



**BİR RÜZGAR ENERJİ SANTRALİNİN YENİLENMESİ KAPSAMINDA
RÜZGAR ENERJİ POTANSİYELİNİN ANALİZİ**

Nurhan GÖREN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2025

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına 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.

Nurhan GÖREN

23.12.2025

BİR RÜZGAR ENERJİ SANTRALİNİN YENİLENMESİ KAPSAMINDA RÜZGAR ENERJİ POTANSİYELİNİN ANALİZİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Nurhan GÖREN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2025

ÖZET

Teknolojik ve sanayi gelişimi ile nüfus artışı hem dünyada hem de Türkiye’de enerji talebinin sürekli olarak artmasına yol açmaktadır. Fosil yakıtların sınırlı oluşu ve çevresel olumsuz etkileri, yenilenebilir enerji kaynaklarının önemini artırmıştır. Bu çalışmada, çevresel duyarlılığı yüksek ve enerji alanında dışa bağımlılığı azaltma potansiyeline sahip yenilenebilir kaynaklardan özellikle rüzgâr enerjisi üzerinde durulmuştur. Türkiye'nin ilk rüzgâr enerji santrali olan Alaçatı rüzgâr enerji santraline ait, brüt elektrik üretim kapasitesinin 19 GWh/yıl olmasına rağmen son yıllarda gerçekleştirilen elektrik üretim miktarının 3.5 GWh/yıl değerine kadar düştüğü gözlemlenmiştir. Bu Tez çalışması ile bölgeye ait mevcut rüzgâr enerji potansiyeli belirlenip, bu enerji miktarından en yüksek seviyede faydalanılabilmesi, Elektrik üretim kapasitesinin arttırılması ve geleceğe yönelik enerji yatırımlarına ışık tutması hedeflenmiştir. Bu çalışmada, Türkiye’nin ilk ticari rüzgâr santrali olan Alaçatı Rüzgâr Enerji Santrali’nin mevcut durumu değerlendirilmiş ve saha rüzgâr potansiyeli analiz edilmiştir. Bu amaçla, proje sahasında 100 metre yüksekliğinde bir ölçüm direği kurulmuş, 2022–2023 yıllarında dört mevsimi temsil eden veriler toplanmıştır. Elde edilen verilerle bölgenin enerji üretim potansiyeli belirlenmiş, ayrıca yerli üretim iki rüzgâr türbini kurulumu incelenmiştir.

Bilim Kodu : 92806

Anahtar Kelimeler : Rüzgar enerji santrali, rüzgar enerji potansiyeli, yenilenebilir enerji, elektrik üretim, rüzgar türbini

Sayfa Adedi : 103

Danışman : Doç. Dr. Ramazan ÇAKIROĞLU

ASSESSMENT OF WIND ENERGY POTENTIAL WITHIN THE SCOPE OF
REPOWERING A WIND POWER PLANT

(Master's Thesis)

Nurhan GÖREN

GAZI UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF SCIENCE

December 2025

ABSTRACT

The continuous growth in energy demand, driven by technological and industrial development as well as population increase, is a significant challenge both globally and in Turkey. The limited availability of fossil fuels and their environmental impacts have heightened the importance of renewable energy sources. Among these, wind energy stands out due to its high environmental sustainability and its potential to reduce dependence on imported energy. Despite a gross electricity generation capacity of 19 GWh/year, Turkey's first wind power plant, the Alaçatı Wind Power Plant, has experienced a decline in actual electricity production to approximately 3.5 GWh/year in recent years. This thesis aims to evaluate the existing wind energy potential in the region, optimize its utilization, enhance electricity generation capacity, and provide guidance for future energy investments. In this study, the current status of the Alaçatı Wind Power Plant was examined, and a detailed wind potential analysis was conducted. A 100-meter-high meteorological mast was installed at the site, and data representing all four seasons were collected during 2022–2023. The collected data were used to assess the region's energy generation potential, and the feasibility of installing two domestically produced wind turbines was also investigated.

Science Code : 92806

Key Words : Wind power plant, wind energy potential, renewable energy, electricity generation

Page Number : 103

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Ramazan ÇAKIROĞLU

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezimin hazırlanması sürecinde akademik birikimi, yönlendirmeleri ve değerli katkılarıyla çalışmama ışık tutan tez danışmanım Doç. Dr. Ramazan ÇAKIROĞLU'na en içten teşekkürlerimi sunarım. Kendilerinin desteği ve rehberliği, bu çalışmanın ortaya çıkmasında büyük rol oynamıştır. Çalışma hayatımı sürdürdüğüm Elektrik Üretim A.Ş. (EÜAŞ) ailesine, araştırma ve yazım süreci boyunca gösterdikleri anlayış, sağladıkları kolaylıklar ve destekler için teşekkür ederim. Kurumumun sunduğu imkânlar, bu tez çalışmasının başarıyla tamamlanmasında önemli katkı sağlamıştır. Bu süreçte bilgi paylaşımları, yardımları ve moral desteğiyle yanımda olan değerli iş arkadaşlarım İlker SOYER ve Serbay Ali BUDAK'a da ayrıca teşekkür ederim. Hayatım boyunca her adımında yanımda olan, sabırları, sevgileriyle beni her koşulda destekleyen annem Nuran KARDAŞ, babam Şener KARDAŞ ve kardeşim Aykut KARDAŞ'a minnettarlığımı ifade etmek isterim. Sabrı, anlayışı ve sevgisiyle her zaman yanımda olan eşim Ali GÖREN'e ve motivasyon kaynağım, en büyük mutluluk sebebim oğlum Ali GÖREN'e tüm gönlümle teşekkür ederim. Onların varlığı ve desteği olmasaydı bu süreci tamamlamak mümkün olmazdı.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
HARİTALARIN LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	5
3. MATERYAL VE METOT	19
3.1. Enerji Kaynakları	19
3.2. Yenilenebilir Enerji Kaynakları	21
3.2.1. Güneş enerjisi.....	22
3.2.2. Hidroelektrik enerjisi	23
3.2.3. Biyokütle enerjisi	23
3.2.4. Jeotermal enerji	23
3.2.5. Hidrojen enerjisi.....	24
3.2.6. Dalga ve gel git enerjisi.....	24
3.2.7. Rüzgar enerjisi	25
3.3. Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Belirleme Çalışmaları	30
3.3.1. Türkiye rüzgar enerjisi potansiyel atlası (REPA)	34
3.4. Çeşme'nin Coğrafi Özellikleri	36
3.5. Çeşme Alaçatı Bölgesi İçin Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesi.....	37
3.6. Araştırmanın Amacı ve Kapsamı	38

	Sayfa
3.6.1. Rüzgar ölçüm direği üzerinde bulunan ölçüm cihazları	41
3.7. Analizler.....	44
4. SONUÇLAR VE BULGULAR.....	59
4.1. Rüzgar Hızı Analizi.....	59
4.1.1. Rüzgâr hızı frekans dağılımlarının istatistiksel analizi	65
4.2. Mevsimsel Rüzgar Rejimi Analizi	68
4.3. Rüzgar yönü ve frekans dağılımı analizi.....	71
4.4. Mekanik Güç – Rüzgâr Hızı Güç Eğrisi Analizi	73
4.5. Sıcaklık, Basınç-Rüzgar Hızı İlişkisi	85
4.6. Rüzgâr Türbini Seçeneklerinin Teknik Karşılaştırması	87
4.7. Öneriler	90
KAYNAKLAR	95
ÖZGEÇMİŞ	103

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Büyüklüklerine göre türbinleri karşılaştırılması.....	29
Çizelge 3.2. Rüzgarı alış yönüne göre türbinlerin karşılaştırılması.....	29
Çizelge 3.3. Kanat çeşitlerine göre türbinlerin karşılaştırılması.....	30
Çizelge 3.4. İzmir Çeşme’de kurulu rüzgâr enerjisi santrallerinin özellikleri.....	38
Çizelge 3.5. Projede kullanılan yerli rüzgar türbininin teknik özellikleri	51
Çizelge 4.1. Yerli ve yabancı türbin modellerinin teknik karşılaştırması	71
Çizelge 4.2. Alaçatı rüzgâr enerji santrali için yenileme (repowering) öncesi ve sonrası teknik ve enerji üretim performanslarının karşılaştırılması	89

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. 2024 yılı sonu itibariyle Türkiye’de kurulu gücün dağılımı	20
Şekil 3.2. 2024 yılı sonu itibariyle Türkiye’de yenilenebilir kaynakların üretimdeki payı.....	21
Şekil 3.3. Yenilenebilir Enerji Kaynakları	22
Şekil 3.4. 2030’ a Kadar hedeflenen yeni küresel rüzgar kurulumları (GW).....	26
Şekil 3.5. Yeni Rüzgar Kurulumları kara ve denizüstü.....	26
Şekil 3.6. Rüzgar türbin performansları	29
Şekil 3.7. Türkiye geneli izlenebilen res'lerin toplam güç üretimi ve tahmini.....	32
Şekil 3.8. Rüzgar verilerinin izlenebilmesi için bölgede kurulmuş olan rüzgâr ölçüm direği.....	40
Şekil 3.9. Rüzgar enerjisi analizi	45
Şekil 3.10. Yerli türbin parçaları üretim aşamasından görüntü.....	52
Şekil 3.11. Yerli türbin parçaları üretim aşamasından görüntü.....	52
Şekil 3.12. Türbin parçaları üretim aşamasından görüntü	52
Şekil 3.13. Türbin parçaları üretim aşamasından görüntü	53
Şekil 3.14. Türbin parçaları üretim aşamasından görüntü	53
Şekil 3.15. Türbin parçaları üretim aşamasından görüntü	53
Şekil 3.16. Türbin parçaları üretim aşamasından görüntü	54
Şekil 3.17. Türbin temel atma aşamasından görüntü	54
Şekil 3.18. Türbin temel atma aşamasından görüntü	55
Şekil 3.19. Türbinlerin konumlandırılma çalışması	55
Şekil 3.20. Türbinlerin konumlandırma çalışması	56
Şekil 4.1. Ocak, Nisan, Temmuz, Ekim 2022 yılı v100 rüzgar hızlarının zaman içindeki değişimi	59
Şekil 5.2. Ocak, Nisan, Temmuz, Ekim 2023 yılı v100 rüzgar hızlarının zaman içindeki değişimi	60

