malzemeler

Rüzgâr endüstrisi büyüdükçe, özellikle malzeme sürdürülebilirliği açısından çevresel etkilerini en aza indirme ihtiyacı artmaktadır. Türbin bileşenlerinin büyük çoğunluğu, çelik ve geri dönüştürülmesi kolay diğer malzemelerden yapılmaktadır. Fakat, tipik olarak fiberglas ve karbon fiberden yapılan rüzgâr türbini kanatlarının geri dönüştürülmesi çok daha zordur. Bu durum, kullanım ömürleri tamamlanan türbin kanatlarının imhasını ile ilgili sorunlar ortaya çıkarmıştır. Bu kanatlar çoğunlukla depolama alanlarına gömülmektedir. Bu sorunu çözebilmek adına geri dönüştürülebilir kanatlar ve çevre dostu malzemelerin geliştirilmesine yönelik çalışmalar yapılmaktadır.

Araştırmacılar ve üreticiler, rüzgâr türbini kanatlarının kullanım ömrünün sonunda parçalanıp, yeniden kullanılabilmesini sağlayan geri dönüştürülebilir kompozit malzemeler geliştirmektedir. Siemens Gamesa tarafından geliştirilen RecyclableBlade projesi ile reçineden yapılmış, tamamen geri dönüştürülebilir bir rüzgâr türbini kanadı üretebilmişlerdir (Siemens Gamesa, 2024). Üretilen kanatlar geri dönüştürüldüğünde, otomotiv sektöründe, uçak kabinlerinde veya düz ekranlarda kullanılabilir. Kanat kesiti ve kullanılan malzemeler Fotoğraf 1.3’de sunulmuştur.

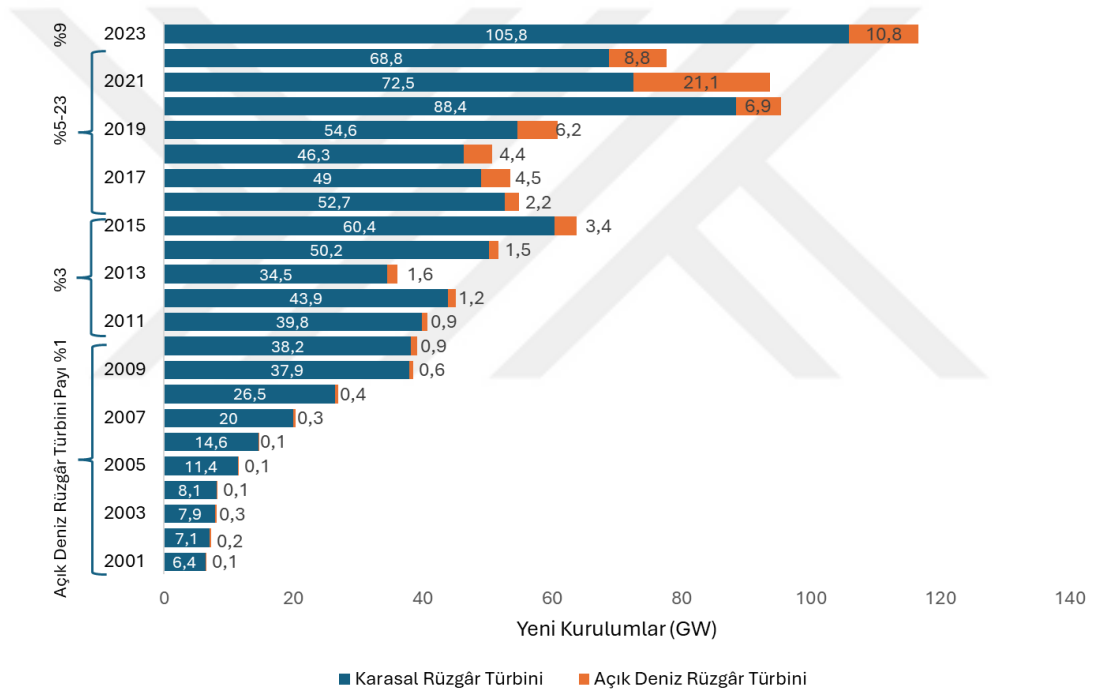


Fotoğraf 1.3. Siemens Gamesa- Geri dönüştürülebilir kanat kesiti (Siemens Gamesa, 2024)

Son zamanlarda bitki lifleri ve biyo-reçineler gibi yenilenebilir kaynaklardan elde edilen biyo-esaslı kompozit malzemeleri kullanılması bir diğer umut verici yön olarak ortaya çıkmaktadır. Bu malzemeler sadece geri dönüştürülebilir olmakla kalmaz, aynı zamanda kanat üretimi ile ilişkili karbon

ayak izini de azaltmaktadır. Biyo-esaslı kompozit malzemeler, geleneksel malzemelerden daha hafif ve dayanıklıdır (Corona ve ark., 2015).

Yeni gelişmeler ile birlikte rüzgâr enerjisi kurulumlarındaki tarihsel büyüme hem karasal hem de açık deniz kapasitelerinde istikrarlı artışlarla birlikte göstermektedir (Şekil 1.3). Teknolojiler ilerledikçe, bu eğilimlerin devam etmesi ve rüzgâr enerjisinin küresel enerji dönüşümünün önemli bir bileşeni olarak rolünü güçlendirmesi beklenmektedir. Şekil 1.3, 2001'den 2023'e kadar yeni enerji kurulumlarının tarihsel gelişimini göstermektedir. Bu artış, çoğunlukla karasal kurulumlara sağlanmış olup, son yıllarda açık deniz kurulumlarının giderek daha fazla önem kazandığı gözlemlenmektedir. Açık deniz kurulumları başlangıçta sınırlı katkı sunarken 2023 yılı itibari ile %9'a çıkmıştır.



Şekil 1.3. Rüzgâr Türbini Kurulumlarının yıllara göre değişimi (GWEC, 2024)

1.4 Çift Rotorlu Rüzgâr Türbinleri

Rüzgâr enerjisinin gelişmeye devam ettikçe, enerji üretimini maksimize etmek ve maliyetleri düşürmek için daha verimli türbin tasarımlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu doğrultuda ortaya çıkan yeni bir türbin tasarımı konsepti, Çift Rotorlu Rüzgâr Türbinleri (CRWT)'dir (Usui ve ark., 2013). Bu teknoloji, enerji verimliliğini arttırmayı hedefleyerek, aynı eksene monte edilmiş veya birbirine yakın konumlandırılmış, zıt yönlerde ya da aynı yönde dönen iki rotordan oluşmaktadır. Rotorların zıt yönlerde dönmesi, geleneksel tek rotorlu rüzgâr

türbinlerine kıyasla iz etkilerinden kaynaklanan enerji kayıplarını azaltabilecek, tork dengesini sağlayabilecek ve toplam güç çıktısını arttıracaktır. Bu teknoloji, rüzgâr enerjisi verimliliğinde önemli bir ilerleme sağlama kapasitesine sahiptir.

Zıt devinimli çift rotorlu rüzgâr türbinlerinin temel konsepti, zıt yönlerde dönen iki rotor arasındaki etkileşimi kullanarak rüzgârdan maksimum enerji eldesini sağlamaktır (Fotoğraf 1.4). Çift rotorlu rüzgâr türbinlerinde ikinci rotor ya ilk rotorun alt akış bölgesinde ya da aynı ekseninde yer alır ve zıt veya aynı yönde döner. Bu ikinci rotor birkaç avantaj sağlamaktadır:

İz İyileştirmesi: İkinci rotor, ilk rotorun izinde çalışarak, iz türbülansını azaltır ve geleneksel rüzgâr türbinlerinde kaybolan enerji geri kazanılır. Zıt yönlerde dönen iki rotorun oluşturduğu iz etkileşimi, akışı stabilize eder ve türbülansı azaltarak enerji verimliliğini artırır (Amoretti ve ark., 2023).

Tork Dengesi: Zıt dönüş, rotorlar tarafından üretilen torku dengeleyerek sistem üzerindeki mekanik stresi azaltmaya yardımcı olur. Bu sayede, çift rotorlu rüzgâr türbinleri daha dayanıklı hale gelir ve mekanik güvenilirlikleri artar. Aynı zamanda, bu özellik, büyük ölçekli rüzgâr çiftliklerine entegrasyonunu kolaylaştırarak verimli ve sürdürülebilir enerji üretimi için daha uygun bir seçenek haline gelmesini sağlamaktadır (Ullah ve ark., 2023).

Artan Enerji Dönüşüm Kapasitesi: İki rotorun etkileşimi sayesinde rüzgâr enerjisi daha etkili bir şekilde yakalanır. Bu durum çift rotorlu sistemleri tek rotorlu sistemlere kıyasla daha fazla güç üretme potansiyeline sahip olmasını sağlamaktadır. Enerji eldesindeki bu artış, özellikle açık deniz rüzgâr çiftliklerinde önemlidir. Enerji verimliliğini maksimum düzeye çıkartmak, rüzgâr enerjisinin ekonomik verimliliğini arttırmada kritik öneme sahiptir (K. Wang ve ark., 2022).



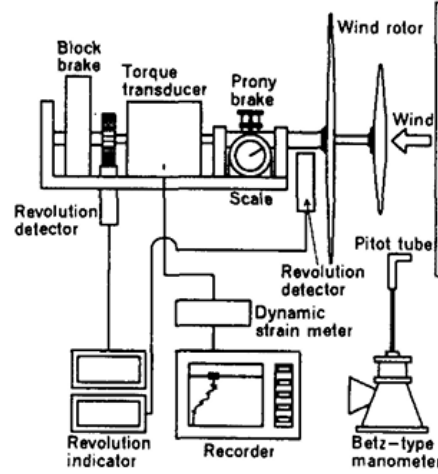
Fotoğraf 1.4. Çift rotorlu rüzgâr türbini (Z. Wang ve ark., 2018)

Bu teknolojinin sunduğu potansiyel avantajlar, özellikle yoğun rüzgâr çiftliklerinde ve açık deniz projelerinde rüzgâr enerjisinin daha verimli ve sürdürülebilir bir şekilde kullanılmasına olanak sağlamaktadır.

1.4.1 Çift rotorlu rüzgâr türbinlerinin tarihi gelişimi ve ilk çalışmalar

Çift rotorlu kavramı ilk olarak Newman tarafında 1986 yılında ortaya koyulmuştur (Newman, 1986). Rüzgâr türbinlerinin verimliliklerinin hesaplamalarında kullanılan Aktüatör Disk teorisinde disk adedinin artırılması ile güç katsayısının arttığı teorik olarak hesaplanmıştır. Hesaplamalara disk eklenmesi ile birlikte güç katsayılarının tek rotorlu olduğu duruma göre %13 daha fazla olduğu görülmüştür.

1996 yılında Ushiyama ve ark. tarafından eş eksenli ve zıt devinimli çift rotorlar için bir deney düzeneği oluşturulmuştur (Ushiyama ve ark., 1996). Yapılan çalışmada, ikinci bir rotorun eklenmesi ile özellikle düşük tork üreten türbinlerin performanslarının iyileştiği görülmüştür (Fotoğraf 1.5). Bu sonuçlar, düşük torklu sistemlerde performansı arttırmak için iki aşamalı rüzgâr türbinlerinin potansiyelini ortaya koymuştur.

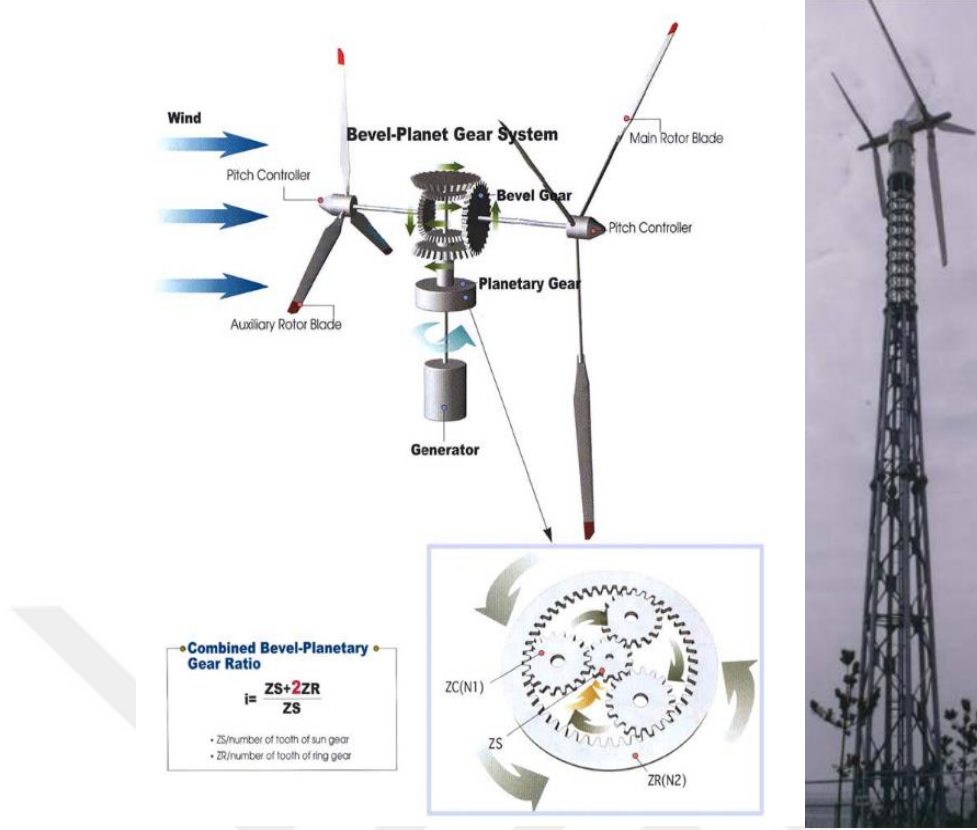


Fotoğraf 1.5. Ushiyama ve ark. tarafından geliştirilen; eş eksenli, zıt devinimli, iki aşamalı rüzgâr türbini (Ushiyama ve ark., 1996)

2000 yılında, Kanemoto ve ark. (2000) çift rotorlu sistemleri gelgit akıntılarında kullanılması üzerine bir çalışma yürütmüşlerdir. Zıt devinimli bir tasarım sayesinde elde edilen güç çıktılarında artış meydana gelmiş ve torkların dengelenmesi ile yüzer şamandıralardaki gelgit akıntı enerjisinin üretimi için kullanıma uygun hale gelmesi sağlanmıştır.

2002 yılında APPA teknoloji tarafından ABD Kaliforniya’da bir prototip imalatı yapılmış ve bazı saha testleri uygulanmıştır. Prototip 6 kW kapasiteli ve zıt devinime sahip rüzgâr türbininden oluşmaktadır. Tek rotorlu rüzgâr türbinleri ile karşılaştırıldığında çift rotorlu rüzgâr türbinlerinden %30 oranında daha fazla enerji elde edilebildiği sonucuna ulaşılmıştır (Appa, 2002).

2005 yılında, Jung ve ark. (2005) 30 kW kapasiteli çift rotorlu bir rüzgâr türbini tasarımı ve imalatını gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmada önde küçük kanatlar, arkada büyük kanatlar kullanılmış ve arka kanatların ön kanat bitiş hizasından başladığı görülmüştür. Planet dişliler yardımıyla ön ve arka rotordan elde edilen torklar tek bir jeneratöre bağlanmıştır (Fotoğraf 1.6). İkinci rotor ana rotorun yarı çapında tercih edilmiştir. Ana rotordaki ölü bölgeyi telafi ederek ek tork sağlamaktadır. Geleneksel sistemler ile karşılaştırıldığında güç çıktısını %21 oranında arttırdığı görülmüştür. Sistem 10.6 m/s hızında 0.5 güç katsayısına ulaşmıştır.



Fotoğraf 1.6. 30 kW kapasiteli çift rotorlu zıt devinimli rüzgâr türbini (Jung ve ark., 2005)

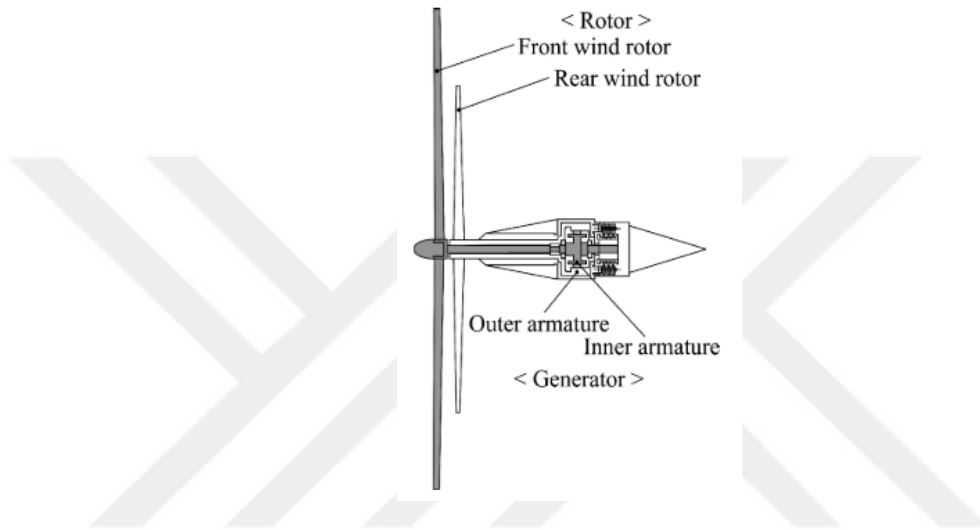
Daha sonra bu alanda yapılan çalışmalar sayısal, teorik ve deneysel olarak artış göstermiştir.

1.4.2 Çift rotorlu rüzgâr türbinleri ile ilgili çalışmalar

Çift rotorlu türbinlerle ilgili çalışmalar farklı kategorilerde ele alınarak aşağıda sunulmuştur. Araştırmacılar, çift rotorlu sistemleri çeşitli açılardan detaylı olarak incelemiştir. Bazı araştırmalarda, çift rotorlu türbinlerin gelgit akıntılarındaki performansları hem sayısal hem de deneysel analizlerle değerlendirilmiştir. Bazı çalışmalarda akış yapıları Parçacık Görüntüleme Velosimetresi (PIV) yöntemiyle analiz edilirken, diğerleri akustik özelliklere odaklanmıştır. Literatürde, ampirik formüller ve teoremler kullanılarak yapılan araştırmaların yanı sıra hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle gerçekleştirilen incelemelere de rastlanmaktadır.

Çift rotorlu rüzgâr türbinleri ile ilgili yapılan deneysel çalışmalar aşağıda sunulmuştur:

Kanemoto ve Galal'ın (2006) tarafından yapılan çalışmada, geleneksel stator kullanılmadan çalışan ardışık rüzgâr rotorları ve çift döner armatürlü bir jeneratör üzerinde deneysel araştırmalar yürütülmüşlerdir (Fotoğraf 1.7). Tasarım, iç ve dış armatürleri tahrik eden büyük bir ön rotor ve daha küçük bir arka rotordan oluşmaktadır. Geleneksel rüzgâr türbinleri ile karşılaştırıldığında, bu sistemin daha yüksek güç çıktısı sağladığı belirlenmiştir.



Fotoğraf 1.7. (Kanemoto & Galal, 2006)'ın çalışmasında kullanılan tasarım

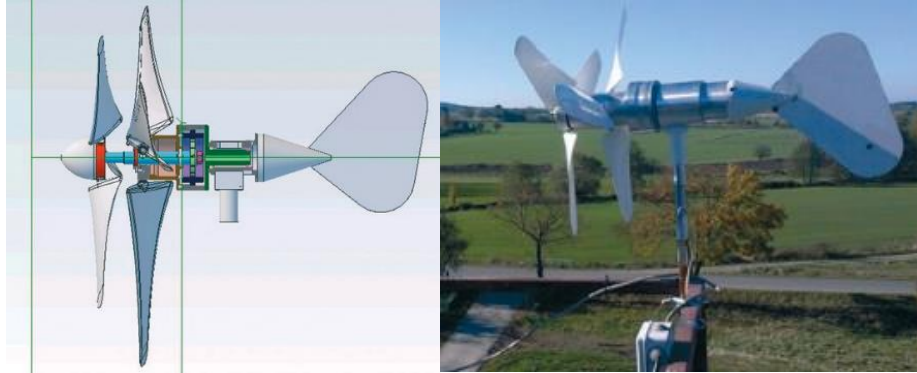
No ve ark. (2009) , çalışmalarında çift rotorlu rüzgâr türbini sistemlerinin optimizasyonu üzerine bir araştırma yürütmüştür. Bu çalışmada, oluşturulan matematiksel modeller aracılığıyla farklı kontrol stratejileri ve sistem performansları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, optimize edilmiş kontrol sistemlerinin çift rotorlu rüzgâr türbinlerinde enerji dönüşüm kapasitesini artırdığını ve operasyonel verimliliği iyileştirdiğini göstermektedir.

Cho ve ark. (2017), yaptıkları çalışmada 15 kW kapasiteli zıt devinimli çift rotorlu rüzgâr türbininin geliştirilmesini ve saha testlerini incelemiştir (Fotoğraf 1.8). Yapılan çalışmada, daha düşük uç hız oranlarında daha yüksek güç katsayılarının elde edildiği belirlenmiştir. Ayrıca, daha düşük uç hız oranlarında çalışılması, gürültü seviyelerinin azalmasını sağlamış ve böylece daha sessiz bir işletim imkânı sunmuştur. Kontrol sistemi, rüzgâr hızına bağlı olarak rotor devir sayısını ve eğim açısını dinamik olarak ayarlayarak, farklı rüzgâr hızlarında sabit güç çıkışı elde edilmesini sağlamıştır.



Fotoğraf 1.8. Cho ve ark. (2017) tarafından çalışmalarında kullanılan çift rotorlu rüzgâr türbini tasarımı

Romanski ve ark. (2016), yaptıkları çalışmada mini bir çift rotorlu rüzgâr türbinini deneysel olarak incelemiştir (Fotoğraf 1.9). Çift rotorlu rüzgâr türbini hem laboratuvar koşullarında hem de sahada test edilmiştir. Yapılan çalışmada kanat açılarının optimize edilmesi ile güç çıktısında %33 oranında artış olduğu görülmüştür.



Fotoğraf 1.9 Romanski ve ark. (2016) çalışmasında kullanılan çift rotorlu rüzgâr türbini tasarımı

Lipian ve ark. (2019), yaptıkları çalışmada difüzör destekli rüzgâr türbini, zıt devinimli çift rotorlu rüzgâr türbini ve zıt devinimli kanallı rüzgâr türbinini karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Yapılan çalışmada çift rotorlu rüzgâr türbininin kanalsız sistemlere göre güç artışında %11-13; kanallı sistemlerde ise %4-5 arasında artış gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca yapılan çalışmada çift rotorlu

sistemlerin, daha dengeli bir gerilim dağılımı sağladığı, performansı arttırdığı ancak kanal ile birleştirildiğinde daha az etki ettiği sonucuna ulaşılmıştır.

Zhao ve ark. (2020), yaptıkları çalışmada çift rotorlu rüzgâr türbinini, rüzgâr tüneli kullanarak deneysel olarak test etmiştir. Tek rotorlu rüzgâr türbinlerinde güç katsayısı 0.373; çift rotorlu rüzgâr türbininde ise 0.426 olarak elde edilmiştir. Başlangıçta daha yüksek bir rüzgâr hızına ihtiyaç duyulmasına rağmen, çift rotorlu rüzgâr türbinlerinin güç katsayılarında %5,3 ile %28,9 arasında bir artış sağlandığı tespit edilmiştir.

Cai ve ark. (2024), yaptıkları çalışmada çift rotorlu rüzgâr türbinlerinde ön ve arka rotorları birbirinden bağımsız kontrol ederek enerji üretimini optimize etmeye yönelik bir çalışma yürütmüştür (Fotoğraf 1.10). Çapraz bağlantı kontrol stratejisi kullanarak rüzgâr türbininin veriminde %1.8 oranında artış sağlanmıştır. Bu artış, rüzgâr türbinlerinin kısmi yük altında çalıştığı, düşük ve orta rüzgâr hızlarında elde edilmiştir.

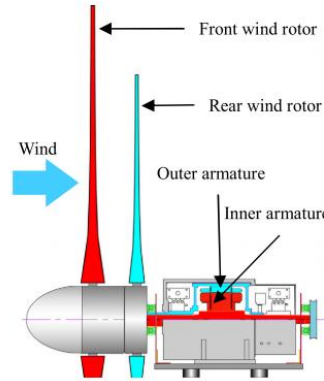


Fotoğraf 1.10. (Cai ve ark., 2024) çalışmasında kullanılan 3kW kapasitesindeki rüzgâr türbini

Mitulet ve ark. (2015), yaptıkları çalışmada zıt devinimli çift rotorlu rüzgâr türbini üzerinde deneysel bir çalışma yürütmüştür. Çift rotorlu rüzgâr türbinlerinde tek rotorluya kıyasla %40 oranında daha fazla güç çıktısı elde edildiği görülmüştür. Ayrıca, ikinci rotorun birinci rotordan 1 metre mesafede yerleştirilmesinin, akışın maksimum kinetik enerji dönüşümüne imkân sağladığı sonucuna ulaşmışlardır.

Kubo ve Kanemoto (2008), yaptıkları çalışmada çift rotorlu rüzgâr türbinlerini deneysel olarak incelemiştir (Fotoğraf 1.11). Çift rotorlu rüzgâr türbinlerinin verimliliklerinin tek rotorlulara kıyasla %20 oranında daha yüksek

olduğu görülmüştür. Ayrıca ön ve arka rotorlar arasındaki ideal çap oranının 0.84 olduğu ve rotorlar arasındaki mesafenin mümkün olduğunca azaltılması gerektiği belirtilmiştir.



Fotoğraf 1.11 (Kubo ve Kanemoto, 2008) çalışmasında kullanılan çift rotorlu tasarım

Kutt ve ark. (2020), çift rotorlu rüzgâr türbinleri üzerinde yaptıkları deneysel çalışmada, çift rotorlu rüzgâr türbinlerinin geleneksel sistemlere göre %13 daha fazla güç üretebileceğini göstermiştir.

Habash ve ark. (2011), yaptıkları çalışmada çift rotorlu sistemleri rüzgâr tüneline test etmiştir. Geleneksel tek rotorlu sistemler ile karşılaştırıldığında enerji verimliliğinde %60 oranında artış meydana geldiği görülmüştür. Yapılan çalışmada verimlilik artışının, ikinci rotorun, ilk rotorun ardında kalan türbülans enerjisini yakalayabilme yeteneği nedeniyle olduğu ifade edilmiştir.

Çift rotorlu rüzgâr türbinlerini Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) kullanarak inceleyen çalışmalar aşağıda sunulmuştur:

Moghadassian ve ark. (2016), yaptıkları çalışmada çift rotorlu rüzgâr türbinlerinin aerodinamik performansını ve yük dağılımlarını sayısal olarak incelemiştir. Çalışmada Büyük Girdap Simülasyonları (LES) kullanarak uniform ve atmosferik sınır tabaka giriş akışları altındaki performansları değerlendirilmiştir. Çift rotorlu rüzgâr türbinlerinin performanslarının tek rotorlu rüzgâr türbinlerine kıyasla %5-6 oranında daha iyi olduğu görülmüştür. Çalışmalar, çift rotorlu rüzgâr türbinlerinin iz etkisini ve kanat köklerinde meydana gelen enerji kayıplarını azalttığını ortaya koymuştur.

Rosenberg ve ark. (2014), yapmış oldukları çalışmada çift rotorlu rüzgâr türbinlerini sayısal olarak Büyük Girdap Simülasyonları (LES) kullanarak

incelemişlerdir. Çift rotorlu konseptinin, kanat kök bölgesindeki verimliliği arttırdığı ve bu sayede Betz sınırını aşan bir güç katsayısı elde edildiği görülmüştür. Tek rotorlu ile karşılaştırıldığında çift rotorlu rüzgâr türbinlerinin güç katsayılarının %7 daha fazla olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Vasel-Be-Hagh ve Archer (2017), yaptıkları çalışmada rüzgâr çiftliklerinde çift rotorlu rüzgâr türbinlerinin kullanımını sayısal olarak incelemiştir. Rüzgâr çiftliklerinde çift rotorlu zıt devinimli rüzgâr türbinlerinin kullanılması ile güç çıktılarında %22.6 oranında artış olduğu görülmüştür. Rüzgâr çiftliklerinde verimliliği arttırmak için ön ve orta sıralarda çift rotorlu rüzgâr türbinlerinin kullanılması önerilmiştir.

Szlivka ve ark. (2023), yaptıkları çalışmada çift rotorlu sistemlerin analizlerinde kullanılan farklı sayısal analiz yöntemlerini karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Yapılan analizlerde çift rotorlu rüzgâr türbinlerinin geleneksel tek rotorlu sistemlere göre %5-28.9 oranında güç katsayılarında artış meydana geldiği görülmüştür. En doğru sonuçların Kayar Ağ (Sliding Mesh) yöntemi ile elde edilmesine rağmen yüksek maliyet ve uzun süren analizler nedeniyle Donmuş Rotor (Frozen Rotor) veya Kayma Düzlemi (Mixing Plane) yöntemlerinden elde edilen sonuçların kabul edilebilir olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Le ve ark. (2023), yaptıkları çalışmada çift rotorlu rüzgâr türbinlerini deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Çift rotorlu türbinlerinin 7 m/s'nin altındaki rüzgâr hızlarında tek rotorlu rüzgâr türbinlerinde göre %20'e varan daha fazla güç üretimi sağlanmıştır. Özellikle tek rotorlu rüzgâr türbinlerinin genellikle çalışmadığı düşük rüzgâr hızlarında dahi enerji üretimi sağladığı görülmüştür.

Hetyei ve Szlivka (2021), çift rotorlu rüzgâr türbinleri üzerine Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) kullanarak yaptıkları çalışmada, çift rotorlu sistemlerin geleneksel sistemlere göre güç çıktılarında %34 oranında artış sağladığını göstermiştir. Eksenel mesafenin optimize edilmesi ile güç katsayısı maksimum seviyeye ulaşmıştır.

K. Wang ve ark. (2022), çift rotorlu rüzgâr türbinleri üzerine Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) kullanarak yaptığı çalışmada, çift rotorlu sistemlerin güç katsayısının tek rotorlu sistemlere kıyasla %22 daha yüksek olduğunu göstermiştir.

Koehuan ve ark. (2017), yaptıkları çalışmada, rotor çapı oranı ve rotorlar arasındaki eksenel mesafe oranı gibi boyutsal olmayan parametrelerin güç katsayısı

üzerindeki etkisini CFD analizleri ile belirlemiştir. En iyi güç katsayısının öndeki ve arkadaki rotorların kanat çaplarının birbirlerine eşit olduğu durumda %52.19 olarak elde edilmiştir. Bu durum geleneksel tek rotorlu sistem ile karşılaştırıldığında %16.49'luk bir artış meydana geldiği görülmüştür.

Abohamzeh ve ark. (2020), yaptıkları çalışmada çift rotorlu rüzgâr türbinlerinin aerodinamik ve aeroakustik performansını incelemiştir. Elde edilen sonuçlar, çift rotorlu rüzgâr türbinlerinde ön rotorun devir sayısının artışı ile daha yüksek gürültünün meydana geldiği görülmüştür. En iyi performansın ise Uç Hız Oranının (TSR) 6 ile 12 arasında olduğu durumda meydana gelmiştir. TSR'nin 12'yi aştığı durumlarda performansta azalma meydana gelmiştir.

Çift rotorlu rüzgâr türbinleri ile ilgili Parçacık Görüntüleme Velosimetresi (PIV) kullanılarak yapılan deneysel çalışmalar aşağıda sunulmuştur:

Wei ve ark. (2017)'nin yaptığı çalışmada, zıt yönlü gelgit türbinlerinin iz akış karakteristikleri Parçacık Görüntüleme Velosimetresi (PIV) kullanılarak incelenmiştir. Yapılan çalışmada zıt devinimli sistemlerde daha yüksek güç katsayısı ve daha verimli bir akış altı izi görülmüştür. Yapılan çalışmada kullanılan kanat ve sistem tasarımı Fotoğraf 1.12'da sunulmuştur.



Fotoğraf 1.12. Wei ve ark. (2017)'nin yaptığı çalışmada kullanılan kanat ve sistem tasarımı

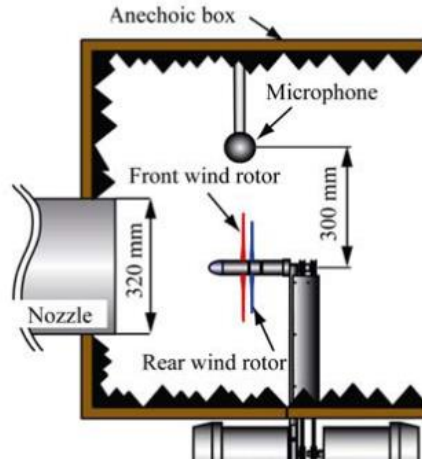
Z. Wang ve ark. (2018), yaptıkları çalışmada çift rotorlu rüzgâr türbinlerinin aerodinamik performansı ve iz özelliklerini Parçacık Görüntüleme Velosimetresi (PIV) kullanarak deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada kanatların aynı yönde ve

zıt yönde döndüğü durumlar tek rotorlu olduğu durum ile karşılaştırılmıştır. Zıt devinimli rüzgâr türbinlerinin tek rotorlu rüzgâr türbinlerine göre %7.2 oranında iyileşme meydana geldiği görülmüştür. Ayrıca çift rotorlu rüzgâr türbinlerinin tek rotorlu rüzgâr türbinlerine göre daha erken denge durumuna geldiği ve iz etkisinin daha az olduğu görülmüştür.

Hollands ve ark. (2020), yaptıkları çalışmada PIV kullanarak çift rotorlu rüzgâr türbinlerinin aerodinamik performansını incelemiştir. Araştırma sonuçları, iki farklı yardımcı rotor konfigürasyonunun uyanış akış özelliklerinde belirgin bir değişiklik yaratmadığını, ancak %50 yardımcı rotor yapılandırmasının bazı iyileştirmeler sağladığını göstermiştir. Bu konfigürasyon, ana rotorun ucu etrafındaki girdapları daha zayıflatmakta ve ana rotorun arkasında, orta bölgedeki ters yönde dönen bir kayma bölgesi oluşturduğu ifade edilmiştir.

Çift rotorlu rüzgâr türbinlerini akustik açıdan inceleyen çalışmalar aşağıda sunulmuştur:

Kubo ve ark. (2010), yaptıkları çalışmada çift rotorlu rüzgâr türbinlerini akustik gürültü açısından incelemiştir (Fotoğraf 1.13). Yapılan çalışmada gürültünün ana kaynağının zıt yönlü rotorların etkileşiminden kaynaklandığı ifade edilmiştir. Akustik gürültünün rotorlar arasındaki eksenel mesafeden önemli bir şekilde etkilendiği görülmüştür. Kanatlar arasındaki mesafenin azalması ile güç çıktısı artarken ses seviyeleri önemli bir şekilde artış göstermiştir. Aynı yönlü dönen sistemlerde zıt devinimli sistemlere göre daha yüksek gürültü seviyeleri gözlenmiştir.



Fotoğraf 1.13 Kubo ve ark. (2010)'un yapmış olduğu çalışmada kullanılan alternatör tasarımı

Liu ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada yatay eksenli çift rotorlu rüzgâr türbinlerinde akustik gürültü üzerine odaklanmıştır. Yapılan çalışmada ana gürültü kaynağının ön ve arka pervaneler arasındaki akış etkileşiminden kaynaklandığı ve gürültü seviyesindeki en büyük etkiyi ön kanat tarafından olduğu görülmüştür. Ayrıca ön kanatların arka kanatlara göre daha küçük seçilmesinin gürültü üzerinde olumlu etki ettiği görülmüştür.

Çift rotorlu rüzgâr türbinlerini literatürde yer alan teoremler ve ampirik formüller kullanarak inceleyen çalışmalar aşağıda sunulmuştur:

S. Lee ve ark. (2012), yaptıkları çalışmada zıt devinimli rüzgâr türbinlerinin aerodinamik performansını etkileyen tasarım değişikliklerini, Modifiye Edilmiş Pala Elemanı Momentum Teorisi (BEMT) kullanarak incelemiştir. Çalışmada maksimum gücün, sadece ön rotorun en fazla güç yakaladığı durumda değil, her iki rotorun güç yükünü paylaştığı durumda elde edildiği görülmüştür. Arka rotorun devir sayısının daha düşük olması ile daha iyi bir performans elde edilmiştir.

Ertürk ve ark. (2018), yaptıkları çalışmada çift rotorlu zıt devinimli rüzgâr türbinini modelleyip analiz etmiştir. Yapılan çalışmada düşük hızlarda bile, çift rotorlu sistemin daha yüksek güç çıktısı elde ettiği görülmüştür. MATLAB/Simulink ile kullanılarak yapılan çalışmada, çift rotorlu zıt devinimli rüzgâr türbinlerinin geleneksel tek rotorlu rüzgâr türbinlerine kıyasla daha yüksek verim sağlayabileceği doğrulanmıştır.

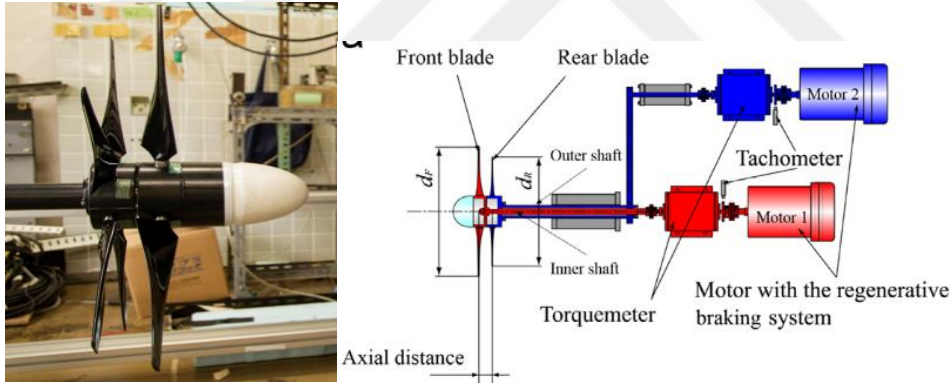
S. Lee ve ark. (2013), yaptıkları çalışmada çift rotorlu rüzgâr türbinlerinin verimliliğini artırmaya yönelik bir analiz sunmuştur. Analizlerde Serbest Akış İzli

Girdap Kafes yöntemi kullanılmıştır ve elde edilen sonuçlar gerçek sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Çift rotorlu sistemler tek rotorlu sistemler ile karşılaştırıldığında %12'lik artış meydana geldiği görülmüştür. Ön ve arka kanat arasındaki mesafe toplam güç üretimini ciddi ölçüde etkilemese de bireysel rotor performansını önemli ölçüde etkilemiştir.

Shen ve ark. (2007), yaptıkları çalışmada Hareket Hattı Tekniği (Actuator Line Technique) kullanarak çift rotorlu rüzgâr türbini sistemlerini incelemiştir. Çalışmada, 500 kW kapasitesindeki geleneksel rüzgâr türbininin yıllık üretiminin %43.5 oranında artırılabilceği sonucuna ulaşılmıştır.

Gelgit akıntılarında çift rotorlu türbinlerin kullanıldığı çalışmalar aşağıda sunulmuştur:

Wei ve ark. (2015), yaptıkları çalışmada kanat açılarının ve kanatlar arasındaki eksenel mesafenin yatay eksenli gelgit türbinleri üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Deney düzeneğinde kullanılan kanatlar Fotoğraf 1.14'de sunulmuştur. Kanat açısının ve eksenel mesafenin artması ile türbin performansında artış meydana geldiği sonucuna ulaşılmıştır.



Fotoğraf 1.14. Gelgit türbinlerinde kullanılan çift rotorlu kanatlar (Wei ve ark., 2015)

Huang ve Kanemoto (2015), yapmış oldukları çalışmada zıt devinimli yatay eksenli gelgit akıntısı türbininin (Fotoğraf 1.15) performansını hem deneysel hem de sayısal olarak incelemişlerdir. Tasarım için optimum uç hız oranının 5 ve 6 olduğu görülmüştür. Daha yüksek veya daha düşük uç hız oranlarında durma noktaları ve ayrılmış akış nedeniyle verim düşüklüğü meydana geldiği sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca CFD sonuçları, deneysel sonuçlar ile yüksek oranda uyum sağlamıştır. Bu da CFD'nin türbin performansını tahmin etmedeki güvenilirliğini ortaya koymaktadır.



Fotoğraf 1.15. Huang ve Kanemoto'nun (2015) çalışmasında kullanılan tasarım

N. J. Lee ve ark. (2015), yaptıkları çalışmada zıt devinimli akıntı türbinlerinin performansını ve optimizasyonunu Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) ve deneysel yöntemler kullanarak incelemiştir. Yapılan çalışmada, çift rotorlu türbinlerin tek rotora kıyasla daha yüksek güç çıktısı verdiği sonucuna ulaşılmıştır. Tek rotorlu sistemlere göre %3 verim artışı sağlamıştır.

Wu ve ark. (2023), yaptıkları çalışmada, ön ve arka kanatlarda farklı sayıda kanat kullanılan çift rotorlu sistemleri sayısal ve deneysel olarak incelemiştir. Geleneksel sistemler ile karşılaştırıldığında enerji verimliliğinde %22'ye varan artış meydana gelmiştir. Ayrıca yapılan çalışmada daha az sayıda ön kanatlı yapılandırmaların daha dengeli bir akış alanı sağladığı ve arka kanat performansını arttırdığı belirtilmiştir.

Son yıllarda, çift rotorlu rüzgâr türbinleri, birinci rotordan geçen akışta kalan kinetik enerjiyi değerlendirmek amacıyla ikinci bir rotorun eklenmesiyle, rüzgârdan ek enerji dönüşüm potansiyeli sunarak dikkat çekmektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda, çift rotorlu konfigürasyonların, tek rotorlu sistemlere kıyasla önemli ölçüde yüksek güç üretme potansiyeline sahip olduğundan bahsetmektedir. Ayrıca rüzgâr çiftliklerinde tek ve çift rotorlu sistemlerin kombine bir şekilde kullanılması ile olası iyileştirmeler sunulmuştur. Fakat iki rotorun devir sayıları ve yük dağılımlarını yönetmekte kontrol zorlukları ortaya çıkmaktadır. Ayrıca alternatör bağlantılarında kullanılan dişli sistemler güç kaybı oluşturmaktadır.

Aerodinamik yüklerin dengelenmesi ve gürültü sorunlarının ele alınması, özellikle stabilite için çift rotorlu düzenlerin optimize edilmesinde karşılaşılan yaygın zorluklardır. Araştırmacılar, çift rotorlu sistemleri analiz etmek için çeşitli hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemleri kullanmışlardır. Ancak bu yöntemlerde, iki rotor arasındaki etkileşimi tam olarak anlayabilmek için deneysel doğrulamaya ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu tez çalışmasında, doğrudan tahrikli jeneratör ve NREL S822 kanat profiline sahip çift rotorlu bir rüzgâr türbini sisteminin tasarımı ve üretimi için yenilikçi bir yaklaşım sunulmaktadır. Doğrudan tahrikli jeneratör kullanımı, dişli bazlı sistemlerde yaygın olarak karşılaşılan verimlilik kayıpları ve bakım zorluklarına alternatif bir çözüm sağlamaktadır. Bu tasarım, mekanik kayıpları en aza indirerek pratik uygulamalarda daha verimli ve düşük bakım gerektiren bir sistem yaratma potansiyeline sahiptir. Küçük ölçekli rüzgâr türbinleri için optimize edilmiş NREL S822 kanat profili, farklı rüzgâr hızlarında enerji dönüşüm kabiliyetini artırarak, türbin performansını en üst düzeye çıkarmayı amaçlamaktadır. Bu çalışma, doğrudan tahrikli jeneratör teknolojisi ile optimize edilmiş kanat profili kombinasyonundan yararlanan yenilikçi bir rüzgâr türbini tasarımını, detaylı testlerle birlikte analiz etmektedir ve bu tasarımın potansiyel katkılarını kapsamlı bir şekilde ortaya koymaktadır.

2. MATERYAL ve YÖNTEM

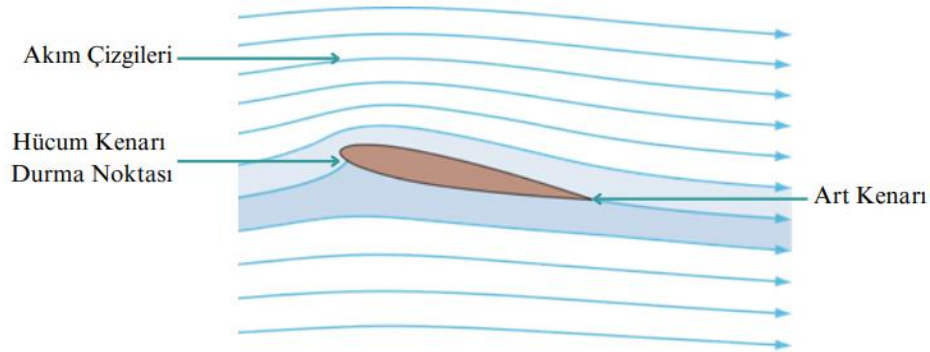
2.1 Kuramsal Temeller

2.1.1 Rüzgâr Türbinlerinde Aerodinamiğin Temelleri

Rüzgâr türbinlerinin aerodinamik tasarımı, rüzgârdan enerji dönüşümünü optimize etmek ve bu enerjiyi verimli bir şekilde mekanik enerjiye çevirmek için kritik öneme sahiptir. Bu bölümde kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri, hücum açısı ve Betz limiti gibi temel aerodinamik prensipler açıklanacaktır.

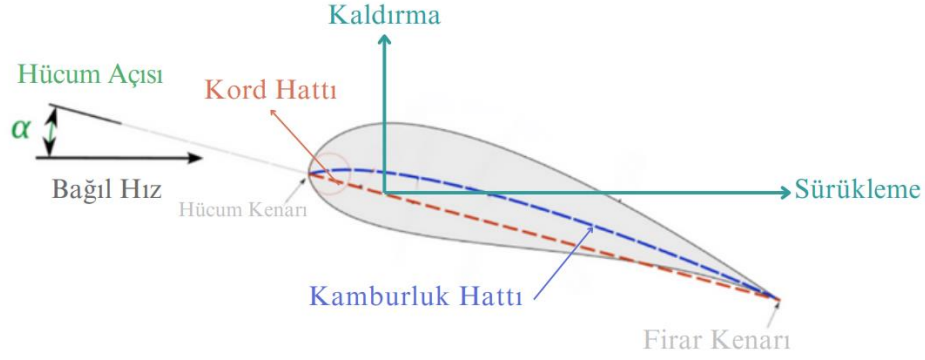
Kaldırma ve Sürüklenme Kuvvetleri

Rüzgâr türbini aerodinamiği, özellikle kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin etkin yönetimi etrafında şekillenir ve güç üretimini maksimize etmek amacıyla hücum açısı, kanat açısı ve akış dinamikleri gibi parametrelerin optimizasyonunu içermektedir. Bu süreç, türbinin farklı rüzgâr hızlarında maksimum verimlilikle çalışmasını sağlamak için aerodinamik tasarımın hassas bir şekilde ayarlanmasını gerektirmektedir. Bir kanat profili boyunca akım çizgilerinin şematik görüntüsü Fotoğraf 2.1’de sunulmuştur.



Fotoğraf 2.1. Bir kanat profili boyunca akım çizgilerinin şematik görünümü
(Sharma & Bartaria, 2015)

Havanın kanatlara çarpması ile oluşan kuvvet, rüzgâr hızına dik ve paralel yönlerde ayrılır. Rüzgâr yönüne dik doğrultudaki kuvvet bileşeni kaldırma, paralel doğrultudaki kuvvet bileşeni ise sürüklenme ya da direnç kuvveti olarak adlandırılmaktadır (Fotoğraf 2.2).



Fotoğraf 2.2. Kanat kesiti, tanımlamalar ve kuvvetler (Houghton ve ark., 2012)

Kaldırma kuvveti, hava akışına dik bir kuvvet olup, kanatları döndürerek mekanik güç üretmektedir. Bir kanattaki kaldırma kuvveti (F_l) Denklem 2.1’de sunulmuştur. Sürüklenme kuvveti (F_d), hava akışına paralel bir direnç kuvveti olup Denklem 2.2’de verilen eşitlik ile hesaplanmaktadır.

$$F_l = \frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2 A C_l \quad 2.1$$

$$F_d = \frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2 A C_d \quad 2.2$$

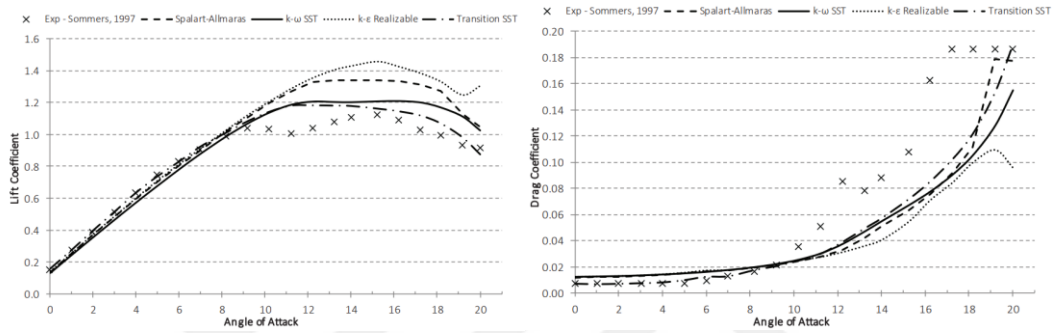
Burada, ρ havanın yoğunluğu (kg/m^3), V_{∞} rüzgâr hızı (m/s), A Kanat kesit alanı (m^2) ve C_l ve C_d ise hücum açısı, kanat profili ve yüzey özelliklerine bağlı olarak değişen kaldırma ve sürüklenme katsayısıdır. Bir kanat profili üzerindeki bütün kuvvetleri tanımlayabilmek için kanattaki momenti (M) hesaplamak gereklidir. Bu moment, kanat profilinin saat yönünde dönmesi durumunda pozitifdir ve moment katsayısı (C_m) Denklem 2.3’deki gibi tanımlanmaktadır.

$$C_m = \frac{M}{\frac{1}{2} \rho V^2 A c} \quad 2.3$$

Burada M , türbin kanadı üzerinde oluşan momenti ifade etmektedir.

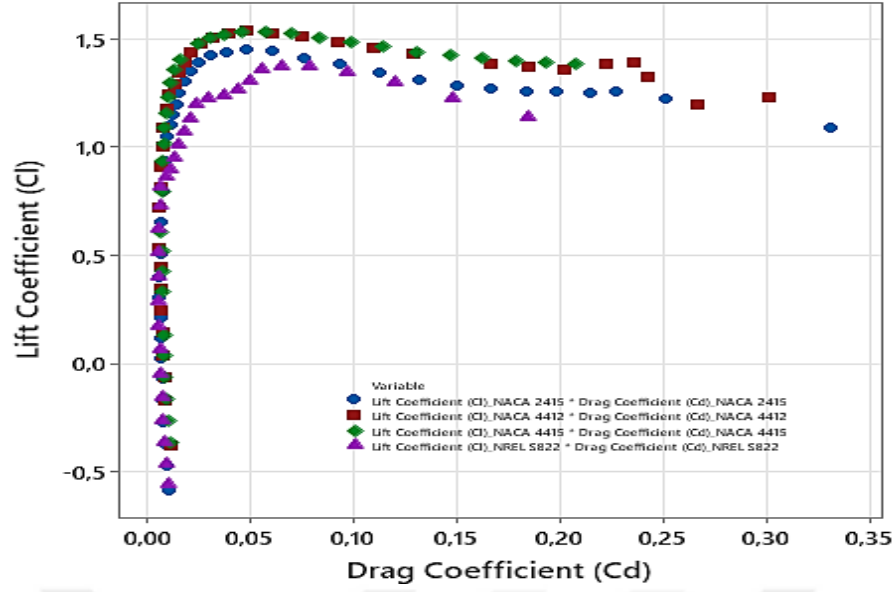
C_l , C_d ve C_m katsayıları hücum açısı(α), Reynolds sayısı ve Mach sayısı (Ma)’nın fonksiyonlarıdır. Hücum açısı, kord hattı ile V_{∞} arasındaki açıdır. Reynolds sayısı ise kord uzunluğu ve rüzgâr hızına bağlı olarak hesaplanmaktadır. Mach sayısı ise rüzgâr hızı ile ses hızı arasındaki oran şeklinde tanımlanmaktadır. Bir rüzgâr türbini için kaldırma, direnç ve moment katsayıları yalnızca hücum açısı ve Reynolds sayısının bir fonksiyonudur.

Belirli bir kanat profili için C_l , C_d ve C_m katsayılarının değişimi deneysel olarak ölçülebilir ya da ampirik denklemler kullanılarak hesaplanabilmektedir. Hücum açısı ve Reynolds sayılarına bağlı olarak katsayılardaki değişimi veren grafiğe kutuplar grafiği olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.1’de s809 kanat profili için oluşturulan kutuplar grafiği sunulmuştur. Kaldırma katsayısı, hücum açısının artmasıyla artış göstermiş, fakat belirli bir noktadan sonra azalmıştır. Bu azalma, stall (akış ayrılması) olarak bilinmektedir. Sürükleme katsayısı ise hücum açısının artması ile genellikle artış göstermektedir. Bu artış, özellikle yüksek hücum açılarında hızlı bir şekilde artış göstermektedir (Volikas & Nikas, 2019).



Şekil 2.1. s809 kanat profili için hücum açısına bağlı olarak kaldırma ve sürükleme kuvvetlerindeki değişim (kutuplar grafiği)(Volikas & Nikas, 2019)

C_l , hücum açısının artması ile birlikte belli bir değere kadar artış gösterir. Belirli bir noktadan sonra kaldırma katsayısı azalmaya başlar. Küçük hücum açılarında C_d neredeyse sabittir fakat duraksama noktasından sonra dikkate değer bir şekilde artmaktadır. Duraksama noktası bir kanat profili üzerindeki kaldırma kuvvetinin maksimum seviyeye ulaştığı ve bu noktadan sonra azalmaya başladığı açıya karşılık gelir. Bu hava akışının profilden ayrılmaya başladığı noktadır ve akış ayrılmasının ardından türbülanslı akış alanları oluşur. Şekil 2.2’de farklı kanat profilleri için sürükleme katsayısına karşılık kaldırma katsayılarındaki değişim sunulmuştur.



Şekil 2.2. Farklı kanat profilleri için kaldırma ve sürüklenme katsayıları

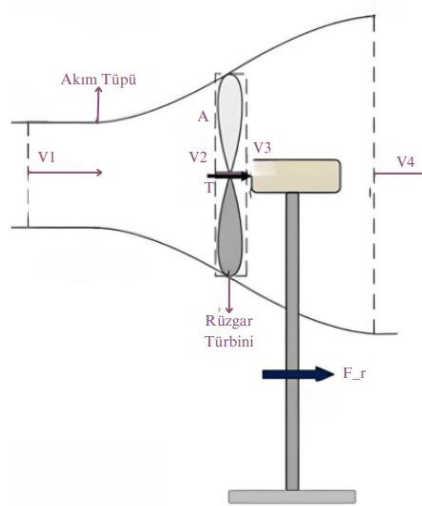
Betz Limiti

Betz Limiti, rüzgâr türbinlerinde rüzgâr enerjisinden elde edilebilecek maksimum teorik verim sınırını belirlemektedir. 1919’da Alman fizikçi Albert Betz tarafından geliştirilen bu limit, bir rüzgâr türbininin rüzgâr enerjisinin en fazla %59.3’ünü mekanik enerjiye dönüştürebileceğini ifade etmektedir. Bu sınıra Betz Limiti veya Betz yasası denmektedir.

Betz limitini kullanarak rüzgâr türbinlerinden elde edilebilecek maksimum gücü hesaplamak için aşağıdaki denklemler kullanılmaktadır.

Rüzgârın kinetik enerjisi, bir hava kütesinin hareketinden kaynaklanan enerji olarak tanımlanmaktadır. Rüzgâr enerjisi Denklem 2.4 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$P_{rüzgar} = \frac{1}{2} \rho A V_{\infty}^3 \quad 2.4$$



Fotoğraf 2.3. Rüzgâr türbini performansını belirlemede kullanılan akış modeli
(Biber, 2019)

Fotoğraf 2.3'te rüzgâr türbini performansını belirlemede kullanılan bir akış modeli yer almaktadır. Model, dairesel kesite sahip, akım çizgileriyle sınırlı, içinden hava akımı geçen bir akım tüpünden oluşmaktadır. Fotoğraf 2.3'te yer alan akım tüpündeki kontrol hacmi için kütleli debi korunumu ($\dot{m}_1 = \dot{m}_4 = \dot{m} = \rho AV = \text{Sabit}$) şeklinde yazılabilmektedir:

Akım tüpünün giriş ve çıkış noktaları arasında doğrusal momentum denklemini uyguladığımızda, oluşacak olan itki kuvveti (T), aynı zamanda akış yönünde türbin direğine etki eden F_R kuvvetidir.

$$T = \dot{m}(V_4 - V_1) \quad 2.5$$

1 ile 2 noktaları ve 3 ile 4 noktaları arasında Bernoulli denklemi yazılırsa:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 \quad 2.6$$

$$P_3 + \frac{1}{2}\rho V_3^2 = P_4 + \frac{1}{2}\rho V_4^2 \quad 2.7$$

Bu iki denklem birbirinden çıkartıldığında:

$$P_3 - P_2 = \frac{1}{2}\rho(V_4^2 - V_1^2) \quad 2.8$$

Elde edilmektedir. Rotor üzerine etki eden itki kuvveti $T = A_2(P_2 - P_3)$ ile hesaplanabilmektedir. Denklem 2.8'den elde edilen basınç farkı itki kuvvetindeki farkın yerine yazıldığında:

$$T = A_2(P_2 - P_3) = \frac{1}{2}\rho A_2(V_4^2 - V_1^2) \quad 2.9$$

Denklem 2.5 ve Denklem 2.9 birbirlerine eşitlendiğinde ve gerekli sadeleştirmeler yapıldığında Denklem 2.10 elde edilmektedir. Bu denklem ideal bir rüzgâr türbininde havanın ortalama hızının ileri akım hızı ve geri akım hızlarının ortalamasına eşit olduğunu ifade etmektedir (Biber, 2019):

$$\frac{1}{2}(V_1 + V_4) = V_2 \quad 2.10$$

Sürtünme gibi tersinmez kayıpların olmadığı ideal bir rüzgâr türbini için, türbin tarafından üretilen güç (P) basit olarak türbine giren ve çıkan kinetik enerjilerin farkıdır.

$$P_{türbin} = \frac{1}{2}\rho A(V_4^2 - V_1^2)V_2 = \frac{1}{2}\rho AV_2(V_4 + V_1)(V_4 - V_1) \quad 2.11$$

Denklemleri çözebilmek için Eksenel Azalma Faktörü (a) tanımlanmaktadır. Türbin etrafından geçen hava akışında, rüzgâr türbine yaklaşırken yavaşlar ve bu yavaşlama, türbin tarafından alınan enerjinin bir göstergesi olmaktadır. Bu kavram, türbinden geçen rüzgâr hızındaki azalmayı açıklamak için kullanılmaktadır.

Eksenel azalma faktörü genellikle (a) ile gösterilir ve Denklem 2.12'deki gibi tanımlanmaktadır.

$$a = \frac{V_1 - V_2}{V_1} \quad 2.12$$

Burada V_1 , rüzgârın türbine ulaşmadan önceki hızı (upstream wind speed); V_2 ise türbinden geçtikten sonraki rüzgâr hızıdır (downstream wind speed). Eksenel azalma faktörü ile ilgili aşağıdaki yorumlar yapılabilmektedir.

- $a = 0$: Türbin rüzgâr akışını hiç etkilememektedir. Rüzgâr hızında bir azalma yoktur. Bu durumda türbin enerji üretmez.
- $0 < a < 0.5$: Türbin rüzgâr hızını azaltmaktadır. Bu aralık, türbinlerin normal çalışma aralığını temsil etmektedir.
- $a > 0.5$: Eksenel azalma faktörünün bu değeri alması fiziksel olarak mümkün değildir.

Burada V_2 ve V_4 hızları Eksenel Azalma Faktörü ile aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$V_2 = V_1(1 - a) \quad 2.13$$

$$V_4 = V_1(1 - 2a) \quad 2.14$$

Denklem 2.13 ve 2.14, Denklem 2.12'de yerlerine konulursa $P_{t\ddot{u}rbin}$ aşağıdaki gibi yazılabilmektedir:

$$P_{t\ddot{u}rbin} = \frac{1}{2} \rho A V^3 4a(1 - a)^2 \quad 2.15$$

Güç katsayısı (C_p), bir rüzgâr türbininin verimliliğini ifade eden bir katsayıdır. Türbinin, rüzgârın taşıdığı toplam kinetik enerjiden ne kadarını mekanik enerjiye dönüştürebildiğini göstermektedir. Güç katsayısı Denklem 2.16'daki gibi tanımlanmaktadır.

$$C_p = \frac{P_{t\ddot{u}rbin}}{P_{r\ddot{u}zgar}} = \frac{\frac{1}{2} \rho A V^3 4a(1 - a)^2}{\frac{1}{2} \rho A V^3} = 4a(1 - a)^2 \quad 2.16$$

Maksimum güç katsayısını bulabilmek için Denklem 2.16'nın a 'ya göre türevini alıp sıfıra eşitlenir. Yapılan işlem sonucunda $a=0$ ve $a=1/3$ değerleri elde edilmektedir. Eksenel azalma faktörünün sıfıra eşit olması mümkün olmadığı için $a=1/3$ değeri denklemde yerine konulursa:

$$C_{P_{MAKS}} = 4 \cdot \frac{1}{3} \left(1 - \frac{1}{3}\right)^2 = \frac{4}{3} \cdot \frac{4}{9} = \frac{16}{27} = 0.5926 \quad 2.17$$

Elde edilen sonuç, bir rüzgâr türbininin teorik olarak en fazla rüzgâr enerjisinin %59.3'ünü yakalayabileceğini ifade etmektedir. Bu değer, türbinlerin enerji dönüşümündeki fiziksel sınırı belirlemektedir ve Betz Limiti olarak bilinmektedir.

