

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



RÜZGAR ETKİSİYLE AÇILIP KAPANABİLEN KANATÇIKLI
DÜŞEY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİNİ TASARIMI VE
VERİMİNİN BELİRLENMESİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ YÜKSEK LİSANS TEZİ

BURAK ÇETİNKAYA

TEZ DANIŞMANI

Prof. Dr. Hasan Yumak

BOLU, MART 2025

KABUL VE ONAY SAYFASI

Burak ÇETİNKAYA tarafından hazırlanan “**RÜZGAR ETKİSİYLE AÇILIP KAPANABİLEN KANATÇIKLI DÜŞEY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİNİ TASARIMI VE VERİMİNİN BELİRLENMESİ**” adlı tez çalışması jürimiz tarafından Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı Makine Mühendisliği Programında Yüksek Lisans Tezi olarak oy birliği ile kabul edilmiştir. 25/03/2025

Jüri Üyeleri

Danışman
Prof. Dr. Hasan YUMAK
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

Üye
Doç. Dr. Fevzi Çakmak BOLAT
Kocaeli Üniversitesi

Üye
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Fatih KAHRAMAN
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

İmza

.....

.....

.....

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.

BURAK ÇETİNKAYA

ÖZET

**RÜZGAR ETKİSİYLE AÇILIP KAPANABİLEN KANATÇIKLI DÜŞEY
EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİNİ TASARIMI VE VERİMİNİN
BELİRLENMESİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
BURAK ÇETİNKAYA
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. HASAN YUMAK)**

BOLU, MART - 2025

XIII + 57

Dünya üzerinde artan enerji ihtiyacı, çevresel faktörlerden dolayı ülkelerin imzaladığı protokoller, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan yönelimi artırmıştır. IRENA kuruluşunun 2024 yılı raporundaki verilerde bunu kanıtlar niteliktedir. Özellikle rüzgâr enerjisinin denizde ve karada kullanımı için geliştirilen projeler sayesinde; rüzgârın enerji kaynağı olarak kullanımında ciddi artış sağlanmıştır. Rüzgârdan gelen enerjiyi daha fazla kullanabilmek için geniş arazilerde rüzgâr santralleri şeklinde uygulamalar yanında şehir içinde de rüzgâr türbini uygulamaları olmalıdır. Bunun için kurulabilecek dikey eksenli ve küçük ölçekli rüzgâr türbinlerinin yaygınlaşması rüzgârdan daha fazla faydalanılmasını sağlayacaktır. Bu bağlamda geliştirdiğimiz açılıp kapanabilen kanatçıklı düşey eksenli rüzgâr türbini, 3 kanatlı, kanatlar üzerinde tek yönlü açılabilir kanatçıklara sahip olup; mevcut düşey eksenli rüzgâr türbinlerine göre daha yüksek verimle çalışabilecek yapısal özelliklere sahiptir. 3 farklı rüzgâr hızında deneysel çalışmaların yapıldığı türbin üzerinde, her rüzgâr hızında üretilen tork miktarı hesaplanmıştır. Elde edilen veriler teorik hesaplamalar sonucu ortaya çıkarılan değerler ile karşılaştırılmış ve türbin verimi ortaya konulmuştur. Sonuçlar değerlendirildiğinde; mevcut imkânlar dâhilinde imalatı ve deneysel çalışmaları yapılan türbin için verim 4,2 m/s rüzgâr hızında % 15 dolayında bulunmuştur. Yüksek rüzgâr hızlarına çıkılması durumunda verimin düştüğü tespit edilmiştir. Simülasyon analizlerine göre türbin veriminin %23 - % 29 dolayına çıkabileceği tespit edilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Rüzgâr enerjisi, Düşey eksenli rüzgâr türbini, Açılıp/kapanabilen kanatçık, Verim

ABSTRACT

**DESIGN AND DETERMINATION OF EFFICIENCY OF VERTICAL
AXIS WIND TURBINE WITH SHUTTERS
CAPABLE OPEN AND CLOSE UNDER THE EFFECT OF WIND
MASTER THESIS
BURAK ÇETİNKAYA
BOLU ABANT İZZET BAYSAL UNIVERSITY
INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
(SUPERVISOR: PROF.DR. HASAN YUMAK)**

BOLU, MARCH 2025

XIII + 57

The increasing energy demand in the world and the protocols signed by countries due to environmental factors have increased the tendency towards renewable energy sources. The data in the 2024 report of IRENA proves this. Thanks to the projects developed especially for the use of wind energy at sea and on land; a significant increase has been achieved in the use of wind as an energy source. In order to use the energy coming from the wind more, there should be wind turbine applications in cities as well as wind power plants in large areas. For this purpose, the widespread use of vertical axis and small-scale wind turbines will provide greater utilization of wind. In this context, the vertical axis wind turbine with opening and closing blades (shutters wing) that we have developed has 3 blades, unidirectional opening blades on the blades; It has structural features that can operate with higher efficiency compared to existing vertical axis wind turbines. The amount of torque produced at each wind speed was calculated on the turbine where experimental studies were carried out at 3 different wind speeds. The obtained data were compared with the values obtained as a result of theoretical calculations and the turbine efficiency was revealed. When the results were evaluated; the efficiency for the turbine, which was manufactured and experimentally studied within the available possibilities, was found to be around 15% at a wind speed of 4.2 m/s. It was determined that the efficiency decreased in case of high wind speeds. According to the simulation analysis, it was determined that the turbine efficiency can increase to 23% - 29%.

KEYWORDS: Wind energy, Vertical axis wind turbine, Shutters wing, Efficiency.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
FOTOĞRAF LİSTESİ	xi
KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ	xii
Semboller	xii
Kısaltmalar	xii
TEŞEKKÜR	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Enerji.....	2
1.2 Enerji Kaynakları.....	2
1.2.1 Yenilenemez Enerji Kaynakları	3
1.2.2 Yenilenebilir Enerji Kaynakları	3
1.3 Dünyada ve Türkiye’de Enerji Kaynaklarının Kullanımı	4
1.4 Rüzgâr.....	5
1.4.1 Türkiye’nin Rüzgâr Haritası	6
1.5 Rüzgâr Enerjisi	13
1.6 Rüzgâr Türbinleri.....	14
1.7 Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinleri	16
1.7.1 Tek Kanatlı Rüzgâr Türbini.....	17
1.7.2 Çift Kanatlı Rüzgâr Türbini.....	17
1.7.1 Üç Kanatlı Rüzgâr Türbini	18
1.7.2 Çok Kanatlı Rüzgâr Türbini	18
1.8 Düşey Eksenli Rüzgâr Türbinleri	19
1.8.1 Savonius Rüzgâr Türbini	19
1.8.2 Darrieus Rüzgâr Türbini	20
1.8.3 Savonius – Darrieus Kombine Rüzgâr Türbini	20
1.8.4 Düşey Eksenli Rüzgâr Türbinlerinin Avantaj ve Dezavantajları	21
1.9 Literatür Özeti.....	22
2. MATERYAL VE YÖNTEM	26
2.1 Tasarım Aşaması	26
2.2 Açılıp/Kapanabilen Kanatçıklı Düşey Eksenli Rüzgâr Türbini İmalat Aşaması	28

2.3 Deneyisel Çalışmalarda Kullanılan Fan ve Ortalama Hız Değerlerinin Belirlenmesi.....	30
2.4 Kuvvet Ölçme Yöntemi.....	32
2.5 Teorik Güç(P_t) Hesaplama Yöntemi.....	32
2.6 Mekanik Güç (P_m) Hesaplama Yöntemi.....	33
2.7 Verim Hesaplama Yöntemi	34
2.8 Belirli Açılarla Sabitlenmiş Kanatlar İçin Kanatçık Açılma Açılarının Hesaplanması.....	34
2.9 Türbin Akış Simülasyon Analizi	36
3. BULGULAR	37
3.1 Türbin Projeksiyon Alanındaki Hava Hızı Ölçüm Sonuçları.....	37
3.2 Türbin Projeksiyon Alanından Elde Edilebilecek Teorik Güç Değerleri..	38
3.3 Farklı Rüzgâr Hızlarındaki Deneyisel Çalışma Sonuçlarına Göre Hesaplanan Tork ve Verim Değerleri	39
3.4 Akış Simülasyon Analizi Sonucunda Elde Edilen Güç Değerleri ve Verim Sonuçları.....	41
3.5 Kanat Dönme Açısına ve Kanatçık Açılma Açılarına Bağlı Tork Değişiminin Hesaplanması.....	44
3.5.1 Belirli Açılarla Sabitlenmiş Kanatlar İçin Kanatçık Açılma Açıları..	45
3.5.2 Kanat Dönme Açısına Bağlı Kanat Aktif Alan Hesabı	48
3.5.3 Kanat Dönme Açısına Bağlı Tork Değişim Hesabı ve Grafiği	49
3.5.4 Kanat Dönme Açısına ve Kanatçık Açılma Açılarına Bağlı Hesaplanan Güç Değerleri ile Teorik Güç Değerlerinin Karşılaştırması.....	52
3.6 Simülasyon ile Bulunan, Hesaplanan ve Deneyisel Olarak Ölçülen Verim Değerlerinin Karşılaştırması.....	52
4. TARTIŞMA	53
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	55
KAYNAKLAR	56

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1. Yenilenebilir Enerji Kaynakları.....	4
Şekil 1.2. Dünya Rüzgâr Hızı Haritası	6
Şekil 1.3. Marmara Bölgesi Yıllık Ortalama Rüzgâr Hızı Dağılımı Haritası.....	6
Şekil 1.4.Marmara Bölgesi Yıllık Ortalama Rüzgâr Güç Yoğunluğu Dağılımı Haritası	7
Şekil 1.5. Ege Bölgesi Yıllık Ortalama Rüzgâr Hızı Dağılımı Haritası	7
Şekil 1.6. Ege Bölgesi Yıllık Ortalama Rüzgâr Güç Yoğunluğu Dağılımı Haritası	8
Şekil 1.7. Akdeniz Bölgesi Yıllık Ortalama Rüzgâr Hızı Dağılımı Haritası	8
Şekil 1.8.Akdeniz Bölgesi Yıllık Ortalama Rüzgâr Güç Yoğunluğu Dağılımı Haritası	9
Şekil 1.9. Güneydoğu Anadolu Bölgesi Yıllık Ortalama Rüzgâr Hızı Dağılımı Haritası	9
Şekil 1.10.Güneydoğu Anadolu Bölgesi Yıllık Ortalama Rüzgâr Güç Yoğunluğu Dağılımı Haritası	10
Şekil 1.11.Doğu Anadolu Bölgesi Yıllık Ortalama Rüzgâr Hızı Dağılımı Haritası	10
Şekil 1.12.Doğu Anadolu Bölgesi Yıllık Ortalama Rüzgâr Güç Yoğunluğu Dağılımı Haritası	11
Şekil 1.13.Karadeniz Bölgesi Yıllık Ortalama Rüzgâr Hızı Dağılımı Haritası	11
Şekil 1.14.Karadeniz Bölgesi Yıllık Ortalama Rüzgâr Güç Yoğunluğu Dağılımı Haritası	12
Şekil 1.15.İç Anadolu Bölgesi Yıllık Ortalama Rüzgâr Hızı Dağılımı Haritası ...	12
Şekil 1.16.İç Anadolu Bölgesi Yıllık Ortalama Rüzgâr Güç Yoğunluğu Dağılımı Haritası	13
Şekil 1.17. Charles F. Brush Tarafından 1888 Yılında Yapılan Rüzgâr Türbini...	14
Şekil 1.18.Paul La Cour Tarafından 1897 Yılında Geliştirilen 2 Adet Rüzgâr Türbini.....	15
Şekil 1.19. Rüzgâr Türbinlerinin Sınıflandırılması.....	16
Şekil 1.20. Düşey Eksenli Rüzgâr Türbin Çeşitleri	19
Şekil 1.21. Savonius-Darrieus Kombine Rüzgâr Türbin Yapısı.....	21
Şekil 2.1. Açılıp Kapanabilen Kanatçıklı Düşey Eksenli Rüzgâr Türbin Tasarımı.....	26
Şekil 2.2. Türbin Taşıyıcı ve Yatak Bölümü Çizim ve Ölçülendirmesi	28
Şekil 2.3. Hareketli Mekanizmaların Teknik Çizim ve Ölçülendirmesi.....	29
Şekil 2.4. Kanat Pencerelerinin Açılma Uzunluk Hesabı	35
Şekil 2.5. Akış Simülasyonu İçin Tasarımı Gerçekleştirilen Açılıp Kapanabilen Kanatçıklı Rüzgâr Türbini	36
Şekil 3.1. Üç Farklı Frekans Değeri İçin Akış Alanı İçerisinde Ölçülen Hızlar ve Elde Edilen Ortalama Hız Değerleri	37
Şekil 3.2. Rüzgâr Hızı-Kuvvet Grafiği	38
Şekil 3.3. Rüzgâr Hızı-Verim Grafiği.....	40
Şekil 3.4. 8.23m/s Rüzgâr Hızı İçin Hava Akış Yörüngeleri.....	41
Şekil 3.5. 4.2 m/s Rüzgâr Hızı Girdisi İle Elde Edilen Analiz Değerleri	42

Şekil 3.6. 5.85 m/s Rüzgâr Hızı Girdisi İle Elde Edilen Analiz Değerleri	42
Şekil 3.7. 8.23 m/s Rüzgâr Hızı Girdisi İle Elde Edilen Analiz Değerleri	42
Şekil 3.8. Kanat Dönme Açısına Göre Kanat Projeksiyon Alanının ve Moment Kolunun Değişimi.	44
Şekil 3.9. 4,2m/s Rüzgâr Hızında Kanat Dönme Açısına ve Kanatçık Açılma Açılarına Bağlı Tork Değişimi.....	50
Şekil 3.10. 5,85m/s Rüzgâr Hızında Kanat Dönme Açısına ve Kanatçık Açılma Açılarına Bağlı Tork Değişimi.....	50
Şekil 3.11. 8,23m/s Rüzgâr Hızında Kanat Dönme Açısına ve Kanatçık Açılma Açılarına Bağlı Tork Değişimi.....	51



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1. Marmara Bölgesi İçin Elde Edilen Hız ve Güç Değerleri.....	7
Tablo 1.2. Ege Bölgesi İçin Elde Edilen Hız ve Güç Değerleri	8
Tablo 1.3. Akdeniz Bölgesi İçin Elde Edilen Hız ve Güç Değerleri.....	9
Tablo 1.4. Güneydoğu Anadolu Bölgesi İçin Elde Edilen Hız ve Güç Değerleri	10
Tablo 1.5. Doğu Anadolu Bölgesi İçin Elde Edilen Hız ve Güç Değerleri.....	11
Tablo 1.6. Karadeniz Bölgesi İçin Elde Edilen Hız ve Güç Değerleri.....	12
Tablo 1.7. İç Anadolu Bölgesi İçin Elde Edilen Hız ve Güç Değerleri	13
Tablo 3.1 Üç Farklı Rüzgâr Hızında Ölçülen Ortalama ve Maksimum Kuvvet Değerleri.....	38
Tablo 3.2. Deneylede Kullanılan Rüzgâr Hızlarında Hesaplanan Teorik Güç (P_t)Değerleri.....	39
Tablo 3.3. Rüzgâr Etkisiyle Açılıp Kapanabilen Kanatçıklı Rüzgar Türbini ile Farklı Hava Hızlarında Ölçülen Çalışma Karakteristikleri ve Türbin Verimi.....	39
Tablo 3.4. Açılıp Kapanabilen Kanatçıklı Rüzgâr Türbininin Farklı Projeksiyon Alanlarına Göre Türbin Verim Değerlerinin Karşılaştırılması	40
Tablo 3.5. Simülasyon Sonucunda Elde Edilen Güç Değerleri.....	43
Tablo 3.6. Simülasyon Sonucunda Elde Edilen Güç Değerleri ile Teorik Güç Değerlerinin Karşılaştırması ve Türbin Verimi	43
Tablo 3.7. Belirli Açılarda Sabitlenmiş Kanat için Farklı Rüzgâr Hızlarında Ölçülen Kanatçık Açılma Mesafeleri.....	46
Tablo 3.8. 4,20 m/s Rüzgâr Hızı İçin Hesaplanan β Açı Değerleri.....	47
Tablo 3.9. 5,85 m/s Rüzgâr Hızı İçin Hesaplanan β Açı Değerleri.....	47
Tablo 3.10. 8,23 m/s Rüzgâr Hızı İçin Hesaplanan β Açı Değerleri.....	48
Tablo 3.11. α Kanat Açı Değerleri ve β Kanatçık Açılma Açısı Değerlerine Göre Hesaplanan A_x Alanları.....	49
Tablo 3.12. Üç Farklı Hız Değerinde ve α Kanat Açı Değerlerine Göre Bir Kanat İçin Hesaplanan Tork Değerleri.....	49
Tablo 3.13. Elde Edilebilecek Net Tork Değerleri.....	51
Tablo 3.14. Net Tork Miktarlarına ve Farklı Rüzgâr Hızlarına Göre Hesaplanan Güç Değerleri	51
Tablo 3.15. Farklı Rüzgâr Hızları İçin Elde Edilebilecek Güç Değerleri ile Teorik Güç Değerlerinin Karşılaştırması ve Türbin Verimi	52
Tablo 3.16. Simülasyon ile Bulunan, Hesaplanan ve Deneysel Olarak Ölçülen Verim Değerleri.....	52

FOTOĞRAF LİSTESİ

Sayfa

Fotoğraf 2.1. Rüzgâr Etkisiyle Açılıp Kapanabilen Kanatçıklı Düşey Eksenli Rüzgâr Türbini	30
Fotoğraf 2.2. Deneysel Çalışmaların Yapıldığı Fan ve Küçük Ölçekli Prototip Rüzgâr Türbini	31
Fotoğraf 2.3. Rüzgâr Hızı Ölçümünde Kullanılan El Anemometresi.....	31
Fotoğraf 2.4. Kuvvet Ölçümünde Kullanılan Dinamometre ve Bağlantı Parçaları.....	32
Fotoğraf 2.5. Kanat Açısı Ölçümünde Kullanılan Açıölçer.....	35



KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ

Semboller

A	: Türbin Projeksiyon Alanı
A_x	: Kanat Dönme Açısına Bağlı Rüzgâr Projeksiyon Alanı
A₁	: Kanatların ve Bağlantı Kollarının Döndüğü Toplam Silindirik Hacmin Projeksiyon Alanı
A₂	: Sadece Kanatların Döndüğü Silindirik Hacmin Projeksiyon Alanı
A₃	: Kanatlardaki Aktif Alanlara Karşı Gelen Projeksiyon Alanı
b	: Kanat Genişliği
d	: Kanatçık Açılma Uzunluğu
F	: Kuvvet Değeri
F_x	: Kanat Dönme Açısına Bağlı Kuvvet Değeri
h	: Kanat Yüksekliği
l	: Tork Kolu Uzunluğu
l_x	: Kanat Dönme Açısına Bağlı Tork Kolu Uzunluğu
P_d	: Rüzgâr Dinamik Basıncı
P_m	: Mekanik Güç
P_t	: Teorik Güç
r₀	: Kanat Bağlantı Kolu Uzunluğu
T_{net}	: Hesaplanan Net Tork
T_{ort}	: Hesaplanan Ortalama Tork
T_x	: Kanat Dönme Açısına Bağlı Tork
V	: Rüzgâr Hızı
α	: Kanat Dönme Açısı
β	: Kanatçık Açılma Açısı
ρ	: Hava Yoğunluğu
ω	: Açısal Hız
η	: Türbin Verimi

Kısaltmalar

HAWT	: Yatay Eksenli Rüzgâr Türbini
IPCC	: Hükûmetler arası İklim Değişikliği Paneli
IRENA	: Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı
RT	: Rüzgâr Türbini
VAWT	: Düşey Eksenli Rüzgâr Türbini
YES	: Yenilenebilir Enerji Sistemleri

TEŞEKKÜR

Bu tezin fikir öncülüğünü yapan ve çalışmalar boyunca maddi ve manevi desteğini esirgemeyen danışman hocam Sn. Prof. Dr. Hasan YUMAK' a teşekkür ediyorum.

Ayrıca, deneysel çalışmaların yapılmasında yardımcı olan Doç. Dr. Kadir GELİŞ ve Arş. Gör. Kadir ÖZBEK' e teşekkür ederim.



1. GİRİŞ

18. yüzyılda Endüstri Devrimi ile başlayan ve günümüzde teknolojinin de gelişmesiyle artan makineleşme sonucunda, enerji talebindeki artış büyük boyutlara ulaşmıştır. Makineleşmenin artması fosil yakıtların kullanımını ve dolayısıyla çevresel tehdit oluşturan sera gazı salınımını artırmıştır. 18. Yüzyılda kömürün temel enerji kaynağı olarak kullanılmaya başlanması ve daha sonraları diğer fosil yakıtların da dâhil olmasıyla 21. Yüzyılda gündemimizi en çok meşgul eden konulardan birinin “ Küresel Isınma ” olmasına neden olmuştur.

Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) değerlendirme raporunda bilim insanları, iklim değişikliği etkisinin tehlikeli boyutlara ulaşmaması için kritik bir noktada olduğumuzu belirtmektedir. Bu kritik noktanın aşılması durumunda benzeri görülmemiş sıcak hava dalgaları ve su kıtlıklarının yaşanmasına kesin gözüyle bakılmaktadır (AR6 Synthesis Report, 2023.). Bu sebepten IPCC üyesi ülkeler karbon salınımlarını azaltmak, ihtiyaç duydukları enerjiyi, yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılamak için çalışmalar yürütmektedir. 2050 yılına kadar karbon salınımlarının sıfıra indirilme hedefi bu çalışmaların yoğunlaşmasına sebep olmuştur. Bu sonuca bağlı olarak güneş enerjisinin doğrudan kazanımı ve dolaylı güneş enerjisi kaynaklarından enerji kazanımı (rüzgâr enerjisi, hidrolik enerji, biokütle enerjisi) kapsamında yenilenebilir enerji kaynakları üzerine yeni teknolojiler geliştirilmeye başlanmıştır.

Rüzgârın enerji kaynağı olarak kullanılması M.Ö. 4000’li yıllara dayanmaktadır. İlk çağlarda yelkenli gemilerin yürütülmesi için yararlanılan rüzgâr, günümüzde tasarlanan farklı tip türbinler sayesinde elektrik üretiminde kullanılmaktadır. Tarihte rüzgâr enerjisinden bahseden ilk kişi Yunanlı bir mühendis olan Heron ’dur. Heron bugünkü çalışmalara ilham kaynağı olan tanımlamalar yapmış ve rüzgâr enerjisiyle çalışan ilk su pompasını tasarlamıştır. Bu çalışma; yel değirmenlerinin tasarlanmasına, yel değirmenleri de bugünkü rüzgâr türbinlerinin tasarımına öncülük yapmıştır.