Şekil	Sayfa
Şekil 4.3. 01.01.2023 tarihine ait 25 m, 45 m, 70 m, 95 m ve 100 m yüksekliklerinde ölçülen ortalama rüzgâr hızlarının zaman içindeki değişimi	61
Şekil 4.4. 01.04.2023 tarihine ait farklı yüksekliklerde ölçülen ortalama rüzgâr hızının zamana göre değişimi.....	62
Şekil 4.5. 01 Temmuz 2023 tarihinde 25 m, 45 m, 70 m, 95 m ve 100 m yüksekliklerinde ölçülen ortalama rüzgâr hızlarının gün içindeki değişimi	63
Şekil 4.6. 01 Ekim 2023 tarihinde 25 m, 45 m, 70 m, 95 m ve 100 m yüksekliklerinde ölçülen ortalama rüzgâr hızlarının gün içindeki değişimi	64
Şekil 4.7. Ocak, Nisan, Temmuz, Ekim 2023 Yılı V100 Rüzgar hızlarının zaman içindeki değişimi	65
Şekil 4.8. 2022 Yılı rüzgâr hızı frekans dağılımlarının istatistiksel analizi	66
Şekil 4.9. 2023 Yılı rüzgâr hızı frekans dağılımlarının istatistiksel analizi	67
Şekil 4.10. 01.01.2023 Mevsimsel rüzgar rejimi analizi.....	68
Şekil 4.11. 01.04.2023 Mevsimsel rüzgar rejimi analizi.....	69
Şekil 4.12. 01.07.2023 Mevsimsel rüzgar rejimi analizi.....	70
Şekil 4.13. 01.10.2023 Mevsimsel rüzgar rejimi analizi.....	71
Şekil 4.14. 2022 ve 2023 yıllarına ait kış mevsimi rüzgâr yönü dağılımları (94 m ve 30 m)	72
Şekil 4.15. 01.01. 2022 100m için mekanik güç – rüzgâr hızı güç eğrisi	74
Şekil 4.16. 01.01. 2022 95m için mekanik güç – rüzgâr hızı güç eğrisi	75
Şekil 4.17. 01.01. 2022 70m için mekanik güç – rüzgâr hızı güç eğrisi	75
Şekil 4.18. 01.01. 2022 45m için mekanik güç – rüzgâr hızı güç eğrisi	76
Şekil 4.19. 01.01. 2022 25m için mekanik güç – rüzgâr hızı güç eğrisi	77
Şekil 4.20. 01.01. 2023 100m için mekanik güç – rüzgâr hızı güç eğrisi	77
Şekil 4.21. 01.01. 2023 95m için mekanik güç – rüzgâr hızı güç eğrisi	78
Şekil 4.22. 01.01. 2023 70m için mekanik güç – rüzgâr hızı güç eğrisi	79
Şekil 4.23. 01.01. 2023 45m için mekanik güç – rüzgâr hızı güç eğrisi	80

Şekil	Sayfa
Şekil 4.24. 01.01. 2023 25m için mekanik güç – rüzgâr hızı güç eğrisi	81
Şekil 4.25. 01.01. 2023 100m için mekanik güç – rüzgâr hızı güç eğrisi	82
Şekil 4.26. 01.01. 2023 95m için mekanik güç – rüzgâr hızı güç eğrisi	82
Şekil 4.27. 01.01. 2023 70m için mekanik güç – rüzgâr hızı güç eğrisi	83
Şekil 4.28. 01.01. 2023 45m için mekanik güç – rüzgâr hızı güç eğrisi	84
Şekil 4.29. 01.01. 2023 45m için mekanik güç – rüzgâr hızı güç eğrisi	84
Şekil 4.30. Sıcaklık, basınç ve rüzgar hızı ilişkisi (Ocak, Nisan, Temmuz, Ekim 2022).....	85
Şekil 4.31. Sıcaklık, basınç ve rüzgar hızı ilişkisi (Ocak, Nisan, Temmuz, Ekim 2023).....	86

HARİTALARIN LİSTESİ

Harita	Sayfa
Harita 3.1. Türkiye yıllık ortalama rüzgar hızı dağılımı.....	31
Harita 3.2. Türkiye rüzgar gücü yoğunluğu dağılımı	31
Harita 3.3. Yıllık ortalama rüzgar hızı dağılımı-100m	35
Harita 3.4. Yıllık ortalama rüzgar güç yoğunluğu dağılımı-100m	35
Harita 3.5. Kapasite faktörü dağılımı-100m	35
Harita 3.6. İzmir Çeşme bölgesine ait harita görüntüsü.....	37
Harita 3.7. Rüzgar ölçüm direğinin konumuna ait görüntü	41
Harita 3.8. Türbinin kurulacağı konum.....	56
Harita 3.9. Türbinin kurulacağı konum.....	57

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Kısaltmalar	Açıklamalar
BOREN	Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü
CBS	Coğrafi Bilgi Sistemleri
DETR	Dikey eksenli rüzgâr türbinleri
EİE	Elektrik İşleri Etüd İdaresi
İZKA	İzmir Kalkınma Ajansı
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı
RES	Rüzgâr Enerji Santrali
REPA	Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Atlası
TEMSAN	Türkiye Elektromekanik Sanayi A.Ş.
YERT	Yatay eksenli rüzgâr türbinleri
YSA	Yapay Sinir Ağı

1. GİRİŞ

Küresel enerji talebinin önemli bir kısmı, küresel ısınma ve hızlı tükenme gibi iki dezavantajı beraberinde getiren fosil yakıtlara bağımlıdır. Enerji talebindeki kademeli artış, küresel ısınmanın artmasına ve fosil yakıtların tükenme noktasına yaklaşmasına neden olmaktadır. Mevcut araştırmacılar, çevre dostu yöntemlerle farklı sektörler için enerji talebini karşılamak amacıyla yenilenebilir enerji kaynaklarına odaklanmaktadır [1].

Fosil yakıtların yüksek maliyetleri ve sınırlı kaynakları, sera gazı emisyonlarının azaltılması gerekliliğiyle birlikte, yenilenebilir kaynakları dünya enerji tabanlı ekonomilerinde cazip hale getirmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının potansiyeli büyüktür çünkü ilke olarak, dünya enerji talebini üssel bir şekilde aşabilirler; bu nedenle, bu tür kaynaklar gelecekteki küresel enerji portföyünde önemli bir paya sahip olacağı için, şu anda büyük ölçüde bu kaynakların gelişimini ilerletmeye odaklanılmaktadır [2].

Doğal kaynaklardan, örneğin güneş ışığı, rüzgâr, dalga, su ve jeotermal ısıdan elde edilen yenilenebilir enerji, kendi kendini sürdüren ve çevreyi kirletmeyen bir kaynaktır. Bu kaynaklar, geleneksel enerji kaynaklarına kıyasla birçok çevresel ve ekonomik fayda sunar. Yenilenebilir enerji, pratikte tükenmeyen ve daha az kirletici madde üreten kaynaklardan elde edilir. Bu, yenilenebilir enerjiyi fosil yakıtlardan temelde farklı kılar ve birçok ülkeyi, Türkiye de dahil, kullanımını teşvik ve sübvansiyon programlarıyla desteklemeye yöneltmiştir. Ayrıca, Avrupa Birliği'ne katılma hazırlıkları ve Kyoto Protokolü'nün olarak onaylanması ile, politika yapıcılar, rüzgâr enerjisinin ülkenin gelecekteki enerjisindeki potansiyel rolünü giderek daha fazla tanımaktadır. Fosil yakıtların üretiminden kaynaklanan emisyonlar hakkındaki artan endişeler, hükümetin desteğini artırmış ve fosil yakıtların yüksek maliyetleri, son yıllarda Türkiye'deki rüzgâr enerjisi kapasitesinin önemli ölçüde artmasına yardımcı olmuştur. Rüzgar, dünyanın ekvatorial bölgelerinin kutup bölgelerine göre daha fazla güneş enerjisi alması nedeniyle ortaya çıkar ve bu durum atmosferde büyük ölçekli konveksiyon akımlarını başlatır. Meteorologlar, gelen güneş radyasyonunun yaklaşık %1'inin rüzgâr enerjisine dönüştüğünü tahmin etmektedir. Dünyanın güneşten sadece on günde aldığı enerji, tüm fosil yakıt rezervlerinin enerji içeriğine eşdeğerdir, bu da rüzgâr kaynağının son derece büyük olduğunu gösterir [3].

Rüzgar enerjisi, rüzgâr türbinleri tarafından rüzgâr enerjisinin elektrik üretmek için rüzgâr türbinleri kullanmak, mekanik güç için yel değirmenleri, su pompalamak veya drenaj için rüzgâr pompaları ya da gemileri hareket ettirmek için yelkenler gibi kullanışlı bir forma dönüştürülmesi olarak tanımlanır. Elektrik üretimi için ilk rüzgâr türbinleri 20. yüzyılın başında geliştirilmiştir. Teknoloji, 1970'lerin başından itibaren kademeli olarak gelişmiştir. 1990'ların sonlarına gelindiğinde, rüzgâr enerjisi, en önemli sürdürülebilir enerji kaynaklarından biri olarak yeniden öne çıkmıştır.

Rüzgardan elektrik üretmek, hareket halindeki havanın kinetik enerjisinin önce mekanik enerjiye, ardından elektrik enerjisine dönüştürülmesini gerektirir. Rüzgar gücü, hareket halindeki havanın kütlesinin kinetik enerjisinden elde edilir. Rüzgar elektrik üretim sistemleri, rüzgâr enerjisini rüzgâr türbinleri aracılığıyla elektriğe dönüştürür. Bu da endüstriyi, bu dönüşümü gerçekleştirecek maliyet etkin rüzgâr türbinleri ve enerji santralleri tasarlamaya zorlar. Rüzgarda, teorik olarak çıkarılabilir kinetik enerji miktarı, rüzgâr hızının küpüyle artar. Ancak bir türbin, mevcut enerjinin yalnızca bir kısmını (yüzde 40–50) yakalayabilir, bu nedenle rüzgâr türbini tasarımı, rüzgâr türbinlerinin karşılaştığı rüzgâr hızları aralığında enerji yakalamayı maksimize etmeye odaklanırken, tüm parametreler dikkate alınarak rüzgâr enerjisinin maliyetini en aza indirmeye çalışmaktadır. Maliyeti azaltmak için rüzgâr türbini tasarımı, malzeme kullanımını azaltma, türbin boyutunu artırma, bileşen ve sistem güvenilirliğini yükseltme ve rüzgâr enerjisi santrali operasyonlarını iyileştirme arzusu ile de motive edilmektedir [3].

Bu yüzyılın başlarına kadar, elektrik üretimi için yüksek hızlı rüzgâr türbinlerinin geliştirilmesi üzerinde çalışmalar yapılmamıştır. Rüzgarın taşıdığı enerji miktarı, rüzgârın hızının artmasıyla iki katına çıkar ve rotorların süpürdüğü alanın düzleminden geçen hava kütlesiyle orantılıdır. Rüzgardan elde edilebilecek güç, yatay eksenli rüzgâr türbini (HAWT) için türbin rotorunun süpürdüğü alanla hesaplanır. Bugün anlaşılan anlamda yapılan mühendislik tasarımı, gerekli matematiksel hesaplamalar ve mühendislik uygulamaları ortaya çıkmadan önce başlatılamazdı. Rüzgar gücü, belirli bir zamanda içindeki enerjinin ürünüdür, bu nedenle rüzgârın hızı arttıkça rüzgârın gücü üç katına çıkar. Betz teoremine göre, rüzgâr enerjisinin mekanik enerjiye dönüştürülmesiyle elde edilen enerji miktarı, rüzgâr hızının küpüyle orantılıdır. Sonuç olarak, rotor kanatlarının çapı iki katına çıkarıldığında, güç dört katına çıkar. Eğer rüzgâr hızı iki katına çıkarsa, güç sekiz katına çıkar. Bu, bir rüzgâr makinesinin yeri seçiminin çok dikkatlice yapılması gerektiği anlamına

gelir, çünkü alan içindeki en yüksek rüzgâr hızına sahip yerin seçildiğinden emin olunmalıdır. 1920'de Albert Betz, kapalı akış tüpü teorisinde, bir rüzgâr türbininin rüzgârda bulunan enerjinin yalnızca %59'unu elektriğe dönüştürebileceğini göstermiştir. Günümüz rüzgâr türbinleri, rüzgârda bulunan enerjinin %50'sini elektriğe dönüştürebilmektedir, bu da teorik sınır performansına çok yakın bir değerdir; bir rüzgâr türbininin rotorları, rüzgârı üçte bir oranında yavaşlattığında bu performans elde edilir [4].