Uç Hız Oranı (Tip Speed Ratio)

Kanat uç hız oranı, bir rüzgâr türbininin aerodinamik performansını değerlendirmede kullanılan önemli bir parametredir. Bu oran türbinin verimliliğini ve enerji üretimini doğrudan etkilemektedir. Kanat uç hız oranı aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$\lambda = \frac{\omega R}{V} \quad 2.18$$

Burada, λ kanat uç hız oranı (TSR), ω rotorun açısal hızını(rad/sn), R rotorun yarıçapını, V ise rüzgâr hızını ifade etmektedir.

Kanat uç hız oranı türbin kanadının uç noktasının hızı ile rüzgâr hızı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Kanat uç hız oranı ile ilgili aşağıdaki yorumlar yapılabilmektedir:

- Düşük TSR ($\lambda < 1$): Bu durumda kanat ucu rüzgâr hızından yavaş hareket etmektedir. Bu türbinler genellikle yüksek sürüklenme kuvvetine dayanır ve düşük verimlidir.
- Optimum TSR ($4 < \lambda < 10$): Modern yatay eksenli üzgar türbinleri, maksimum verimliliği sağlamak için bu aralıkta çalışmaktadır. Bu aralıkta türbin, maksimum güç katsayısını elde etmektedir.
- Yüksek TSR ($\lambda > 10$): Kanat uçları rüzgâr hızına göre çok hızlı hareket eder. Bu durumda yüksek sürtünme ve aerodinamik kayıplar meydana gelmektedir.

Kanat uç hız oranı ve güç katsayısı doğrudan ilişkilidir. Türbin maksimum verimliliğe genellikle belirli bir kanat uç hız oranında ulaşmaktadır.

2.1.2 Çift Rotorlu Rüzgâr Türbinlerinde Aerodinamik

Yatay eksenli çift rotorlu rüzgâr türbinlerinde, rüzgâr türbin kanatlarından geçerken, kanat üzerinde oluşan aerodinamik kaldırma kuvvetleri sayesinde kanatlar tork üretmektedir. Rüzgâr enerjisinin bir kısmını kaybeder ve bu enerji mekanik enerjiye dönüşür. Genel olarak türbin kanatları üzerinde oluşan aerodinamik tork Denklem 2.19’da ifade edildiği gibi hesaplanabilmektedir (Ertürk ve ark., 2018).

$$T = \frac{0.5\rho\pi R^3 V_{\infty}^2 C_p}{\lambda} \quad 2.19$$

Çift rotorlu rüzgâr türbinlerinde, ön ve arka rotor kanatlarının farklı rüzgâr hızlarına, farklı açısal hızlara ve farklı kanat yarıçaplarına sahip olabilecekleri göz önüne alındığında ön ve arka rotorların kanat uç hız oranları ve torkları farklılık göstermektedir. Bu nedenle ön ve arka kanatların torkları Denklem 2.20 ve 2.21’de gösterildiği gibi ayrı ayrı hesaplanabilmektedir.

$$T_1 = \frac{0.5\rho\pi R_1^3 V_s^2 C_{p_1}}{\lambda_1} \quad 2.20$$

$$T_2 = \frac{0.5\rho\pi R_2^3 V_s^2 C_{p_2}}{\lambda_2} \quad 2.21$$

Burada “1” ve “2” alt indis olarak verilen ifadeler sırasıyla öndeki ve arkadaki rotorlar için değerleri ifade etmektedir. Buradan yola çıkılarak, öndeki ve arkadaki kanatlardan elde edilen güçler Denklem 2.22 ve 2.23’te gösterildiği gibi hesaplanabilmektedir.

$$P_1 = T_1 \omega_1 \quad 2.22$$

$$P_2 = T_2 \omega_2 \quad 2.23$$

Son olarak, çift rotorlu rüzgâr türbinlerinin sistemin toplam aerodinamik torku, ön ve arka rotorların torkları toplamı olarak; toplam aerodinamik güç ise ön ve arka rotorların toplam tork ve açısız hızına bağlı olarak hesaplanabilmektedir (Denklem 2.24 ve Denklem 2.25).

$$T_{toplam} = T_1 + T_2 \quad 2.24$$

$$P_{total} = T_1 \omega_1 + T_2 \omega_2 \quad 2.25$$

2.1.3 Rüzgâr Türbinlerinde Ekserji

Ekserji analizi, termodinamik sistemlerin enerji dönüşüm süreçlerindeki kayıpları ve geri kazanılabilir enerji potansiyelini değerlendirmek için kullanılan önemli bir yöntemdir. Rüzgâr türbinlerinde enerji üretim süreçleri, çeşitli aerodinamik, mekanik ve termodinamik kayıplara bağlıdır. Bu bağlamda ekserji analizi, türbin performanslarını optimize etmek ve enerji verimliliğini arttırmak amacıyla, geleneksel Termodinamiğin Birinci Yasa yaklaşımının ötesine geçerek detaylı bir değerlendirme imkanı sunmaktadır (Pope ve ark., 2010). Rüzgâr türbinlerinde ekserji hesaplamaları aşağıdaki denklemler kullanılarak yapılmaktadır.

Ekserji verimliliği Denklem 2.26 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\Psi = \frac{\dot{W}_{\text{çıkış}}}{\dot{E}x_{\text{akış}}} \quad 2.26$$

Burada, Ψ ekserji verimliliğini, $\dot{W}_{\text{çıkış}}$ türbinden elde edilen güç değerini, $\dot{E}x_{\text{akış}}$ akış ekserjisini ifade etmektedir. $\dot{E}x_{\text{akış}}$ Denklem 2.27 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\dot{E}x_{\text{akış}} = \dot{E}x_{ph} + \dot{E}x_{KE} \quad 2.27$$

Burada, $\dot{E}x_{ph}$ fiziksel ekserjiyi (türbin operasyonu ile ilgilidir, entalpi ve entropi değişikliklerini içermektedir), $\dot{E}x_{KE}$ akış ekserjisinin kinetik bileşenidir. Türbinden geçen kinetik enerjinin farkına eşdeğerdir. Denklem 2.27'deki Fiziksel Ekserji kavramı Denklem 2.28 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\dot{E}_{ph} = \dot{m} \left[C_p(T_2 - T_1) + T_0 \left(C_p \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) - R \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \right) - \frac{C_p(T_0 - T_{\text{average}})}{T_0} \right] \quad 2.28$$

Denklem 2.27'de ifade edilen, T_1 ve T_2 sıcaklıkları kanatların öncesi ve sonrasındaki rüzgâr hızına bağlı sıcaklıkları ifade etmektedir. Rüzgâr hızına bağlı olarak hissedilen sıcaklıklar Rüzgâr Soğutma Sıcaklığı (Wind Chill Temperature) olarak adlandırılmaktadır ve (Bluestein & Zecher, 1999) tarafından geliştirilen ve Denklem 2.29 verilen eşitlik ile hesaplanmaktadır.

$$\text{WCT} = 33 - 0.0454[10V_{\infty}^{0.5} + (10.45 - V_{\infty})(33 - T_a)] \quad 2.29$$

Burada, V_{∞} rüzgâr hızını, T_a ortam sıcaklığını ifade etmektedir.

2.2 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

2.2.1 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) ve Rüzgâr Türbini Analiz Süreçleri

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD), akışkanların davranışını sayısal simülasyonlar yoluyla analiz etmek ve tahmin etmek için kullanılan bir araçtır. CFD, özellikle aerodinamik, turbo makineler, otomotiv tasarımı ve rüzgâr enerjisi sistemleri gibi birçok mühendislik uygulamasında tasarım ve analiz süresinde tercih edilmektedir. CFD, akışkan fiziğinin temel denklemlerini çözerek, mühendislerin akışkan ve katı yüzeyler arasındaki karmaşık etkileşimleri anlamasını sağlamaktadır.

CFD simülasyonları, rüzgâr enerjisi alanında geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılmaktadır. CFD, rüzgâr türbini kanatlarının tasarımı ve optimizasyonunda, rüzgâr çiftliklerinde türbin yerleşim stratejilerinin belirlenmesinde, farklı türbin tasarımlarının çeşitli rüzgâr koşullarındaki performans analizinde ve türbin bileşenlerinin aerodinamik kuvvetlere karşı yapısal durumlarının değerlendirilmesinde etkili bir araç olarak öne çıkmaktadır.

CFD, akışkan hareketini tanımlayan karmaşık diferansiyel denklemleri çözmek için sayısal yöntemler ve algoritmalar kullanılmaktadır. CFD’de temel yaklaşım, problem tanımlama, ağ (mesh) yapısının oluşturulması, modellerin belirlenmesi ve sonuçların işlenmesi aşamalarından oluşmaktadır.

Problemin Tanımlanması

CFD analizlerinin doğru ve güvenilir sonuçlar verebilmesi için, problemin fiziksel ve matematiksel tanımlarının eksiksiz ve yazılımın gereksinimlerine uygun şekilde modellenmesi gerekmektedir. Bu süreçte, akış alanı, sınır koşulları, türbülans modeli, mesh yapısı ve çözüm yöntemleri gibi parametrelerin yazılım tarafından doğru şekilde işlenebilmesi için kapsamlı bir problem tanımlaması yapılmalıdır.

Geometrinin tanımlanması aşamasında, bir kanat profili, rüzgâr türbini kanadı ya da bir rüzgâr çiftliği yerleşimi gibi fiziksel alanların belirlenmesi gerekmektedir. Geometrin, analiz edilen fiziksel sistemi doğru bir şekilde temsil edecek şekilde tasarlanmalıdır.

Sınır koşullarının belirlenmesi aşamasında, akışkan hesaplama alanının sınırlar ile nasıl etkileşime girdiği tanımlanmaktadır. Rüzgâr türbinleri için rüzgâr hızı, türbülans yoğunluğu, akışkanın alandan çıkması koşulu, duvar sınırı, katı yüzeylere uygulanan sürtünmesiz koşul, simetrik veya tekrarlayan akış desenleri bu aşamada tanımlanmaktadır.

Ağ (Mesh) yapısının oluşturulması aşaması, CFD hesaplamalarındaki en kritik adımlardan bir tanesidir. Yapılacak olan simülasyonların doğruluğu büyük ölçüde ağ yapısının kalitesine bağlıdır. Problemlerin karmaşıklık düzeylerine göre ağ yapıları farklılık göstermektedir. Yapısal ağ yapıları, düzenli bir hücre ağına sahiptir ve genellikle basit geometriler için kullanılmaktadır. Yapısal olmayan ağ yapıları ise, karmaşık geometrilere uyum sağlayabilen düzensiz şekilli hücrelerden oluşmaktadır. Hibrit ağ yapısı ise yapısal ve yapısal olmayan ağ yapılarının

birleşimidir. Basit geometriye sahip bölgelerde yapısal ağ yapısı; karmaşık yapıli bölgelerde ise yapısal olmayan ağ yapıları kullanılmaktadır.

Yönlendirme Denklemlerinin Ayırıklaştırılması

Akışkan akışının hesaplanmasını sağlayan temel denklemler, Süreklilik Denklemi, Navier-Stokes Denklemleri ve Enerji Denklemleri kısmi diferansiyel denklemler kullanılarak ifade edilmektedir. CFD çözümlenmesinde bu diferansiyel denklemler cebirsel ifadelere dönüştürölmektedir. Bu süreç ayırıklaştırma (discretization) olarak tanımlanmaktadır. Ayırıklaştırma adımlarında Sonlu Fark Yöntemi (FDM), Sonlu Hacim Yöntemi (FVM) ve Sonlu Eleman Yöntemi (FEM) kullanılmaktadır. Problemlerin karmaşıklık durumunda göre yöntem belirlenmektedir.

Çözümleme

Ayırıklaştırma adımı sonrasında problem cebirsel denklem sistemi haline gelmektedir. Bu denklem bütününün çözümlesinde aşağıdaki adımlar uygulanmaktadır.

- Yinelemeli Çözücüler (Iterative Solvers): Denklemler karışık ve fazla olmasından kaynaklı olarak Gauss-Seidel, Conjugate Gradient veya Multigrid çözücüler gibi yinelemeli çözücüler kullanılmaktadır. Bu çözücüler, her bir ağ noktasındaki değeri güncelleyerek çözüm alanında yineleyerek ilerlemektedir.
- Yakınsama Kriteri: Yakınsama, mevcut çözüm ile kesin çözüm arasındaki hata olan kalıntılara (residuals) dayanarak değerlendirilir. Çözüm, kalıntılar belirli bir eşik değeri altına düştüğünde yakınsama sağlanmış kabul edilmektedir.
- Basınç-hız bağlantısı: Sıkıştırılabilir akış simülasyonlarında basınç ve hız alanları birbirleriyle bağlantılıdır. SIMPLE (Basınç Bağlantılı Yarı Örtük Yöntem) ve PISO (Operatörlerle Ayırık Basınç yöntemi) gibi algoritmalar, bu bağlantıyı etkili bir şekilde çözmektedir.

Türbölans Modelleme

Türbölans, özellikle rüzgâr türbini gibi uygulamalarda karşılaşılan, akışkanların oldukça karmaşık ve düzensiz bir özelliğidir. Türbölanslı akışlarda, akışkan hız ve basınç değeri hem zamana hem de mekâna bağılı olarak değişmektedir. CFD simülasyonlarında türbölansın etkililerini yaklaşık olarak

hesaplayan türbülans modelleri kullanılmaktadır. Bu modeller, karmaşık hareketleri daha basit hale getirir ve simülasyonu daha yönetilebilir kılmaktadır.

Türbülans modelinde RANS (Reynolds- Ortalama Navier-Stokes), LES (Büyük Girdap Simülasyonu) ve DNS (Doğrudan Sayısal Simülasyon) yaklaşımları bulunmaktadır. RANS modelleri, Navier-Stokes denklemlerini çözerken, zamana bağlı ortalama türbülans dalgalanmalarını dikkate almaktadır. Bu modeller zamana bağlı türbülanslı dalgalanmaları ortaladığı için hesaplama açısından oldukça verimlidir. En yaygın RANS modelleri k-ε ve k-ω modelleridir. LES yönteminde, büyük türbülans girdaplarını doğrudan çözerken, daha küçük ölçekli türbülans yapılarını modellemektedir. Karmaşık akış yapılarında genellikle tercih edilmektedir. DNS modelinde ise, Navier-Stokes denklemlerini herhangi bir türbülans modeli olmadan doğrudan çözmektedir. Bu yöntem, akışkanın tüm türbülans ölçeklerini çözmektedir.

Son İşleme

Son işleme, CFD simülasyonundan elde edilen sonuçların analizini içermektedir. Akış alanının görselleştirilmesi, nicel verilerin çıkarılması ve tasarımın performansının değerlendirilmesini kapsamaktadır. Bu aşamada görselleştirme araçları kullanılmaktadır. Sistemin hız, basınç ve sıcaklık dağılımlarını görselleştirmek için kontur grafikleri, vektör alanları ve akış çizgileri kullanılmaktadır. Ayrıca hesaplamalardan elde edilen kaldırma ve sürüklenme katsayıları, basınç dağılımı gibi performans ölçütleri analiz edilmektedir.

2.2.2 CFD Analizleri için Kuramsal Temeller

Rüzgâr türbinlerinin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği kullanılarak simülasyonu, akışkanlar dinamiğinin temel prensiplerine dayanmaktadır. Bu prensipler, akışkan hareketini tanımlayan Navier-Stokes denklemleri ile matematiksel olarak ifade edilmektedir. Bu bölümde CFD analizlerinde kullanılan temel denklemler sunulacaktır.

Süreklilik Denklemi

Süreklilik Denklemi, akışkan akışında kütlenin korunumunu ifade etmektedir. Bir akışanda süreklilik Denklem 2.26'daki gibi yazılabilmektedir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad 2.30$$

Havanın yoğunluğunun sıkıştırılmaz akış için sabit kabul edildiğinde:

$$\nabla \cdot u = 0$$

2.31

Burada u ; x , y ve z yönlerinde hız bileşenlerini temsil eden hız vektörüdür. Bu denklem hız alanının diverjansının sıfır olduğunu, yani akış alanında net bir kütle birikimi olmadığını ifade etmektedir.

Momentum Denklemi (Navier- Stokes Denklemleri)

Navier-Stokes denklemleri, bir akışkandaki momentumun korunumu prensibini tanımlamaktadır. Sıkıştırılmaz ve Newton tipi akışkanlar için momentum denklemi aşağıdaki gibi yazılabilmektedir (Pacholczyk & Karkosinski, 2020).

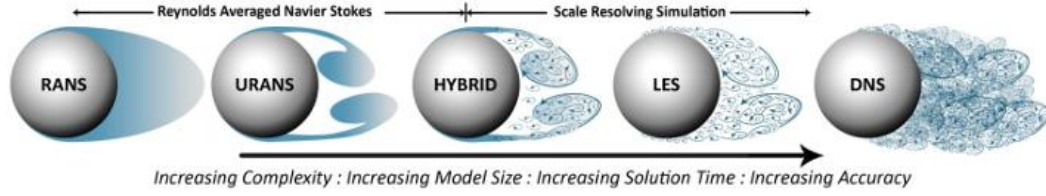
$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 u + \frac{1}{\rho} G \quad 2.32$$

Burada, $\frac{\partial u}{\partial t}$ terimi hızın zamanla değişimini, $(u \cdot \nabla)u$ akışkan hareketine bağlı momentum taşınımını, $-\frac{1}{\rho} \nabla p$ terimi akışkan içindeki basınç değişikliğinin oluşturduğu kuvveti, $\nu \nabla^2 u$ akışkan viskozitesi ve kesme gerilmelerinin etkilerini, G ise yer çekimi gibi dış kuvvetleri ifade etmektedir.

Akışkanın türbülanslı olması durumunda, doğrudan sayısal çözüm (DNS) uygulamak son derece maliyetlidir. Rüzgâr türbini simülasyonlarında, türbülanslı akışın doğru bir şekilde tahmin edilmesi karmaşık girdap etkileşimlerinin çözümlenebilmesi için kritik öneme sahiptir.

Türbülansın çözülmesi için kullanılan modeller, Navier-Stokes denklemlerinin Doğrudan Sayısal Simülasyonu (DNS) gibi tüm ölçeklerini çözmeyi amaçlayan yöntemlerden, daha basitleştirilmiş modellere kadar uzanmaktadır. DNS yöntemleri, yüksek hesaplama maliyetleri nedeniyle yalnızca basit akış problemlerinde tercih edilmektedir. Geniş Eddy Simülasyonları (LES) yöntemi, bir akış içerisindeki en büyük türbülans ölçeklerini doğrudan çözerken, daha küçük ölçekleri ise alt ızgara modelleri kullanarak filtrelemektedir. Bu simülasyonlar genellikle geçiş akışlarının simülasyonunda kullanılmaktadır. Bu iki yönteme alternatif olarak RANS ve URANS türbülans modelleri son zamanlarda tercih edilmektedir. Bu modeller, genellikle daha düşük hesaplama maliyeti sunmaktadır. Son yıllarda Hibrit SRS/URANS modelleri, CFD yazılımlarında giderek yaygın bir hale gelmektedir. Bu hibrit modeller, ölçek uyarlamalı simülasyon (SAS) ve Ayırık Girdap Simülasyonu (DES) gibi yaklaşımları

içermektedir. Bu teknikler, LES ve URANS yöntemlerini birleştirerek, özellikle duvar yakınındaki akışların simülasyonunda daha doğru ve ekonomik çözümler sunmaktadır (Hart, 2016). Akış çözümlerinde kullanılan farklı türbülans modelleri ve çözüm yaklaşımlarının karşılaştırılması Fotoğraf 2.4'te sunulmuştur.



Fotoğraf 2.4. Akış çözümlerinde kullanılan farklı türbülans modelleri ve çözüm yaklaşımlarının karşılaştırılması (Hart, 2016)

Fotoğraf 2.4, akışkanlar dinamiğinde türbülans modelleme yaklaşımlarını karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) en basit ve en hızlı yöntemken, türbülans etkilerini ortalayarak diğer modellere göre daha düşük bir doğruluk sunmaktadır. DNS (Direct Numerical Simulation) ise tüm türbülans yapılarını çözer, en karmaşık ve en doğru yöntem olmasına karşın en yüksek hesaplama maliyeti ve hesaplama gücü gerektirmektedir. Problemlerin karmaşıklığı, sonuçların doğruluğu ve çözüm süresi soldan sağa artış göstermektedir. Tablo 2.1'de türbülans modelleri karşılaştırmalı olarak avantaj, dezavantaj, kullanım alanları ve çözüm ölçekleri özet halinde sunulmuştur (Abohamzeh ve ark., 2020; Kaya & Karagöz, 2007; Kumar ve ark., 2017; Rosenberg ve ark., 2014).

Tablo 2.1. CFD'de kullanılan türbülans modelleri ve performans karşılaştırması

Model	Çözülen Mekânsal Ölçekler	Avantajlar	Dezavantajlar	Kullanım Alanları
DNS (Doğrudan Sayısal Simülasyon)	Tüm türbülans ölçekleri	- En doğru sonuçları sağlar. - Hiçbir yaklaşık model kullanılmaz.	- Yüksek hesaplama maliyeti. - Sadece basit ve düşük Reynolds sayılı akışlar için uygundur.	- Akademik araştırmalar - Teorik analizler - Basit ve küçük ölçekli akış problemleri
LES (Büyük Girdap Simülasyonu)	Büyük girdaplar doğrudan çözülür, küçük girdaplar modellenir	- Karmaşık geçiş akışları ve girdap dinamikleri için yüksek doğruluk sağlar. - Türbülanslı akışların detaylı simülasyonu yapılabilir.	- Yüksek hesaplama maliyeti. - Hassasiyet için ince mesh gerektirir. - Karmaşık model ayarları gerekebilir.	- Karmaşık akış analizleri - Geçiş akışları - Otomotiv ve havacılık aerodinamiği

Tablo 2.2.(devam). CFD'de kullanılan türbülans modelleri ve performans karşılaştırması

Model	Çözülen Mekânsal Ölçekler	Avantajlar	Dezavantajlar	Kullanım Alanları
RANS (Reynolds Ortalama Navier-Stokes)	Tüm türbülans ölçekleri modellenir	- Düşük hesaplama maliyeti. - Endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. - Basit ve hızlı çözüm sağlar.	- Karmaşık akışları doğru modelleyemez. - Geçiş ve akış ayrılmalarında zorluk yaşar. - Ortalama akış dışında detaylı bilgi vermez.	- Yüksek Reynolds sayılı akışlar - Boru akışları - Uçak ve gemi aerodinamiği - Rüzgâr Türbinleri
URANS (Unsteady RANS)	Zamanla değişen ortalama akış çözülür	- Zaman bağımlı akışlar için uygundur. - Düşük hesaplama maliyeti ile zamanla değişen akışlar analiz edilebilir.	- Karmaşık türbülans yapılarını çözemez. - Geçiş akışlarını doğru tahmin edemez. - Ortalama akışa bağlı kalır.	- Zamanla değişen akışlar - Salınlımlı akış problemleri - Uçak kanadı analizleri - Rüzgâr Türbinleri
Hibrit Modeller (DES, SAS)	Büyük girdaplar doğrudan çözülür, küçük girdaplar modellenir	- LES doğruluğu ve RANS verimliliğini birleştirir. - Geçiş akışlarını ve karmaşık sınır tabakalarını doğru simüle edebilir.	- Karmaşık model ayarları gerektirir. - Yüksek hesaplama maliyeti olabilir. - Hassas uygulama ve ince mesh gerektirir.	- Karmaşık sınır tabakası akışları - Geçiş akışları - Türbin ve otomotiv aerodinamiği
k-ε Modeli	Tüm türbülans ölçekleri modellenir	- Basit ve hesaplama açısından verimli. - Yüksek Reynolds sayılı akışlar için uygundur. - Yaygın olarak kullanılır.	- Duvar yakınında düşük doğruluk sağlar. - Basınç gradyanı olan akışlarda sorun yaşar. - Geçiş akışlarını doğru modelleyemez.	- Genel mühendislik akışları - Isı değiştiriciler - Endüstriyel boru akışları
k-ω SST Modeli	Duvar yakınında k-ω, serbest akışta k-ε kullanılır	- Duvar yakınındaki akışlarda yüksek doğruluk. - Geçiş akışlarında etkilidir. - Ayrılma bölgelerinde iyi performans gösterir.	- Serbest akış türbülans seviyelerine duyarlıdır. - Diğer modellerden daha fazla hesaplama maliyeti gerektirir.	- Rüzgâr türbini kanadı analizleri - Otomotiv aerodinamiği - Karmaşık akış geçişleri

Rüzgâr türbini aerodinamiğinde doğru türbülans modeli seçimi, kanatlar etrafındaki sınır tabakası davranışı, geçiş akışları ve ayrılma bölgelerinin doğru bir şekilde tahmin edilebilmesi için kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda k-ω SST (Share Stress Transport) modeli hem duvar yakınındaki akışların, hem de serbest akış bölgelerini doğru bir şekilde modellemeyi sağlayan hibrit bir türbülans modelidir.

k-ω SST Modelinin Özellikleri

- 1. Hibrit Yapısı:** k-ω SST modeli, k-ω modelinin duvar yakınındaki hassasiyetini ve k-ε modelinin serbest akış performansını birleştirmektedir (Menter, 1994). Bu sayede kanat yüzeyine yakın bölgelerde yüksek doğruluk sağlar ve basınç gradyanı olan bölgelerde etkili olmaktadır.

2. **Ayrılma Tahmini:** (Menter, 1994) tarafından geliştirilen model, güçlü ters basınç gradyanları olan akışlarda ayrılma noktalarını daha doğru bir şekilde tahmin etmektedir. Bu durum özellikle rüzgâr türbinleri gibi yüksek Reynolds sayılı uygulamalarda önemlidir.

3. **Geçiş Akışları:** k- ω SST modeli, geçiş akışlarını ve sınır tabakası davranışlarını doğru bir şekilde yakalayabilmektedir (David C. Wilcox, 2006). Rüzgâr türbinlerinde kanat profilleri üzerindeki geçiş bölgeleri, aerodinamik performansını doğrudan etkilediğinden bu model hassasiyeti büyük bir avantaj sağlamaktadır.

Literatürde rüzgâr türbinleri ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde k- ω SST türbülans modelinin rüzgâr türbini analizlerinde sıklıkla tercih edildiği gözlemlenmiştir. Yapılan analizlerin sonuçları, deneysel verilerle karşılaştırıldığında yüksek doğruluk oranları elde edilmiş ve bu modelin rüzgâr türbini çözümlemelerinde güvenilir bir seçenek olduğu doğrulanmıştır (Hao & Li, 2020; Rocha ve ark., 2014; Volikas & Nikas, 2019; K. Wang ve ark., 2022). Bu bulgular doğrultusunda, yapılacak analizlerde k- ω SST türbülans modelinin kullanılması tercih edilmiştir.

k- ω Share Stress Transport (SST) Modeli Kuramsal Temelleri

k- ω SST modeli, duvar yakınındaki bölgelerde k- ω modeli kullanırken, serbest akış bölgelerinde k- ϵ modeli kullanarak iki modelin avantajlarını bir araya getirmektedir. Bu sayede, model hem sınır tabakadaki türbülansı hem de serbest akıştaki türbülansı doğru tahmin edebilmektedir (David C. Wilcox, 2006).

k- ω SST modeli, türbülans kinetik enerjisi (k) denklemi ve Spesifik Türbülans Dağılma Oranı (ω) denklemi olmak üzere iki ana taşınma denklemi içermektedir. Türbülans Kinetik Enerjisi (k) Denklem 2.29'da sunulmuştur.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla k = P_k - \beta^* k \omega + \nabla \cdot [(v + \sigma_k v_t) \nabla k] \quad 2.33$$

Burada, $\frac{\partial k}{\partial t}$ türbülans kinetik enerjisinin zamanla değişimi, $\vec{u} \cdot \nabla k$ konveksiyon terimi, P_k türbülans kinetik enerjisinin üretimi, v_t türbülans viskozitesidir, σ_k türbülans Prandtl sayısı, β^* model katsayısıdır.

Spesifik Türbülans Dağılma Oranı (ω) Denklem 2.30'da sunulmuştur.

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \omega = \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \omega^2 + \nabla \cdot [(\nu + \sigma_\omega \nu_t) \nabla \omega] \quad 2.34$$

Burada, α, β ve σ_ω model sabitleridir. " $\nabla \cdot [(\nu + \sigma_\omega \nu_t) \nabla \omega]$ " ise dağılma terimidir. Türbülansın yayılmasını temsil etmektedir.

k- ω SST modelinin temel avantajı, Shear Stress Transport (SST) fonksiyonunu kullanmasıdır. Bu fonksiyon, duvar yakınındaki kesme gerilmesini doğru bir şekilde hesaplayarak, sınır tabaka ayrılmasını tahmin edebilmektedir. Bu sayede, akışın ayrılma noktaları, basınç düşüşleri ve uyandırma bölgelerini daha doğru bir şekilde modelleyebilmektedir. SST fonksiyonu, k- ω ve k- ϵ modeli arasında geçiş yapmak için bir karışım fonksiyonu (F_1) ve bir geçiş fonksiyonu (F_2) kullanmaktadır. Karışım fonksiyonu Denklem 2.31'de sunulmuştur.

$$F_1 = \tanh \left(\min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\rho k}{\sigma_\omega D_+ y^2} \right] \right) \quad 2.35$$

Burada, y duvardan olan mesafe; D_+ kayma gerilmesi, β model sabiti, ν kinematik viskozitedir. Geçiş fonksiyonu Denklem 2.32'de sunulmuştur. F_2 fonksiyonu, serbest akış bölgesinde k- ϵ modeline geçişi sağlamaktadır.

$$F_2 = \tanh \left(\max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right) \right) \quad 2.36$$

SST modelinin en önemli özelliklerinden biri, kesme gerilmesi (shear stress) tahminindeki doğruluktur. Model kayma gerilmesini hesaplamak için Denklem 2.33'ü kullanmaktadır.

$$\nu_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, S F_2)} \quad 2.37$$

Burada, ν_t türbülans Eddy Viskozitesini; a_1 model sabiti; k türbülans kinetik enerjisi; ω türbülans spesifik dağılma oranı; S ise kayma gerilmesinin büyüklüğünü ifade etmektedir. Kayma gerilmesinin büyüklüğü Denklem 2.34 ve Denklem 2.35 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad 2.38$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad 2.39$$

Burada, S_{ij} kayma gerilmesi tensörüdür.

2.2.3 Çift Rotorlu Rüzgâr Türbininin CFD Çözümlemesi

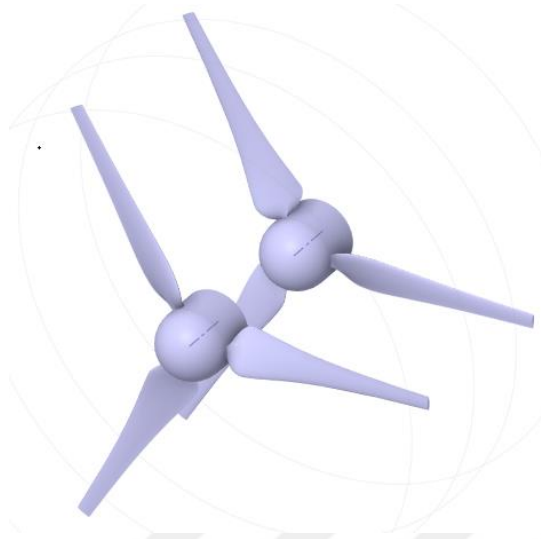
Bu tez çalışmasında, çift rotorlu rüzgâr türbininin aerodinamik performansını ve iz etkilerini analiz etmek için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) kullanılmıştır. CFD analizleri, Ansys Fluent yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde, sayısal çözümleme sürecinde izlenen yöntemler, modelleme stratejileri ve çözümleme parametreleri detaylı bir şekilde sunulmaktadır. Çözümleme, çift rotorlu sistemin tasarım parametrelerinin enerji üretimi ve iz etkileri üzerindeki etkisini anlamak için yürütülmüştür.

CFD analizleri çift rotorlu rüzgâr türbinlerinde farklı açı ve yük durumlarında zıt devinimli olarak sistemin çalışıp, çalışmayacağını doğrudan hesaplayamamaktadır. CFD analizleri sonucunda ancak iz etkileri, kanat üzerindeki akış ayrılmaları ve üretilen torklar yorumlanarak tahminde bulunulabilmektedir. Bu analizlerin yapılabilmesi için farklı devir sayılarının da sisteme tanımlanması gerekmektedir. Buradan yola çıkılarak deneysel sonuçlar doğrultusunda CFD analizlerinin yapılmasının daha doğru bir yaklaşım olacağı sonucuna ulaşılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda ön ve arka rotorun birbirlerine zıt bir şekilde yük altında dönebildiği kanat hücum açıları belirlenmiştir. Bu kanat açıları için devir sayıları ve rüzgâr hızları kayıt altına alınmıştır. CFD analizlerinde çift rotorlu sistemin çalıştığı ve deneysel olarak elimizde bulunan rüzgâr hızı ve devir sayıları kullanılarak analizler yapılmıştır. Bu aşamada ilk olarak geometrik modelleme yapılmıştır.

Geometrik Modelleme

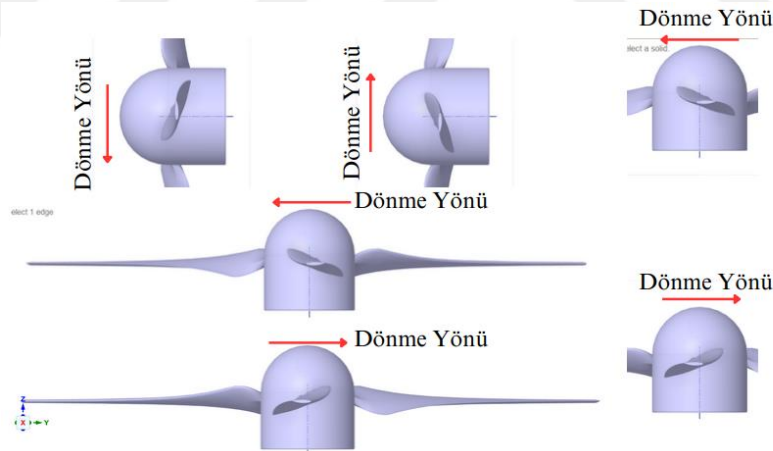
Deney düzeneğinin montajının tamamlanması ile birlikte ön ve arka rotor kanatları arasındaki mesafe belirlenmiştir. Buradan yola çıkılarak ön ve arka kanatlar arasındaki mesafe 1 metre olacak şekilde simülasyonlar yapılmıştır. Kanat tasarımları ilk olarak Solidworks yazılımı üzerinden hazırlanmıştır. Daha

sonrasında kanat tasarımları Ansys SpaceClaim yazılımına aktarılmış ve rotor tasarımları yapılmıştır. SpaceClaim yazılımındaki tasarım Şekil 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.3. Ön ve Arka rotor tasarımları

Ön ve arka rotorların birbirlerine zıt bir şekilde dönebilmesi için arka kanatlar ön kanatların simetriği olacak şekilde tasarlanmıştır. Kanatların yandan görünüşü Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4. Kanatların yandan görünüşü

Akış alanı Şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.5. Akış alanı

Çift rotorlu rüzgâr türbini için hesaplama alanı, akışın doğru bir şekilde temsil edilmesini ve sınır koşullarının sonuçlar üzerindeki etkilerini en aza indirilmesini sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Şekil 2.5'te gösterildiği gibi akış alanının boyutları $8D \times 4D \times 4D$ olarak belirlenmiştir. Bu ölçüler literatürde yer alan benzer çalışmalardan yola çıkılarak belirlenmiştir (Rosenberg ve ark., 2014). Burada D , rotor çapını ifade etmektedir. Türbin, giriş sınırına $2D$ mesafede konumlandırılmıştır. Bu mesafe düzgün akış gelişimi için yeterli alanı sağlamaktadır. Çıkış sınırı ise ikinci rotorun $6D$ arkasında yer almaktadır. Böylece iz etkisi dinamiklerinin etkili bir şekilde analiz edilmesi mümkün olmaktadır.

Giriş sınır koşulu, serbest akış rüzgâr hızına karşılık gelen sabit bir hız profili uygulanmıştır. Çıkış sınır koşulu olarak ise akışın serbestçe çıkışına izin vermek için basınç çıkışı koşulu uygulanmıştır. Yan ve üst sınırlarda duvar sınır koşulu uygulanmış olup, türbin yüzeyleri sabit olarak kabul edilmiş olup, etrafındaki akış hacmi hareketlendirilmiştir.

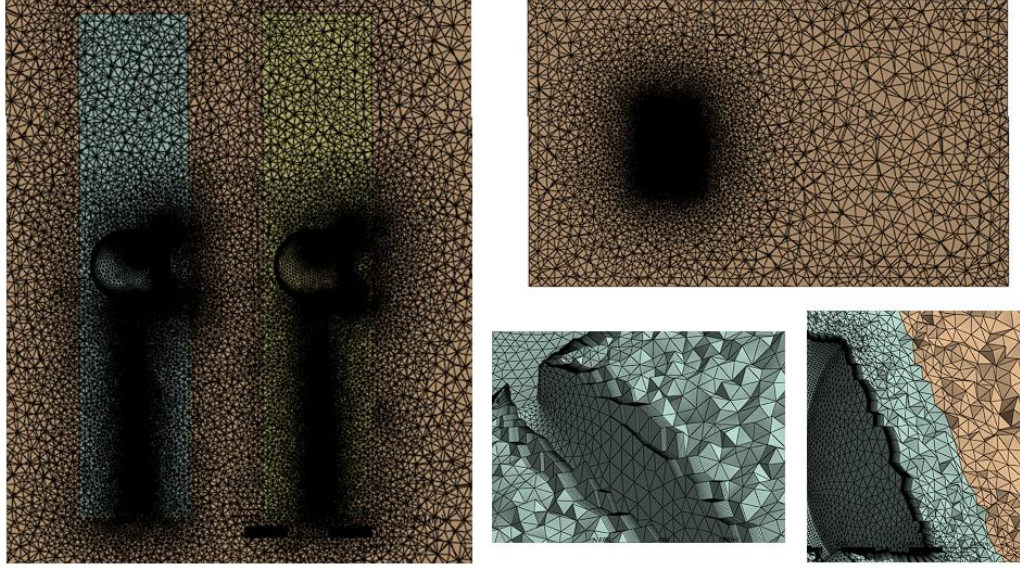
Ağ Yapısı

Tez çalışmasında çift rotorlu rüzgâr türbini modelinin aerodinamik performansını ve iz etkilerini doğru bir şekilde analiz edebilmek amacıyla yüksek kaliteli bir ağ yapısı oluşturulmuştur. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizleri için kullanılan ağ, türbin etrafındaki sınır tabakası akışı ve türbin kanadı üzerindeki yerel aerodinamik etkileri çözümlemek üzere tasarlanmıştır. Ağ yapısının oluşturulmasında hem çözüm hassasiyeti hem de hesaplama maliyeti göz önünde bulundurularak optimize edilmiş bir yapı tercih edilmiştir. Ağ özellikleri özet olarak Tablo 2.3'de sunulmuştur.

Tablo 2.3. Ağ yapısı (Mesh) özellikleri

Özellik	Değer
Eleman Sayısı	7.668.151
Düğüm Sayısı	1.963.760
Eleman türleri	Dörtyüzlü, prizmatik
Hedef eleman boyutu	$3 \times 10^{-3} \text{m}$
Maksimum Çarpıklık Değeri	0.95203
Ortalama Çarpıklık	0.2653
Minimum Ortogonal Kalite	0.26967
Maksimum Ortogonal Kalite	0.99757
Ortalama Ortogonal Kalite	0.73057
Inflation İlk Katman Genişliği	0.0005883 m
Inflation Katman Sayısı	20
Inflation Büyüme Oranı	1.05
Geçiş Oranı	0.272

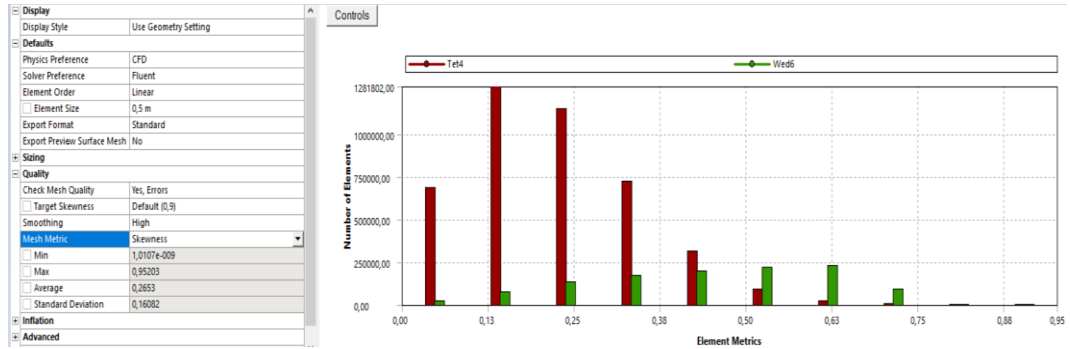
Ağ yapısında yaklaşık olarak 7.7 Milyon eleman ve 1.9 Milyon düğüm noktası bulunmaktadır. Türbin yüzeyine yakın bölgelerde eleman yoğunluğu artırılarak hassasiyet sağlanmıştır. Türbinden uzak bölgelerde ise daha geniş eleman boyutları kullanılmıştır. Türbin yüzeyi ve akış bölgesindeki karmaşık Dörtyüzlü yapıların doğru modellenebilmesi için farklı eleman tipleri kullanılmıştır. Dörtyüzlü elemanlar ağırlıklı olarak tercih edilmiştir ve akış alanında düzgün bir geçiş sağlamak adına prizmatik katmanlar kullanılmıştır. Oluşturulan ağ yapısının kesit görünüşleri Şekil 2.6'da sunulmuştur.



Şekil 2.6. Ağ yapısı kesit görüntüleri

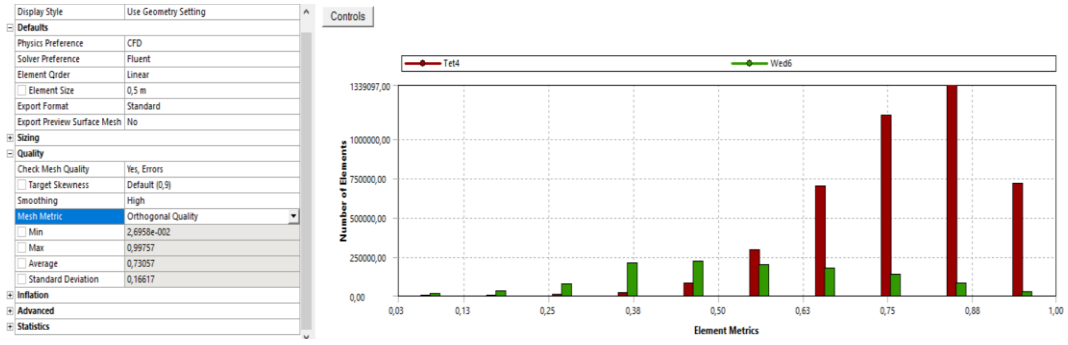
Ağ yapısının kalite parametreleri CFD analizlerindeki çözüm kararlılığı ve doğruluğunu sağlamak için detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir.

Ortalama çarpıklık değeri 0.2653 olarak elde edilmiştir. Çarpıklık değerinin 0.9'dan küçük olması, çözümün kararlı ve doğruluğunun yüksek olacağını göstermektedir. Çarpıklık değerleri ağ yapısının genel kabul gören CFD standartları ile uyumlu olduğunu ortaya koymaktadır (Hesami ve ark., 2022). Ağ yapısının çarpıklık değerinin dağılımı Şekil 2.7'de sunulmuştur.



Şekil 2.7. Ağ yapısının çarpıklık değeri dağılımları

Ağ yapısının orthogonal yapısı incelendiğinde, Ortalama orthogonal kalite 0.73057, minimum orthogonal kalite ise 0.26957 olarak ölçülmüştür. Orthogonal kalitenin 0.1 değerinden büyük ve 0.8 değerine yakın olması ağ yapısının yüksek kaliteli olduğunu göstermektedir. Ağ yapısının orthogonal kalitesi değerlerinin dağılımları Şekil 2.8'de sunulmuştur.



Şekil 2.8 Ağ yapısının orthogonal kalitesi değerlerinin dağılımları

Ağ yapısının kalitesi, türbin yüzeyindeki ve iz bölgelerinde akışı çözümleyebilmek için yeterli olduğunu göstermektedir. Çarpıklık ve Orthogonal kalite değerleri CFD analizlerinde kabul edilen sınırlarda yer almaktadır. Bu ağ yapısının, çift rotorlu rüzgâr türbini modelinin aerodinamik performansını doğru bir şekilde analiz etmek için uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Ağ yapısı y^+ değerleri ve ağ yapısı çözünürlüğü

CFD analizlerinde y^+ değeri, katı yüzeylere yakın bölgelerdeki ağ çözünürlüğünün yeterli olup olmadığına karar vermede kullanılan bir parametredir. Özellikle türbülanslı akış simülasyonlarında y^+ değeri, ağ yapısındaki ilk hücre merkezinin duvara olan mesafesini viskoz alt tabaka birimleri cinsinden hesaplayan boyutsuz bir parametredir (Szlivka ve ark., 2023). y^+ değeri Denklem 2.40 ile hesaplanmaktadır.

$$y^+ = \frac{\rho u_\tau y}{\mu} \quad 2.40$$

Burada, ρ akışkan yoğunluğunu, u_τ duvar kayma gerilimini, y duvara olan fiziksel mesafeyi, μ akışkan dinamik viskozitesini ifade etmektedir.

y^+ değeri, kullanılan türbülans modeline bağlı olarak ağın duvar yakınlarındaki akışı doğru bir şekilde çözümleyip çözümlemeyeceğini belirtmektedir. Tez çalışmasındaki sayısal analizler için, y^+ değerleri hesaplanmıştır. $y^+ < 1$ olması hedeflenmiştir. Böylelikle türbin kanatları etrafında ince bir ağ yapısının oluşması sağlanmıştır. Yapılan analizlerde y^+ değeri, minimum 0.0109, ortalama 0.355 olarak elde edilmiştir.

Ön kanat ve arka kanat için ortalama y^+ değerleri sırasıyla 2.359 ve 0.355 olarak elde edilmiştir. Arka kanat için elde edilen çözünürlük değeri, viskoz etkilerin doğrudan çözülmesine olanak sağlamaktadır. Arka türbin, ön kanadın iz

etkilerinden kaynaklı daha karmaşık akışa maruz kalmaktadır. Bu düşük y^+ değeri, akış ayrılmalarının ve türbülansın hassas bir şekilde çözülmesini sağlamaktadır. Ön kanadın y^+ değerinin biraz daha yüksek olması ise, ön rotor kanatlarının doğrudan rüzgâr ile etkileşime girmesi ve bu nedenle daha yüksek kayma gerilmesi ve türbülans yoğunluğu yaşamasından kaynaklanmaktadır. Her iki türbin için y^+ değerleri, düşük Reynolds sayılı modelleme için ideal aralıkta olup, $k-\omega$ SST modeli ile uyumludur (Yu & Thé, 2016).

Çözümleme

Bu bölümde, çift rotorlu rüzgâr türbini modeli için yapılan Hesaplamalı Akışkanla Dinamiği analizinin çözüm kurulumu aşamaları açıklanmaktadır. Kurulum ayarları, iz etkisi dinamiklerini ve türbin etrafındaki aerodinamik etkileri doğru bir şekilde çözülmesi için optimize edilmiştir. Kullanılan parametreler ve sınır koşulları, literatür taramalarına dayanarak belirlenmiştir.

Genel ayarlar, çözüm yönteminin temel yapılandırmasını içermektedir. Çift rotorlu türbin modelinin akışkanlar dinamiği problemleri, düşük hızlarda çalıştığı için basınç tabanlı çözücü (pressure-based solver) seçilmiştir. Ayrıca rotorlar arasındaki etkileşimin daha iyi bir şekilde anlaşılabilmesi için zamana bağlı olarak incelemelerde kullanılan “transient” analiz yöntemi tercih edilmiştir. Hız Referansı (Velocity Frame) CFD çözümlemelerinde genellikle akış alanı içinde belirli bir noktada veya yüzeyde hızın nasıl ölçüldüğünü belirtmektedir. CFD analizlerinde genellikle iki ana hız referans çerçevesi kullanılır: mutlak (absolute) ve göreceli (relative). Mutlak hız referans çerçevesinde, akışkan hızının sabit bir referansa, genellikle laboratuvar veya yer çerçevesine göre ölçüldüğü durumu ifade etmektedir. Göreceli hız referans çerçevesinde ise akışkanın hareketi bir objeye göre hızını ifade etmektedir. Rüzgâr türbinlerinde hız referansı olarak Mutlak Hız Referans Çerçevesi (Absolute) tercih edilmektedir. Genel ayarlar Tablo 2.4’te sunulmuştur.

Tablo 2.4. CFD çözümlemesinde kullanılan genel ayarlar

Parametre	Seçim
Çözücü Türü	Basınç Bazlı
Hız Referansı	Mutlak
Zaman Türü	Zaman Bağlı
Yerçekimi	Devre Dışı

Türbülans modeli olarak k-omega SST türbülans modeli seçilmiştir. Bu model çift rotorlu rüzgâr türbinlerinde rotorlar arasındaki etkileşimi ve türbin yüzeyindeki sınır tabakası akışını doğru bir şekilde modellenmesinde araştırmacılar tarafından tercih edilmektedir. Bu modelin avantajı hem sınır tabakasını hem de iz bölgesinde akışı hassas bir şekilde çözebilmesidir. Türbülans modeli parametreleri Şekil 2.9’da sunulmuştur.

Viscous Model

Model

- ☐ Inviscid
- ☐ Laminar
- ☐ Spalart-Allmaras (1 eqn)
- ☐ k-epsilon (2 eqn)
- ☒ k-omega (2 eqn)
- ☐ Transition k-kl-omega (3 eqn)
- ☐ Transition SST (4 eqn)
- ☐ Reynolds Stress (7 eqn)
- ☐ Scale-Adaptive Simulation (SAS)
- ☐ Detached Eddy Simulation (DES)
- ☐ Large Eddy Simulation (LES)

k-omega Model

- ☐ Standard
- ☐ GEKO
- ☐ BSL
- ☒ SST

k-omega Options

- ☐ Low-Re Corrections

Options

- ☐ Curvature Correction
- ☐ Corner Flow Correction
- ☐ Production Kato-Launder
- ☒ Production Limiter

Transition Options

Transition Model: none

Model Constants

Alpha*_inf: 1

Alpha_inf: 0.52

Beta*_inf: 0.09

a1: 0.31

Beta_i (Inner): 0.075

Beta_i (Outer): 0.0828

TKE (Inner) Prandtl #: 1.176

TKE (Outer) Prandtl #: 1

SDR (Inner) Prandtl #: 2

SDR (Outer) Prandtl #: 1.168

Production Limiter Clip Factor: 10

User-Defined Functions

Turbulent Viscosity: none

Scale-Resolving Simulation Options

- ☐ Stress Blending (SBES) / Shielded DES

OK Cancel Help

Şekil 2.9. Türbülans modeli ve model sabitleri

Türbinlerin dönme hareketini modelleyebilmek için türbin etrafındaki Zone (Bölge)’de ağ yapısı hareketi yöntemi kullanılmıştır. Her rotor için deneysel olarak elde edilen devir sayıları ağ yapısı hareketi olarak tanımlanmıştır. Dönme eksenini Z eksenine atanmıştır. Bölge ayarları Şekil 2.10’da sunulmuştur.

Şekil 2.10 Türbin etrafındaki bölgedeki ağ hareketi ayarları

Sınır koşulları, HAD analizlerinde türbinin çalıştığı ortam koşullarını doğru bir şekilde temsil edecek şekilde belirlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen rüzgâr hızı değerleri girdi parametresi olarak tanımlanmıştır. Türbülans şiddeti olarak %5 ve Türbülans Viskozite Oranı 10 olarak tercih edilmiştir. İz akış bölgelerindeki zamana bağlı akış dinamiklerini çözmek için sabit zaman adımlı bir çözüm yöntemi tercih edilmiştir. Yaklaşık her bir durum için 15.000 iterasyon çözümleme yapılmıştır. Zaman ilerlemesi ayarları Tablo 2.5'te sunulmuştur.

Tablo 2.5. CFD Zaman ilerlemesi ayarları

Parametre	Değer
Zaman Adımı (Time Step)	0,001 s
Zaman Adımı Sayısı	750
Maksimum İterasyon/Adım	20

Çözüm yöntemi olarak SIMPLE algoritması kullanılmıştır. SIMPLE algoritması düşük Mach sayılarında kararlı çözümler sunmaktadır ve iz dinamiklerinin çözümlemelerinde ideal bir seçimdir. Çözüm yönteminde kullanılan ayrıklaştırma parametreleri Tablo 2.6'te verilmiştir.

Tablo 2.6. Çözüm yönteminde kullanılan ayrıklaştırma türleri

Değişken	Ayrıklaştırma Türü
Basınç	İkinci Derece
Momentum	İkinci Derece Yukarı Akış
Türbülans Kinetik Enerjisi (k)	İkinci Derece Yukarı Akış
Türbülans Dağılım Hızı (ω)	İkinci Derece Yukarı Akış

Ayrıklaştırma, fiziksel denklemleri, sayısal yöntemler ile çözülebilir hale getirmek için sürekli bir alandan ayırık bir alana dönüştürme işlemidir. Bu işlem CFD hesaplamalarında akışkanlar mekaniğine ait süreklilik, momentum ve enerji denklemlerinin diferansiyel formülasyonlarını sayısal formda ifade etmek için yapılmaktadır. Ayrıklaştırma, iki temel bileşene ayrılmaktadır: Uzaysal Ayrıklaştırma ve Zamana Bağlı Ayrıklaştırma. Bu tez çalışmasında Uzaysal Ayrıklaştırma yöntemi kullanılmıştır. Uzaysal Ayrıklaştırma sürekli bir alanın belirli bir ağ yapısına bölünmesi durumudur. Bu işlem, diferansiyel denklemleri her bir hücre veya eleman için yaklaşık olarak çözülmesini sağlamaktadır. Birinci Derece yukarı Akış, akış yönüne bağlı olarak çözüm yapmaktadır. İkinci Derece Yukarı Akış'ta ise çözüm, birinci dereceden daha hassas ve doğruluk oranı daha yüksektir. Hem yukarı hem de aşağı akış değerlerini dikkate almaktadır.

Artık İzleme, CFD çözümlemelerinin doğruluğunu ve kararlılığını sağlamak için kullanılan bir yöntemdir. Çözüm sürecinde, doğrusal olmayan denklemler iteratif olarak çözülür ve her iterasyonda çözümün ne kadar ilerlediğini belirlemek için artıklar hesaplanır. Bu çalışmada, artık kriteri 10^{-6} belirlenmiş ve her parametre bu değerin altına inene kadar çözüm devam ettirilmiştir. Analiz sırasında izlenen denklemler ve bu denklemler için yakınsama kriteri Tablo 2.7'da sunulmuştur.

Tablo 2.7. Artık İzleme ve Yakınsama Kriteri Parametreleri

Denklem	İzleme	Yakınsama Kriteri
Süreklilik (Continuity)	Evet (Active)	10^{-6}
X-Hız Bileşeni (X-Velocity)	Evet (Active)	10^{-6}
Y-Hız Bileşeni (Y-Velocity)	Evet (Active)	10^{-6}
Z-Hız Bileşeni (Z-Velocity)	Evet (Active)	10^{-6}
Türbülans Kinetik Enerjisi (k)	Evet (Active)	10^{-6}
Türbülans Dağılım Hızı (ω)	Evet (Active)	10^{-6}

2.3 Materyal

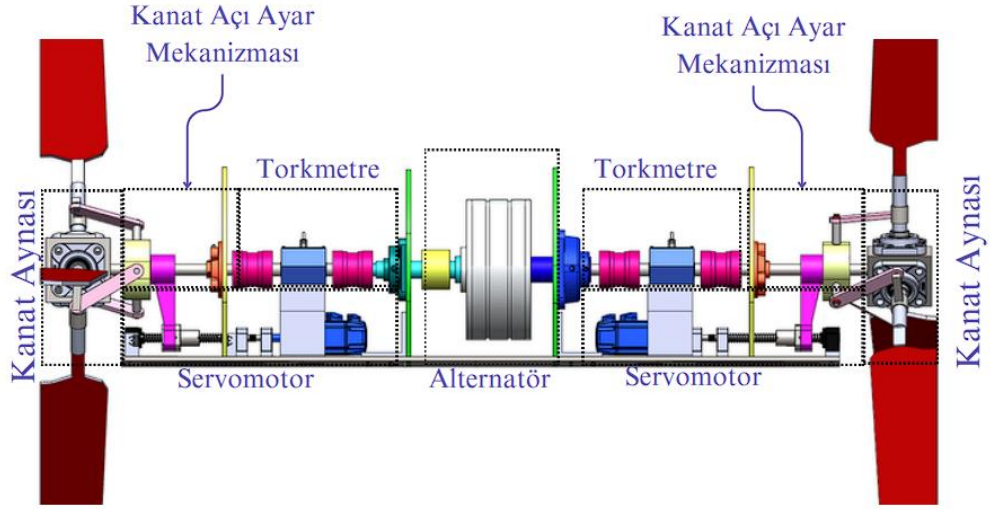
Bu bölümde zıt devinimli çift rotorlu rüzgâr türbinleri üzerinde yapılan sayısal ve deneysel araştırmalarda kullanılan malzemeler, bileşenler ve ekipmanlar detaylı olarak açıklanmaktadır. Bu kapsamda, çift rotorlu rüzgâr türbinlerinde kullanılmak üzere tasarlanan ve imal edilen kanatlar, alternatör ve şaftlar gibi temel bileşenlerin mekanik ve yapısal özellikleri detaylandırılmıştır. Ayrıca deney düzeneğinde veri almakta kullanılan test ekipmanlarının teknik özellikleri, hassasiyetleri, rüzgâr tüneli sınırları gibi bilgiler sunulmuştur.

2.3.1 Deney Düzeneği

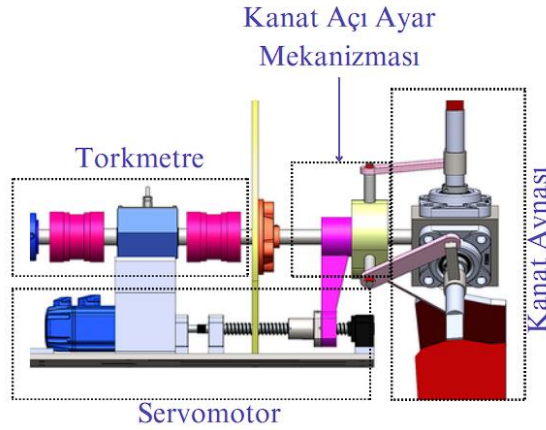
Bu bölümde çift rotorlu rüzgâr türbini testleri için hazırlanan deney düzeneğinin detayları görseller ile sunulacaktır. Deney düzeneği 4 temel başlık altında detaylandırılabilir.

1. Alternatör: Bu bölüm alternatör, alternatörü plakaya sabitleyen gövde plakaları, rulmanlar ve kayar yüzükten (Slipring) oluşmaktadır.
2. Kanatlar ve Açık Kontrol Mekanizmaları: Bu bölümde kanat aynası, kanat bağlantı parçaları, kanatlar, kanat açısı ayar mekanizması ve rulmanlardan oluşmaktadır.
3. Ölçüm ekipmanları: Bu bölümde çift rotorlu sistemleri değerlendirmede kullanılan ölçüm ve test ekipmanları yer almaktadır. Anemometre, torkmetre, takometre, enerji analizörü, yük ünitesi ve bilgisayar yer almaktadır.
4. Açık Döngülü Rüzgâr Tüneli: Bu bölümde rüzgâr fanları ve frekans invertörlerinden oluşmaktadır.

Çift rotorlu rüzgâr türbini deney setinin yandan görünüşü Şekil 2.11 ve tek bir rotor üzerinde ekipmanların gösterildiği durum Şekil 2.12’te sunulmuştur.