Bu çalışmada rüzgâr etkisiyle açılıp kapanabilen kanatçıklı düşey eksenli rüzgâr türbini tasarımı ve imalatı yapılmış, deneysel ve simülasyon çalışmalarıyla türbin veriminin belirlenmesi hedeflenmiştir. Ülkemiz geneline bakıldığında rüzgâr hızı ortalamasının 4-5 m/s civarında olması düşük rüzgâr hızlarında verimli

alışacak trbınlere olan ihtiyaı gözler önüne sermektedir. Yapılan bu çalışmayla; ülkemizin rüzgâr enerjisinden daha fazla faydalanması konusunda şehir içi uygulamalarında da kullanılabilecek ve düşük rüzgâr hızlarında verimli çalışabilecek bir rüzgâr türbini geliştirilmesi amaçlanmıştır.

1.1 Enerji

Kısaca iç yapabilme yeteneği olarak da tanımlanan enerji, nüfusun artması, teknolojinin gelişmesine bağlı talebi her geçen gün artan önemli bir ihtiyaçtır. Enerji, toplumların ekonomik ve sosyal gelişiminde büyük paya sahiptir. Dünyaya geldiğimiz günden itibaren yaşantımızı devam ettirebilmek için enerjiye ihtiyaç duyarız. Vücudumuzun gereksinim duyduğu enerjiyi besinlerden sağlarken, yaşantımızı daha konforlu hale getirmemize yardımcı olan makinelerin enerji gereksinimi ise, doğadan elde edilen kaynaklardan sağlanmaktadır.

Enerji birçok farklı formda elde edilir. Isı enerjisi, elektrik enerjisi, kimyasal enerji bunlardan bazılarıdır. Değişik formlarda bulunan enerji, uygun şartlarda bir formdan diğerine dönüştürebilmektedir. Enerjinin bu yapısı sayesinde yaşamımızın her alanında kullandığımız makine ve donanımların geliştirilmesi ve kullanıma sunulması mümkün olmuştur.

1.2 Enerji Kaynakları

Genel şekliyle, enerji kaynakları yenilenebilir ve yenilenemez niteliklerine göre iki grupta; dönüştürülebilme özelliklerine göre ise; birincil ve ikincil olmak üzere iki kategoride sınıflandırılmaktadır. Kullanılacağı alana göre ekonomik maliyetler, çevresel etkiler ve sürdürülebilirlik, enerji kaynaklarının seçiminde başı çeken kavramlardır. Enerji kaynaklarının kullanımında sürdürülebilirlik dünya genelinde kritik öneme sahiptir. Bütün lkeler enerji retimnin devamlılığını sağlamak için çalışmalar yapmakta ve mevcutta kullandıkları kaynakların alternatiflerine yönelmektedir. Bu sayede her geçen gün enerji teknolojilerinde gelişmeler yaşanmakta; daha güvenli, daha temiz ve sürdürülebilir bir enerji sistemi inşa edilmeye çalışılmaktadır.

1.2.1 Yenilenemez Enerji Kaynakları

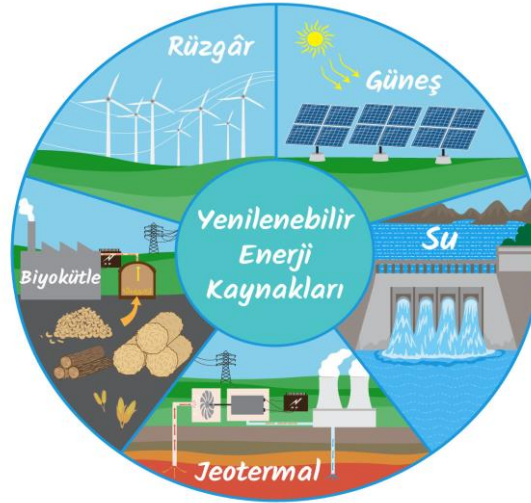
Konvansiyonel ya da tükenir enerji kaynakları olarak da nitelendirilen bu enerji kaynakları, fosil ve nükleer olmak üzere iki ana başlıkta toplanmıştır. Fosil kaynaklar biyolojik süreçler sonucunda oluşurken, nükleer kaynaklar ise atom çekirdeğinden elde edilmektedir. Her iki enerji kaynağı da kullanılması durumunda tükenmekte ve yeniden oluşması için uygun şartlar altında milyonlarca yıl gerektirmektedir.

Dünyada enerji üretiminin büyük bir bölümü yenilenemez enerji kaynaklarından sağlanmaktadır. Bunun en büyük nedenleri intensive (yoğun) kaynaklar olması ve kaynağa ulaşımın kolay, maliyetinin düşük olmasıdır. Ancak günümüzde bu kaynakların kullanımı sonrası çevreye verdiği olumsuz etkiler, küresel ısınma ve sera gazı etkisi dikkate alındığında uzun vadede zararlı etkileri daha belirgin hale gelmiştir. Üstelik rezervleri sınırlı olduğundan yakın gelecekte bu kaynakların tükeneceği belirtilmektedir. Açıklanan gerekçelerle ülkeler; dünyamızın yakın gelecekte yaşayabileceği tehlikeli sürecin önüne geçmek için birçok protokol imzalamıştır. Bu protokoller gereği; günden güne dünyada enerji arzının artması, yenilenemez enerji kaynaklarının sürdürülebilir olmaması ve çevreye verdiği olumsuz etkilerden dolayı ülkeler alternatif kaynak arayışına yönlenmişlerdir. Bu arayış ise yenilenebilir enerji kaynaklarının önemini artırmıştır.

1.2.2 Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Yenilenebilir enerji kaynaklarının esas kaynağı güneştir. Diğer bir ifade ile doğrudan (ısı ve elektriksel kazanım) ve dolaylı (kaynağı güneş enerjisine bağlı olan rüzgâr, hidrolik, biokütle enerjileri ve hatta kısmen jeotermal enerji) olarak kazanılan güneş enerjisidir. Doğal süreçlerin açığa çıkarması nedeniyle yenilenebilir enerji kaynakları çevre kirliliğine olan etkisi minimum düzeydedir. Yani doğadaki mevcutta bulunan bir durumdan yararlanılması söz konusudur. Kullanılması durumunda ise bir tükenme durumuyla karşı karşıya kalınmaması yani sürdürülebilir olması en büyük özelliklerinden bir tanesidir. Ülkelerin artan enerji ihtiyaçlarını temiz ve sürdürülebilir bir şekilde karşılama ihtiyacı, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan yönelimi artırmıştır (Şekil 1.1). Bu alanda yapılan

araştırmalar hız kazanmış ve mevcut teknolojileri daha verimli hale getirecek tasarımlar üzerine çalışmalar hızlanmıştır.



şekil 1.1 Yenilenebilir Enerji Kaynakları (*Alternatif Enerji Kaynakları ve Türkiye | TÜBİTAK Bilim Genç, 2024.*)

1.3 Dünyada ve Türkiye’de Enerji Kaynaklarının Kullanımı

Dünyada nüfusun, makineleşmenin ve konforlu yaşam algısının her geçen gün artması; doğru orantılı olarak enerji talebini de artırmaktadır. lkeler enerji ihtiyaçlarını çeşitli enerji kaynaklarından sağlamaya çalışmaktadır.

Dünya enerji üretiminin %80’ine yakını hala fosil kaynaklardan karşılanmaktadır. Bu durum evre politikaları gereği azaltılmaya çalışılmakta ve çevreye etkisi daha az olan yenilenebilir enerji sistemleri(YES) zerine yönelim sağlanmaktadır. IRENA(Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı) 2024 verilerine göre; küresel çapta yenilenebilir enerji kapasitesi 3.864.522 MW’a ulaşmıştır (*Renewable Energy Statistics, 2024.*). Raporda yenilenebilir enerji kapasitesinde öncülüğü in’in önderliğinde Asya Kıtası üstlenmektedir. 2023 yılında yenilenebilir enerji kapsamında en fazla büyüme Güneş ve Rüzgâr enerjisi alanında sağlanmıştır. Rüzgâr enerjisinin, denizde ve karada kullanımı için geliştirilen projeler sayesinde 1.017.390 MW’a ulaşarak bir önceki seneye göre 114.507 MW artış göstermesi önemli bir gelişme olarak görülmektedir.

Ülkemizin özellikle son yıllarda aldığı düzensiz göç nedeniyle yaşadığı hızlı nüfus artışı ve her geçen gün sanayileşmenin artması; aynı oranda enerji talebini de yükseltmiştir. Ülkemizin mevcut kurulu gücü Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı

Eylül ayı verilerine göre 114.215 MW a ulaşmıştır (*Elektrik - T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024.*). Ülkemiz mevcut enerji ihtiyacının yaklaşık %70 ini yenilenemez enerji kaynaklarından karşılamaktadır.

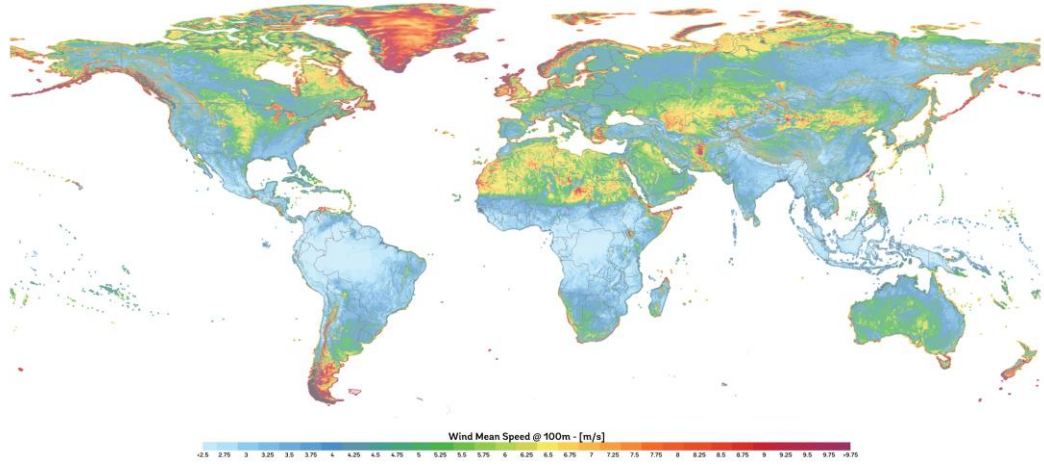
2022 yılı Enerji yatırım raporunda; termik santral yatırım payı % 49,92 iken, 2023 yılında bu payın %3,48 e düşmesi ve aynı oranda yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanıldığı santrallere yatırımın artırılması geleceğe dair büyük umut vermektedir (*EİGM Raporları - T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024.*). Özellikle bu yatırımların içerisinde Rüzgâr Enerji Santralleri yatırım paydasının 2021 yılında %51,42, 2022 yılında %22,64, 2023 yılında ise %33,04 olması; ülkemizin sahip olduğu rüzgâr enerji potansiyelinin farkında olduğunu ve bu alanda yatırımlara devam edileceğini göstermektedir (*EİGM Raporları - T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024.*).

1.4 Rüzgâr

Rüzgâr, güneşten gelen ışıının enerjisiyle atmosferin ve yeryüzünün farklı sıcaklıklara ulaşması ile hava hareketleri sonucunda oluşmaktadır. Bu hava hareketlerinin temel kaynağı ise güneştir. Güneşin yeryüzünün her bölgesini eşit olarak ısıtamaması nedeniyle ortaya çıkan sıcaklık farkları ve bu sıcaklık farkı sebebiyle oluşan basınç farkları hava kütlelerinin hareket etmesine sebep olmaktadır. Bu hava kütlelerinin hareketleri sonucunda ise rüzgâr oluşmaktadır. Hava hareketi her zaman yüksek basınç bölgesinden alçak basınç bölgesine yönelik olmaktadır.

Rüzgârın özelliğini etkileyen temel faktör sıcaklık farkı ve dolayısıyla oluşan hava basınç değişimleri olmakla birlikte; bunun yanında dünyanın hareketi, ısı yayılımları, farklı atmosferik olaylar ve arazinin coğrafi yapısı da rüzgarın spesifik yapısını etkilemektedir (*Rüzgar - T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2025.*).

Rüzgârın farklı bölgelerde farklı özelliklerde bulunması dünyada rüzgâr haritalarının ortaya çıkmasına neden olmuştur. Şekil 1.2' de dünya rüzgâr haritası verilmiştir. Bu haritada renkler maviden kırmızıya doğru gittikçe rüzgâr hızı, dolayısıyla rüzgâr güç yoğunluğu artmaktadır.

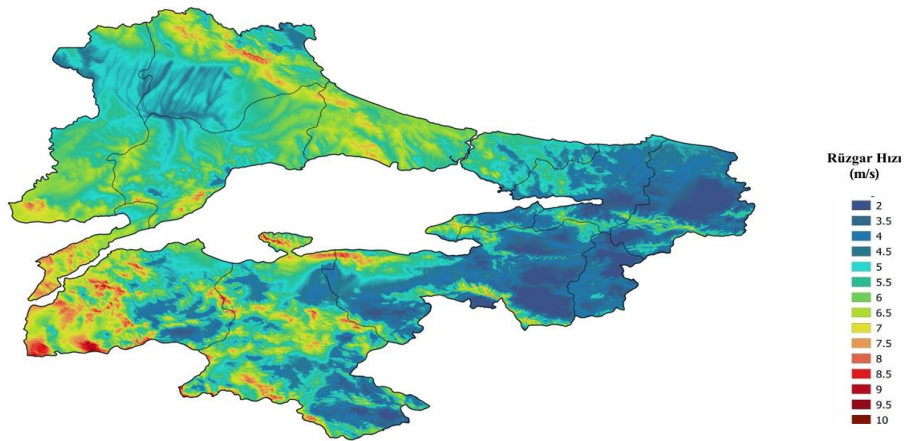


Şekil 1.2 Dünya Rüzgâr Hızı Haritası (Denmark, 2017)

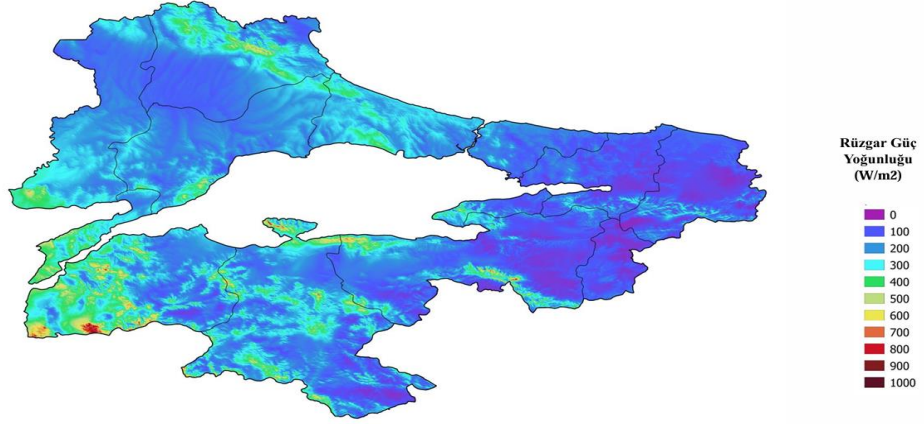
1.4.1 Türkiye'nin Rüzgâr Haritası

Ülkemizde, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığının yaptığı çalışmalar sonucunda 7 farklı bölgemizin her biri için; 100 metre yükseklikte, yıllık ortalama rüzgâr hızı dağılımı ve yıllık ortalama rüzgâr güç yoğunluğu dağılımı haritaları oluşturulmuştur. Her bölge için elde edilen minimum rüzgâr hızı değeri, maksimum rüzgâr hızı değeri, ortalama rüzgâr hızı değeri, minimum güç yoğunluğu, maksimum güç yoğunluğu ve ortalama güç yoğunluğu değerleri aşağıda haritalar ve tablolar halinde gösterilmiştir.

Marmara bölgesi için elde edilen veriler;



Şekil 1.3 Marmara Bölgesi Yıllık Ortalama Rüzgâr Hızı Dağılımı Haritası (Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli, 2025.)

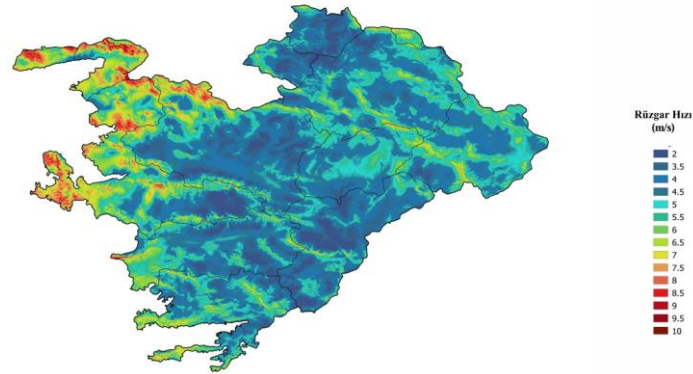


Şekil 1.4 Marmara Bölgesi Yıllık Ortalama Rüzgâr Güç Yoğunluğu Dağılımı Haritası(*Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli, 2025.*)

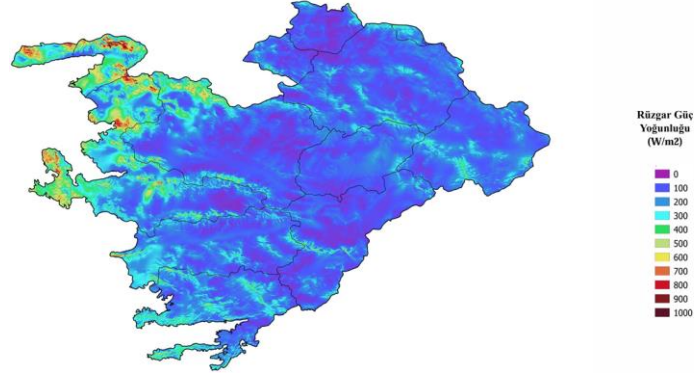
Tablo 1.1. Marmara Bölgesi İçin Elde Edilen Hız ve Güç Değerleri

Minimum rüzgâr hızı (m/s)	1,93	Minimum güç yoğunluğu (W/m ²)	12,85
Maksimum rüzgâr hızı (m/s)	9,86	Maksimum güç yoğunluğu (W/m ²)	1041,314
Ortalama rüzgâr hızı (m/s)	5,24	Ortalama güç yoğunluğu (W/m ²)	201,765
Variyans	1,23	Variyans	10428,29
Standart Sapma	1,11	Standart Sapma	102,119

Ege bölgesi için elde edilen veriler;



Şekil 1.5 Ege Bölgesi Yıllık Ortalama Rüzgâr Hızı Dağılımı Haritası(*Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli, 2025.*)

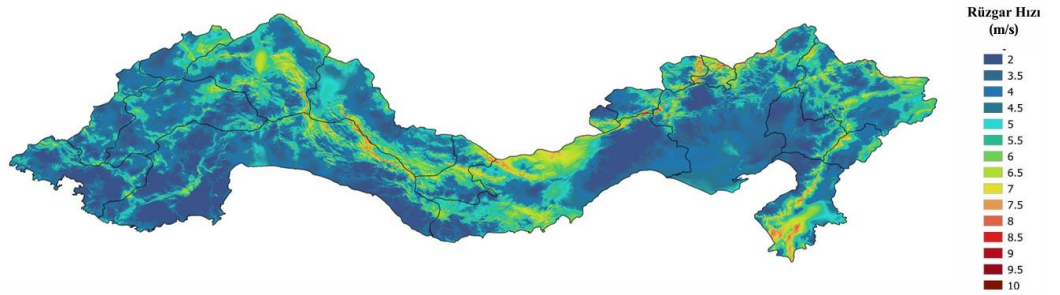


Şekil 1.6 Ege Bölgesi Yıllık Ortalama Rüzgâr Güç Yoğunluğu Dağılımı Haritası(*Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli, 2025.*)

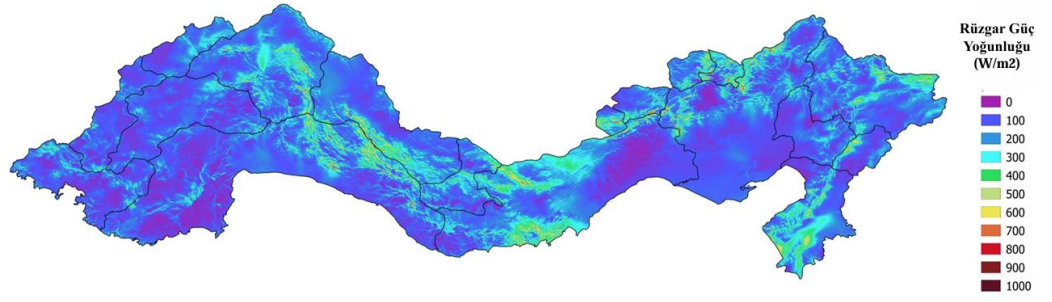
Tablo 1.2. Ege Bölgesi İçin Elde Edilen Hız ve Güç Değerleri

Minimum rüzgâr hızı (m/s)	1,96	Minimum güç yoğunluğu (W/m2)	12,44
Maksimum rüzgâr hızı (m/s)	10,79	Maksimum güç yoğunluğu (W/m2)	1357,68
Ortalama rüzgâr hızı (m/s)	4,81	Ortalama güç yoğunluğu (W/m2)	176,89
Variyans	1,30	Variyans	13573,42
Standart Sapma	1,14	Standart Sapma	116,505

Akdeniz bölgesi için elde edilen veriler;



Şekil 1.7 Akdeniz Bölgesi Yıllık Ortalama Rüzgâr Hızı Dağılımı Haritası(*Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli, 2025.*)

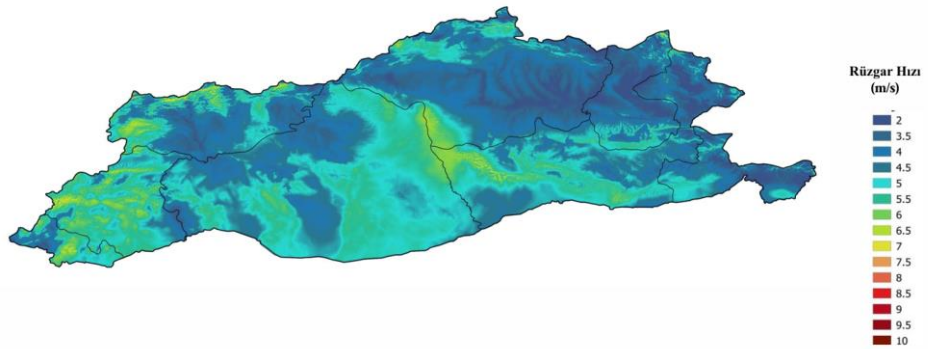


Şekil 1.8 Akdeniz Bölgesi Yıllık Ortalama Rüzgâr Güç Yoğunluğu Dağılımı Haritası(*Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli, 2025.*)