1970 ile 1980 yılları arasında, hem yatay hem de dikey eksenli tasarımlar da dahil olmak üzere çeşitli kara rüzgâr türbini konfigürasyonları incelenmiştir. Zamanla, yatay eksenli tasarım hakim duruma gelmiş, ancak konfigürasyonlar, özellikle kanat sayısı ve kanatların yönlendirilmesi açısından farklılıklar göstermiştir. Kara rüzgâr türbinleri genellikle rüzgâr enerji santrallerinde bir araya getirilir, bunlar bazen rüzgâr çiftlikleri olarak da adlandırılır. Bu rüzgâr enerji santralleri genellikle 5 ila 300 MW büyüklüğündedir, ancak daha küçük ve daha büyük santraller de mevcuttur. Deniz üzerindeki rüzgâr enerjisi teknolojisi, kara üzerindekiye göre daha az olgunlaşmış ve daha yüksek yatırım gerektirir. Offshore (deniz üzeri) rüzgâr enerjisini geliştirmeye yönelik motivasyonlar şunlardır: denizde bulunan daha kaliteli rüzgâr kaynakları; daha büyük rüzgâr türbinleri kullanabilme imkanı; kara üzerindekiyelerden daha büyük enerji santralleri inşa edebilme yeteneği; ve kara tabanlı iletim altyapısına olan ihtiyacın potansiyel olarak azaltılması. Elektrik sistemi güvenilirliği açısından, rüzgâr türbinlerinin önemli bir parçası elektriksel dönüşüm sistemidir. Büyük şebeke bağlantılı türbinler için elektriksel dönüşüm sistemleri üç farklı biçimde gelir. Sabit hızda çalışan indüksiyon jeneratörleri, hem stall-regüleli hem de pitch kontrollü türbinler için erken yıllarda popülerdi; bu düzenlemelerde, rüzgâr türbinleri, elektrik ağı tarafından sağlanması gereken reaktif güç tüketicileriydi. Modern türbinler için, bu tasarımlar şimdi değişken hız makineleriyle değiştirilmiştir. Yaygın olan iki düzenek, çift beslemeli indüksiyon jeneratörleri ve tam güç elektronik dönüştürücüsü olan senkron jeneratörlerdir; bunların her ikisi de neredeyse her zaman pitch kontrollü rotorlarla birleştirilir. Bu değişken hız tasarımları, türbinin dönen kütlelerini elektrik sisteminden ayırır, böylece önceki türbin tasarımlarına kıyasla bir dizi güç kalitesi avantajı sunar. Bu türbinler, elektrik ağı operatörlerinin ihtiyaç duyduğu gerçek ve reaktif güç sağlayabilir ve bazı arıza geçiş kapasitesine sahip olabilir [5].

Bu tez çalışmasında; Türkiye'nin ilk ticari rüzgâr santrali olan, 28 Kasım 1998 tarihinde Alaçatı, Çeşme'de kurulan Alaçatı Rüzgar Enerji Santralinin Mevcut türbinlerin yaşı

itibarıyla günümüz teknolojilerine nazaran çok daha düşük verim değerlerine sahip olması nedeniyle saha rüzgâr enerji potansiyelinin verimli kullanılamaması, türbinlerin eski teknolojiye sahip olmaları nedeniyle sarf ve yedek parça temin edilememesi, proje sahası rüzgâr potansiyelinin belirlenip mevcut şebeke bağlantısı alt yapısının etkin ve verimli kullanımının sağlanması amacıyla yenilenmesi projesi kapsamında, İzmir Çeşme sınırları içerisinde yer alan bölgede 1 adet 100m yüksekliğinde rüzgâr ölçüm direği kurulumu yapıp, elde edilen verilerden faydalanılarak enerji analizi yapılmıştır. Kullanılan veriler, 2022 ve 2023 yılları arasında dört mevsimi de temsil etmesi açısından; Ocak, Nisan, Temmuz, Ekim aylarında birer haftalık değerleri kapsamaktadır. Böylece elde edilen veriler kullanılarak rüzgâr türbini kurulacak bölgeye ait rüzgâr enerjisinin potansiyelini gösteren bir ön araştırma yapılmıştır. Bunun yanında, yüzde yüz yerli üretim olan 2 adet rüzgâr türbini kurulumu çalışması incelenmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Özlü ve Dinçer (2015) yaptıkları çalışmada, güneş-rüzgâr hibrit çoklu üretim sisteminin geliştirilmesi ve performans analizine odaklanmıştır. Enerji, exergy, exergoekonomik ve exergoenvironmental analizler gerçekleştirilmiş ve bu analizler Engineering Equation Solver yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Sistem verimliliği ve güç çıkışı, enerji ve exergy verimlilikleri aracılığıyla incelenmiş ve optimizasyon yapılmıştır. Toronto'daki ortalama daire sayısı hesaplanarak, sistemin performansı değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, sistemin enerji verimliliği %43, exergy verimliliği ise %65'e ulaşmıştır. Ayrıca, sistemin maksimum türbin çıkışı 48 kW, soğutma etkisi 28 kW ve ısıtma etkisi 298,5 kW'dır. Bu çoklu üretim sistemi, yılda 1614 ton CO₂ tasarrufu sağlamakta ve 49 daireye kadar enerji sağlayabilmektedir [6].

Baskut ve arkadaşları (2015) Rüzgâr Türbini Enerji Santrallerinin İkinci Kanun Analizi çalışmalarında, Çeşme, İzmir'deki Türkiye'nin ilk rüzgâr santralini (1,50 MW) enerji ve exergy verimliliği analiz etmişlerdir. Exergy, enerji ve teknik kullanılabilirlik analizleri yapmışlar ve santralin exergy verimliliğini %0 ile %68,20 arasında bulmuşlardır. Türbinlerin aylık ortalama teknik kullanılabilirlik oranlarını sırasıyla %96,11, %98,71 ve %98,52 olarak hesaplamışlardır. Ayrıca, farklı güç faktörleri için WTPP'nin exergy verimliliğini tahmin edebilen korelasyonlar geliştirmişlerdir [6].

Ishaq ve Dincer (2022) Rüzgâr enerjisi tabanlı bir sistemin, hidrojen ve metanol ürünü için birlikte üretim (koenerji) değerlendirilmesi isimli çalışmalarında rüzgâr enerjisi kullanarak metanol ve hidrojen üretimini amaçlayan yenilikçi bir sistem önermişlerdir. Sistemin, sanayi karbon emisyonlarını metanol üretimi için kullanır ve metanol, verimli performansı, düşük emisyonları ve düşük yangınlık riski ile geleneksel otomotiv yakıtı olarak kullanılabilirliğini ortaya koymuşlardır. Tasarladıkları bu sistem, rüzgâr türbinleri, PEMFC yakıt hücresi, metanol üretim sistemi ve damıtma ünitesinden oluşmuştur. Sistemi, farklı rüzgâr hızları ve türbini verimlilikleriyle test etmişlerdir. Ayrıca, sistemin exergy verimliliği %38,2, enerji verimliliği ise %39,8 olarak bulunmuştur. Parametrik çalışmalarla, damıtma kolonu performansı ve hidrojen ile metanol üretim kapasiteleri de incelenmiştir [1].

Eriksson ve arkadaşları (2008) çalışmalarında üç farklı rüzgâr türbinini karşılaştırmaktadır: yatay eksenli türbin ve iki dikey eksenli türbin türü olan Darrieus türbini ile H-rotoru. Çalışma, bu türbinlerin yapı dinamiği, kontrol sistemleri, bakım, üretim ve elektrikli ekipmanlar gibi önemli yönlerini karşılaştırmayı amaçlamaktadır. Ayrıca, farklı türbinlerin kanat alanları da incelenmiştir. Sonuç olarak, dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin yatay eksenli türbinlere göre çeşitli açılardan avantajlı olduğu bulunmuştur [7].

Öztürk (2021) Türkiye'nin Hakkari ve Trabzon bölgelerinde fotovoltaik/termal kolektör destekli ısı pompası ile evsel su ısıtma sisteminin enerji, exergy ve ekonomik analizleri yapmışlardır. Sistemin tasarımında büyük hacimli depolama tankı ve karşı akış ısı değiştiricisi kullanılmıştır. TRNSYS simülasyonu ile enerji analizi yapılmış, ardından exergy ve ekonomik analizler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlara göre, sistemin enerji verimliliği Hakkari'de %68, Trabzon'da ise %67 olarak bulunmuştur. Hakkari'deki sistem, konvansiyonel sistemlerden daha düşük enerji maliyetlerine sahiptir. Ancak, yatırımın Hakkari için uygulanabilir olduğu, Trabzon için ise ekonomik olarak uygun olmadığı belirlenmiştir [8].

Gökçek ve arkadaşları (2007) Türkiye'nin Marmara Bölgesi'nde yer alan Kırklareli ilinin rüzgâr enerjisi potansiyelini, saatlik zaman serileri olarak ölçülen rüzgâr verileri üzerinden analiz etmişlerdir. Kullandıkları 2004 yılına ait verileri, Elektrik Enerjisi Kaynakları Araştırma ve Geliştirme İdaresi'nden almışlardır. Rüzgar verileri yıllık, mevsimsel ve aylık olarak işlenmiş ve Weibull ile Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonlarını hesaplamışlardır. 2004 yılı için Weibull şekil parametresi $k = 1.75$ ve ölçek parametresi $c = 5.25$ m/s bulunmuştur. Yapılan güç hesaplamalarına göre, bölgedeki yıllık ortalama güç yoğunluğu 138.85 W/m^2 olarak belirlenmiştir. Sonuçlar, Kırklareli'nin rüzgâr enerjisi kullanımına uygun bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir [9].

Kılıç (2019) çalışmasında Burdur ilinin rüzgâr enerjisi potansiyelini analiz etmek için 2009-2016 yılları arasındaki rüzgâr hızı verileri, dört farklı istasyondan elde etmiştir. Verileri, Yapay Sinir Ağı (YSA) yöntemiyle incelemiş ve 2030 yılına kadar tahmin edilen rüzgâr hızı değerleri belirlemiştir. Ayrıca, gelecekteki rüzgâr hızı tahminleri için formüller geliştirmiştir. YSA ile elde edilen verilerle, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) kullanılarak işlemiş ve yüksek rüzgâr enerjisi potansiyeline sahip bölgeler tespit ederek rüzgâr dağılım haritaları oluşturmuştur. Çalışma, YSA ve CBS'nin geleneksel tahmin yöntemlerine

alternatif olarak rüzgâr enerjisi sektöründeki araştırmacılar ve yatırımcılar tarafından kullanılabileceğini göstermektedir [10].

Emeksiz ve Demirci (2019) çalışmalarında, Türkiye'deki açık deniz rüzgâr enerjisi potansiyelini değerlendirmek için "Yeni Hibrit Alan Seçim Yöntemi" (NHSSM) geliştirmişlerdir. 31 kıyı bölgesinde 10 farklı seçim kriteri, analitik hiyerarşi süreci (AHP) ile değerlendirilmişler. Sonuç olarak, Bafra, Sinop ve Mersin kıyılarında sırasıyla 2112 MW, 1176 MW ve 1293 MW kapasiteli açık deniz rüzgâr santralleri kurulabileceğini belirlemişlerdir. Toplam kapasite tahminini 9021 MW olarak hesaplayıp, bu metodolojinin, açık deniz rüzgâr santrali planlamasında bölgesel karar alma süreçlerinde ve yenilenebilir enerji politikalarının geliştirilmesinde kullanılabilir olduğunu sunmuşlardır [11].