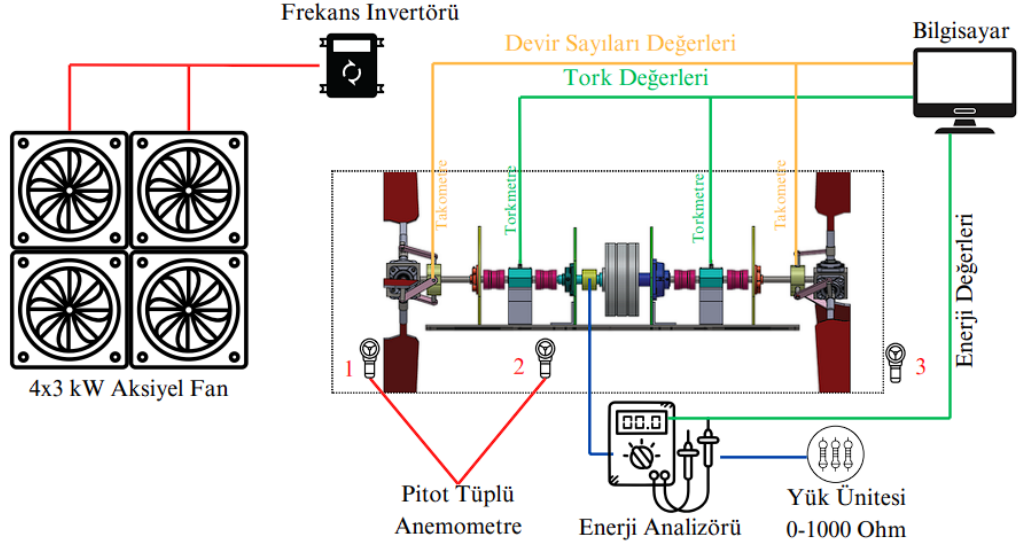


Şekil 2.11. Çift Rotorlu Rüzgâr Türbini Deney Setinin Yandan Görünüşü ve Bileşenleri



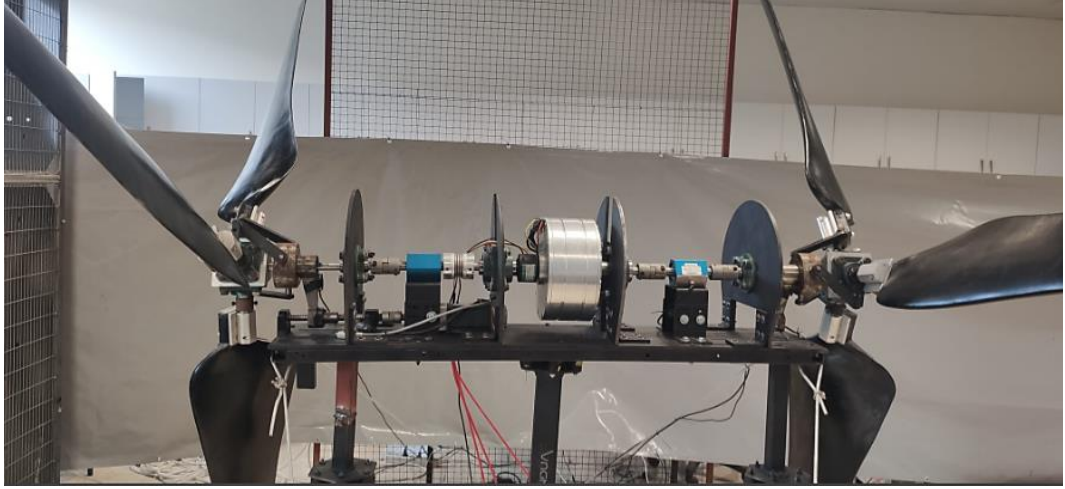
Şekil 2.12. Deney düzeneği bağlantı şeması

Öndeki ve arkadaki kanatlar ayna diye tabir edilen, kanat bağlantı aparatına bağlanmaktadır. Üçgen olarak tasarlanan kanat bağlantı aynasının içerisinde bir mil geçmektedir. Öndeki kanatların bağlandığı aynadan geçen mil alternatörün statoruna, arkadaki kanatların bağlandığı aynadan geçen mil ise alternatörün rotoruna bağlanmıştır. Kanat bağlantı aynasının hemen arkasında açısı kontrolünü sağlayan ve içinde servomotor, vidalı mil ve bağlantı kolu bulunan ekipman yer almaktadır. Bu tasarım tez kapsamında yapılmış olup, özgün bir tasarımıdır. Öndeki ve arkadaki kanatlardaki torkları ölçebilmek adına mil üzerine torkmetreler yerleştirilmiştir. Deney düzeneğinde diğer ekipmanların da gözüktüğü deney düzeneği sistem şeması Şekil 2.13'te sunulmuştur.



Şekil 2.13. Çift Rotorlu Rüzgâr Türbini Deney Düzenesinde Kanat Açısı Ayar Mekanizması ve Bileşenleri

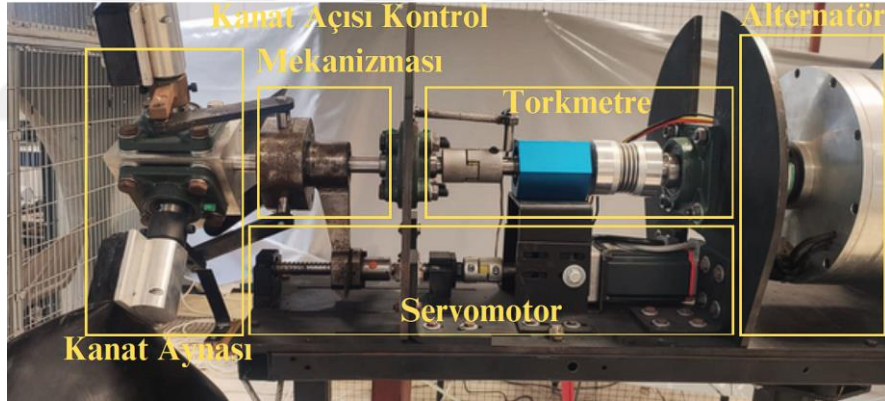
Deney düzeneğinin imalat sonrası görseli ise Fotoğraf 2.5 ve Fotoğraf 2.6 ve Fotoğraf 2.7 'te sunulmuştur.



Fotoğraf 2.5. Deney düzeneğinin imalat sonrası görseli (yandan görünüş)



Fotoğraf 2.6. Deney düzeneğinin imalat sonrası görseli (perspektif)



Fotoğraf 2.7. Deney düzeneğinin imalat sonrası görseli (açıklamalı görsel)

Deney düzeneği ile ilgili bilgiler temel olarak bu başlık altında verilmiştir. Sonraki bölümlerde alternatör, kanatlar, ölçüm ekipmanları ve diğer mekanik ekipmanların tasarım, imalat ve montaj detayları sunulmuştur.

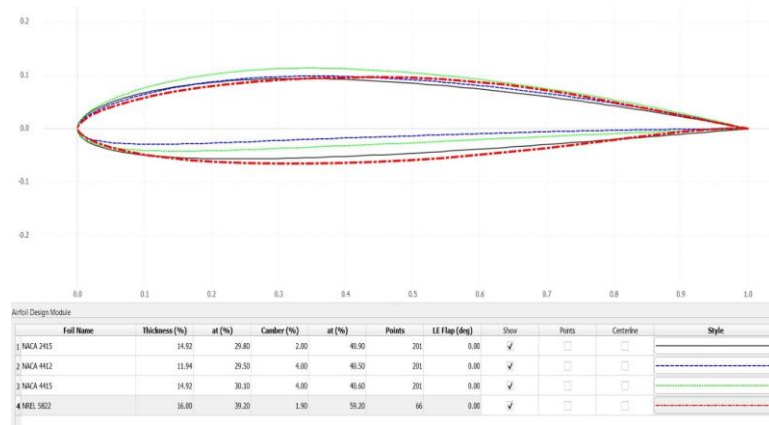
2.3.2 Kanat Tasarımı ve İmalatı

Araştırmacılar, rüzgârdan maksimum enerji elde etmek amacıyla farklı kanat geometrileri üzerinde çeşitli çalışmalar yapmış ve kanat verimliliğini artırmak için farklı optimizasyon yöntemleri geliştirmiştir (Alaskari ve ark., 2019; Altmimi ve ark., 2022; Deghoum ve ark., 2023). Rüzgâr türbinlerinin verimliliği, kanatların

rüzgâr enerjisini dönüştürme kabiliyetiyle doğrudan ilişkilidir ve rüzgâr hızı, uç hız oranı, Reynolds sayısı, profil geometrisi, kanat sayısı ve uzunluğu gibi faktörlerden etkilenmektedir.

Kanat tasarımları ve simülasyonlarında birçok farklı yazılım kullanılmaktadır. Ansys Fluent, QBlade, FAST ve Blade Comp gibi yazılımlar endüstriyel uygulamalarda ve araştırmacılar tarafından sıklıkla tercih edilmektedir. Literatürde, QBlade yazılımı ile analiz edilen ve simüle edilen kanatların, test istasyonlarında elde edilen deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında, simülasyon sonuçlarının yüksek oranda deneysel verilerle uyumlu olduğu belirlenmiştir (Alaskari ve ark., 2019; Deghoum ve ark., 2023; Mahmuddin, 2017). QBlade, yatay ve dikey eksenli rüzgâr türbini kanat tasarımı, simülasyonu ve aerodinamik hesaplamaları için kapsamlı çözümler sunan açık kaynaklı bir yazılımdır. QBlade yazılımında kanat optimizasyonunda Betz (Betz, 1926) ve Schmitz (Galuert) (Schmitz, 1955) teorileri kullanılmaktadır.

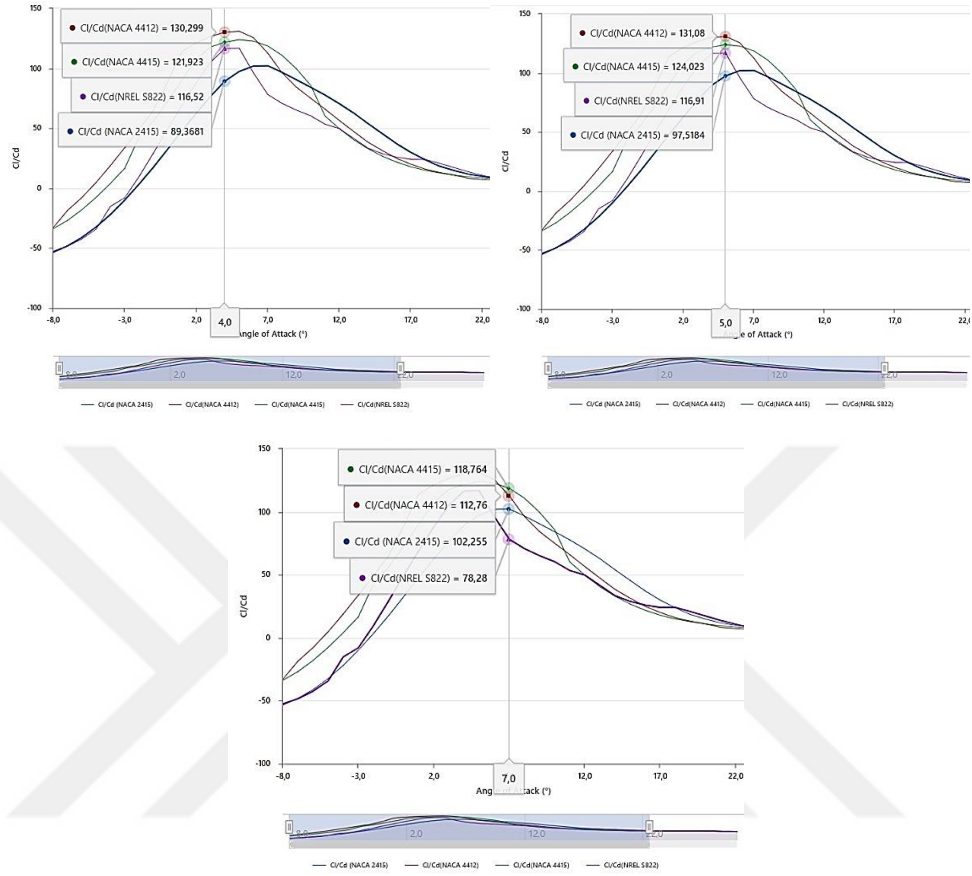
Yapılan tez çalışmasında 2 kW maksimum güç değerine sahip bir rüzgâr türbini için farklı kanat profilleri ve optimizasyon yöntemleri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda belirlenen kanat tasarımının imalatı gerçekleştirilmiştir. Kanat profili olarak özellikle küçük ölçekli rüzgâr türbinlerinde tercih edilen NACA 4412, NACA 4415, NACA 2415 ve NREL s822 profilleri incelenmiştir. Bu kanat profillerinde Betz ve Schmitz optimizasyon yöntemleri uygulanarak karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Kullanılan kanat profilleri ve kesitleri Fotoğraf 2.8’te sunulmuştur.



Fotoğraf 2.8. İncelenen kanat profilleri ve kesit görüntüleri

Kanat profili tasarımlarında optimizasyon yapılabilmesi için, kanat profillerinin maksimum kaldırma-sürüklenme oranına (C_l/C_d) sahip olduğu hücum

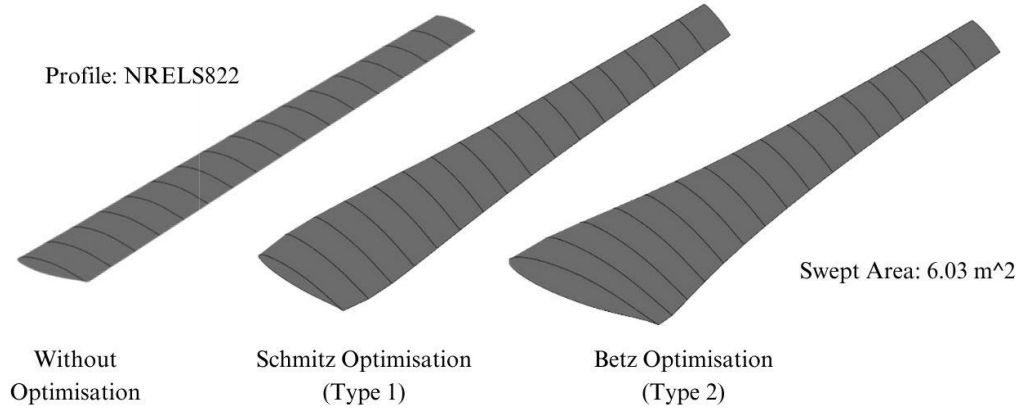
açıları belirlemek gerekmektedir. Kaldırma-Sürüklenme oranı kanat profillerinin verimliliğini ifade etmektedir. Kanat profillerinin farklı hücum açılarındaki Kaldırma-Sürüklenme Oranları Şekil 2.14’te sunulmuştur.



Şekil 2.14. Kanat profillerinin farklı hücum açılarındaki kaldırma-sürüklenme oranları

Şekil 2.14’te yer alan Kaldırma-Sürüklenme katsayıları incelendiğinde NACA 4412, NACA 4415 ve NREL S822 kanat profillerinin 5°’de NACA 2415 kanat profilinin ise 7°’de maksimum Kaldırma-Sürüklenme katsayısına ulaştığı görülmüştür. Bu değerler kanatların optimize edilmesinde kullanılmaktadır.

Yapılan çalışmada, optimizasyon uygulanmayan kanat tasarımı, Schmitz optimizasyonu ve Betz optimizasyonu kullanılan kanat tasarımı karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Dört farklı kanat profili için üç farklı yöntem uygulanarak toplam 12 durum analiz edilmiştir. Optimizasyon yöntemleri arasındaki farklılıkların daha iyi anlaşılabilmesi için NREL S822 kanat profiline ait tasarımlar Fotoğraf 2.9’da sunulmuştur



Fotoğraf 2.9 NREL S822 için farklı optimizasyon yöntemlerine göre kanat tasarımları

2 kW kapasiteli rüzgâr türbini için kanat uzunluğu 1.2 metre olarak belirlenmiştir (Ozbek ve ark., 2024). Her bir tasarım için kord uzunlukları, burulma açıları Tablo 2.8’de sunulmuştur. Kanat tasarımlarında önemli bir diğer parametre ise kanat uç hız (TSR) oranlarıdır. Kanat uç hız oranının artmasıyla kanatlar küçülmekte ve istenilen pik güce daha yüksek rüzgâr hızlarında ve devir sayılarında ulaşabilmektedir. Ülkemizdeki ortalama rüzgâr hızları dikkate alındığında, kanat uç hız oranı tüm tasarımlarda 5 olarak belirlenmiştir. Yapılan simülasyon sonuçları karşılaştırmalı olarak Şekil 2.15’te sunulmuştur.

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, TSR oranının 4 olduğu durumda NACA 4412 profili ve Schmitz optimizasyonuna sahip kanadın en yüksek enerji çıktısını sağladığı belirlenmiştir. TSR 5, TSR 6 ve TSR 7 değerlerinde ise NREL S822 kanat profili ve Schmitz optimizasyonu kullanılan kanat tasarımının en yüksek güç çıktısını elde ettiği gözlemlenmiştir. NACA 4412 kanat profili, düşük TSR oranlarında yüksek güç katsayılarına ulaşsa da kanat tasarımındaki yüzey artışı nedeniyle imalat maliyetlerini artırmakta ve üretim sürecini zorlaştırmaktadır. Genel olarak, NREL S822 kanat profilinin düşük hızda çalışan rüzgâr türbinleri için daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

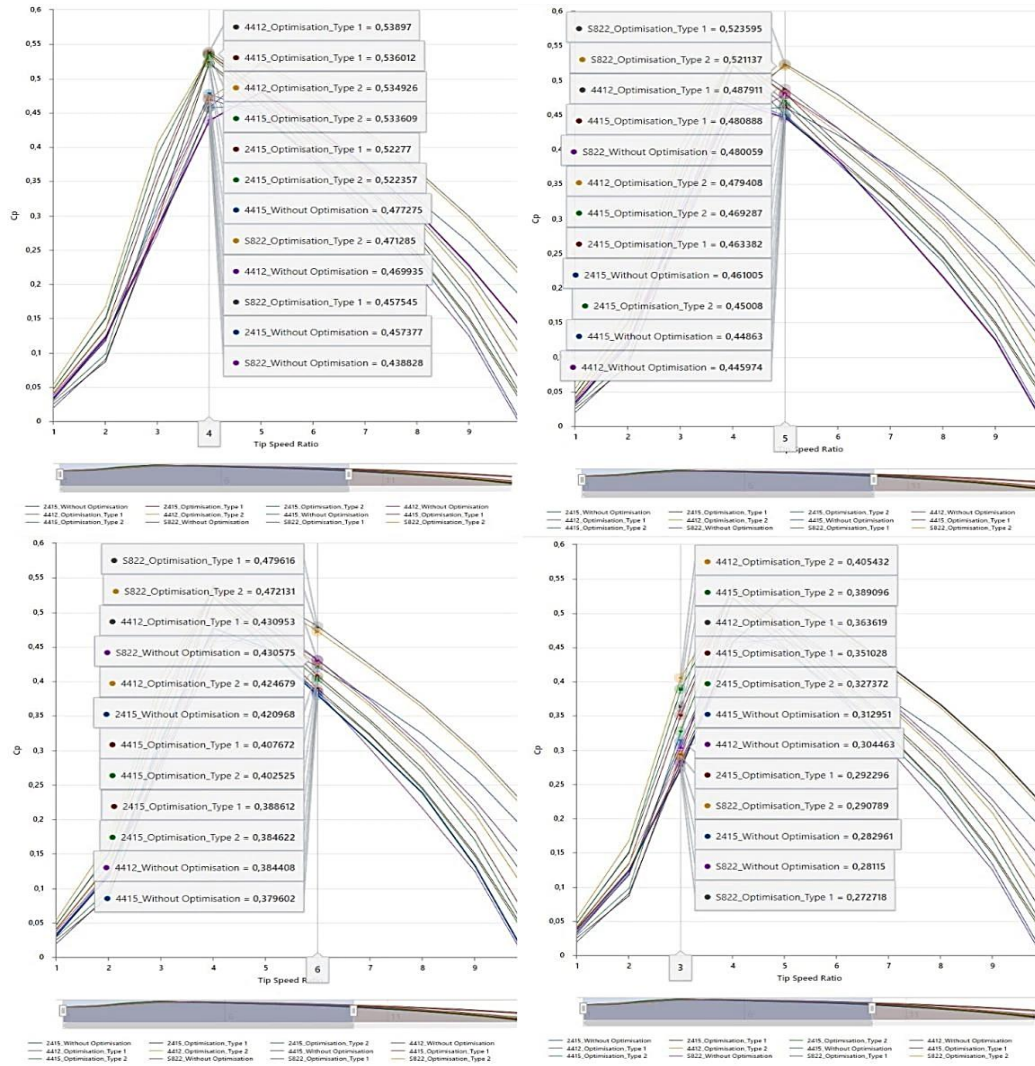
Buradan yola çıkılarak tez çalışmasında NREL S822 kanat profilinde Schmitz optimizasyon yöntemi uygulanmış kanat tasarımının kullanılmıştır.

Tablo 2.8. Kanatların farklı optimizasyon yöntemlerine göre kord uzunlukları ve burulma açıları

Konum (m)	NACA 4412						NACA 4415					
	Optimizasyonsuz		Tip 1		Tip 2		Optimizasyonsuz		Tip 1		Tip 2	
	Kord (m)	Burulma (°)	Kord (m)	Burulma (°)	Kord (m)	Burulma (°)	Kord (m)	Burulma (°)	Kord (m)	Burulma (°)	Kord (m)	Burulma (°)
0,00	0,20	0,00	0,28	29,17	0,53	38,39	0,20	0,00	0,27	27,17	0,52	37,39
0,08	0,20	0,00	0,29	23,56	0,45	29,31	0,20	0,00	0,28	22,56	0,44	28,31
0,15	0,19	0,00	0,28	19,00	0,39	22,69	0,19	0,00	0,27	18,00	0,38	21,69
0,23	0,19	0,00	0,27	15,32	0,34	17,77	0,19	0,00	0,26	14,31	0,33	16,76
0,30	0,18	0,00	0,25	12,33	0,30	14,01	0,18	0,00	0,24	11,32	0,29	13,01
0,38	0,18	0,00	0,23	9,89	0,26	11,08	0,18	0,00	0,22	8,88	0,26	10,08
0,45	0,17	0,00	0,21	7,87	0,24	8,74	0,17	0,00	0,20	6,86	0,23	7,74
0,53	0,17	0,00	0,20	6,18	0,22	6,84	0,17	0,00	0,19	5,18	0,21	5,84
0,60	0,16	0,00	0,18	4,75	0,20	5,26	0,16	0,00	0,18	3,75	0,19	4,26
0,68	0,16	0,00	0,17	3,53	0,18	3,93	0,16	0,00	0,16	2,53	0,18	2,93
0,75	0,15	0,00	0,16	2,48	0,17	2,79	0,15	0,00	0,15	1,48	0,16	1,79
0,83	0,15	0,00	0,15	1,57	0,16	1,82	0,15	0,00	0,14	0,56	0,15	0,82
0,90	0,14	0,00	0,14	0,77	0,15	0,97	0,14	0,00	0,13	-0,23	0,14	-0,02
0,98	0,14	0,00	0,13	0,06	0,14	0,23	0,14	0,00	0,13	-0,95	0,13	-0,76
1,05	0,13	0,00	0,12	-0,57	0,13	-0,42	0,13	0,00	0,12	-1,57	0,12	-1,42
1,13	0,13	0,00	0,12	-1,14	0,12	-1,01	0,13	0,00	0,11	-2,14	0,12	-2,03
1,20	0,12	0,00	0,11	-1,64	0,12	-1,53	0,12	0,00	0,11	-2,64	0,11	-2,53

Konum (m)	NACA 2415						NREL S822					
	Optimizasyonsuz		Tip 1		Tip 2		Optimizasyonsuz		Tip 1		Tip 2	
	Kord (m)	Burulma (°)	Kord (m)	Burulma (°)	Kord (m)	Burulma (°)	Kord (m)	Burulma (°)	Kord (m)	Burulma (°)	Kord (m)	Burulma (°)
0,00	0,20	0,00	0,29	26,17	0,53	35,39	0,20	0,00	0,30	26,30	0,50	33,03
0,08	0,20	0,00	0,29	20,56	0,46	26,31	0,20	0,00	0,29	20,34	0,41	24,16
0,15	0,19	0,00	0,28	16,00	0,39	19,69	0,19	0,00	0,27	15,77	0,34	18,07
0,23	0,19	0,00	0,27	12,31	0,34	14,77	0,19	0,00	0,25	12,25	0,93	13,71
0,30	0,18	0,00	0,25	9,32	0,30	11,01	0,18	0,00	0,22	9,49	0,26	10,47
0,38	0,18	0,00	0,23	6,88	0,27	8,08	0,18	0,00	0,20	7,30	0,23	7,98
0,45	0,17	0,00	0,21	4,86	0,24	5,74	0,17	0,00	0,19	5,53	0,20	6,02
0,53	0,17	0,00	0,20	3,18	0,22	3,84	0,17	0,00	0,17	4,07	0,18	4,43
0,60	0,16	0,00	0,18	1,75	0,20	2,26	0,16	0,00	0,16	2,86	0,17	3,20
0,68	0,16	0,00	0,16	1,53	0,18	0,93	0,16	0,00	0,15	1,83	0,15	2,04
0,75	0,15	0,00	0,16	-0,51	0,17	-0,20	0,15	0,00	0,14	0,94	0,14	1,11
0,83	0,15	0,00	0,15	-1,43	0,16	-1,17	0,15	0,00	0,13	0,18	0,13	0,32
0,90	0,14	0,00	0,14	-2,23	0,15	-2,02	0,14	0,00	0,12	-0,47	0,12	-0,36
0,98	0,14	0,00	0,13	-2,94	0,14	-2,76	0,14	0,00	0,11	-1,06	0,11	-0,97
1,05	0,13	0,00	0,13	-3,57	0,13	-3,42	0,13	0,00	0,11	-1,58	0,11	-1,50
1,13	0,13	0,00	0,12	-4,13	0,12	-4,01	0,13	0,00	0,10	-2,04	0,10	-1,98
1,20	0,12	0,00	0,11	-3,64	0,11	-3,53	0,12	0,00	0,10	-2,46	0,10	-2,40

*Tip 1: Schmitz Optimizasyon Yöntemi Kullanılan; Tip 2: Betz Optimizasyon Yöntemi Kullanılan



Şekil 2.15. Farklı kanat tasarımları ve optimizasyon yöntemleri için Kanat Uç Hız Oranı (TSR)- C_p grafikleri

Kanat İmalatı

Kanat imalat süreçleri Şekil 2.16’da sunulmuştur. Tek rotorlu rüzgâr türbinlerinde tek bir kanat modeli üzerinden kalıp oluşturulması ve kanatların imal edilmesi mümkün olmaktadır. Çift rotorlu zıt devinimli rüzgâr türbinlerinde, kanatların birbirlerine zıt bir devinim ile dönmesi kanatların birbirine göre simetrisinin ön ve arka rotorlara yerleştirilmesi ile mümkün olmaktadır. Bu nedenle yapılan tez çalışmasında ön ve arkadaki rotorlardaki kanatlar için iki model ve iki kalıp oluşturulmuş ve kanatlar imal edilmiştir. Ön ve arka rotorlarda aynı kanatların

kullanılması durumunda her iki rotorda aynı yönde dönecek ve alternatörde herhangi bir güç üretimi olmayacaktır.

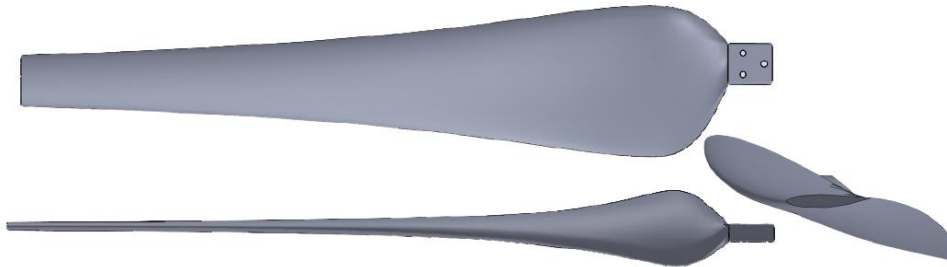


Şekil 2.16. Kanat imalat süreçleri

Çift rotorlu rüzgâr türbinlerinde kullanılmak üzere tasarım ve optimizasyonu QBlade yazılımı kullanılarak yapılan kanatların imalatları altı aşamadan oluşmuştur:

1. Aşama: Kanat tasarımının katı modelinin oluşturulması

QBlade yazılımı kanadı eş kesitlere bölerek, her bir kesit için kanat profillerinin ölçülerini ve konumlarını koordinat düzlemi olarak vermektedir. Bu aşamada her bir kanat kesiti kullanarak kanat katı modelinin oluşturulması gerekmektedir. Kanadın katı modelinin oluşturulması için Solidworks yazılımı kullanılmıştır. Solidworks yazılımı üzerinden oluşturulan kanat tasarımı Şekil 2.17’de sunulmuştur.



Şekil 2.17. Optimize edilmiş kanat tasarımının katı modeli

2. Aşama: Dilimleme ve 3D Baskı

Kanat katı modelinin oluşturulmasının ardından, üretim sürecine geçilebilmesi için uygun bir kalıp hazırlanması gerekmektedir. Bu aşamada çeşitli kalıp oluşturma yöntemleri bulunmaktadır. Bu çalışmada, kanat modeli BAİBU Mühendislik Fakültesi'nde bulunan Ender 3-V2 3D yazıcı kullanılarak üretilmiştir. Kanat tasarımı yazıcının baskı ölçüleri dikkate alınarak 7 parçaya bölünmüştür. Yazıcıda filament olarak ABG marka, 1.75 mm kalınlığında PETG filament tercih edilmiştir. Tablo 2.9'teki verilere göre, kalıp üretimi için PETG filamentin daha uygun olduğu tespit edilmiş ve bu nedenle tercih edilmiştir. Mühendislik uygulamalarında genellikle ABS filamentler tercih edilse de çalışmada PETG filament kullanılmıştır.

Tablo 2.9. PETG ve ABS Filamentlerinin karşılaştırılması

Özellik	PETG	ABS
Malzeme Yapısı	PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol), esnek ve dayanıklı bir termoplastiktir.	ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene), sert ve yüksek dayanıklılığa sahip bir mühendislik plastiğidir.
Baskı Kolaylığı	Daha kolay baskı alınabilir, düşük büzülme riski vardır.	Baskı esnasında daha fazla büzülme yapabilir, bu yüzden kapalı hazne tercih edilir.
Dayanıklılık	Yüksek darbe dayanıklılığına sahiptir, esneklik gösterir.	Yüksek sıcaklıklara dayanıklıdır, ancak darbe dayanıklılığı PETG kadar iyi değildir.
Isı Dayanımı	75-80°C'ye kadar dayanıklıdır.	100-110°C'ye kadar dayanıklıdır.
Kimyasal Dayanım	Asitler ve bazlara karşı dirençlidir, UV ışınlarına dayanıklıdır.	Kimyasal maddelere karşı dayanıklıdır ancak UV ışınlarına karşı hassastır.
Yüzey Kalitesi	Yüzey parlak ve şeffaf olabilir, düşük katman izi bırakır.	Mat yüzey sunar, ancak daha pürüzlü olabilir ve son işlem gerektirebilir.
Koku	Baskı sırasında kokusuzdur.	Baskı esnasında yoğun kimyasal koku yayabilir; iyi havalandırma gerektirir.
Esneklik	Orta düzeyde esnek, kırılmaya karşı dirençli.	Daha serttir ve kırılma riski yüksektir.
Kullanım Alanları	Prototipler, mekanik parçalar, şeffaf ve dayanıklı baskılar.	Mekanik parçalar, otomotiv uygulamaları, dayanıklı prototipler.
Baskı Sıcaklığı	220-250°C	230-260°C
Tabla Sıcaklığı	70-90°C	90-110°C

Fotoğraf 2.10'da 3D yazıcıdan alınan parçaların görselleri sunulmuştur.



Fotoğraf 2.10. Kanat modeli için 3D baskı ile alınan kanat parçaları

3. Aşama: Birleştirme ve Yüzey Hazırlık

Kanat modeli parçalarının imal edilmesinin ardından oluşturulan model üzerinden kalıp hazırlanabilmesi için pürüzsüz bir yüzey elde edilmesi gerekmektedir. Bu aşamada ilk olarak kanat parçaları çift karışımlı plastik yapıştırıcılar kullanarak yapıştırılmıştır. Kanatların yapıştırıldıktan sonraki görseli Fotoğraf 2.11’de sunulmuştur.



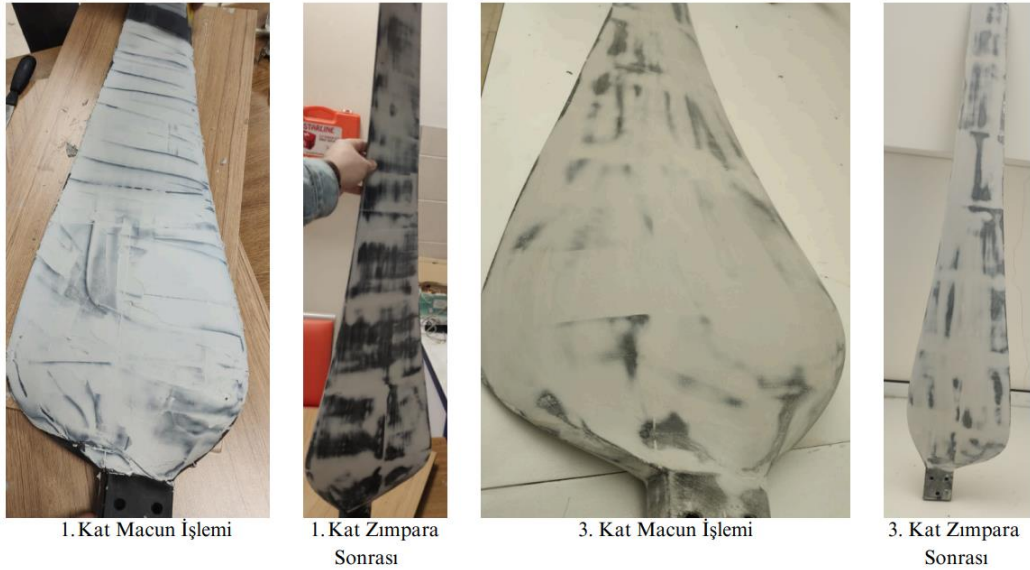
Fotoğraf 2.11. Modelin yapıştırıldıktan sonraki görseli

Modelin yapıştırılmasından sonra yüzeyin pürüzlülüğünü sağlamak adına 3 farklı zımpara (kum boyutları: 80, 180, 400) kullanarak pürüzsüz hale getirilmiştir (Fotoğraf 2.12).



Fotoğraf 2.12. Model yüzey hazırlama işlemleri-Zımparalama

Modelin ilk zımparalama işleminin bitmesinin ardından bütün yüzeye çelik macun uygulaması yapılmıştır. Toplamda 3 kat ince macun çekilmiştir ve her aşamada yüzey de ıslak zımparalama işlemi gerçekleştirilmiştir. Yapılan son işlem sonrasında model kalıp oluşturmaya uygun hale gelmiştir.



Fotoğraf 2.13. Model üzerinde yapılan çelik macun ve zımpara işlemleri

4. Aşama: Modelden Kalıp İmal Edilmesi

Bu aşamada en önemli olan noktalardan bir tanesi model yüzeyinin pürüzsüzlüğüdür. Önceki aşamalarda modelin pürüzlülüğü sağlanan modeller kullanılarak polyester kalıplar oluşturulmuştur. İlk olarak modellerin yüzeyi, kalıp ayırıcı vaks ile kaplanmıştır. Daha sonra yüzey polyester reçine ve fiberglas mat

kullanarak yapılmıştır. Reçine hazırlanan modele katman katman uygulanmaktadır. Her katmanın arasında fiberglas mat yerleştirilmiştir. Kalıpların katmanları, genellikle kalıbın sağlamlığını ve dayanıklılığını arttırmak için kalınlaştırılmıştır. Kanat tasarımındaki değişken burulma açıları ve kord uzunlukları nedeniyle kalıp iki parça halinde imal edilmiştir. Kalıp malzemesinin tamamen sertleşmesi için kürlleme aşaması gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık ve nem gibi çevresel koşullara bağlı olarak değişkenlik gösteren bu süreç sonunda model kalıptan ayrılmıştır. Sonrasında kalıp üzerinde pürüzler giderilmiş ve kalıp kullanıma hazır hale getirilmiştir (Fotoğraf 2.14).



Fotoğraf 2.14. Kalıp imalat süreçleri

5. Aşama: Kanat Ağırlığı Optimizasyonu

Rüzgâr türbini tasarımlarında, kanatların ağırlıklarının ve ağırlık merkezlerinin tüm kanatlar için eşit olması gerekmektedir. Bu iki parametrede farklılık oluşması durumunda, rotor devir sayısının artmasıyla titreşim ve salınım da artacak, bu da rüzgâr türbininin stabilitesini ve verimliliğini olumsuz yönde etkileyecektir. Ayrıca, miller üzerindeki dengesiz yükler, yüksek hızlarda deformasyona neden olabilir. Bu doğrultuda, yapılan çalışmada üretilen kalıplardan farklı kanatlar üretilmiş ve en uygun kanat imalatına karar verilmiştir. Bu aşamada, kanat bağlantı noktasının tamamının dolu olması, yalnızca kanat bağlantı noktalarındaki epoksi katmanlarının artırılması ve kanadın tamamının aynı kalınlıkta yapılması durumları karşılaştırılmıştır. Kanatların ağırlık merkezlerinin kanat bağlantı noktasından kanat boyunun 1/3'ü uzaklığında olduğu nokta ideal olarak literatürde ifade edilmiştir (Hansen, 2015). Kanatların ortalama ağırlıkları 2000 gr. olarak elde edilmiştir.

6. Aşama: Kanat İmalatları

Oluşturulan kalıp üzerine kalıp ayırıcı uygulanmıştır. Daha sonra fiberglas yerleştirilmiş ve üzerine polyester reçine sürülmüştür. Fırça ve rulo yardımıyla reçinenin fiberglas yüzeyine eşit şekilde yayılması sağlanmış ve bu işlem üç kez tekrarlanarak toplam üç katman oluşturulmuştur. Kanat bağlantı noktaları ise beş katmandan oluşmaktadır. Kanatlar kalıptan çıkarıldıktan sonra, gerekli bölgelere tek kat çelik macun ve zımpara uygulanarak pürüzsüz bir yüzey elde edilmiştir. Son olarak, kanatlar boyanmıştır. Kanat imalatı ile ilgili görseller Fotoğraf 2.15’de sunulmuştur.



Fotoğraf 2.15. Kanat imalat aşamaları ile ilgili görseller

2.3.3 Alternatör Tasarımı, İmalatı ve Montajı

Literatürdeki çift rotorlu rüzgâr türbinleri ile ilgili yapılan incelendiğinde çoğunlukla geleneksel rüzgâr türbinlerinde kullanılan alternatörlerin tercih edildiği görülmüştür. Bazı çalışmalarda öndeki ve arkadaki kanatlardan gelen torklar bir dişli sistem yardımıyla alternatör rotoruna aktarıldığı (Cai ve ark., 2024; Cho ve ark., 2017; Habash ve ark., 2011; Jung ve ark., 2005; Romanski ve ark., 2016); bazı çalışmalarda ön ve arkada iki farklı alternatörün kullanıldığı (Kanemoto & Galal, 2006; Wei ve ark., 2015); bazı çalışmalarda ise rotor ve statorun döndüğü (Kanemoto & Galal, 2006; Kubo ve ark., 2010; Ullah ve ark., 2024) görülmüştür.

Bu tez çalışmasında, özellikle düşük rüzgâr hızlarında daha fazla enerji üretebilen, zıt yönlerde dönen doğrudan sürüslü (direct-drive) çift rotorlu bir alternatör geliştirilmiştir. Tasarlanan çift rotorlu rüzgâr türbininde sabit mıknatıslı bir jeneratör (PMG) kullanılmıştır. Türbinin ön tarafındaki kanatların bağlı olduğu mil, dişli kutusu olmadan doğrudan jeneratörün rotoruna, arka kanatların bağlı

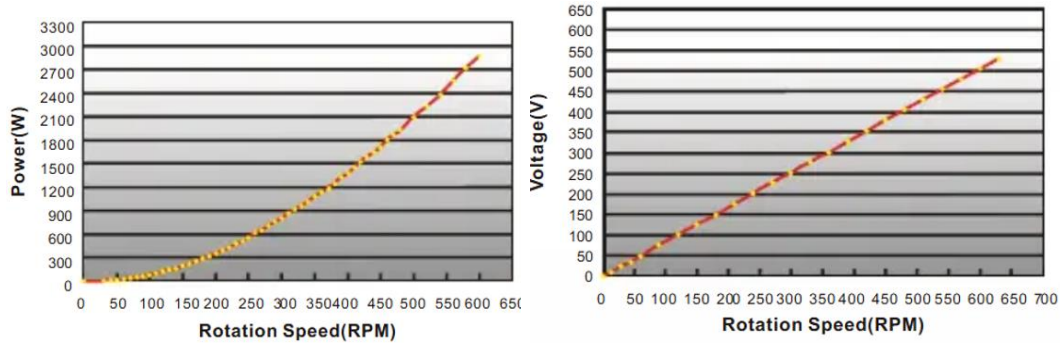
olduğu mil ise yine dişli kutusu olmadan jeneratörün statoruna bağlanmıştır. Kanat tasarımı sayesinde rotor ve statora bağlı miller zıt yönlerde dönecek, böylece jeneratörün rotoru ve statoru arasındaki bağıl hız artırılarak enerji üretim verimliliği yükseltilmiştir.

Alternatör sabit mıknatıslı olacak şekilde tercih edilmiştir. Alternatör Ginlong Technologies tarafından üretilen GL-PMG-1800 modeli tez kapsamında temin edilmiş ve deneylerde kullanılmıştır. Alternatörün teknik özellikleri Tablo 2.10’de verilmiştir.

Tablo 2.10. Alternatör teknik özellikleri

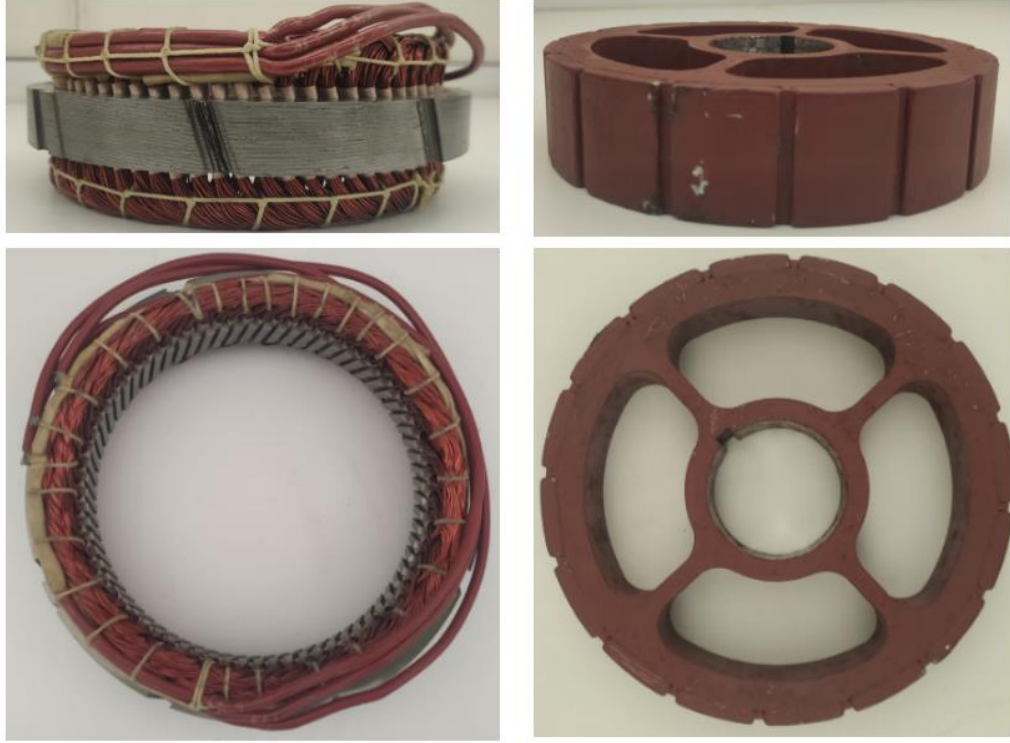
Özellik	Değer
Nominal Çıkış Gücü (W)	1800
Nominal Dönüş Hızı (RPM)	480
Doğrultulmuş DC Akım Nominal Çıkış (A)	6
Nominal Çıkış Torku (Nm)	44.5
Faz Direnci (Ohm)	0.5
Çıkış Tel Kesit Alanı (mm ²)	4
Çıkış Tel Uzunluğu (mm)	600
Yalıtım Sınıfı	H Sınıfı
Jeneratör Yapılandırması	3 Faz Yıldız Bağlantılı AC Çıkış
Başlangıç Torku (Nm)	<0.9 Nm

Alternatörün devir sayısına bağlı güç ve açık devre voltajındaki değişimi veren grafikler Şekil 2.18’de sunulmuştur.



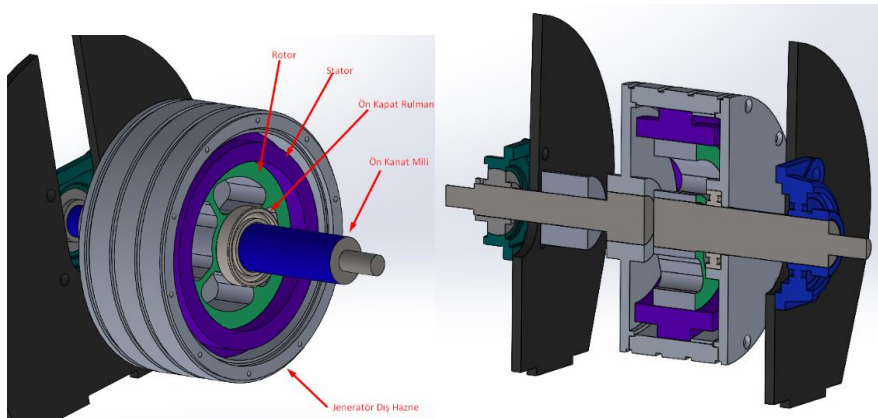
Şekil 2.18. Alternatörün devir sayısına bağlı güç ve açık devre voltajı grafikleri

Tez çalışmasında kullanılan alternatörün rotor ve statoru Fotoğraf 2.16 ‘de sunulmuştur.



Fotoğraf 2.16. Tez çalışmasında kullanılan PMG alternatörün rotor ve statoru

Doğrudan tahrikli sistemlerde alternatör rulmanlar kullanarak sabitlenmektedir. Bu nedenle alternatörün ve alternatör gövdesinin düşük ağırlıklarda olması gerekmektedir. Yapılan çalışmada alternatör gövdesi alüminyum malzemeden imal edilmiştir. Alternatör gövdesi, alternatör statoru ile sıkı geçme montajı sağlanmış ve birlikte dönmeleri sağlanmıştır. Alternatör bağlantısı kesit görünüşleri Şekil 2.19 verilmiştir.



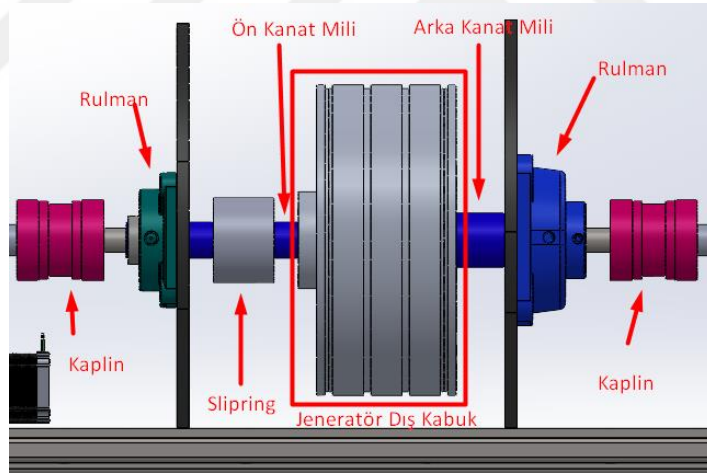
Şekil 2.19. Alternatör montajı kesit görünümü

Alternatör gövde imalatı aşamaları ve imalat sonrası görüntüler Fotoğraf 2.17’de sunulmuştur.



Fotoğraf 2.17. Alternatör gövde imalatı aşamaları ve imalat sonrası görüntüler

Alternatör gövde imalatının tamamlanmasının ardından ön ve arka rotorun milleri imal edilmiştir. Alternatörün kablolarının çıktığı kısımda kabloların alternatör ile birlikte dönmesine olanak sağlayan Kayma Halkası (Slipring)'na uygun çaplar seçilmiştir. Rüzgâr türbininin alternatör kısmının yandan görünüşü Şekil 2.20'da sunulmuştur.



Şekil 2.20. Alternatör tasarımının yandan görünüşü

Millerin imal edilmesi ile alternatör montajı yapılmıştır. Bu aşamada yapılan işlemler aşağıda sırayla belirtilmiştir (Fotoğraf 2.18).

1. Rulmanlar sıkı geçme olacak şekilde kapaklara monte edilmiştir.
2. Alternatör rotoru mili monte edilmiş ve bir yüzük ile mile tam olarak montajı sağlanmıştır.
3. Alternatörün rotor kısmı, kapak ile birleştirilmiştir.

4. Stator alternatör gövdesine sıkı geçme şekilde monte edebilmek için ilk olarak kabuk yüksek sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Ardından stator gövde içerisine yerleştirilmiş ve soğutma işlemine tabi tutulmuştur.
5. Ardından Stator, stator gövdesi, stator kapağı ve mil bağlantısı gerçekleştirilmiş, kablolar gövdeden dışarı çıkarılmıştır.



Fotoğraf 2.18. Alternatör Montaj Aşamaları

2.3.4 Diğer mekanik ekipmanlar

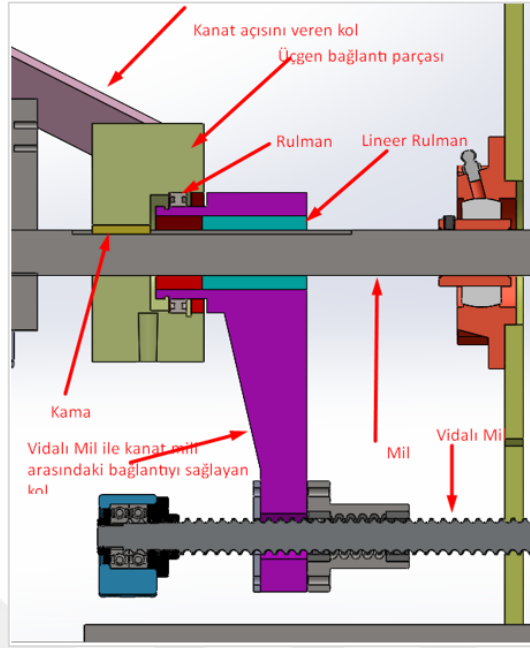
Bu bölümde, çift rotorlu rüzgâr türbini test düzeneğinde kullanılmak üzere tasarlanan ve imal edilen kanat bağlantı aynası, kanat açısı ayar mekanizması ve kanat montaj gövdesinin tasarımı, imalatı ve montajı hakkında bilgi verilecektir.

Kanat Hareket Mekanizması

Kanat açılarını ayarlamak için servomotor ve vidalı mil bağlantılı bir sistem tasarlanmıştır. Manuel olarak servomotor hareketi sağlanarak, kanat açılarının eşit şekilde ayarlanması mümkün kılınmıştır. Vidalı milin hareketi, mil ile bağlantılı kolun doğrusal hareketini sağlamaktadır. Bağlantı kolu içerisinde yer alan mil, hem dönme hareketi yapmakta hem de vidalı milden aktarılan tahrik ile ileri-geri doğrultuda hareket etmektedir. Bu doğrusal hareket, bağlantı kolunun içerisinde konumlandırılmış lineer rulman ile desteklenmiştir.

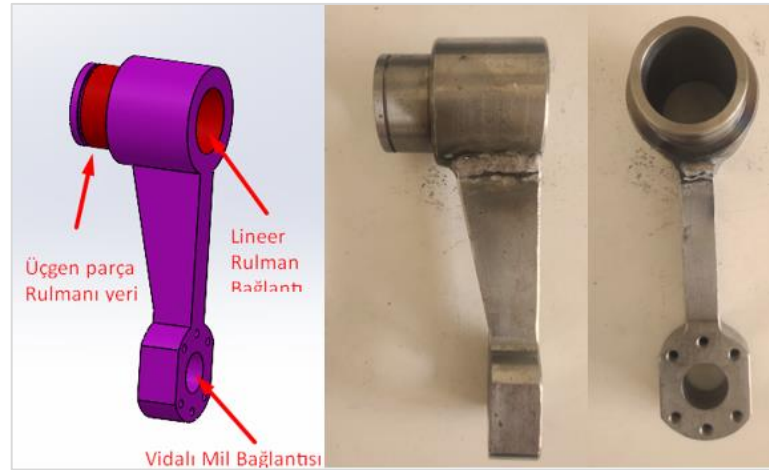
Bağlantı kolunun ucunda, kanat ile birlikte eşzamanlı dönmesini sağlamak amacıyla tasarlanmış üçgen bir bağlantı elemanı bulunmaktadır. Bu üçgen bağlantı elemanı, mile kama vasıtasıyla sabitlenmiş ve bağlantı kolu içerisindeki rulman ile entegre edilmiştir. Ayrıca, üçgen elemanın her iki yüzeyinde sekman yuvaları

oluşturularak, bağlantı kolunun hareketi ile uyumlu şekilde çalışması sağlanmıştır. Kanat açısı ayar mekanizması Şekil 2.21’te sunulmuştur.



Şekil 2.21. Kanat açısı ayar mekanizması kesiti

Vidalı mil ile kanat mili arasındaki bağlantıyı sağlayan kol tasarımı ve imalat sonrası görselleri Şekil 2.22’te sunulmuştur.



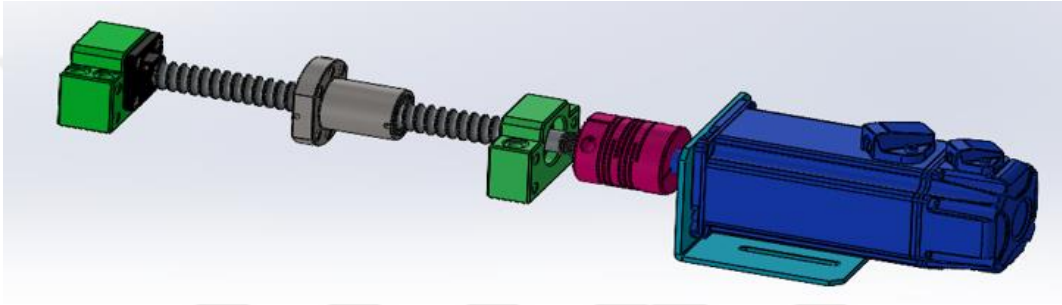
Şekil 2.22. Vidalı mil ile kanat mili arasındaki bağlantı kolu

Kanat ile birlikte dönecek olan üçgen parçanın tasarımı ve imalat sonrası görüntüleri Şekil 2.23’te sunulmuştur.



Şekil 2.23 Üçgen parça çizim ve imalat sonrası görüntüleri

Bu işlemlerin parçaların imatlatlarının tamamlanmasının ardından, vidalı mil bağlantıları ve montajı tamamlanmıştır. Vidalı mil bağlantısı tasarımı Şekil 2.24’de; vidalı mil bağlantısı imalat sonrası görseli Fotoğraf 2.19’da sunulmuştur.



Şekil 2.24. Vidalı mil bağlantısı tasarımı



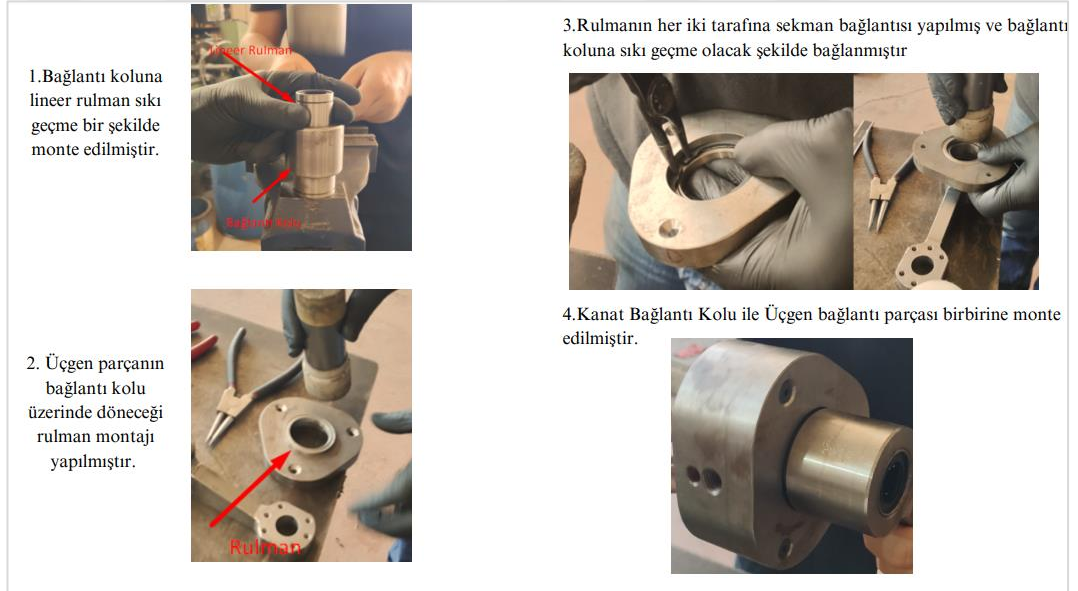
Fotoğraf 2.19. Vidalı mil bağlantısı imalat ve montaj sonrası görseli

Kanat milleri tasarıma uygun bir şekilde imal edilmiştir. Mil üzerinde açılan kama kanalı sayesinde kanatın ileri ve geri hareket etmesi sağlanmıştır. Şekil 2.23’te sunulan üçgen bağlantı parçasının içerisinde bulunan kama yuvasına yerleştirilen kama ile birlikte bu mil üzerinde hareket etmesi sağlanmıştır. Kanat mili tasarımı ve imalat sonrası görseli Fotoğraf 2.20’de sunulmuştur.



Fotoğraf 2.20. Ön ve arka kanatların mil tasarımları ve imalat sonrası görselleri

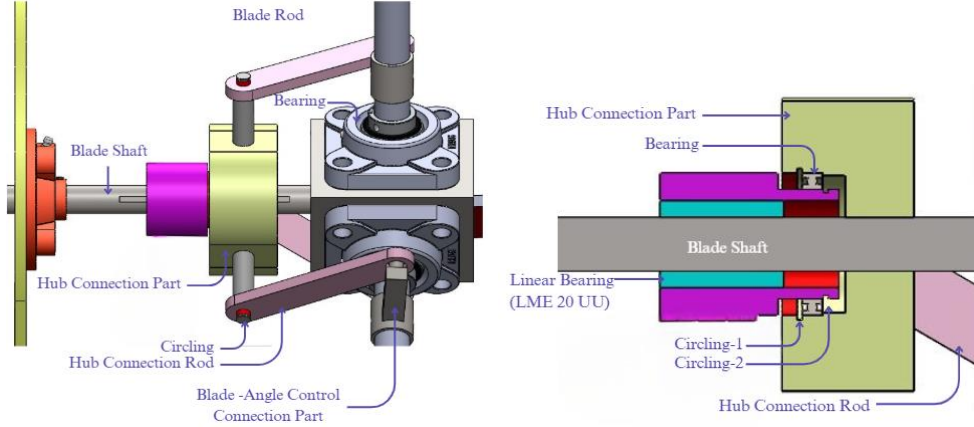
Kanat hareket mekanizmasının son parçasının montaj aşamaları Fotoğraf 2.21’de sunulmuştur.



Fotoğraf 2.21. Kanat hareket mekanizması kolu montaj aşamaları

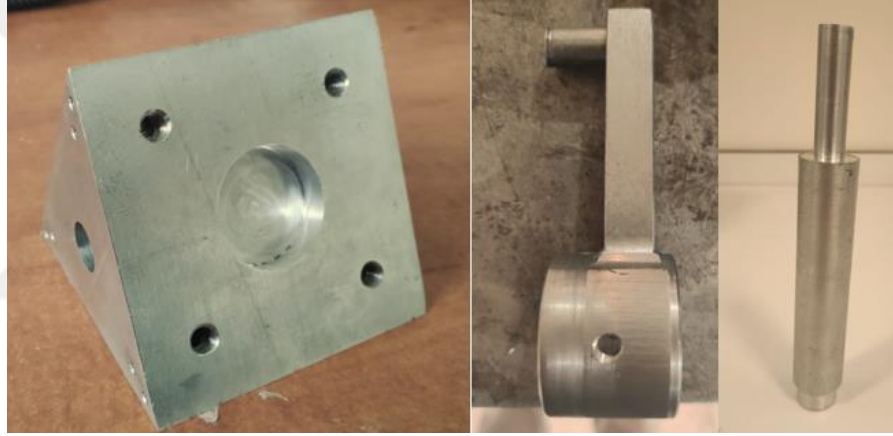
Kanat Bağlantı Aynası

Kanatların rüzgâr ile oluşturduğu dönme hareketini rotor miline aktaran mekanik ekipman, kanat aynası olarak adlandırılmaktadır. Tez kapsamında, bu bileşen için özgün bir tasarım geliştirilmiştir. Çalışmada önde ve arkada üçer kanat bulunacağından, kanat aynası üçgen formda tasarlanmıştır. Minimum ağırlık sağlamak amacıyla, malzeme olarak alüminyum tercih edilmiştir. Kanat ayna tasarımı ve kanat aynasının montaj sonrası tasarımı Şekil 2.25’de sunulmuştur.