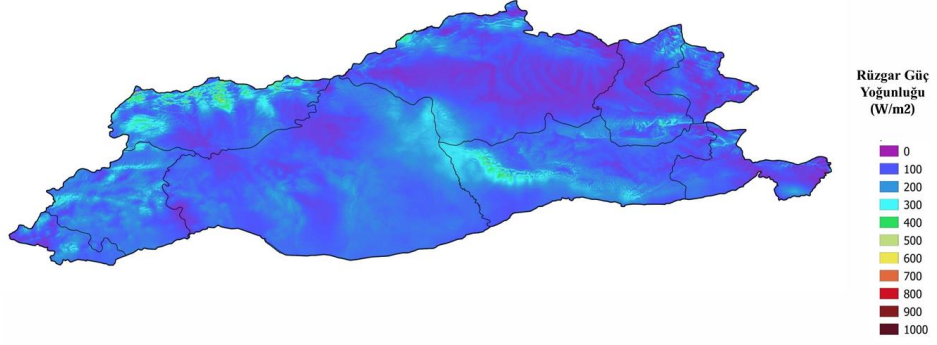
Tablo 1.3. Akdeniz Bölgesi İçin Elde Edilen Hız ve Güç Değerleri

Minimum rüzgâr hızı (m/s)	0,92	Minimum güç yoğunluğu (W/m ²)	2,145
Maksimum rüzgâr hızı (m/s)	10,49	Maksimum güç yoğunluğu (W/m ²)	1311,89
Ortalama rüzgâr hızı (m/s)	4,46	Ortalama güç yoğunluğu (W/m ²)	162,194
Variyans	1,28	Variyans	9811,695
Standart Sapma	1,13	Standart Sapma	99,054

Güneydoğu Anadolu bölgesi için elde edilen veriler;



Şekil 1.9 Güneydoğu Anadolu Bölgesi Yıllık Ortalama Rüzgâr Hızı Dağılımı Haritası (*Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli, 2025.*)

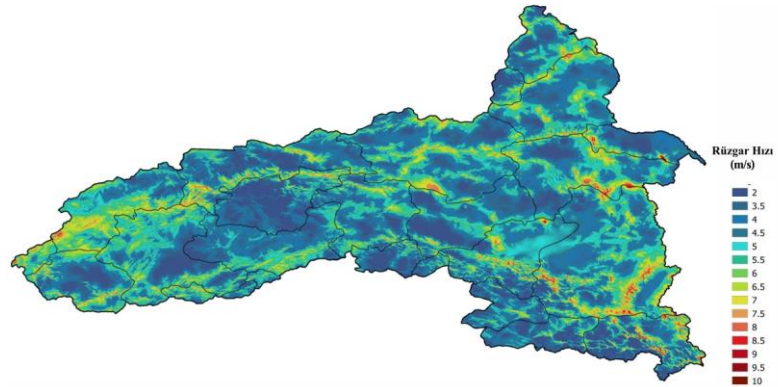


Şekil 1.10 Güneydoğu Anadolu Bölgesi Yıllık Ortalama Rüzgâr Güç Yoğunluğu Dağılımı Haritası(*Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli, 2025.*)

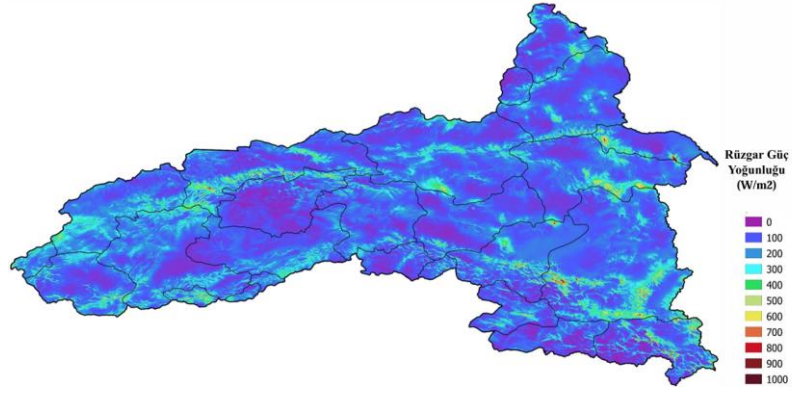
Tablo 1.4. Güneydoğu Anadolu Bölgesi İçin Elde Edilen Hız ve Güç Değerleri

Minimum rüzgâr hızı (m/s)	1,39	Minimum güç yoğunluğu (W/m ²)	3,681
Maksimum rüzgâr hızı (m/s)	8,24	Maksimum güç yoğunluğu (W/m ²)	840,871
Ortalama rüzgâr hızı (m/s)	4,59	Ortalama güç yoğunluğu (W/m ²)	137,229
Variyans	0,59	Variyans	3401,222
Standart Sapma	0,77	Standart Sapma	58,320

Doğu Anadolu bölgesi için elde edilen veriler;



Şekil 1.11 Doğu Anadolu Bölgesi Yıllık Ortalama Rüzgâr Hızı Dağılımı Haritası(*Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli, 2025.*)

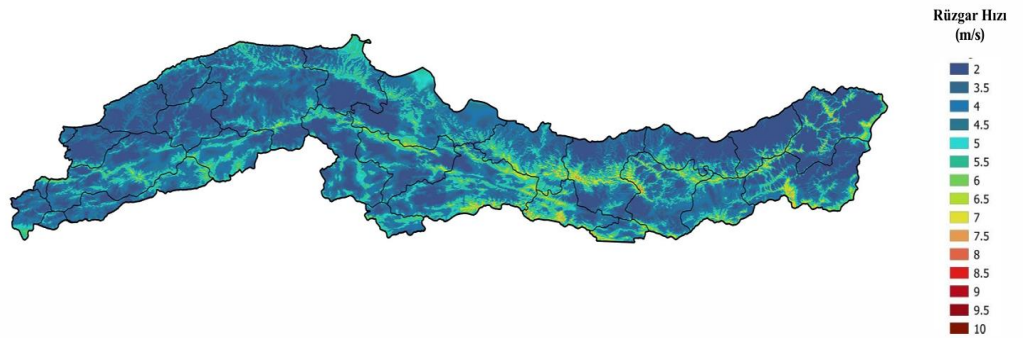


Şekil 1.12 Doğu Anadolu Bölgesi Yıllık Ortalama Rüzgâr Güç Yoğunluğu Dağılımı Haritası(*Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli, 2025.*)

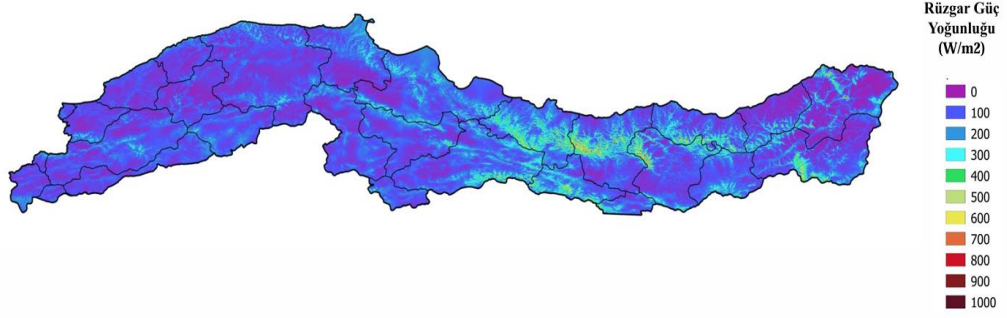
Tablo 1.5. Doğu Anadolu Bölgesi İçin Elde Edilen Hız ve Güç Değerleri

Minimum rüzgâr hızı (m/s)	1,002	Minimum güç yoğunluğu (W/m ²)	1,669
Maksimum rüzgâr hızı (m/s)	13,60	Maksimum güç yoğunluğu (W/m ²)	1945,37
Ortalama rüzgâr hızı (m/s)	4,61	Ortalama güç yoğunluğu (W/m ²)	152,67
Variyans	1,30	Variyans	8537,39
Standart Sapma	1,14	Standart Sapma	92,398

Karadeniz bölgesi için elde edilen veriler;



Şekil 1.13 Karadeniz Bölgesi Yıllık Ortalama Rüzgâr Hızı Dağılımı Haritası(*Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli, 2025.*)

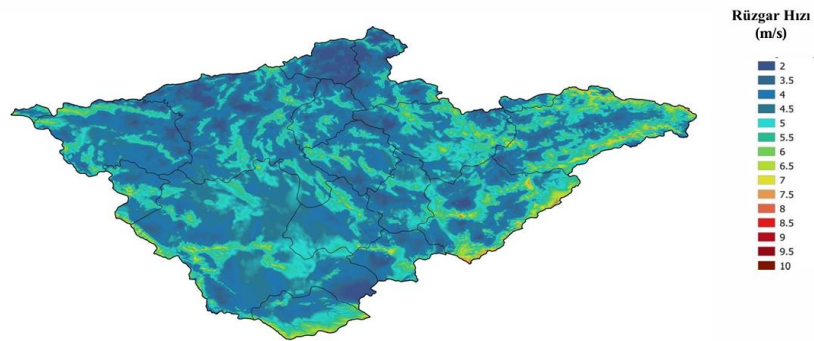


Şekil 1.14 Karadeniz Bölgesi Yıllık Ortalama Rüzgâr Güç Yoğunluğu Dağılımı Haritası(*Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli, 2025.*)

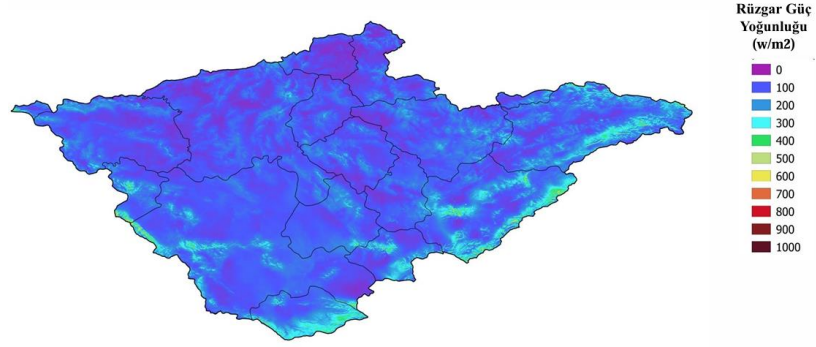
Tablo 1.6. Karadeniz Bölgesi İçin Elde Edilen Hız ve Güç Değerleri

Minimum rüzgâr hızı (m/s)	0,67	Minimum güç yoğunluğu (W/m ²)	0,792
Maksimum rüzgâr hızı (m/s)	10,07	Maksimum güç yoğunluğu (W/m ²)	1274,416
Ortalama rüzgâr hızı (m/s)	4,01	Ortalama güç yoğunluğu (W/m ²)	121,152
Variyans	1,08	Variyans	7015,738
Standart Sapma	1,04	Standart Sapma	83,76

İç Anadolu bölgesi için elde edilen veriler;



Şekil 1.15 İç Anadolu Bölgesi Yıllık Ortalama Rüzgâr Hızı Dağılımı Haritası(*Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli, 2025.*)



Şekil 1.16 İç Anadolu Bölgesi Yıllık Ortalama Rüzgâr Güç Yoğunluğu Dağılımı Haritası(*Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli, 2025.*)

Tablo 1.7. İç Anadolu Bölgesi İçin Elde Edilen Hız ve Güç Değerleri

Minimum rüzgâr hızı (m/s)	1,96	Minimum güç yoğunluğu (W/m²)	13,55
Maksimum rüzgâr hızı (m/s)	9,80	Maksimum güç yoğunluğu (W/m²)	860,019
Ortalama rüzgâr hızı (m/s)	4,53	Ortalama güç yoğunluğu (W/m²)	128,537
Variyans	4,53	Variyans	3602,881
Standart Sapma	0,74	Standart Sapma	60,024

Değerler ülkemizde Ege ve Marmara bölgesinde rüzgâr hızlarının ve güç yoğunluğunun daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bundaki temel sebep dağların uzanışı ve bölgenin topoğrafik yapısından kaynaklanmaktadır. Ülkemizde rüzgârdan faydalanma yönünde yapılan yatırımlarda bu bölgelerde yoğunlaşmıştır. Ancak tabloya geniş açıdan bakıldığında ülkemizde ortalama rüzgâr hız seviyelerinin 4-5 m/s aralığında olduğu görülmektedir. Bu çalışmada, tasarımı ve imalatı yapılan rüzgâr türbini ile düşük rüzgâr hızlarında(4-5m/s) verimli enerji üretimi hedeflenmiştir.

1.5 Rüzgâr Enerjisi

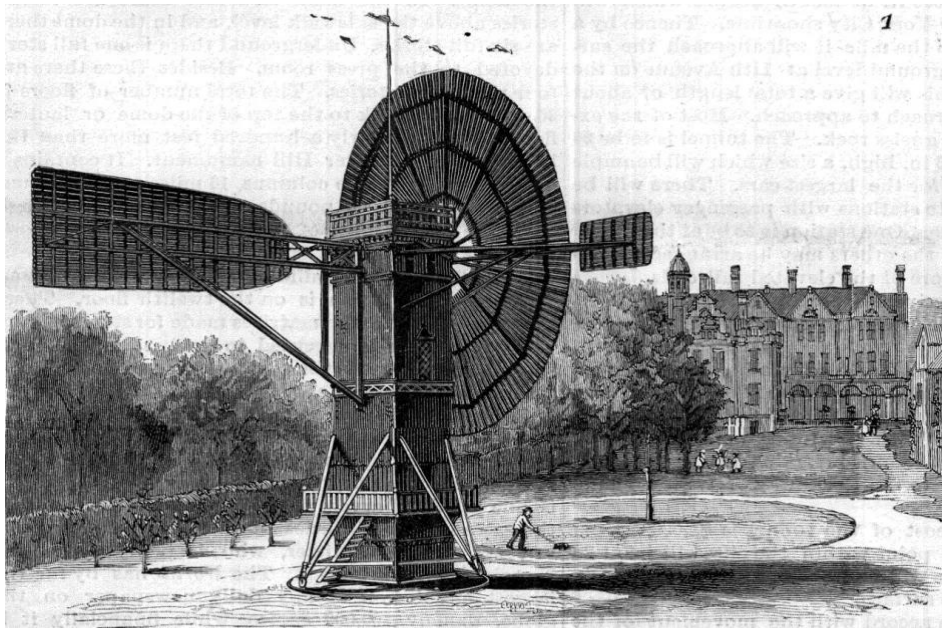
Rüzgâr enerjisi, atmosferin ve yeryüzünün eşit olmayan ısınması ve soğuması sonucu ortaya çıkan hava kütlelerinin hareketleri ile oluşan hava akışı ile

ortaya çıkar. Böylece rüzgâr enerjisi aslında rüzgârı oluşturan hava akımının sahip olduğu hareket enerjisidir.

Milattan önceki yıllarda kullanılmaya başlanılan rüzgâr enerjisi, denizlerde yelkenli gemilere, karalarda ise, yel değirmenlerine ve rüzgâr millerine ana güç kaynağı olmuştur. Daha sonraki yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarına duyulan ihtiyacın artması ve gelişen teknoloji ile birlikte rüzgâr türbini denilen ve elektrik üretiminde kullanılan ilk makineler tasarlanmıştır. Rüzgâr enerjisinden elektrik üreten ilk türbin ise 1891’de modern aerodinamiğin önemli mühendisi olan ve rüzgâr türbinlerinin babası kabul edilen Paul la Cour tarafından Danimarka’da inşa edilmiştir (*EliBüyük ve Üçgül, 2014*).

1.6 Rüzgâr Türbinleri

Rüzgâr türbininden elektrik üretimi maksadıyla denemelerde bulunan Charles F. Brush bu alanda yapılan ilklerden birisine imza atmıştır. Tasarladığı türbin 17 metre çapında ve bir kule üzerinde monte edilmiş haliyle sık aralıklı dar kanatlardan oluşmaktaydı. Türbin için rüzgâra yönlendirme yapmak amacıyla bir kuyruk mekanizması kullanmış ve güç artırımı içinde 50:1 oranında devir yükselten dişli kutusu kullanılmıştır. Charles F. Brush tarafından 1888 yılında yapılan rüzgâr türbini Şekil 1.17 de gösterilmiştir.



Şekil 1.17 Charles F. Brush Tarafından 1888 Yılında Yapılan Rüzgâr Türbini(“*Here’s Good Wind, Here’s Pretty Wind*, 2025.)

Charles F. Brush tarafından yapılan türbin sık aralıklı dar kanatlardan oluşması nedeniyle devir sayısı olarak oldukça düşük kalmıştır. Rotor çapının büyüklüğü göz önün alındığında makinanın 12Kw gücünde olması sık ve çok kanatlı türbinlerin elektrik üretiminde kullanılmasının verimli olmadığını gözler önüne sermiştir. Charles F. Brush yaptığı çalışmalar ile ileride tasarlanacak ve elektrik üretiminde kullanılacak türbinler için önemli bir kaynak olmuştur.

1891 yılında 4 kanatlı ve yüksek hızlı rotora sahip türbini tasarlayarak elektrik üretimi için uygun hale getiren Paul La Cour bu buluşuyla günümüzdeki modern rüzgâr türbinlerinin öncüsü olmuştur(Şekil 1.18). Paul La Cour tarafından tasarlanan türbinler 35Kw'a kadar güç üretebilme potansiyeline sahipti. Bu türbinlerden 1918 yılına kadar 120 adet üreterek 1918 yılında Danimarka'da Kurulu rüzgâr enerji gücünün Mw'a ulaşmasını sağlamıştır.



Şekil 1.18 Paul La Cour Tarafından 1897 Yılında Geliştirilen 2 Adet Rüzgâr Türbini(“*Here’s Good Wind, Here’s Pretty Wind*, 2025.)

İlerleyen yıllarda ABD tarafından çeşitli kanat sistemleri ile denemeler yapılsa da verimli sonuç alınamadı. 1920 yılında J.M. Darrieus tarafından düşey eksenli türbinler üzerine geliştirilen çeşitli rotor tasarımları o yıllarda çok ilgi görmese de ilerleyen yıllarda düşey eksenli türbinlerin gelişimi açısından önemli bir role sahip olmuştur. 1920’li yıllarda özellikle konutlardaki düşük enerji ihtiyacının karşılanması için tasarlanan ve bugünkü uygulamalara benzeyen 3 kanatlı türbin Marcellus Jacobs tarafından faaliyete geçirilmiştir. Ancak zaman

içerisinde konutlardaki teknolojik cihazların artmasıyla enerji ihtiyacında da artış meydana gelmiştir. Artan enerji ihtiyacının mevcut türbinler ile karşılanamaması nedeniyle elektrik şebekeleri kurulmuş ve türbinlerin gelişimi de bu yönde olmuştur. Bu konuda ilk uygulama da 1930 yılında gerçekleştirilmiştir. Şebekeye enerji sağlamak için Rusya tarafından kurulan türbin ile 2 yıl içerisinde şebekeye 200.000 kWh enerji verilmiştir.

Rüzgâr türbinlerinde asıl gelişim ise 2. Dünya savaşı sonrasında başlamıştır. 2. Dünya savaşı sonrasında Almanya ve Danimarka'nın farklı yaklaşımları ile geliştirilen türbinler, günümüzdeki türbinlerin temel yapı taşını oluşturmuştur. Özellikle Johannes Juul tarafından Danimarka'nın Gedser kentinde kurulan ve ismini buradan alan Gedser türbini, 1980 li yıllarda rüzgâr türbin endüstrisinde Danimarka'nın öncü olmasını sağlamıştır.

Günümüzde rüzgâr türbinleri dönme eksenlerine, devirlerine, güçlerine, kanat sayılarına, rüzgâr etkisine, dişli özelliklerine ve kurulum konumlarına göre sınıflandırılırlar (EliBüyük ve Üçgül, 2014). Sınıflandırma Şekil 1.19 da gösterilmiştir.



Şekil 1.19 Rüzgâr Türbinlerinin Sınıflandırılması (EliBüyük ve Üçgül, 2014)

1.7 Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinleri

Yatay eksenli rüzgâr türbin sistemlerinin dönüş eksenini rüzgârın yönüne paraleldir. Bu yüzden rüzgârın sabit yönlü olduğu, türbülansın olmadığı hava akış alanlarında kurulurlar. Verimli çalışabilmesi için kanatların her zaman rüzgâr yönüne doğrultulması gerektiğinden; bunu ekstra bir mekanizma ekleyerek sapma

motoruyla sağlayabilmektedir. Rüzgârı her yönden alabilme özelliğinin zayıf olması düşey eksenli rüzgâr türbinlerine kıyasla dezavantajlarından birisidir.

Yatay eksenli rüzgâr türbinleri temel olarak kanat, kule, dişli kutusu, jeneratör, yatak, yaw mekanizması, pitch mekanizması, kavrama ve kontrol ünitesinden oluşmaktadır. Yaw mekanizması türbinin rüzgârı önden veya arkadan almasına göre sisteme dâhil edilmektedir. Rüzgârı önden alan türbinlerde Yaw mekanizması kullanılırken, rüzgârı arkadan alan türbinlerde Yaw mekanizması kullanılmamaktadır.

Bu tip rüzgâr türbinlerinde kanat sayıları büyük bir öneme sahiptir. Kanat sayıları azaldıkça rotor daha hızlı döner. Bu yüzden kanat sayılarına göre; tek kanatlı, çift kanatlı, üç kanatlı ve çok kanatlı olarak sınıflandırılırlar.

1.7.1 Tek Kanatlı Rüzgâr Türbini

Tek kanatlı rüzgâr türbinleri emsallerine nazaran az kanat yapısına sahiptir. Bu özellik ise onların dönme hızının yüksek olmasına ve bu sebeple makinenin kütesinin ve rotorun dönme momentinin azalmasına olanak sağlamaktadır. Tek kanatlı rüzgâr türbinlerinde bulunan rotor kanadı, türbine yalnızca 1 adet menteşe ile tutturulmakta olup 2 farklı ağırlıkla kanadın dengede tutulması sağlanmaktadır.

Tek kanatlı rüzgâr türbinlerinin yukarıda sayılan avantajlarının yanında dezavantajları da bulunmaktadır. Bu dezavantajlardan en önemlisi aerodinamik gürültü seviyesinin fazla olmasıdır. Bu gürültü seviyesinin fazla olmasının nedeni, kanat uç hızının 120 m/sn. seyirlerinde olmasıdır. Tek kanatlı rüzgâr türbinlerinin bu kanat uç hızı, üç kanatlı rüzgâr türbinlerinin kanat uç hızına kıyasla 2 kat daha fazladır ve bu nedenle daha fazla gürültü oluşturmaktadır. Tek kanatlı rüzgâr türbinlerinin meydana getirdiği bu gürültü sebebiyle özellikle bu türbinlerin keşif yeri olan Almanya piyasasında tek kanatlı rüzgâr türbinlerinin kullanımı oldukça seyrektir.

1.7.2 Çift Kanatlı Rüzgâr Türbini

Çift kanatlı rüzgâr türbinleri, tek kanatlı rüzgâr türbinlerine nazaran daha az gürültüye sebep olmak ve üç kanatlı rüzgâr türbinlerine nazaran rotor maliyetini azaltmak üzere tasarlanmış türbinlerdir. Bu türbinler, piyasada çok bulunmamakla

beraber bu türbinlerin piyasadaki miktarının arttırılması için de herhangi bir ciddi çalışma bulunmamaktadır.