Oral ve Behçet (2015) çalışmalarında, bir bölgenin rüzgâr enerjisi potansiyelini değerlendirmek için rüzgâr hız ve yön verilerinin nasıl kullanılacağı incelemiştir. Bunun için öncelikle rüzgâr ölçüm istasyonları kurarak periyodik ölçümler yapmanın gerekliliği vurgulanmıştır. Sakarya-Esentepe bölgesinde kurulan bir rüzgâr ölçüm istasyonundan alınan 2007 yılına ait rüzgâr hızı ve yönü verileriyle örnek bir istatistiksel analiz yapmışlardır. Weibull dağılımı kullanılarak bölgenin rüzgâr enerjisi potansiyeli istatistiksel olarak incelemişler ve MATLAB programı ile sayısal çözümleme gerçekleştirmişler. Ayrıca, rüzgâr verilerinin analizinde WindPRO yazılımı kullanılmıştır [12].

Chobadi (2017) İsrail'in 2050 yılına kadar %100 temiz yenilenebilir enerjiye geçiş için pratik planı isimli çalışmasında İsrail'in 2050 yılına kadar tüm enerji altyapısını %100 yenilenebilir enerji kaynakları olan Rüzgar-Su-Güneş (WWS) teknolojilerine dönüştürmek için bir plan önermektedir. Bu plan, Prof. Jacobson'ın dünya çapındaki “%100 Temiz ve Yenilenebilir Rüzgar, Su ve Güneş Enerjisi” planına dayanmaktadır. Ancak, plan İsrail'in özgül topografik, çevresel ve yasal sınırlamaları göz önüne almadığı için, İsrail'in WWS teknolojilerini geliştirebilecek yeterli alana sahip olup olmadığı sorgulanmıştır. Analizler, güneş ve rüzgâr enerjisi potansiyelinin gerekli kapasitenin üzerinde olduğunu göstermiştir. Ancak, rüzgâr enerjisinin gelişimini etkileyen diğer faktörler göz önüne alındığında, Jacobson'ın planı güvenli bir şekilde doğrulanmamıştır. Bunun yerine, talebi karşılayacak şekilde güvenle doğrulanan alternatif bir enerji karışımı önerilmiştir [13].

Yang ve Dong (2017) yaptıkları çalışmada, yönlü rüzgâr enerjisi potansiyelini değerlendirmek için, rüzgâr hızı, rüzgâr yönü ve hava yoğunluğu gibi birbirine bağlı üç değişkenin birleşik dağılımını modellemek amacıyla vine kopula teorisine dayalı yarı parametrik bir üçlü model önermişlerdir. Önerdikleri bu modelde, rüzgâr hızı, yönü ve hava yoğunluğunun marjinal dağılımlarını uyarlamak için karışım dağılımları ve ikili dağılımlar için Johnson-Wehrly modelini kullanmışlardır. Ayrıca, rüzgâr hızı ile hava yoğunluğu arasındaki ilişkiyi tanımlamak için parametrik olmayan kopula uygulanmıştır. Modelin doğruluğunu test etmek için, Çin kıyısındaki sekiz farklı noktada 30 yıl boyunca toplanan saatlik rüzgâr verileri kullanmışlardır. Çalışmanın sonucuna göre, modelin hem toplam hem de mevsimsel verilerde yönlü rüzgâr enerjisi potansiyelini doğru şekilde tahmin ettiğini ve rüzgâr yönünün döngüsellliğini başarıyla modellediğini göstermektedir [14].

Bilgili (2007) yapay sinir ağları ile rüzgâr hızı ve rüzgâr gücü potansiyeli tahminleri çalışmasında Türkiye'nin güney ve güneybatı bölgelerindeki rüzgâr güç yoğunluğu, Weibull ve Rayleigh dağılım fonksiyonları ile Wind Atlası Analiz ve Uygulama Programı (WAsP) kullanarak belirlemiştir. Ayrıca, bir hedef istasyonun rüzgâr hızı, yapay sinir ağları (ANN) yöntemiyle, referans istasyonlarının verileri ve diğer meteorolojik parametreler kullanılarak tahmin edilmiştir. Yapay sinir ağları, Türkiye'nin farklı noktalarındaki uzun dönem aylık sıcaklık ve yağış verilerini tahmin etmek için de uygulanmıştır. Çalışmada, rüzgâr verileri 1998-2003 yılları arasında 9 farklı ölçüm istasyonundan alınmıştır. Elde edilen sonuçlar, tahmin edilen ve gerçek veriler arasında iyi bir uyum sağladığını ve model hatalarının kabul edilebilir sınırlar içinde olduğunu göstermektedir [15].

Kurban (2021) Yalova Üniversitesi için 10 yıllık (01.01.2012-18.04.2021) rüzgâr verileri kullanılarak yaptığı çalışmada, REPA haritaları ve Weibull dağılımı ile hesapladığı rüzgâr hızı verilerini incelemiş ve bilgisayar programları (WAsP ve WindPRO) ile rüzgâr potansiyelini belirlemiştir. Sonuç olarak, Yalova Üniversitesi'nin ortalama rüzgâr hızı 3.76 m/s ve rüzgâr gücü potansiyeli 62.7 W/m² olarak hesaplamıştır. Türkiye'nin farklı illerinde yapılan benzer çalışmalarda, rüzgâr hızı ve güç yoğunluğu değerlerine ulaşılmıştır. Kullanılan yöntemler arasında Weibull yoğunluk fonksiyonu, Rayleigh dağılımı ve bilgisayar programları öne çıkmaktadır. Yapılan analizlerde, en iyi sonuçların Weibull dağılımı ile elde edildiği belirlenmiştir. Diğer unsurlarda ise genellikle WAsP ve WindPRO bilgisayar programları tercih edilmiştir. Yalova Üniversitesi'ndeki rüzgâr hızı verileri,

REPA ile analiz edilen verilerle karşılaştırıldığında, REPA değerlerinden ortalama %20.4 daha yüksek çıkmıştır [16].

Özek (2022) çalışmasında, rüzgâr enerjisinin avantajları ve dezavantajlarıyla birlikte, dünya ve Türkiye'deki durumunu ele almıştır. Rüzgâr enerjisi, temiz, sürekli ve yerli bir enerji kaynağı olarak, düşük maliyet ve hızlı kurulum avantajlarıyla tercih edildiğini açıklamıştır. Çalışmasında, İzmir ilinin rüzgâr enerjisi potansiyelini incelemek amacıyla, İzmir Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nden alınan 2016-2020 yılları arasındaki rüzgâr verileriyle istatistiksel bir analiz yapmıştır [17].

Çınar (2023) Türkiye'de rüzgâr enerjisi yatırımlarını etkileyen faktörlerin araştırılması adlı çalışmasında, Türkiye'de son 10 yılda yenilenebilir enerji sektöründe kaydedilen ilerlemeyi incelemiştir. Yenilenebilir elektrik üretimi üç kat artmış ve 2022'de Türkiye'nin rüzgâr enerjisi kurulu gücü 11.944 MW'a ulaşmıştır. Türkiye, 2020'de yenilenebilir enerjiden elde edilen toplam güç üretiminde %52'lik bir paya ulaşmış, 2035 yılında rüzgâr kurulu gücünü 29,6 GW'a çıkarmayı hedeflemektedir. Rüzgar enerjisinin yerli enerji kaynaklarında payının artırılması, Türkiye'nin ticaret açığını azaltma ve enerji talebini karşılama açısından önemli olduğuna değinmiştir. Ayrıca, rüzgâr enerjisi maliyetlerini, yatırım dinamiklerini ve ekonomik potansiyelini araştırmış, Türkiye'deki rüzgâr gücü firmalarıyla yapılan görüşmeler sonucunda, rüzgâr enerjisinin potansiyelinin daha verimli kullanılabilmesi için çeşitli politika önerileri sunmuştur [18].

Khan (2023) Çalışmasında, Türkiye'nin rüzgâr enerjisi potansiyelini değerlendirmek için makine öğrenimi algoritmalarıyla rüzgâr enerjisi üretimi tahminini incelemiştir. SVM modelleri, saatlik ve haftalık tahminler için karşılaştırmıştır. Sonuçlar, Polynomial çekirdekli SVM modelinin daha başarılı tahminler sunduğunu göstermektedir. Bu çalışma, rüzgâr enerjisinin entegrasyonu ve tahmininin önemini vurgulamakta olup, farklı parametrelerle model performansının değişebileceğini belirtmektedir [19].

Adewumi (2019) çalışmasında Nijerya'nın kuzeyindeki 10 eyalette, 2008-2017 yıllarına ait rüzgâr verilerini incelemiştir. Rüzgar enerjisi potansiyelini belirleyerek, elektrik üretimi için rüzgâr türbinlerinin uygulanabilirliğini değerlendirmiştir. Çalışmada 10 farklı dağıtım fonksiyonu kullanmış ve en uygun fonksiyon Kolmogorov-Smirnov testiyle seçmiştir. Yapılan analizlere göre, yıllık ortalama rüzgâr hızı 4.96 ile 12.3 knot arasında değişmektedir,

bu da bölgenin yüksek rüzgâr potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin, kırsal alanlarda kesintisiz hava akışı ve geniş alan erişimi nedeniyle en uygun seçenek olduğu sonucuna varılmıştır. 1500 kW gücünde Suzlon S82 türbini, en düşük enerji üretim maliyetiyle en verimli türbin olarak bulunurken, 4500 kW gücündeki Gamesa G128 türbini ise en yüksek enerji üretim maliyetine sahiptir [20].

Balat (2009) Çalışmasında, modern rüzgâr türbini teknolojisinin gelişimini incelemiştir. Rüzgar enerjisi, elektrik üretimi için olgun, rekabetçi ve çevre dostu bir teknoloji olarak dünya çapında yaygın olarak kullanılmaktadır. Rüzgar türbinleri, aerodinamik kanatlar kullanarak rüzgârdan enerji toplar ve bunu elektrik ya da mekanik enerjiye dönüştürür. Son teknoloji ve performans iyileştirmeleri, rüzgâr türbinlerinin verimliliğini, maliyet etkinliğini ve güvenilirliğini artırmıştır [21].

Akpınar ve Akpınar (2004) çalışmalarında, Türkiye'nin Maden-Elazığ bölgesindeki rüzgâr enerjisi potansiyeli Weibull yoğunluk fonksiyonu kullanarak belirlemiştir. 1998-2002 yılları arasındaki beş yıllık saatlik rüzgâr verileri analiz edilmişlerdir. Sonuçlar, bölgedeki şekil (k) parametresinin yıllık olarak 1.51 ile 1.70 arasında değiştiğini, ölçek (c) parametresinin ise 5.54 ile 6.12 arasında olduğunu göstermiştir. Yıllık ortalama rüzgâr hızı 5.63 m/s ve ortalama güç yoğunluğu 244.65 W/m² olarak hesaplanmıştır. Bu veriler, Maden-Elazığ'ın rüzgâr enerjisi üretimi için potansiyeli yüksek bir bölge olduğunu ortaya koymuştur [22].