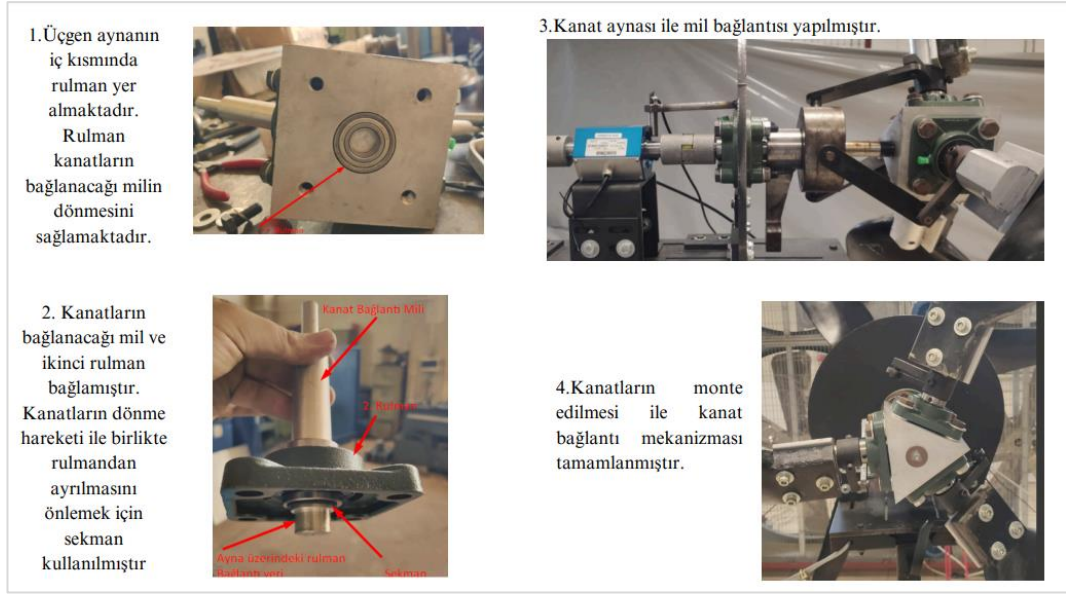
Şekil 2.25. Kanat ayna tasarımı ve kanat montajı tasarımı

Tasarımlar kapsamında imalatı yapılan ekipmanların imalat sonrası görüntüleri Fotoğraf 2.22’de sunulmuştur.



Fotoğraf 2.22. Kanat aynası ve kanat bağlantı ekipmanları imalat sonrası görselleri

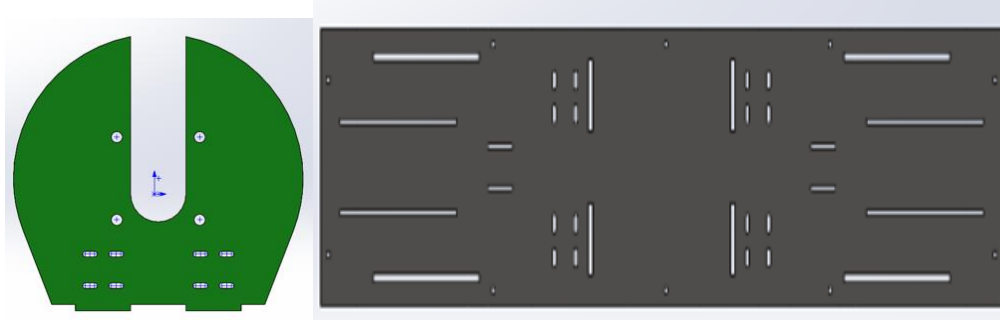
Kanat bağlantı aynası montaj aşamaları Fotoğraf 2.23’de sunulmuştur.



Fotoğraf 2.23. Kanat bağlantı aynası montaj aşamaları

Test Düzeneği Tabla ve Gövde Tasarımları

Deney düzeneğinde, alternatörün ve kanatların rulmanlar ile tasarlanan gövde plakalarına sabitlenmesi sağlanmıştır. Bu aşamada, alt plaka üzerine iki alternatör ve iki kanat bağlantısı için toplam dört adet gövde plakası tasarlanmış ve montajı gerçekleştirilmiştir. Alt tabla ve gövde plakaları tasarımları Şekil 2.26’de sunulmuştur.



Şekil 2.26. Deney düzeneği alt tabla ve gövde plakaları tasarımı

Tablalar 4 mm plakalardan lazer kesim işlemi ile imal edilmiştir. İmalat sonrası görselleri sunulmuştur. Tasarım aşamasında alt tabla üzerinde geniş soketler bırakılmış olup, deney düzeneğinin montajında oluşabilecek sorunlar minimuma indirgenmiştir.



Fotoğraf 2.24. Alt tabla ve gövde plakaları imalat sonrası görselleri

2.3.5 Açık Döngülü Rüzgâr Tüneli

Tez çalışması kapsamında, açık döngülü rüzgâr tünelinin tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi, kanat uzunluğu 1,2 metre olarak belirlenmiş olup, rüzgâr türbininin süpürme çapı yaklaşık 2,8 metre olarak hesaplanmıştır. Bu doğrultuda, dört adet TAVSAN marka TAVSAN Fan 1400 modeli temin edilmiştir. Her bir fandaki motor 3 kW kapasitesine sahip olup, fanlar 2x2 düzeninde monte edilmiştir. Fanların montaj sonrası görseli Fotoğraf 2.25'te sunulmuştur.



Fotoğraf 2.25. Rüzgâr Fanları Montaj Sonrası

Rüzgârın istenilen hız değerlerinde ayarlanabilmesi için Delta Marka VFD075E43A modeli frekans invertörleri temin edilmiştir. Anemometrelerden okunan hız değerlerine göre frekans ayarlaması yapılmış ve istenilen hız değeri ayarlanmıştır.

2.3.6 Ölçüm Ekipmanları

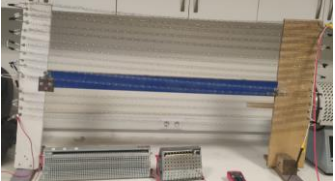
Çift rotorlu rüzgâr türbininin verimliliğinin hesaplanabilmesi ve analiz edilebilmesi için sistemin farklı bölgelerinden ölçümler yapılmıştır. Yapılan ölçümler aşağıda liste halinde sunulmuştur.

- Rüzgâr hızı ve basıncı: 3 bölgeden rüzgâr hızı ve rüzgâr basıncı verileri toplanmıştır. Rüzgârın ilk giriş hızı ve basıncı V_1 , P_1 ; Rüzgârın ön kanatları geçtikten sonraki hızı ve basıncı V_2 , P_2 ve rüzgârın arka kanatları geçtikten sonraki hızı ve basıncı V_3 , P_3 olmak üzere 3 bölgeden hız ve basınç verileri pitot tüplü anemometre kullanılarak ölçülmüştür.
- Tork değerleri: Ön ve arka kanatlardan elde edilen tork değerleri torkmetre cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Torkmetreden elde edilen çıktılar Veri Okuma Cihazı kullanılarak kayıt altına alınmıştır.

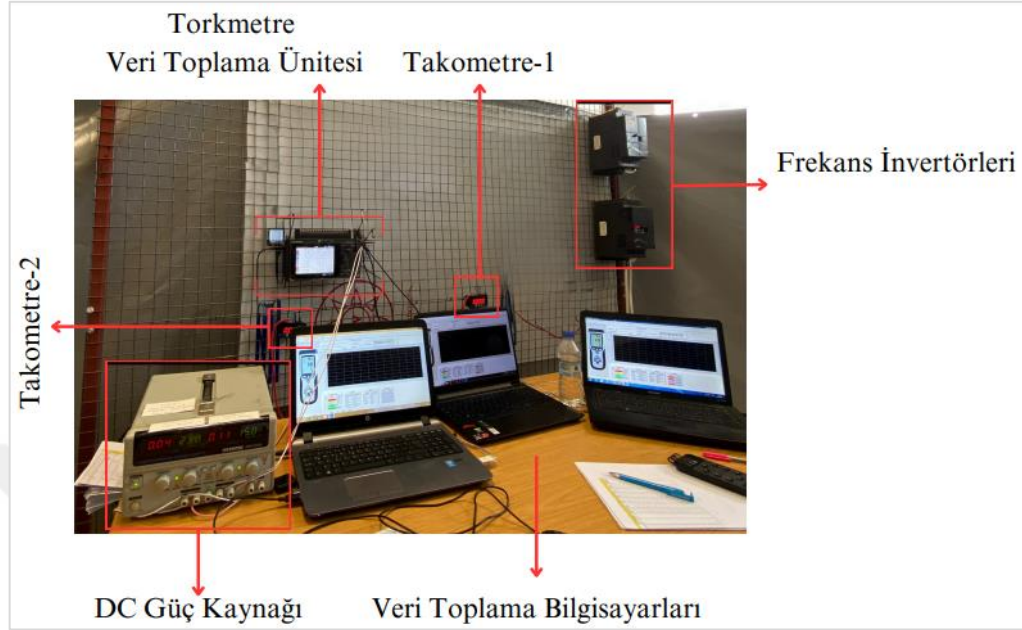
- Devir sayıları: Ön ve arka millerin devir sayıları, mil üzerine yerleştirilen takometreler kullanılarak ölçülmüş ve kaydedilmiştir.
- Güç Çıktıları: Alternatörden elde edilen gücü değerlendirmek için yük ünitesi tasarlanmıştır. Oluşturulan yük ünitesi ile farklı direnç değerlerinde alternatörün ürettiği akım ve gerilim değerleri multimetre ve pens ampermetre aracılığıyla ölçülmüştür.

Deney düzeneğinde kullanılan ekipmanların teknik detayları Tablo 2.11’te sunulmuştur.

Tablo 2.11. Deney düzeneği ölçüm ekipmanları

Ölçüm Ekipmanı Adı	Ekipman Detayları	Ekipman görseli
Pitot Tüplü Anemometre	Marka: CEM Model: DT8920 Doğruluk: ± 0.3 Basınç Aralığı: ± 5000 Pa Hız Aralığı: 1-80 m/s Sıcaklık Aralığı: 0-50 °C	
Torkmetre	Marka: Interface Model: T8 Ölçüm Aralığı: 0.2 Nm-200 Nm Doğruluk: ± 0.25	
Veri Okuma Cihazı	Marka: Graphtec Model: G1820-Midi Voltaj Ölçüm Doğruluğu: ± 0.1	
Takometre	Marka: Linpotek Ölçüm Aralığı: 0-7000 dev/dak Doğruluk: ± 0.01	
Multimetre	Marka: Unit Model: Ut221 Ölçüm Aralığı: 0-2000 A (%2.5) 0-750 V (%0.8)	
Yük Ünitesi	Yük ünitesi çalışma kapsamında direnç telleri ve reosta dirençler kullanılarak hazırlanmıştır. Direnç Aralığı: 0-1000 Ω	

Veri toplama işlemleri ile ilgili cihazlar ve yerleşimleri Fotoğraf 2.26’da sunulmuştur.



Fotoğraf 2.26. Veri toplama ekipmanları

Belirsizlik Analizi

Deneyssel ölçümler ne kadar titizlikle gerçekleştirilse de ölçüm hatalarının tanımlanması ve kontrol edilmesi, sonuçların doğruluğu açısından önemlidir. Bu hatalar, bazen rastlantısal meydana gelirken, bazen de araştırmacıların gözünden kaçan faktörlere bağlı olarak ortaya çıkabilmektedir. Yanlış olduğu açıkça belirgin veriler çıkartılırken, beklentilere uyum göstermeyen verileri doğrudan hatalı olarak kabul etmek yanıltıcı olabilmektedir. Bu bağlamda, verilerin doğruluğunun değerlendirilmesi ve hatalı noktaları saptamak için, özellikle standart sapma sınırlarını aşan değerlerin incelenmesi gerekmektedir (Ren ve ark., 2022). Deneyssel çalışmalardaki belirsizliğin hesaplanabilmesi için Kline ve McClintock tarafından önerilen metot kullanılmaktadır (Kline & McClintock, 1953). Deneyssel belirsizlik Denklem 2.41 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$W_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{0.5} \quad 2.41$$

Burada W_R , sonuçların belirsizliğini, R bağımsız değişkenlerin ($x_1, x_2, \dots, x_n$) fonksiyonlarını, ($w_1, w_2, \dots, w_n$) ise bağımsız değişkenlerin belirsizlikleridir.

Tablo 2.11’da sunulan test ekipmanlarının doğruluk oranları kullanarak deneysel düzeneğin belirsizliğinin hesaplanması mümkündür. Sağlanan değerler ve belirsizlikleri için toplam karekök yöntemi kullanılarak hesaplanan toplam belirsizlik değeri ± 2.66 olarak elde edilmiştir. Bu değer, deneysel düzeneğin toplam belirsizliğini temsil etmektedir.

2.4 Yöntem

Tez çalışması üç temel aşamadan meydana gelmiştir. Birinci aşamada deney düzeneğinin oluşturulması, deneysel parametrelerin belirlenmesi ve deneylerin yapılması; ikinci aşama Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) kullanarak çift rotorlu rüzgâr türbininin sayısal olarak incelenmesi; üçüncü aşama ise elde edilen deneysel ve sayısal verilerin karşılaştırılması ve istatistiksel olarak değerlendirilmesi yapılmıştır.

Birinci Aşama: Deneysel İnceleme

Bu aşamada çift rotorlu rüzgâr türbininin tasarımı, imalatı ve deney düzeneğinin hazırlanması gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, deneysel çalışmalar sırasında kullanılacak ekipmanlar seçilmiş ve temin edilmiştir. Çalışmalar aşağıda belirtilen alt başlıklar altında yürütülmüştür.

1. Tasarım ve Prototip İmalatı

- Çift rotorlu rüzgâr türbininin aerodinamik ve yapısal tasarımı yapılmıştır.
- Rotor kanatlarının boyutları, malzeme özellikleri ve geometrik parametreler belirlenmiştir.
- Kanatların kalıp tasarımları ve imalatları tamamlanmıştır.
- Deneysel düzenekte kullanılacak olan parçalar tasarlanmış ve imalatları gerçekleştirilmiştir.

2. Deneysel Düzeneğin Hazırlanması

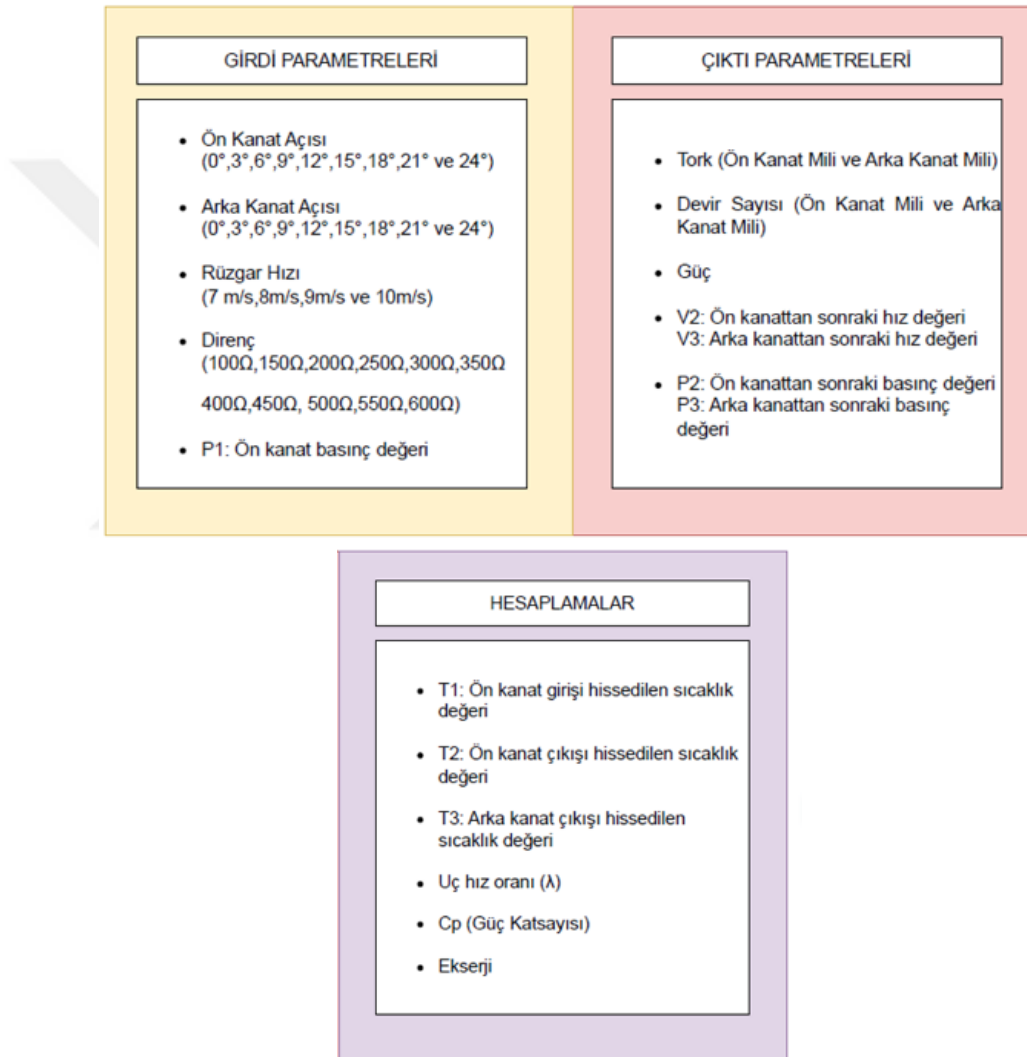
- Deney düzeneği ile ilgili ölçüm ekipmanları temin edilmiştir.
- Deney düzeneğinin montajı tamamlanmıştır.

- Deneysel parametrelerin ölçülebilmesi için sensörlerin montajı ve kalibrasyonu yapılmıştır.
- Deneysel parametrelerin belirlenmesi yapılmıştır.

3. Deneylerin yapılması

- Belirlenen parametreler için deneylerin tamamlanmıştır.
- Elde edilen verilerin kayıt altına alınmıştır.

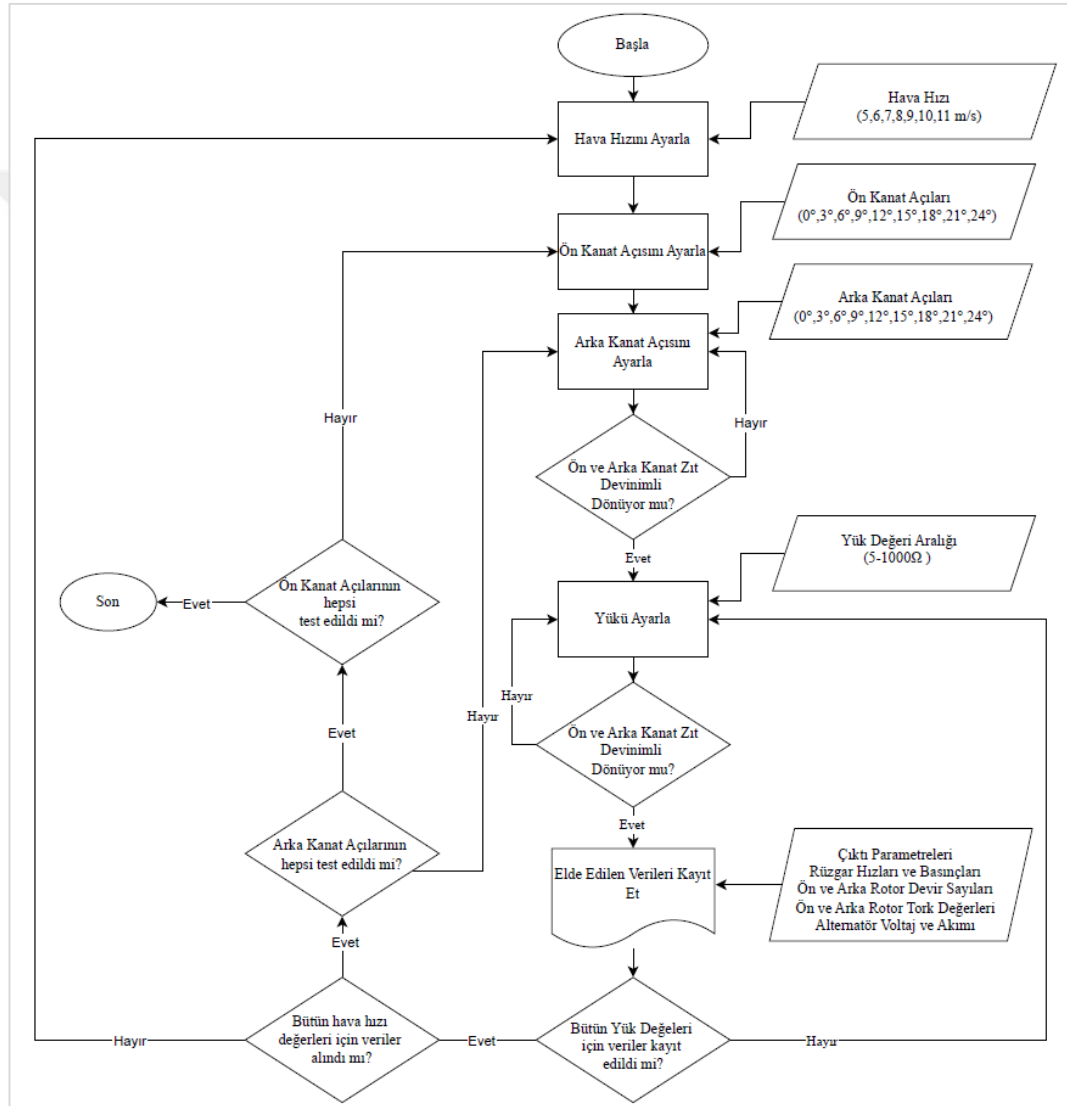
Deney düzeneğindeki girdi ve çıktı parametreleri belirlenmiş ve Şekil 2.27’de sunulmuştur.



Şekil 2.27. Deneysel parametreler

Çift rotorlu rüzgâr türbinlerinde optimum çalışma koşullarının belirlenebilmesi için, türbinin farklı yük koşullarında zıt yönlü olarak çalışabildiği açıların tespit edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, ön ve arka rotor kanatlarının açıları 0° ile 24° arasında, her seferinde 3° artırılarak değiştirilmiştir. Açık çevrimli

bir rüzgâr tüneline gerçekleştirilen ön testler sonucunda, 5-10 m/s rüzgâr hız aralığında testlerin yapılabileceği tespit edilmiştir. Çift rotorlu türbinlerde karşılaşılan en önemli sorunlardan biri, alternatörden akım çekildiğinde arka rotor kanatlarının durması ve ön rotorla aynı yönde dönmeye başlamasıdır. Bu tez çalışmasında, 0-1000 ohm arasında değişen yük değerleri uygulanarak, çift rotorlu rüzgâr türbininin hangi açılarda zıt yönlü çalıştığı ve güç ürettiği kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. Deneylerin yapılması aşamasında izlenen yol haritası akış şeması halinde Şekil 2.28’de verilmiştir.



Şekil 2.28. Deney Akış Şeması

Deneyler ilk olarak hava hızının belirlenmesi ve ayarlanması ile başlanmaktadır. Deneyde, belirlenen hava hızları (5, 6, 7, 8, 9, 10 m/s) anemometrelerden alınan veriler doğrultusunda frekans invertörü kullanarak

ayarlanmıştır. Hava hızı ayarlandıktan sonra, ön rotor kanat açısı belirlenir ve ilgili açı (0° , 3° , 6° , 9° , 12° , 15° , 18° , 21° , 24°) ayarlanmaktadır. Ardından, aynı şekilde arka rotor kanat açısı seçilir ve belirtilen açı değerlerinden biri uygulanmaktadır.

Bu işlemlerin tamamlanmasının ardından, ön ve arka rotorların birbirine zıt yönlerde düzgün bir şekilde dönüp dönmediği kontrol edilmektedir. Rotorlar, zıt yönlerde hareket ediyorsa, yük ünitesi aracılığıyla yükler değiştirilerek alternatörün optimum çalışma aralıkları belirlenmektedir. Sistem, yük altında çalışmayı sürdürüyorsa, elde edilen ölçüm verileri kaydedilmektedir. Ancak rotorların zıt yönlü hareket etmediği durumlarda, öncelikle rüzgâr hızı artırılarak farklı yük kombinasyonları denenmektedir. Sistem, bu koşullarda da çalışmazsa, arka rotor kanat açısı değiştirilmekte ve deneyler, minimum rüzgâr hızı ve yük değerlerinden başlayarak yeniden gerçekleştirilmektedir. Tüm arka rotor kanat açıları değerlendirildikten sonra, ön rotor kanat açısı değiştirilmekte ve benzer prosedür diğer açı değerleri için tekrarlanmaktadır.

İkinci Aşama: Sayısal Analiz

Bu aşamada, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) kullanılarak çift rotorlu rüzgâr türbini sisteminin sayısal analizi gerçekleştirilmiştir. Sayısal analiz, türbin aerodinamik performansını değerlendirmek ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılabilir sonuçlar elde etmek için kritik rol oynamaktadır. Ayrıca çift rotorlu sistemlerin açı ile iz etkilerinin değişimlerini incelemek mümkün olmaktadır. Çift rotorlu sistemin detaylı incelenmesi, aerodinamik davranışlarının simülasyon ortamında modellenmesi ile gerçekleştirilmiştir. Sayısal çözümler için ANSYS Fluent yazılımı tercih edilmiştir. Sayısal analizlerde takip edilen süreç aşağıda sunulmuştur.

1. Geometrik Modelleme ve Ağ Yapısının Oluşturulması: Bu aşamada çift rotorlu rüzgâr türbininin 3D geometrik modeli oluşturulmuştur. Bu model, ön-arka kanatları ve kanat göbek kısmından oluşmaktadır.
2. Ağ Yapısı: Akış alanının sayısal çözümüne uygun bir ağ yapısı geliştirilmiştir. Türbin kanatları ve çevresinde yüksek çözünürlüklü bir ağ yapısı tercih edilmiştir.
3. Sayısal çözüm parametrelerinin belirlenmesi: Türbin kanatları etrafındaki türbülanslı akışın özelliklerini doğru şekilde çözebilmek için $k-\omega$ Shear Stress Transport (SST) türbülans modeli kullanılmıştır. Bu model, sınır tabaka akışlarını ve iz etkilerinin incelenmesine olanak sağlamaktadır.

4. CFD Simülasyonlarının yapılması: Deneysel çalışmalar sonucunda ön ve arka kanatların yük altında zıt devinimli bir şekilde döndüğü açılar belirlenmişti. Belirlenen ön ve arka kanat açıları için rüzgâr hızları ve devir sayıları simüle edilmiştir. Ön ve arka kanatlardan elde edilen tork değerleri elde edilmiştir.
5. Sayısal sonuçların doğrulanması: Elde edilen CFD sonuçları, deneysel ölçümlerle karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Deneysel ve sayısal veriler arasındaki farklar analiz edilmiş ve hata oranları belirlenmiştir. Türbülans modeli ve mesh parametreleri gerektiğinde yeniden ayarlanarak simülasyonların doğruluğu artırılmıştır.

Bu aşamada, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) analizleri ile çift rotorlu rüzgâr türbininin aerodinamik performansı kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Sayısal analizler, türbin tasarımında iz etkilerini azaltmak ve enerji verimliliğini artırmak için kritik bilgiler sağlamış, aynı zamanda deneysel verilerle birlikte çalışarak sonuçların doğruluğunu artırmıştır. Bu analizler, çift rotorlu türbin tasarımının optimize edilmesine katkıda bulunmuştur.

Üçüncü Aşama: Sonuçların Değerlendirilmesi ve İstatistiksel Analiz

Tez çalışmasının üçüncü aşamasında, deneysel ve sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Ayrıca elde edilen deneysel sonuçlar istatistiksel olarak Tam Faktöriyel Tasarım kullanılarak detaylı bir şekilde incelenmiş ve analiz edilmiştir. Bu aşamada çift rotorlu rüzgâr türbini sisteminin performansını etkileyen temel parametreler tanımlanmış, bu parametreler arasındaki etkileşimler incelenmiş ve optimum çalışma koşulları belirlenmiştir. İstatistiksel analizler, deneysel sonuçların doğrulanması ve model optimizasyonu açısından önemli rol oynamıştır. Ayrıca çift rotorlu rüzgâr türbinleri ekserji açısından incelenmiş ve sonuçlar yorumlanmıştır. Sonuçların değerlendirilmesi aşamasında takip edilen süreç aşağıda sunulmuştur.

1. Deneysel sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.
2. Deneysel ve sayısal veriler karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.
3. Sayısal sonuçlar, görseller ile değerlendirilmiştir
4. Çift rotorlu rüzgâr türbininin performansını etkileyen temel parametreler belirlenmiştir.
5. Çift rotorlu rüzgâr türbinleri için güç çıktısını veren regresyon analizleri yapılmış ve optimum çalışma koşulları belirlenmiştir.

6. Çift rotorlu rüzgâr türbinleri ekserji açısından incelenmiştir.

Bu aşamada, deneysel ve sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar sistematik bir şekilde karşılaştırılmış ve çift rotorlu rüzgâr türbini tasarımının aerodinamik verimliliği değerlendirilmiştir. Deneysel verilerle CFD simülasyonlarının uyumu doğrulanmış ve çift rotorlu sistemin performans avantajları açıkça ortaya konulmuştur. Elde edilen sonuçlar, çift rotorlu türbinlerin tasarım ve geliştirme sürecine katkı sağlayacak nitelikte olup, iz etkilerinin azaltılmasında önemli bilgiler sunmaktadır.



3. BULGULAR

Bu bölümde, çift rotorlu zıt devinimli rüzgâr türbini sistemine yönelik gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) analizleri, ekserji analizi, istatistiksel değerlendirmeler ve maliyet analizi sonuçları sunulmaktadır. Çalışmada elde edilen bulgular, sistemin aerodinamik performansını, enerji dönüşüm verimliliğini, hangi durumlarda stabil bir şekilde çalıştığını ve ekonomik değerlendirmesini ortaya koymaktadır. Bu kapsamda, rotorlar arasındaki etkileşimler, tork dengesi, enerji kayıpları ve optimum çalışma koşulları analiz edilerek çift rotorlu sistemlerin etkinliği değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, bulgular **deneysel, sayısal, istatistiksel, ekserji ve maliyet** analizleri olmak üzere beş ana başlık altında ele alınmıştır. **Deneysel analizler**, prototipin performansını gerçek çalışma koşulları altında belirlemek için yapılan testlerden elde edilen verileri içermektedir. **Sayısal analizler**, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) kullanılarak yapılan modelleme çalışmalarını kapsamaktadır. **İstatistiksel analizler**, elde edilen verilerin doğruluğunu değerlendirmek, hata paylarını belirlemek ve sonuçların güvenilirliğini artırmak için uygulanmıştır. **Ekserji analizi**, sistemin termodinamik verimliliğini incelenmesine odaklanmıştır. **Maliyet analizi** ise sistemi ekonomik olarak değerlendirmek, yatırım ve işletme maliyetlerini optimize etmek amacıyla gerçekleştirilmiştir.

3.1 Deneysel Verilerin Analizi ve Elde Edilen Bulgular

Şekil 2.28’de sunulan deney planına göre gerçekleştirilen deneyler sonucunda, yük altında ön ve arka rotorların tüm kanat açısı kombinasyonlarında **dönmediği** tespit edilmiştir. Çift rotorlu rüzgâr türbinlerinde, jeneratörden herhangi bir elektrik üretimi gerçekleşmediğinde, ön ve arka rotorlar serbest bir şekilde hareket edebilmekte ve aerodinamik etkileşimler doğrultusunda birbirine zıt yönlerde dönebildiği gözlemlenmiştir. Ön rotor, rüzgârı doğrudan karşılayarak belirli bir hızda dönerken, arka rotor ön rotordan geçen hava akışının etkisiyle ters yönde dönme eğiliminde olmaktadır. Ancak bu hareket, **yalnızca** sistemde herhangi bir elektriksel yük olmadığı koşullarda gerçekleşmiştir. Jeneratörden akım çekilmeye başlandığında, elektromanyetik direnç nedeniyle arka rotorun dönüşü yavaşlamış ve belirli yük seviyelerinin üzerinde tamamen durarak ön rotor ile aynı yönde dönmeye başlamıştır. Bu durum, çift rotorlu sistemin enerji üretim sürecinde

elektromekanik etkileşimlerden doğrudan etkilendiğini ve iz etkisinin yanı sıra jeneratörün de rotorların dinamiği üzerinde belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir.

Sistemin hangi açı değerlerinde ve yük koşullarında çalışabildiğini belirlemek amacıyla özel bir yük ünitesi tasarlanmıştır. Bu yük ünitesi kullanılarak, 0 ile 1000 ohm arasındaki direnç değerlerinde çift rotorlu sistemin çalışma durumu detaylı bir şekilde test edilmiştir.

Deneyler sırasında öncelikle yüksek direnç değerleri kullanılmıştır. Yüksek direnç seviyelerinde üretilen akım düşük olduğundan, sistemler genellikle dönmeye devam etmiştir. Ancak, direnç değerleri azaltıldıkça jeneratörden elde edilen akım artmış ve böylece test edilen rüzgâr hızında maksimum güç çıktısının sağlandığı yük seviyeleri belirlenmiştir. Geleneksel rüzgâr türbini şarj kontrol ünitelerinde genellikle sabit dirençler kullanılmaktadır, ancak bu yaklaşım çift rotorlu sistemlerde etkili olmamaktadır. Bu nedenle, değişken yüklerin test edilmesi ve değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır. Rüzgâr türbinlerinde kullanılabilecek MPPT (Maksimum Güç Noktası Takibi) sistemi üzerine çalışmalar (DURSUN, 2020) devam etmek ile birlikte henüz ticarileşmiş ekipmanlar bulunmamaktadır. Tablo 3.1’de deneysel sonuçlar doğrultusunda çift rotorlu rüzgâr türbininin enerji üretebildiği çalışma durumları özetlenmiştir.

Tablo 3.1. Kanat Açısı Değişimlerinin Çift Rotorlu Rüzgâr Türbinlerinde Çalışma Durumu Üzerindeki Etkileri

Kanat Açıları (°)											
Ön	Arka	Ön	Arka	Ön	Arka	Ön	Arka	Ön	Arka	Ön	Arka
24	0	21	0	18	0	15	0	12	0	9-6-3-0	0
	3		3		3		3		3		3
	6		6		6		6		6		6
	9		9		9		9		9		9
	12		12		12		12		12		12
	15		15		15		15		15		15
	18		18		18		18		18		18
	21		21		21		21		21		21
	24		24		24		24		24		24
● Zıt Devininimli Olarak Döndüğü Açılar ● Zıt Devininimli Olarak Dönmediği Açılar											

Tablo 3.1, çift rotorlu zıt devininimli bir rüzgâr türbini için ön ve arka rotorun farklı açı konfigürasyonlarında yük altındaki çalışma durumlarını göstermektedir. Tabloda **yeşil** ile belirtilen konfigürasyonlar, ön ve arka rotorların zıt yönlerde dönebildiği ve güç üretebildiği açıları temsil etmektedir. Buna karşılık, **kırmızı** ile

gösterilen konfigürasyonlar, ön ve arka rotorların zıt yönlü hareket edemediği ve dolayısıyla güç üretiminin gerçekleşmediği durumları ifade etmektedir.

Ön rotor rüzgârı doğrudan karşıladığı ve kullandığı için daha geniş bir çalışma aralığına sahiptir. Ön kanat, açısının artması ile birlikte rüzgârı etkin bir şekilde kullanamamaktadır. Bu durum arka kanadın daha fazla rüzgârı kullanmasına olanak sağlamaktadır. Böylece ön kanadın yüksek açı değerine sahip olduğu durumlarda arka kanatların aktif olarak çalıştığı görülmektedir. Ön kanat açısının azalması ile birlikte ön rotor rüzgârı daha etkin bir şekilde kullanmasından kaynaklı olarak arka rotorun dönme ihtimalleri azalmaktadır. Ön kanat açısının 24° olduğu durumda arka kanat bütün açılarda dönmeyi sağlamıştır. Ön kanat açısının 21° , arka kanat açısının 24° durumda ise çift rotorlu sistemin dönmesi sağlanamamıştır. Bu beklenen bir sonuçtur. Ön rotor kanat açısının 18° olduğunda, arka rotor 18° ve üzerinde işlevsiz hale geldiği görülmüştür. Ön kanat açısının $0^\circ, 3^\circ, 6^\circ$ ve 9° olduğu durumlarda ise arka kanat açısı ne olursa olsun dönmesi sağlanamamıştır. Bu sınırlamalar, ön rotorun oluşturduğu türbülanslı iz etkisinden ve gelen rüzgârın enerjisinin büyük bir kısmının kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Ön kanadın oluşturduğu iz etkisi, arka rotorun giriş akış koşullarını bozarak aerodinamik verimliliği düşürmektedir. Ön rotor açısının artması ile arka rotorun çalışma aralığı genişlemektedir.

Ön ve arka rotorun eş zamanlı olarak dönemediği noktalar çift rotorlu sistemin sınırlarını göstermektedir. Bu bulgular çift rotorlu rüzgâr türbinleri kontrol sistemlerindeki sınırlamaları belirlemede önemli bir rol oynamaktadır. Ön rotorun temiz hava akışında işlevselliğini geniş bir açı aralığında koruması, ön rotorun performansını istikrarlı hale getirmektedir. Ancak bu durum, iz etkileri nedeniyle arka rotorun performansını ciddi bir şekilde sınırlandırmaktadır. Ön rotorun tüm koşullarında daha düşük açılarda çalışması sağlanarak, türbülansın en aza indirgenmesi arka rotorun işlevselliğini arttırabilir. Arka rotorun kanat açılarının 0° - 18° gibi işlevsel bir aralıkta sınırlandırılması, çift rotorlu sistemin stabil bir şekilde çalışmasını sağlayabilir.

Çift rotorlu rüzgâr türbininin deneysel analizleri sonucunda, ön ve arka rotorların ürettikleri torklar arasındaki farklar detaylı olarak incelenmiştir. Bu farkların enerji üretimi, iz etkileri ve rotorların zıt devinimli hareket kabiliyeti üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Tablo 3.2’de ön ve arka rotorlar arasındaki tork farklarının yüzdesel dağılımı sunulmuştur.

Tablo 3.2. Ön ve arka rotorlar arasındaki tork farklarının dağılımı

Ön ve Arka Rotorların Torkları Arasındaki Fark	Bütün deneylerdeki oranı
%0- %5 Nm	%40.67
%5-%10 Nm	%23.54
%10-%15 Nm	%16.81
%15-%20 Nm	%8.86
%20-%25 Nm	%7.03
%25-%28.46 Nm	%3.05
En yüksek tork farkının %28.46 olduğu tespit edilmiştir. Tork farkının %28.46'dan yüksek olduğu durumlarda ön ve arka kanatlar zıt yönde döndürülemez .	

Tablo 3.2, ön ve arka kanatların birbirlerine zıt devinimli bir şekilde döndüğü 330 durum için deneysel veri analiz edilmiştir. Ön ve arka rotorlar arasındaki tork farkları yüzdesel olarak sunulmuştur. Toplamda 4860 durum belirlenmiş ve testler yapılmıştır.

Ön ve arka rotorlar arasındaki tork farkının %0-%5 olduğu durumlar bütün deneylerin %40.67'sini oluşturmaktadır. Bu durum, ön ve arka rotorlar arasında uyumlu bir performans olduğunu ve iz etkilerinin sınırlı olduğunu göstermektedir. Tork farkının %5-%10 aralığında olduğu durum ise deneylerin yaklaşık dörtte birine denk gelmektedir. Bu durum iz etkilerinin belirgin bir hale geldiğini fakat rotorlar arasında hala dengeli bir performans olduğunu ifade etmektedir. Tork farkının %15 ve üstü olduğu durumlarda ise iz etkilerinin arttığı söylenebilmektedir. Tork farkının artması ile ön ve arka kanatların birbirlerine zıt bir şekilde dönmesi sağlanamamıştır. Daha büyük tork farkları, iz etkisinin ciddi seviyelere ulaştığı ve arka rotorun performansını sınırladığı durumlarda ortaya çıkmıştır.

Ön ve arka kanatlar arasındaki tork farkı en yüksek %28.46 olarak tespit edilmiştir. Tork farkının bu değerden yüksek olduğu durumlarda ön ve arka rotorun zıt yönlerde dönmesi mümkün olmamış ve sistem kararsız hale gelmiştir. Bu durum, iz etkisinin sistemin mekanik kararlılığı üzerindeki etkisini göstermektedir.

Tork farklarının %5'in altında olduğu durumlar, sistemin en kararlı çalıştığı durumları temsil etmektedir. Bu koşulları, ön ve arka rotorlar arasında optimum enerji transferi ve iz etkilerinin minimum düzeyde olduğunu göstermektedir. %15'in üzerinde tork farklarının olduğu durumlarda iz etkisinin arka rotor performansını ciddi bir şekilde sınırladığı gözlemlenmiştir. Tork farkının

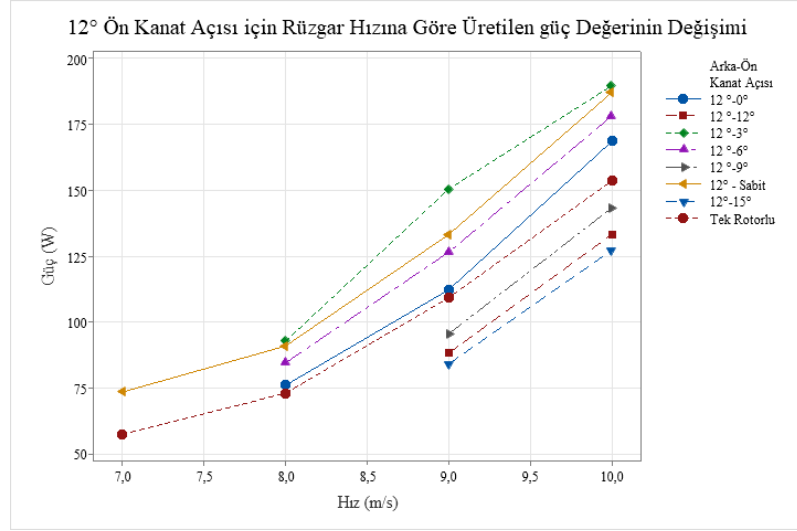
%28.46'yı aşması ile sistemin kararlılığı bozulmuş ve rotorların zıt devinimli olarak dönmesi sağlanamamıştır.

Bu çalışmada elde edilen **ön ve arka rotorlar arasındaki tork farkı ve sistem kararlılığına ilişkin deneysel veriler**, literatürde daha önce detaylı olarak incelenmemiş bir konu kapsamındadır. Çift rotorlu zıt devinimli rüzgâr türbinlerinde rotorlar arasındaki tork farklarının sistem kararlılığı üzerindeki etkisi hakkında kapsamlı bir veri seti sunulmamıştır. Mevcut çalışmalar, genellikle çift rotorlu sistemlerin aerodinamik performansına, enerji üretim kapasitesine veya akışkan dinamiği analizlerine odaklanırken, bu çalışmada doğrudan deneysel ölçümlerle tork farklarının sistem stabilitesi ve iz etkileri üzerindeki etkisini ortaya koymuştur. Özellikle tork farklarının %5'in altında olduğu durumlarda sistemin en dengeli bir şekilde çalıştığının belirlenmesi, çift rotorlu sistemlerin optimize edilmesi için kritik bir eşik değeri sağlamaktadır. Ayrıca, **tork farkının %28.46'yı aşmasıyla sistemin kararsız hale geldiğinin gösterilmesi**, çift rotorlu türbinlerin tasarım süreçlerinde dikkate alınması gereken önemli bir mühendislik sınırı ortaya koymaktadır. Bu bulgular, çift rotorlu rüzgâr türbinlerinin tasarımında iz etkilerini minimize etmek ve rotorlar arası enerji transferini optimize etmek için gerekli olan yapısal ve kontrol parametrelerinin belirlenmesine doğrudan katkı sağlamaktadır. Gelecekteki çalışmalar için bir referans noktası oluşturabilecek bu veriler, çift rotorlu rüzgâr türbinlerinin daha kararlı ve verimli çalışmasını sağlamak için geliştirilecek yeni kontrol ve tasarım stratejilerine temel teşkil etmektedir.

Deneysel Güç ve Tork değerlerinin değerlendirilmesi

Bu bölümde farklı kanat açıları konfigürasyonları için elde edilen güç değerleri, güç artış oranları ve tork değerleri tek rotorlu rüzgâr türbinleri ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

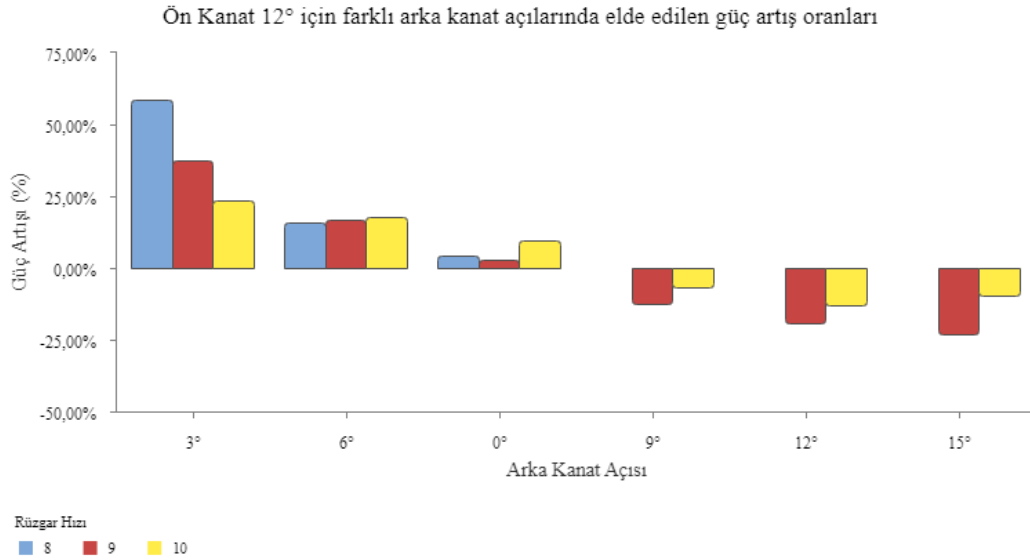
Ön kanat Açısının 12° olduğu durum için deneysel sonuçlar:



Şekil 3.1. 12° ön kanat açısı için farklı rüzgâr hızı ve konfigürasyonlarda elde edilen güç değerleri

Şekil 3.1, 12° ön kanat açısında farklı rüzgâr hızları için arka kanat açısının değişmesi ile elde edilen güç değerlerini karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. En yüksek güç çıktısının 12° - 3° konfigürasyonu için elde edildiği görülmüştür. 10 m/s rüzgâr hızında 189.50 W güç çıkışı elde edilmiştir. Bu güç değeri sistem üzerinden elde edilen en büyük güç çıktısı olduğu görülmüştür. Tek rotorlu rüzgâr türbini ile karşılaştırıldığında 12° - 3° kombinasyonuna sahip çift rotorlu rüzgâr türbini %23-%59 arasında daha iyi güç çıktısı elde etmiştir. Daha sonra en yüksek güç çıkışı, sırasıyla 178.11 W ve 168.48 W olarak 12° - 6° ve 12° - 0° kanat açı kombinasyonlarında elde edilmiştir. Arka kanat açısının 9° , 12° ve 15° olduğu durumlarda ise tek rotorlu rüzgâr türbinine göre daha az enerji üretildiği görülmüştür. Buradan yola çıkılarak ön kanat açısının 12° olduğu durum için arka kanat açısının 0° - 6° arasında olması gerektiği söylenebilmektedir.

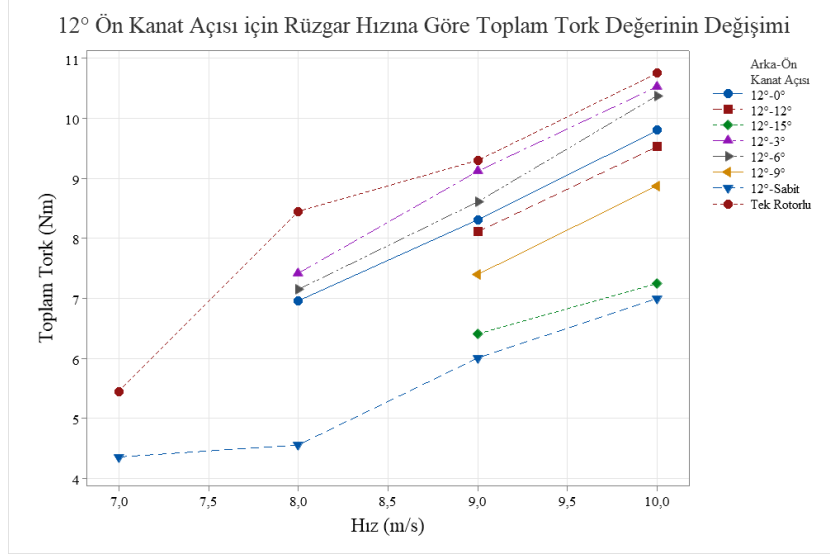
Ön kanat açısının 12° olduğu durumda, tek rotorlu rüzgâr türbinine göre, farklı kanat açısı konfigürasyonları için güç çıkışlarında olan artışlar Şekil 3.2’de sunulmuştur.



Şekil 3.2. 12° ön kanat açısı için farklı rüzgâr hızı ve konfigürasyonları için tek rotorlu rüzgâr türbinine göre güç çıkışındaki artış miktarı

12° ön kanat açısı için güç artış oranları incelendiğinde, arka kanat açısının 3° olduğu durumda, 10 m/s, 9 m/s ve 8 m/s rüzgâr hızlarında, tek rotorlu rüzgâr türbinine kıyasla sırasıyla %23.40, %37.58 ve %58.56 oranında daha yüksek güç üretildiği tespit edilmiştir. Arka kanat açılarının 3° ve 6° olduğu durumlar güç çıktılarında belirgin oranlarda artış gözükmemektedir. 6° için tüm rüzgâr hızlarında yaklaşık %15-%17 oranında orta düzeyde güç kazançları görülmektedir. Arka kanat açısının 0° olduğu duruma ise güç kazanımlarının minimum düzeyde olduğu görülmüştür. Özellikle düşük rüzgâr hızlarında güç artışlarının minimum düzeyde olduğu görülmüştür. 10 m/s rüzgâr hızı için yaklaşık %10 oranında hafif bir artış görülmektedir. Arka kanat açısının 9° olduğu durumlarda ise tek rotorlu rüzgâr türbinine kıyasla daha az enerji çıktıları elde edilmektedir. 9 m/s rüzgâr hızında %12'ye varan düşüşler meydana gelmektedir. Bu durum ön kanat iz etkisinin arka kanat aerodinamiğini bozduğunu göstermektedir. Arka kanat açısının 12° ve 15° olduğu durumlarda ise tek rotorlu rüzgâr türbinine göre önemli güç kayıpları gözlemlenmektedir. 9 m/s rüzgâr hızlarında %23'e varan kayıplar görülmektedir.

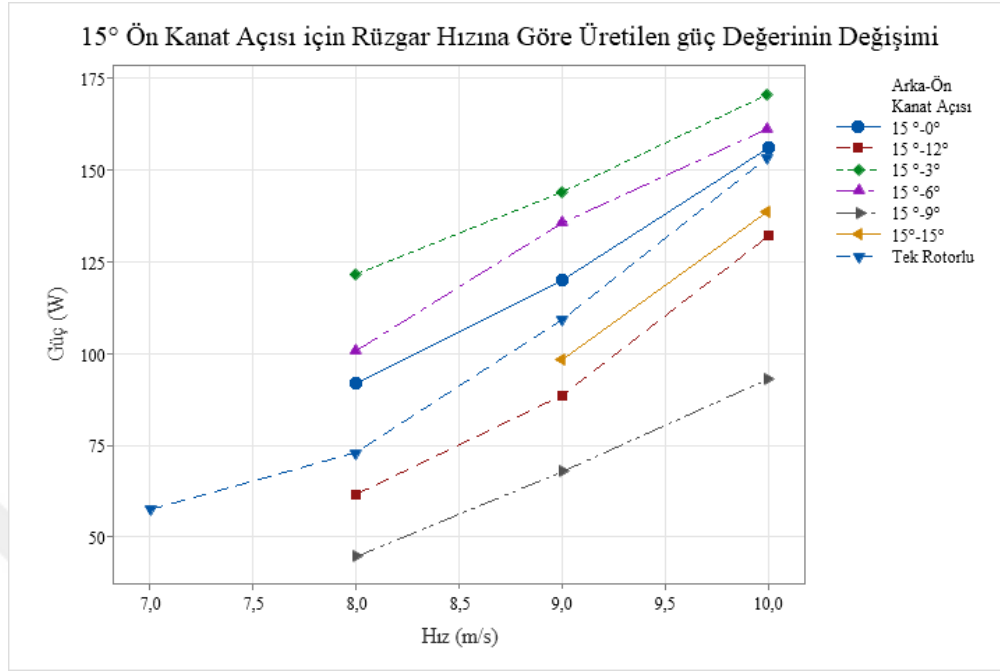
12° ön kanat için elde edilen toplam tork değerleri Şekil 3.3'te sunulmuştur.



Şekil 3.3. 12° ön kanat için elde edilen toplam tork değerleri

Şekil 3.3, çift rotorlu rüzgâr türbini sisteminde ön kanat açısının 12° olduğu durum için arka kanat açılarının değişiminin toplam tork değerleri üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak göstermektedir. En yüksek tork değerlerinin tek rotorlu rüzgâr türbininde elde edildiği görülmüştür. Tork değerinin yüksek olmasına rağmen tek rotorlu rüzgâr türbini güç üretimi açısından en yüksek olmadığı görülmüştür. Çift rotorlu sistemlerin toplam torkları daha düşük olmasına rağmen daha yüksek güç üretimi sağlanmıştır. Tek rotorlu rüzgâr türbini en yüksek 10,75 Nm değerine ulaşırken, çift rotorlu rüzgâr türbininde 12°-3° kombinasyonu için en yüksek tork değeri 10,53 Nm olarak elde edilmiştir. En yüksek tork değerleri arasında %2,08 oranında fark olmasına rağmen güç değerinde %58,56 oranında fark görülmektedir. Düşük rüzgâr hızlarında konfigürasyonlar arasındaki tork farkları daha az belirgin olduğu görülmektedir. Tek rotorlu sistemlere göre daha düşük torka rağmen daha yüksek güç çıktısının elde edilebilmesi güce etki eden parametrelerden kaynaklanmaktadır. Güç üretimi devir sayısı ve tork değeri ile orantılıdır. Tek rotorlu sistemlerde daha yüksek tork üretilmiş olabilir ancak bu çift rotorlu sistemine göre daha düşük devir sayısına sahiptir. Çift rotorlu sistemlerde, özellikle aerodinamik etkileşimler nedeniyle rotorların daha hızlı dönmesi sağlanabilmektedir.

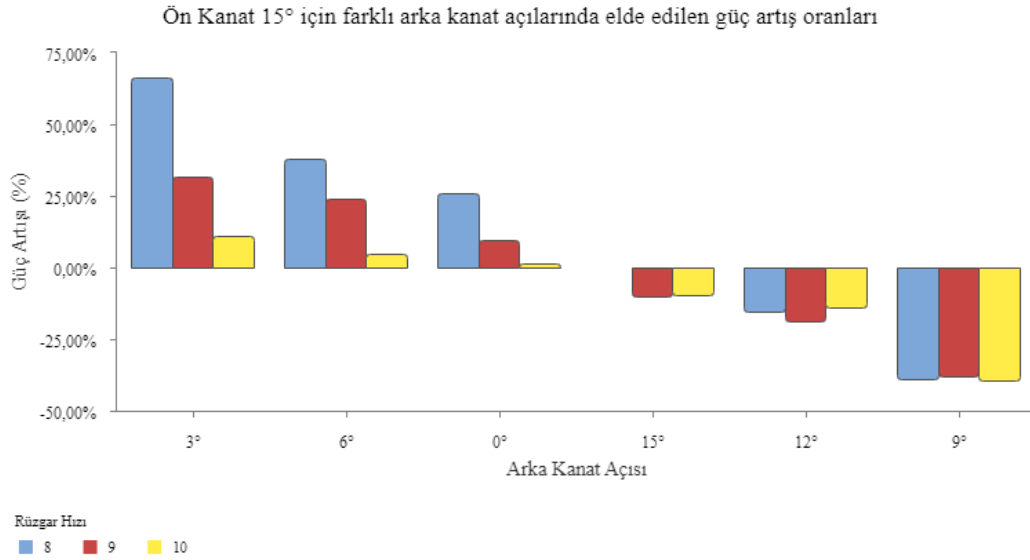
Ön kanat Açısının 15° olduğu durum için deneysel sonuçlar:



Şekil 3.4. 15° ön kanat açısı için farklı rüzgâr hızı ve konfigürasyonlarda elde edilen güç değerleri

Şekil 3.4, 15° ön kanat açısında farklı rüzgâr hızları için arka kanat açısının değişmesi ile elde edilen güç değerlerini karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. En yüksek güç çıktısının 15° - 3° konfigürasyonu için elde edildiği görülmüştür. 10 m/s rüzgâr hızında 170.69 W güç çıkışı elde edilmiştir. Tek rotorlu rüzgâr türbini ile karşılaştırıldığında 15° - 3° kombinasyonuna sahip çift rotorlu rüzgâr türbini %11-%66 arasında daha iyi güç çıktısı elde etmiştir. En yüksek güç artışı bu konfigürasyonda elde edilmiştir. 15° - 3° konfigürasyonunda iz etkilerinin minimum seviyede olduğu ve performansın optimize edildiği söylenebilmektedir. Daha sonra en yüksek güç çıkışı, sırasıyla 161.28 W ve 156.0 W olarak 15° - 6° ve 15° - 0° kanat açı kombinasyonlarında elde edilmiştir. Arka kanat açısının 9° , 12° ve 15° olduğu durumlarda ise tek rotorlu rüzgâr türbinine göre daha az enerji üretildiği görülmüştür. Buradan yola çıkılarak ön kanat açısının 15° olduğu durum için arka kanat açısının 0° - 6° arasında olması gerektiği söylenebilmektedir.

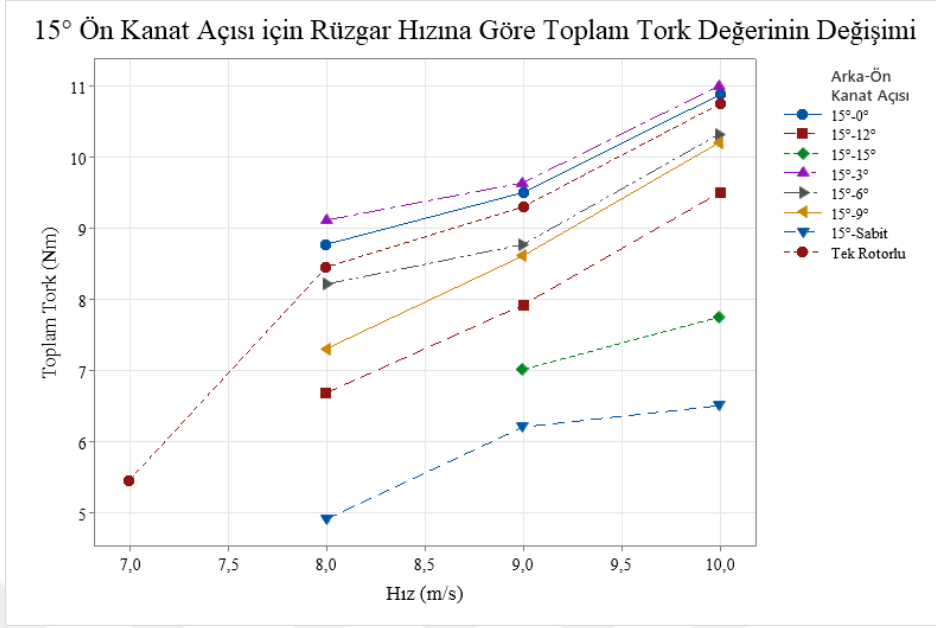
Ön kanat açısının 15° olduğu durumda, tek rotorlu rüzgâr türbinine göre, farklı kanat açısı konfigürasyonları için güç çıkışlarında olan artışlar Şekil 3.5’de sunulmuştur.



Şekil 3.5. 15° ön kanat açısı için farklı rüzgâr hızı ve konfigürasyonları için tek rotorlu rüzgâr türbinine göre güç çıkışındaki artış miktarı

15° ön kanat açısı için güç artış oranları incelendiğinde, arka kanat açısının 3° olduğu durumda, tek rotorlu rüzgâr türbinine kıyasla önemli güç kazanımları sağlandığı görülmüştür. Özellikle 8 m/s, 9 m/s ve 10 m/s rüzgâr hızlarında, çift rotorlu sistem sırasıyla %66.21, %31.72 ve %11.15 oranında daha yüksek güç çıktısı elde etmiştir. Bu konfigürasyon, ön rotordan kaynaklanan iz etkisinin etkili bir şekilde kullanıldığını göstermektedir. Arka kanat açılarının 3° ve 6° olduğu durumlar güç çıktılarında belirgin oranlarda artış gözükmemektedir. Arka kanat açısının 6° olarak ayarlandığı durumda, tüm rüzgâr hızlarında %5 ile %38 arasında değişen artışlar elde edilmiştir. Arka kanat açısının 0° olduğu duruma ise güç kazanımlarının minimum düzeyde olduğu görülmüştür. Özellikle yüksek rüzgâr hızlarında güç artışlarının minimum düzeyde olduğu görülmüştür. 10 m/s rüzgâr hızı için yaklaşık %1.6 oranında hafif bir artış görülmektedir. Bu sınırlı performans, arka rotoru düz kanat açısı nedeniyle iz etkisi alanındaki enerjiyi etkili bir şekilde çıkaramamasıyla açıklanabilmektedir. Bu durum, özellikle yüksek rüzgâr hızlarında genel sistem verimliliğinin azalmasına yol açmaktadır. Arka kanat açılarının 9°, 12° ve 15° olduğu durumlarda çift rotorlu sistem, tek rotorlu türbine kıyasla daha düşük güç çıktıları üretmektedir. En belirgin düşüş, 15°-9° konfigürasyonu için gözlemlenmiş olup, bu durumda çift rotorlu sistem, 10 m/s hızında tek rotora kıyasla %39.32 daha az güç üretmiştir.