Çift kanatlı rüzgâr türbinlerini tek kanatlı rüzgâr türbinleri ile kıyasladığımızda çift kanatlı rüzgâr türbinlerinin tek kanatlı türbinlere nazaran rotorunun balansının daha estetik ve dayanıklı olduğu görülecektir. Bu avantajın yanında çift kanatlı rüzgâr türbinleri, tek kanatlı rüzgâr türbinlerine nazaran daha fazla teknik bilgi, teknik güç ve maliyete sebebiyet vermektedir.

Çift kanatlı rüzgâr türbinlerini üç kanatlı türbinler ile karşılaştırdığımızda ise çift kanatlı türbinlerin en önemli avantajının kanat uç hızlarının yüksek olması olduğu görülecektir. Ancak çift kanatlı rüzgâr türbinlerinin üç kanatlı türbinlere nazaran gürültü seviyesinin yüksek olması ve yalnızca düşük rüzgâr hızlarında çalışabilmesi onun dezavantajlarını gözler önüne sermektedir.

1.7.1 Üç Kanatlı Rüzgâr Türbini

Üç kanatlı rüzgâr türbinleri, rüzgâr türbinlerinin arasında en modern dizayn ve projeye sahip olan türbinlerdir. Bu türbinler hemen hemen dünyanın her yanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu rüzgâr türbinlerinin yaygın olmasının nedeni dönme momentinin diğer türbinlere nazaran daha düzgün ve sistematik olmasıdır. Bu türbinler bünyesinde atalet momenti içermediği için imalatında titreşimi önleyici pahalı parçalara da ihtiyaç duyulmamaktadır. Üç kanatlı rüzgâr türbinlerinin kanat uç hızı 70m/sn. altındadır. Bu da türbinlerin gürültüsüz bir biçimde çalışmasına olanak sağlamaktadır. Ayrıca bu türbinler üç kanatlı yapıları sayesinde dengeli bir dönüş sağlamakta olup herhangi bir sarsıntı yahut sarsılma meydana getirmemektedir.

1.7.2 Çok Kanatlı Rüzgâr Türbini

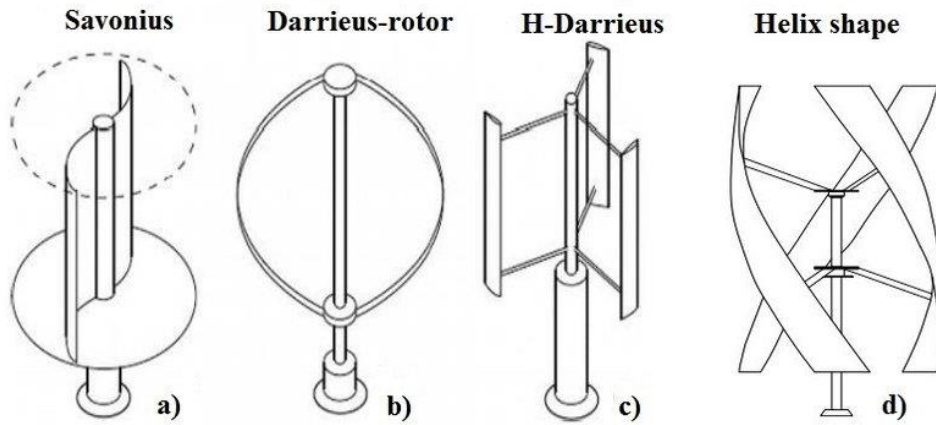
Çok kanatlı rüzgâr türbinleri, rüzgârgülü olarak da bilinmektedir. Bu türbinler, rüzgâr türbinlerinin en temel biçimi olup türbinlerin ilk örnekleridir. Bu türbinler düşük hızda çalışmaya uygundur. Bu nedenle bu türbinler uzun seneler boyunca yalnızca su pompalama işlemi için kullanılmıştır.

Çok kanatlı rüzgâr türbinlerinin sahip olduğu kanatlar, pervaneye bağlanan noktadan kanat uçlarına gidildikçe genişlemektedir. Çok kanatlı rüzgârgülleri, bünyesinde ayrıca rüzgârgülü yönlendiricisi (Yönlendirme kanadı) taşımaktadır.

Bu yönlendirici, çok kanatlı rüzgârgülünün, pervane düzleminin rüzgâr hız vektörünü her zaman dik olarak alabilecek şekilde yapılır.

1.8 Düşey Eksenli Rüzgâr Türbinleri

Düşey eksenli rüzgâr türbinleri, dönüş eksenini laminar akımlı yatay doğrultuda her yönden gelen rüzgârın yönüne diktir. Böylece bu türbinler rüzgârı her yönden alabilme ve buna göre dönüş hareketi yaparak elektrik üretebilir. Bu nedenle yatay eksenli rüzgâr türbinlerine göre bir üstünlüğü bulunur. Verimleri ise yatay eksenli türbinlerle karşılaştırıldığında daha düşük düzeydedir. Rüzgârı sürükleyerek kaldıran bu türbinlerin verimi ise yaklaşık olarak %35'dir (Kim ve Gharib, 2013a). Son yıllarda verimin artırılması yönünde çalışmalar yapılmaktadır. Bunlardan biri rüzgâr akış yönlendiricileri kullanımıdır. Yukarı akış deflektörü kullanımının türbin veriminde önemli düzeyde artış sağladığı belirtilmektedir. Bu türbinler herhangi bir kuleye ihtiyaç duymadan düşük rüzgâr hızlarında da çalışabilmektedir. Düşey eksenli rüzgâr türbinleri 'Savonius' ve 'Darrieus' olmak üzere 2 ana gruba ayrılır. Darrieus türbinleri ise H-Darrieus, Hellisel Darrieus ve D-Darrieus olmak üzere 3 gruba ayrılır (Çetin vd., 2019a). Düşey eksenli rüzgâr türbinlerinin yapısı Şekil 1.20 de gösterilmiştir.



Şekil 1.20 Düşey Eksenli Rüzgâr Türbin Çeşitleri(Castellani vd., 2019)

1.8.1 Savonius Rüzgâr Türbini

Savonius rüzgâr türbininin keşfi 1925 yılında Finlandiyalı mühendis Sigurd J. Savonius tarafından yapılmıştır. Bu türbin simetrik merkezli iki yarım silindir kanattan oluşmaktadır. Düşey eksenli olmasından kaynaklı rüzgârı her yönden alabilme özelliğine sahiptir. Rüzgâr etkisiyle kanatların iç ve dış kısmında ters

yönde momentler oluşmaktadır. İç kısımda pozitif moment, dış kısımda ise negatif moment oluşur. Pozitif momentin negatif momentten yüksek olduğu durumlarda dönme hareketi gerçekleşir. Hareket yönü pozitif moment yönündedir.

Savonius rüzgâr türbinleri, inşa edilme kolaylıkları, türbin yapılarının basitliği ve yüksek başlangıç torklarına sahip olması gibi özellikleri nedeniyle dikkatleri üzerine çekmiştir. Basit bir yapıya sahip olması; bakımını kolay, işletmesini basit kılmaktadır. Ancak uygulamalarda aerodinamik performansının düşük kalması; Savonius rüzgâr türbin kullanımının havalandırma, su pompaları gibi alanlarla sınırlı kalmasına sebep olmuştur. Savonius rüzgâr türbinleri birçok avantajı yapısında bulundurmasına rağmen, son yıllara kadar aerodinamik performanslarının düşüklüğünden dolayı elektrik enerjisi kazanımında kullanılmamaktaydı. Ancak günümüzde yapılan bazı çalışmalar sonucunda aerodinamik performansın iyileştirilmesi ile birlikte rüzgâr enerjisinde kullanılmasına başlanmıştır(Mojola, 1985).

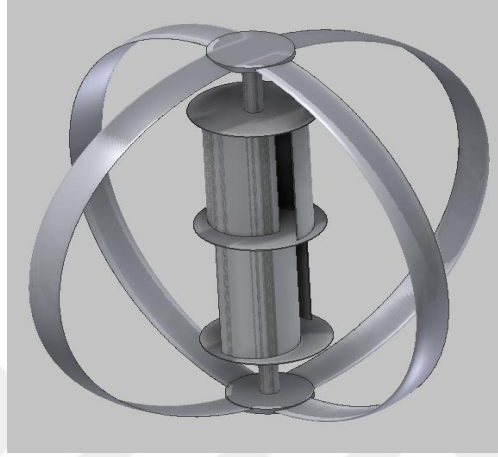
1.8.2 Darrieus Rüzgâr Türbini

İcadı 1931 yılında gerçekleştirilen Darrieus rüzgâr türbinleri ismini, mucidi olan Fransız mühendis George J.M. Darrieus tarafından almıştır. Kanat yapısının düzgün ve aerodinamik olarak geometrik formlu olması bu türbinin en önemli özelliğidir. Darrieus rüzgâr türbinleri kanat yapısı sayesinde yüksek performansa sahiptir. Ancak ilk hareket için tahrik motoru gerekmektedir. Kanatlar türbin mili üzerinde elips oluşturacak şekilde ve düşey olarak yerleştirilmiştir. Çalışma prensibi elips yapıdaki kanatların içbükey ve dışbükey yüzeyleri arasındaki çekme kuvveti farkıyla oluşur. Darrieus tipi rüzgâr türbinlerinde, devir başına iki kere en yüksek tork elde edilir (Roshan vd., 2021).

1.8.3 Savonius – Darrieus Kombine Rüzgâr Türbini

Düşey eksenli rüzgâr türbinlerinde yaygın olarak Savonius ve Darrieus tipi türbinler tercih edilmektedir. Ancak iki türbin çeşidi içinde dezavantajlı yönler bulunmaktadır. Darrieus-Savonius rüzgâr türbinlerinin kombine tasarımı(Şekil 1.21) bu dezavantajlıları tolere edebilecek düzeydedir. Savonius tipi türbinlerin başlangıç için ihtiyaç duyduğu tork miktarı azdır ancak verimleri de düşüktür. Darrieus rüzgâr türbinlerinde ise başlangıç için fazla tork gerektirmesine rağmen verimleri de yüksektir. Bu sebeple Darrieus ve Savonius rüzgâr türbinlerinin

bütünleşik kullanımı performansı arttırmayı hedeflemektedir. Yapılan kombine tasarımda Darrieus rüzgâr türbini Savonius rüzgâr türbinini bir tahrik motoru olarak kullanır ve bu sayede başlangıç performansı iyileştirilmiştir fakat diğer bir taraftan sisteme Savonius rotor eklendiğinde yüksek dönme hızındaki güç performansı büyük ölçüde etkilenmektedir. Bunun nedeni esas olarak Savonius rotorunun uç hız oranı ünitelerden büyük olduğunda yüke dönmesidir(Çetin vd., 2019b).



Şekil 1.21 Savonius-Darrieus Kombine Rüzgâr Türbin Yapısı(Espina-Valdés vd., 2022)

1.8.4 Düşey Eksenli Rüzgâr Türbinlerinin Avantaj ve Dezavantajları

Türbin kurulumları rüzgâr hızının artması ve rüzgârın daha istikrarlı bir biçime bürünmesinden dolayı; yüksek kesimlere yapılır. Son zamanlarda mühendislik alanlarındaki uygulamalar ve ortaya konulan projelere bakıldığında rüzgâr kullanılarak gerçekleştirilen elektrik üretiminin büyük bir çoğunluğu yatay eksenli rüzgâr türbinleri vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. Bunun en büyük nedeni ise düşey eksenli rüzgâr türbinlerinin verim olarak yatay eksenli türbinlerin gerisinde kalmasından kaynaklıdır. Ancak yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde; yerden yüksekliğin çok olması sebebiyle olası bir arıza yahut rutin bakım yapma zorunluluğu ile karşı karşıya kalındığında daha fazla maliyet harcanmaktadır. Düşey eksenli rüzgâr türbinlerinin bakımına ilişkin yapılan masraflar ise yok denecek kadar az olup kurulumu da yatay eksenli rüzgâr türbinlerine nazaran oldukça kolaydır. Son yıllarda düşey eksenli rüzgâr türbinlerinin verimini artırmaya yönelik çalışmalar ile yakın gelecekte türbin tercihiinde değişikliğe gidilebileceği düşünülmektedir.

1.9 Literatür Özeti

Yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgâr enerjisi kazanım sistemlerindeki teknolojik gelişmeler; reel enerji maliyetlerini düşürebilecek potansiyele sahiptir. Rüzgâr türbini, rüzgârdan kazandığı kinetik enerjiyi pervanelerinin dönmesi sayesinde mekanik enerjiye, bu mekanik enerjiyi ise elektrik enerjisine dönüştüren bir makine sistemidir. Bir rüzgâr türbini sistemi temelde kule, jeneratör, dişli kutusu, elektronik elemanlar ve pervaneden oluşur. Rüzgârın kinetik enerjisi türbin ile mekanik enerjiye çevrilir. Rotor milinin devir hareketi hızlandırılarak gövdedeki jeneratöre aktarılır. Jeneratörden elde edilen elektrik enerjisi aküler vasıtasıyla depolanarak veya doğrudan alıcılara ulaştırılır.

Rüzgâr türbinleri dönme eksenlerine göre yatay eksenli (HAWT) ve düşey eksenli (VAWT) olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Düşey eksenli rüzgâr türbinlerinde, dönüş eksenini daima rüzgâr yönüne dik olduğundan her yönden gelen rüzgârla çalışabilir. Rüzgâra göre yönlendirme sistemine ve ilk hareket düzenine ihtiyaç yoktur. Ancak verimleri yaklaşık %35 civarında kalan düşey eksenli türbinleri, bu konuda yatay eksenli türbinlerin gerisinde kalmıştır. Son yıllarda verimin artırılması yönünde çalışmalar yapılmaktadır. Bunlardan biri rüzgâr akış yönlendiricileri kullanımıdır. Yukarı akış deflektörü kullanımının türbin veriminde önemli düzeyde artış sağladığı belirtilmektedir (Kim ve Gharib, 2013b; Stout vd., 2017), düşük ortalama rüzgâr hızları için H-rotor tipi dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin basitliği ve kullanım kolaylığı nedeniyle en çekici çözümlerden biri olduğunu belirtmişlerdir. H-rotor tip dikey eksenli rüzgâr türbininde başlangıç torkunu artırmak amacıyla, rotorun altına ve üst kısmına kesik koni biçimli rüzgâr yönlendiricileri kullanılarak yapılan deneysel bir araştırmada, hem statik tork artışı, hem de rüzgârdan güç kazanım oranının arttığı bildirilmiştir (Li vd., 2018). Bu ve benzeri rüzgâr yönlendirme-yoğunlaştırma sistemleri düşey eksenli rüzgâr türbinleri için yapılabilir, ancak yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde çok yüksek olmaları nedeniyle kullanılamaz. Ayrıca “offshore” olarak bilinen açık denizlerde ve büyük göllerde tesis edilecek rüzgâr enerjisi santrallerinde düşey eksenli rüzgâr türbinlerinin tercih edildiği belirtilmektedir (Ghigo vd., 2024). Böylece türbinlerin montaj tabanında, kütlelerinin azaltılmasına olanak veren artan statik stabilite, yüzer temel veya daha büyük bir türbini desteklemek için, türbinlerin daha az

aerodinamik kayıplara sahip olması, türbinlerin birbirine daha yakın kurulması sağlanır ve sonuçta küçük bir kurulum alanı gerektirir.

Diğer taraftan, büyük ölçekli merkezi rüzgâr enerjisi santrallerinin çevresel ve iklimsel etkilerinin incelendiği bir çalışmada, büyük ölçekli rüzgâr santrallerinin iklim koşulları üzerinde potansiyel etkileri bulunduğu kaydedilmiştir. Yapılan simülasyon çalışmaları sonucunda, küresel enerji talebinin %10-15'ini rüzgar enerjisinden karşılamak için kurulacak merkezi büyük ölçekli rüzgar türbinlerinin karada sıcaklığın 1 °C artması yüzey ısınmasına neden olabileceği belirtilmiştir. Bu sebeple merkezi olmayan küçük ölçekli rüzgar türbinlerinin sürdürülebilir bir seçenek olduğu bildirilmiştir(Tummala vd., 2016). Bu makalede, yatay eksenli ve düşey eksenli farklı tipte küçük ölçekli türleri incelenerek bunların performansları irdelenmiştir. Ayrıca rüzgâr türbinlerinin konumlandırılması ile aero-akustik özellikler, çeşitli çalışmalardan ve ülkelerden edinilen deneyimler değerlendirilmiştir. Mikro rüzgâr enerji sistemleri olarak da anılan küçük ölçekli rüzgâr türbinlerinin yaygınlaşmasının bir avantajı da kendi elektriğini kendin üret kapsamındaki rüzgâr türbinlerinin yaygınlaşması ulusal elektrik enerjisi şebekesinden daha az enerji alınması sonucuna götürür. Bu tip sistemlerde bulunan yerin ortalama rüzgâr hızı dikkate alınarak ihtiyaca uygun küçük ölçekli rüzgâr türbinleri, yeterli kapasitedeki aküler, invertör ve diğer elektriksel donanım bulunur. Yapılan bir çalışmada, mikro rüzgâr enerjisi sistemleri, kentsel alanlardaki potansiyel kullanımları tekno ekonomik açıdan değerlendirilmiş, rüzgâr güç yoğunluğu ve diğer parametrelere göre analiz edilmiştir(Celik vd., 2007).

Bilindiği gibi, düşey eksenli türbinleri yönlendirme düzenine gerek olmaksızın her yönden gelen rüzgârla çalışabilmektedir. Bu avantajı yanında önemli bir dezavantajı ise dönme ekseninin bir tarafında pozitif tork elde edilirken diğer tarafında negatif tork ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle negatif (direnç) torku ne kadar azaltılabilirse türbin verimi de artacaktır.

Yapılan bir tez çalışmasında (Aksoy,2017), düşey eksenli rüzgâr türbini için üç farklı kanat tipinde, belirtilen negatif tork bölgesi önüne farklı şekillerdeki rüzgâr yönlendiricileri takılarak verimin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Analizler Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) programıyla yapılmıştır. NACA0015 ve NACA5510 kanat profiline sahip dikey eksenli rüzgâr türbinlerinde, yuvarlak

geometriye sahip rüzgâr düzenleyicisi kullanılması durumunda torkun arttığı, buna bağlı olarak güç katsayısının da arttığı bildirilmiştir.

Düşey eksenli rüzgâr türbininde negatif torku azaltacak diğer bir çözüm, kepçe kanat olarak nitelendirilen yatay eksenle 90°dönebilen kanat tasarımıdır. Gür, M. (2022) tarafından tamamlanan tez çalışması kapsamında yapılan özel şekilli bağlantı sayesinde pozitif tork kazanmak için kanat düşey konuma gelirken 180° açı farkıyla negatif tork tarafında kanat yatay konuma gelerek rüzgara karşı projeksiyon alanı azalmaktadır. Böylece, türbin milinden net tork kazanılmıştır. Tasarım ve prototip imalatı gerçekleştirilen bu türbinin deneyleri amaca uygun rüzgar kanalı olmadığından bir araç üstüne monte edilerek araç hızıyla sağlanan rüzgardan yararlanılmıştır. Türbin güç katsayısının (C_p) 25-50 d/dak. çalışma aralığında 0,25 dolayında olduğu belirtilmiştir(Gür, 2022.).

Savonius tip düşey eksenli 12 kanatlı düşey eksenli prototip bir rüzgar türbini imal edilerek sonuçlarının irdelendiği tez çalışmasında ise üretilen elektriksel güç, güç katsayısı (C_p), kanat uç hız oranları bulunmuştur (Güler, 2019.). MATLAB Simulink programı analizler yapılmış ve $C_p = 0.02$ değerle çok düşük çıkmıştır. Daha sonra türbin milinin devir sayısını 4 kat artıracak V- Kayış kasnak sistemi bağlanmıştır. Yeni durumdaki deneylerde C_p değerlerinin 0,23 – 0,33 arasında bulunduğu kaydedilmiştir.

Acar, M. (2013) tarafından yapılan tez çalışmasında, Savonius rüzgâr türbini performansının artırılması hedeflenmiştir. Bu amaçla geliştirilen tasarımda, helezonik yapıda düzenlenmiş çok kademeli, hava akımı etkisiyle açılabilen kanatçıklara sahip pencereci türbin tasarımı ve prototip imalatı yapılarak deneysel, teorik analizler yapılmıştır. Sonuçta, düşük rüzgâr hızlarında (1-4 m/s) bile çalışabildiği ve helezonik yapıda dizilmiş pencerelerdeki kapakçıkların çalışma hızını artırdığı bildirilmiştir(Acar, 2013.).

Sunulan bu çalışmadan farklı, düşey eksenli üç düzlem kanatlı her kanadın içerisinde düşey eksenle belirli açılarda döndürülerek sabitlenen 2 kanatçıklı bir türbin ile (Muttagi vd., 2018) tarafından yapılmış bir optimizasyon çalışmasında kapakçık açılma açısının 30 olması durumunda türbin veriminin daha iyi olduğu, ayrıca kapakçıkların düz olmayıp kavisli olmasının daha avantajlı olduğu belirtilmiştir.