Aneke ve Wang (2016) yaptıkları çalışmalarında, enerji depolamanın modern enerji tedarik zincirindeki önemini vurgulamıştır. Enerji depolama, şebeke istikrarını artırma, yenilenebilir enerji kullanımını yaygınlaştırma, enerji verimliliğini iyileştirme, yenilenemeyen enerji kaynaklarını koruma ve çevresel etkileri azaltma gibi faydalar sağladığına değinmişlerdir. Literatürde birçok enerji depolama teknolojisi mevcut olsa da, bunlar farklı olgunluk seviyelerinde olup sadece bazıları ticari ölçekte kanıtlandığını açıklamışlardır. Çoğu inceleme makalesi bu teknolojileri ayrıntılı şekilde ele alırken, gerçek yaşam uygulamaları hakkında sınırlı bilgi bulunmaktadır. Bu çalışma, enerji depolama teknolojilerinin uygulama ve performanslarını ayrıntılı şekilde inceleyerek gerçek yaşam uygulamalarındaki bu boşluğu doldurmayı amaçlamıştır. Ayrıca, ikincil enerji formlarının; elektrik ve ısı depolanması ve dünya genelindeki projeler hakkında da bilgi verilmektedir. Son olarak, ticari ölçekte enerji depolama teknolojilerinin yaygınlaşmasını engelleyen zorluklar ele alınmıştır [23].

Barton ve Infield (2004) çalışmalarında, zayıf elektrik şebekelerinde araziye entegre yenilenebilir enerji üretiminin (ERG) artışını sağlamak ve zaman kaydırarak üretilen elektriğin değerini artırmak için geliştirilen basit bir olasılık yöntemini ele almıştır. Özellikle rüzgâr jeneratörlerinin bağlantısı ve voltaj artışı nedeniyle sınırlanan ERG seviyeleri üzerine odaklanmıştır. Farklı depolama teknolojilerinin farklı zaman dilimlerinde operasyonel uygunlukları karşılaştırmışlar ve enerji depolama için uygun boyutlandırmanın sağlanabilmesi amacıyla güç kapasitesi ve enerji kapasitesi arasındaki ilişki incelemişlerdir [24].

Boudy ve arkadaşları (2021) yaptıkları bu çalışmalarında, Moritanya'daki rüzgâr enerjisi potansiyelinin mekansal ve zamansal varyasyonlarını inceleyerek enerji üretiminin teknoloji-ekonomik fizibilite analizini yapmayı amaçlamıştır. Araştırma, mevsimsel, günlük ve turbulans indekslerinin bu bölgedeki rüzgâr potansiyeli üzerindeki etkilerini analiz etmeye odaklanmıştır. Bir yıl boyunca her 10 dakikada bir ölçülen veriler, Moritanya'nın batı kıyasında sekiz farklı noktadan toplanmış ve rüzgâr özelliklerinin yıllık ortalamaları belirlenmiştir. Rüzgar türbinlerinin güç yoğunluğu, Weibull parametreleri ve kapasite faktörleri incelenmiş, farklı türbinlerin enerji üretim verimliliği karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, düşük turbulans indeksine sahip bölgelerde daha yüksek güç üretimi sağlandığını ve Ecotecnia-48 türbininin en düşük enerji maliyetine sahip olduğunu göstermektedir [25].

Castillo ve Gayme (2014) yenilenebilir enerji kaynaklarının yüksek oranlarda kullanıldığı, verimli ve maliyet etkin bir enerji sistemine geçişte şebeke ölçeğinde enerji depolamanın rolünü ve karşılaşılan engelleri ele almaktadır. Şebeke depolama teknolojileri, çeşitli özelliklere sahip olup birçok şebeke hizmeti sunmaktadır. Özellikle, kesintili ve talep edilemeyen yenilenebilir enerji kaynaklarının belirsizlik ve değişkenlik etkilerini azaltmaya yönelik en uygun depolama hizmetleri üzerinde durulmuştur. Makale, şebeke entegrasyonunu değerlendiren mevcut yöntemleri özetlemekte ve büyük ölçekli enerji depolamanın benimsenmesindeki zorlukları vurgulamaktadır. Ayrıca, enerji depolamanın teknik faydaları ile mevcut piyasa yapıları içindeki ekonomik zorluklar arasındaki çatışmalar ele alınmıştır. Son olarak, düzenleyici değişiklikler ve piyasa tasarımı ile ilgili devam eden zorluklar hakkında tartışmalar yapılmış ve kritik araştırma ihtiyaçlarına değinilmiştir [26].

Yıldız (2023) Coğrafi Bilgi Sistemi Fonksiyonları Kullanarak Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesi: Türkiye, Balıkesir Örneği çalışmasında, Türkiye'nin Balıkesir

ilinin rüzgâr enerjisi potansiyeli coğrafi bilgi sistemi (CBS) fonksiyonları kullanarak hesaplamıştır. 32 meteoroloji istasyonunda 10 m yükseklikte ölçülen rüzgâr hızları, arazi örtüsü verilerini dikkate alarak 100 m'ye extrapole etmiştir. Bu verilerle Balıkesir ilinin rüzgâr hızı haritası oluşturulmuş ve ulusal düzenlemelere bağlı olarak türbin sayısını hesaplamak için bir denklem geliştirilmiştir. Sonuçlar, Balıkesir ilinin rüzgâr enerjisi potansiyelini farklı rüzgâr hızı aralıklarına göre belirlemiş ve Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Atlası (REPA) ile karşılaştırılmıştır [27].

Liu (2019) Çin ve Amerika Birleşik Devletleri Arasındaki Yenilenebilir Enerji Politikaları ve Siyasi Yapıların Karşılaştırmalı Analizi çalışmasında, Çin ve Amerika Birleşik Devletleri'ni, yenilenebilir enerji gelişimindeki önemli rollerini inceleyerek karşılaştırmıştır. Çin'in dünyada yenilenebilir enerji alanında neden lider olduğu sorusunu ele almış ve bunun, Çin'in gelişmekte olan bir ülke olmasına rağmen nasıl başarılabilirdiğini araştırmıştır. Literatür, yenilenebilir enerji gelişiminin sübvansiyon ve ayrıcalıklı politikalara dayandığını göstermektedir. Ayrıca, Çin ve ABD arasındaki farklı siyasi yapılar ve politika yapma süreçlerinin, yenilenebilir enerji politikalarının gelişimini nasıl etkilediği vurgulanmıştır. Tez, Çin'in benzersiz siyasi yapısının ve politika yapma sürecinin, yenilenebilir enerji gelişimini etkili kıldığını savunmaktadır. Son olarak, bu karşılaştırmadan elde edilen bulgular, her iki ülkenin de yenilenebilir enerji ve politikalarını geliştirmesi için öneriler sunmaktadır [28].

Wo 'zniak (2021) çalışmalarında, Polonya'nın güneydoğusundaki 18-40 yaş arasındaki gençlerin iklim değişikliği ve yenilenebilir enerjiye yönelik tutumlarını incelemiştir. Katılımcılar, iklim değişikliğinin önemli olduğunu ve yenilenebilir enerji kullanımının artırılmasının gerekliliğini desteklediklerini belirtmişlerdir. Ayrıca, nükleer enerjiye de destek vermiş ve enerji tasarrufu için hükümet desteği talep etmişlerdir. Araştırma, 2025 yılında enerji alanındaki değişikliklerle birlikte tekrar yapılacaktır [29].

Kruyt (2019) çalışmasında İsviçre'nin dağlık arazisindeki rüzgâr kaynağını daha iyi anlamayı ve ülkenin enerji geçişine katkıda bulunmayı amaçlamaktadır. İlk olarak, İsviçre'deki rüzgâr kaynağının özellikleri, iki meteorolojik ağdan elde edilen verilerle araştırılmış ve ülke genelindeki rüzgâr çiftliklerinin kararlı bir güç çıktısı üretebileceği sonucuna varılmıştır. Ayrıca, yükseltinin rüzgâr kaynağındaki rolü vurgulanarak, yükselti arttıkça düşük rüzgâr hızlarının azaldığı, ortalama hızların ise arttığı gösterilmiştir. Daha

sonra, bir Numerik Hava Tahmin Modeli (NWP) ile Alpler üzerindeki rüzgâr hızları simüle edilerek, mevcut ortalama rüzgâr hızı tahminlerinden önemli bir iyileşme sağlanmıştır. Bu model, rüzgâr türbini kapasitesinin hesaplanmasında kullanılmış ve yüksek rakımlarda türbinler inşa edilerek kapasitenin azaltılabileceği bulunmuştur. Tezin son kısmında ise, Alpler'in küçük bölgelerinde yapılan yüksek çözünürlükteki simülasyonlar, daha yüksek çözünürlük modellerinin rüzgâr enerjisi potansiyelini daha doğru bir şekilde değerlendirdiğini göstermiştir. Bu, karmaşık topografyanın rüzgâr akışlarını önemli ölçüde etkileyerek enerji üretimi potansiyelini değiştirdiği anlaşılmaktadır [30].

Hadjipaschalis ve arkadaşları (2009) Çalışmasında, Elektrik enerjisi uygulamaları için mevcut ve gelecekteki enerji depolama teknolojilerinin genel bir bakışı çalışmasında elektrik enerjisi uygulamalarında kullanılan mevcut ve gelecekteki enerji depolama teknolojilerini incelemiştir. Mevcut teknolojiler uygulamada olup, bazıları hâlâ araştırılmaktadır. Teknolojiler arasındaki karşılaştırma, her birinin farklı ağ ortamları ve enerji depolama ölçeklerinde ideal şekilde çalıştığını göstermektedir. Optimum sonuçlar elde etmek için, ağ ortamı ve depolama cihazının özelliklerinin iyi bir şekilde incelenmesi gerektiği vurgulanmaktadır [31].

Joensen (2002) Kısa Vadeli Rüzgar Enerjisi Tahmini isimli çalışmasında, rüzgâr enerjisi ile üretilen elektriğin yüksek doğrulukta tahminlerini hesaplamak için modeller ve yöntemler geliştirmek ve bu modelleri ve yöntemleri çevrimiçi bir yazılım uygulamasına entegre etmeyi amaçlamıştır. Ayrıca, tahminlerin ekonomik değerini de kısaca ele almıştır [32].

Kalair (2021) Enerji depolama sistemlerinin fosil yakıtlardan yenilenebilir enerjiye geçişteki rolünü araştırdığı çalışmasında yenilenebilir enerji kaynaklarının hızla artışı ve fosil yakıtların azalışı bağlamında ısı ve elektrik depolama sistemlerinin rolünü ele almıştır. Yenilenebilir enerjilerin büyümesi ve fosil yakıtların tüketiminin azalması, sürdürülebilir enerji sistemleri, enerji geçişi ve temiz enerji girişimlerinin etkisiyle şekillenmektedir. Yenilenebilir enerjiye geçiş, yeni tasarım ve operasyonel zorluklar doğururken, enerji depolama sistemleri bu geçişi destekleyebilir. Ayrıca, nükleer füzyon ve yapay fotosentez gibi uzun vadeli temiz enerji çözümleri de tartışılmıştır. Çalışmada, enerji depolama cihazlarının güneş ve rüzgâr enerjisinin periyodik doğasını dengeleyebileceği, ayrıca güneş termal sistemlerinin soğuk iklimlerde su ve mekan ısıtması için uygun bir çözüm sunduğu

belirtilmiştir. Sonuç olarak, fosil yakıtlardan yenilenebilir enerjiye geçiş ve enerji depolama sistemlerindeki yeni gelişmeler vurgulanmaktadır [33].