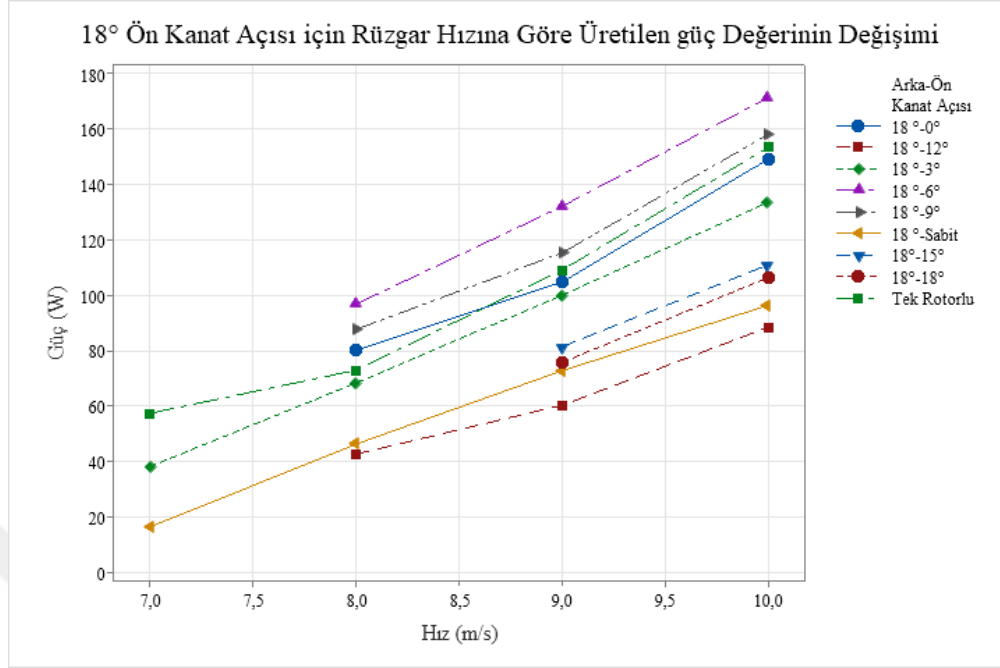
15° ön kanat için elde edilen toplam tork değerleri Şekil 3.6'da sunulmuştur.



Şekil 3.6. 12° ön kanat için elde edilen toplam tork değerleri

Şekil 3.6, çift rotorlu rüzgâr türbini sisteminde ön kanat açısının 15° olduğu durum için arka kanat açılarının toplam tork değerleri üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak göstermektedir. En yüksek tork değerlerinin 15°–3° konfigürasyonuna sahip çift rotorlu rüzgâr türbininden elde edildiğini görülmüştür. Bu konfigürasyon, toplam tork açısından 11.01 Nm ile en iyi performansı sergilemiş olup, bu değer aynı zamanda en yüksek güç çıktısının elde edildiği konfigürasyona da karşılık gelmektedir. Bu durum, çift rotor sistemlerinde tork ve güç arasındaki doğrudan ilişkiyi bir kez daha doğrulamaktadır. Tek rotorlu rüzgâr türbini 10.75 Nm ile en yüksek tork değerine ulaşmıştır. Çift rotorlu sistemin 15°–3° konfigürasyonu ile arasında tork farkı yalnızca %2.41 olmasına rağmen, bu iki sistem arasında güç çıktısı arasında %66.21 fark görülmektedir. Bu farkın nedeni, çift rotorlu sistemin arka rotor sayesinde iz etkisi bölgesindeki enerjiyi etkin bir şekilde kullanabilmesi ve daha yüksek devir sayılarına ulaşabilmesi ile açıklanabilmektedir. Böylece, çift rotorlu sistem daha verimli enerji dönüşümü sağlayarak daha yüksek güç üretebilmektedir.

Ön kanat Açısının 18° olduğu durum için deneysel sonuçlar:

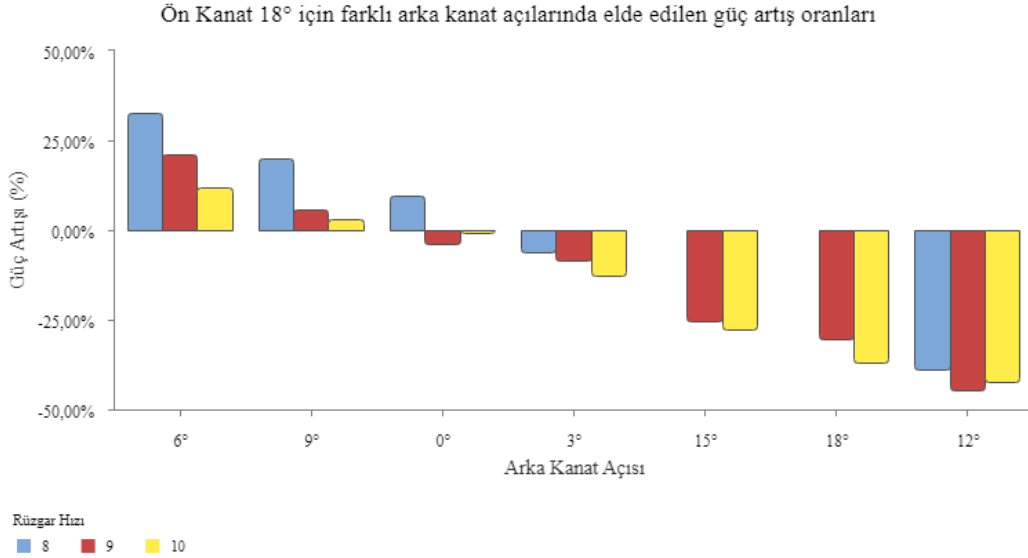


Şekil 3.7. 18° ön kanat açısı için farklı rüzgâr hızı ve konfigürasyonlarda elde edilen güç değerleri

Şekil 3.7, 18° ön kanat açısında farklı rüzgâr hızları için arka kanat açısının değişmesi ile elde edilen güç değerlerini karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. En yüksek güç çıktısının 18°-6° konfigürasyonu için elde edildiği görülmüştür. 10 m/s rüzgâr hızında 171.60 W güç çıkışı elde edilmiştir. Tek rotorlu rüzgâr türbini ile karşılaştırıldığında 18°-6° kombinasyonuna sahip çift rotorlu rüzgâr türbini %11-%33 arasında daha iyi güç çıktısı elde etmiştir. Bu durum, 18°-6° konfigürasyonunda iz etkilerinin minimum seviyede tutulduğunu ve arka rotorun ön rotorun iz etkisinden optimum şekilde faydalanarak performansını en üst düzeye çıkardığını göstermektedir. En yüksek güç çıktısının elde edildiği 18°-6° konfigürasyonunun ardından, 18°-9° ve 18°-0° arka kanat açıları sırasıyla 158.24 W ve 152.74 W güç üretimi ile ikinci ve üçüncü en iyi performans gösteren kombinasyonlar olmuştur. 18°-9° konfigürasyonu, arka rotorun iz etkisi bölgesinde kısmen verimli çalıştığını göstermekteyken, 18°-0° konfigürasyonunda arka rotorun iz etkisini sınırlı bir ölçüde kullanabildiği görülmektedir. Arka kanat açısının 3°,12°,15° ve 18° olduğu durumlarda ise tek rotorlu rüzgâr türbinine göre daha az enerji üretildiği görülmüştür. Buradan yola çıkılarak ön kanat açısının 18°

olduğu durum için arka kanat açısının 3° - 12° arasında olması gerektiği söylenebilmektedir.

Ön kanat açısının 18° olduğu durumda, tek rotorlu rüzgâr türbinine göre, farklı kanat açısı konfigürasyonları için güç çıkışlarında olan artışlar Şekil 3.8’de sunulmuştur.

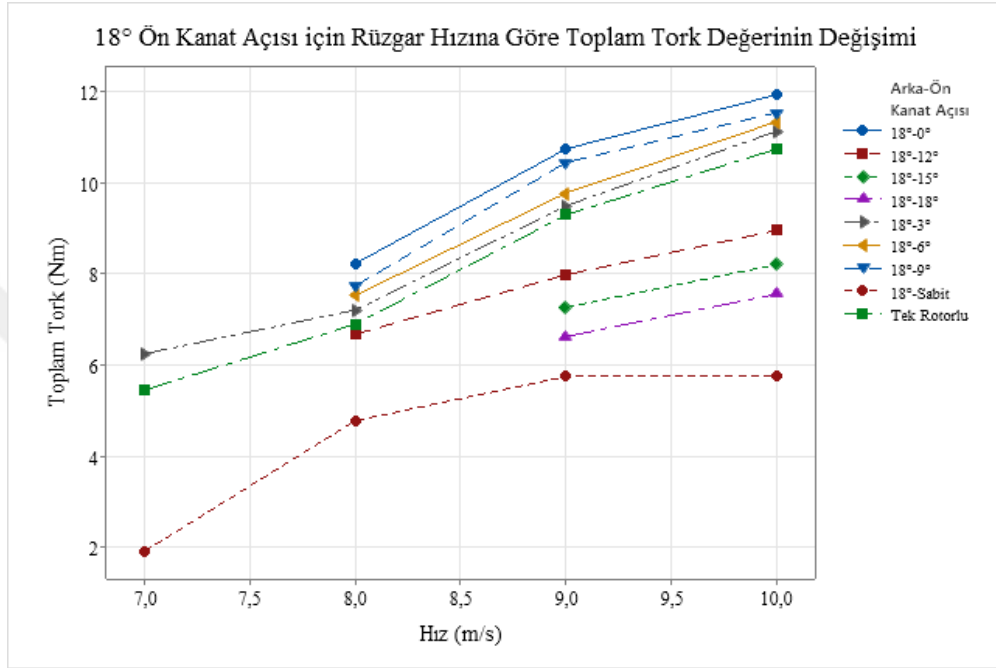


Şekil 3.8. 18° ön kanat açısı için farklı rüzgâr hızı ve konfigürasyonları için tek rotorlu rüzgâr türbinine göre güç çıkışındaki artış miktarı

Şekil 3.8, 18° ön kanat açısı için farklı arka kanat açıları altında elde edilen güç artış oranlarını detaylı bir şekilde sunmaktadır. 18° ön kanat açısı için güç artış oranları incelendiğinde, arka kanat açısının 6° olduğu durumda, tek rotorlu rüzgâr türbinine kıyasla önemli güç kazanımları sağlandığı görülmüştür. Özellikle 8 m/s, 9 m/s ve 10 m/s rüzgâr hızlarında, çift rotorlu sistem sırasıyla %65.53, %21.01 ve %11.74 oranında daha yüksek güç çıktısı elde etmiştir. Bu konfigürasyon, ön rotordan kaynaklanan iz etkisinin etkili bir şekilde kullanıldığını göstermektedir. Arka kanat açısının 9° olarak ayarlandığı durumda, tüm rüzgâr hızlarında %3 ile %20 arasında değişen artışlar elde edilmiştir. Arka kanat açısının 0° olduğu duruma ise güç kazanımlarının minimum düzeyde olduğu görülmüştür. Özellikle yüksek rüzgâr hızlarında güç artışlarının tek rotorlu rüzgâr türbinine kıyasla yaklaşık %4 daha düşük olduğu görülmüştür. Bu sınırlı performans, arka rotoru düz kanat açısı nedeniyle iz etkisi alanındaki enerjiyi etkili bir şekilde çıkaramamasıyla açıklanabilmektedir. Bu durum, özellikle yüksek rüzgâr hızlarında genel sistem

verimliliğinin azalmasına yol açmaktadır. Arka kanat açılarının 3° , 12° , 15° ve 18° olduğu durumlarda çift rotorlu sistem, tek rotorlu türbine kıyasla daha düşük güç çıktıları üretmektedir. En belirgin düşüş, 12° konfigürasyonu için gözlemlenmiş olup, bu durumda çift rotorlu sistem, 9 m/s hızında tek rotora kıyasla %44.62 daha az güç üretmiştir.

18° ön kanat için elde edilen toplam tork değerleri Şekil 3.9’da sunulmuştur.

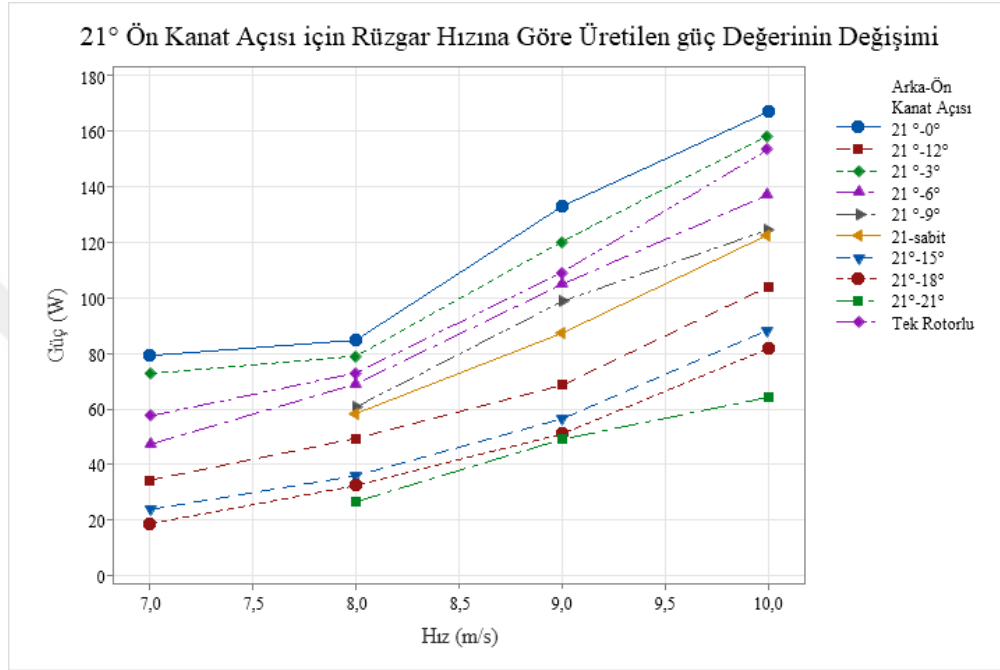


Şekil 3.9. 18° ön kanat için elde edilen toplam tork değerleri

Şekil 3.9, çift rotorlu rüzgâr türbini sisteminde ön kanat açısının 18° olduğu durum için arka kanat açılarının toplam tork değerleri üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak göstermektedir. En yüksek tork değerlerinin $18^\circ-0^\circ$ konfigürasyonuna sahip çift rotorlu rüzgâr türbininden elde edildiğini görülmüştür. Bu konfigürasyon, toplam tork açısından 11.94 Nm ile en iyi performansı sergilemiştir. Ancak bu konfigürasyon, en yüksek güç çıktısının elde edildiği konfigürasyon olmamakla birlikte, tork performansı açısından diğer konfigürasyonlara göre üstünlük sağlamıştır. Bu durum, tork değeri yüksek olsa bile, güç üretiminin tork ile devir sayısının çarpımıyla ilişkili olması nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Tek rotorlu rüzgâr türbini 10.75 Nm ile en yüksek tork değerine ulaşmıştır. Çift rotorlu sistemin $18^\circ-6^\circ$ konfigürasyonu, 11.94 Nm'lik tork değerine kıyasla yaklaşık %11.06 daha düşük bir tork değeri elde etmiş olmasına rağmen, güç çıktısı açısından çok daha verimli performans göstermiştir. İki sistem arasındaki güç çıktısı farkı %32.53 olarak tespit edilmiştir. Bu farkın temel nedeni,

çift rotorlu sistemin arka rotorunun iz etkisi bölgesindeki enerjiyi etkin bir şekilde kullanabilmesi ve buna bağlı olarak daha yüksek devir sayılarına (RPM) ulaşabilmesidir. Tek rotor sisteminde ise iz etkisi bölgesindeki enerji kaybolmakta ve arka rotorun olmaması nedeniyle bu enerjinin geri kazanımı mümkün olmamaktadır

Ön kanat Açısının 21° olduğu durum için deneysel sonuçlar:

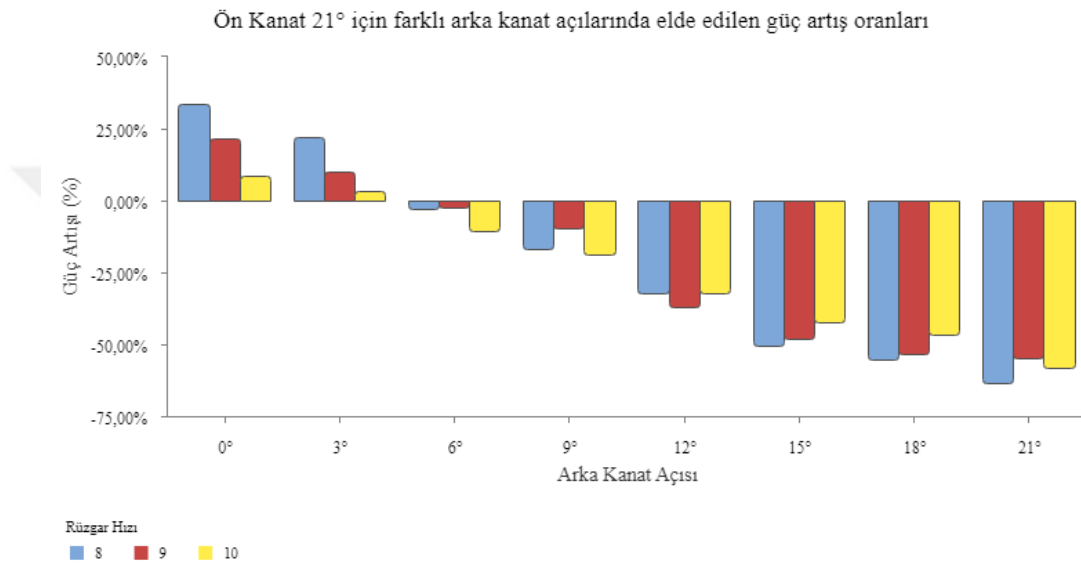


Şekil 3.10. 21° ön kanat açısı için farklı rüzgâr hızı ve konfigürasyonlarda elde edilen güç değerleri

Şekil 3.10'da, 21° ön kanat açısında farklı rüzgâr hızları için arka kanat açısının değişmesi ile elde edilen güç değerlerini karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. En yüksek güç çıktısının 21°-0° konfigürasyonu için elde edildiği görülmüştür. 10 m/s rüzgâr hızında 167,07 W güç çıkışı elde edilmiştir. Tek rotorlu rüzgâr türbini ile karşılaştırıldığında 21°-0° kombinasyonuna sahip çift rotorlu rüzgâr türbini %8-%34 arasında daha iyi güç çıktısı elde etmiştir. Bu durum, 21°-0° konfigürasyonunda iz etkilerinin minimum seviyede tutulduğunu ve arka rotorun ön rotorun iz etkisinden optimum şekilde faydalanarak performansını en üst düzeye çıkardığını göstermektedir. En yüksek güç çıktısının elde edildiği 21°-0° konfigürasyonunun ardından, 21°-3° ve 21°-6° arka kanat açıları sırasıyla 158,58 W ve 137,28 W güç üretimi ile ikinci ve üçüncü en iyi performans gösteren kombinasyonlar olmuştur. 21°-3° konfigürasyonu, arka rotorun iz etkisi bölgesinde kısmen verimli çalıştığını göstermekteyken, 21°-6° konfigürasyonunda arka

rotorun iz etkisini sınırlı bir ölçüde kullanabildiği görülmektedir. Arka kanat açısının $9^\circ, 12^\circ, 15^\circ, 18^\circ$ ve 21° olduğu durumlarda ise tek rotorlu rüzgâr türbinine göre daha az enerji üretildiği görülmüştür. Buradan yola çıkılarak ön kanat açısının 21° olduğu durum için arka kanat açısının $0^\circ-6^\circ$ arasında olması gerektiği söylenebilmektedir.

Ön kanat açısının 21° olduğu durumda, tek rotorlu rüzgâr türbinine göre, farklı kanat açısı konfigürasyonları için güç çıkışlarında olan artışlar Şekil 3.11’de sunulmuştur.

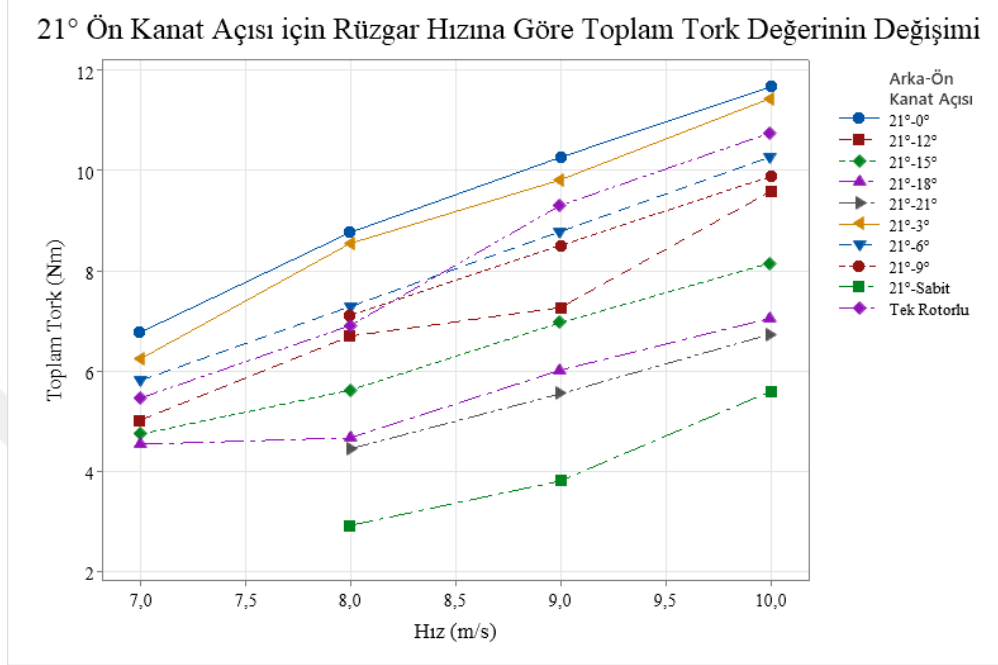


Şekil 3.11. 21° ön kanat açısı için farklı rüzgâr hızı ve konfigürasyonları için tek rotorlu rüzgâr türbinine göre güç çıkışındaki artış miktarı

Şekil 3.11, 21° ön kanat açısı için farklı arka kanat açıları altında elde edilen güç artış oranlarını detaylı bir şekilde sunmaktadır. 21° ön kanat açısı için güç artış oranları incelendiğinde, arka kanat açısının 0° olduğu durumda, tek rotorlu rüzgâr türbinine kıyasla önemli güç kazanımları sağlandığı görülmüştür. Özellikle 10 m/s, 9 m/s ve 8 m/s rüzgâr hızlarında, çift rotorlu sistem sırasıyla %8.79, %21.71 ve %33.84 oranında daha yüksek güç çıktısı elde etmiştir. Bu konfigürasyonlar, ön rotordan kaynaklanan iz etkisinin etkili bir şekilde kullanıldığını göstermektedir. Arka kanat açılarının 0° ve 3° olduğu durumlar güç çıktılarında belirgin oranlarda artış gözükmemektedir. Arka kanat açısının 3° olarak ayarlandığı durumda, tüm rüzgâr hızlarında %3 ile %22 arasında değişen artışlar elde edilmiştir. Arka kanat açılarının $6^\circ, 9^\circ, 12^\circ, 15^\circ, 18^\circ$ ve 21° olduğu durumlarda çift rotorlu sistem, tek rotorlu türbine kıyasla daha düşük güç çıktıları üretmektedir. En belirgin düşüş, $18^\circ-21^\circ$

konfigürasyonu için gözlemlenmiş olup, bu durumda çift rotorlu sistem, tek rotora kıyasla %63.32 daha az güç üretmiştir.

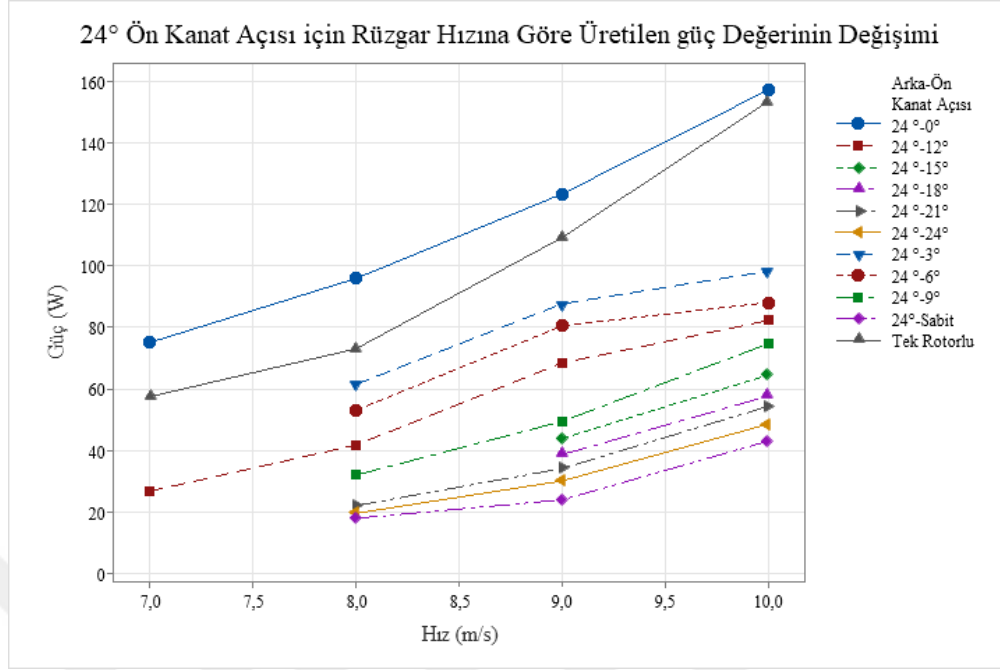
21° ön kanat için elde edilen toplam tork değerleri Şekil 3.12’de sunulmuştur.



Şekil 3.12. 21° ön kanat açısı için elde edilen toplam tork değerleri

Şekil 3.12, çift rotorlu rüzgâr türbini sisteminde ön kanat açısının 21° olduğu durum için arka kanat açılarının toplam tork değerleri üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak göstermektedir. En yüksek tork değerlerinin 21°-0° konfigürasyonuna sahip çift rotorlu rüzgâr türbininden elde edildiğini görülmüştür. Bu konfigürasyon, toplam tork açısından 10.26 Nm ile en iyi performansı sergilemiştir. Bu konfigürasyon aynı zamanda en yüksek güç çıktısının elde edildiği durumdur. Tek rotorlu rüzgâr türbini 10.75 Nm ile en yüksek tork değerine ulaşmıştır. Çift rotorlu sistemin 21°-0° konfigürasyonu, 10.75 Nm'lik tork değerine kıyasla yaklaşık %4.87 daha yüksek bir tork değeri elde etmiş olmasına rağmen, güç çıktısı açısından %33.84 oranında daha verimli performans göstermiştir. Bu farkın temel nedeni, çift rotorlu sistemin arka rotorunun iz etkisi bölgesindeki enerjiyi etkin bir şekilde kullanabilmesi ve buna bağlı olarak daha yüksek devir sayılarına (RPM) ulaşabilmesidir. Tek rotor sisteminde ise iz etkisi bölgesindeki enerji kaybolmakta ve arka rotorun olmaması nedeniyle bu enerjinin geri kazanımı mümkün olmamaktadır.

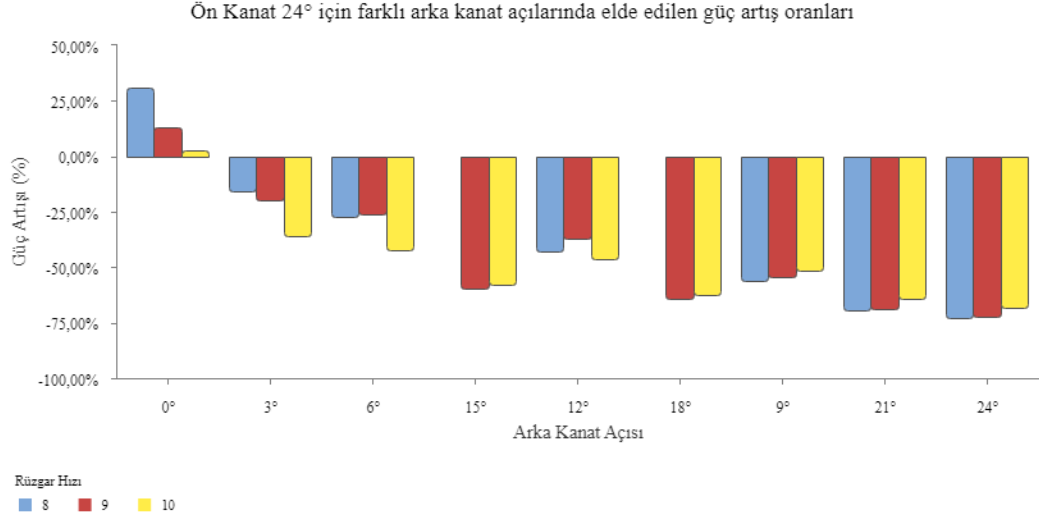
Ön kanat Açısının 24° olduğu durum için deneysel sonuçlar:



Şekil 3.13. 24° ön kanat açısı için farklı rüzgâr hızı ve konfigürasyonlarda elde edilen güç değerleri

Şekil 3.13, 24° ön kanat açısında farklı rüzgâr hızları için arka kanat açısının değişmesi ile elde edilen güç değerlerini karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. En yüksek güç çıktısının 24°-0° konfigürasyonu için elde edildiği görülmüştür. 10 m/s rüzgâr hızında 157.30 W güç çıkışı elde edilmiştir. Tek rotorlu rüzgâr türbini ile karşılaştırıldığında 24°-0° kombinasyonuna sahip çift rotorlu rüzgâr türbini %2-%31 arasında daha iyi güç çıktısı elde etmiştir. Bu durum, 24°-0° konfigürasyonunda iz etkilerinin minimum seviyede tutulduğunu ve arka rotorun ön rotorun iz etkisinden optimum şekilde faydalanarak performansını en üst düzeye çıkardığını göstermektedir. En yüksek güç çıktısının elde edildiği 24°-0° konfigürasyonunun ardından, tek rotorlu rüzgâr türbini en yüksek güç çıktısını üretmiştir. Ön kanat açısının 24° olduğu konfigürasyon dışındaki bütün konfigürasyonlarda tek rotorlu rüzgâr türbinine kıyasla daha düşük güç çıktısı elde edilmiştir. Arka kanat açısının 3°,6°,9°,12°,15°,18° ve 21° olduğu durumlarda çift rotorlu sistem çalışmaya devam etse de tek rotorlu rüzgâr türbinine göre daha az enerji üretildiği görülmüştür. Buradan yola çıkılarak ön kanat açısının 24° olduğu durum için arka kanat açısının 0° arasında olması gerektiği söylenebilmektedir.

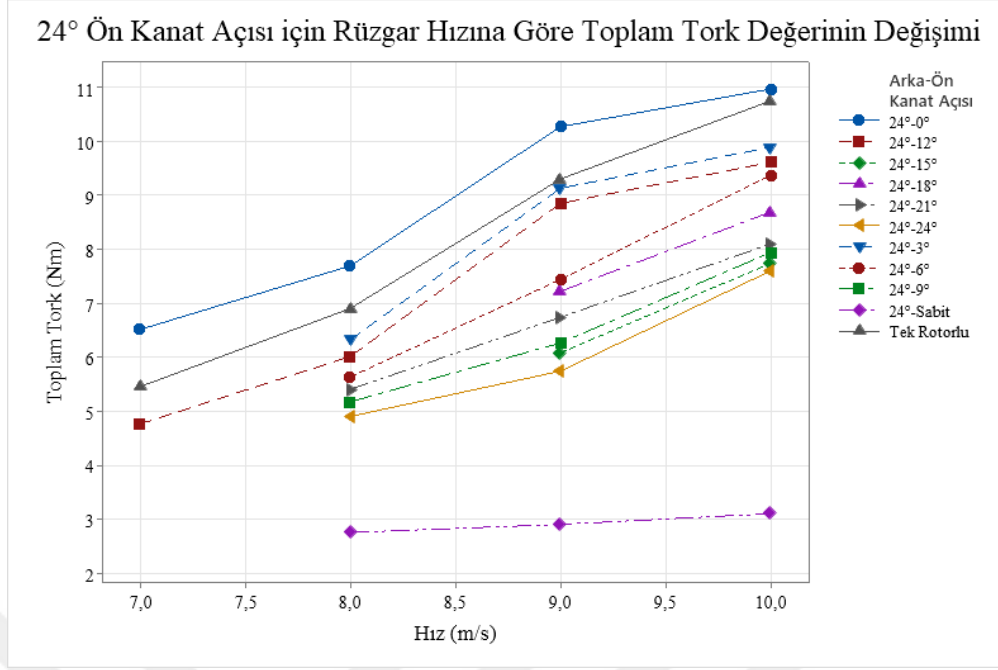
Ön kanat açısının 24° olduğu durumda, tek rotorlu rüzgâr türbinine göre, farklı kanat açısı konfigürasyonları için güç çıkışlarında olan artışlar Şekil 3.14'te sunulmuştur.



Şekil 3.14. 24° ön kanat açısı için farklı rüzgâr hızı ve konfigürasyonları için tek rotorlu rüzgâr türbinine göre güç çıkışındaki artış miktarı

Şekil 3.14, 24° ön kanat açısı için farklı arka kanat açıları altında elde edilen güç artış oranlarını detaylı bir şekilde sunmaktadır. 24° ön kanat açısı için güç artış oranları incelendiğinde, arka kanat açısının 0° olduğu durumda, tek rotorlu rüzgâr türbinine kıyasla daha yüksek güç kazanımları sağlandığı görülmüştür. Özellikle 10 m/s, 9 m/s ve 8 m/s rüzgâr hızlarında, çift rotorlu sistem sırasıyla %2.43, %12.95 ve %31.22 oranında daha yüksek güç çıktısı elde etmiştir. Bu konfigürasyonlar, ön rotordan kaynaklanan iz etkisinin etkili bir şekilde kullanıldığını göstermektedir. Diğer bütün konfigürasyonlarda tek rotorlu rüzgâr türbinine kıyasla daha düşük güç çıktısı elde edilmiştir. En belirgin düşüş, 24° - 24° konfigürasyonu için gözlemlenmiş olup, bu durumda çift rotorlu sistem, 8 m/s hızında tek rotora kıyasla %69.65 daha az güç üretmiştir.

24° ön kanat açısı için elde edilen toplam tork değerleri Şekil 3.15'de sunulmuştur.



Şekil 3.15. 24° ön kanat açısı için elde edilen toplam tork değerleri

Şekil 3.15, çift rotorlu rüzgâr türbini sisteminde ön kanat açısının 24° olduğu durum için arka kanat açılarının toplam tork değerleri üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak göstermektedir. En yüksek tork değerlerinin 24°-0° konfigürasyonuna sahip çift rotorlu rüzgâr türbininden elde edildiğini görülmüştür. Bu konfigürasyon, toplam tork açısından 10.97 Nm ile en iyi performansı sergilemiştir. Bu konfigürasyon aynı zamanda en yüksek güç çıktısının elde edildiği durumdur. Tek rotorlu rüzgâr türbini 10.75 Nm ile en yüksek tork değerine ulaşmıştır. Çift rotorlu sistemin 24°-0° konfigürasyonu, 10.75 Nm'lik tork değerine kıyasla yaklaşık %2.04 daha yüksek bir tork değeri elde etmiş olmasına rağmen, güç çıktısı açısından %31.22 oranında daha verimli performans göstermiştir. Bu farkın temel nedeni, çift rotorlu sistemin arka rotorunun iz etkisi bölgesindeki enerjiyi etkin bir şekilde kullanabilmesi ve buna bağlı olarak daha yüksek devir sayılarına (RPM) ulaşabilmesidir. Tek rotor sisteminde ise iz etkisi bölgesindeki enerji kaybolmakta ve arka rotorun olmaması nedeniyle bu enerjinin geri kazanımı mümkün olmamaktadır.

Çift rotorlu rüzgâr türbini sistemine yönelik yapılan deneysel analizler, ön ve arka rotorun farklı kanat açısı konfigürasyonları altında tork, güç ve çalışma performansını detaylı bir şekilde ortaya koymuştur. Elde edilen veriler, çift rotorlu rüzgâr türbini sisteminin potansiyel avantajlarını ve sınırlamalarını göstermektedir.

Çalışma Koşulları ve Performans

Ön ve arka rotorun zıt devinimli bir şekilde dönebildiği konfigürasyonların belirlenmesi, çift rotorlu sistemlerin aerodinamik ve mekanik sınırlamalarını anlamada önemli bir adımdır. Deneysel veriler, ön rotorun daha geniş bir çalışma aralığını sağladığını gösterirken, arka rotorun iz etkisi bölgesinde çalışması nedeniyle performansının sınırlandığını göstermektedir. Özellikle ön kanat açısının düşük olduğu durumlarda, kanatların rüzgâr daha dik bir açıyla bakması nedeniyle, arka rotorun performansı ciddi oranlarda düşmüştür. Ön kanat açısının 24° olduğu durum, arka rotorun tüm açılarda dönebildiği tek durum olarak dikkat çekmiştir.

Bu sonuçlar, çift rotorlu sistemlerde ön ve arka rotor arasındaki optimum açı kombinasyonlarının belirlenmesinin, sistem performansı açısından kritik bir faktör olduğunu göstermektedir. Ön rotorun açısının belirli bir seviyenin üzerinde olması, arka rotorun stabil çalışmasını sağlayarak çift rotorlu sistemlerin verimli ve dengeli bir şekilde enerji üretebilmesi için gerekli aerodinamik koşulları oluşturmuştur. Bu nedenle, kanat açılara bağlı olarak sistemin çalışma sınırlarının belirlenmesi hem tasarım optimizasyonu hem de sistem kontrol stratejilerinin geliştirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Tork ve Güç Arasındaki İlişki

Tork ve güç değerleri arasındaki ilişki incelendiğinde, toplam tork değerinin tek rotorlu sistemlerde genellikle daha yüksek olduğu, ancak çift rotorlu sistemlerin daha fazla güç üretebilme kabiliyetine sahip olduğu görülmüştür. Bunun temel nedeni, çift rotorlu sistemde yer alan arka rotorun iz etkisinin olduğu bölgede enerjiyi aktif bir şekilde kullanabilmesinden kaynaklanmaktadır. Daha yüksek devir sayılarına ulaşmak mümkün olmaktadır. 12° ön kanat açısı için çift rotorlu sistemin tork değerinin tek rotorlu sisteme göre daha düşük olmasına rağmen, güç çıktısı %58.56 oranında daha yüksek olarak elde edilmiştir. Bu durum, çift rotorlu sistemin devir sayısının güce olan etkisini net bir şekilde ortaya koymaktadır.

Bu bulgu, çift rotorlu sistemlerde tork ve güç arasındaki ilişkinin tek rotorlu sistemlerden farklı bir dinamikte çalıştığını ortaya koymaktadır. Tek rotorlu sistemlerde güç üretimi, tork ve rotor hızının birleşimi ile belirlenirken, çift rotorlu sistemlerde ise rotorların devir sayıları, iz etkisinin etkin kullanımı ve aerodinamik etkileşimler güç üretimi üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle ikinci rotorun, birinci rotorun oluşturduğu iz akışına nasıl tepki verdiği ve bu akıştan nasıl enerji çektiği, sistemin genel performansını doğrudan etkilemektedir. Bu durum,

çift rotorlu sistemlerin mekanik tasarım ve kontrol stratejilerinde yalnızca tork değerine değil, rotorların dönüş hızlarına, iz etkisinin optimize edilmesine ve rotorlar arasındaki aerodinamik etkileşime de odaklanması gerektiğini göstermektedir.

Kanat Açılarının Performansa Etkisi

Deneylerde farklı ön ve arka kanat açılarının etkisi ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Analizler, ön kanat açısının artırılması ile arka rotorun performansını arttıracak daha düzgün bir akış alanı oluşturduğunu göstermektedir. Ön kanat açısının 12° olduğu durumda, arka kanat açısının 3° olarak ayarlanmasıyla sistemin maksimum güç çıktısı elde edilmiştir. Fakat ön kanat açısının 24° olduğu durumlarda, arka rotorun katkı oranları artmış olsa da iz etkisi bölgesinde çalışmasından kaynaklı daha düşük güç çıktısı elde edilmiştir.

Bu bulgular, çift rotorlu rüzgâr türbinlerinde ön ve arka rotor kanat açılarının birlikte optimize edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Ön rotorun açısının belirli bir seviyeye kadar artırılması, arka rotorun daha düzenli bir akış alanında çalışmasını sağlarken, çok yüksek açılar iz etkisini artırarak sistemin genel verimini düşürebilmektedir. Bu nedenle, çift rotorlu sistemlerin tasarımında, ön ve arka rotor açıları arasındaki optimum dengeyi sağlamak, aerodinamik kayıpları minimize etmek ve maksimum güç üretimini elde etmek için kritik bir faktör olarak değerlendirilmelidir.

İz Etkisi ve Aerodinamik Etkileşimler

İz etkisi çift rotorlu sistemlerdeki en büyük sınırlayıcı faktörlerden bir tanesidir. Yapılan deneysel çalışmalar bunu doğrular niteliktedir. Ön rotorun iz etkisi, arka rotorun giriş akışını bozarak aerodinamik verimliliği azalttığı görülmüştür. Bu durum özellikle yüksek arka kanat açılarında daha belirgin hale gelmiştir. Bazı açı konfigürasyonlarında tek rotorlu rüzgâr türbininden daha düşük bir güç çıktısı elde edilmiştir.

İz etkisini minimize etmek ve arka rotorun daha stabil bir akış alanında çalışmasını sağlamak için ön rotorun açı değerinin belirli bir eşik değerin üzerinde olması gerektiği belirlenmiştir. Yapılan analizler, ön rotorun 12° derece ve üzerinde çalıştığında arka rotorun etkin bir şekilde çalışmaya başladığını göstermektedir. Ön rotorun düşük açı değerlerinde çalıştırılması ile arka rotorun düşük enerjili bir akış alanında çalışmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, çift rotorlu sistemlerin tasarımında, ön rotorun minimum 12° veya daha yüksek açı değerlerinde

çalıştırılması, arka rotorun daha verimli çalışmasını sağlamak ve sistemin toplam enerji üretimini maksimize etmek açısından kritik bir tasarım stratejisi olarak öne çıkmaktadır.

İdeal Konfigürasyonlar

Deneyssel analizler, her ön kanat açısı için en verimli arka kanat açılarını belirlemeye yardımcı olmuştur. Yapılan testler sonucunda, farklı ön kanat açıları için elde edilen deneyssel güç çıktıları referans alınarak, **sistemin maksimum güç ürettiği ideal ön ve arka kanat açıları belirlenmiş ve sunulmuştur.**

12° Ön Kanat Açısı: En yüksek güç çıktısı (189.50 W) 12°-3° konfigürasyonundan elde edilmiştir. Arka kanat açısının 0°-6° arasında olması durumunda sistemin performansı optimize edilmektedir.

15° Ön Kanat Açısı: Tek rotorlu sisteme göre en yüksek güç artışı (%66.21) 15°-3° konfigürasyonundan elde edilmiştir. Arka kanat açısının 0°-6° arasında olması durumunda sistemin performansı optimize edilmektedir. Arka kanat açısının 3°-6° aralığında olması durumunda sistem en iyi performansı sergilemiştir.

18° Ön Kanat Açısı: Ön kanat açısının 18° olduğu durumda en yüksek güç çıktısı arka kanat açısının 6° olması durumunda elde edilmiştir. Tek rotorlu sisteme kıyasla %32.53 oranında bir artış göstermiştir. Arka kanat açısının 0°-9° arasında tutulması ile optimum sonuçlar sağlanmıştır.

21-24° Ön Kanat Açısı: Ön kanat açısının 21° ve 24° olduğu durumlarda en yüksek güç ve tork çıktıları arka kanat açılarının 0° olması durumunda elde edilmiştir. Arka kanat açısının sadece 0° olması durumunda sistemden optimum sonuçlar elde edilmiştir.

Çift Rotorlu Sistemin Avantaj ve Sınırlamaları

Çift rotorlu sistemler, uygun konfigürasyonlarda çalıştırıldığında tek rotorlu sistemlere kıyasla daha yüksek güç çıktıları elde edebilme potansiyeline sahip olduğu görülmüştür. Ancak, iz etkisinin kontrol edilebilmesi ve kanat açısı optimizasyonunun doğru bir şekilde yapılması kritik rol oynamaktadır. Ayrıca sistemde maksimum güç noktası takibi gibi dinamik kontrol parametrelerinin uygulanması, çift rotorlu sistemlerin verimliliğini önemli ölçüde artırabilir. Yapılan analizler, çift rotorlu rüzgâr türbinlerinin performans sınırlarının belirlenmesi ve optimize edilmesi için önemli bir yol haritası sunmaktadır.

Çift rotorlu sistemlerin verimli çalışması için bazı mekanik ve aerodinamik sınırlamaların aşılması gerekmektedir. İz etkisinin kontrol edilmesi, arka rotorun enerji üretim kapasitesini doğrudan etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Yapılan deneylerde, ön rotorun oluşturduğu türbülanslı akışın arka rotorun giriş akışını bozarak aerodinamik verimliliğini azalttığı ve bazı açılarda tek rotorlu sistemlere göre daha düşük güç çıktısı üretilmesine sebep olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle ön rotor açısının 9° ve daha düşük olduğu durumlarda, arka rotorun stabil şekilde çalışmadığı tespit edilmiştir. Bu durum, çift rotorlu sistemlerin sadece belirli konfigürasyonlarda avantaj sağladığını ve sistemin optimum tasarım parametreleri belirlenmeden her durumda verimli çalışmayacağını ortaya koymaktadır.

Tork dengesinin korunması, özellikle %0-%5 tork farkı aralığında sistemin en kararlı çalıştığının tespit edilmesi, rotorlar arasındaki enerji transferinin optimize edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. %15 ve üzeri tork farklarında, iz etkisinin arka rotor performansını ciddi şekilde sınırladığı gözlemlenmiş ve tork farkının %28.46'yı aşması durumunda sistemin kararlılığının bozulduğu belirlenmiştir.

Sonuç olarak, çift rotorlu rüzgâr türbinleri, daha fazla enerji üretme potansiyeline sahip olmasına rağmen, sistemin iz etkisi, tork dengesi ve rotor açıları açısından optimize edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada sunulan bulgular, çift rotorlu rüzgâr türbinlerinin performans sınırlarını belirleyerek, gelecekteki tasarım ve kontrol optimizasyonlarına yol gösterecek önemli bir referans sağlamaktadır.

3.2 Ekserji Analizi ve Elde Edilen Bulgular

Bu bölümde, zıt devinimli çift rotorlu rüzgâr türbinleri ekserji yönünden incelenmiş ve elde edilen sonuçlar enerji çıktıları ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Ekserji verimliliği, sistemin termodinamik olarak ne kadar verimli çalıştığını ve mevcut enerji potansiyelinin ne kadar etkili bir şekilde kullanıldığını ifade etmektedir. Bununla birlikte, ekserji yıkımı, sistemde geri kazanılamayan enerji kayıplarını göstererek, türbin performansının iyileştirilmesi açısından kritik bir değerlendirme parametresi olmuştur. Çift rotorlu rüzgâr türbinlerinde ekserji analizi, ön rotor, rotorlar arası bölge ve arka rotor çıkışındaki akış alanlarında meydana gelen enerji kayıplarını belirlemek açısından büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, ön rotorun girişinde, ön rotor çıkışında (arka rotorun girişinde) ve arka rotorun çıkışında ölçülen hız, basınç ve sıcaklık değerleri

kullanılarak ekserji yıkımı hesaplanmıştır. Böylece, her iki rotorun enerji dönüşüm sürecine olan katkıları ve bu süreçte oluşan termodinamik kayıplar analiz edilmiştir. Özellikle arka rotorun performansı, ön rotorun oluşturduğu iz etkisi nedeniyle değişiklik göstermekte ve bu durum sistemdeki ekserji kayıplarını doğrudan etkilemektedir.

Yapılan literatür taramasında, çift rotorlu rüzgâr türbinlerinin ekserji bazında değerlendirildiği herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Mevcut çalışmalar genellikle çift rotorlu sistemlerin aerodinamik performansına, enerji üretim kapasitelerine veya iz etkisine odaklanırken, bu çalışmada ilk kez çift rotorlu sistemlerin termodinamik verimliliği ekserji perspektifinden ele alınmıştır. Bu yönüyle, çalışma çift rotorlu sistemlerde ön rotorun iz etkisinin arka rotor üzerindeki ekserji yıkımı açısından değerlendirilmesine olanak sağlayan ilk deneysel analizlerden biri olması bakımından literatüre önemli bir katkı sunmaktadır.

Şekil 3.16'da 24° ön kanat açısı için çift rotorlu rüzgâr türbinlerinde ekserji yıkımı (kJ/kg) ve enerji üretimi (W) sunulmuştur. Sonuçlar, ekserji yıkımının rüzgâr hızı ve kanat açısına bağlı olarak değiştiğini ve enerji üretimi ile doğrudan bir ilişkiye sahip olduğunu göstermektedir. Ekserji yıkımının rüzgâr hızı arttıkça belirgin bir şekilde yükseldiği görülmüştür. 24° - 0° konfigürasyonu için ekserji yıkımı 7 m/s hızda 178.0 kJ/kg iken, 10 m/s hızda 361.6 kJ/kg'ye ulaşmaktadır. Benzer şekilde, diğer konfigürasyonlarda da artan rüzgâr hızıyla birlikte ekserji yıkımında belirgin bir artış gözlemlenmektedir. Konfigürasyonlar değerlendirildiğinde, 24° - 0° ve 24° - 18° kombinasyonlarının en yüksek ekserji yıkımına sahip olduğu görülmektedir. Ekserji yıkımının yüksek olması, akışkanın mekanik enerjiye dönüşümü sırasında meydana gelen kayıpların fazla olduğunu göstermektedir. 24° ön kanat açısı için enerji yıkımının en yüksek olduğu konfigürasyonlarda aynı zamanda en yüksek enerji üretiminin sağlandığı görülmüştür. Tek rotorlu türbin ile çift rotorlu sistem karşılaştırıldığında, çift rotorlu yapıdaki ekserji yıkımı önemli ölçüde daha yüksek olmasına rağmen enerji üretimi daha yüksek olduğu görülmüştür. Tek rotorlu sistemde 10 m/s hızda ekserji yıkımı 193.4 kJ/kg seviyesindeyken, çift rotorlu türbinde bu değer 361 kJ/kg olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, tek rotorlu türbinin ürettiği enerji 153.5 W iken, çift rotorlu türbinde bu değer en verimli konfigürasyon için yaklaşık 160 W seviyelerine ulaşmıştır. Bu karşılaştırma, çift rotorlu türbinin enerji dönüşüm sürecinde daha

yüksek ekserji kaybına sahip olmasına rağmen, toplam enerji üretiminde avantaj sunduğunu göstermektedir.

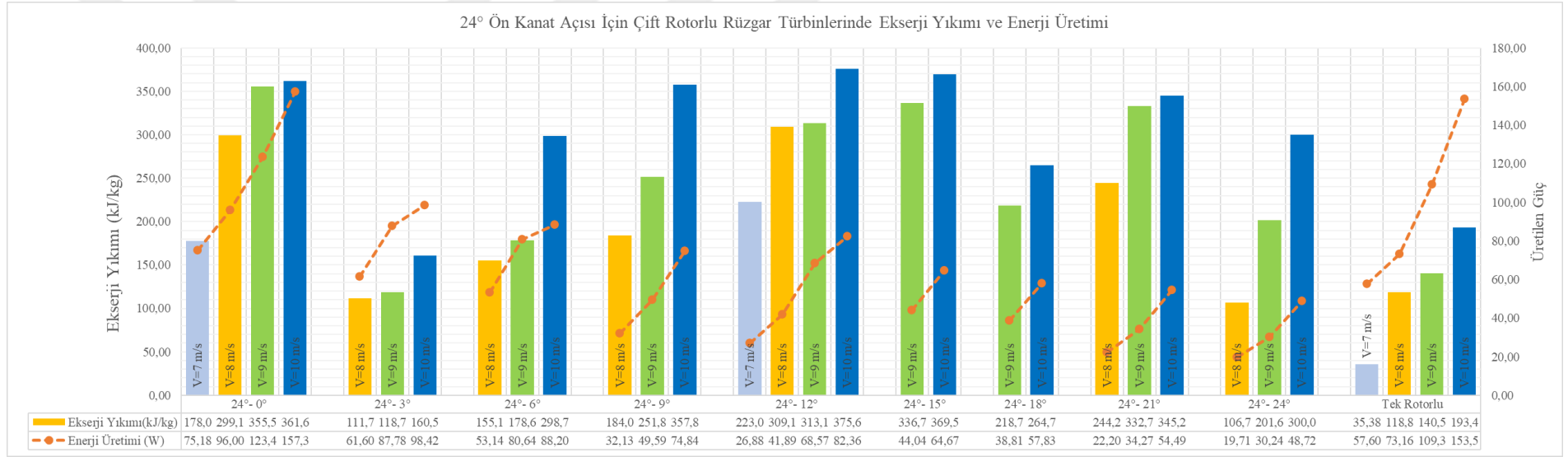
Şekil 3.17'de 21° ön kanat açısı için çift rotorlu rüzgâr türbinlerinde ekserji yıkımı (kJ/kg) ve enerji üretimi (W) sunulmuştur. Genel olarak, artan rüzgâr hızıyla birlikte ekserji yıkımının belirgin şekilde arttığı gözlemlenmiştir. $21^\circ - 0^\circ$ konfigürasyonu için ekserji yıkımı 7 m/s hızda 137 kJ/kg, 10 m/s hızda 325 kJ/kg seviyesine ulaşmaktadır. Benzer eğilim, diğer kanat açılarında da gözlemlenmekte olup, $21^\circ - 3^\circ$ ve $21^\circ - 15^\circ$ konfigürasyonları en yüksek ekserji yıkımına sahip kombinasyonlar olarak öne çıkmaktadır. $21^\circ - 3^\circ$ konfigürasyonunda 10 m/s hızda ekserji yıkımı 287 kJ/kg, üretilen güç ise 158 W seviyesine ulaşmaktadır. Daha düşük ekserji yıkımına sahip olan $21^\circ - 21^\circ$ konfigürasyonunda ise ekserji yıkımı 224 kJ/kg, enerji üretimi 64.4 W seviyesinde kalmaktadır. Tek rotorlu türbin ile çift rotorlu sistem karşılaştırıldığında, çift rotorlu yapıdaki ekserji yıkımının daha yüksek olduğu, ancak bunun enerji üretiminde avantaj sağladığı görülmektedir. Tek rotorlu sistemde 10 m/s hızda ekserji yıkımı 193 kJ/kg, çift rotorlu sistemde ise 360 kJ/kg'ye kadar çıkmaktadır. Aynı hızda, tek rotorlu türbinin ürettiği enerji 153 W, çift rotorlu sistemde ise 160 W seviyelerine ulaştığı görülmüştür. Bu karşılaştırma, çift rotorlu sistemlerin enerji dönüşüm sürecinde ekserji kaybının arttığını, ancak bu durumun enerji üretimi açısından genel bir avantaj sunduğunu ortaya koymaktadır.

Şekil 3.18'de 18° ön kanat açısı için çift rotorlu rüzgâr türbinlerinde ekserji yıkımı ve enerji üretimi arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Artan rüzgâr hızıyla birlikte ekserji yıkımının belirgin şekilde arttığı gözlemlenmiştir. $18^\circ - 0^\circ$ konfigürasyonu için ekserji yıkımı 7 m/s hızda 268.4 kJ/kg, 10 m/s hızda ise 336.6 kJ/kg seviyesine ulaşmaktadır. Benzer eğilim, diğer kanat açılarında da gözlemlenmekte olup, $18^\circ - 9^\circ$ ve $18^\circ - 12^\circ$ konfigürasyonları en yüksek ekserji yıkımına sahip kombinasyonlar olarak öne çıkmaktadır. $18^\circ - 9^\circ$ konfigürasyonunda 10 m/s hızda ekserji yıkımı 375.9 kJ/kg, üretilen güç ise 158.2 W seviyesine ulaşmaktadır. Daha düşük ekserji yıkımına sahip olan $18^\circ - 18^\circ$ konfigürasyonunda ekserji yıkımı 361 kJ/kg, enerji üretimi 106,6 W seviyesinde kalmaktadır. Tek rotorlu türbin ile çift rotorlu sistem karşılaştırıldığında, çift rotorlu yapıdaki ekserji yıkımının daha yüksek olduğu, ancak bunun enerji üretiminde avantaj sağladığı görülmektedir. Tek rotorlu sistemde 10 m/s hızda ekserji yıkımı 193.4 kJ/kg, çift rotorlu sistemde ise bu değer 367 kJ/kg'ye kadar çıkmaktadır. Aynı hızda, tek

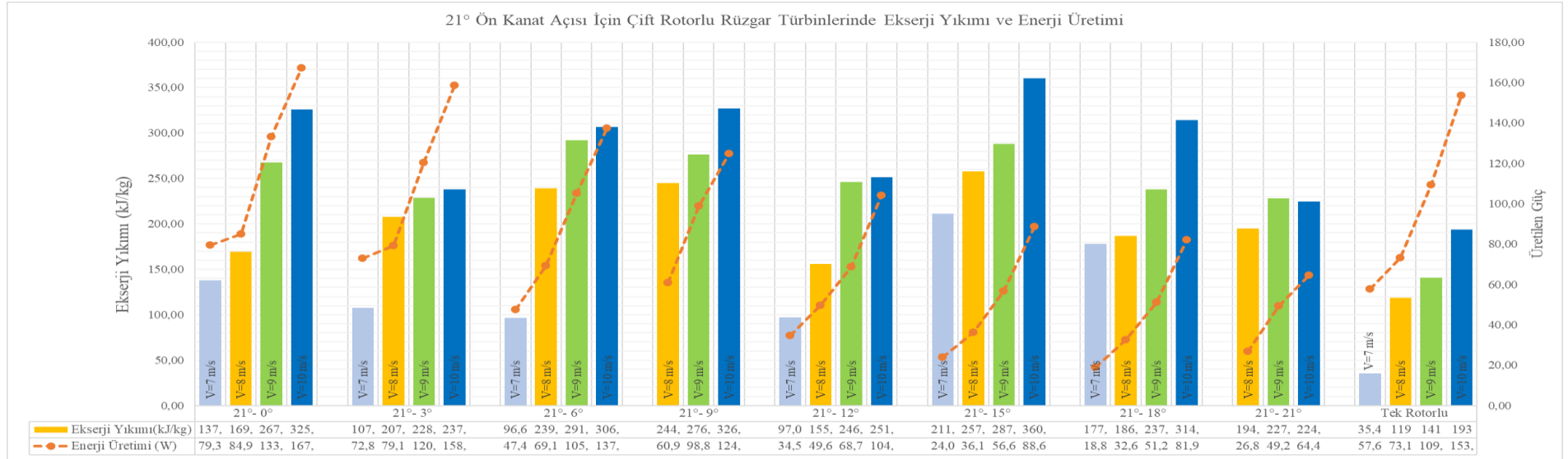
rotorlu türbinin ürettiği enerji 153.5 W, çift rotorlu sistemde ise 160 W değerlerine çıktığı görülmüştür.

Şekil 3.19'da 15° ön kanat açısı için çift rotorlu rüzgâr türbinlerinde ekserji yıkımı ve enerji üretimi arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Artan rüzgâr hızıyla birlikte ekserji yıkımının belirgin şekilde arttığı gözlemlenmiştir. 15°- 0° konfigürasyonu için ekserji yıkımı 7 m/s hızda 85.2 kJ/kg, 10 m/s hızda ise 211.37 kJ/kg seviyesine ulaşmaktadır. Benzer eğilim, diğer kanat açılarında da gözlemlenmekte olup, 15°- 12° ve 15°- 15° konfigürasyonları en yüksek ekserji yıkımına sahip kombinasyonlar olarak öne çıkmaktadır. 15°- 12° konfigürasyonunda 10 m/s hızda ekserji yıkımı 283.22 kJ/kg, üretilen güç ise 132,02 W seviyesine ulaşmaktadır. Daha düşük ekserji yıkımına sahip olan 15°- 6° konfigürasyonunda ekserji yıkımı 192.88 kJ/kg, enerji üretimi 126.28 W seviyesinde kalmaktadır. Tek rotorlu türbin ile çift rotorlu sistem karşılaştırıldığında, çift rotorlu yapıdaki ekserji yıkımının daha yüksek olduğu, ancak bunun enerji üretiminde avantaj sağladığı görülmektedir. Tek rotorlu sistemde 10 m/s hızda ekserji yıkımı 193.41 kJ/kg, çift rotorlu sistemde ise bu değer 283.22 kJ/kg'ye kadar çıkmaktadır. Aynı hızda, tek rotorlu türbinin ürettiği enerji 153.57 W, çift rotorlu sistemde ise 170 W değerlerine çıktığı görülmüştür.