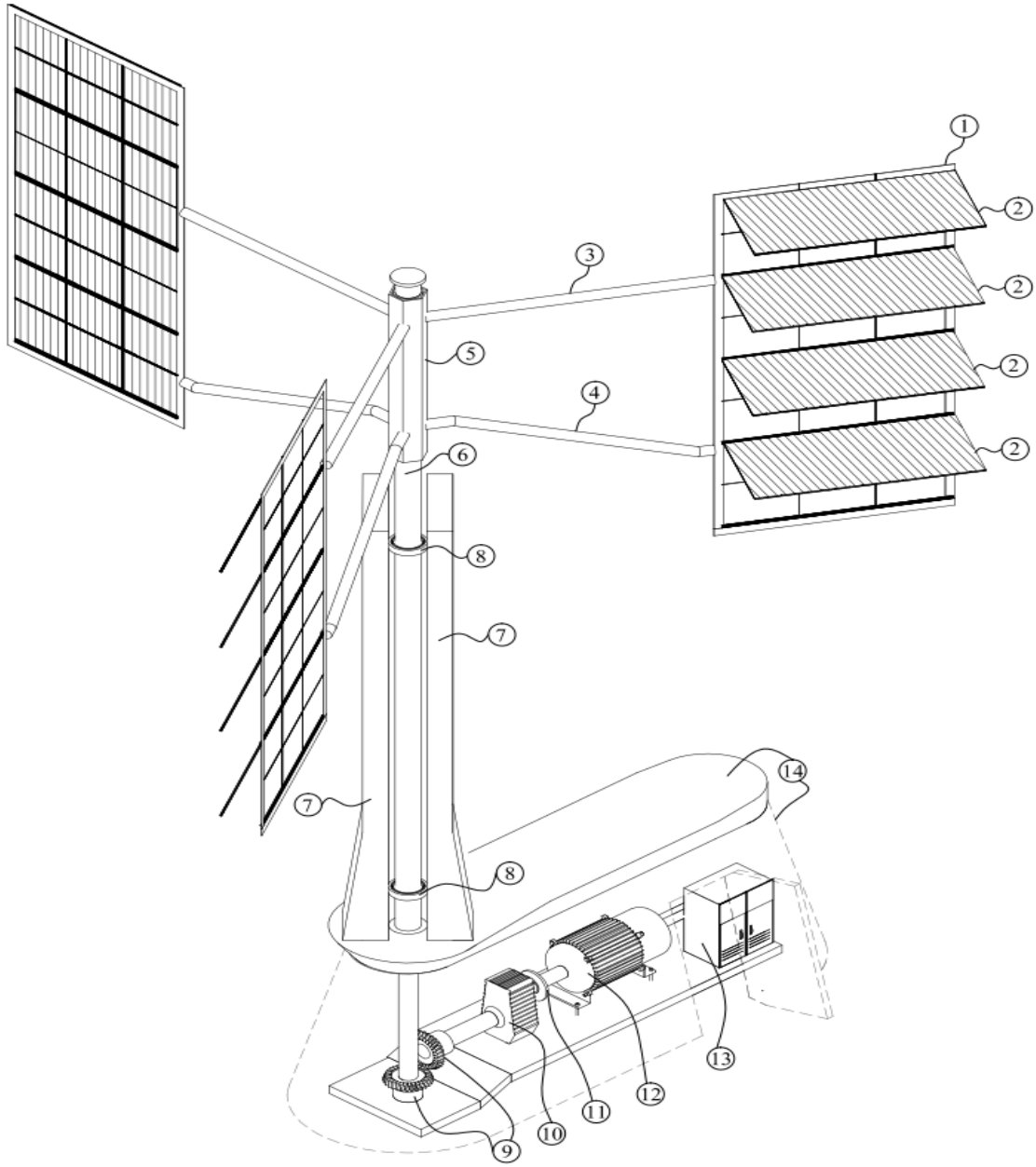
Bu araştırmada ise dūřey eksenli, 3 kanatlı, kanatlar üzerinde tek yönlü açılabilir kanatçıklara sahip küçük ölçekli bir rüzgâr türbini imal edilerek çalışma karakteristikleri ve verimi ortaya konmuştur. Rüzgâra dik doğrultuda olan düz kanatlar sayesinde trbın milinden yüksek tork (döndürme momenti) elde edilebilmektedir. Bu zellik, rüzgâr türbininden daha fazla mekanik ve elektriksel g elde edileceği anlamına gelir. Ayrıca, trbın mili dūřey konumda olduğundan g aktarma sistemi, dişli kutusu ve jeneratör grubu kule altında olacaktır. Bu zellik bakım onarım, kontrol ve işletmecilik açısından kolaylıklar sağlar. Bu rüzgâr türbini, mevcut dūřey eksenli rüzgâr türbinlerine göre daha yüksek verimle çalışabilecek yapısal özelliklere sahiptir.

Betz limiti ilk olarak Alman fizikçi Albert Betz tarafından 1919 yılında ortaya atılmıştır ve bu limit kendi ismiyle özdeşleşmiştir. Betz yasası rüzgâr akışından enerjii alan bir iletim diski vasıtasıyla hava akışının momentumu ve kütlesinin korunma prensibinden türetilmiştir. Betz yasasına göre hiçbir trbın rüzgâr kinetik enerjisinin 16/27 (0,593) oranından daha fazlasını kullanamaz. Diėer bir ifade ile rüzgâr kinetik enerjisinin maksimum %59,3' rüzgâr türbini ile mekanik enerji şeklinde kazanılabilir. Gerçekte rüzgâr türbinleri bu değere ulaşamazlar. Genel olarak rüzgâr trbın verimi %35 – %45 arasındadır (*De Lellis vd., 2018*). Ama son yıllardaki çalışmalar ile birlikte birçok rüzgâr türbininde % 50 verime ulaşıldığı belirtilmektedir. Diėer taraftan, yapılan bir araştırmada trbın veriminin aslında türbinden çıkan rüzgâr hızındaki azalışa bağlı olduğu bildirilmiştir (*Khan, 2020*). Bu sonuç Betz limitini değiştirecek eğilime sahiptir. Nitekim (*Tummala vd., 2016*) yaptıkları çalışma sonucunda yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde verimin % 50-60 arasına, dūřey eksenli rüzgâr türbinlerinde ise % 70 dolayına çıkabileceğini belirtmişlerdir. Bu araştırmalar, rüzgâr enerjisini daha yüksek oranda kazanabilecek, Betz limitinin aşıldığı yeni ve farklı rüzgâr türbinleri geliştirilebileceğini göstermektedir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1 Tasarım Aşaması

İlk olarak; düşündüğümüz rüzgâr türbini için literatür araştırmaları yapıldı. Bu araştırmalar neticesinde tasarlanan, açılıp/kapanabilen kanatçıklı düşey eksenli rüzgâr türbini Şekil 2.1 de gösterilmiştir. Türbin elemanları ve çalışma prensibi aşağıda açıklanmıştır.



Şekil 2.1 Açılıp Kapanabilen Kanatçıklı Düşey Eksenli Rüzgâr Türbin Tasarımı

1	KANATLAR
2	KANATÇIKLAR
3	BAĞLANTI KOLLARI
4	BAĞLANTI KOLLARI
5	TÜRBİN GÖBEĞİ
6	KUVVET İLETİM MİLİ
7	KOVAN

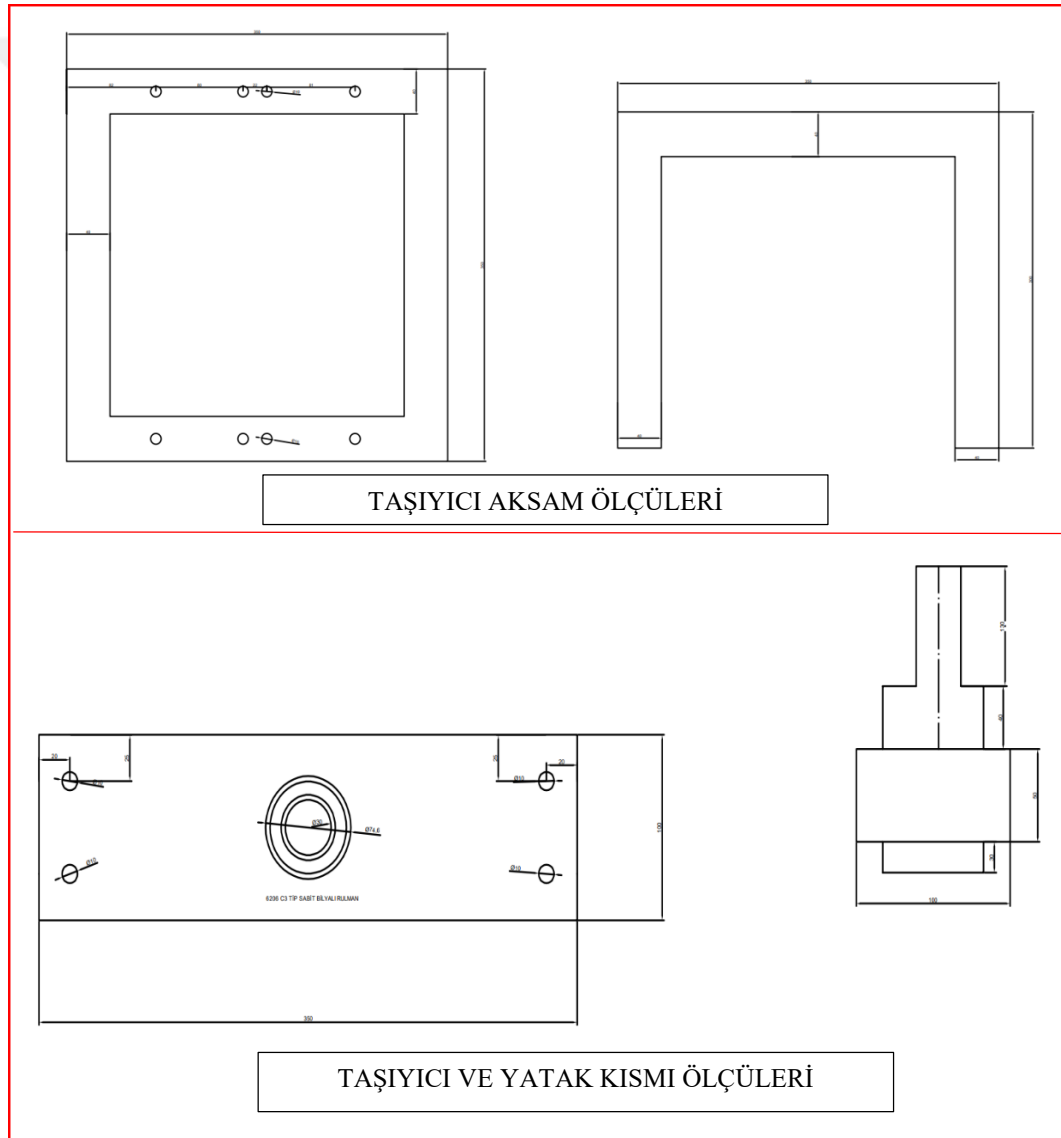
8	YATAKLAR
9	KONİK DİŞLİ
10	DİŞLİ KUTUSU
11	KAVRAMA VE EMNİYETSİSTEMİ
12	JENERATÖR
13	ELEKTRİK KONTROL PANOSU
14	MUHAFAZA KABİNİ

Düşey eksenli rüzgâr etkisiyle açılıp kapanabilen kanatçıklı rüzgâr türbininde dikdörtgen şekilli, içinden rüzgârın geçebileceği tel panel şeklinde kanatlar bulunmaktadır. Bu kanatların üzerinde sadece tek yönlü düşey konumda açılabilen hafif malzemeden yapılan kanatçıklar mafsallı olarak bağlıdır. Tel panel tarafından gelen rüzgârın etkisiyle kanatçıklar açılarak rüzgâra karşı direnç oluşturmaz. Ancak kanatçıklar tarafından gelen rüzgârın etkisiyle bu defa kanatçıklar, tel panel kanadın üzerine gelerek kapanır. Bu şekilde, türbin kanatlarının konumuna göre kanatçıklar açılıp veya kapanarak hareket ederler. Kanatçığın kapalı konumunda rüzgâra karşı kapalı bir alan oluşur ve kanat üzerinde rüzgâra dik alanla orantılı rüzgâr itme kuvveti elde edilir. Bu itme kuvveti kanadın bağlantı kolları ile türbin göbeğine, buradan da bağlı olduğu mil üzerine dönme momenti (tork) uygulayarak mekanik güç elde edilir. Kanatçıklar rüzgârın sadece tel panel tarafından gelmesi durumunda açılmaktadır. Bu konum dışında kendi ağırlıklarının etkisiyle kapanmaktadır. Kanadın rüzgâr doğrultusuna geldiği (etkisiz) konumlarda ise kanatçıklar açılmaz ve rüzgâra karşı direnç de oluşturmaz. Tek yönlü açılabilen kanatçıklara sahip türbin kanatları, dönme açısına bağlı olarak ardışık şekilde açılıp kapanarak çalışır.

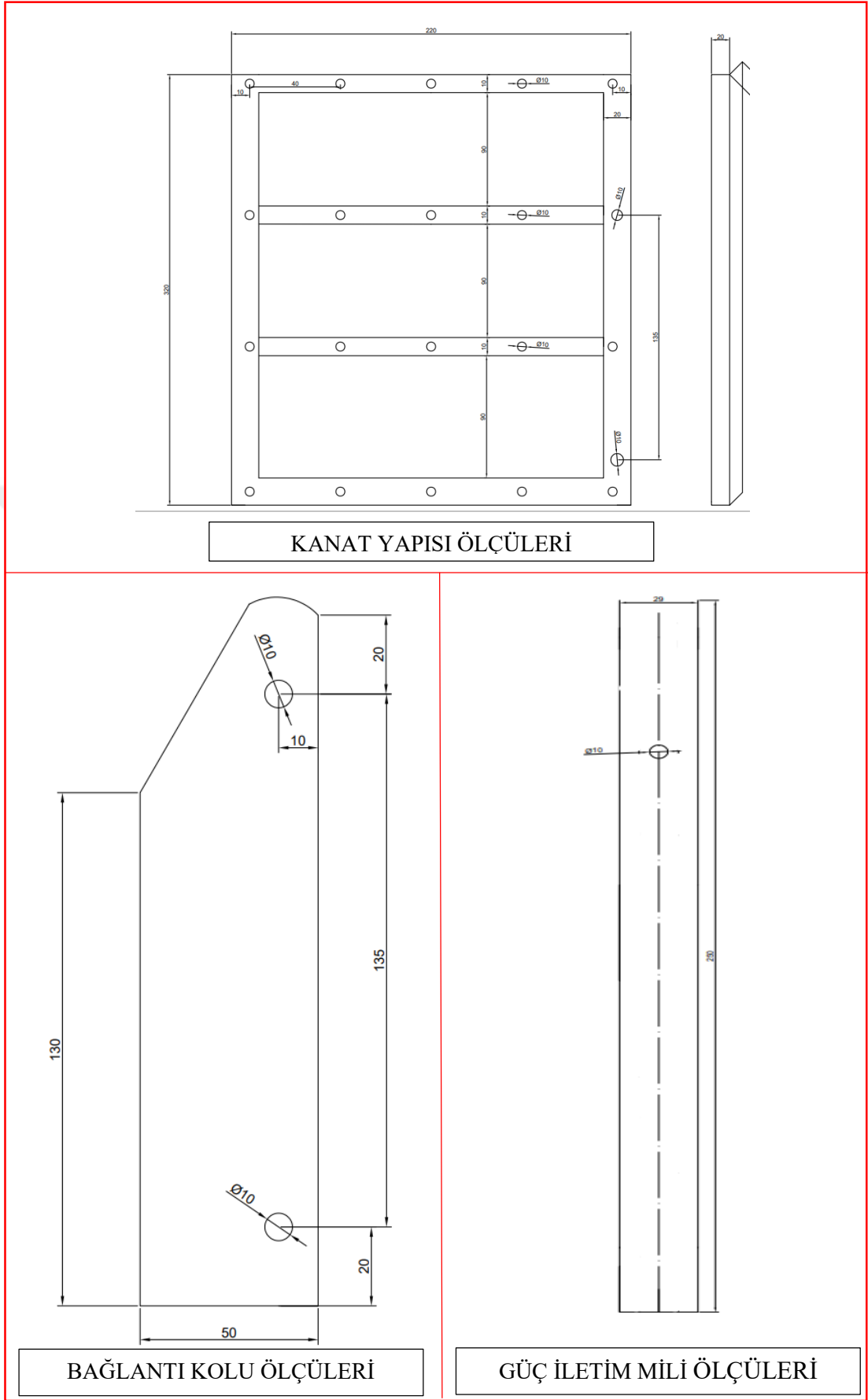
Türbin mili kovan şeklindeki kule içinde yataklandırılmıştır. Bu şekilde türbin kulesi içinden alta gelen hareket konik dişli çiftiyle dişli kutusuna, kavrama ve emniyet sistemi aracılığı ile jeneratöre iletilerek elektrik enerjisine dönüşüm sağlanmaktadır. Üretilen elektrik enerjisi kontrol ünitesinden kullanıma sunulur. Rüzgâr türbini kulesi altında bulunan aktarma ve dönüşüm sistemleri için bir muhafaza kabini bulunur.

2.2 Açılıp/Kapanabilen Kanatçıklı Düşey Eksenli Rüzgâr Türbini İmalat Aşaması

Rüzgâr türbinimizin imalatına başlamak için ilk olarak türbin parçalarının teknik çizimlerini gerçekleştirdik. Projede yaptırılacak küçük ölçekli rüzgâr türbininde mekanik güç ve türbin çalışma karakteristikleri ölçüleceğinden; Şekil 2.1’de verilen 9-14 numara arasındaki elemanlar yer almamıştır. Deneysel çalışmaların yapılması esnasında taşıma kolaylığı sağlaması bakımından kanat, kanatçık ve bağlantı kollarının bulunduğu bölüm ayrı bir parça olarak tasarlanmıştır. Türbin parçalarının teknik çizimleri ölçüleri ile birlikte aşağıda gösterilmiştir (Şekil 2.2 ve Şekil2.3).

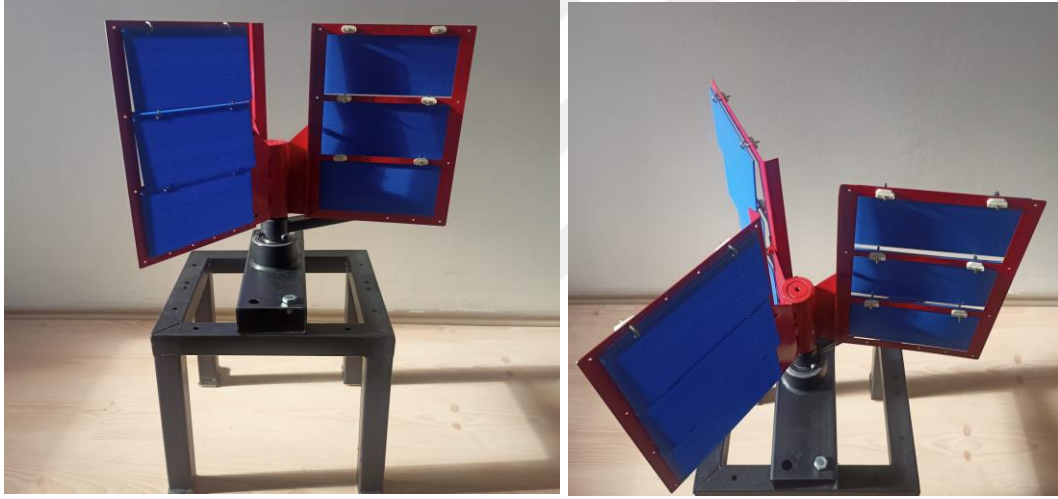


Şekil 2.2 Türbin Taşıyıcı ve Yatak Bölümü Çizim ve Ölçülendirmesi



Şekil 2.3 Hareketli Mekanizmaların Teknik Çizim ve Ölçülendirmesi

Türbin imalatında taşıyıcı ve yatak kısmının bulunduğu bölüm 40*40 profilden imal edilmiştir. Yatak kısmında her iki tarafı korumalı iç çapı 30mm RSR marka 6206 C3 tip sabit bilyalı rulman kullanılmıştır. Kuvvet milinde ve türbin göbeğinde kolay işlenebilme özelliğinden kaynaklı transmisyon çeliği tercih edilmiştir. Bağlantı kolları ve kanatlar ise DKP 2 mm sacdan yapılmıştır. Kanatçıklar için ise hafif bir malzeme olan oluklu polipropilen levhadan yapılmıştır. Bu çalışmada tasarım ve imalatı tamamlanan rüzgâr türbini aşağıdaki resimlerde görülmektedir (Fotoğraf 2.1.). Mavi renkli oluklu polipropilen levhadan yapılan kanatçıklar kanatlar üzerindeki yerlerine takılmış durumdadır. Bu kanatçıklar rüzgârın etkisiyle tek yönde açılmakta, diğer yönde kanat üzerine kapanarak rüzgârdan enerji kazanmaktadır.



Fotoğraf 2.1 Rüzgâr Etkisiyle Açılıp Kapanabilen Kanatçıklı Düşey Eksenli Rüzgâr Türbini

2.3 DeneySEL Çalışmalarda Kullanılan Fan ve Ortalama Hız Değerlerinin Belirlenmesi

DeneySEL çalışmalar Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği laboratuvarında bulunan ve 4 adet pervaneden oluşan rüzgâr fan grubu kullanılmıştır (Fotoğraf 2.2). Fan grubu TÜBİTAK 121R080 nolu “2 kW Gücünde Zıt Devrimli Çift Rotorlu Rüzgâr Türbininin Aktif Tork Dağılımı Kontrolü ” 1001 Araştırma projesi kapsamında yaptırılmıştır. Fanların çalışma hızı kademesiz olarak ayarlanabilmektedir. Ön deneyler

sonucunda hız kademeleri belirlenmiş, böylece istenen rüzgâr hızı kademeleri ile deneyler yapılmıştır. Türbin boyutu küçük olduğundan sadece bir adet fan çalıştırılarak deneyler yapılmıştır.



Fotoğraf 2.2 Deneyisel Çalışmaların Yapıldığı Fan ve Küçük Ölçekli Prototip Rüzgâr Türbini.

Çalışmalarda kullanılan rüzgâr hızları, türbine etkiyen projeksiyon alanı içerisinde 9 farklı noktadan ölçülerek ortalama hızlar hesaplanmıştır. Hava hızının ölçümünde UNI-T UT363S tip el anemometresi kullanılmıştır (Fotoğraf 2.3).



Fotoğraf 2.3 Rüzgâr Hızı Ölçümünde Kullanılan El Anemometresi

2.4 Kuvvet Ölçme Yöntemi

Yaptırılan küçük ölçekli rüzgâr türbinine uygun bir tork ölçme cihazı bulunmadığından özel olarak imal edilmiş ayarlanabilir bir moment kolu vasıtasıyla kuvvet ölçülerek tork değerleri hesaplanmıştır. Kuvvet ölçümü için 0,1 N duyarlılığa sahip Geratech 20 N dinamometre kullanılmıştır (Fotoğraf 2.4). Moment kolu üzerinde dinamometre bağlamak için 4 adet farklı noktalarda delik bulunmaktadır. Bu deliklerin merkeze uzaklıkları 120 mm, 180 mm, 200 mm, 220 mm'dir. Deney aşamasında şartlara bağlı olarak uygun olan, merkezden 120 mm uzaklıktaki delik kullanılarak dinamometre bağlanmıştır. Bağlanan dinamometre ile kuvvet kolu 90° açıdayken ölçülen kuvvet miktarı ile kuvvet kolu uzunluğunun çarpılması sonucunda tork miktarı hesaplanmıştır.



Fotoğraf 2.4 Kuvvet Ölçümünde Kullanılan Dinamometre ve Bağlantı Parçaları

2.5 Teorik Güç(P_t) Hesaplama Yöntemi

Teorik güç 2.1. eşitliğinden hesaplanmıştır Mekanik güç ise kuvvet ölçümünden hesaplanmıştır.