Kazmi (2019) Pakistan'daki bir köy için Hibrit Jeotermal–PV–Rüzgar Sistemi çalışmalarında Pakistan'ın Azad Jammu Kashmir bölgesindeki Tattapani köyü için hibrit bir jeotermal–PV–rüzgâr enerji sistemi tasarlamışlardır. Bu sistem, köyün baz yük ihtiyaçlarını karşılamak için yeterli jeotermal enerji sağlayan sıcak su kaynaklarından yararlanırken, güneş ve rüzgâr enerjisi santrallerini kullanarak enerji arzını tamamlamaktadır. Bu tasarım, elektrik maliyetini (COE) düşürmekte ve fosil yakıt bağımlılığını azaltarak küresel ısınmanın önlenmesine katkı sağlamaktadır. Araştırma, 250 kW jeotermal, 250 kW PV ve 100 kW rüzgâr kapasitesine sahip hibrit sistemin, %5 faiz oranıyla 234.11 milyon rupe net bugünkü maliyet (NPC) ile uygulanabilir olduğunu göstermektedir. Ayrıca, fazla enerji şebekeye satılmakta ve COE 7.50 Rs/kWh olarak hesaplanmaktadır. Sistem, atmosferdeki 1.8 milyon kilogram CO₂ emisyonunu engellemeyi hedeflemektedir. Duyarlılık analizi, rüzgâr hızı ve güneş ışınlamı değişikliklerinin, rüzgâr ve güneş enerjisinin maliyetini nasıl etkilediğini göstermekte, ayrıca faiz oranındaki değişikliklerin NPC ve COE üzerindeki etkileri tartışılmaktadır. Bu sonuçlar, hibrit enerji sistemlerinin maliyet etkinliğini ve çevresel faydalarını ortaya koymaktadır [34].

McKenna ve arkadaşları (2013) çalışmalarında, Baden-Württemberg eyaletinin 2020 yılına kadar toplam elektrik üretiminin %10'unu rüzgâr enerjisinden elde etme hedefinin gerçekleştirilmesinin teknik ve ekonomik yönlerini incelemişlerdir. Çalışma, bölgedeki rüzgâr enerjisi potansiyelini ve elektrik üretim maliyetlerini hesaplayarak maliyet-potansiyel eğrileri oluşturur. Teknik potansiyel, coğrafi bilgi sistemleri (GIS) ve arazi kullanımı verileriyle belirlenmiş, rüzgâr atlası ve türbin verileri kullanılarak elektrik üretim kapasitesi tahmin edilmiştir. 2010 yılı için rüzgâr enerjisi maliyetleri analiz edilip, 2020 ve 2030 yılları için projeksiyon yapılmıştır. Sonuç olarak, Baden-Württemberg'de rüzgâr enerjisi için uygun alanın %5.9 (2119 km²) olduğu ve 18.5 GW ile 24.5 GW arasında kapasite kurulabileceği bulunmuştur. Elektrik maliyetleri, türbin türüne ve rüzgâr hızına bağlı olarak, 2010'da 3.99 ile 21.42 cent/kWh arasında değişmekte, 2030'da ise bu maliyetlerin 3.33 ile 17.84 cent/kWh arasında düşmesi beklenmektedir [35].

Mukulo (2014) Kenya Platosu Mwingi-Kitui'de Rüzgar Enerji potansiyelinin belirlenmesi isimli çalışmada, Kenya'nın Mwingi-Kitui platosunda küçük rüzgâr türbinleri (SWTG)

kullanarak enerji sağlama potansiyelini araştırmıştır. Bölgede yıllık ortalama rüzgâr hızları 20 m yükseklikte 4.24 m/s ve 40 m yükseklikte 4.88 m/s bulunmuş, bu da küçük türbinlerin verimli çalışabileceğini göstermiştir. Rüzgar yönü genellikle güneydoğudan olup, 40 m üzerindeki yüksekliklerde rüzgâr hızı, türbinlerin çalışma hızını aşmaktadır. Maksimum rüzgâr gücü yoğunlukları ise 60 m, 80 m ve 100 m yüksekliklerde sırasıyla 84.3 W/m², 100.5 W/m² ve 115 W/m² olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, bölgede rüzgâr enerjisinin kullanımına uygun bir potansiyel sunduğunu göstermiştir [36].

Albostan ve arkadaşları (2008) Yaptıkları çalışmada, Bahçeşehir Üniversitesi Beşiktaş yerleşkesine 2008 yılında kurulan cup-tipi rüzgâr enerjisi gözlem istasyonundan beş aylık bir dönemde yarım saatlik aralıklarla ölçülen rüzgâr hızı, yönü, nem, sıcaklık ve basınç verileri kullanarak, bölgenin rüzgâr enerjisi potansiyeli değerlendirmişlerdir. Elde edilen verilerle, bölgenin rüzgâr enerjisi potansiyelinin istatistiksel analizi yapmışlar ve Weibull dağılımı kullanarak analiz gerçekleştirmişlerdir. Çalışmanın sonucu, bölgenin elektrik enerjisi üretimi açısından uygun bir rüzgâr enerjisi potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir [37].

Köse ve Özgören (2005) Çalışmalarında, Selçuk Üniversitesi Alaaddin Keykubat Kampüsü bölgesinde kurulan ölçüm istasyonundan elde edilen verilerle, bölgenin rüzgâr enerjisi potansiyelini belirlemişlerdir. 2003-2005 yılları arasında, uluslararası standartlara uygun olarak yapılan ölçümler, yerden 10 m ve 20 m yüksekliklerdeki ortalama rüzgâr hızı ile 20 m yükseklikteki rüzgâr yönü verilerini içermektedir. Ölçülen veriler ve yerli imalat faktörleri göz önünde bulundurularak, kapasite, yatırım maliyeti ve geri ödeme süreleri hesaplanmıştır. Bölgeye kurulacak rüzgâr enerjisi santrali için uygun türbin tipi seçilmiş ve minimum maliyet ile geri ödeme süresi elde edilmiştir. Yapılan hesaplamalara göre, yatırımın ilk maliyetini 6 yıldan daha kısa sürede karşılayacağı bulunmuş, bu süre, literatürde verilen türbin kullanım sürelerine göre oldukça kısa olarak değerlendirilmiştir [38].

Şekerci ve arkadaşları (2009) çalışmalarında, yıllık enerji üretiminin hesaplanması için iki yöntem ele almıştır. İlk yöntem, Weibull dağılımına dayanırken, ikinci yöntem Rayleigh dağılımına dayanmaktadır. Ayrıca, araziye ait rüzgâr özelliklerine göre doğru rüzgâr türbini seçimi önerilmektedir. Maksimum güç çıkışı için, rüzgâr türbinleri araziye ait rüzgâr özelliklerine göre seçilmelidir. Rüzgar türbini ne kadar uygun olursa, yıllık enerji üretiminin

o kadar yüksek olması beklenir. Seçim, en az bir yıl boyunca ölçülen rüzgâr hızı verilerine dayanmaktadır [39].

Mengi ve Metlek (2020) çalışmalarında, Türkiye'nin Akdeniz Bölgesi'ndeki 21 noktanın rüzgâr ekserji analizi, yapay sinir ağı ve klasik hesaplama yöntemleri ile karşılaştırılmıştır. NASA'dan elde edilen 1981-2018 arasındaki aylık ortalama yüzey sıcaklığı, yüzey basıncı ve rüzgâr hızı verileri kullanılmıştır. Bu verilerle örnek bir rüzgâr türbini modeli oluşturulmuş ve maksimum enerji üretimi ile ekserji değerleri hesaplanmıştır. Çalışmanın sonucunda, yapay sinir ağı ve klasik hesaplama yöntemleriyle elde edilen değerler karşılaştırılmış ve %0,00024 ortalama karesel hata oranı ile başarılı sonuçlar alınmıştır. Bu sayede, rüzgâr enerji santrali yatırımı yapacak yatırımcılar ve karar alıcılar için ekserji analiz sonuçları az veriyle hızlıca hesaplanabilmektedir [40].

Jannis (2012) Hava Tabanlı Rüzgar Enerjisinin Teknik ve Ekonomik Potansiyeli isimli çalışmasında hava tabanlı rüzgâr enerjisinin uygulanabilirliğini ve ekonomik potansiyelini değerlendirmişlerdir. Pompalı uçurtma jeneratörleri (PKG) kullanarak, enerji maliyetlerinin geleneksel rüzgâr enerjisine kıyasla daha düşük olabileceği sonucuna varılmıştır. PKG tasarımları için maliyet hesaplamaları yapılmış ve bu sistemlerin mevcut sübvansiyonlarla ya da hükümet desteği olmadan ekonomik olabileceği gösterilmiştir. Tez, PKG teknolojisinin özellikle uzak ve karmaşık arazilerde avantajlı olduğunu, uzun vadede düşük rüzgâr hızına sahip bölgeler ve açık deniz projelerinin ise daha umut verici olduğunu ortaya koymuştur [41].

Pradotto (2022) Sardinya'daki rüzgâr potansiyelinin tahmin edilmesi, nicel hesaplamalar ve mevcut kısıtlamaların analizi çalışmasında Sardinya Adası'ndaki rüzgâr enerjisi potansiyeli değerlendirmiştir. Rüzgar türbinlerinin elektrik üretkenliği incelenerek, teknik, uygulanabilir ve düzenleyici potansiyeller hesaplanmış, bu hesaplamalar çeşitli dışlama kriterleri kullanılarak yapılmıştır. Ayrıca, bölgenin mevcut elektrik altyapısı ve ekonomik değerlendirmeleri de yapılmıştır. Sonuç olarak, Sardinya'daki rüzgâr kaynağının, İtalya'nın yenilenebilir enerji hedeflerine ulaşmak için verimli bir şekilde kullanılabileceği ve her üç potansiyelin de tutarlı yıllık üretim ile kapasite faktörüne sahip olduğu bulunmuştur [42].

Yanıktepe ve arkadaşları (2013) çalışmalarında, Türkiye'nin Osmaniye ilindeki rüzgâr enerjisi potansiyelini incelemişlerdir. Osmaniye'deki rüzgâr enerjisi potansiyeli, Weibull ve

Rayleigh dağılım yöntemleriyle hesaplanmıştır. 2008-2011 yılları arasında 10 m yükseklikte toplanan rüzgâr hızı, yönü ve akış süresi verileriyle, bölgenin rüzgâr enerjisi potansiyelinin uygun olduğu belirlenmiştir. Ortalama rüzgâr hızı 2,23 m/s, rüzgâr potansiyel enerjisi ise 24,587 W/m² olarak hesaplanmıştır. Ulaşılan bu sonuç, Osmaniye'nin rüzgâr enerjisi yatırımları için uygun bir bölge olduğunu göstermektedir [43].

İmal (2013) Sütçü İmam Üniversitesi Ana Kampüste Rüzgar Enerji Potansiyeli Araştırması ve Değerlendirmesi isimli bu çalışmalarında, Kahramanmaraş ilindeki rüzgâr potansiyelini incelemeye yönelik önemli bir araştırma sunmaktadır. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi kampüsünde yerleştirilen rüzgâr ölçüm direği ve cihazlarla, 2010 yılı Ekim ayında başlayan ölçümler 2012 yılı Nisan ayında sona erdirilmiştir. Bu süre zarfında, bölgedeki rüzgâr verileri toplanmış ve kaydedilmiştir. Toplanan veriler, rüzgâr atlası analizi ve uygulaması yapan WAsP programı ile analiz edilmiştir. Bu program, rüzgâr potansiyelinin daha iyi anlaşılmasını sağlayan güçlü bir araçtır. Elde edilen bulgular, ölçülen bölgedeki ortalama yıllık rüzgâr hızı ve yönü hakkında bilgi sunmaktadır. Bu analizler sayesinde, kampüs alanı için rüzgâr haritası oluşturulmuş, ayrıca rüzgâr türbini yerleşimi ve bölgedeki en uygun koordinatlar tespit edilmiştir. Bu tür çalışmalar, özellikle yenilenebilir enerji projeleri ve rüzgâr enerjisinden faydalanma amacıyla büyük önem taşımaktadır. Bölgede elde edilen veriler, enerji üretimi ve rüzgâr türbini yerleşimi açısından kritik bilgiler sağlamaktadır [44].