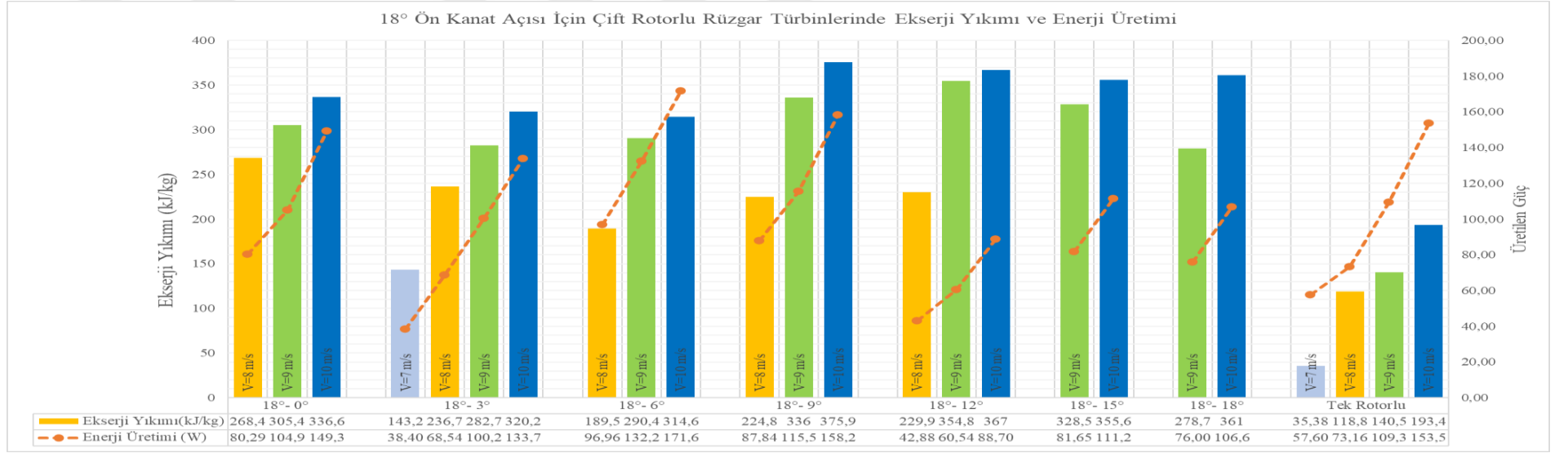
Şekil 3.20'de 12° ön kanat açısı için çift rotorlu rüzgâr türbinlerinde ekserji yıkımı ve enerji üretimi arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Artan rüzgâr hızıyla birlikte ekserji yıkımının belirgin şekilde arttığı gözlemlenmiştir. 12°- 0° konfigürasyonu için ekserji yıkımı 7 m/s hızda 71.3 kJ/kg, 10 m/s hızda ise 174.4 kJ/kg seviyesine ulaşmaktadır. Benzer eğilim, diğer kanat açılarında da gözlemlenmekte olup, 12°- 6° ve 12°- 12° konfigürasyonları en yüksek ekserji yıkımına sahip kombinasyonlar olarak öne çıkmaktadır. 12°- 6° konfigürasyonunda 10 m/s hızda ekserji yıkımı 280.26 kJ/kg, üretilen güç ise 178.11 W seviyesine ulaşmaktadır. Daha düşük ekserji yıkımına sahip olan 12°- 15° konfigürasyonunda ekserji yıkımı 233.38 kJ/kg, enerji üretimi 127.36 W seviyesinde kalmaktadır. Tek rotorlu türbin ile çift rotorlu sistem karşılaştırıldığında, çift rotorlu yapıdaki ekserji yıkımının daha yüksek olduğu, ancak bunun enerji üretiminde avantaj sağladığı görülmektedir. Tek rotorlu sistemde 10 m/s hızda ekserji yıkımı 193,41 kJ/kg, çift rotorlu sistemde ise bu değer 280.26 kJ/kg'ye kadar çıkmaktadır. Aynı hızda, tek rotorlu türbinin ürettiği enerji 153.57 W, çift rotorlu sistemde ise 189 W değerlerine çıktığı görülmüştür.



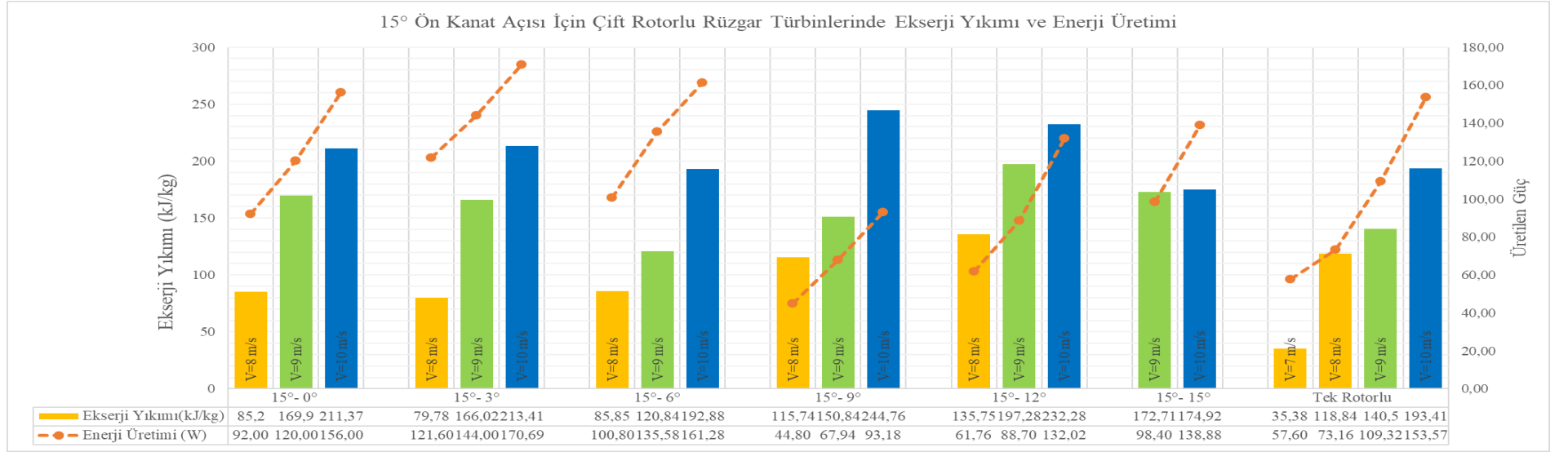
Şekil 3.16. 24° Ön kanat açısı için çift rotorlu rüzgâr türbinlerinde ekserji yıkımı ve enerji üretimi



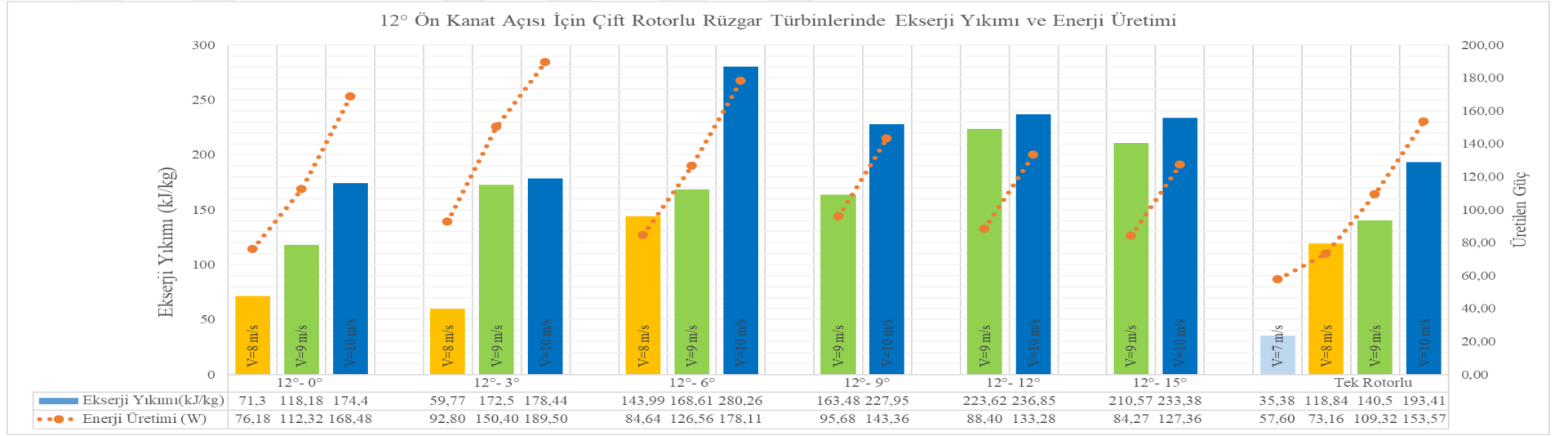
Şekil 3.17. 21° Ön kanat açısı için çift rotorlu rüzgâr türbinlerinde ekserji yıkımı ve enerji üretimi



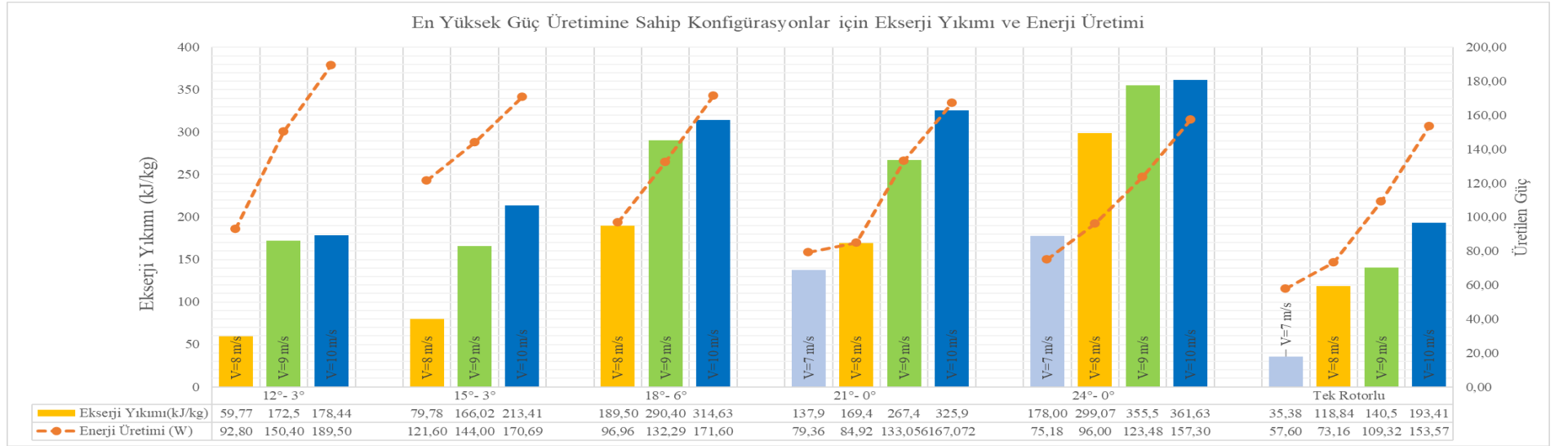
Şekil 3.18. 18° Ön kanat açısı için çift rotorlu rüzgâr türbinlerinde ekserji yıkımı ve enerji üretimi



Şekil 3.19. 15° Ön kanat açısı için çift rotorlu rüzgâr türbinlerinde ekserji yıkımı ve enerji üretimi



Şekil 3.20. 12° Ön kanat açısı için çift rotorlu rüzgâr türbinlerinde ekserji yıkımı ve enerji üretimi



Şekil 3.21. En yüksek güç üretimine sahip konfigürasyonlar için ekserji yıkımı ve enerji üretimi

Şekil 3.21’de en yüksek güç üretimine sahip konfigürasyonlar için ekserji yıkımı ve enerji üretimini göstermektedir. Rüzgâr hızındaki artış ile birlikte ekserji yıkımının belirgin şekilde arttığı gözlemlenmiştir. 12° - 3° konfigürasyonu için 7 m/s hızda 59.77 kJ/kg olan ekserji yıkımı, 10 m/s hızda 178.44 kJ/kg seviyesine ulaşmaktadır. 24° - 0° konfigürasyonu ise, 10 m/s hızda 361.63 kJ/kg ekserji yıkımıyla en yüksek değerlere ulaşan konfigürasyonlardan biri olarak öne çıkmaktadır. Bu durum, kanat açısı ve rüzgâr hızının ekserji kayıpları üzerinde doğrudan etkili olduğunu ve bazı konfigürasyonlarda kayıpların aşırı düzeylere çıkabildiğini göstermektedir. Tek rotorlu sistemde 10 m/s hızda ekserji yıkımı 193.41 kJ/kg iken, çift rotorlu sistemlerde bu değer 300 kJ/kg ve üzeri seviyelere ulaşmaktadır. Bu fark, çift rotorlu sistemlerde hava akışı üzerindeki etkileşimlerin daha kompleks hale geldiğini ve aerodinamik kayıpların arttığını göstermektedir. Ancak, bu kayıplara rağmen çift rotorlu sistemler, rüzgâr enerjisinin mekanik enerjiye dönüşümünde daha etkin bir performans sergileyerek enerji üretiminde avantaj sağlamaktadır. Tek rotorlu türbin ile karşılaştırıldığında, çift rotorlu türbinlerin enerji üretiminde belirgin bir avantaj sağladığı görülmektedir. 10 m/s hızda tek rotorlu sistem 153.57 W güç üretirken, çift rotorlu sistemlerde bu değer 189 W seviyelerine kadar çıkmaktadır. Bu durum, çift rotorlu sistemlerin aerodinamik verimliliğinin tek rotorlu sistemlere kıyasla daha yüksek olduğunu ve hava akışından daha fazla enerji toplayabildiğini göstermektedir.

Çalışma sonuçları, çift rotorlu rüzgâr türbinlerinde ekserji yıkımı ve enerji üretimi arasındaki ilişkiyi net bir şekilde ortaya koymaktadır. Rüzgâr hızındaki artışın, ekserji kayıplarında belirgin bir yükselişe neden olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, yüksek hızlarda türbin bileşenleri arasındaki aerodinamik etkileşimlerin daha karmaşık hale gelerek enerji dönüşüm sürecinde ekserji kayıpları artırdığını göstermektedir. Kanat açısı, ekserji yıkımı ve enerji üretimi açısından kritik bir parametre olarak öne çıkmaktadır. Bazı açılar, hava akışını daha verimli yönlendirerek enerji üretimini artırırken, bazı açılar ise türbülans ve geri akış gibi olumsuz etkileri artırarak ekserji kayıplarını büyötmektedir. Optimum bir tasarımın belirlenmesi, enerji üretimi ve ekserji yönetimi açısından büyük önem taşımaktadır. Tek rotorlu ve çift rotorlu türbinlerin karşılaştırılması, çift rotorlu sistemlerin aerodinamik olarak daha avantajlı olduğunu göstermektedir. Çift rotorlu yapı, havanın daha etkin bir şekilde kullanılmasını sağlayarak toplam enerji üretimini artırmaktadır. Ancak, bu süreçte ekserji kayıpları da artmakta ve sistemin

termodinamik verimliliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olmaktadır. Dolayısıyla, çift rotorlu sistemlerin tasarım sürecinde hem enerji üretimi hem de ekserji yönetimi dikkate alınarak optimizasyon çalışmaları yapılması gerekmektedir. Genel olarak, çift rotorlu sistemler, rüzgâr enerjisinin mekanik enerjiye dönüşümünde daha verimli bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. Ancak, bu sistemlerin yüksek ekserji kayıplarını minimize edecek şekilde tasarlanması, enerji üretimindeki kazançların en üst seviyeye çıkarılması açısından kritik bir faktördür. Bu doğrultuda, kanat açısının dikkatli bir şekilde optimize edilmesi hem enerji üretimini artıracak hem de ekserji kayıplarını kontrol altında tutarak türbin performansını en iyi hale getirecektir.

3.3 Çift Rotorlu Rüzgâr Türbini CFD Analizleri

Çift rotorlu rüzgâr türbinlerinin performansı, kanat hücum açıları, burulma açısı, kord uzunluğu, rüzgâr hızları ve rotor devir sayıları gibi aerodinamik parametrelerle doğrudan ilişkilidir. Bu parametreler, türbinin güç üretim kapasitesini, tork karakteristiklerini ve genel aerodinamik verimliliğini önemli ölçüde etkilemektedir. Çift rotorlu sistemlerde, ön rotorun hava akışını değiştirmesi, iz etkisi nedeniyle arka rotorun performansını doğrudan etkileyerek enerji kayıplarına veya kazanımlarına yol açmaktadır. Bu nedenle, çift rotorlu rüzgâr türbinlerinin aerodinamik ve fiziksel etkileşimini daha iyi anlamak ve olası etkileri daha net yorumlayabilmek için, sistemin deneysel verilerle doğrulanan CFD analizleriyle kapsamlı bir şekilde incelenmesi büyük önem taşımaktadır.

Bu bölümde, çift rotorlu rüzgâr türbinleri üzerine yapılan deneysel çalışmaların sonuçları ile Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) analizlerinden elde edilen bulgular karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Daha önceki bölümlerde deneysel olarak incelenen çift rotorlu rüzgâr türbini sisteminin, yük altında hangi açılarda dönmeye devam ettiği ve güç üretebildiği belirlenmişti. Deneysel çalışmalar sonucunda, rüzgâr hızları, ön ve arka rotor devir sayıları ve elde edilen güç çıktıları kayıt altına alınmış, bu veriler kullanılarak CFD analizleri gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizlerde kullanılan girdi parametreleri Tablo 3.3' de sunulmuştur.

Tablo 3.3. Sayısal Analiz Girdi Parametreleri

Kanat Açısı (°)		Rüzgâr Hızı (m/s)	Devir Sayısı (dev/dak)	
Ön	Arka		Ön	Arka
24	0	7	60	175
		8	68	192
		9	80	221
		10	90	235
21	0	8	79	158
		9	90	200
		10	92	230
18	6	8	97	148
		9	113	181
		10	125	185
15	3	8	113	160
		9	130	165
		10	142	203
12	3	8	143	135
		9	158	152
		10	180	185

Sayısal analizlerde ilk olarak, belirlenen kanat açıları için geometrik modeller oluşturulmuştur. Oluşturulan geometrik modellerin ardından ağ yapısı hazırlanmıştır. Ağ yapısı, yüzeydeki viskoz etkilerin doğru bir şekilde modellenebilmesi için y^+ değerleri dikkate alınarak hazırlanmıştır. Oluşturulan ağ yapılarının ardından girdi parametreleri tanımlanmış ve çözümler elde edilmiştir. Sayısal analizler sonucunda, ön ve arka kanatlardan üretilen aerodinamik torklar, kanatlar üzerindeki basınç ve hız dağılımları ile kanatların iz etkileri incelenmiştir. Elde edilen deneysel ve sayısal sonuçlar karşılaştırmalı olarak Tablo 3.4’de verilmiştir.

Tablo 3.4. Deneysel ve sayısal analiz sonuçları

Kanat Açılırları (°)			Rüzgâr Hızı (m/s)	Devir Sayıları (rpm)		Deneysel Tork (Nm)		Deneysel Güç (W)	CFD Tork (Nm)		CFD Güç Sonuçları (W)			Kanatların güç çıktısına katkı oranları (%)	
Ön	Arka			Ön	Arka	Ön	Arka	Toplam	Ön	Arka	Ön	Arka	Toplam	Ön	Arka
24	0	7	60	175	2.74	2.77	60.14		2.85	2.75	17.91	50.40	68.30	26.22%	73.78%
24	0	8	68	192	3.74	3.10	96.00		3.54	3.68	25.21	73.99	99.20	25.41%	74.59%
24	0	9	80	221	3.78	3.70	123.48		3.90	4.25	32.67	98.36	131.03	24.94%	75.06%
24	0	10	90	235	3.61	3.94	146.30		4.28	4.58	40.34	112.71	153.05	26.36%	73.64%
21	0	8	79	158	3.37	3.49	79.36		3.29	3.37	27.22	55.76	82.98	32.80%	67.20%
21	0	9	90	200	3.95	4.14	133.06		4.27	4.59	40.24	96.13	136.38	29.51%	70.49%
21	0	10	102	215	5.15	3.86	167.07		6.58	4.45	70.28	100.19	170.47	41.23%	58.77%
18	6	8	97	148	3.88	3.55	96.96		4.59	3.69	46.62	57.19	103.81	44.91%	55.09%
18	6	9	113	181	4.60	3.61	132.29		5.74	4.21	67.92	79.80	147.72	45.98%	54.02%

Tablo 3.5.(devam). Deneysel ve sayısal analiz sonuçları

Kanat Açılırları (°)			Rüzgâr Hızı (m/s)	Devir Sayıları (rpm)		Deneysel Tork (Nm)		Deneysel Güç (W)	CFD Tork (Nm)		CFD Güç Sonuçları (W)			Kanatların güç çıktısına katkı oranları (%)	
Ön	Arka			Ön	Arka	Ön	Arka	Toplam	Ön	Arka	Ön	Arka	Toplam	Ön	Arka
18	6	10	125	180	4.89	4.23	171.60		5.94	5.16	77.75	97.26	175.02	44.43%	55.57%
15	3	8	113	160	4.10	3.71	121.60		5.19	3.97	61.41	66.52	127.93	48.01%	51.99%
15	3	9	130	165	4.04	3.70	144.00		5.49	4.38	74.74	75.68	150.42	49.69%	50.31%
15	3	10	141	203	4.24	4.20	170.69		5.97	4.68	88.15	99.49	187.64	46.98%	53.02%
12	3	8	143	135	4.81	3.78	116.00		5.05	3.67	75.62	51.88	127.51	59.31%	40.69%
12	3	9	158	152	4.40	3.90	150.40		5.76	4.05	95.30	64.47	159.77	59.65%	40.35%
12	3	10	180	185	5.91	4.42	189.50		6.35	4.10	119.69	79.43	199.12	60.11%	39.89%

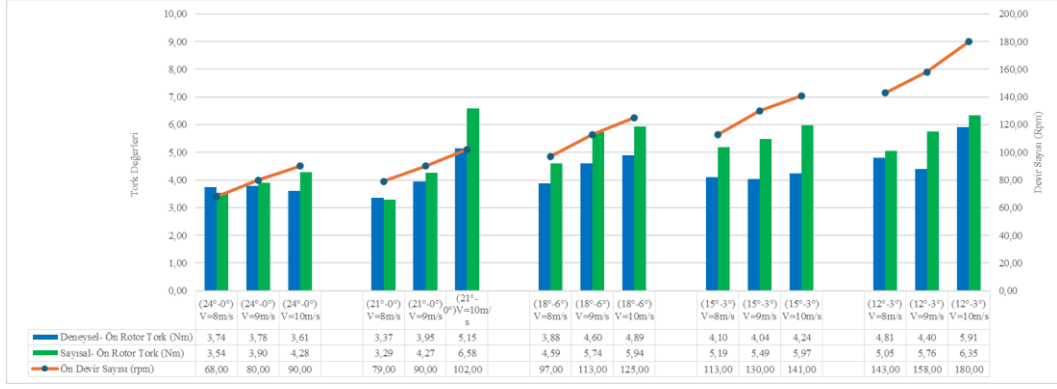
Tablo 3.4’de incelenen beş farklı kanat açısı kombinasyonu için elde edilen deneysel ve sayısal sonuçlar sunulmuştur. Bu analizde, rüzgâr hızına bağlı olarak tork değerlerinin her iki yöntemle de benzer eğilimler sergilediği görülmektedir. Özellikle düşük rüzgâr hızlarında (7-8 m/s) CFD tork ve güç sonuçları deneysel verilerle uyumlu olurken, orta hızlarda (9 m/s) CFD analizleri deneysel verilere göre %5-%10 oranında daha yüksek güç çıktısı öngörmektedir. Yüksek rüzgâr hızlarında (10 m/s) ise fark daha belirgin hale gelmekte, bu durumun nedeni olarak deney ortamında oluşabilecek mekanik kayıpların (jeneratör, sürtünme kayıpları, hava akışındaki düzensizlikler) CFD analizlerinde doğrudan hesaba katılamaması ve sayısal modellemede akışın ideal koşullarda değerlendirilmesi olarak söylenebilmektedir. Ön rotorun açısının artırılması ile arka rotorun enerji üretimine olan katkısı artmış olsa da belirli açılarda iz etkisinin arka rotorun performansını olumsuz etkilediği görülmüştür. Yüksek ön kanat açılarında sahip konfigürasyonlarda (24° – 0° gibi) arka rotorun güç üretimine katkı oranı daha yüksek olurken, düşük ön rotor açılarında (12° – 3°) ön rotorun sistemin genel enerji üretimine daha fazla katkı sağladığı görülmüştür. Rüzgâr hızının artışıyla birlikte güç üretimi genel olarak yükselmekte, ancak her konfigürasyonda aynı oranda artış gözlemlenmemektedir.

Deneysel ve CFD tork sonuçları incelendiğinde, özellikle ön rotor açısının yüksek olduğu konfigürasyonlarda, CFD tork değerlerinin deneysel verilere yakın olduğu gözlemlenmiştir. 24° – 0° konfigürasyonunda 10 m/s rüzgâr hızında deneysel ön rotor torku 3.61 Nm, CFD torku ise 4.28 Nm olarak hesaplanmıştır, bu da yaklaşık %18’lik bir fark oluşturmaktadır. Arka rotor için ise deneysel tork değeri

3.94 Nm iken, CFD analizi bu değeri 4.58 Nm olarak hesaplamıştır. Güç çıktıları açısından CFD ve deneysel veriler karşılaştırıldığında, ön rotor açısının düşük olduğu konfigürasyonlarda deneysel sonuçların CFD ile oldukça yakın olduğu görülmektedir. 12° – 3° konfigürasyonunda 10 m/s rüzgâr hızında deneysel toplam güç 189.50 W iken, CFD analizi 199.12 W hesaplamıştır, yani yaklaşık %5’lik bir fark oluşmuştur. Bu durum, düşük açı değerlerinde iz etkisinin CFD analizlerinde daha doğru modellenebildiğini ve deneysel sistemle büyük ölçüde örtüştüğünü göstermektedir. Yüksek ön rotor açılarında ise CFD analizleri, deneysel güç çıktısını gerçekte olduğundan daha yüksek hesaplamıştır. 21° – 0° konfigürasyonunda, 10 m/s rüzgâr hızında deneysel toplam güç 167.07 W iken, CFD bu değeri 170.47 W olarak hesaplamıştır. Bu fark yaklaşık %2’lik bir sapma gösterse de, özellikle arka rotorun iz etkisine maruz kaldığı bölgelerde (örneğin, 24° – 0° konfigürasyonunda), CFD analizlerinin deneylere kıyasla ortalama %5-10 daha yüksek güç hesapladığı belirlenmiştir.

Deneysel ve CFD sonuçlarının karşılaştırılması, çift rotorlu rüzgâr türbinlerinin iz etkisi ve aerodinamik performansı açısından önemli bilgiler sunmaktadır. Genel olarak, CFD analizleri, iz etkisinin az olduğu düşük ön rotor açılarında deneysel verilere oldukça yakın sonuçlar vermektedir, ancak iz etkisinin arttığı konfigürasyonlarda (yüksek ön rotor açıları ve yüksek rüzgâr hızlarında) CFD analizleri, deneysel verilere kıyasla daha yüksek güç çıktısı tahmin etmektedir. Bu fark, deney ortamında iz etkisinin türbülansı artırması ve akışın düzensiz hale gelmesiyle açıklanabilmektedir. Özellikle deneysel sistemde türbülans kaynaklı enerji kayıpları ve akışın homojen olmaması, ölçülen güç çıktısının CFD analizlerine göre daha düşük olmasına neden olmaktadır. Ayrıca, CFD analizlerinde kullanılan türbülans modelleri ve ideal akış varsayımları, gerçek deney koşullarındaki türbülans seviyelerini tam olarak yansıtamayabilir. Bu durum, özellikle iz etkisinin belirgin olduğu bölgelerde CFD analizlerinin güç tahminlerinde sapmalara yol açmaktadır.

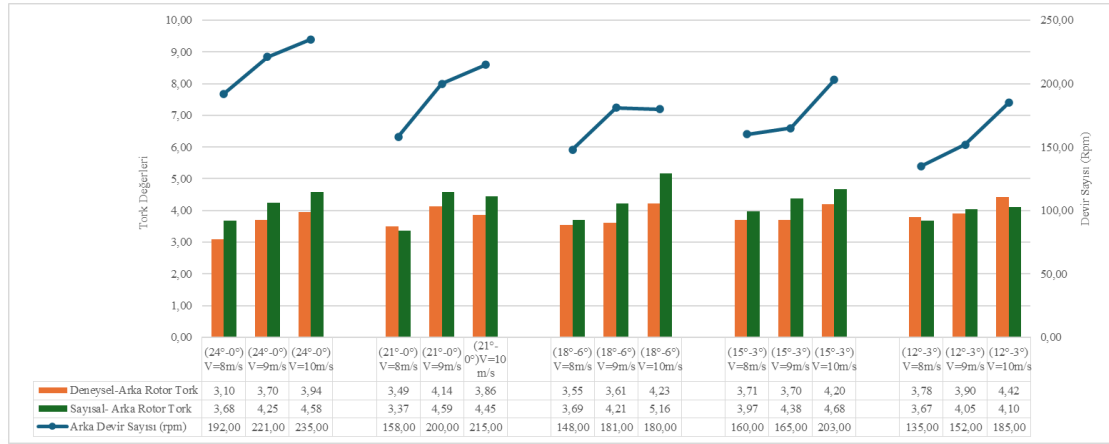
Şekil 3.22’de ön kanat için deneysel olarak elde edilen tork değerleri ve CFD analizlerinden elde edilen tork değerleri devir sayılarına bağlı olarak karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



Şekil 3.22. Ön kanat için deneysel ve CFD analizi tork çıktıları

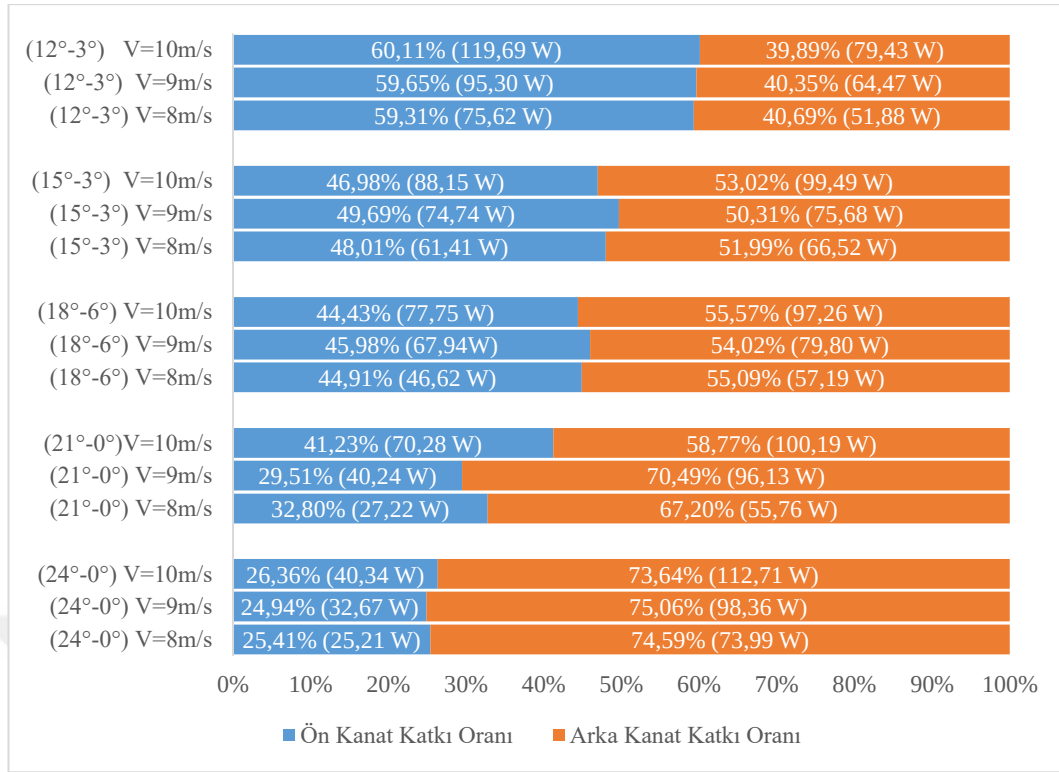
Şekil 3.22 değerlendirildiğinde, tork değerlerinin rüzgâr hızı arttıkça yükseldiği görülmüştür. CFD analizleri deneysel verilere kıyasla özellikle yüksek rüzgâr hızlarında ve büyük açı değerlerinde daha yüksek tork sonucu elde edilmiştir. Özellikle 21°-0° (V=10 m/s) ve 18°-6° (V=10 m/s) konfigürasyonlarında CFD tork değerlerinin deneysel verilere göre yaklaşık %10-15 daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu farkın başlıca sebebi, CFD analizlerinde iz etkisinin deneysel ortam kadar türbülanslı olmaması ve akışın daha düzenli modellenmesi olarak değerlendirilmektedir. Düşük ön rotor açılarında sahip konfigürasyonlarda ise deneysel ve CFD tork değerleri birbirine daha yakındır, bu durum düşük açılarda iz etkisinin CFD tarafından daha doğru tahmin edildiğini göstermektedir. Ön rotor devir sayıları ise rüzgâr hızına bağlı olarak artış göstermekte ve en yüksek değer 12°-3° (V=10 m/s) konfigürasyonunda elde edilmiştir. Özellikle ön rotorun düşük açılarda olduğu konfigürasyonlarda (12°-3°) CFD ve deneysel tork sonuçları oldukça benzer olup, yüksek açı değerlerinde CFD'nin iz etkisini daha zayıf tahmin ettiği görülmektedir. Ön kanadın devir sayısının en düşük 68 dev/dak, en yüksek ise 180 dev/dak olduğu görülmüştür. Değişen durumlar için devir sayısının düzenli olarak artış gösterdiği görülmüştür. Hem deneysel hem de sayısal sonuçlar için tork değerleri de benzer şekilde artış göstermiştir. Tork değeri en düşük 24°-0° durumunda sayısal ve deneysel olarak sırasıyla 3.54 Nm ve 3.74 Nm olarak; en yüksek ise 12°-3° durumunda sayısal ve deneysel olarak sırasıyla 6.35 Nm, 5.91 Nm olarak hesaplanmış ve ölçülmüştür. Genel olarak kanat açısının tork ve devir sayıları üzerindeki etkisi net bir şekilde görülmektedir. Hem deneysel hem de sayısal veriler benzer eğilimler ortaya koymaktadır.

Şekil 3.23’de arka kanat için deneysel olarak elde edilen tork değerleri ve CFD analizlerinden elde edilen tork değerleri devir sayılarına bağlı olarak karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



Şekil 3.23. Arka kanat için deneysel ve CFD analizi tork çıktıları

Şekil 3.23 değerlendirildiğinde, Genel olarak, tork değerlerinin rüzgâr hızı arttıkça yükseldiği, ancak CFD analizlerinin deneysel verilere kıyasla özellikle yüksek rüzgâr hızlarında ve büyük açı değerlerinde daha yüksek tork tahmin ettiği gözlemlenmiştir. Özellikle 21°-0° (V=10 m/s) ve 18°-6° (V=10 m/s) konfigürasyonlarında, CFD tork değerlerinin deneysel verilere göre yaklaşık %10-15 daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Buna karşılık, düşük rüzgâr hızlarında (8 m/s) deneysel ve CFD tork değerleri birbirine daha yakın çıkmıştır. Arka rotor devir sayıları da rüzgâr hızına bağlı olarak artış göstermekte ve en yüksek değer 18°-6° (V=10 m/s) konfigürasyonunda elde edilmiştir. Bu durum, düşük açılı arka rotor konfigürasyonlarının daha yüksek hızlarda dönmesini sağladığını ve iz etkisini daha verimli kullandığını göstermektedir. Sonuç olarak, arka rotor tork üretimi ve devir sayısının optimizasyonu için açısal ayarların dikkatlice belirlenmesi gerektiği, düşük açılı arka rotor konfigürasyonlarının daha dengeli ve verimli bir performans sunduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 3.24. Ön ve arka kanatların toplam güç çıktısına olan katkı oranları

Şekil 3.24'te elde edilen güç çıktısına kanatların katkı oranları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Genel olarak, ön rotorun katkı oranı düşük ön rotor açılımlarına sahip konfigürasyonlarda daha yüksek olurken, arka rotorun katkısı ise ön rotor açısının arttığı durumlarda belirgin şekilde arttığı görülmüştür.

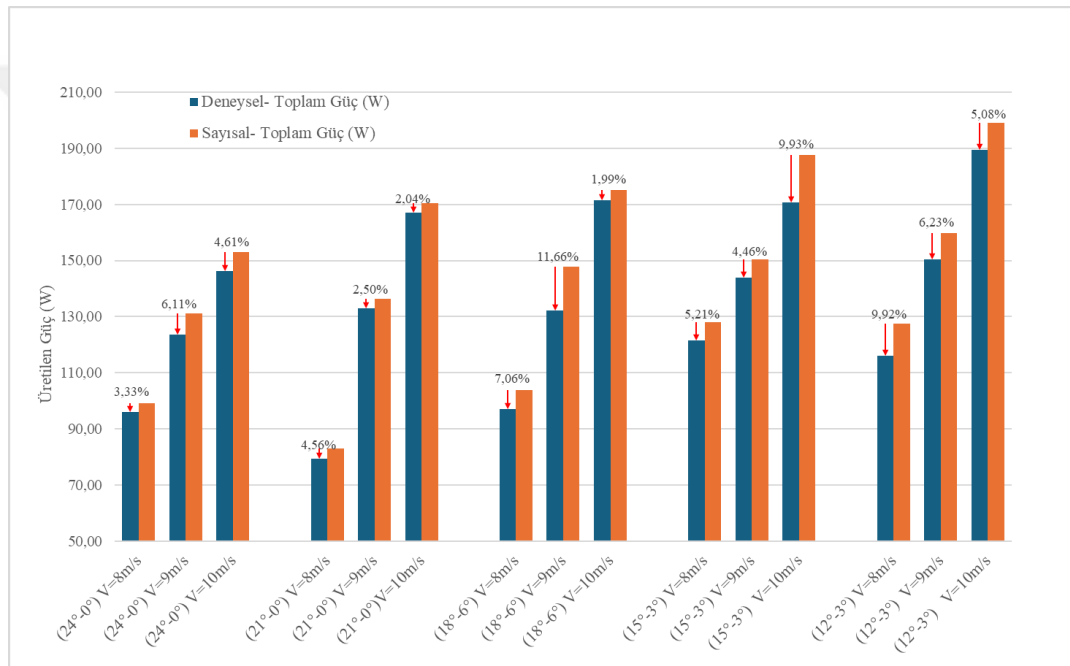
Düşük ön rotor açılımlarına sahip konfigürasyonlarda (12°-3°) ön rotorun güç üretimine katkısı oldukça yüksektir. Özellikle 12°-3° (V=10 m/s) konfigürasyonunda ön rotorun katkısı %60.11 (119.69 W) ile en yüksek seviyeye ulaşmıştır. Bu durum, düşük açı değerlerinde ön rotorun daha etkin bir şekilde rüzgâr enerjisini dönüştürdüğünü ve iz etkisini minimize ederek daha fazla güç ürettiğini göstermektedir. Aynı konfigürasyonda arka rotorun katkısı ise %39.89 (79.43 W) ile sınırlı kalmıştır.

Yüksek ön rotor açılımlarına sahip konfigürasyonlarda (21°-0° ve 24°-0°) arka rotorun katkısı belirgin şekilde artmaktadır. Özellikle 24°-0° (V=9 m/s) konfigürasyonunda arka rotorun katkı oranı %75.06 (98.36 W) ile maksimum seviyeye ulaşmıştır. Aynı durumda ön rotorun katkısı ise yalnızca %24.94 (32.67 W) seviyesindedir. Bu sonuç, yüksek ön rotor açılımlarıyla ön rotorun rüzgâr enerjisinin büyük bir kısmını tükettikten sonra bile arka rotorun kalan enerjiyi daha verimli kullanabildiğini göstermektedir. Ayrıca, 21°-0° (V=9 m/s)

konfigürasyonunda arka rotorun katkısı %70.49 (96.13 W) iken ön rotor yalnızca %29.51 (40.24 W) katkı sağlamıştır.

Rüzgâr hızının etkisine bakıldığında, hız arttıkça hem ön hem de arka rotorun güç üretiminde genel bir artış görülmektedir, ancak katkı oranlarında ciddi bir değişim olmamaktadır. Bu durum, rotor açıları ile belirlenen güç dağılım dengesinin rüzgâr hızından bağımsız olarak sabit kaldığını göstermektedir. Ancak, yüksek rüzgâr hızlarında (10 m/s) her iki rotorun da toplam güç çıktısında daha yüksek değerlere ulaştığı gözlemlenmiştir.

Şekil 3.25'te deneysel ve sayısal olarak hesaplanan toplam güç değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



Şekil 3.25. Toplam deneysel ve sayısal güç değerleri

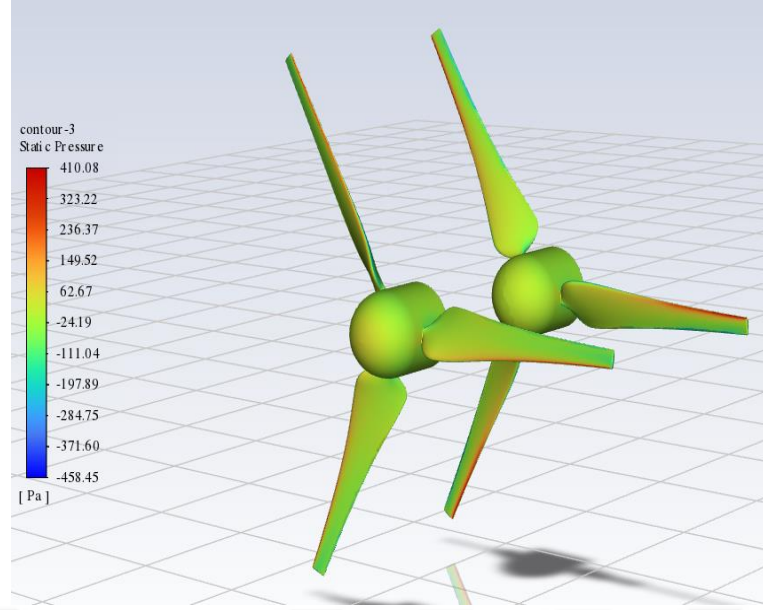
Şekil 3.25'te sunulan güç değerleri karşılaştırıldığında, sayısal analizler deneysel sonuçlardan daha yüksek güç üretimi tahmin ettiği görülmüştür. Bu durum, CFD analizlerinde iz etkisi ve türbülans kaynaklı kayıpların ideal koşullarda modellenmesi nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Düşük rüzgâr hızlarında bu farklar daha az belirginken, yüksek rüzgâr hızlarında farkların arttığı görülmektedir.

24°-0° konfigürasyonunda, 8 m/s rüzgâr hızında deneysel ve sayısal güç değerleri arasındaki fark %3.33 ile oldukça düşük olup, bu durum CFD analizlerinin düşük hızlarda deneysel sonuçlara daha yakın tahminler yaptığını göstermektedir. Ancak rüzgâr hızının artışı ile birlikte farkın arttığı görülmüştür. Bu artış, rüzgâr

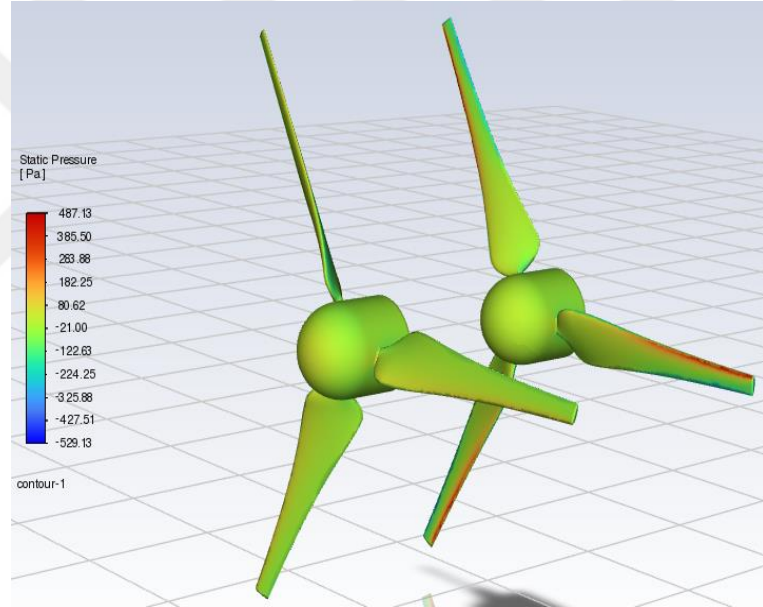
hızının artışı ile birlikte iz etkisinin güçlenmesi ve CFD'nin bu karmaşık akışı tam olarak modelleyememesi ile açıklanabilmektedir. Benzer şekilde 21° - 0° konfigürasyonunda farklar orta seviyede kalmıştır. Bu konfigürasyonda 8 m/s rüzgâr hızında %4.56 ve 10 m/s rüzgâr hızında %2.50 gibi farklar olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar, CFD analizlerinin belirli hız aralıklarında daha tutarlı olduğunu göstermektedir. 18° - 6° konfigürasyonu, farkların en belirgin olduğu durumlardan biri olduğu görülmüştür. Özellikle 8 m/s rüzgâr hızında %11.6'lık bir fark gözlemlenmiştir. 9 m/s rüzgâr hızında aralarında fark azalsa da belirgin bir farklılık bulunmaktadır.

Genel olarak sayısal ve deneysel güç üretim farklılıkları incelendiğinde, CFD analizlerinin genel olarak deneysel sonuçlardan %2-12 arasında daha yüksek güç üretimi öngördüğü görülmüştür. Bu farklar, özellikle yüksek rüzgâr hızlarında ve karmaşık akış koşullarında biraz daha belirgin hale gelse de, genel olarak düşük seviyelerde kaldığı görülmüştür. Bu durum, CFD analizlerinin deneysel verilerle büyük ölçüde tutarlı ve güvenilir olduğunu göstermektedir. Özellikle %5'in altında kalan farklar, sayısal modellerin aerodinamik davranışları doğru bir şekilde simüle edebildiğini ve çift rotorlu rüzgâr türbini performansını güvenilir bir şekilde tahmin edebildiğini ortaya koymaktadır.

Kanat yüzeylerinin basınç dağılımları önden ve arkadan görünüşleri Şekil 3.26 ve Şekil 3.27'te sunulmuştur. Tez kapsamında bütün durumların basınç dağılımlarının kontur grafikleri ayrı ayrı sunulmamış, tablo halinde özetlenmiştir. Bütün durumlarda kanatlardaki basınç dağılımlarında benzer eğilimler sergilediği görülmüştür. Örnek olarak en yüksek güç çıktısının elde edildiği 12° - 3° ve en düşük güç çıktısının elde edildiği 24° - 0° konfigürasyonu için kanat üzerindeki basınç dağılımlarını veren görseller sunulmuştur.



(a)



(b)

Şekil 3.26. Kanat yüzeylerindeki basınç dağılımlarının önden görünüşü (a: 12° - 3° konfigürasyonu; b: 24° - 0° konfigürasyonu)

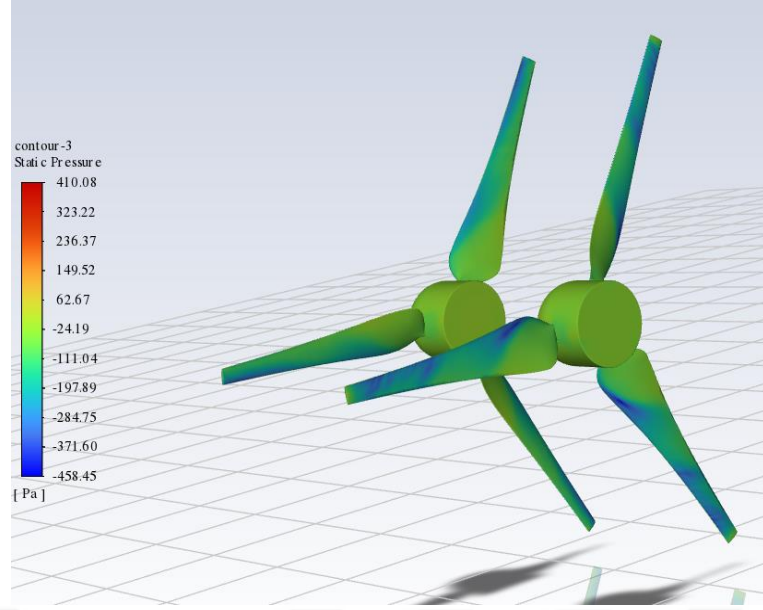
Şekil 3.26, çift rotorlu rüzgâr türbinine ait kanat yüzeylerindeki statik basınç dağılımlarının önden görünüşünü farklı konfigürasyonlar için göstermektedir. 12° - 3° konfigürasyonunda, ön rotor kanatlarında daha dengeli bir basınç dağılımı gözlemlenmektedir. Kanatların ön kenarlarında (leading edge) kırmızıya yakın bölgeler, özellikle kanatların uç kısımlarında yoğunlaşmış olup, buralarda yüksek basınç olduğu görülmektedir. Kanatların dip kısmına doğru ilerledikçe basıncın

azaldığı görülmüştür. Arka rotor kanatlarında ise basınç farkının daha düşük olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum ön rotorun iz etkisinin arka rotor üzerindeki etkisinin sınırlı olduğunu göstermektedir. Bu konfigürasyon, daha düşük iz etkisiyle birlikte daha dengeli bir aerodinamik performans sunmakta bu da güç üretiminin daha verimli olmasına katkı sağlamaktadır.

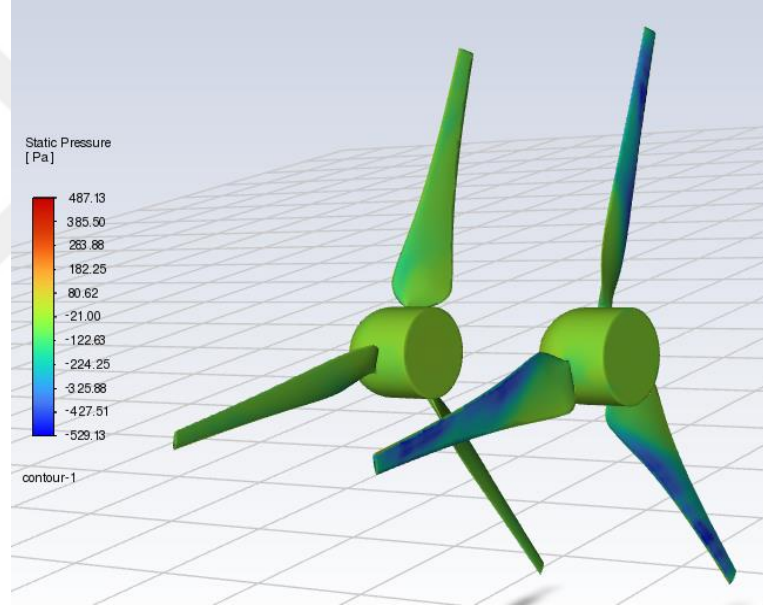
24°-0° konfigürasyonunda ise ön rotor kanatlarında çok daha az belirgin basınç farkları gözlemlenmiştir. Genellikle ön kanat yüzeyinde düşük basınç bölgelerinin olduğu görülmektedir. Bu durum kanatlara uygulanan aerodinamik yüklerin azalttığını ve bu nedenle daha düşük tork üretimine yol açabileceğini göstermektedir. Arka rotor kanatlarında ise basınç dağılımının daha düzensiz olduğu görülmüştür. Özellikle ön rotorun iz etkisinin yoğunlaştığı bölgelerde basınç gradyanlarının belirgin bir şekilde arttığı görülmektedir. Bu durum, arka rotorun iz etkisinden olumsuz etkilendiğini ve performansının sınırlandığını göstermektedir.

Bununla birlikte, kanat üretim metodolojisi ile basınç dağılımı arasındaki ilişki de önemli bir faktördür. Kanatların ön kenarında (leading edge) yüksek basınç bölgelerinin oluşması, özellikle kanat uçlarında malzeme yorgunluğu ve aşınma gibi mekanik zorlanmalara neden olabilir. Bu bağlamda, kanat üretiminde yüksek basınca maruz kalan bölgelerde yapısal dayanıklılığı artırmak için kompozit malzeme kullanımı, optimize edilmiş kanat profilleri ve üretim sürecinde özel kaplama teknikleri uygulanabilir. Ayrıca, arka rotorun iz etkisinden daha az etkilenmesi için aerodinamik tasarım optimizasyonları, kanat açılarının hassas bir şekilde belirlenmesi ve iz etkisini minimize edecek rotor yerleşim düzenlemeleri üzerine çalışmalar yapılabilir.

Bu analizler, çift rotorlu rüzgâr türbinlerinde kanat açıları ile basınç dağılımı arasındaki ilişkiyi net bir şekilde ortaya koymaktadır. Daha homojen basınç dağılımı, düşük kayıplar ve daha verimli güç üretimi anlamına gelirken; düzensiz basınç gradyanları, türbülans, enerji kaybı ve arka rotor performansındaki düşüş ile ilişkili olduğu görülmüştür.



(a)



(b)

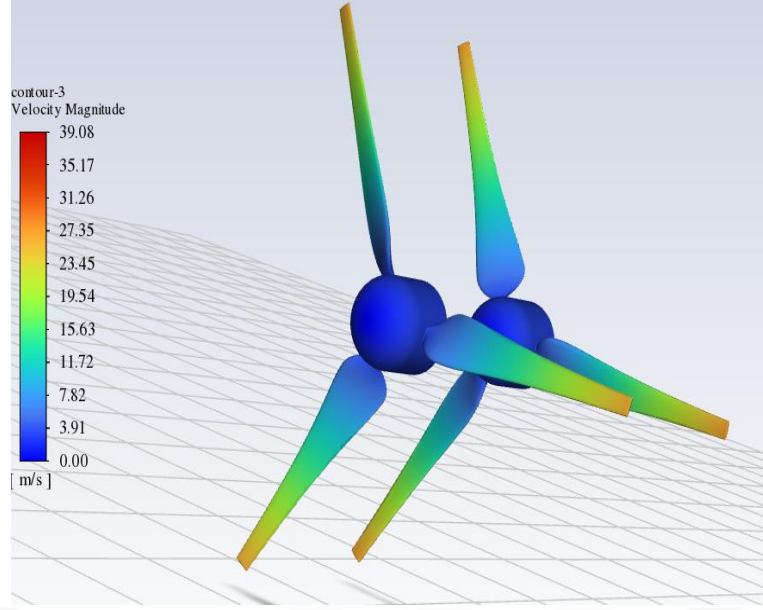
Şekil 3.27. Kanat yüzeylerindeki basınç dağılımlarının arkadan görünüşü (a: 12° - 3° konfigürasyonu; b: 24° - 0° konfigürasyonu)

Şekil 3.27, çift rotorlu rüzgâr türbinine ait kanat yüzeylerindeki statik basınç dağılımlarının arkadan görünüşünü, farklı konfigürasyonlar için göstermektedir. 12° - 3° konfigürasyonunda kanat yüzeylerindeki basınç dağılımının daha dengeli ve homojen bir yapıda olduğu görülmüştür. Ön rotor kanatlarında orta seviyede basınç değerleri görülürken, arka rotor kanatlarında ise daha düşük basınç bölgeleri görülmektedir. Özellikle kanatların uç kısımlarında düşük basınçlı bölgelerin

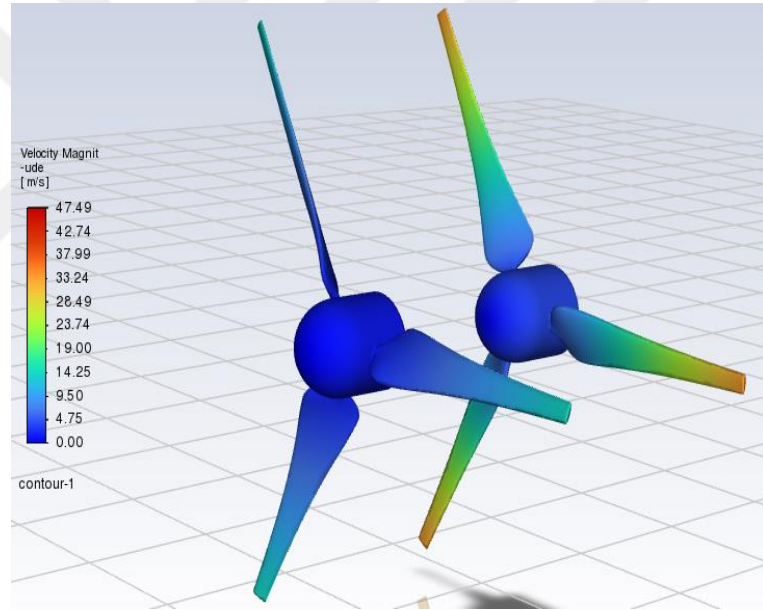
oluştugu görülmüştür. Bu durum kaldırma kuvvetinin optimize edildiğine işaret etmektedir. Bu durum, arka rotorun daha verimli çalışmasını sağlayarak, genel performansın daha iyi olmasını sağlamaktadır. Düşük basınç gradyanları, hem tork kayıplarının daha az olduğunu ve türbinin mekanik stabilitesinin daha iyi olduğunu göstermektedir. Bu nedenle 12° - 3° konfigürasyonu aerodinamik verimlilik açısından daha iyi olduğu görülmektedir.

24° - 0° konfigürasyonunda ise basınç dağılımı daha düzensiz ve yoğun gradyanlara sahip olduğu görülmüştür. Arka rotor kanatlarında düşük basınç bölgelerinin daha belirgin olduğu ve kanat boyunca basınç farklılıklarının arttığı görülmüştür. Bu durum, arka rotorun verimliliğini olumsuz etkileyerek aerodinamik kayıplara ve tork dengesizliklerine yol açmaktadır. Ayrıca, iz etkisinin güçlü olduğu bölgelerde basınç gradyanlarının ani değişimi, sistemde mekanik titreşimler ve performans dalgalanmalarına neden olmaktadır.

Kanat yüzeylerinin hız dağılımları Şekil 3.28'de sunulmuştur. Tez kapsamında bütün durumların hız dağılımlarının kontur grafikleri ayrı ayrı sunulmamış, tablo halinde özetlenmiştir. Bütün durumlarda kanatlardaki basınç dağılımlarında benzer sonuçlar elde edilmiştir. Örnek olarak en yüksek güç çıktısının elde edildiği 12° - 3° ve en düşük güç çıktısının elde edildiği 24° - 0° konfigürasyonu için görseller sunulmuştur.



(a)



(b)

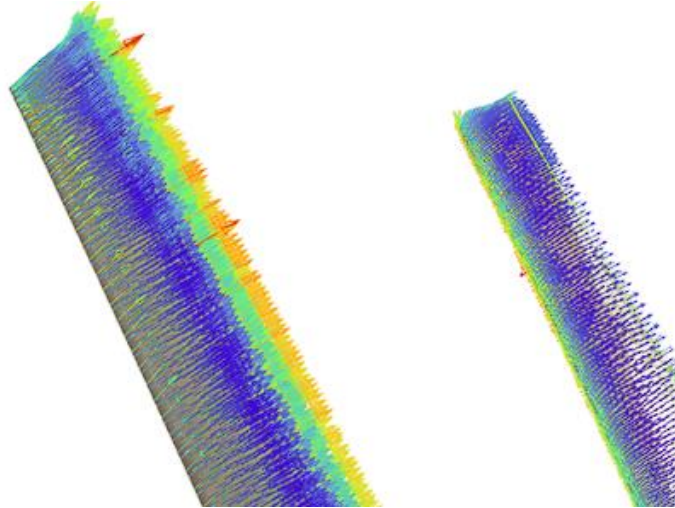
Şekil 3.28. Kanat yüzeylerindeki hız dağılımlarının önden görünüşü (a: 12° - 3° konfigürasyonu; b: 24° - 0° konfigürasyonu)

Şekil 3.28’de çift rotorlu rüzgâr türbininde iki farklı kanat konfigürasyonu için kanat yüzeyindeki hız dağılımları önden görünüşü sunulmuştur. 12° - 3° konfigürasyonunda, kanat yüzeylerindeki hız dağılımı daha dengeli ve homojen bir yapıda olduğu görülmüştür. Kanat uçlarında en yüksek hızların ulaşıldığı bölgeler gözükmektedir. Bu durum kanat uçlarında daha yüksek kaldırma kuvveti üretildiğini göstermektedir. Ön rotorun kanat köküne doğru daha düşük hızlı

bölgeler gözükmektedir. Bu durum hava akışının bu bölgelerde daha yavaş olduğunu ve aerodinamik yüklerin daha az olduğunu göstermektedir. Arka rotorun güç dağılımının ise oldukça düzenli olduğu görülmüştür. Bu durum ön rotorun iz etkisinin arka rotor üzerinde minimum türbülans oluşturduğunu ve daha stabil bir akış ortamı sağladığını göstermektedir. Bu homojen dağılım, türbin verimliliği açısından oldukça olumlu bir durumdur. Kanatlar boyunca enerji kayıplarının minimize edildiği ve aerodinamik sürüklenmenin düşük seviyede tutulduğunu işaret etmektedir. Bu da daha yüksek güç üretimi ve stabilite sağlamaktadır.