Teorik Güç (P_t) Hesabı; Rüzgârın teorik gücü (P_t) aşağıdaki eşitlikten hesaplanmıştır.

$$P_t = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (2.1)$$

$P_t = \text{Teorik Güç (W)}$

$\rho = \text{Hava Yoğunluğu (kg/m}^3\text{)} (1,22 \text{ kg/m}^3 \text{ olarak alınmıştır.})$

$A = \text{Türbin Projeksiyon Alanı (m}^2\text{)}$

$V = \text{Rüzgar Hızı (m}^3\text{/s)}$

Rüzgar türbini için üç farklı projeksiyon alanı (A) baz alınarak teorik güç hesabı yapılmıştır. Hesaplamada kullanılan alanlar;

1. Kanatların ve bağlantı kollarının döndüğü toplam silindirik hacmin projeksiyon alanı (A_1),

$$A_1 = 0,56 \times 0,32 = 0,179 \text{ m}^2,$$

2. Sadece kanatların döndüğü silindirik hacmin projeksiyon alanı (A_2),

$$A_2 = 2 (0,32 \times 0,22) = 0,141 \text{ m}^2$$

3. Kanatlardaki aktif alanlara karşı gelen projeksiyon alanı (A_3),

$$A_3 = 3(0,09 \times 0,18)^2 = 0,097 \text{ m}^2$$

2.6 Mekanik Güç (P_m) Hesaplama Yöntemi

Türbinden kazanılan mekanik güç (P_m) hesabında tork kolunda ölçülen kuvvet (F) değerlerinden tork büyüklükleri hesaplanmıştır. Daha sonra ölçülen çalışma devir sayıları kullanılarak güç değerleri bulunmuştur:

$$T = F \times l \quad (2.2)$$

$T = \text{Tork Değeri (Nm)}$

$F = \text{Ölçülen Kuvvet Değeri (N)}$

$l = \text{Tork kolu uzunluğu (Deneylerde 0,12 m kullanılmıştır.)}$

Aktif konumdaki kanat üzerine gelen rüzgârdan elde edilebilecek maksimum tork (T_{max}) değerlerine karşı gelen F_{max} kuvvetleri, kanadın rüzgâra dik olduğu konumda ölçülmüştür. Bu değerlerden maksimum tork değerleri hesaplanmıştır.

$$T_{max} = 0,12 \times F_{max} \quad (2.3)$$

$$P_m = T_{max} \cdot \omega \text{ ve } \omega = (2 \cdot \pi \cdot n) / 60 ; \quad (2.4)$$

$$P_m = T_{max} \cdot (\pi \cdot n) / 30 \quad (2.5)$$

$$P_m = \text{Mekanik Güç (W)}$$

$$\omega = \text{Açısal Hız}$$

2.7 Verim Hesaplama Yöntemi

Küçük ölçekli prototip rüzgâr türbinin verimini belirlemek için, sürtünme frenleme sistemiyle moment koluna etkiyen kuvvetler ve çalışma dönü sayılar ölçülmüş, bu değerler kullanılarak türbin miline etkiyen tork değerleri hesaplanmıştır. Daha sonra mekanik güç hesaplanmıştır. Hesaplanan güç değerleri türbin projeksiyon alanından elde edilebilecek teorik güce (P_t) oranlanarak türbin verimi değerleri hesaplanmıştır.

Türbin verimi (η),

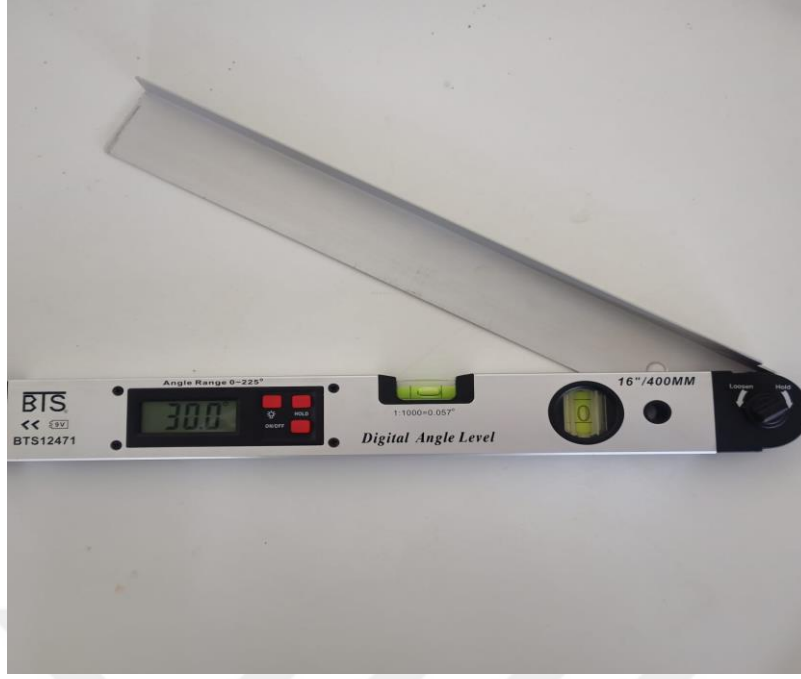
$$\eta = P_m / P_t \quad (2.6)$$

Oranlanarak hesaplanmıştır.

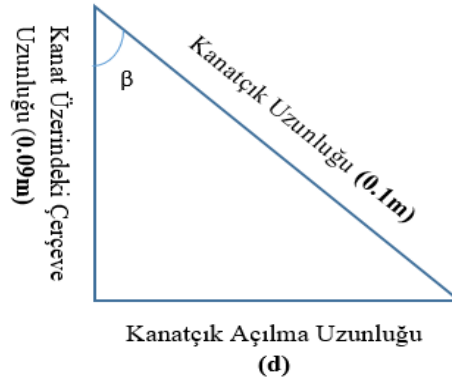
2.8 Belirli Açılarla Sabitlenmiş Kanatlar İçin Kanatçık Açılma Açılarının Hesaplanması

Rüzgâr türbini 3 kanatlı ve her kanat arasında 120° açı farkı bulunduran bir yapıya sahiptir. Her kanat üzerinde menteşeli 3 adet kanatçık bulunmaktadır. Kanatçıklar; kanadın 0° - 180° arasındaki konumunda kapalı durumda, 180° - 360° arasındaki konumda ise farklı açılarda açılmaktadır.

Kanatçıkların açılma değerlerini hesaplamak için ilk olarak; kanatları 180° den sonra 30° açı farkları ile sabitleyip, her açı konumunda kanatçıkların kanat mesafesinden uzaklığı ölçülmüştür. Deneyler 3 farklı hız değerinde gerçekleştirilmiştir ve her hız değeri için 3 kez tekrarlama yapılmıştır. Elde edilen uzaklık mesafelerinin ortalama değerleri alınarak açı değerleri hesaplanmıştır. Kanatların açı değerleri BTS Marka dijital açıölçer ile ölçülmüştür.



Fotoğraf 2.5 Kanat Açısı Ölçümünde Kullanılan Açıölçer



Şekil 2.4 Kanat Pencerelerinin Açılma Uzunluk Hesabı

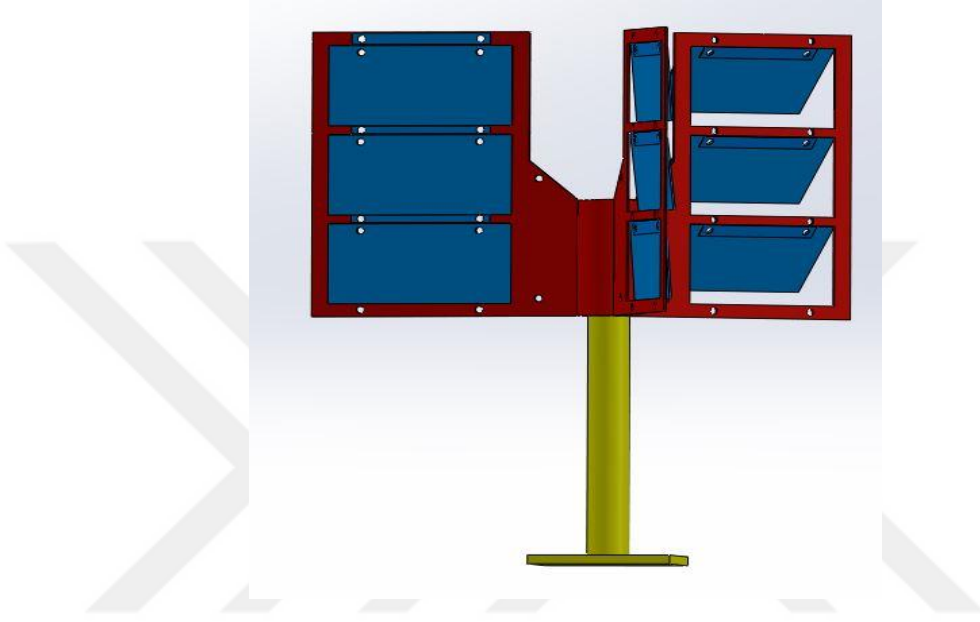
Kanatçıkların β açılma derecesi hesabı için; d mesafesi ölçümleri yapıldıktan sonra $\sin\beta$ değerinden açı değeri hesaplanmıştır.

$$\sin\beta = \frac{\text{Kanatçık Açılma Uzunluğu } (d)}{\text{Kanatçık Uzunluğu } (0.1m)} \quad (2.7)$$

$$\beta = \text{ArcSin}\left(\frac{\text{Kanatçık Açılma Uzunluğu } (d)}{\text{Kanatçık Uzunluğu } (0.1m)}\right) \quad (2.8)$$

2.9 Türbin Akış Simülasyon Analizi

Açılıp kapanabilen kanatçıklı rüzgar türbininden optimum şartlar altında elde edilebilecek güç değerlerinin analizi için; Solidworks programının Flow Simulation eklentisinden yararlanılmıştır. Akış simülasyonu için ilk olarak türbinin Solidworks ortamında 3 boyutlu çizimi yapılmıştır. Yapılan tasarım şekil 2.5 de gösterilmiştir.



şekil 2.5 Akış Simülasyonu İçin Tasarımı Gerçekleştirilen Açılıp Kapanabilen Kanatçıklı Rüzgâr Türbini

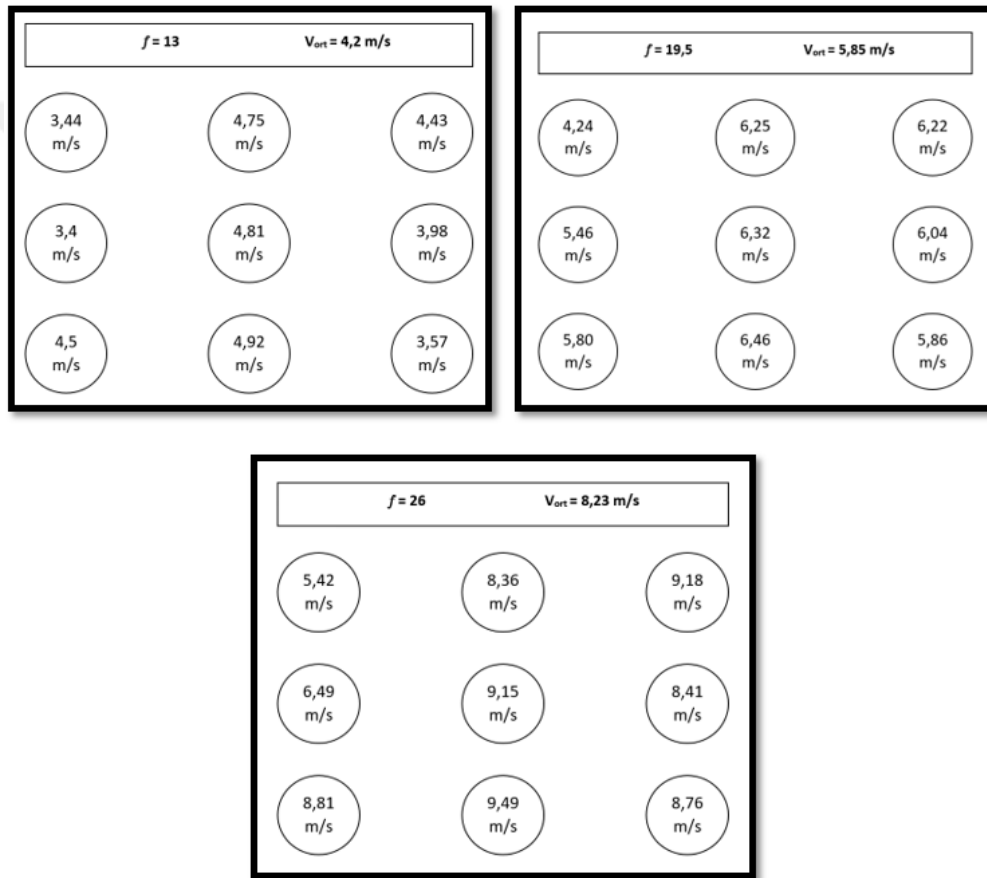
Analiz için; deneysel ölçümlerde kullanılan 3 farklı hız değeri (4,2m/s, 5,85 m/s, 8,23 m/s) kullanılmıştır. Türbinin akış simülasyon analizi, i akış ortamında bir rüzgar tüneli içerisinde gerçekleştirilmiştir. Zamana bağlı olarak gerçekleştirilen analizler sonucunda; optimum şartlar sağlandığında türbinden elde edilebilecek güç değerleri bulunmuştur.

3. BULGULAR

3.1 Türbin Projeksiyon Alanındaki Hava Hızı Ölçüm Sonuçları

Türbinle yapılan deneysel çalışmalarda rüzgar hızı laboratuvarında 120 cm çapındaki fan tarafından sağlandığı için türbin projeksiyon alanına etkiyen hava hızları 9 ayrı lokasyonda ölçülerek ortalama hız hesaplanmıştır.

Deneysel çalışmalar 3 farklı frekans ayarında gerçekleştirilmiştir. Her bir frekans değeri için akış alanı içerisinde ölçülen rüzgâr hızları ve o frekans için elde edilen ortalama hız değeri aşağıda gösterilmiştir(Şekil3.1).



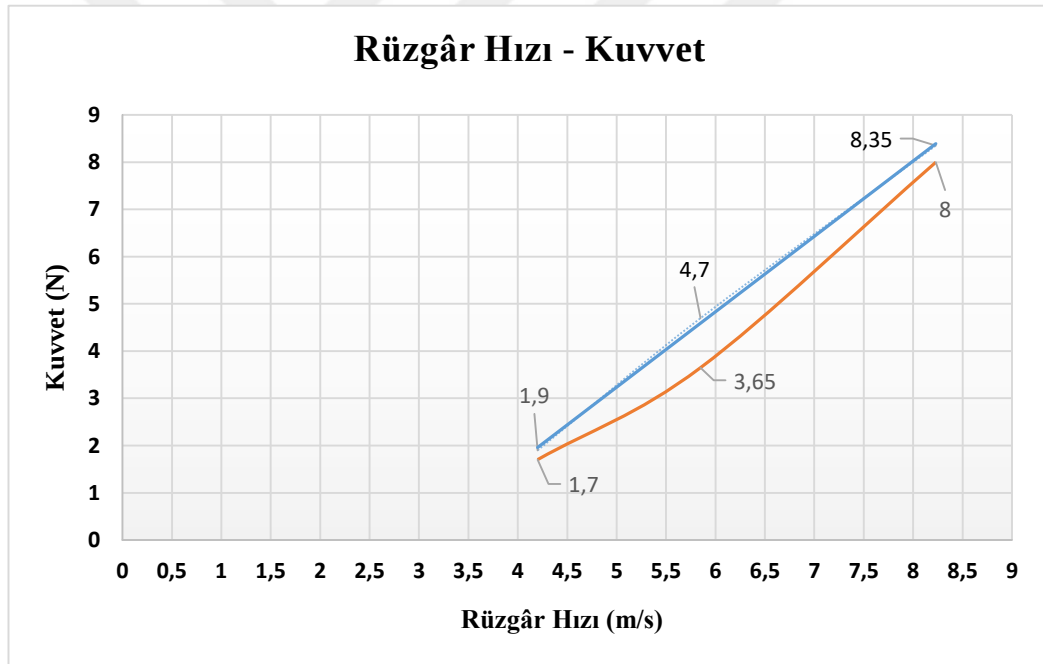
Şekil 3.1 Üç Farklı Frekans Değeri İçin Akış Alanı İçerisinde Ölçülen Hızlar ve Elde Edilen Ortalama Hız Değerleri

Açılıp kapanabilen kanatçıklı düşey eksenli rüzgâr türbini ile 3 farklı rüzgâr hızında; dirençsiz ve direnç altında elde edilen kuvvet miktarları ölçülmüştür. Hesaplamalarda türbinin dirence maruz bırakıldığında elde edilen kuvvet değerleri (F_{ort}) kullanılmıştır. Yapılan deneylerde ölçülen kuvvet değerleri ve her hız değeri için ölçülen türbin dönü sayıları Tablo 3.1 de gösterilmiştir. Bu tabloda rüzgâr hızı arttıkça maksimum ve ortalama kuvvet değerlerinin arttığı görülmektedir.

Tablo 3.1 Üç Farklı Rüzgâr Hızında Ölçülen Ortalama ve Maksimum Kuvvet Değerleri

Rüzgâr Hızı, m/s	Maksimum Kuvvet Değeri ($F_{\max}$), N	Ortalama Kuvvet Değeri (F_{ort}), N	Türbin dönü sayısı (n), d/dak.
4,20	1,90	1,70	55
5,85	4,70	3,65	60
8,23	8,35	8,00	52

Çalışmaların yapıldığı 3 farklı rüzgâr hızı için elde edilen kuvvet değerleri grafik haline getirilmiştir (Şekil 3.2). Grafikte rüzgâr hızı arttıkça elde edilen kuvvet miktarının doğrusal oranda arttığı görülmektedir. Mavi ile gösterilen değerler maksimum, turuncu ile gösterilenler ise ortalama değerleri yansıtmaktadır.



Şekil 3.2. Rüzgâr Hızı-Kuvvet Grafiği

3.2 Türbin Projeksiyon Alanından Elde Edilebilecek Teorik Güç Değerleri

Yöntem bölümünde verilen 2.1. eşitliğinden, belirlenen rüzgâr hızlarında hesaplanan teorik güç değerleri aşağıdaki tabloda özetlenmiştir (Tablo3.2.). Hesaplamalarda havanın öz kütlesi (ρ)= 1,22 kg/m³

Tablo 3.2. Deneylerde Kullanılan Rüzgâr Hızlarında Hesaplanan Teorik Güç (P_t) Değerleri.

Rüzgâr Hızı (v), m/s	A ₁ Alan Değeri için Teorik Güç (P_t), W	A ₂ Alan Değeri için Teorik Güç (P_t), W	A ₃ Alan Değeri için Teorik Güç (P_t), W
4,20	8,09	6,37	4,38
5,85	21,86	17,22	11,85
8,23	60,87	47,95	32,98

3.3 Farklı Rüzgâr Hızlarındaki Deneysel Çalışma Sonuçlarına Göre Hesaplanan Tork ve Verim Değerleri

Kuvvet değerleri, merkeze uzaklığı 120 mm olan kuvvet kolu aracılığıyla ölçüldüğünden, buradan her bir rüzgâr hızı için ortalama tork değerleri hesaplanmıştır. Türbinin rejimde çalışabildiği dönü sayıları (n) dikkate alınarak hesaplanan güç (P_m) değerleri Tablo 3.3. de verilmiştir.

Tablo 3.3. Rüzgâr Etkisiyle Açılıp Kapanabilen Kanatçıklı Rüzgâr Türbini ile Farklı Hava Hızlarında Ölçülen Çalışma Karakteristikleri ve Türbin Verimi

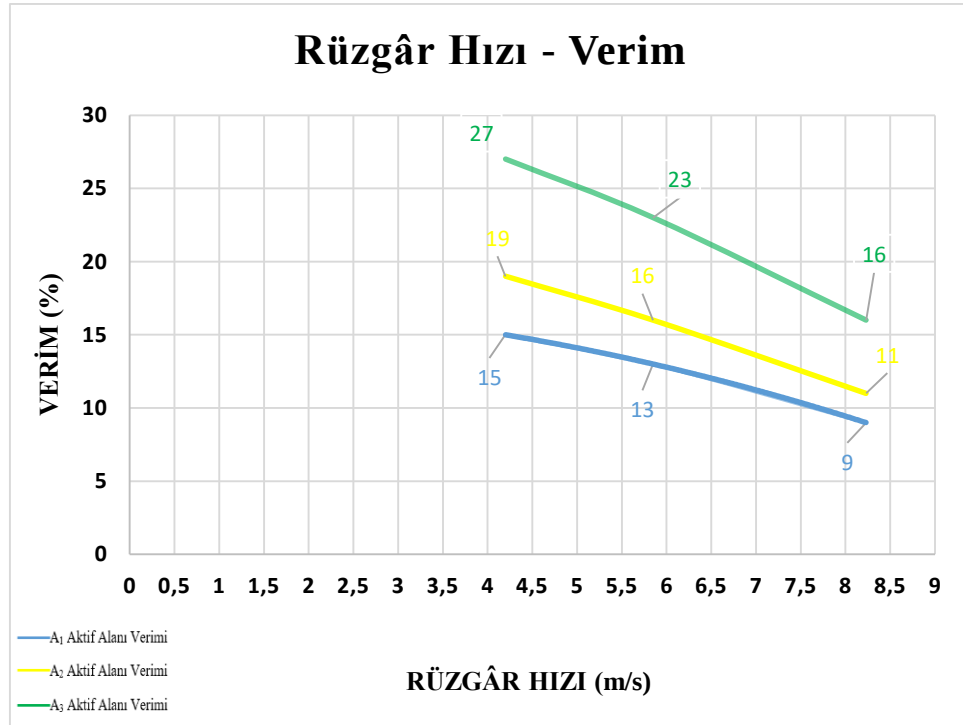
Rüzgâr Hızı, m/s	Türbin dönü sayısı, d/dak.	Kuvvet, N		Ortalama Tork, Nm	Güç, W	Türbin Verimi (η)
		Ort.	Max			
4,20	55	1,70	1,90	0,204	1,18	%15
5,85	60	3,65	4,70	0,438	2,75	%13
8,23	52	8,00	8,35	0,960	5,22	%9

Bu tablodaki verim değerleri elde edilen güç değerlerinin türbinin toplam projeksiyon alanından (A_1) elde edilebilecek teorik güç değerlerine oranlanması ile bulunmuştur. Gerçekte türbin yapısı, kanat ölçüleri ve dönme eksenindeki 10 cm çapındaki boşluk dikkate alınır, bu alanın yöntem bölümünde verildiği gibi sadece türbin kanatlarının döndüğü projeksiyon alanının (A_2) olması gerekmektedir. Ayrıca, deneysel amaçlı olarak küçük ölçekli imal edilen türbinde konstrüktif bazı

özellikler nedeniyle aktif alan oranı % 69 değeriyle düşük düzeyde kalmıştır. Açılıp kapanabilen kanatçıklı türbinin büyük boyutlarda yapılması durumunda aktif alan oranının artacağı açıktır. Bu nedenle sınır değer olarak, kanatlardaki sadece rüzgar geçen pencere alanları (A_3) dikkate alınırsa bu durumda projeksiyon alanı düşeceği için türbin verimi değerleri de artacaktır. Tablo 3.4’de belirtilen farklı türbin projeksiyon alanlarına göre hesaplanan verim değerleri gösterilmiştir. Şekil 3.3’de ise rüzgâr hızı ile türbin veriminin değişimi gösterilmiştir.

Tablo 3.4. Açılıp Kapanabilen Kanatçıklı Rüzgâr Türbininin Farklı Projeksiyon Alanlarına Göre Türbin Verim Değerlerinin Karşılaştırılması.