3. MATERYAL VE METOT

Enerji, insanlığın başlangıcından bugüne kadar ve gelecekte de sürecek en temel ihtiyaçlardan biridir. İnsan varlığını sürdürebilmek için en önemli kaynak olan enerji, ilk yerleşik hayattan makineleşmeye, gelişen teknolojiye ve artan nüfusla birlikte hayatımızda şekil değiştirerek sürekli var olmuştur. Enerji, kelime anlamıyla “bir işin yapılabilme yeteneği” olarak tanımlanırken, aslında daha geniş bir anlam taşır ve en değerli kaynaklardan biridir.

İnsanlar, zamanla daha az güçle maksimum verim elde edebilecek üretim yöntemlerini arayışına girmişlerdir. Emek gücüne dayalı üretim yöntemlerinde, üretim miktarı bireylerin yetenekleri ve güçleriyle sınırlı kalmaktadır. Nüfus arttıkça, üretim miktarının artırılması gerektiği gerçeğiyle birlikte üretim tekniklerinin geliştirilmesine odaklanılmıştır. Buhar makinesinin icadından sonra, doğal enerji kaynaklarıyla üretim yapılabileceği öngörülmüştür. Büyük ölçekli yatırımlar için enerji tüketimi, en önemli faktör haline gelmiştir. Enerji kaynaklarının mülkiyetine sahip ülkeler, sadece üretim değil, aynı zamanda siyasal açıdan da stratejik bir avantaj elde ederek öncelikli durumlar kazanabilmektedir. Enerji, ülkeler arasındaki ilişkilerin şekillenmesinde önemli rol oynamakta ve bazen siyasi kırılmalara yol açabilmektedir [45].

3.1. Enerji Kaynakları

İnsanların talepleri arttıkça, enerjinin farklı kaynaklardan elde edilmesi kaçınılmaz hale gelmiştir. Bu ihtiyaç doğrultusunda, enerji üretiminin sağlanması için çeşitli kaynaklara başvurulmuş ve ülkelerde de bu kaynakları bulma arayışı başlamıştır. Enerji kaynakları arasında katı yakıtlar (kömür ve türevleri), ham petrol, nükleer enerji, doğalgaz, rüzgâr, güneş, jeotermal, hidrolik, hidrojen ve biyokütle (hayvan ve bitki atıkları, odun) gibi çeşitler bulunmaktadır. IEA (Uluslararası Enerji Ajansı) verilerine göre, küresel çapta en fazla üretilip tüketilen enerji kaynakları kömür, petrol ve doğalgazdır. Ayrıca enerji kaynaklarının üç temel özelliği vardır: kıt olmaları, dünya genelinde eşitsiz dağılımları ve enerji dönüşümünün çevreyi kirletici etkiler yaratması. Enerji kaynakları, ticari ve ticari olmayan olmak üzere iki gruba ayrılabilir. Ticari enerji kaynakları, modern endüstriyel ekonomilerin ihtiyaçlarını karşılayan ve geniş bir ulusal ve uluslararası pazara sahip enerji türlerini kapsar;

örnek olarak doğalgaz, petrol, su gücü, nükleer enerji ve elektrik verilebilir. Ticari olmayan enerji kaynakları ise geleneksel ekonomilerde kullanılan enerjilerdir; örnekler olarak odun, tarımsal atıklar ve hayvan atıkları gösterilebilir [46].

	Kurulu Güç (MW)	Yüzde %
Hidrolik	32.173	27,7
Doğalgaz	24.780	21,3
Güneş	20.098	17,3
Rüzgar	12.863	11,1
Yerli Kömür	11.475	9,9
İthal Kömür	10.456	9,0
Biyokütle	2.119	1,8
Jeotermal	1.734	1,5
Diğer	574	0,3
TOPLAM	116.271	100

Şekil 3.1. 2024 yılı sonu itibariyle Türkiye’de kurulu gücün dağılımı [47]

2024 yılında Türkiye’nin elektrik üretiminin %34,7’si kömürden, %18,9’u doğal gazdan, %21,1’i hidrolik enerjiden, %10,4’ü rüzgârdan, %8,7’si güneşten, %3,1’i jeotermal enerjiden ve %3,1’i diğer kaynaklardan sağlanmıştır. 2025 yılı Eylül ayı itibarıyla ülkenin toplam kurulu gücü 121.418 MW’a ulaşmıştır. Kurulu gücün kaynaklara göre dağılımı ise %26,6 hidrolik, %20,2 doğal gaz, %18,1 kömür, %11,7 rüzgâr, %19,9 güneş, %1,4 jeotermal ve %2,1 diğer kaynaklar şeklindedir. Aynı dönemde Türkiye genelinde elektrik üretim santrali sayısı (lisanssız santraller dâhil) 38.067’ye yükselmiştir. Bu santrallerin 771’i hidroelektrik, 69’u kömür, 387’si rüzgâr, 66’sı jeotermal, 361’i doğal gaz, yaklaşık 36.000’i güneş enerjisi ve 413’ü diğer kaynaklı tesislerden oluşmaktadır [48].

3.2. Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Modern dünyada, enerji üretim tesisleri genellikle kömür, petrol ve doğalgazla çalışmaktadır. Bu fosil yakıtlar yenilenemez, yani bir süre sonra tükenip, geri kazanılmaları çok pahalı veya çevresel olarak çok zararlı hale gelecektir. Bu nedenle, enerji üretim tesislerine alternatif enerji kaynakları tanıtılmalıdır. Bu yüzden, rüzgâr ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları giderek daha popüler hale gelmektedir çünkü bu kaynaklar sürekli olarak yenilenir ve asla tükenmezler.

Güneş, ana yenilenebilir enerji kaynağıdır çünkü neredeyse tüm yenilenebilir enerji kaynakları doğrudan veya dolaylı olarak ona bağlıdır. Güneşin neden olduğu hava sıcaklık değişimleri, rüzgârları harekete geçirir ve rüzgârın enerjisi daha sonra rüzgâr türbinleri tarafından yakalanır. Güneş ışığı tarafından taşınan güneş enerjisi, güneş panelleri tarafından emilir. Ardından, rüzgâr türbinlerinden ve güneş panellerinden elde edilen çıkış gücü, şebekeye kullanıma sunulur, böylece güneşten gelen enerji, güç üretimi için bir kaynak olarak kullanılır. Çıkış gücü daha sonra çeşitli ticari ve endüstriyel amaçlar için kullanılır.



Şekil 3.2. 2024 yılı sonu itibariyle Türkiye’de Yenilenebilir Kaynakların Üretimdeki Payı [47]

Yenilenebilir enerji kaynakları, doğada bulunan ve tükenmeyen, sürdürülebilir rüzgâr, güneş, jeotermal, hidrojen ve biyokütle gibi kaynaklardır. Ayrıca nükleer enerji, yerin içindeki termal enerji ve yerçekiminden kaynaklanan potansiyel enerji de bu kayıtlara dahildir. Bu kaynaklar endüstriyel tesislerde genellikle elektrik üretimi gibi ikincil enerji kaynaklarına dönüştürülür ve doğrudan da kullanılabilir. Bazı enerji kaynakları ise hammadde olarak başka alanlarda kullanılabilir [49].



Şekil 3.3. Yenilenebilir Enerji Kaynakları [50]

Yenilenebilir enerji kaynakları, ikincil enerji kaynakları olarak bilinir ve geçmişten beri potansiyel olarak var olan kaynaklardır. Ancak, teknolojinin yeterince gelişmemesi ve yaşanan bazı zorluklar nedeniyle son yıllarda bu kaynaklardan daha fazla yararlanılmaya başlanmıştır. İkincil enerji kaynakları arasında jeotermal, rüzgâr, güneş, hidrojen, biyokütle, dalga, gel-git ve biyogaz gibi enerji türleri yer almaktadır. Sanayileşme sürecinin yaşanmaması, insanların fosil kaynaklar kullanarak ihtiyaçlarını karşılamasını zorunlu kılmıştır. Fosil kaynaklar uzun yıllar kullanılırken, yenilenebilir enerji kaynakları daha sonra kullanılmaya başlanmıştır. İkincil enerji kaynaklarının kullanımı, sanayileşmenin başlaması ve günümüz teknolojisinin gelişmesiyle artmıştır. Eskiden ekonomik ve teknolojik zorluklar nedeniyle bu kaynakların kullanımı sınırlıydı. Ancak günümüzde fosil kaynakların kullanımının arttığı ve zamanla tükenmeye başlayacağı bilinciyle yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ihtiyaç da artmıştır [51].

3.2.1. Güneş enerjisi

Güneşin çekirdeğinde bulunan hidrojen gazının helyuma dönüşmesiyle gerçekleşen füzyon reaksiyonu sonucunda ortaya çıkan enerjiye güneş enerjisi denir. Güneş enerjisinden faydalanmak için güneş kollektörleri, güneş santralleri ve fotovoltaik piller gibi teknolojiler geliştirilmiştir. Bu teknolojiler, güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesini veya ısı enerjisi olarak kullanılmasını sağlamaktadır [52].

3.2.2. Hidroelektrik enerjisi

Hidroelektrik enerji, su hareketinden elde edilen enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesidir. Yenilenebilir bir enerji kaynağı olan bu enerji, en çok ırmaklar üzerine inşa edilen barajlarla suyun biriktirilip, bu birikintiden yararlanılarak elektrik üreten şekilde kullanılır.

Hidroelektrik santrallerinin çalışma türleri benzer olsa da, tüm santraller yenilenebilir enerji sınıfına dahil edilmemektedir. Elektrik Enerjisi Üretim Amaçlı Kullanım İlişkin Kanununa göre, hidroelektrik santrallerinin enerji olarak kabul edilebilmesi için; kanal veya nehir tipi olmalarının yanı sıra ve rezervuar alanının 15 kilometrekarenin altında olması gerekmektedir [53].

3.2.3. Biyokütle enerjisi

Biyokütle, bitkisel ve hayvansal kökenli tüm maddelerden oluşan ve ana bileşenleri karbonhidrat olan bir enerji türüdür. Biyokütle enerjisinin kullanımının ilk örneği, 19. yüzyılda İngiltere'de fosseptiklerde oluşan gazın sokakları aydınlatma amacıyla kullanılması ile birlikte görülmüştür. Türkiye'de ise biyokütle enerjinin kullanımında ilk adım, 1970 yılında Toprak Su Araştırma Enstitüsü tarafından atılmış, 1977'de ise Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu bu konuyla ilgili çalışmalara önem verilmeye başlanmıştır.

Biyokütlenin, hava koşulları ve iklim koşulları üzerinde olumlu etkilere sahiptir. Biyokütle yakıtları, ısıtma, elektrik üretimi ve enerji sağlamak amacıyla dağıtmak, hayvansal atıklar, bitkisel atıklar değerlendirilebilir. Bu sayede biyokütle enerji kapsamında alternatif katı, sıvı ve gaz yakıtları elde edilir. En önemli alternatif yakıtlardan biri, dizel motorlar için kullanılan biyomotordur. Ayrıca fosil yakıtlar ile birlikte biyokütle yakıtlarının kullanımı hava kirliliğini azaltmakta katkıda bulunur [55].