24°-0° konfigürasyonunda ise ön rotor kanatlarında genel olarak düşük hız bölgelerinin hâkim olduğu görülmüştür. Özellikle kanat köküne yakın bölgelerde hız çok düşüktür. Bu durum, ön rotorun yüksek hücum açısı nedeniyle rüzgâr akışını verimli bir şekilde kullanamadığını göstermektedir. Kanat uçlarında bile belirgin bir hız artışı gözlemlenmemektedir. Bu da ön rotorun aerodinamik performansının ciddi bir şekilde azaldığını ortaya koymaktadır. Arka rotor kanatlarında ise daha yüksek hız değerleri görülmektedir. Bu durum arka rotorun nispeten daha temiz bir akış alanında çalıştığını göstermektedir. Arka rotor daha yüksek hız değerlerine ulaşsa da ön rotorun zayıf performansı toplam verimliliği sınırlamaktadır.

Kanat yüzeylerindeki vektör dağılımları Şekil 3.29’da sunulmuştur.



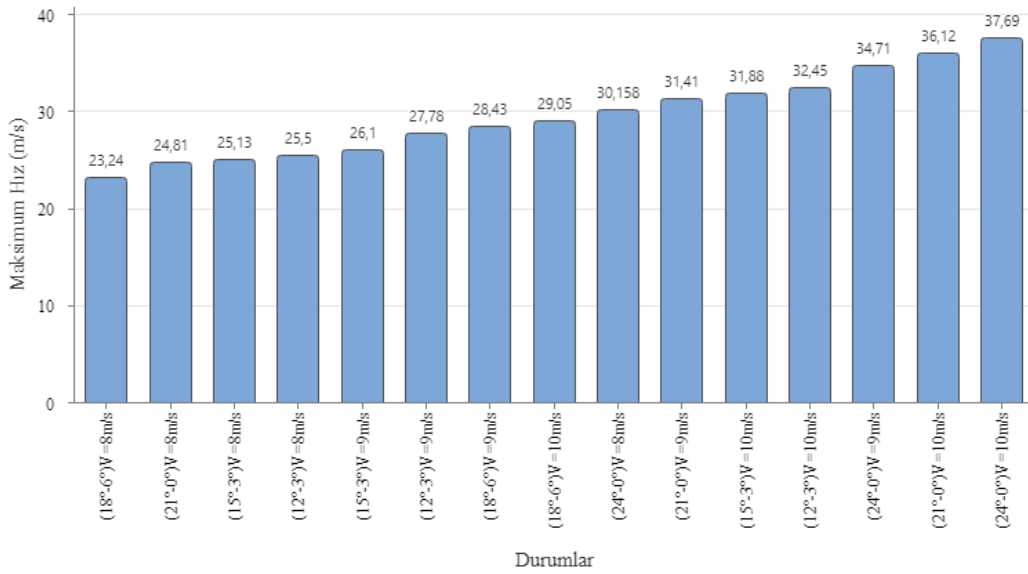
Şekil 3.29. Kanat yüzeylerindeki vektörel hız dağılımı: Sol görsel ön rotor için, sağ görsel arka rotor için gösterilmektedir.

Şekil 3.29 vektör alanı görseli, rotor kanatları çevresindeki hava akışının yönünü ve hızını göstermektedir. Ön rotorun ön kenarındaki vektörler, yüksek hız

ve düzenli akışı göstermektedir. Bu durum bu bölgedeki aerodinamik kuvvetlerin düzgün bir şekilde etki ettiğini göstermektedir. Arka rotorun üzerinde akışın ise türbülanslı bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Ön rotor akış alanında büyük türbülanslı bölgeler oluşturarak arka rotorun hava giriş koşullarını düzensiz hale getirmektedir. Arka rotor üzerindeki vektörlerin düzensiz desenleri, arka rotorun performans düşüklüğünü açıklamaktadır. Arka rotor üzerindeki akış vektörleri, hız ve yön bakımından farklılıklar göstermektedir. Bu da arka rotora ulaşan hava akışının bozulmasından kaynaklanmaktadır. Arka rotora olan düzensiz giriş koşulları arka rotorun aerodinamik verimliliğini azaltmakta ve kanatların daha düşük enerji üretebileceği bir ortamda çalışmasına neden olmaktadır.

Kanat uçları, akış vektörlerindeki yön değişiklikleriyle görülebilen girdaplar üretmektedir. Bu girdaplar, kanadın üst ve alt yüzeyleri arasındaki basınç farkından kaynaklanmakta ve yüksek enerjili hava akışının kanat uçlarından dışarı spiral şeklinde hareket etmesine yol açmaktadır. Kanat ucu girdapları, sürüklenme kuvvetlerinin başlıca kaynaklarından biri olup, enerji kayıplarını artırmaktadır.

Kanat yüzeyleri üzerindeki maksimum hızlar Şekil 3.30'da sunulmuştur.

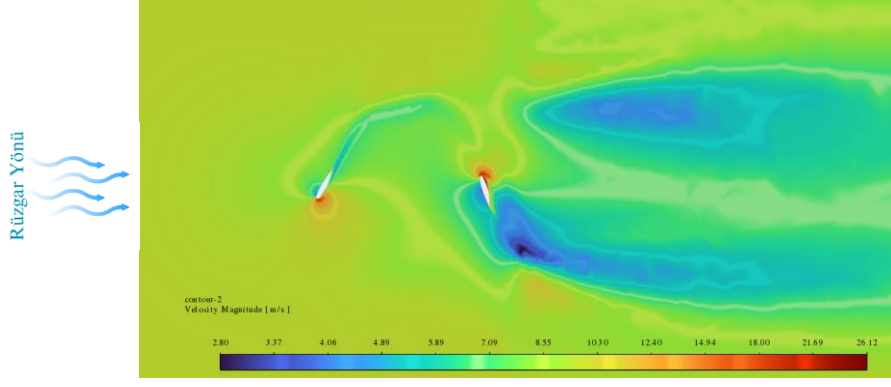


Şekil 3.30. Farklı konfigürasyonlar için kanat yüzeylerindeki maksimum hızlar

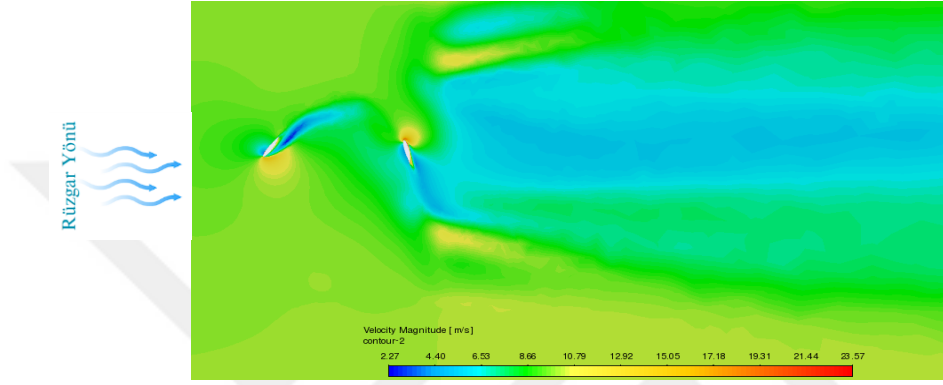
Şekil 3.30, farklı kanat açıları konfigürasyonları ve rüzgâr hızları için kanat yüzeylerindeki maksimum hızları sunmaktadır. Bu veriler, rotor sisteminin aerodinamik performansını etkileyen farklı çalışma parametrelerinin nasıl bir etki yarattığını anlamak açısından önemlidir. Maksimum hız, genellikle kanatların ön kenarları ve uçlarında yoğunlaşmaktadır.

Maksimum hızların tüm konfigürasyonlarda giriş hızıyla orantılı olarak artış gösterdiği görülmektedir. Daha yüksek giriş hızları, daha fazla akış kinetik enerjisi sağlayarak, kanatlar çevresinde daha büyük hızlanmalara olanak sağlamaktadır. En yüksek hız 24° - 0° konfigürasyonunda 37.69 m/s olarak elde edilmiş, en düşük hız ise 18° - 6° konfigürasyonunda 23.24 m/s olarak elde edilmiştir. Kanat açısının artması ile rüzgâra daha dik bir şekilde konumlanan kanatlar, havanın kanat yüzeyinde daha hızlı bir şekilde hareket etmesine olanak sağlamaktadır. Fakat bu hızın büyük bir çoğunluğu sürtünme kuvveti oluşturduğu için tork üretimi düşük olmaktadır. 24° - 0° konfigürasyonunda olduğu gibi maksimum hız bütün durumlar içerisinde en yüksek olmasına rağmen enerji üretimi bakımından en az üretime sahiptir. En yüksek hız; yüksek giriş hızları ve dik kanat açılarında oluşmaktadır. Bu durum, güçlü kaldırma ve itme kuvveti oluştururken, aynı zamanda yüksek sürüklenme kuvveti oluşturmaktadır. Ayrıca türbülansın neden olduğu verimlilik kayıpları oluşmaktadır. Orta dereceli konfigürasyonlar 15° - 3° ile 12° - 3° diğer konfigürasyonlara göre daha optimum hızlar üretmektedir. Bu durum kanatlar ve sistem üzerindeki gerilmeyi de azaltmaktadır.

Hız büyüklüğü kontür grafikleri Şekil 3.31’de sunulmuştur. Hız büyüklüğü kontur grafikleri, çift rotorlu sistemin kanatları çevresindeki hava akışı davranışını kapsamlı bir şekilde görselleştirmektedir. Bu kontürler, akış alanındaki hız büyüklüklerini çeşitli bölgeler halinde göstermektedir. Kontür grafikleri sadece en yüksek güç çıktısının elde edildiği 12° - 3° ve en düşük güç üretiminin olduğu 24° - 0° konfigürasyonu için yapılmıştır. Analiz, akışın hızlanma ve yavaşlama bölgelerini tanımlamaya, ayrıca ön ve arka rotorlar arasındaki etkileşimlerinin etkisini incelemeye odaklanmaktadır.



(a)



(b)

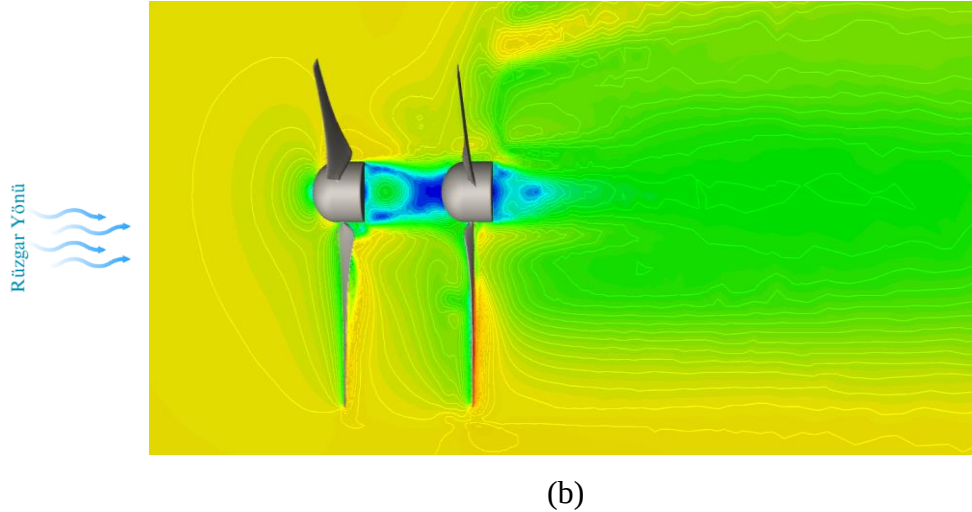
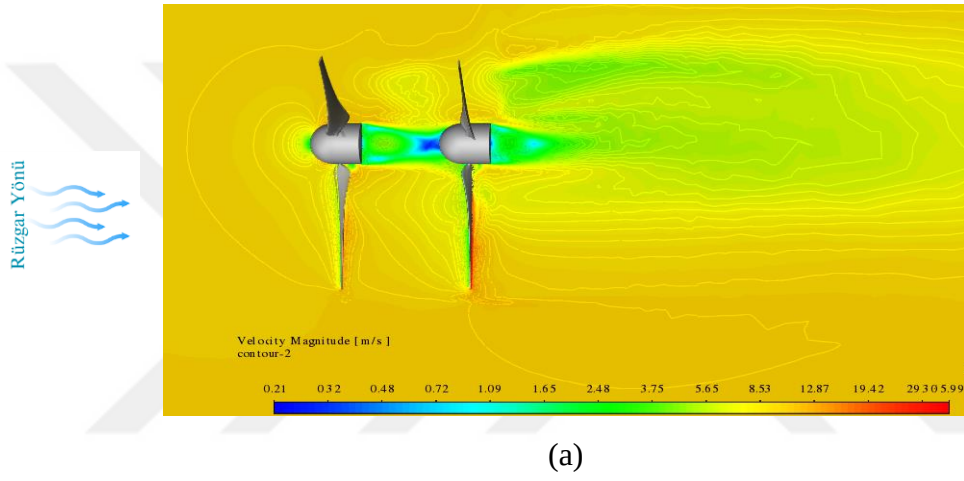
Şekil 3.31. Hız büyüklüğü kesit görünümü- Kontür Grafiği (a: 12° - 3° konfigürasyonu; b: 24° - 0° konfigürasyonu)

Şekil 3.31’de çift rotorlu rüzgâr türbininde iki farklı konfigürasyonun kanat çevresindeki hız büyüklüğü dağılımı kontür grafiği dağılımı gösterilmiştir. Bu kontür grafikleri, özellikle iz etkisi, türbülans oluşumu ve kanatlar arasındaki etkileşimin anlaşılması açısından önemli bilgiler sunmaktadır.

12° - 3° konfigürasyonunda, ön rotor kanatlarından çıkan akışın arka rotora daha düzenli bir şekilde iletildiği görülmektedir. İz etkisi belirgin olsa da, akışın simetrik ve kontrollü olduğu görülmüştür. Ön rotorun arkasında oluşan düşük hızlı bölge, arka rotora doğru yayılırken hız kaybı sınırlı düzeydedir. Bu durum, arka rotorun verimli bir şekilde çalışmasına ve sistem genelinde daha dengeli bir performans elde edilmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca ön rotorun iz bölgesindeki hız düşüşüne rağmen akış, arka rotor kanatları tarafından etkin bir şekilde toparlanmaktadır. 24° - 0° konfigürasyonunda ise iz etkisi çok daha belirgin ve düzensizdir. Özellikle ön rotorun arkasında geniş bir düşük hızlı bölge oluşmuş ve bu durum arka rotora ulaşan rüzgâr hızının ciddi ölçüde düşmesine neden olmuştur.

Bu durum arka rotorun performansını önemli ölçüde sınırlandırmıştır. Ön rotordaki yüksek hücum açısı nedeniyle iz bölgesindeki türbülans artmış ve düşük hızlı bölgeler oluşmuştur. Bu konfigürasyon, sistem genelinde aerodinamik verimliliğin düşmesine ve tork dengesizliklerine neden olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, 12° - 3° konfigürasyonu, daha stabil bir akış profili ve daha dengeli iz yapısı ile çift rotorlu rüzgâr türbininin performansını optimize ederken, 24° - 0° konfigürasyonu iz etkisi nedeniyle sistemin verimliliğini olumsuz etkilemektedir.

Şekil 3.32, akış alanı için hız büyüklüğü kontur grafiklerini sunmaktadır. Bu görsellerde rotorlar etrafındaki hava akışının kesit alınarak incelenmesi sağlanmıştır.



Şekil 3.32. Hız büyüklüğü alanı analizi (a: 12° - 3° konfigürasyonu; b: 24° - 0° konfigürasyonu)

Şekil 3.32 incelendiğinde, 12° - 3° konfigürasyonunda, ön rotorun ardından başlayan iz bölgesinin daha dar ve düzenli olduğu görülmüştür. Ön rotorun

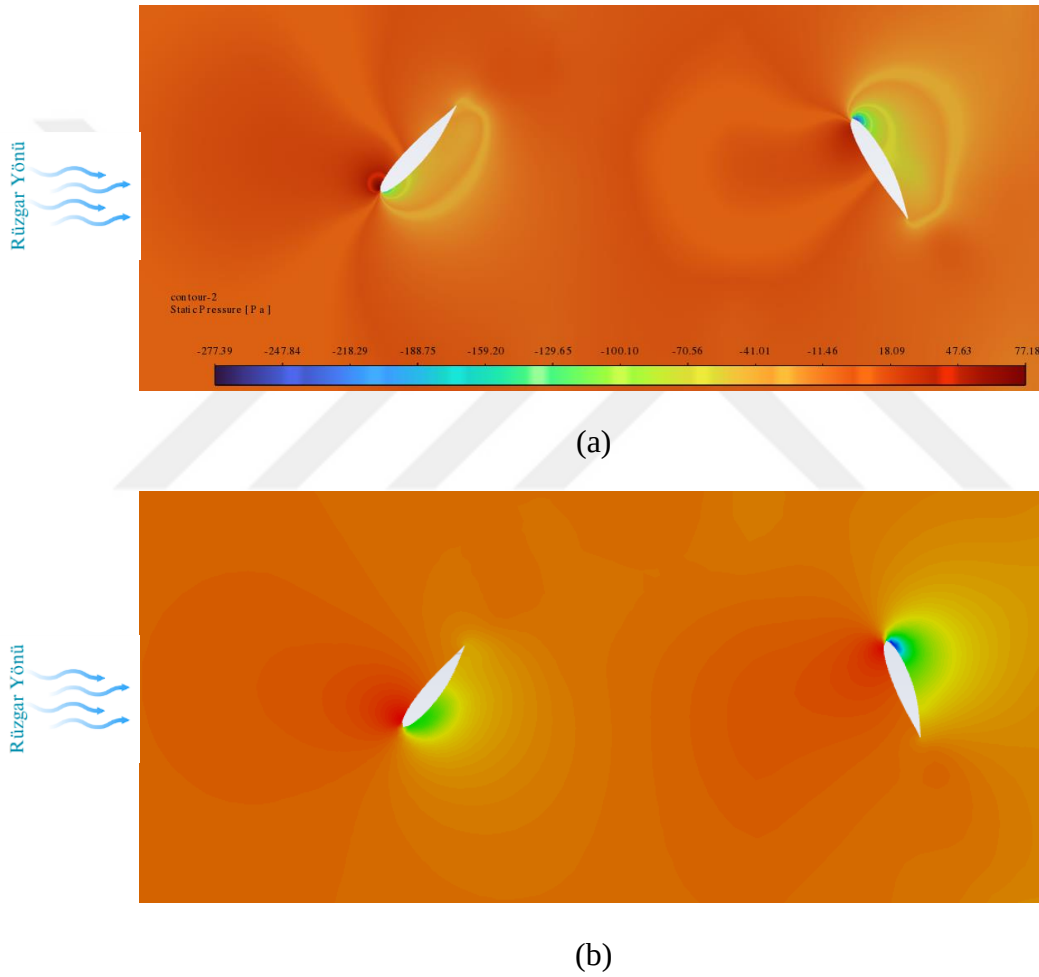
arkasında oluşan düşük hızlı bölge daha düzenli kalmakta ve akış, arka rotora daha verimli bir şekilde iletilmektedir. Bu durum, arka rotorun daha stabil bir akış ortamında çalışmasını sağlayarak aerodinamik performansı artırmaktadır. Ayrıca akışın, simetrik yapıda olması, türbülans seviyesini düşürerek enerji kayıplarını daha minimumda tutmaktadır. Bu konfigürasyonda yüksek hızlı bölgeler daha belirgin bir şekilde kanat uçlarında ve ön kenarlarında yoğunlaştığı görülmüştür. Bu durum, kanat üzerindeki aerodinamik basınç farkının ve kaldırma kuvvetinin daha etkili bir şekilde oluştuğunu göstermektedir. Arka rotorda benzer şekilde kanat uçlarında hız artışları görülmektedir. Bu da aerodinamik performansın optimize edildiğini göstermektedir. 12° - 3° konfigürasyonunda ön rotor 10 m/s rüzgâr hızında 180 dev/dk; arka rotor ise 185 dev/dk'da dönmektedir. Bu konfigürasyonda ön rotorun iz etkisi, arka rotora ulaşmadan önce kısmen yayılmış ve enerjisini bir miktar kaybetmiş durumdadır. Bu da arka rotorun nispeten dengeli bir akış sağlamıştır. Rotora daha az uygulanan direnç kuvveti ile daha yüksek devir sayılarına ulaşmak mümkün olmaktadır. Ayrıca, ön rotorun iz bölgesi geniş olduğu için arka rotor bu yayılmış iz etkisine maruz kalmak ve bu nedenle arka rotorda benzer devir sayılarında dönerek sistem dengesini koruyabilmektedir. İz etkisinin geniş bir alana yayılması, arka rotor üzerindeki türbülansın daha yayılmış olmasına neden olur. Bu durum arka rotorun akıştaki düşük enerjili bölgelerden etkilenmeden verimli çalışmasını sağlamaktadır.

24° - 0° konfigürasyonunda ise yüksek hız bölgelerinin arka rotor kanatlarının uç kısımlarında yoğunlaştığı görülmüştür. Kanat uçlarında hızın artması, burada oluşan güçlü kaldırma kuvveti ile ilişkilidir. Kanat köklerine doğru hızı daha düşük olduğu görülmüştür. Ön rotorun hemen arkasında geniş bir iz bölgesi oluşmuştur. Bu bölge düşük hızlı türbülanslı akış alanını temsil etmektedir. Arka rotora ulaşan bu düşük hızlı akış, arka rotorun performansını sınırlamakta ve enerji kaybına neden olmaktadır. Bu konfigürasyonda, 10 m/s rüzgâr hızında ön rotor 90 dev/dak açısal hızda dönerken arka rotor ise 235 dev/dak gibi daha yüksek bir açısal hızda dönmektedir. Görselde ön rotorun ardından oluşan iz etkisinin çok daha dar ve yoğun olduğu görülmektedir. Bu dar iz bölgesi, ön rotorun yüksek hücum açısı nedeniyle oluşan yüksek aerodinamik direnç ve akış ayrılmaları sonucu oluşmaktadır. Ön rotorun düşük devirle çalışmasının temel nedeni, yüksek hücum açısının aerodinamik yükü arttırarak hava direncini fazlalaştırmasıdır. Bu durum,

ön rotorun daha fazla enerji kaybına uğramasına ve devir sayısının düşmesine yol açmaktadır.

Her iki konfigürasyonda da en yüksek hızların kanat uçlarında yoğunlaştığı görülmüştür. $12^\circ-3^\circ$ konfigürasyonunda daha dar bir iz yapısı ve daha stabil bir akış oluşurken, $24^\circ-0^\circ$ konfigürasyonunda daha geniş bir iz bölgesi ve buna bağlı olarak daha düzensiz bir akış gözlemlenmiştir. Bu durum, kanat açıları ile akış yapısı arasındaki ilişkinin sistem performansı üzerindeki kritik rolünü göstermektedir.

Kanat profillerinin etrafı ve akış alanındaki basınç dağılımları Şekil 3.33'te verilmiştir.



Şekil 3.33. Kanat profilleri ve akış alanı için basınç dağılımları (a: $12^\circ-3^\circ$ konfigürasyonu; b: $24^\circ-0^\circ$ konfigürasyonu)

Şekil 3.33'de sunulan kontur grafikleri, özellikle kanat yüzeylerindeki basınç gradyanları ve bunların aerodinamik performansa etkilerini incelemek açısından önem arz etmektedir. $12^\circ-3^\circ$ konfigürasyonunda, kanat profilinin ön kenarlarında yüksek basınç bölgeleri yoğunlaşmışken, kanadın üst yüzeyinde ve

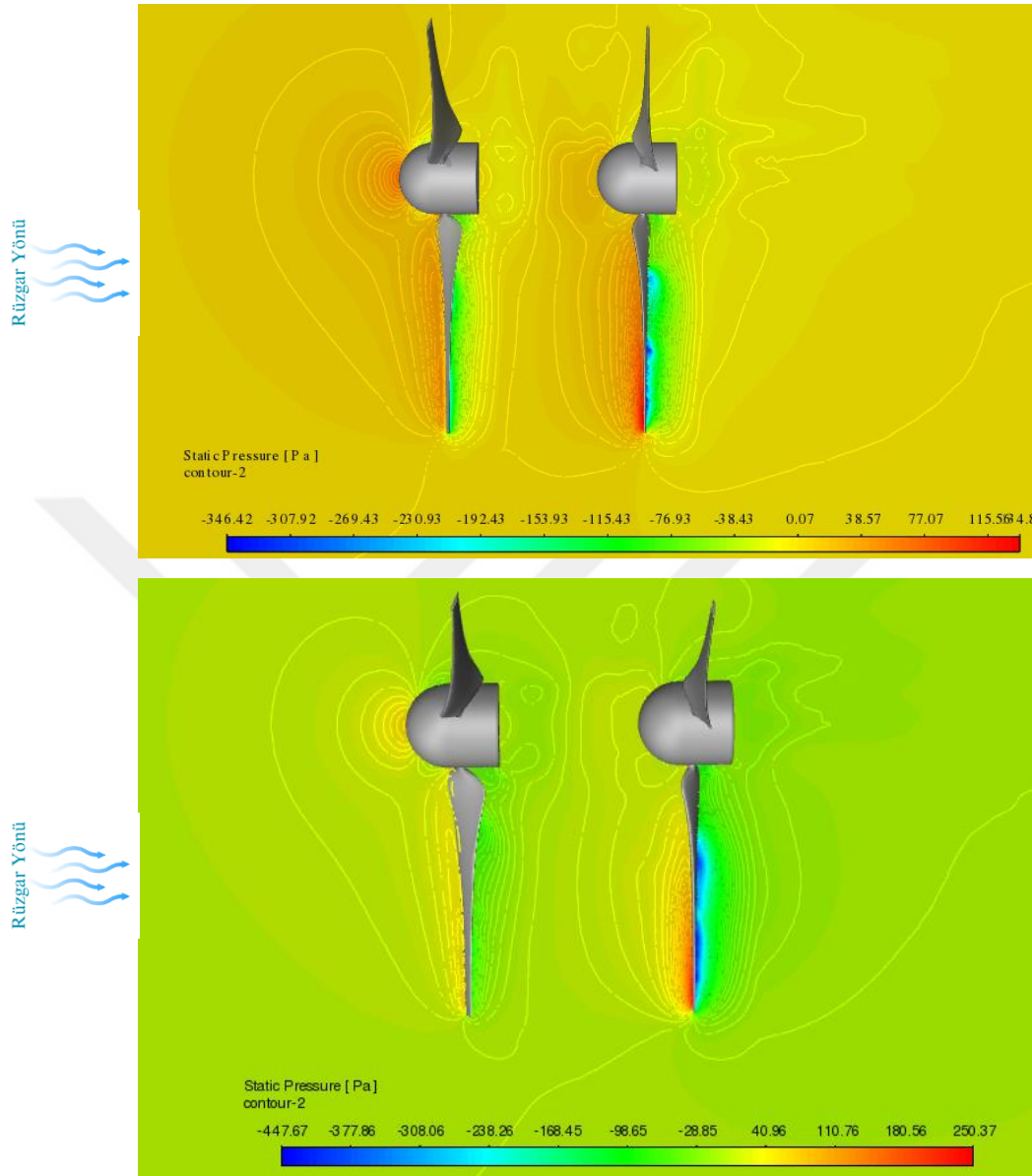
arka kenarlarında düşük basınç bölgelerinin olduğu görülmüştür. Bu durum, kanat üzerinde yüksek basınç farkı yaratarak güçlü bir kaldırma kuvveti oluşmasını sağlamaktadır. Özellikle ön rotorun ön kenarında görülen basınç açısından yoğun bölge, hava akışının kanatla ilk temas ettiği noktada meydana gelen basınç birikimini göstermektedir. Bu basınç gradyanı, akışın hızlanmasına ve kanar boyunca düzgün bir şekilde ilerlemesine olanak sağlamaktadır. Düşük basınçlı alanların geniş bir bölgeye yayılması, kanat üzerinde dengeli bir kaldırma kuvveti oluşturmakta ve bu durum aerodinamik verimliliği arttırmaktadır. Arka rotor kanadında da benzer bir basınç dağılımı gözlemlenmektedir. Ancak iz etkisi nedeniyle ön rotora kıyasla daha düzensiz bir yapı mevcuttur. Yine de basınç farkı yeterince korunmuş olup, bu durum arka rotorun aerodinamik performansını desteklemektedir.

24°-0° konfigürasyonunda ise ön rotorun ön kenarlarında belirgin bir yüksek basınç bölgesi görülmektedir. Bu durum, kanadın yüksek hücum açısı ile çalışmasından kaynaklanmaktadır. Yüksek hücum açısı, hava akışının kanat yüzeyine daha dik açıyla çarpmasına neden olmaktadır. Kanadın alt kısmında görülen düşük basınç bölgelerinin ise geniş bir alanda olması, akış ayrılmalarının meydana geldiğini ve aerodinamik verimliliğin düştüğünü göstermektedir. Yüksek basınç farkı nedeniyle ön rotor yüksek aerodinamik sürtünme kuvvetlerine maruz kalır ve bu da rotorun düşük devirlerde çalışmasına neden olmaktadır. Arka rotorun ön kenarında daha dengeli bir basınç dağılımı gözlemlenmektedir. Kanadın ön kenarına yakın bölgelerde yüksek basınç bölgeleri ve hemen arkasında düşük basınç bölgeleri oluşmuştur. Bu durum arka rotorun daha dengeli bir basınç farkı oluşturarak yüksek kaldırma kuvveti üretmesine olanak sağlamıştır.

Genel olarak 12°-3° konfigürasyonunda, basınç dağılımı daha dengeli olup, bu durum aerodinamik verimliliği arttırmak ve rotorların yüksek devirlerde çalışmasına olanak tanımaktadır. İz etkisi geniş bir alana yayılmış ancak türbülans seviyeleri kontrollü kalmıştır. 24°-0° konfigürasyonunda ise yüksek hücum açısı nedeniyle ön rotor üzerinde yoğun basınç gradyanları oluşmuş, bu da akış ayrılması ve aerodinamik verim kayıplarına neden olmuştur. Bu durum ön rotorun düşük devirde çalışmasına neden olurken, arka rotor dar bir iz etkisiyle daha verimli çalışarak yüksek devirlere ulaşmıştır.

Akış alanının basınç dağılımı Şekil 3.34'da sunulmuştur. Bu kontur grafiği çift rotorlu rüzgâr türbinindeki toplam basınç dağılımını göstererek, iz oluşumu,

enerji kaybı ve rotorlar arasındaki etkileşim gibi önemli aerodinamik davranışları ortaya koymaktadır.



Şekil 3.34. Akış alanı basınç dağılımı (a: 12°-3° konfigürasyonu; b: 24°-0° konfigürasyonu)

Şekil 3.34, her iki konfigürasyon için akış alanı basınç dağılımlarını vermektedir. Bu analiz, rotor kanatları etrafındaki basınç farklarını, iz etkilerini ve aerodinamik performansa olan etkilerini incelenmiştir. 12°-3° konfigürasyonunda ön rotorun hemen arkasında, rotorun kanat uçlarında başlayan belirgin bir düşük basınç bölgesi gözlemlenmektedir. Bu düşük basınç bölgesi, rotorun kaldırma kuvveti üretmesini sağlamaktadır. Ön rotorun iz etkisi geniş bir alana yayılmış olup, bu geniş alan boyunca basınç gradyanı daha dengeli bir dağılım göstermiştir. Arka

rotorun iz bölgesi, ön rotordan gelen akışın etkisiyle hafifçe düzensizleşmiş olsa da, yine de düşük basınçlı alanlar korunmuştur. Bu durum, arka rotorun ön rotorun iz etkisinden fazla olumsuz etkilenmeden çalışmasına olanak tanımaktadır. Basınç farkının dengeli olması, ön rotorun ve arka rotorun devir sayılarının birbirine yakın olmasını desteklemektedir.

24°-0° konfigürasyonunda ise yüksek hücum açısı nedeniyle ön kanat yüzeyinde daha belirgin bir yüksek basınç bölgesi oluşmuştur. Bu durum, hava akışının kanat yüzeyine daha dik bir açıyla çarpması sonucu ortaya çıkmaktadır. Düşük basınçlı alanların ise daha dar bir alanda olduğu görülmüştür. Bu durum, kaldırma kuvvetlerinin daha az olmasına ve rotorun düşük devirlerde (90 dev/dk) çalışmasına neden olmaktadır. Arka rotorun iz bölgesinin ise daha dar ve yoğun yapıda olduğu görülmüştür. Ön rotorun oluşturduğu iz etkisi, akışın belirli bir hat üzerinde yoğunlaşmasına neden olmuştur. Bu da arka rotorun daha yüksek devir sayılarında (235 dev/dk) dönmesine olanak sağlamıştır.

Elde edilen sayısal analiz sonuçları doğrultusunda çift rotorlu rüzgâr türbini sisteminin aerodinamik performansı kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Analizler, rotorlar arasındaki akış dinamiklerini, basınç dağılımlarını ve iz etkilerini ortaya koyarak sistemin verimliliğine yönelik önemli bulgular sağlamaktadır. Bu kapsamda aşağıdaki önemli bulgulara ulaşılmıştır.

- Hız büyüklüğü kontur analizleri: Hız kontur görselleri, ön ve arka rotorlar arasındaki performans farkını açık bir şekilde ortaya koymaktadır. Ön rotor, düzenli ve daha yüksek enerjili bir giriş akışı ile çalıştığı için özellikle ön kenar (leading edge) ve kanat uçlarında yüksek hız bölgeleri oluşmuştur. Bu durum aerodinamik tork üretimini ve kaldırma kuvveti oluşumunu destekleyerek ön rotorun daha yüksek verimle çalışmasını sağlamaktadır. Arka rotor ise ön rotorun iz etkisiyle oluşan türbülanslı ve düşük enerjili akış alanında çalışmaktadır. Bu durum, özellikle rotorlar arası bölgede düşük hız bölgeleri ve artan türbülans seviyeleri ile görülmekte ve arka rotorun tork üretimini sınırlamaktadır. Ön ve arka rotor arasında belirgin performans farklılıkları oluşmaktadır.
- Statik Basınç Dağılımları: Statik basınç kontur görselleri, kanat yüzeylerindeki basınç gradyanlarını net bir şekilde ortaya koymaktadır. Ön rotor, kanat ön kenarında yüksek basınç ve üst arka kenarında düşük basınç bölgeleri oluşturarak etkili bir kaldırma kuvveti oluşturmaktadır. Ancak arka rotorda bu

basınç farkı daha az belirgin olup, özellikle ön rotorun iz etkisinden kaynaklanan türbülanslı ve düşük enerjili giriş akışı nedeniyle basınç gradyanı zayıflamaktadır. Bu durum, arka rotorun kanatlarında daha düşük basınç alanlarının görülmesine ve aerodinamik verim kaybına yol açmaktadır.

- **Toplam Basınç Dağılımı:** Toplam basınç konturları akış içindeki enerji dağılımını yansıtarak sistemin aerodinamik performansı hakkında genel bir bakış sunmaktadır. Ön rotorun ön kenarlarında yüksek toplam basınç bölgeleri oluşmuş ve bu durum yüksek tork üretimi ile ilişkilendirilmiştir. Arka rotor kanatlarında ise toplam basınçta keskin düşüşler gözlemlenmiş ve bu düşüş, ön rotorun iz etkisinden kaynaklanan akış bozulmaları ile açıklanabilir. Arka rotorun daha az belirgin yüksek basınç bölgeleri ve geniş düşük basınç alanları, ön rotorun oluşturduğu iz etkisinin neden olduğu azalan aerodinamik verimliliği doğrulamaktadır.
- **Uç Girdapları ve Enerji Kayıpları:** Basınç konturları ve hız vektör analizlerinde görülen uç girdapları özellikle kanat uçlarında yoğunlaşmakta ve enerji kayıpların önemli bir kaynağı olarak öne çıkmaktadır. Bu girdaplar, iz alanında türbülansı arttırarak aerodinamik sürüklenmeye ve verim kaybına neden olmaktadır.
- **İz etkisi,** çift rotorlu sistemin en önemli sınırlayıcı faktörlerinden birisidir. 12° - 3° konfigürasyonunda iz etkisi daha geniş ve homojen olarak dağılmışken, 24° - 0° konfigürasyonunda daha dar ancak yoğun bir iz etkisi gözlemlenmiştir. Özellikle arka rotor, bu türbülanslı iz bölgesinde çalışmak zorunda kaldığı için akış dengesizliği ve azalan tork üretimi sağlamıştır.

Bu kapsamlı analizler, çift rotorlu rüzgâr türbinlerinde kritik öneme sahip aerodinamik parametreleri ortaya koymaktadır. Ön rotorun yüksek verimle çalışması ve arka rotorun iz etkisinden kaynaklanan kayıpların minimize edilmesi, çift rotorlu sistemlerin genel performansını arttırmak için temel bir strateji sunmaktadır. Bu gözlemler, dengeli aerodinamik performans sağlamak ve enerji kayıplarını en aza indirmek amacıyla çift rotorlu rüzgâr türbini tasarımını optimize etmek için güçlü bir temel oluşturmaktadır

3.4 Sonuçların istatistiksel olarak incelenmesi

Yapılan deneysel çalışmalarda farklı rüzgâr hızı ve yük değerlerinde kanatların hangi açı aralıklarında döndüğü ve performanslarının nasıl değiştiği

önceki bölümlerde detaylı bir şekilde incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ayrıca istatistiksel açıdan incelenmiştir. Bütün parametreler için deneyler yapılmış ve çift rotorlu sistemin kararlı bir şekilde çalıştığı 330 durum için değerler kaydedilmiştir. Bütün değerler kayıt altına alındığı için istatistiksel yaklaşım olarak Tam Faktöriyel Tasarım tercih edilmiştir.

Tam faktöriyel tasarım, tüm faktörlerin tüm seviyelerinin olası kombinasyonlarını içeren bir istatistiksel yöntemdir. Bu yaklaşım, her bir parametrenin etkisinin ve parametrelerin çıktı parametresi üzerindeki etkisinin tam olarak incelenmesine olanak sağlamaktadır. Bir sürecin veya sonucun birden fazla parametre tarafından nasıl etkilendiğinin anlaşılmasında kullanılan en kapsamlı yöntemler arasında yer almaktadır. Her bir parametrenin tüm olası kombinasyonları değerlendirilmektedir. Her parametrenin bütün seviyeleri test edildiği için, sonuçlar daha dengeli ve kapsamlı olmaktadır. Tam faktöriyel tasarımın en büyük dezavantajı parametre ve seviyelerinin artması ile deney sayısının artmasıdır. Yapılan çalışmada çift rotorlu rüzgâr türbini kapsamlı bir şekilde incelendiği için bütün parametreler ve seviyeleri detaylı bir şekilde incelenmiş ve deney sayısını azaltabilecek istatistiksel yöntemler tercih edilmemiştir. İstatistiksel analizler Minitab yazılımı kullanılarak yapılmıştır.

Deneyisel çalışmalardan elde edilen sonuçların değerlendirilmesinde ANOVA (Varyans Analizi) uygulanmıştır. Modelin genel anlamlılığı ve faktörlerin etkileri Tablo 3.6’da sunulmuştur. Bu sonuçlar çift rotorlu rüzgâr türbini için güç çıktısını veren matematiksel model için oluşturulmuştur.

Tablo 3.6. Deneyisel sonuçlar için Varyans Analizi (ANOVA)

Kaynak	SD	Düz. KT	Düz. OK	F-Değeri	P-Değeri
Model	9	1098,19	137,274	162,80	0,000
Ana Etkiler	5	539,87	107,974	128,05	0,000
Ön Kanat Açısı(°)	1	59,36	59,363	70,40	0,000
Arka Kanat Açısı(°)	1	36,87	36,870	43,73	0,000
V1(m/s)	1	5,15	5,154	6,11	0,014
Direnç (Ohm)	1	151,89	151,890	180,13	0,000
P1(Pa)	1	0,46	0,461	0,55	0,460
İkili Etkileşimler	4	29,57	9,857	11,69	0,000
Ön Kanat Açısı(°)*Arka Kanat Açısı(°)	1	15,09	15,093	17,90	0,000
Ön Kanat Açısı(°)*Direnç (Ohm)	1	3,74	3,740	4,44	0,036
Arka Kanat Açısı(°)*P1(Pa)	1	13,85	13,848	16,42	0,000
Hata	318	268,98	0,843		
Toplam	327	1367,17			

Varyans Analizi, deney sonuçlarının varyasyon kaynaklarını analiz ederek, oluşturulan matematiksel modelde kullanılan faktörlerin etkileşimlerinin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını sunmaktadır. Oluşturulan matematiksel modelin F-Değeri 162.80 olarak ve P değeri ise 0.000 ($P < 0.05$) olduğu görülmüştür. Modelin genel olarak anlamlı olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, modele dahil edilen faktörlerin, modelin varyansını açıklamada güçlü bir katkı sağladığını göstermektedir. Ana etkiler, her bir faktörün bağımsız model üzerindeki etkisini açıklamaktadır. Oluşturulan modelde “Ön Kanat Açısı”, “Arka Kanat Açısı”, “V1-Rüzgâr Hızı”, “Direnç”, ve “Girdi Rüzgâr Basıncı-P1” faktörlerinin etkisi olduğu görülmüştür. Direnç değeri modele en yüksek katkıyı yapan faktör olarak görülmüştür. Direnç değerindeki değişimler, model üzerindeki varyansın büyük bir kısmını açıklamaktadır. Ön ve arka kanat açıları model üzerinde anlamlı bir etki oluşturmuştur. Aerodinamik performans üzerinde güçlü bir etkisi olduğu görülmüştür.

İkili etkileşimler, iki faktörün birlikte nasıl bir etki yarattığını açıklamaktadır. Etkileşimler, özellikler bir faktörün etkisinin diğer faktörlere bağlı olduğu durumlarda önemlidir. Varyans Analizinde hata terimi, açıklanamayan varyansı ifade etmektedir. Yani, modelde kullanılan faktörler ve etkileşimler tarafından açıklanamayan kısmı ifade etmektedir. Hata değeri için serbestlik derecesi 318 olduğu görülmüştür. Bu, hata teriminin çok sayıda veri noktasına dayandığını ve güvenilir bir tahmin sağladığını göstermektedir. Düzeltilmiş Kareler Toplamında (Düz KT), hata varyansının (268.98), toplam varyansın (1367.17) yaklaşık %19.7’sini temsil ettiği görülmüştür. Bu durum, modelin toplam varyansın %80.3’ünü açıklayabildiğini ve hata teriminin düşük olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak hata teriminin düşük seviyede kaldığı, bu da modelin genel olarak güçlü olduğunu ve açıklanamayan varyansın sınırlı olduğunu göstermektedir.

Yapılan analizler sonucunda çift rotorlu rüzgâr türbinlerinde güç çıkışının elde edilebildiği bir matematiksel model oluşturulmuştur. Oluşturulan matematiksel model Eşitlik 3.1’de verilmiştir.

$$\begin{aligned}
Güç(W) = & 43,6 - 5,140 \text{ Ön Kanat Açısı}(\text{°}) + 15,89 \text{ Arka Kanat Açısı}(\text{°}) \\
& + 12,12 \text{ Rüzgar Hızı}(m/s) - 0,2489 \text{ Yük } (Ohm) + 1,398 P1(Pa) \\
& - 0,1433 \text{ Ön Kanat Açısı}(\text{°}) * \text{ Arka Kanat Açısı}(\text{°}) \\
& + 0,00728 \text{ Ön Kanat Açısı}(\text{°}) * \text{ Yük } (Ohm) - 0,1096 \text{ Arka Kanat Açısı}(\text{°}) \\
& * P1(Pa)
\end{aligned}$$

3.1

Oluşturulan eşitlik çift rotorlu rüzgâr türbinlerinde güç çıktısının elde edilebildiği bir denklemdir. Modelin özeti Tablo 3.7’de sunulmuştur.

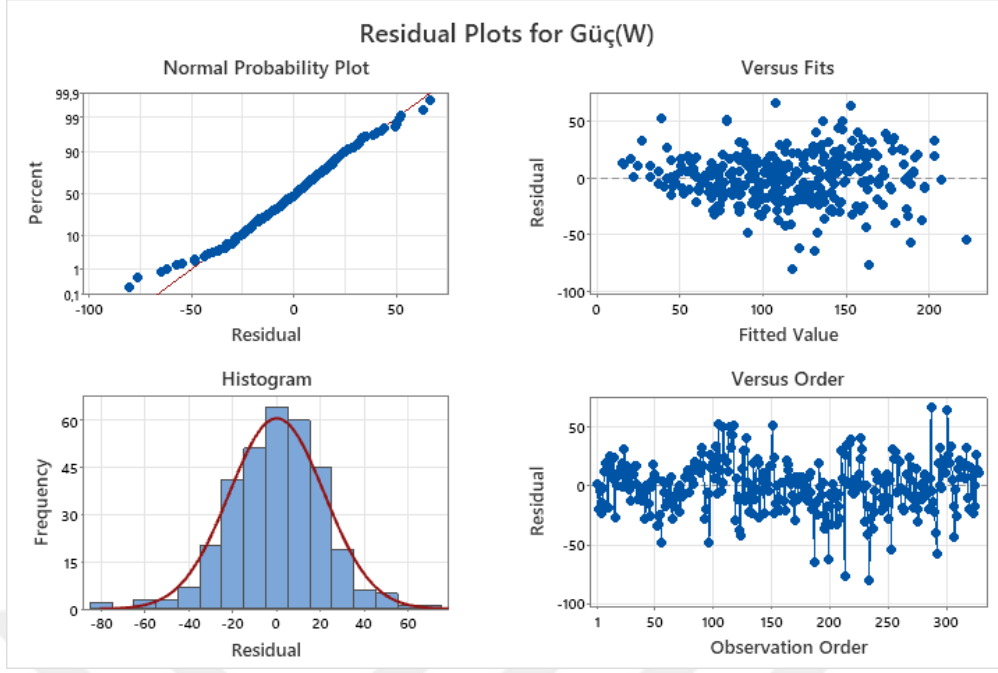
Tablo 3.7. Model Özeti

Standart Hata	R ²	R ² (Düzeltilmiş)	R ² (Tahmin)
17.5875	78.95%	78.43%	77.83%

Standart Hata, modelin tahminlerindeki sapma miktarını göstermektedir. Bu modelde Standart Hata (S) 17.59 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, modelin tahminlerinde yaklaşık ± 17.59 birimlik bir sapma olduğunu göstermektedir. R² değeri %78.95 olup, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkenin toplam varyansının %78.95’ini açıkladığını göstermektedir. Bu yüksek R² değeri, modelin genel olarak iyi bir uyum sağladığını ve veriye güçlü bir şekilde adapte olduğunu göstermektedir. Düzeltilmiş R² değeri %78.43’tür. Bu değer R² değerine oldukça yakın olması, modele dahil edilen değişkenlerin büyük ölçüde anlamlı olduğunu ve modelde aşırı uyum (overfitting) sorunu bulunmadığını göstermektedir. R² (Tahmin) değeri ise %77.83’tür. Bu değer, modelin yeni bir veri seti üzerinde tahmin yapma kapasitesini ölçmekte olup, modelin genellenebilirliğinin yüksek olduğunu ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, modelin güçlü ve güvenilir olduğu görülmektedir. Bağımsız değişkenlerin ve etkileşimlerinin etkileri istatistiksel olarak anlamlı bir şekilde tespit edilmiştir.

Sonuçlar için oluşturulan Artık (Residual) Analizi Şekil 3.35’de sunulmuştur.



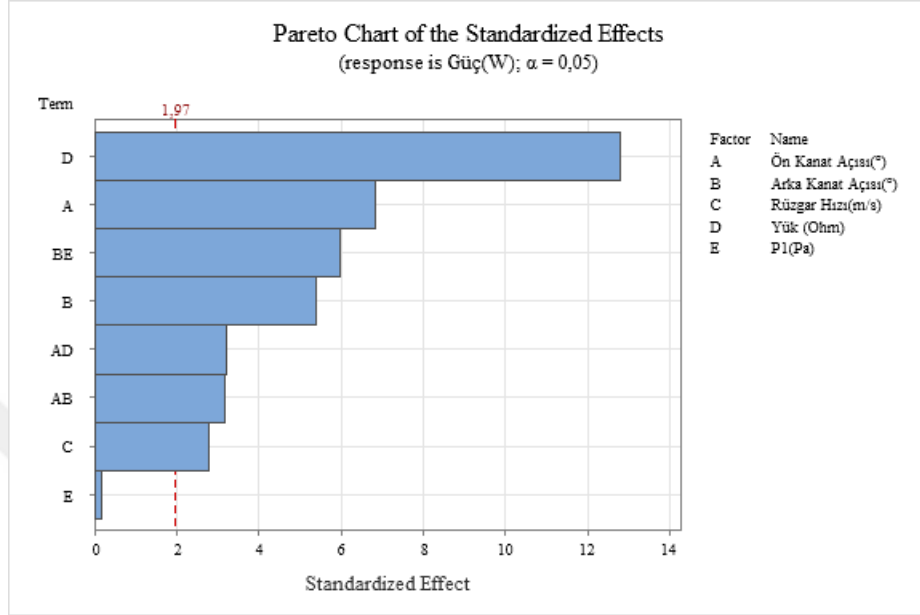
Şekil 3.35. Artık (Residual) Analizi

Artık analizi, oluşturulan matematiksel modelin değerlendirilmesinde kritik bir adımdır. Artıklar, tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasındaki farkları ifade etmektedir. Modelin hatalarını ve varsayımlarını test etmek için artıkların analizi, modelin doğruluğu ve güvenilirliği hakkında detaylı bilgi sağlamaktadır. Normal Olasılık (Normal Probability) grafiği incelendiğinde, artıkların büyük ölçüde doğrusal bir çizgi boyunca sıralandığını göstermektedir. Bu durum, artıkların normal dağılıma yakın olduğunu ve modelin normallik varsayımını büyük ölçüde karşıladığını göstermektedir. Bazı uç değerler olsa da, bunlar modelin genel geçerliliğini önemli ölçüde etkilememektedir.

Tahmin edilen değerlere karşı artıklar (Residual vs Fitted), artıkların tahmin edilen değerler boyunca rastgele dağıldığını göstermektedir. Herhangi bir eğilim, sistematik desen veya konik bir desen bulunmamaktadır. Bu durum, modelin, tahmin edilen değerlere göre sistematik bir değişim göstermediğini ifade etmektedir. Artıkların histogramı (Histogram of Residuals) ise artıkların normal dağılım şeklinde bir dağılım sergilediği görülmüştür. Histogramın simetrik bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. Artıkların normal dağılım varsayımına uygun olduğu doğrulanmıştır. Küçük sapmaların, deneysel ölçüm hatalarından veya modelin sınırlamalarından kaynaklandığı söylenebilmektedir. Gözlem sırasına göre artıklar (Residuals vs Observation Order) ise zaman veya deney sırasına bağlı

olarak herhangi bir sistematik desen veya trend olmadığı görülmektedir. Bu durum artıkların bağımsızlık varsayımını sağladığını göstermektedir.

Güç çıktısına etki eden parametrelerin etki seviyeleri Pareto diyagramı kullanılarak değerlendirilmiştir. Pareto grafiği Şekil 3.36’de sunulmuştur.



Şekil 3.36. Oluşturulan modelin Pareto grafiği

Pareto grafiği, modelde yer alan faktörlerin ve etkileşimlerinin önem derecesini görselleştirmek için kullanılmaktadır. Bu grafikte, standartlaştırılmış etkiler belirli bir kritik eşik değeri (1.97) ile karşılaştırılmaktadır. Kritik eşik değerinin üzerinde yer alan faktörler istatistiksel olarak anlamlı kabul edilmektedir. Grafiğe göre, “Yük (D)” ana faktörünün model üzerinde en güçlü etkiye sahip olduğu açıkça görülmektedir. Standartlaştırılmış etkisi, diğer tüm faktörlerden belirgin bir şekilde daha yüksektir. Bu durum, yük faktörünün güç üretimi üzerinde kritik bir rol oynadığını göstermektedir. Model üzerinde etkili olan diğer önemli bir faktör ise “Ön Kanat Açısı (A)” olarak öne çıkmaktadır. Ön kanat açısındaki değişikliklerin aerodinamik performans ve enerji üretimi üzerinde doğrudan ve anlamlı bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. İkili etkileşimler açısından değerlendirildiğinde, “Arka Kanat Açısı (B)” ile “Girdi Hava Basıncı (P1)” arasındaki etkileşim (BE) en önemli ikili etkileşim olarak dikkat çekmektedir. Bu durum, özellikle bu iki faktörün birlikte optimize edilmesinin sistem performansını artırabileceğini göstermektedir. Buna karşılık, “Girdi Hava Basıncı (P1)” (E) faktörünün hem bağımsız etkisi hem de diğer faktörlerle olan etkileşimleri

istatistiksel olarak anlamlı değildir. Benzer şekilde, “Ön Kanat Açısı $\times$ Girdi Hava Basıncı (AE)” etkileşiminin de model üzerindeki etkisi oldukça düşüktür. Bu durum, özellikle bu iki faktörün bir arada optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir.

Gücü maksimum yapan değerlerin istatistiki olarak belirlenmesi

Bu bölümde, deneysel verilerin istatistiksel olarak doğrulanması amacıyla yapılan analizler sunulmaktadır. Çalışmada, sistemin performansını etkileyen temel parametrelerin optimize edilmesi ve elde edilen güç değerlerinin güvenilirliği değerlendirilmiştir. İstatistiksel analiz kapsamında ANOVA (Varyans Analizi), tahmin edilen güven aralıkları, optimizasyon sonuçları ve kontur grafikleri kullanılarak sistem performansı detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Deneysel veriler kullanılarak oluşturulan matematiksel model çerçevesinde, sistemin performansını en üst düzeye çıkarmak amacıyla yanıt optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte belirlenen ana yanıt değişkeni güç üretimi (Watt) olarak tanımlanmıştır. Optimizasyon kapsamında, belirlenen parametreler doğrultusunda en uygun çalışma koşulları değerlendirilmiş ve ön kanat açısı, arka kanat açısı, rüzgâr hızı ve yük direnci (Ohm) gibi faktörlerin sistem performansına etkisi incelenmiştir. Optimizasyon hedef değerleri Tablo 3.8’de sunulmuştur.

Tablo 3.8. Hedef Parametre tablosu ve tanımlamalar

Yanıt	Hedef	Alt Değer	Hedef Değer	Üst Değer	Ağırlık Derecesi	Önem Derecesi
Güç(W)	Maksimum	18.88	189.5	189.5	1	1

Tablo 3.8’de sunulan hedef parametreler doğrultusunda yapılan optimizasyon işlemi, maksimum güç üretimini hedeflemekte olup alt, hedef ve üst değerler analiz edilerek sistemin performans sınırları belirlenmiştir. Optimizasyonun amacı, yanıt değişkeni olan Güç değerini maksimum seviyeye çıkarmaktır. Bu, sistemin enerji üretimini maksimuma çıkarmayı hedeflemektedir. Alt değer, deneysel olarak elde edilen minimum güç değerini ifade etmektedir. Hedef değer ise deneysel olarak elde edilen maksimum güç değerini ifade etmektedir. Ağırlık ve önem derecesinin 1 olarak belirlenmesi güç değişkeninin doğrudan optimize edilmesini sağlamaktadır. Birçok parametrenin optimize edilmesi istenildiği durumlarda bu derecelerde değişiklikler yapılmaktadır. Yapılan

çalışmada tek bir yanıt parametresi için analizler yapılmasından dolayı önem de ağırlık seviyeleri 1 olarak tanımlanmıştır.

Optimizasyon sürecinde elde edilen çözümün detayları Tablo 3.9’da sunulmuştur.

Tablo 3.9. Optimizasyon sonuçları

Çözüm	Ön Kanat Açısı (°)	Arka Kanat Açısı (°)	Rüzgâr Hızı (m/s)	Yük (Ohm)	Basınç (Pa)	Güç (W) Fit
1	12	3	10	141.228	155.317	201.763

Tablo 3.9’de sunulan optimizasyon sonuçlarına göre en iyi performans ön kanat açısının 12° ve arka kanat açısının 3° olduğu durumda elde edilmiştir. Bu konfigürasyonda, rüzgâr hızı 10 m/s olarak belirlenmiş ve uygulanan direnç 141.228 Ohm olarak hesaplanmıştır. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlara benzer sonuçlar elde edilmiştir. Optimizasyon süreci sonucunda elde edilen güç değeri 201.76 W olup, hedeflenen maksimum güç değerinden daha yüksek bir performans sergilendiği görülmüştür. Bu bulgu, sistemin optimize edilen parametreler sayesinde daha verimli çalıştığını doğrulamaktadır. Tahmin edilen yanıtlar ve güven aralıkları Tablo 3.10’da sunulmuştur.

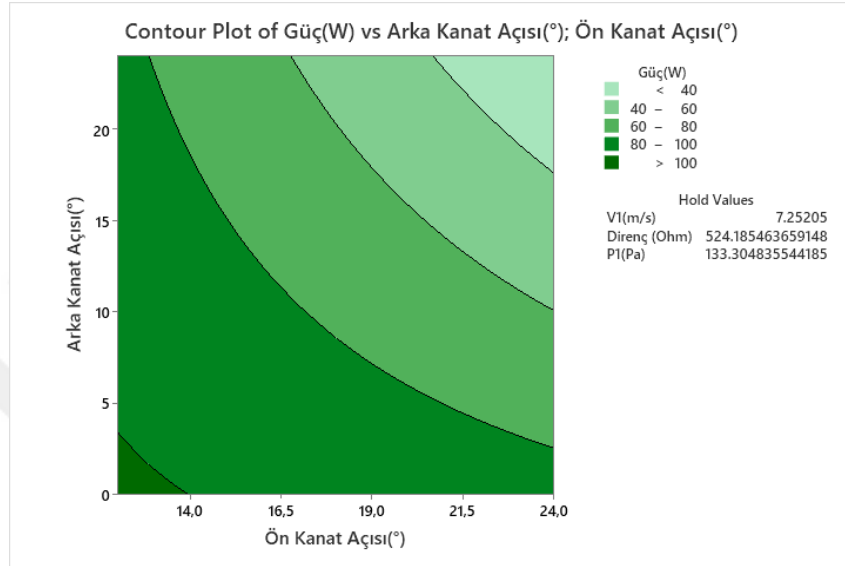
Tablo 3.10. Tahmin edilen yanıtlar ve güven aralıkları

Yanıt	Tahmin Edilen Güç	Standart Hata	95% Güven Aralığı	95% Tahmin Aralığı
Güç (W)	201.7	7.60	(200.86; 230.75)	(178.12; 253.50)

Tablo 3.10’da tahmin edilen güç değerleri, standart hata oranları ve güven aralıkları sunulmaktadır. Tahmin edilen güç değeri 201.7 W olarak hesaplanmış olup, deneysel olarak elde edilen değerlere son derece yakın bir sonuç ortaya koymaktadır. Standart hata değeri 7.60 olarak hesaplanmış olup, bu düşük hata değeri modelin tahmin performansının oldukça güvenilir olduğunu göstermektedir. %95 güven aralığı (200.86 W- 230.75 W) olarak belirlenmiş olup, bu aralığın dar olması modelin yüksek doğruluk sunduğunu kanıtlamaktadır. Güven aralığının dar olması, optimizasyon sürecinde elde edilen sonuçların istatistiksel olarak güçlü bir modelle desteklendiğini göstermektedir. %95 tahmin aralığı ise (178.12 W - 253.50 W) olup, bu aralık gelecekte yapılacak ölçümlerin büyük bir kısmının bu sınırlar içinde olacağını ifade etmektedir. Tahmin aralığının güven aralığından daha geniş olması, veri değişkenliğinin belirli ölçüde olabileceğini ancak modelin genel olarak

sağlam tahminler ürettiğini göstermektedir. Bu sonuçlar, deneysel ve sayısal analizler arasında güçlü bir korelasyon olduğunu ve modelin sistem performansını yüksek doğrulukla tahmin edebildiğini ortaya koymaktadır.

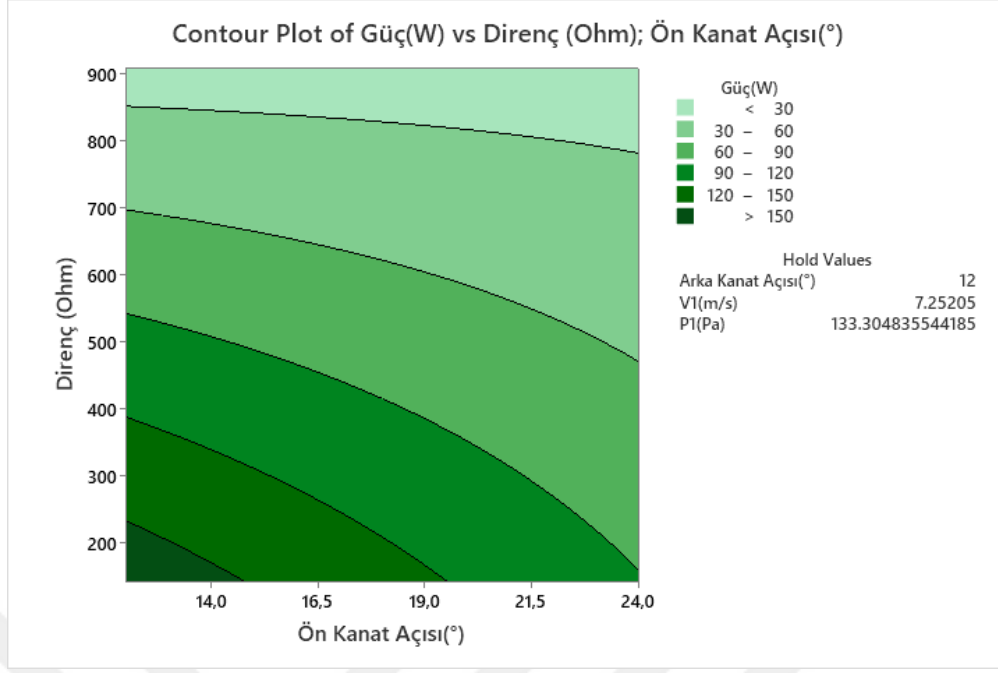
Parametrelerin sonuçlar üzerindeki etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi adına kontur grafikleri oluşturulmuştur. Ön ve Arka kanat açılarının güç çıktısı üzerindeki etkisinin dağılımını veren kontur grafiği Şekil 3.37’de sunulmuştur.