Rüzgâr Hızı (v), m/s	Türbin Dönü Sayısı (n), d/dak.	Elde Edilen Mekanik Güç (P_m) W	Teorik Güç (P_t), W ve Türbin Verimi (η) Değerleri					
			A_1		A_2		A_3	
			P_t	η	P_t	η	P_t	η
4,20	55	1,18	8,09	%15	6,37	%19	4,38	%27
5,85	60	2,75	21,86	%13	17,22	%16	11,85	%23
8,23	52	5,22	60,87	%9	47,95	%11	32,98	%16



Şekil 3.3. Rüzgâr Hızı-Verim Grafiği

3.4 Akış Simülasyon Analizi Sonucunda Elde Edilen Güç Değerleri ve

Verim Sonuçları

Akış simülasyonunda doğru verilerin elde edilebilmesi amacıyla girdi kısmında;

Akışkanlar: Hava

Akış Tipi: Laminer ve Türbülanslı

Analiz Tipi: İç

Yer Çekimi: $9,81\text{m/s}^2$

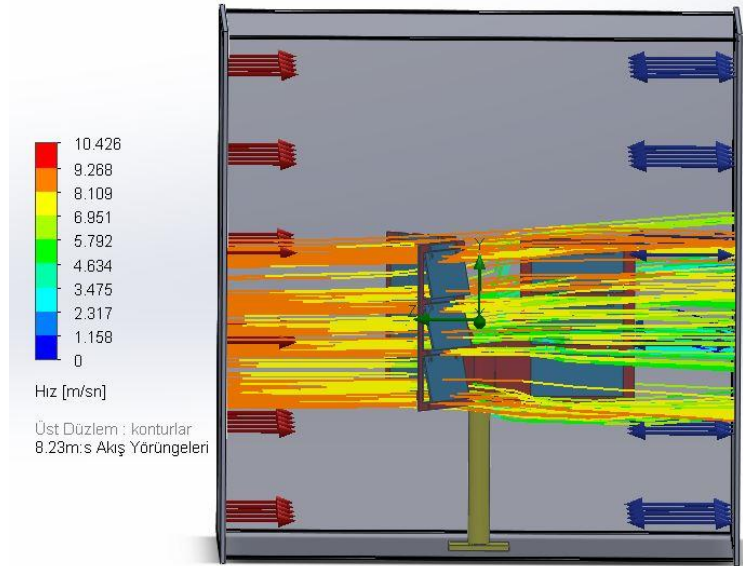
Basınç: 101325Pa

Sıcaklık: 293.2K

Rüzgâr Hızları: Deneysel Çalışmalarında Yapıldığı Hız Değerleri Kullanılmıştır.

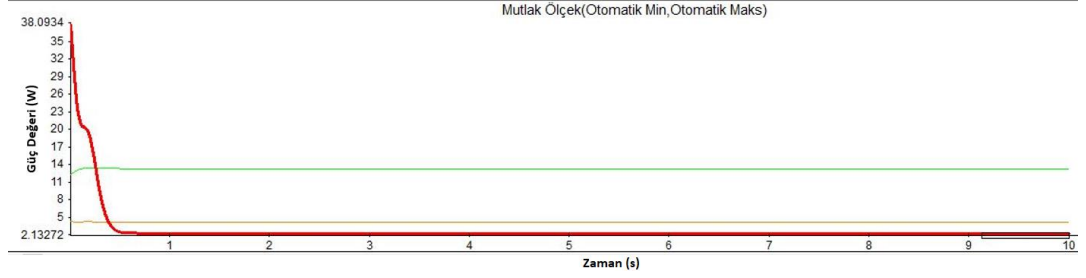
Açışal Hız: 5.7 rad/s (Bu değer türbinin deneysel olarak bulunan rejimde çalıştığı devir sayıları göz önüne alınarak belirlenmiştir. Her hız değeri için bu değer kullanılmıştır.)

Simülasyon sonucu elde edilen hava akış yörüngeleri Şekil 3.4 de, güç değerleri ise şekil 3.5, Şekil 3.6 ve Şekil 3.7 de gösterilmiştir.



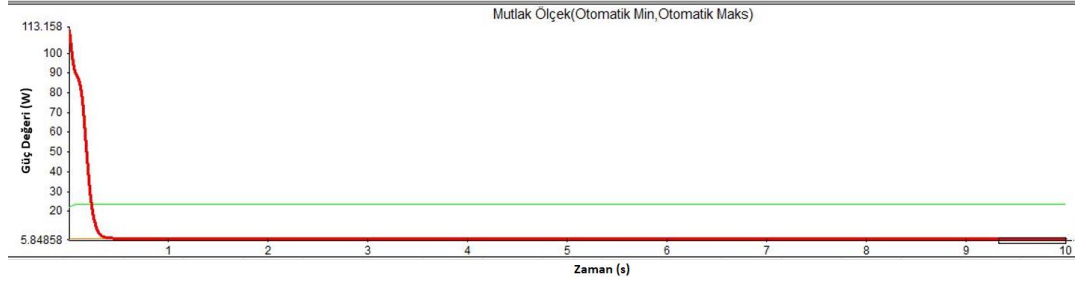
Şekil 3.4. 8.23m/s Rüzgâr Hızı İçin Hava Akış Yörüngeleri

Ad	Mevcut Değer	İlerleme	Kriteri	Ortalama Değer
Güç Değeri	2.19287 W	berçekleştinildi (IT = 64)	5.21396 W	2.20157 W
Ortalama Dinamik Basınç	13.3018 Pa	berçekleştinildi (IT = 64)	0.142406 Pa	13.3035 Pa
Ortalama Hız	4.22705 m/sn	berçekleştinildi (IT = 64)	0.00521898 m/sn	4.22734 m/sn



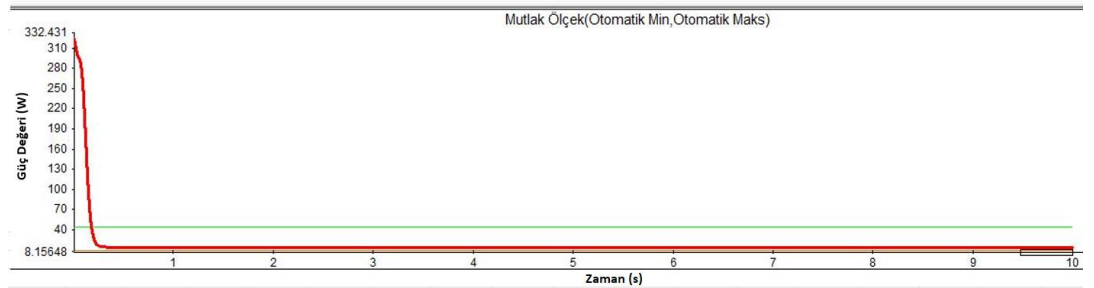
Şekil 3.5. 4.2 m/s Rüzgâr Hızı Girdisi İle Elde Edilen Analiz Değerleri

Ad	Mevcut Değer	İlerleme	Kriteri	Ortalama Değer
Güç Değeri	6.30544 W	berçekleştinildi (IT = 64)	15.67 W	6.28046 W
Ortalama Dinamik Basınç	23.7142 Pa	berçekleştinildi (IT = 64)	0.181804 Pa	23.7137 Pa
Ortalama Hız	5.85397 m/sn	berçekleştinildi (IT = 64)	0.00651398 m/sn	5.8537 m/sn



Şekil 3.6. 5.85 m/s Rüzgâr Hızı Girdisi İle Elde Edilen Analiz Değerleri

Ad	Mevcut Değer	İlerleme	Kriteri	Ortalama Değer
Güç Değeri	13.77 W	berçekleştinildi (IT = 64)	46.5996 W	13.7603 W
Ortalama Dinamik Basınç	44.4144 Pa	berçekleştinildi (IT = 64)	0.248188 Pa	44.4223 Pa
Ortalama Hız	8.23796 m/sn	berçekleştinildi (IT = 64)	0.00794675 m/sn	8.2388 m/sn



Şekil 3.7. 8.23 m/s Rüzgâr Hızı Girdisi İle Elde Edilen Analiz Değerleri

Akış simülasyon analizi sonucunda farklı rüzgar hızlarında elde edilen güç miktarları Tablo 3.5 de gösterilmiştir.

Tablo 3.5. Simülasyon Sonucunda Elde Edilen Güç Değerleri

Rüzgâr Hızı (v), m/s	Simülasyon Sonucunda Elde Edilen Güç Değerleri (P_s), W
4,20	2,20
5,85	6,28
8,23	13,76

Türbinin optimum şartlar altında çalıştığı durumda elde edilebilecek güç değerleri ile teorik güç değerleri Tablo 3.6 da karşılaştırılmıştır.

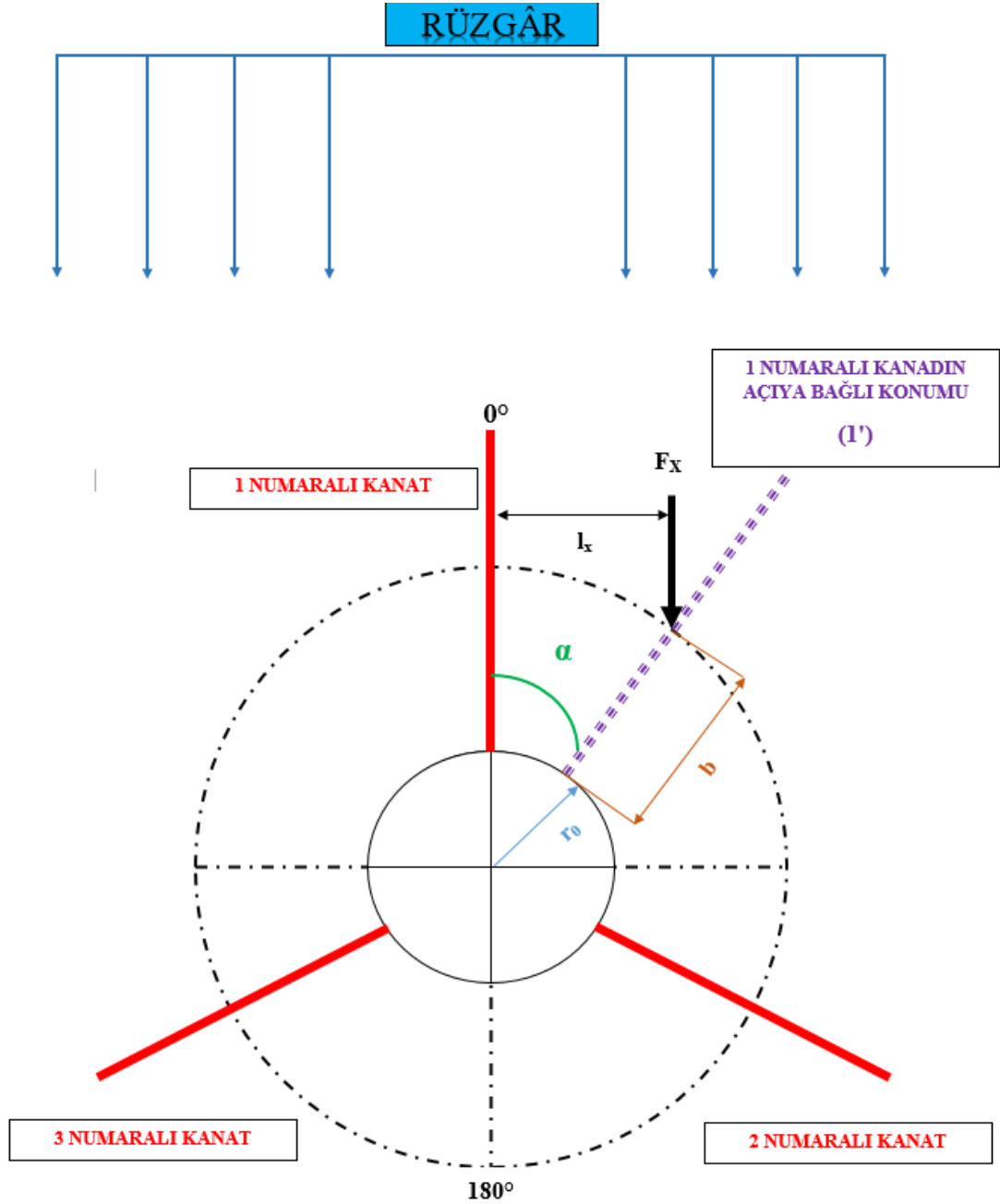
Tablo 3.6. Simülasyon Sonucunda Elde Edilen Güç Değerleri ile Teorik Güç Değerlerinin Karşılaştırması ve Türbin Verimi

Rüzgâr Hızı (v), m/s	Simülasyon Sonucunda Elde Edilen Güç (P_s), W	Teorik Güç (P_t), W	Türbin Verimi, (η)
4,20	2,20	8,09	%27
5,85	6,28	21,86	%29
8,23	13,76	60,87	%23

Simülasyon sonucundan elde edilen veriler temel alındığında; türbin veriminde deneysel sonuçların aksine daha yüksek verim değerlerinin elde edilebileceği görülmüştür.

3.5 Kanat Dönme Açısına ve Kanatçık Açılma Açılarına Bağlı Tork Değişiminin Hesaplanması

Kanat dönme açısına bağlı olarak elde edilecek tork değişimi için gerekli hesaplamalar ve hesaplamaların yapılması için çizilen ve kullanılan görsel aşağıda gösterilmiştir (Şekil3.8).



Şekil 3.8. Kanat Dönme Açısına Göre Kanat Projeksiyon Alanının ve Moment Kolunun Değişimi.

Şekil 3.8.'den aşağıdaki eşitlikler yazılabilir. 1 nolu kanat α açısı kadar döndüğünde x (1') konumundayken:

Tork kolu (l_x);

$$l_x = \sin\alpha \times (r_0 + \frac{b}{2}) \quad (3.1)$$

Kanat projeksiyon alanı (A_x);

$$A_x = |\sin\alpha \times A| \quad (3.2)$$

$A = b \times h$ Burada; b: Kanat genişliği

h: Kanat yüksekliği

Dinamik basınç (P_d) ve Kuvvet değeri (F_x);

$$P_d = \rho \frac{v^2}{2} \quad (3.3)$$

$$F_x = A_x \times P_d, \quad (3.4)$$

$$F_x = (\sin\alpha \times A) \times \rho \frac{v^2}{2} \quad (3.5)$$

α açısında Tork değeri (T_x)

$$T_x = l_x \times F_x \quad (3.6)$$

3.1 ve 3.2 deki eşitlikler 3.6 eşitliğinde yerine konulursa,

$$T_x = [\sin\alpha \times (r_0 + \frac{b}{2})] \times |(\sin\alpha \times A)| \times \rho \frac{v^2}{2} \quad (3.7)$$

Eşitliği elde edilir. Bu eşitlik kanatların α açısı değişimine göre üreteceği tork miktarıdır.

3.5.1 Belirli Açılarla Sabitlenmiş Kanatlar İçin Kanatçık Açılma Açıları

Şekil 3.8 de görüldüğü üzere her kanat 180° den sonra 360° bölgesine kadar rüzgâra karşı gelen bölgede olacaktır. Bu sebeple kanadın üzerinde bulunan kanatçıkların açılması sayesinde rüzgârın oluşturduğu direnç miktarı azalacaktır. Kanatçıkların açılma dereceleri kanadın her açı değeri için farklı konumda olacaktır. Bu nedenle kanadın 180° den sonraki her 30° açı farkıyla hareketi sabitlenmiş ve bu konumdaki kanatçık açılma mesafeleri ölçülmüştür. Bu sayede kanat dönme açısına bağlı değişen kanat alanı hesaplamasında bu değerler

kullanılmıştır. Kanatçık açılma mesafeleri 3 farklı hız değeri için 3 kez ölçülmüştür ve ortalama değeri hesaplanmıştır. Elde edilen kanatçık açılma mesafeleri ve hesaplanan ortalama değerler Tablo 3.7 de gösterilmiştir.

Tablo 3.7. Belirli Açılarda Sabitlenmiş Kanat için Farklı Rüzgâr Hızlarında Ölçülen Kanatçık Açılma Mesafeleri

KANATÇIK AÇILMA MESAFELERİ (m)		Rüzgâr Hızı (v), m/s					
		4,2 m/s		5,85 m/s		8,23m/s	
		Ölçümler	Ort.	Ölçümler	Ort.	Ölçümler	Ort.
Kanat Konumunun Açısı	210°	0,55m	0,06m	0,08m	0,085m	0,07m	0,0766m
		0,06m		0,085m		0,08m	
		0,065m		0,09m		0,08m	
	240°	0,09m	0,086m	0,093m	0,095m	0,093m	0,0936m
		0,085m		0,095m		0,095m	
		0,083m		0,097m		0,093m	
	270°	0,085m	0,0893m	0,095m	0,0966m	0,095m	0,0963m
		0,09m		0,097m		0,097m	
		0,093m		0,098m		0,097m	
	300°	0,08m	0,085m	0,09m	0,0916m	0,09m	0,0923m
		0,09m		0,095m		0,095m	
		0,085m		0,09m		0,092m	
	330°	0,05m	0,0573m	0,07m	0,0733m	0,065m	0,0716m
		0,06m		0,08m		0,08m	
		0,062m		0,07m		0,07m	

Ölçülen kanatçık açılma uzunlukları Denklem 2.8 de yerine konulduğunda; kanatçık açılma açıları(β) elde edilmiştir.

$$\beta = \text{ArcSin} \left(\frac{\text{Kanatçık Açılma Uzunluğu (d)}}{\text{Kanatçık Uzunluğu (0.1m)}} \right)$$

Hesaplanan β açı değerleri Tablo 3.8, Tablo 3,9 ve Tablo 3,10 da verilmiştir.

Tablo 3.8. 4,2 m/s Rüzgâr Hızı İçin Hesaplanan β Açısı Değerleri

Kanat Konum Açısı(α)	Kanatçık Açılma Açısı (β)
210°	36,87°
240°	59,32°
270°	63,25°
300°	58,2°
330°	34,96°

Tablo 3.9. 5,85 m/s Rüzgâr Hızı İçin Hesaplanan β Açısı Değerleri

Kanat Konum Açısı(α)	Kanatçık Açılma Açısı (β)
210°	58,2°
240°	71,80°
270°	75°
300°	66,35°
330°	47,14°

Tablo 3.10. 8,23 m/s Rüzgâr Hızı İçin Hesaplanan β Açısı Değerleri

Kanat Konum Açısı(α)	Kanatçık Açılma Açısı (β)
210°	50°
240°	69,4°
270°	74,36°
300°	67,37°
330°	45,7°

3.5.2 Kanat Dönme Açısına Bağlı Kanat Aktif Alan Hesabı

Kanat dönme açısına bağlı tork hesabına kullanılacak kanat alanları, kanadın dönme açısına göre değişiklik gösterecektir. 0°-180° Aralığında kanat rüzgârdan gelen itme kuvvetiyle tork üretecektir. 180°-360° Aralığında ise kanat rüzgâra karşı gelerek direnç gösterecektir. Rüzgâra karşı direnç gösterdiği noktada kanatçıklar açılarak direnci azaltacaktır. Kanatçıkların açıldığı durumda kanat aktif alanı belirli derecelerde farklı olacaktır. Bu yüzden dönme açısına bağlı tork hesabında; kanadın 30° açı farklarıyla deneysel olarak elde edilen kanatçık açılma açısı değerleri kullanılarak sahip olduğu aktif alanlar hesaplanmıştır. Alan hesabında

0°-180° Aralığında Kanat alanı(A_x):

$$A_x = \sin\alpha \times (\text{Kanat Genişliği} \times \text{Kanat Yüksekliği}) \quad (3.2)$$

180°-360° Aralığında Kanat alanı(A):

$$A_x = |\sin\alpha| \times [(\text{Kanat Genişliği} \times \text{Kanat Yüksekliği}) - A'] \quad (3.8)$$

$$A' = [0,09 - (0,1 \times \cos\beta)] \times (0,18 \times 3) \quad (3.9)$$

Denklemleri kullanılmıştır. Denklem 3.2, Denklem 3.8 ve Denklem 3.9 ile yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen alan değerleri Tablo 3.11 de gösterilmiştir

Tablo 3.11. α Kanat Açısı Değerleri ve β Kanatçık Açılma Açısı Değerlerine Göre Hesaplanan A_x Alanları

		A _x ALAN DEĞERLERİ TABLOSU (m ²)												
Kanat Dönme Açısı (°)		0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°	360°
RÜZGAR HIZI (m/s)	4,2 m/s	0	0,0352	0,0609	0,0704	0,0609	0,0352	0	0,0325	0,0427	0,046	0,0435	0,0349	0
	5,85 m/s	0	0,0352	0,0609	0,0704	0,0609	0,0352	0	0,025	0,033	0,0357	0,0376	0,029	0
	8,23 m/s	0	0,0352	0,0609	0,0704	0,0609	0,0352	0	0,028	0,035	0,036	0,036	0,029	0

3.5.3 Kanat Dönme Açısına Bağlı Tork Değişim Hesabı ve Grafiği

Alan hesaplamaları yapıldıktan sonra denklem 3.7 de bütün değerler yerine koyulursa;

$$T_x = [\sin\alpha \times (r_0 + \frac{b}{2})] \times A_x \times \rho \frac{V^2}{2}$$

$$T_x = [\sin\alpha \times (0,05 + \frac{0,22}{2})] \times A_x \times 1,22 \frac{V^2}{2}$$

$$T_x = (\sin\alpha \times 0,16) \times A_x \times 0,61V^2 \quad (3.10)$$

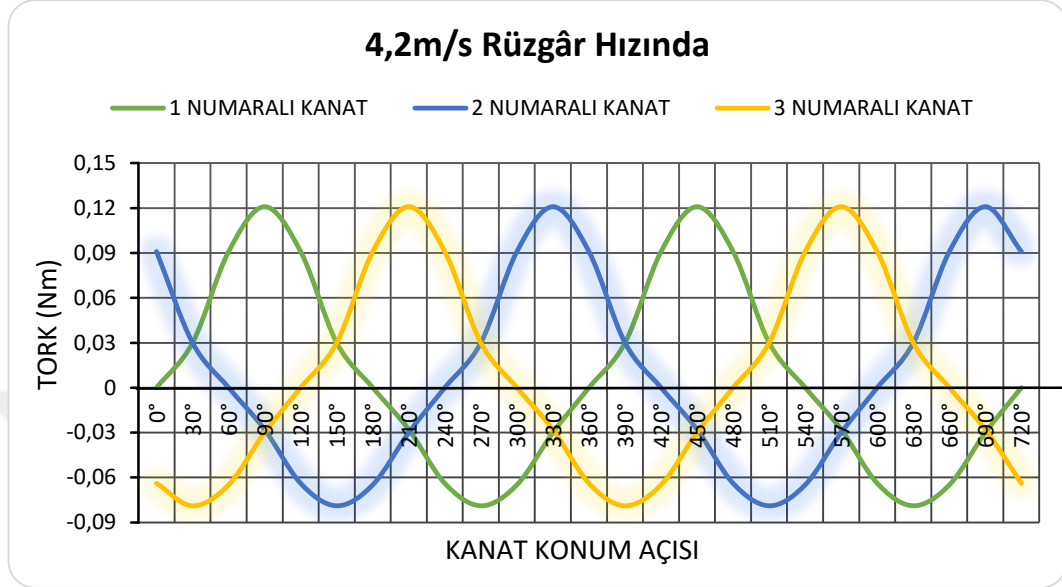
Denklem 3.10 da kanat dönme açıları, rüzgâr hızları ve aktif alanlar yerine konulduğunda; kanat dönme açısına bağlı tork değerleri elde edilmiştir. Tork değerleri Tablo 3.12 de gösterilmiştir.