Şekil 3.37. Ön ve Arka kanat açılarının güç çıktısı üzerindeki etkisi

Kontur grafiği, ön kanat açısı ve arka kanat açısı değişkenlerinin güç üzerindeki etkisini göstermektedir. Grafik, sabit rüzgâr hızı, direnç değeri ve basınç değeri için oluşturulmuştur. Daha koyu renkler ile gösterilen alanlar güç üretiminin anlık 100 W ve üzeri olduğu yüksek performans bölgelerini temsil etmektedir. Güç değerinin özellikle ön kanat açısının artışı ile belirgin bir şekilde azaldığı görülmektedir. Arka kanat açısı ise daha düşük kanat açılarında daha yüksek güç çıktısı alınmasını sağlamıştır. Optimum güç üretimi için ön kanat açısının yüksek, arka kanat açısının ise düşük olduğu kombinasyonlarda elde edilmiştir. Bu da aerodinamik denge ve enerji verimliliği arasındaki uyumu göstermektedir.

Ön kanat açısı ve yük değerinin değişiminin güç çıktısı üzerindeki etkisini veren kontur grafiği Şekil 3.38’de verilmiştir.



Şekil 3.38. Ön kanat açısı ve yük değerinin değişiminin güç çıktısı üzerindeki etkisi

Bu kontur grafiği, sabit arka kanat açısı, sabit rüzgâr hızı ve basınç değeri için oluşturulmuştur. Daha koyu renkler güç değerinin 150 W ve üzerinde olduğu yüksek performans bölgelerini temsil etmektedir. Ön kanat açısının artışı ile güç değerlerinde belirgin bir azalma meydana gelirken, direnç değerinin düşük seviyelerde tutulması ile güç üretimi optimize edilmiştir.

İstatistiksel çalışmada, sistem performansını etkileyen faktörlerin optimize edilmesi ve yanıt değişkeni üzerindeki etkilerinin analizi detaylı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. ANOVA (Varyans Analizi) sonuçlarına göre, model toplam varyansın %79.13'ünü açıklayarak istatistiksel olarak anlamlı bir yapı sunduğu belirlenmiştir. Girdi parametreleri arasında Direnç (Ohm) ve Arka Kanat Açısı, güç üretimi üzerinde en güçlü etkiye sahip değişkenler olarak öne çıkmıştır. Oluşturulan matematiksel model, faktörlerin ve etkileşimlerinin güç üzerindeki etkilerini başarıyla açıklamış ve tahmin edilen güç değeri 201.7 W olarak hesaplanmıştır. Bu değer, hedeflenen 189.5 W seviyesinin yaklaşık %6.5 üzerinde gerçekleşmiş olup, modelin beklenenden daha yüksek bir performans sergilediğini göstermektedir. Artık analizleri, modelin tahmin doğruluğunu destekler nitelikte olup, standart hata 7.60 olarak hesaplanmıştır. Arzu edilebilirlik fonksiyonunun 1 olarak belirlenmesi, optimizasyon hedeflerinin tam anlamıyla karşılandığını göstermektedir. Kontur grafikleri, güç üretimini etkileyen faktörler arasındaki ilişkileri görselleştirerek

daha kapsamlı bir inceleme imkânı sunmuştur. Ön kanat açısının azalmasıyla güç üretiminin belirgin bir şekilde arttığı, buna karşın ön kanat açısının artışıyla wake etkisinin güç kayıplarını artırdığı tespit edilmiştir. Düşük direnç (yük) seviyelerinde ise, elektriksel verimliliğin daha yüksek olduğu ve güç çıktılarının maksimum seviyeye ulaştığı görülmüştür. Bu bulgular, aerodinamik ve elektriksel bileşenlerin birlikte optimize edilmesinin, çift rotorlu rüzgâr türbini sisteminin performansını artırmada kritik bir faktör olduğunu doğrulamaktadır. Güçlü istatistiksel performans, geliştirilen modelin gelecekteki rüzgâr türbini tasarımları için hem tahmin hem de optimizasyon aracı olarak güvenilir bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.

3.5 Çift Rotorlu ve Tek Rotorlu Rüzgâr Türbinleri için Maliyet Analizi

Rüzgâr türbinleri, sürdürülebilir enerji üretiminde önemli bir rol oynamakta olup, ekonomik açıdan yatırım maliyetleri ve uzun vadeli enerji üretim kapasiteleri dikkate alınarak değerlendirilmelidir. Bu analizde, tek rotorlu ve çift rotorlu rüzgâr türbinlerinin maliyetleri ve yıllık enerji üretim performansları karşılaştırılmış, geri ödeme süreleri dikkate alınarak ekonomik fizibiliteleri incelenmiştir. Deneysel olarak elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde çift rotorlu rüzgâr türbinlerinden ortalama %40 daha fazla enerji elde edilebildiği görülmüştür. Tablo 3.11’de 2 kW kapasitesindeki Tek Rotorlu Rüzgâr Türbini ve Çift Rotorlu Rüzgâr Türbini maliyetleri karşılaştırmalı olarak Tablo 3.11’de sunulmuştur.

Tablo 3.11. 2 kW kapasitesinde Tek Rotorlu ve Çift Rotorlu Rüzgâr Türbini Maliyetleri

Malzeme	Tek Rotorlu Rüzgâr Türbini			Çift Rotorlu Rüzgâr Türbini		
	Adet	Birim Fiyat (TL)	Toplam Fiyat	Adet	Birim Fiyat (TL)	Toplam Fiyat
Alternatör (2 kW kapasitede)	1	45600	45600	1	45600	45600
Kanat	3	3000	9000	6	3000	18000
Kanat Aynası	1	2300	2300	2	2300	4600
Direk Seti	1	13690	13690	1	13690	13690
Invertör	1	8000	8000	1	8000	8000
Akü (100 Amper- Jel)	1	6000	6000	1	6000	6000
Şarj Kontrol Ünitesi	1	15790	15790	1	15790	15790
Bağlantı Ekipmanları (Rulman,Vida, Somun, Montaj Sehpa vb.)	1	1000	1000	1	3000	3000
Kablo ve Bağlantı Aparatları	1	500	500	1	1000	1000
Jeneratörün zıt devinimli dönmesi için yapılan imalatlar	-	-	-	1	3000	3000
Kanat Açısı Ayar Mekanizması	-	-	-	1	10000	10000
Torkmetre	-	-	-	2	15000	30000
Servomotor	-	-	-	2	6500	13000
Toplam			101880			167380

Tek rotorlu sistemin toplam maliyeti 101.880 TL, çift rotorlu sistemin maliyeti ise 167.380 TL olarak hesaplanmıştır. Çift rotorlu sistemin yatırım maliyeti tek rotorlu sisteme kıyasla %64 daha yüksek olmakla birlikte, daha fazla enerji üretimi sağlaması nedeniyle uzun vadede ekonomik avantaj sunmaktadır. Maliyet farkı, çift rotorlu sistemde ek kanatlar, kanat açısı ayar mekanizması, tork ölçüm sistemleri ve jeneratörün zıt devinimli çalışmasını sağlayan ilave imalatlardan kaynaklanmaktadır. Ancak, çift rotorlu sistemin %40 daha fazla enerji üretmesi, bu ek maliyetin uzun vadede amorti edilmesini sağlamaktadır.

Rüzgâr santrallerinin değerlendirilmesinde kullanılan Kapasite Faktörü (CF), bir enerji üretim tesisinin belirli bir zaman dilimi içinde, tam kapasiteyle çalışması durumunda üretebileceği maksimum enerjiye oranla, gerçek zamanlı olarak ürettiği enerjiyi gösteren bir ölçümdür. Rüzgâr türbinlerinde kapasite faktörü, rüzgâr hızlarının değişkenliği ve sistemin çalışma süresi dikkate alınarak hesaplanır. Kapasite faktörü Eşitlik 3.2’de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır (Şenkal ve ark., 2009).

$$KF = \frac{\text{Gerçekte Üretilen Enerji}(kWh)}{\text{Maksimum Teorik Üretim}(kWh)} \quad 3.2$$

Maksimum teorik üretim, türbinin sürekli tam kapasitede çalışması durumunda üreteceği enerji miktarıdır. Yıldaki toplam saat sayısı 8.760 saat olduğuna göre, 2 kW nominal gücündeki bir rüzgâr türbininin maksimum teorik üretimi aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır (Eşitlik 3.3 ve Eşitlik 3.4).

$$E_{maks} = P_{nominal} \times h \quad 3.3$$

$$E_{maks} = 2 \text{ kW} \times 8.760 \text{ saat} = 17.520 \text{ kWh} \quad 3.4$$

Ancak, rüzgâr hızları yıl boyunca sürekli maksimum seviyede olmadığı için, gerçek enerji üretimi kapasite faktörüne bağlı olarak değişmektedir. Türkiye’deki küçük ölçekli rüzgâr türbinleri için kapasite faktörü genellikle %25- %35 arasında değişmektedir (Şenkal ve ark., 2009) . Bu çalışmada %35 kapasite faktörü esas alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Bu parametreler doğrultusunda, tek rotorlu rüzgâr türbini için yıllık enerji üretimi aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır (Eşitlik 3.5-3.7).

$$E_{tek} = P_{nominal} \times h \times KF \quad 3.5$$

$$E_{tek} = 2 \text{ kW} \times 8760 \text{ saat/yıl} \times 0.35 \quad 3.6$$

$$E_{tek} = 6132 \text{ kWh/yıl} \quad 3.7$$

Elde edilen deneysel sonuçlar, çift rotorlu rüzgâr türbininin tek rotorluya göre %10-66 aralığında daha yüksek güç ürettiğini göstermiştir. Bu değişken aralık, rüzgâr hızı ve çeşitli yapısal konfigürasyonlara bağlı olarak farklılık göstermektedir. Değerlerin aritmetik ortalaması yaklaşık %40 olup, bu oran çift rotorlu sistemin güç üretim kapasitesinin tek rotorluya kıyasla ortalama %40 daha fazla olduğu söylenebilmektedir. Çift rotorlu türbin için yıllık enerji üretimi aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır (Eşitlik 3.8 ve Eşitlik 3.9):

$$E_{çift} = E_{tek} \times 1.40 \quad 3.8$$

$$E_{çift} = 8584 kWh/yıl \quad 3.9$$

2024 yılı ortalama elektrik birim fiyatının yaklaşık olarak 2 TL/kWh olduğu durumda (EPIAŞ, 2024), her iki sistemden elde edilecek olan gelirler aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\begin{aligned} \text{Elektrik Geliri (Tek Rotorlu)} &= E_{tek} \times 2 \text{ TL/kWh} \\ &= 6132 \text{ kWh/yıl} \times 2 \text{ TL/kWh} = 12.264 \text{ TL/yıl} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Elektrik Geliri (Çift Rotorlu)} &= E_{çift} \times 2 \text{ TL/kWh} \\ &= 8584 \text{ kWh/yıl} \times 2 \text{ TL/kWh} = 17.168 \text{ TL/yıl} \end{aligned}$$

Elde edilen sonuçlara göre çift rotorlu sistemin yıllık elektrik geliri, tek rotorlu bir sisteme kıyasla 4904 TL daha fazla olduğu görülmüştür.

Sistemin geri ödeme süreleri hesaplandığında Tek Rotorlu Rüzgâr Türbininin geri ödemesi 8.3 yıl olarak; Çift Rotorlu Rüzgâr Türbininin geri ödeme süresi 9.75 yıl olduğu görülmüştür. Bu sonuçlara göre, çift rotorlu rüzgâr türbininin yatırım geri dönüş süresi tek rotorlu sisteme kıyasla yaklaşık 1.45 yıl daha uzun olmaktadır. Ancak, üretim kapasitesinin daha yüksek olması sayesinde uzun vadede daha fazla gelir sağladığı ve yüksek enerji verimliliği sunduğu görülmektedir.

Kapasite faktörünün %35 olduğu bir durumda yapılan hesaplamalar göstermektedir ki, çift rotorlu sistemin geri ödeme süresi tek rotorlu sisteme kıyasla yalnızca 1.45 yıl daha uzundur. Ancak, daha fazla enerji üretimi sayesinde uzun vadede daha yüksek gelir elde edileceği ve sistemin ekonomik olarak daha avantajlı hale geleceği görülmektedir. Elektrik fiyatlarının artması durumunda, çift rotorlu sistemin sağladığı ekonomik kazanç daha da belirgin hale gelecek ve yatırımın geri dönüş süresi daha da kısalmaktadır.

Bunun yanı sıra, çift rotorlu sistemler daha fazla enerji üretimi yaparak şebeke bağımlılığını azaltmakta ve yenilenebilir enerji kullanımını teşvik etmektedir. Yüksek rüzgâr potansiyeline sahip kıyı bölgelerinde veya dağlık alanlarda, kapasite faktörünün %35'in üzerine çıkması durumunda çift rotorlu türbinlerin yatırım geri dönüş süresi daha da kısalmakta ve ekonomik avantajları artmaktadır.

Elde edilen bu geri ödeme süreleri 2024 yılı içerisindeki üretim maliyetleri ve enerji birim fiyatları üzerinden hesaplanmıştır. Çift rotorlu rüzgâr türbinleri

hakkında gelecekte yapılması olası üretim yöntemleri ile ilgili gelişmelere ve enerjinin gelecekteki birim fiyatına göre geri ödeme sürelerinde bazı değişiklikler olabileceği unutulmamalıdır.

Sonuç olarak, çift rotorlu sistemler başlangıçta daha yüksek yatırım maliyeti gerektirse de uzun vadede daha fazla enerji üretimi sağlayarak ekonomik açıdan sürdürülebilir bir seçenek sunmaktadır. Elektrik fiyatlarının artması, enerji verimliliğinin artırılması ve devlet destek mekanizmalarının uygulanması gibi faktörler göz önüne alındığında, çift rotorlu rüzgâr türbinleri gelecekte daha fazla tercih edilen bir teknoloji haline gelebilir.

Çalışmanın Teknoloji Hazırlık Seviyesi Bakımından Değerlendirilmesi

Teknoloji Hazırlık Seviyesi (Technology Readiness Level - TRL) kavramı, bir teknolojinin geliştirme sürecindeki ilerleme seviyesini belirlemek için kullanılan sistematik bir ölçektir. İlk olarak NASA tarafından geliştirilen bu ölçek, günümüzde savunma, havacılık, enerji ve mühendislik alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. TRL seviyesi, bir teknolojinin temel fikrinden ticari olarak kullanılabilir bir ürüne dönüşüm sürecini dokuz farklı aşamada değerlendirerek, geliştirme sürecinin hangi aşamada olduğunu belirlemeye yardımcı olur. TRL sistemi 1'den 9'a kadar seviyelendirilmiştir. **TRL 1-3:** Temel araştırma ve kavramsal ispat çalışmaları; **TRL 4-5:** Laboratuvar ölçekli testler ve ilk prototiplerin geliştirilmesi; **TRL 6-7:** Gerçek sistemin laboratuvar veya kontrollü ortamda test edilmesi; **TRL 8-9:** Pilot uygulamalar ve tam ölçekli ticari kullanım için hazırlık aşamasıdır.

Bu kapsamda, çalışmada geliştirilen çift rotorlu rüzgâr türbini, **TRL 7** seviyesine kadar ulaştırılmıştır. Bu seviyede, sistemin laboratuvar ortamında deneysel testleri gerçekleştirilmiş, aerodinamik ve elektriksel performans analizleri yapılmış ve sistemin gerçek dünya koşullarında çalışabilirliği doğrulanmıştır.

Çift rotorlu rüzgâr türbini tasarımında, deneysel testler ve sayısal analizler (CFD) gerçekleştirilmiş, iz etkileri analiz edilmiş ve sistemin aerodinamik performansı değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, sistemin güç üretim kapasitesini ve tork dengesini optimize etmeye yönelik önemli veriler sağlamıştır. Ayrıca, elektriksel performans açısından da sistemin enerji verimliliği analiz edilmiş ve belirlenen yük koşullarında çalışma dinamikleri incelenmiştir. Bu seviyede elde edilen bulgular, türbinin gerçek dış ortam koşullarında test edilmesi

ve ticari ölçekte uygulanabilirliğinin değerdendirilmesi için önemli bir temel oluşturmaktadır.

Sonuç olarak, geliştirilen çift rotorlu rüzgâr türbini, laboratuvar ölçekli testlerle doğrulanmış ve TRL 7 seviyesine ulaşmıştır. Gelecekte yapılacak dış ortam testleri ve saha uygulamaları, teknolojinin TRL 8 ve 9 seviyelerine ulaşmasını sağlayarak, ticari kullanım için gerekli teknik ve ekonomik fizibilitenin tamamlanmasına olanak tanıyacaktır.



4. TARTIŞMA

Bu çalışma kapsamında, doğrudan tahrikli jeneratör ve NREL S822 kanat profiline sahip çift rotorlu bir rüzgâr türbini sisteminin tasarımı, üretimi ve performans analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın tasarım odaklı kısıtı, çift rotorlu bir rüzgâr türbini için dişli mekanizmasına ihtiyaç duymayan bir jeneratör kullanarak mekanik kayıpları minimize etmek ve bakım gereksinimlerini azaltarak daha verimli bir enerji dönüşüm sistemi oluşturmaktır.

Bunun yanı sıra, NREL S822 kanat profili kullanılarak küçük ölçekli rüzgâr türbinleri için optimize edilmiş bir aerodinamik yapı sunulmuş ve bu tasarımın farklı rüzgâr hızlarında enerji dönüşüm kapasitesi detaylı olarak incelenmiştir. Tez çalışmasında, çift rotorlu zıt devinimli rüzgâr türbini sisteminin aerodinamik performansı, enerji verimliliği, mekanik kararlılığı ve ekonomik fizibilitesi kapsamlı deneysel ve sayısal analizler ile detaylı bir şekilde ele alınmıştır.

Bu kapsamda, çift rotorlu rüzgâr türbininin çalışma prensipleri ve performans kriterleri; deneysel performans testleri, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) analizleri, ekserji analizi, istatistiksel değerlendirmeler ve maliyet analizleri ile çok yönlü ve eş zamanlı bir yaklaşımla değerlendirilmiştir.

Deneysel çalışmalar, çift rotorlu sistemin aerodinamik verimliliğini, enerji dönüşüm kapasitesini ve mekanik dayanıklılığını gerçek çalışma koşullarında test ederek, teorik ve sayısal analizlerin doğruluğunu teyit etmiştir. CFD analizleri ile rüzgâr akışının rotorlar üzerindeki etkisi detaylı bir şekilde incelenmiş, hava akışı etkileşimleri, türbülans yapıları ve basınç dağılımları belirlenmiştir. **Ekserji analizi**, sistemdeki enerji kayıplarını ve termodinamik verimliliği değerlendirmek için kullanılmış, böylece toplam sistem performansına yönelik daha kapsamlı çıkarımlar yapılmıştır. **Ekonomik fizibilite çalışmaları**, sistemin yatırım maliyetleri, enerji üretim kapasitesi ve geri ödeme süreleri gibi faktörler doğrultusunda değerlendirilerek, teknolojinin ticari potansiyeli ve uygulanabilirliği konusunda öngörüler sunmuştur.

Elde edilen kritik sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Çift rotorlu rüzgâr türbininin, yük altında ön ve arka rotorların tüm kanat açısı kombinasyonlarında **dönmediği** tespit edilmiştir. Çift rotorlu rüzgâr türbinlerinde, jeneratörden herhangi bir elektrik üretimi gerçekleşmediğinde, ön ve arka rotorlar serbest bir şekilde hareket edebilmekte ve aerodinamik

etkileşimler doğrultusunda birbirine zıt yönlerde dönebildiği gözlemlenmiştir. Ancak bu hareket, **yalnızca** sistemde herhangi bir elektriksel yük olmadığı koşullarda gerçekleşmiştir. Jeneratörden akım çekilmeye başlandığında, elektromanyetik direnç nedeniyle arka rotorun dönüşü yavaşlamış ve belirli yük seviyelerinin üzerinde tamamen durarak ön rotor ile aynı yönde dönmeye başlamıştır.

- Ön kanat açısının azalması ile birlikte ön rotor rüzgârı daha etkin bir şekilde kullanmasından kaynaklı olarak arka rotorun dönme ihtimalleri azalmaktadır. Ön kanat açısının 24° olduğu durumda arka kanat bütün açılarda dönmeyi sağlamıştır. Ön kanat açısının 21° , arka kanat açısının 24° durumda ise çift rotorlu sistemin dönmesi sağlanamamıştır. Bu beklenen bir sonuçtur. Ön rotor kanat açısının 18° olduğunda, arka rotor 18° ve üzerinde işlevsiz hale gelmektedir. Ön kanat açısının $0^\circ, 3^\circ, 6^\circ$ ve 9° olduğu durumlarda ise arka kanat açısı ne olursa olsun dönmesi sağlanamamıştır.
- Tork farklarının %5'in altında olduğu durumlar, sistemin en kararlı çalıştığı durumlar olduğu görülmüştür. Bu koşulları, ön ve arka rotorlar arasında optimum enerji transferi ve iz etkilerinin minimum düzeyde olduğunu göstermektedir. %15'in üzerinde tork farklarının olduğu durumlarda iz etkisinin arka rotor performansını ciddi bir şekilde sınırladığı gözlemlenmiştir. Tork farkının %28.46'yı aşması ile sistemin kararlılığı bozulmuş ve rotorların zıt devinimli olarak dönmesi sağlanamamıştır.
- En yüksek güç çıktısının 12° - 3° konfigürasyonu için elde edildiği görülmüştür. 10 m/s rüzgâr hızında 189.50 W güç çıkışı elde edilmiştir. Bu güç değeri sistem üzerinden elde edilen en büyük güç çıktısı olduğu görülmüştür. Tek rotorlu rüzgâr türbini ile karşılaştırıldığında 12° - 3° kombinasyonuna sahip çift rotorlu rüzgâr türbini %23-%59 arasında daha iyi güç çıktısı elde etmiştir.
- Çift rotorlu sistemlerin toplam torkları daha düşük olmasına rağmen daha yüksek güç üretimi sağlanmıştır. Tek rotorlu rüzgâr türbini en yüksek 10.75 Nm değerine ulaşırken, çift rotorlu rüzgâr türbininde 12° - 3° kombinasyonu için en yüksek tork değeri 10.53 Nm olarak elde edilmiştir. En yüksek tork değerleri arasında %2.08 oranında fark olmasına rağmen güç değerinde %58.56 oranında fark görülmektedir.

- Tek rotorlu rüzgâr türbini ile karşılaştırıldığında 15° - 3° kombinasyonuna sahip çift rotorlu rüzgâr türbini %11-%66 arasında daha iyi güç çıktısı elde etmiştir. En yüksek güç artışı bu konfigürasyonda elde edilmiştir.
- **12° Ön Kanat Açısı:** En yüksek güç çıktısı (189.50 W) 12° - 3° konfigürasyonundan elde edilmiştir. Arka kanat açısının 0° - 6° arasında olması durumunda sistemin performansı optimize edilmektedir.
- **15° Ön Kanat Açısı:** Tek rotorlu sisteme göre en yüksek güç artışı (%66.21) 15° - 3° konfigürasyonundan elde edilmiştir. Arka kanat açısının 0° - 6° arasında olması durumunda sistemin performansı en yüksek seviyeye çıkmaktadır.
- **18° Ön Kanat Açısı:** Ön kanat açısının 18° olduğu durumda en yüksek güç çıktısı arka kanat açısının 6° olması durumunda elde edilmiştir. Tek rotorlu sisteme kıyasla %32.53 oranında bir artış göstermiştir. Arka kanat açısının 0° - 9° arasında tutulması ile optimum sonuçlar sağlanmıştır.
- **21 - 24° Ön Kanat Açısı:** Ön kanat açısının 21° ve 24° olduğu durumlarda en yüksek güç ve tork çıktıları arka kanat açılarının 0° olması durumunda elde edilmiştir. Arka kanat açısının sadece 0° olması durumunda sistemden optimum sonuçlar elde edilmiştir.
- Çalışma sonuçları, rüzgâr hızındaki artışın ekserji yıkımını belirgin şekilde artırdığını göstermektedir. 12° - 3° konfigürasyonunda ekserji yıkımı, 7 m/s hızda 59.77 kJ/kg iken, 10 m/s hızda 178.44 kJ/kg seviyesine ulaşmıştır. Öte yandan, 24° - 0° konfigürasyonu 10 m/s hızda 361.63 kJ/kg ekserji yıkımı ile en yüksek değerlere sahip konfigürasyonlardan biri olarak öne çıkmaktadır. Tek rotorlu sistemde 10 m/s hızda ekserji yıkımı 193.41 kJ/kg iken, çift rotorlu sistemlerde bu değer 300 kJ/kg ve üzeri seviyelere çıkmaktadır. Bu durum, çift rotorlu sistemlerde hava akışı üzerindeki etkileşimlerin daha karmaşık hale gelmesi nedeniyle aerodinamik kayıpların arttığını göstermektedir. Ancak, çift rotorlu sistemler enerji dönüşümünde daha etkin performans sergileyerek avantaj sağlamaktadır. 10 m/s hızda tek rotorlu sistem 153.57 W güç üretirken, çift rotorlu sistemlerde bu değer 189 W seviyelerine ulaşmaktadır. Bu analizler, çift rotorlu sistemlerin hava akışından daha fazla enerji toplayarak aerodinamik verimliliğini artırdığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, çift rotorlu sistemler arasında en yüksek güç üretimine sahip konfigürasyon, aynı zamanda en düşük ekserji yıkımını sağlamaktadır. Bu durum, belirli kanat açılarının hem enerji

üretimini artırdığını hem de ekserji kayıplarını minimize ettiğini göstermektedir. Sonuç olarak, rüzgâr hızındaki artışın ekserji kayıplarını artırdığı görülse de, doğru konfigürasyon seçimi ile bu kayıplar azaltılarak enerji üretim verimliliği artırılabilir. Kanat açısı, ekserji yıkımı ve enerji üretimi açısından kritik bir parametre olarak öne çıkmaktadır.

- Özellikle düşük rüzgâr hızlarında (7-8 m/s) CFD tork ve güç sonuçları deneysel verilerle uyumlu olurken, orta hızlarda (9 m/s) CFD analizleri deneysel verilere göre %5-%10 oranında daha yüksek güç çıktısı öngörmektedir. Yüksek rüzgâr hızlarında (10 m/s) ise fark daha belirgin (%10-%18) hale gelmektedir.
- Ön rotorun açısının artırılması ile arka rotorun enerji üretimine olan katkısı artmış olsa da belirli açılarda iz etkisinin arka rotorun performansını olumsuz etkilediği görülmüştür. Yüksek ön kanat açılarında sahip konfigürasyonlarda arka rotorun güç üretimine katkısı daha yüksek olurken, düşük ön rotor açılarında ön rotorun sistemin genel enerji dönüşümüne daha fazla katkı sağladığı görülmüştür. Rüzgâr hızının artışıyla birlikte güç üretimi genel olarak yükselmekte, ancak her konfigürasyonda aynı oranda artış gözlemlenmemektedir.
- Güç çıktıları açısından CFD ve deneysel veriler karşılaştırıldığında, ön rotor açısının düşük olduğu konfigürasyonlarda deneysel sonuçların CFD ile oldukça yakın olduğu görülmektedir. 12° – 3° konfigürasyonunda 10 m/s rüzgâr hızında deneysel toplam güç 189.50 W iken, CFD analizi 199,12 W hesaplamıştır, yani yaklaşık %5'lik bir fark oluşmuştur. Bu durum, düşük açı değerlerinde iz etkisinin CFD analizlerinde daha doğru modellenbildiğini ve deneysel sistemle büyük ölçüde örtüştüğünü göstermektedir. Özellikle arka rotorun iz etkisine maruz kaldığı konfigürasyonlar (24° – 0° gibi) CFD analizlerinin deneylere kıyasla %5-10 arasında daha yüksek güç tahmini yaptığı belirlenmiştir.
- CFD analizleri deneysel verilere kıyasla özellikle yüksek rüzgâr hızlarında ve büyük açı değerlerinde daha yüksek tork sonucu elde edilmiştir. Özellikle 21° – 0° ($V=10$ m/s) ve 18° – 6° ($V=10$ m/s) konfigürasyonlarında CFD tork değerlerinin deneysel verilere göre yaklaşık %10-15 daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

- Düşük ön rotor açılara sahip konfigürasyonlarda ön rotorun güç üretimine katkısı oldukça yüksektir. Özellikle 12° – 3° ($V=10$ m/s) konfigürasyonunda ön rotorun katkısı %60,11 (119.69 W) ile en yüksek seviyeye ulaşmıştır. Bu durum, düşük açı değerlerinde ön rotorun daha etkin bir şekilde rüzgâr enerjisini dönüştürdüğünü ve iz etkisini minimize ederek daha fazla güç ürettiğini göstermektedir. Aynı konfigürasyonda arka rotorun katkısı ise %39,89 (79.43 W) ile sınırlı kalmıştır.
- Yüksek ön rotor açılara sahip konfigürasyonlarda (21° – 0° ve 24° – 0°) arka rotorun katkısı belirgin şekilde artmaktadır. Özellikle 24° – 0° ($V=9$ m/s) konfigürasyonunda arka rotorun katkı oranı %75,06 (98.36 W) ile maksimum seviyeye ulaşmıştır. Aynı durumda ön rotorun katkısı ise yalnızca %24,94 (32.67 W) seviyesindedir.
- Deneysel ve sayısal güç değerlerindeki farklılıklar incelendiğinde, CFD analizlerinin genel olarak deneysel sonuçlardan %2-12 arasında daha yüksek güç üretimi öngördüğü görülmüştür. Bu farklar, özellikle yüksek rüzgâr hızlarında ve karmaşık akış koşullarında biraz daha belirgin hale gelse de genel olarak düşük seviyelerde kaldığı görülmüştür.
- İz etkileri incelendiğinde, 12° – 3° konfigürasyonunda ön rotor kanatlarından çıkan akışın arka rotora daha düzenli bir şekilde iletildiği görülmektedir. İz etkisi belirgin olsa da akışın simetrik ve kontrollü olduğu görülmüştür. Ön rotorun arkasında oluşan düşük hızlı bölge, arka rotora doğru yayılırken hız kaybı sınırlı düzeydedir. Bu durum, arka rotorun verimli bir şekilde çalışmasına ve sistem genelinde daha dengeli bir performans elde edilmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca ön rotorun iz bölgesindeki hız düşüşüne rağmen akış, arka rotor kanatları tarafından etkin bir şekilde toparlanmaktadır. 24° – 0° konfigürasyonunda ise iz etkisi çok daha belirgin ve düzensizdir. Özellikle ön rotorun arkasında geniş bir düşük hızlı bölge oluşmuş ve bu durum arka rotora ulaşan rüzgâr hızının ciddi ölçüde düşmesine neden olmuştur. Bu durum arka rotorun performansını önemli ölçüde sınırlandırmıştır.
- Akış alanı basınç dağılımları incelendiğinde, 12° – 3° konfigürasyonunda, basınç dağılımı daha dengeli olup, bu durum aerodinamik verimliliği arttırmak ve rotorların yüksek devirlerde çalışmasına olanak tanımaktadır. İz etkisi geniş bir alana yayılmış ancak türbülans seviyeleri kontrollü kalmıştır. 24° – 0°

konfigürasyonunda ise yüksek ön kanat hücum açısı nedeniyle ön rotor üzerinde yoğun basınç gradyanları oluşmuş, bu da akış ayrılması ve aerodinamik verim kayıplarına neden olmuştur. Bu durum ön rotorun düşük devirde çalışmasına neden olurken, arka rotor dar bir iz etkisiyle daha verimli çalışarak yüksek devirlere ulaşmıştır.

- İstatistiksel analizler sonucunda, çift rotorlu rüzgâr türbini sisteminin güç üretimi üzerinde etkili olan faktörler belirlenmiş ve anlamlılık seviyeleri incelenmiştir. ANOVA testleri, ön ve arka kanat açıları, rüzgâr hızı ve yük direnci gibi faktörlerin güç çıktısı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir ($p < 0.05$). Modelin toplam varyansın %78.95'ini açıkladığı ve standart hata değerinin 17.59 W olduğu belirlenmiştir. Direnç (Ohm) faktörü, en büyük etkiye sahip değişken olarak tespit edilmiş olup, güç üretiminde belirleyici bir rol oynamıştır. İkili etkileşimler incelendiğinde, ön ve arka kanat açıları arasındaki etkileşimin güç üretiminde anlamlı olduğu gözlemlenmiştir. Optimizasyon analizleri, en uygun parametre kombinasyonunun ön rotor açısının 12° , arka rotor açısının 3° , rüzgâr hızının 10 m/s ve yük direncinin 141.228 Ohm olduğunu göstermiştir. Artık analizleri, modelin sistematik bir hataya sahip olmadığını ve tahmin edilen değerlerin gözlemlenen değerlerle uyumlu olduğunu göstermiştir. Pareto analizi, yük direncinin en büyük etkiye sahip faktör olduğunu ve kanat açılarının aerodinamik performansı doğrudan etkilediğini ortaya koymuştur.
- Çift rotorlu ve tek rotorlu rüzgâr türbinlerinin maliyet analizi, sistemlerin ekonomik fizibilitesini ve uzun vadeli yatırım getirilerini karşılaştırmak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Çift rotorlu sistemin yatırım maliyeti 167.380 TL, tek rotorlu sistemin maliyeti ise 101.880 TL olarak hesaplanmıştır. Çift rotorlu türbin, tek rotorlu sisteme kıyasla %64 daha yüksek yatırım maliyetine sahip olmasına rağmen, yıllık enerji üretiminde %40 oranında daha fazla güç üretebilme kapasitesine sahiptir. Kapasite faktörünün %35 olduğu bir durum için hesaplamalar yapıldığında, geri ödeme süreleri sırasıyla tek rotorlu sistem için 8.3 yıl, çift rotorlu sistem için 9.75 yıl olarak belirlenmiştir. Çift rotorlu sistemin geri ödeme süresi 1.45 yıl daha uzun olmasına rağmen, uzun vadede daha yüksek gelir sağlaması, artan elektrik fiyatları ve kapasite faktörünün yükselmesiyle birlikte ekonomik avantajının artacağı öngörülmektedir.

Bu çalışma, doğrudan tahrikli jeneratör ve NREL S822 kanat profiline sahip çift rotorlu zıt devinimli rüzgâr türbini sisteminin tasarımını, üretimini ve performans analizini kapsamlı bir şekilde ele almıştır. Deneysel ve sayısal analizler sonucunda, çift rotorlu sistemin tek rotorlu sistemlere kıyasla daha yüksek enerji verimliliği sağladığı, belirli konfigürasyonlarda aerodinamik avantaj sunduğu ve uzun vadede ekonomik olarak uygulanabilir olduğu belirlenmiştir. Optimum kanat açısı kombinasyonlarının sistemin kararlılığı ve enerji üretimi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüş, özellikle 12° - 3° konfigürasyonunun en yüksek güç çıktısını sağladığı tespit edilmiştir. İstatistiksel analizler, ön ve arka kanat açıları ile yük direncinin güç üretiminde belirleyici faktörler olduğunu ortaya koymuş ve sistemin performans optimizasyonu için kritik veriler sunmuştur. CFD ve deneysel analizler arasında güçlü bir korelasyon olduğu gözlemlenmiş, ancak yüksek rüzgâr hızlarında ve büyük açı değerlerinde bazı farkların oluştuğu belirlenmiştir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, doğrudan tahrikli jeneratör ve NREL S822 kanat profiline sahip çift rotorlu bir rüzgâr türbini sisteminin tasarımı, üretimi ve performans analizi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneysel ve sayısal analizler sonucunda, çift rotorlu sistemin aerodinamik performansı, enerji verimliliği ve ekonomik fizibilitesi çok yönlü olarak değerlendirilmiştir.

- Çift rotorlu rüzgâr türbini, belirli kanat açısı kombinasyonlarında tek rotorlu sisteme göre %23-%66 oranında daha yüksek güç çıktısı sağlamış ve optimum aerodinamik performans göstermiştir.
- 12° - 3° konfigürasyonu, 10 m/s rüzgâr hızında 189.50 W ile en yüksek güç çıktısını sağlamış ve aerodinamik olarak en dengeli çalışma şartlarını sunmuştur.
- 15° - 3° konfigürasyonu, tek rotorlu sisteme göre %66'ya varan oranlarda daha yüksek güç çıktısı sağlamış, bu da çift rotorlu sistemlerin potansiyel enerji kazançlarının altını çizmiştir.
- Ekserji analizleri, çift rotorlu sistemlerde enerji dönüşümü sürecinde daha fazla enerji toplandığını ve optimum konfigürasyon seçimi ile ekserji kayıplarının minimize edilebileceğini ortaya koymuştur. 10 m/s rüzgâr hızında 12° - 3° konfigürasyonunda ekserji yıkımı 178.44 kJ/kg olarak hesaplanmış, buna karşın 24° - 0° konfigürasyonunda bu değer 361.63 kJ/kg'a ulaşmıştır.
- CFD analizleri ve deneysel veriler arasındaki farklar düşük rüzgâr hızlarında minimal iken, yüksek rüzgâr hızlarında %10-18 arasında farklılıklar olduğu gözlemlenmiştir.
- CFD analizleri deneysel verilere kıyasla özellikle yüksek rüzgâr hızlarında ve büyük açısı değerlerinde daha yüksek tork sonucu elde edilmiştir.
- Tork farkları %5'in altında olduğu durumlar, sistemin en kararlı çalıştığı senaryolar olarak tespit edilmiştir.
- İstatistiksel analizler, kanat açılarının, rüzgâr hızının ve elektriksel yük faktörlerinin sistem performansı üzerinde anlamlı etkiler yarattığını ortaya koymuştur.
- Maliyet analizleri sonucunda, çift rotorlu sistemin yatırım maliyetinin %64 daha yüksek olmasına rağmen, uzun vadede daha fazla enerji üretmesi nedeniyle ekonomik olarak avantajlı olabileceği belirlenmiştir.

Bu çalışmada elde edilen bulgular, çift rotorlu rüzgâr türbinlerinin geliştirilmesi için önemli veriler sağlasa da sistemin performansını daha da iyileştirmek ve ticari uygulanabilirliğini artırmak adına gelecekte yapılması gereken çalışmalar bulunmaktadır:

- Adaptif Kontrol ve Akıllı Sistemler: Rüzgâr hızı ve yönüne bağlı olarak rotorların dinamik açısal ayarlarının yapılmasını sağlayan adaptif kontrol mekanizmalarının geliştirilmesi ve yapay zekâ tabanlı optimizasyon tekniklerinin uygulanması.
- Malzeme ve Yapısal Dayanıklılık Çalışmaları: Rotorların uzun vadeli dayanıklılığını artırmak için hafif ve yüksek mukavemetli kompozit malzemelerin kullanımı ve yapısal titreşim analizlerinin gerçekleştirilmesi.
- Ekserji ve Termodinamik Verimlilik Artırımı: Farklı kanat profilleri ve türbülans modelleri kullanılarak ekserji kayıplarının azaltılması ve sistemin termodinamik verimliliğinin artırılması üzerine çalışmalar yapılmalıdır.
- Büyük Ölçekli ve Ticari Uygulamalar: Küçük ölçekli bir sistem olarak geliştirilen çift rotorlu türbinin büyük ölçekli rüzgâr santralleri için uygulanabilirliği araştırılmalı ve saha testleri ile gerçek koşullardaki performansı değerlendirilmelidir.
- Ekonomik ve Politika Analizleri: Yenilenebilir enerji teşvikleri, yatırım maliyetleri ve karbon emisyonları açısından çift rotorlu sistemlerin avantajlarının değerlendirilmesi ve politika yapıcılar için önerilerin geliştirilmesi üzerine çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Abohamzeh, E., Jamil, M., & Benim, A. C. (2020). Prediction of aeroacoustic performance of counter-rotating wind turbine by changing the rotational speed of front rotor. *SN Applied Sciences*, 2(1), 1–16. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1864-7>
- Al-Othman, A., Tawalbeh, M., Martis, R., Dhou, S., Orhan, M., Qasim, M., & Ghani Olabi, A. (2022). Artificial intelligence and numerical models in hybrid renewable energy systems with fuel cells: Advances and prospects. *Energy Conversion and Management*, 253, 115154. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2021.115154>
- Alaskari, M., Abdullah, O., & Majeed, M. H. (2019). Analysis of Wind Turbine Using QBlade Software. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 518(3). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/518/3/032020>
- Altmimi, A. I., Aws, A., Jweeg, M. J., Abed, A. M., & Abdullah, O. I. (2022). An Investigation of Design and Simulation of Horizontal Axis Wind Turbine Using QBlade. *Measurement Science Review*, 22(6), 253–260. <https://doi.org/10.2478/msr-2022-0032>
- Amoretti, T., Huet, F., Garambois, P., & Roucoules, L. (2023). Configurable dual rotor wind turbine model based on BEM method: Co-rotating and counter-rotating comparison. *Energy Conversion and Management*, 293(July), 117461. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117461>
- Appa, K. (2002). *Counter rotating wind turbine system*.
- Barthelmie, R. J., Hansen, K., Frandsen, S. T., Rathmann, O., Schepers, J. G., Schlez, W., Phillips, J., Rados, K., Zervos, A., Politis, E. S., & Chaviaropoulos, P. K. (2009). Modelling and measuring flow and wind turbine wakes in large wind farms offshore. *Wind Energy*, 12(5), 431–444. <https://doi.org/10.1002/WE.348>
- Betz, A. (1926). *Wind energy and its utilization through windmills* (Vol.2.). Vandenhoeck & Ruprecht.
- Biber, K. (2019). *Bir Boyutlu Momentum Teorisi ve Betz Limiti Ders Notları* (Vol. 2).
- Bin Abu Sofian, A. D. A., Lim, H. R., Siti Halimatul Munawaroh, H., Ma, Z., Chew, K. W., & Show, P. L. (2024). Machine learning and the renewable energy revolution: Exploring solar and wind energy solutions for a sustainable future including innovations in energy storage. *Sustainable Development*, 32(4), 3953–3978. <https://doi.org/10.1002/SD.2885>
- Bluestein, M., & Zecher, J. (1999). A New Approach to an Accurate Wind Chill Factor. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80(9), 1893–1899. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1999\)080<1893:ANATAA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1999)080<1893:ANATAA>2.0.CO;2)
- Cai, W., Hu, Y., Wang, H., Yao, L., Guo, X., & Liu, J. (2024). Cross-coupling control design of a flexible dual rotor wind turbine with enhanced wind energy capture capacity. *Renewable Energy*, 220(August 2023). <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119629>
- Chen, S., Xie, B., Wu, L., Qiao, Z., Zhu, R., & Xie, C. (2024). Wind turbine gearbox condition monitoring using AI-enabled virtual indicators*. *Measurement Science and Technology*, 35(10), 105005. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/AD5C8E>
- Chen, Y. J., Tsai, Y. F., Huang, C. C., Li, M. H., & Hsiao, F. Bin. (2014). The design and analysis of passive pitch control for horizontal axis wind turbine. *Energy Procedia*, 61, 683–686. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.942>
- Cho, W., Lee, K., Choy, I., & Back, J. (2017). Development and experimental verification of counter-rotating dual rotor/dual generator wind turbine: Generating, yawing and furling. *Renewable Energy*, 114, 644–654. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.06.083>

- Corona, A., Markussen, C., Birkved, M., & Madsen, B. (2015). Comparative Environmental Sustainability Assessment of Bio-Based Fibre Reinforcement Materials for Wind Turbine Blades. *Http://Dx.Doi.Org/10.1260/0309-524X.39.1.53*, 39(1), 53–64. <https://doi.org/10.1260/0309-524X.39.1.53>
- da Silva Lima, L., Quartier, M., Buchmayr, A., Sanjuan-Delmás, D., Laget, H., Corbisier, D., Mertens, J., & Dewulf, J. (2021). Life cycle assessment of lithium-ion batteries and vanadium redox flow batteries-based renewable energy storage systems. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 46, 101286. <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2021.101286>
- David C. Wilcox. (2006). *Turbulence modeling for CFD* (3rd Ed). DCW Industries, La Cañada, Calif.
- Deghoum, K., Gherbi, M. T., Sultan, H. S., Jameel Al-Tamimi, A. N., Abed, A. M., Abdullah, O. I., Mechakra, H., & Boukhari, A. (2023). Optimization of Small Horizontal Axis Wind Turbines Based on Aerodynamic, Steady-State, and Dynamic Analyses. *Applied System Innovation*, 6(2), 1–19. <https://doi.org/10.3390/asi6020033>
- DURSUN, E. H. (2020). *RÜZGAR ENERJİSİ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİNİN MPPT KONTROLÜ İLE ENERJİ VERİMLİLİĞİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ* (Issue Ağustos). KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ.
- EPİAŞ. (2024). *ELEKTRİK PİYASALARI AYLIK RAPORU*.
- Equinor. (2024). *Floating wind*. <https://www.equinor.com/energy/floating-wind>
- Erturk, E., Sivrioglu, S., & Bolat, F. C. (2018). Analysis model of a small scale counter-rotating dual rotor wind turbine with double rotational generator armature. *International Journal of Renewable Energy Research*, 8(4), 1849–1858. <https://doi.org/10.20508/ijrer.v8i4.8235.g7549>
- GWEC. (2024). Global Wind Report 2024| GWEC. In Gwec. www.gwec.net
- Habash, R. W. Y., Groza, V., Yang, Y., Blouin, C., & Guillemette, P. (2011). Performance of a Contrarotating Small Wind Energy Converter. *ISRN Mechanical Engineering*, 2011, 1–10. <https://doi.org/10.5402/2011/828739>
- Hansen, M. O. L. (2015). *Aerodynamics of Wind Turbines*. Taylor & Francis.
- Hao, W., & Li, C. (2020). Performance improvement of adaptive flap on flow separation control and its effect on VAWT. *Energy*, 213, 118809. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118809>
- Hart, J. (2016). Comparison of Turbulence Modeling Approaches to the Simulation of a Dimpled Sphere. *Procedia Engineering*, 147(0), 68–73. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.191>
- Hesami, A., Nikseresht, A. H., & Mohamed, M. H. (2022). Feasibility study of twin-rotor Savonius wind turbine incorporated with a wind-lens. *Ocean Engineering*, 247(January), 110654. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.110654>
- Hetyei, C., & Szlivka, F. (2021). Counter-rotating dual rotor wind turbine layout optimisation. *Acta Polytechnica*, 61(2), 342–349. <https://doi.org/10.14311/AP.2021.61.0342>
- Hollands, E. O., He, C., & Gan, L. (2020). A particle image velocimetry study of dual-rotor counter-rotating wind turbine near wake. *Journal of Visualization*, 23(3), 425–435. <https://doi.org/10.1007/s12650-020-00643-0>
- Houghton, E. L., Carpenter, P. W., Collicott, S. H., & Valentine, D. T. (2012). Aerodynamics for Engineering Students: Sixth Edition. In *Aerodynamics for Engineering Students: Sixth Edition*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-63882-4>
- Huang, B., & Kanemoto, T. (2015). Performance and internal flow of a counter-rotating type tidal stream turbine. *Journal of Thermal Science*, 24(5), 410–416. <https://doi.org/10.1007/s11630-015-0803-1>

- IEA. (2023). *Renewables 2023*. www.iea.org
- Institute, E. T. (2008). *Deep Water*. <https://www.eti.co.uk/programmes/offshore-wind/deep-water>
- International Energy Agency. (2021). *Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector*.
- IRENA. (2019). Global energy transformation: A roadmap to 2050. In *International Renewable Energy Agency*.
- Jiang, P., Liu, Z., Niu, X., & Zhang, L. (2021). A combined forecasting system based on statistical method, artificial neural networks, and deep learning methods for short-term wind speed forecasting. *Energy*, 217, 119361. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2020.119361>
- Jung, S. N., No, T. S., & Ryu, K. W. (2005). Aerodynamic performance prediction of a 30 kW counter-rotating wind turbine system. *Renewable Energy*, 30(5), 631–644. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.07.005>
- Kanemoto, T., & Galal, A. M. (2006). Development of intelligent wind turbine generator with tandem wind rotors and double rotational armatures: (1st report, superior operation of tandem wind rotors). *JSME International Journal, Series B: Fluids and Thermal Engineering*, 49(2), 450–457. <https://doi.org/10.1299/jsmeb.49.450>
- Kanemoto, T., Tanaka, D., Kashiwabara, T., Uno, M., & Nemoto, M. (2000, May 28). Counter-Rotating Type Machine Suitable For Tidal Current Power Generation. *He Tenth International Offshore and Polar Engineering Conference*. <https://onepetro.org/ISOPEIOPEC/proceedings-abstract/ISOPE00/All-ISOPE00/6754>
- Kaya, F., & Karagöz, İ. (2007). Investigation into the Suitability of Turbulence Models in Swirling Flows. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 1951, 85–96.
- Khare, V., Nema, S., & Baredar, P. (2016). Solar–wind hybrid renewable energy system: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 23–33. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.12.223>
- Kline, S. J., & McClintock, F. A. (1953). Describing uncertainties in single-sample experiments. *Mechanical Engineering*, 3–8.
- Koehuan, V. A., Sugiyono, & Kamal, S. (2017). Investigation of counter-rotating wind turbine performance using computational fluid dynamics simulation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 267(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/267/1/012034>
- Kubo, K., & Kanemoto, T. (2008). Development of Intelligent Wind Turbine Unit with Tandem Wind Rotors and Double Rotational Armatures (2nd Report, Characteristics of tandem wind rotors). *Journal of Fluid Science and Technology*, 3(3), 370–378. <https://doi.org/10.1299/jfst.3.370>
- Kubo, K., Mihara, N., Enishi, A., & Kanemoto, T. (2010). Acoustic noise from tandem wind rotors of Intelligent Wind Power Unit. *Journal of Thermal Science*, 19(2), 120–125. <https://doi.org/10.1007/s11630-010-0120-7>
- Kumar, A., Maithani, R., & Suri, A. R. S. (2017). Numerical and experimental investigation of enhancement of heat transfer in dimpled rib heat exchanger tube. *Heat and Mass Transfer*, 53, 3501–3516. <https://doi.org/10.1007/s00231-017-2080-x>
- Kutt, F., Blecharz, K., & Karkosinski, D. (2020). Axial-flux permanent-magnet dual-rotor generator for a counter-rotating wind turbine. *Energies*, 13(11), 1–15. <https://doi.org/10.3390/en13112833>
- Le, D. H., Nguyen, T. B., & Ngo, V. M. (2023). Experimental Performance of a Novel Dual–Stage Counter–Rotating Small Wind Turbine and Forming a Validatable CFD Computational Model. *Energies*, 16(14). <https://doi.org/10.3390/en16145510>

- Lee, N. J., Kim, I. C., Kim, C. G., Hyun, B. S., & Lee, Y. H. (2015). Performance study on a counter-rotating tidal current turbine by CFD and model experimentation. *Renewable Energy*, 79(1), 122–126. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.022>
- Lee, S., Kim, H., Son, E., & Lee, S. (2012). Effects of design parameters on aerodynamic performance of a counter-rotating wind turbine. *Renewable Energy*, 42, 140–144. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.08.046>
- Lee, S., Son, E., & Lee, S. (2013). Velocity interference in the rear rotor of a counter-rotating wind turbine. *Renewable Energy*, 54, 235–240. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.08.003>
- Lipian, M., Dobrev, I., Karczewski, M., Massouh, F., & Jozwik, K. (2019). Small wind turbine augmentation: Experimental investigations of shrouded- and twin-rotor wind turbine systems. *Energy*, 186, 115855. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.115855>
- Liu, P., Odo, F., Murakami, T., & Kanemoto, T. (2019). Acoustic noise measurement in counter-rotating propellers. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 33(7), 3187–3192. <https://doi.org/10.1007/s12206-019-0613-6>
- Luo, Z., Wang, X., Wen, H., & Pei, A. (2022). Hydrogen production from offshore wind power in South China. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(58), 24558–24568. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2022.03.162>
- Mahmuddin, F. (2017). Rotor Blade Performance Analysis with Blade Element Momentum Theory. *Energy Procedia*, 105, 1123–1129. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.477>
- Menter, F. R. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, 32(8). <https://doi.org/https://doi.org/10.2514/3.12149>
- Mituleț, L. A., Oprina, G., Chihaia, R. A., Nicolaie, S., Nedelcu, A., & Popescu, M. (2015). Wind tunnel testing for a new experimental model of counter-rotating wind turbine. *Procedia Engineering*, 100(January), 1141–1149. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.477>
- Moghadassian, B., Rosenberg, A., & Sharma, A. (2016). Numerical Investigation of Aerodynamic Performance and Loads of a Novel Dual Rotor Wind Turbine. *Energies*, 9(7). <https://doi.org/10.3390/en9070571>
- Newman, B. G. (1986). Multiple actuator-disc theory for wind turbines. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 24(3), 215–225. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(86\)90023-1](https://doi.org/10.1016/0167-6105(86)90023-1)
- No, T. S., Kim, J. E., Moon, J. H., & Kim, S. J. (2009). Modeling, control, and simulation of dual rotor wind turbine generator system. *Renewable Energy*, 34(10), 2124–2132. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.01.019>
- Olatomiwa, L., Mekhilef, S., Ismail, M. S., & Moghavvemi, M. (2016). Energy management strategies in hybrid renewable energy systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 821–835. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.05.040>
- Ozbek, K., Gelis, K., & Ozyurt, O. (2024). Investigation and Simulation of Horizontal Axis Wind Turbine Blade Optimization Methods. *7 Th International Conference on Advances in Natural and Applied Sciences*.
- Pacholczyk, M., & Karkosinski, D. (2020). Parametric Study on a Performance of a Small Counter-Rotating Wind Turbine. *Energies*, 13(15). <https://doi.org/10.3390/en13153880>
- Pope, K., Dincer, I., & Naterer, G. F. (2010). Energy and exergy efficiency comparison of horizontal and vertical axis wind turbines. *Renewable Energy*, 35(9), 2102–2113. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.02.013>
- Rehman, S., Al-Hadhrani, L. M., & Alam, M. M. (2015). Pumped hydro energy storage system: A technological review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 586–598.

<https://doi.org/10.1016/J.RSER.2014.12.040>

- Ren, Y., Yao, X., Liu, D., Qiao, R., Zhang, L., Zhang, K., Jin, K., Li, H., Ran, Y., & Li, F. (2022). Optimal design of hydro-wind-PV multi-energy complementary systems considering smooth power output. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 50, 101832. <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2021.101832>
- Rocha, P. A. C., Rocha, H. H. B., Carneiro, F. O. M., Vieira da Silva, M. E., & Bueno, A. V. (2014). K- ω SST (shear stress transport) turbulence model calibration: A case study on a small scale horizontal axis wind turbine. *Energy*, 65, 412–418. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.11.050>
- Romanski, L., Bieniek, J., Komarnicki, P., Debowski, M., & Detyna, J. (2016). Operational tests of a dual-rotor mini wind turbine. *Maintenance and Reliability*, 18(2), 201–209. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.17531/ein.2016.2.7>
- Rosenberg, A., Selvaraj, S., & Sharma, A. (2014). A novel dual-rotor turbine for increased wind energy capture. *Journal of Physics: Conference Series*, 524(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/524/1/012078>
- Sakarvadia, M., Haugeseth, A., & Chakravorty, A. (2024). *Optimizing Offshore Wind Turbine Reliability and Costs Through Predictive Maintenance and SCADA Data Analysis*. 113–126. https://doi.org/10.1007/978-981-99-9836-4_10
- Schmitz, G. (1955). Theory and design of windwheels with an optimum performance. *Zeitschrift Der Universität Rostock*, 56.
- Şenkal, A., Çetin, N. S., & Edaş, G. (2009). Türkiye’de Kurulu Olan Büyük Güçlü Rüzgar Santrallerinin Kapasite Faktörlerine Genel Bir Bakış. *Ege Bölgesi Enerji Forumu*, 40–45.
- Sharma, S., & Bartaria, V. N. (2015). Airfoil Terminology, Its Theory and Variations as well as Relations with its Operational Lift Force and Drag Force in Ambient Conditions. *International Journal of Recent Research in Civil and Mechanical Engineering (IJRRCME)*, 2(1), 268–277. www.paperpublications.org
- Shen, W. Z., Zakkam, V. A. K., Sørensen, J. N., & Appa, K. (2007). Analysis of counter-rotating wind turbines. *Journal of Physics: Conference Series*, 75(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/75/1/012003>
- Siemens Gamesa. (2024). *RecyclableBlade*. <https://www.siemensgamesa.com/global/en/home/explore/journal/recyclable-blade.html>
- Sundararaju, H., Lo, K. H., Metcalfe, R., & Wang, S. S. (2017). Aerodynamics and CFD analysis of equal size dual-rotor wind turbine. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 9(4). <https://doi.org/10.1063/1.4999500>
- Szlivka, F., Heteyi, C., Fekete, G., & Molnár, I. (2023). Comparison of Mixing Plane, Frozen Rotor, and Sliding Mesh Methods on a Counter-Rotating Dual-Rotor Wind Turbine. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(15). <https://doi.org/10.3390/app13158982>
- Ullah, W., Khan, F., Akuru, U. B., Khan, B., & Khalil, S. A. (2023). Evaluation of Counter-Rotating Dual-Rotor Permanent-Magnet Flux-Switching Machine with Series and Parallel Stator Teeth. *Machines*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/machines11110989>
- Ullah, W., Selema, A., & Khan, F. (2024). Design and comparative analysis of dual rotor wound field excited flux switching generator for household DC microgrid system with rooftop wind turbine. *Applied Energy*, 357(February 2023), 122464. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122464>
- Ushiyama, I., Shimota, T., & Miura, Y. (1996). An experimental study of the two-staged wind turbines. *Renewable Energy*, 9(1–4), 909–912. [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(96\)88427-8](https://doi.org/10.1016/0960-1481(96)88427-8)

- Usui, Y., Kanemoto, T., & Hiraki, K. (2013). Counter-rotating type tidal stream power unit boarded on pillar (performances and flow conditions of tandem propellers). *Journal of Thermal Science*, 22(6), 580–585. <https://doi.org/10.1007/s11630-013-0665-3>
- Vasel-Be-Hagh, A., & Archer, C. L. (2017). Wind farms with counter-rotating wind turbines. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 24, 19–30. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2016.10.004>
- Venkataramani, G., Parankusam, P., Ramalingam, V., & Wang, J. (2016). A review on compressed air energy storage – A pathway for smart grid and polygeneration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 895–907. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.05.002>
- Volikas, A., & Nikas, K. S. (2019). Turbulence modeling investigation of airfoil designed for wind turbine applications. *AIP Conference Proceedings*, 2123(May). <https://doi.org/10.1063/1.5116994>
- Wang, K., Liu, T., Wan, Y., Ong, M. C., & Wu, T. (2022). Numerical Investigation on Aerodynamic Characteristics of Dual-Rotor Wind Turbines. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/jmse10121887>
- Wang, Z., Ozbay, A., Tian, W., & Hu, H. (2018). An experimental study on the aerodynamic performances and wake characteristics of an innovative dual-rotor wind turbine. *Energy*, 147, 94–109. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.01.020>
- Wei, X., Huang, B., Kanemoto, T., & Wang, L. (2017). Near wake study of counter-rotating horizontal axis tidal turbines based on PIV measurements in a wind tunnel. *Journal of Marine Science and Technology (Japan)*, 22(1), 11–24. <https://doi.org/10.1007/s00773-016-0389-7>
- Wei, X., Huang, B., Liu, P., Kanemoto, T., & Wang, L. (2015). Experimental investigation into the effects of blade pitch angle and axial distance on the performance of a counter-rotating tidal turbine. *Ocean Engineering*, 110, 78–88. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.10.010>
- Wu, B., Zhan, M., Wu, R., & Zhang, X. (2023). The investigation of a coaxial twin-counter-rotating turbine with variable-pitch adaptive blades. *Energy*, 267(May 2022), 126546. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126546>
- Yaramasu, V., Wu, B., Sen, P. C., Kouro, S., & Narimani, M. (2015). High-power wind energy conversion systems: State-of-the-art and emerging technologies. *Proceedings of the IEEE*, 103(5), 740–788. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2014.2378692>
- Yu, H., & Thé, J. (2016). Validation and optimization of SST k- ω turbulence model for pollutant dispersion within a building array. *Atmospheric Environment*, 145, 225–238. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.09.043>
- Zhao, X., Zhou, P., Liang, X., & Gao, S. (2020). The aerodynamic coupling design and wind tunnel test of contra-rotating wind turbines. *Renewable Energy*, 146, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.118>