Tablo 3.12. Üç Farklı Hız Değerinde ve α Kanat Açısı Değerlerine Göre Bir Kanat İçin Hesaplanan Tork Değerleri

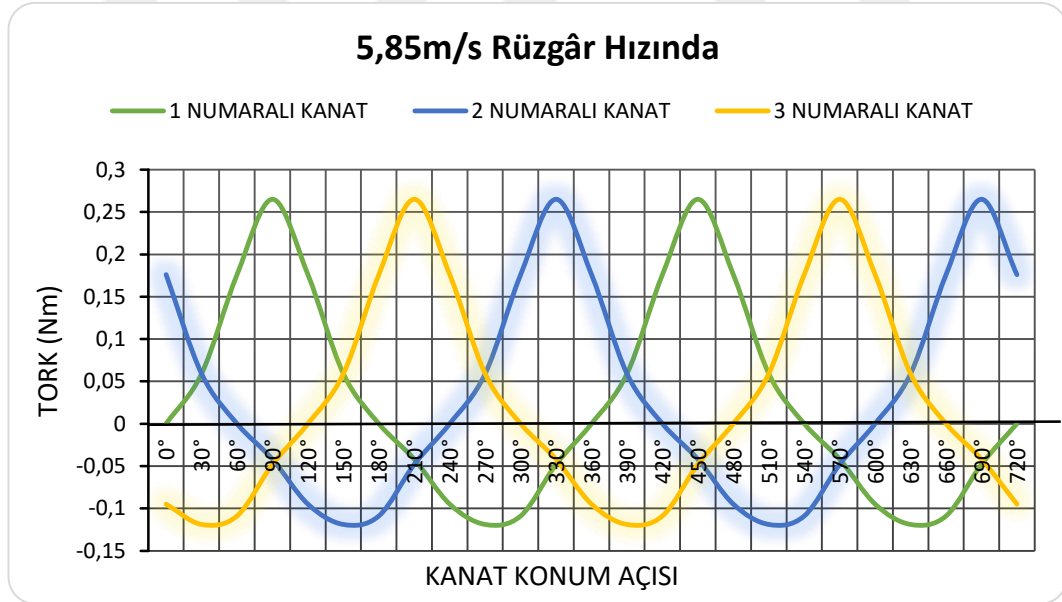
		3 FARKLI HIZ DEĞERİNDE BİR KANAT İÇİN HESAPLANAN TORK MİKTARI (Nm)												
Kanat Dönme Açısı (°)		0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°	360°
Rüzgar Hızı (m/s)	4,2 m/s	0	0,03	0,091	0,121	0,091	0,03	0	-0,028	-0,064	-0,079	-0,065	-0,03	0
	5,85 m/s	0	0,059	0,176	0,265	0,176	0,059	0	-0,042	-0,095	-0,119	-0,109	-0,048	0
	8,23 m/s	0	0,116	0,348	0,465	0,348	0,116	0	-0,092	-0,2	-0,238	-0,206	-0,096	0

Tablo 3.12 bir kanadın konum açısına göre üreteceği tork miktarını göstermektedir. Türbinde 3 adet kanat olduğu ve her bir kanat arasında 120 derece açı farkı bulunduğundan 3 kanat aynı anda farklı konumlarda bulunmakta ve farklı

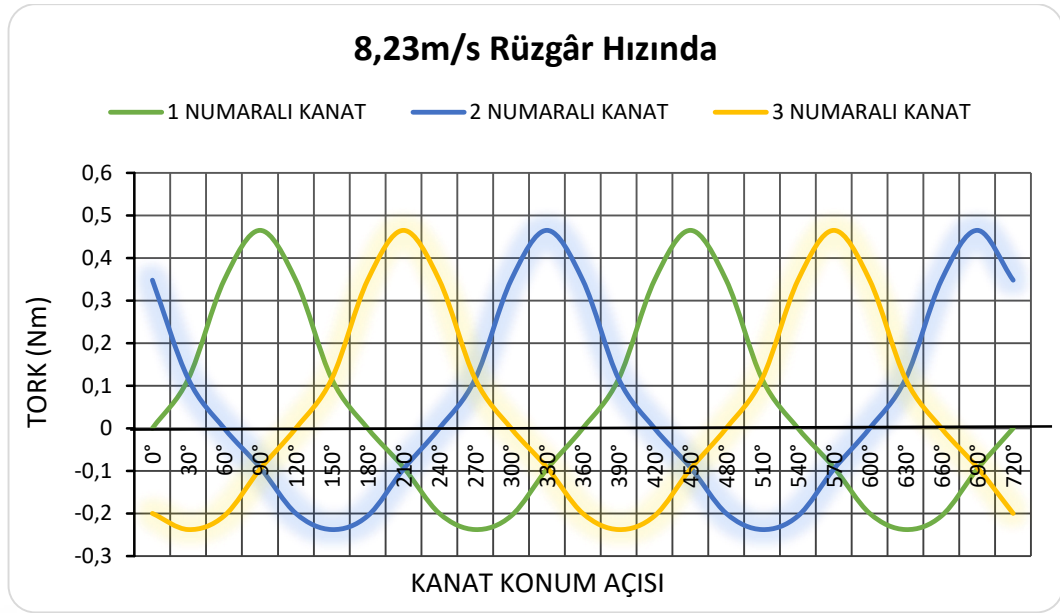
değerlerde tork üretmektedir. Türbin çalışırken bütün kanatlar tarafından üretilen tork miktarları değişimi, grafik haline getirilerek Şekil 3.9, Şekil 3.10 ve Şekil 3.11 de verilmiştir.



Şekil 3.9. 4,2 m/s Rüzgâr Hızında Kanat Dönme Açısına ve Kanatçık Açılma Açılarına Bağlı Tork Değişimi



Şekil 3.10. 5,85 m/s Rüzgâr Hızında Kanat Dönme Açısına ve Kanatçık Açılma Açılarına Bağlı Tork Değişimi



Şekil 3.11. 8,23 m/s Rüzgâr Hızında Kanat Dönme Açısına ve Kanatçık Açılma Açılarına Bağlı Tork Değişimi

Grafikler yardımıyla; x ekseninin üstünde(+) ve x ekseninin altında(-) kalan alanlar dikkate alınarak elde edilebilecek net tork değerleri (Tablo 3.13) ve bu tork değerlerinden hesaplanan güç değerleri tablosu(Tablo 3.14) aşağıda gösterilmiştir.

Tablo 3.13 Elde Edilebilecek Net Tork Değerleri

		NET TORK (T_{net})
RÜZGÂR HIZI(m/s)	4,2 m/s	0,305Nm
	5,85 m/s	1,007Nm
	8,23 m/s	1,757Nm

Tablo 3.14 Net Tork Miktarlarına ve Farklı Rüzgâr Hızlarına Göre Hesaplanan Güç Değerleri

Rüzgâr Hızı, m/s	Türbin dönü sayısı, d/dak.	Net Tork, Nm	Hesaplanan Güç, W
4,20	55	0,305	1,76
5,85	60	1,007	6,32
8,23	52	1,757	9,56

3.5.4 Kanat Dönme Açısına ve Kanatçık Açılma Açılarına Bağlı Hesaplanan Güç Değerleri ile Teorik Güç Değerlerinin Karşılaştırması

Kanat dönme açısına bağlı olarak elde edilebilecek güç değerleri ve teorik olarak hesaplanan güç değerleri Tablo 3.15 de kıyaslanmıştır.

Tablo 3.15 Farklı Rüzgâr Hızları İçin Elde Edilebilecek Güç Değerleri ile Teorik Güç Değerlerinin Karşılaştırması ve Türbin Verimi

Rüzgâr Hızı (v), m/s	Türbin Dönü Sayısı (n), d/dak.	Elde Edilebilecek Mekanik Güç (P _m), W	Teorik Güç (P _t), W	Türbin Verimi, (η)
4,20	55	1,76	8,09	%22
5,85	60	6,32	21,86	%29
8,23	52	9,56	60,87	%16

3.6 Simülasyon ile Bulunan, Hesaplanan ve Deneysel Olarak Ölçülen Verim Değerlerinin Karşılaştırması

Simülasyon analizi, kanat dönme ve kanatçık açılma açısına bağlı hesaplanan (teorik) verim değerleri ve deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen verim değerleri tablo 3.16 da gösterilmiştir.

Tablo 3.16 Simülasyon ile Bulunan, Hesaplanan ve Deneysel Olarak Ölçülen Verim Değerleri

Rüzgâr Hızı (v), m/s	Simülasyon Analizi Sonucunda Verim	Kanat Dönme ve Kanatçık Açılma Açılarına Bağlı Hesaplanan Maksimum Verim	Deneysel Olarak Ölçülen Verim
4,20	%27	%22	%15
5,85	%29	%29	%13
8,23	%23	%16	%9

4. TARTIŞMA

Rüzgâr etkisiyle açılıp/kapanabilen kanatçıklı düşey eksenli rüzgâr türbini fikir, tasarım ve imalat aşaması olarak uzun bir süreç sonucu ortaya çıkmıştır. Mevcut düşey eksenli rüzgâr türbinlerinin düşük verimli olması sebebiyle, yeni tasarım ile verimin artırılması hedeflenmiştir. Türbinin deneysel amaçlı küçük ölçekli yapılması nedeniyle ölçülen değerler düşük düzeyde kalmıştır. Buna rağmen türbinin çalışma sisteminde herhangi bir aksaklık ortaya çıkmamıştır. Rüzgâr etki alanının arttığı daha büyük ölçekli türbinlerde daha iyi sonuçlar elde edilebilir.

Deneysel çalışmalarda amaca uygun rüzgâr tünelinin olmaması nedeniyle çalışma hızı ayarlanabilen eksenel fan kullanılmıştır. Ancak fan vasıtasıyla üretilen hava akımının laminar akışa tam uymaması, rüzgârın çevreye çok fazla dağılmasına neden olmaktadır. Bu sebeple rüzgâr tüneli kullanılarak yapılacak deneysel çalışmalarda türbin veriminde artış görülebilir. Rüzgar hızları; türbin projeksiyon alanı içerisinde 9 farklı noktadan hız değerleri ölçülerek ve ortalama değerler hesaplanarak bulunmuştur.

Çalışmaların yapıldığı laboratuvarında bulunan rüzgâr fan grubunun maksimum frekans ayarının 28 olması ve maksimum hızda çalışmasının güvenlik açısından problem oluşturabileceği sebebiyle; son kademede 26 frekans gücü kullanılmıştır. Bu nedenle ölçümler maksimum 8,23 m/s rüzgâr hızında yapılabilmektedir. Daha yüksek rüzgâr hızlarında türbin veriminde düşüşün devam edeceği öngörülmektedir.

Türbin devir sayılarının her hız için 60 d/dak. seviyelerine yaklaşması mevcut türbinlere nazaran daha fazla devir sayısına ulaşabildiğini göstermiştir. Ancak türbinin büyük ölçekli yapılması durumunda özellikle çapının artışıyla açılma hızının düşeceği beklenmektedir. Bu özellik, rüzgâr türbinleri için kullanılan kanat ucu hız oranından kaynaklanmaktadır.

Türbin kanatçıklarının her rüzgâr hızı için açılma ve kapanma açıları değişmektedir. Ayrıca kanatçıkların açılma açıları kanat dönme açılarına bağlı olarak da değişmektedir. Kanatçıkların açılma esnasında açı değerlerinin rüzgâr hızı ile birlikte artması; daha yüksek rüzgâr hızlarında türbine negatif tork bölgesinde uygulanan direnç miktarının daha da azalacağını göstermektedir. Fakat aynı oranda kanatçıklar ne kadar fazla açılırsa kanat üzerine kapanma esnasında

ıkan ses miktarı da artmaktadır. Ses miktarını azaltmak için geliştirilecek yalıtım yöntemleri ve kanatçık malzemesi seçimi bu problemin önüne geçebilir.

Mevcut türbin üzerinde aktif alan oranının %69 seviyesinde kalması nedeniyle 3 farklı aktif alan ile verim hesaplamaları yapılmıştır. Aktif alan miktarının artması ile veriminde arttığı hesaplanmıştır. Yani daha büyük ölçekli ve aktif alanın artırılacağı türbinde daha fazla verim elde edilebilir.

Kanat dönme açısına bağlı elde edilebilecek tork değerleri incelendiğinde; deneysel olarak elde edilen türbin veriminin, türbin potansiyelinin gerisinde kaldığı görülmektedir.

Akış simülasyon programı kullanılarak gerçekleştirilen analizler sonucunda türbinin optimum şartlar sağlandığında daha yüksek verim değerlerine ulaşabildiği görülmüştür. Deneysel alışmalar sonucunda elde edilen sonuçlara benzer şekilde yüksek rüzgâr hızında türbinin veriminin düştüğü bulunmuştur. Ancak türbinin düşük rüzgâr hızlarındaki verimi dikkate alındığında, bu tasarımın düşük rüzgâr hızlarına daha uygun olduğu görülmektedir.

4,2 m/s, 5,85 m/s ve 8.23 m/s olmak üzere üç farklı rüzgâr hızında gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda; simülasyon sonuçları ve kanat dönme açısına bağlı hesaplanan verim değerlerinin türbinin geleceği için umut vaat ettiği görülmektedir. Ancak yapılan deneysel çalışmalar sonucunda analiz sonuçlarına ve hesaplanan verim değerlerine henüz ulaşılamamıştır. Düşey eksenli rüzgâr türbinlerinde negatif tork bölgesine ilave edilecek rüzgâr yönlendiricileri sayesinde verimin artırılabilceği belirtilmektedir (Aksoy,2017). Analiz sonucuna ve hesaplanan verim değerlerine ulaşılabilmesi için; laboratuvar ortamında rüzgâr tüneli kullanılarak yapılacak deneysel çalışmaların incelenmesi gerekmektedir. Açık hava koşullarında yapılacak deneysel çalışmalar için hava akış deflektörü kullanımının yararlı olacağı görülmektedir. Türbinin alışma esnasındaki atalet kuvvetleri etkisinin azaltılacağı geliştirme çalışmaları ile türbin veriminin artırılabilceği sylenabilir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Rüzgâr etkisiyle açılıp/kapanabilen kanatçıklı düşey eksenli rüzgâr türbini, mevcut türbinlere göre bazı üstün özelliklere sahiptir. Türbinin kanatçıklı yapısı ile negatif tork tarafındaki kanat direncinin düşürülmesi ve bu sayede türbin veriminin artırılması hedeflenmiştir. İmkanlar dahilinde yapılan prototip ile deneysel çalışmalar gerçekleştirildiğinde; türbin çalışmasında kanatçıkların açılıp kapanmasının teorikte düşünülen şekliyle sorunsuz bir şekilde gerçekleştiği gözlemlenmiştir. 3 farklı rüzgâr hızında yapılan kuvvet ölçümleri ve verim hesaplamaları sonucunda; açılıp/kapanabilen kanatçıklı düşey eksenli rüzgâr türbini için beklenen verim değerleri elde edilememiştir. Bu sonuçta türbinin istenilen boyutlarda olmaması, aktif alan oranının %69 seviyelerinde kalması ve kanat açısına göre hesaplanan net tork değerlerine ulaşılamaması önemli bir faktördür.

Yapılan simülasyon analizleri ve hesaplanan verim değerlerine ulaşılması için; deney düzeneğinde gerçekleştirilecek geliştirme ve inovasyon çalışmaları (aktif alan oranının artırılması ve atalet kuvvetlerinin etkisinin azaltılması) ile deney düzeneğinin iyileştirilmesi büyük öneme sahiptir.

Araştırma hipotezindeki ana düşünceler; düşük rüzgâr hızlarında verimli çalışabilecek ve şehir içi uygulamalarda kullanılabilecek bir rüzgâr türbini tasarlamaktır. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı verilerinden alınan 7 bölgemizdeki ortalama rüzgâr hızlarının 4-5 m/s düzeyinde olması; düşük rüzgâr hızlarında çalışacak türbinlere olan ihtiyacı gözler önüne sermektedir. Deneysel çalışmalar sonucunda türbinin düşük rüzgâr hızlarında, yüksek rüzgâr hızlarına göre daha verimli çalışması projenin geleceği ile ilgili umut vaat etmektedir.

Yenilenebilir enerji kapsamında rüzgâr enerjisine yönelimin artması, büyük ölçekli türbinlerin yanında yerleşim yerlerinde kullanılabilecek küçük ölçekli rüzgâr türbinlerine duyulan ihtiyacı artırmaktadır. Şehir içi uygulamalarda da kullanılacak türbinlerin bakım ve onarımının kolay yapılabilme özelliğine sahip olması en önemli faktörlerden birisidir. Tasarlanan türbininin düşey eksenli olması, bakım onarımının kolaylığı ve aynı zamanda düşük rüzgâr hızlarında da çalışabilmesi önemli üstünlükleridir. Bu sebeple türbin üzerinde daha fazla bilimsel çalışmalar yapılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Acar, M. (2013.). Pencere ve Helezonik Tip Bir Düşey Eksenli Rüzgâr Türbininin Tasarımı ve Performansının Deneysel Olarak İncelenmesi.
- Alternatif Enerji Kaynakları ve Türkiye | TÜBİTAK Bilim Genç. (2024). Bilim Genç. Geliş tarihi 25 Kasım 2024, gönderen <http://bilimgenc.tubitak.gov.tr/makale/alternatif-enerji-kaynaklari-ve-turkiye>
- AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023. (2023). Geliş tarihi 12 Kasım 2024, gönderen <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- Castellani, F., Astolfi, D., Peppoloni, M., Natili, F., Buttà, D., ve Hirschl, A. (2019). Experimental Vibration Analysis of a Small Scale Vertical Wind Energy System for Residential Use. *Machines*, 7(2), 35. <https://doi.org/10.3390/machines7020035>
- Celik, A. N., Muneer, T., ve Clarke, P. (2007). An investigation into micro wind energy systems for their utilization in urban areas and their life cycle assessment. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 221(8), 1107-1117. <https://doi.org/10.1243/09576509JPE452>
- Çetin, S. K., Genç, M. S., ve Daldaban, F. (2019a). Dikey eksenli rüzgâr türbinleri-küçük ölçekli uygulamalar. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6(2), 539-551.
- Çetin, S. K., Genç, M. S., ve Daldaban, F. (2019b). Dikey eksenli rüzgâr türbinleri-küçük ölçekli uygulamalar. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6(2), 539-551.
- De Lellis, M., Reginatto, R., Saraiva, R., ve Trofino, A. (2018). The Betz limit applied to airborne wind energy. *Renewable Energy*, 127, 32-40.
- Denmark, T. U. of. (2017). English: This map provides an estimated summary of wind speed at 100 m above surface level. The map is derived from high-resolution wind speed distributions based on a chain of models, which downscales winds from global models (~70 km), to mesoscale (9 km) to microscale (150 m terrain). The output resolution is 1 km. [Graphic]. <https://globalwindatlas.info>.
- EİGM Raporları—T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2024.). Geliş tarihi 12 Kasım 2024, gönderen <https://enerji.gov.tr/eigm-raporlari>
- Elektrik—T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2024.). Geliş tarihi 12 Kasım 2024, gönderen <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik>
- EliBüyük, U., ve Üçgül, İ. (2014). Rüzgâr Türbinleri, Çeşitleri Ve Rüzgâr Enerjisi Depolama Yöntemleri.
- Espina-Valdés, R., Gharib-Yosry, A., Ferraiuolo, R., Fernández-Jiménez, A., ve Fernández-Pacheco, V. M. (2022). Experimental Comparison between Hydrokinetic Turbines: Darrieus vs. Gorlov. *Environmental Sciences Proceedings*, 21(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/envirosciproc2022021026>
- Ghigo, A., Faraggiana, E., Giorgi, G., Mattiazzo, G., ve Bracco, G. (2024). Floating Vertical Axis Wind Turbines for offshore applications among potentialities and challenges: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 193, 114302.
- Güler, B. (2019.). Dikey Eksenli Örnek Rüzgâr Türbini Tasarımı.
- Gür, M. (2022.). Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.

- “Here’s good wind, here’s pretty wind:” A whirlwind overview of the fascinating wind turbine of French engineer Louis Constantin, and of a few other things besides that, part 2 | The Channel. (t.y.). Geliş tarihi 11 Şubat 2025, gönderen <https://ingeniumcanada.org/channel/articles/heres-good-wind-heres-pretty-wind-a-whirlwind-overview-of-the-fascinating-wind-0>
- Khan, S. (2020). Conflicts in betz limit and an alternative approach for wind turbines. 2020 IEEE Region 10 Symposium (TENSYP), 1438-1443. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9230876/>
- Kim, D., ve Gharib, M. (2013a). Efficiency improvement of straight-bladed vertical-axis wind turbines with an upstream deflector. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 115, 48-52.
- Kim, D., ve Gharib, M. (2013b). Efficiency improvement of straight-bladed vertical-axis wind turbines with an upstream deflector. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 115, 48-52.
- Li, Y., Zhao, S., Tagawa, K., ve Feng, F. (2018). Starting performance effect of a truncated-cone-shaped wind gathering device on small-scale straight-bladed vertical axis wind turbine. *Energy conversion and management*, 167, 70-80.
- Mojola, O. O. (1985). On the aerodynamic design of the Savonius windmill rotor. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 21(2), 223-231.
- Muttagi, V. R., Wangikar, S. S., Bhosale, S. S., ve Bhosale, S. B. (2018). Optimization of Process Parameters for Shutter Type Vertical Axis Wind Turbine. İçinde P. M. Pawar, B. P. Ronge, R. Balasubramaniam, and S. Seshabhatter (Ed.), *Techno-Societal 2016* (ss. 147-152). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-53556-2_16
- Renewable Energy Statistics 2024. (2024.).
- Roshan, M. Y., Khaleghinia, J., Nimvari, M. E., ve Salarian, H. (2021). Performance improvement of Darrieus wind turbine using different cavity layouts. *Energy Conversion and Management*, 246, 114693.
- Rüzgar—T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2025.). Geliş tarihi 06 Şubat 2025, gönderen <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-ruzgar>
- Semih, A. (2017.). Üç Kanatlı Dikey Eksenli Rüzgar Türbin Performansının Sayısal İncelenmesi
- Stout, C., Islam, S., White, A., Arnott, S., Kollovozi, E., Shaw, M., Droubi, G., Sinha, Y., ve Bird, B. (2017). Efficiency improvement of vertical axis wind turbines with an upstream deflector. *Energy procedia*, 118, 141-148.
- Tummala, A., Velamati, R. K., Sinha, D. K., Indraja, V., ve Krishna, V. H. (2016). A review on small scale wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 1351-1371.
- Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli. (2025.). Geliş tarihi 07 Şubat 2025, gönderen <https://repa.enerji.gov.tr/Repa/>