3.2.4. Jeotermal enerji

Jeotermal enerji, yer kabuğunun çeşitli derinliklerinde birikmiş sıcak su, buhar, gaz veya sıcak kuru kayalardan elde edilen termal enerji olarak sağlanır. Yapılan çalışmalar ve programlamalar dünyanın başlangıçta eriyik halde bulunduğunu ve yıllar içinde katı hale

geldiğini göstermektedir. Yer kabuğunun derinliklerinde bulunan uranyum (U238, U235) toryum (Th232) ve hücreleri (K40) gibi radyoaktif parçaların bozuşması sonucu sürekli olarak ısı üretimi sürecinin, jeotermal enerjinin kaynağı olduğuna inanılmaktadır. Jeotermal enerji, verimli ve temiz bir enerji kaynağı olması sebebiyle birçok doğrudan kullanım alanına sahiptir. Yaygın kullanım alanları arasında sıcak su ve ısıtma suyu üretimi, seraların ısıtılması, termal turizm ve gıda ile kimya sanayi gibi endüstriyel çalıştırmalar yer alır. Ayrıca jeotermal sistemler, gaz yakıtlı ve sıvı yakıtlı sistemlere göre daha verimli oldukları için tercih edilmektedir. Jeotermal kaynakların kullanım alanları arasında elektrik üretimi için farklı buhar çevrimi prosesleri de mevcuttur [56].

3.2.5. Hidrojen enerjisi

Hidrojen ve hidrojen enerjisi, rafinaj, endüstriyel sistemler (amonyak, metanol, demir-çelik, çimento üretimi), ulaşım sektöründe içten yanmalı motorlar ve yakıt hücreli araçlar için yakıt olarak, ayrıca evlerin ısıtılmasında kullanılmaktadır. Şu anda kullanılan hidrojenin büyük çoğunluğu fosil yakıtlardan üretilmektedir. Hidrojenin bu kadar geniş bir kullanım alanı, küresel ekonomiyi ve günlük yaşamı desteklemektedir. Hidrojen enerjisi kullanım talebinin çoğalması, özellikle gıda üretimi için gübre, nakliye sektöründe rafine yakıtlar ve inşaat sektöründe inşaat malzemesi gibi alanlardaki ürün değişiminin görülmesiyle iyice artacaktır [57].

3.2.6. Dalga ve gel git enerjisi

Okyanus dalgaları, Dünya yüzeyinin eşit olmayan şekilde ısınmasının rüzgâr üretmesi ve suyun üzerinden esen rüzgârın dalgalar üretmesi bakımından üçüncü bir güneş enerjisi biçimidir. Dünya yüzeyinin yaklaşık %75'i su ile kaplı olmasına rağmen, dalga enerjisi verimli bir şekilde araştırılmamıştır, özellikle de güneş ve rüzgârın enerjisinden yararlanmada kaydedilen ilerlemeyle karşılaştırıldığında. Sorun, bu enerjiden yararlanmanın ve onu büyük miktarlarda elektriğe dönüştürmenin kolay olmamasıdır. Bu nedenle, dalga enerjisi santralleri nadirdir [58].

Türkiye'nin kıyı uzunluğu yaklaşık 8210 km olmasına rağmen, tüm kıyı bölgeleri dalga paneli sistemi kurulabilir değildir. Türkiye'nin kıyı uzunluğunun yaklaşık beşte birinde, yıllık yaklaşık 2.11 GW dalga enerjisi potansiyeli bulunmaktadır. Batı Karadeniz bölgesi,

İstanbul Boğazı'nın kuzeyi ve Ege Denizi'nin güneybatı kıyıları, dalga enerjisinden elektrik üretimi için uygun alanlara olarak görülmektedir. [59] Dalga enerjisi ile ilgili Türkiye'de yatırım yapan önemli girişimlerden biri, Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü (BOREN) ve Türkiye Elektromekanik Sanayi A.Ş. (TEMSAN) tarafından ortaklaşa yapılan çalışmadır. Bu çalışma, Sakarya'nın Karasu ilçesinde gerçekleştirilmiştir [60].

3.2.7. Rüzgar enerjisi

Rüzgâr enerjisi, kaynağı güneş olan doğal, yenilenebilir ve temiz bir enerji türüdür. Güneşin yeryüzünü homojen ısıtmaması nedeniyle oluşan sıcaklık ve basınç farkları, hava kütlelerinin hareket etmesine ve böylece rüzgârın oluşmasına yol açar. Rüzgar, yüksek basınç alanlarından alçak basınç alanlarına doğru hareket eden hava akımıdır ve dünyanın dönmesi, yüzey sürtünmeleri, yerel ısı dağılımı, atmosferik olaylar ve arazi topografyası gibi faktörlerden etkilenerek zamansal ve mekânsal değişiklikler gösterir [61].

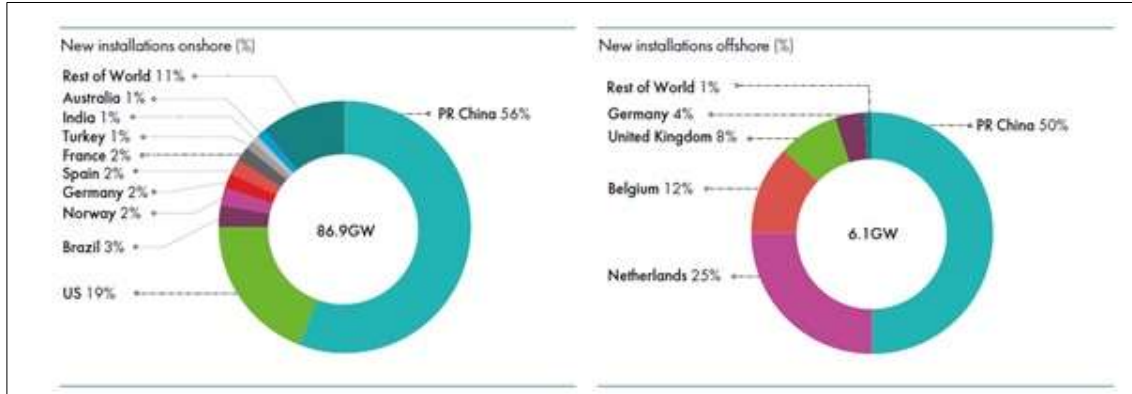
Rüzgar enerjisi, hareket halindeki havanın enerjisinin kinetik enerjisinden elde edilir ve bu enerji mekanik enerji ya da elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Rüzgar enerjisinin ilk kullanımları, su pompalama, tahıl öğütme, odun kesme ve yelkenli tekneleri hareket ettirme gibi işlemlerle olmuştur. Rüzgar enerjisinden elektrik üreten ilk kişi, 1891'de Danimarkalı bilim insanı Poul La Cour'dur. La Cour, Danimarkalı bilim insanı, I. ve II. Dünya Savaşları sırasında geliştirilmiş ve 1891 ile 1918 yılları arasında 20-35 kW aralığında 100'den fazla elektrik üreten türbin inşa etmiştir. Ancak rüzgâr enerjisinin kullanımına olan ilgi, fosil yakıtların fiyatlarına bağlı olarak dalgalanmıştır. 1970'lerdeki petrol kıtlıkları, dünya enerji tablosunu değiştirmiş ve rüzgâr enerjisi kaynağına olan ilgiyi artırmıştır. 1980'lerde Kaliforniya'da ilk rüzgâr çiftlikleri kurulmuştur. Rüzgar Enerji teknolojileri hızla gelişmiş ve daha büyük rüzgâr çiftlikleri oluşturulmuştur.

Rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemleri, teknolojisinin hızlı gelişimi, maliyetlerinin geleneksel güç santralleriyle rekabet edebilir hale gelmesi ve çevresel etkilerinin düşük olması nedeniyle günümüzde en hızlı yayılan yenilenebilir enerji kaynağı olmuştur[61]. Türkiye'de rüzgâr enerjisinden elektrik üretimi üzerine yapılan çalışmalar 1990'larda başlamıştır. Türkiye'nin ilk ticari rüzgâr santrali, 28 Kasım 1998 tarihinde Alaçatı, Çeşme'de kurulmuştur [62].

Teknolojik yenilikler ve ölçek ekonomilerinin etkisiyle, 2025 yılı itibarıyla rüzgâr enerjisinin küresel ölçekte rekabet avantajını sürdürdüğü gözlemlenmektedir. Çin'in 2060 yılına kadar net sıfır emisyon hedefi ve ABD'nin 2050 yılına kadar bu hedefe ulaşma taahhüdüyle birlikte değerlendirildiğinde, net sıfır hedefini benimseyen veya kabul eden ülkelerin günümüzde küresel ekonominin yaklaşık üçte ikisini ve küresel sera gazı emisyonlarının %63'ünü temsil ettiği görülmektedir [63].



Şekil 3.4. 2030' a kadar hedeflenen yeni küresel rüzgar kurulumları (GW) [63]



Şekil 3.5. Yeni rüzgar kurulumları kara ve denizüstü dağılımları [63]

Şekil 3.5' den de görüleceği gibi yeni rüzgâr kurulumlarına baktığımızda Türkiye küresel ölçekte ilk 10 ülke içerisinde görülmektedir. Türkiye'de 2019'daki 686 MW yeni rüzgâr kapasite artışı olmuş, 2020'de ise artış 1224 MW ile önceki yılın neredeyse iki katına çıkmıştır. Türkiye'de 2020 yılında toplam rüzgâr kapasitesi 9280 MW'a yükselmiştir [63].

Rüzgar türbinleri

Rüzgar enerjisi, çevre dostudur ve yakıt kullanımı ihtiyacı duymadığı için enerji tasarrufu sağlar. Rüzgar türbinleri, fosil yakıt sistemlerinde olduğu gibi çevreyi kirleten emisyonlara neden olmaz. En önemli avantajı ise, doğal ve yenilenebilir bir kaynak olması nedeniyle yakıt için herhangi bir ücret talep edilmemesidir. Fakat, rüzgâr türbinleriyle üretilen elektrik enerjisinin diğer enerji kaynaklarıyla rekabet edebilmesi için; sürekli rüzgâr alan bölgelerde kurulumuyla mümkündür. Kurulum maliyetleri yüksek olsa da, rüzgâr türbinlerinin bakım ve işletme giderleri düşüktür. Rüzgar türbinleri, dikey ve yatay eksenli türbinler olarak iki ana kategoride üretilmektedir. Küçük boyutlu türbinler, tekneler veya karavanlar gibi hareketli bölgelerde, dağ pilleri şarj etmek veya trafik işaretlerine enerji sağlamak için düşük güç alanlarını karşılamak için kullanılır. Rüzgar çiftlikleri ise, büyük türbin dizilerinden oluşan önemli bir enerji bölgesidir. Birçok ülke, fosil yakıtlara olan bağımlılıklarını azaltmak amacıyla bu türbinlerin kurulumunu desteklemektedir [64].

Dünya yüzeyine bakıldığında, rüzgâr türbinlerinin ekonomik olabilme bakımından en avantajlı şartlara sahip olduğu alanların; büyük rüzgâr kuşakları üzerinde bulunan ve özellikle okyanus kıyılarında yer alan konumlar olduğu söylenebilir [65].

Rüzgar enerjisi, Betz teoremine göre maksimum %59,3 etkinlikle mekanik enerjiye dönüştürülebilir. Bu dönüşüm, rüzgâr türbini aracılığıyla gerçekleşir. Türbinin verimli çalışabilmesi için, çevresindeki engellerin rüzgârı kesemeyecek kadar yüksek olması ve geniş düz alanların tercih edilmesi önemlidir. Ayrıca, türbinin rüzgâra göre doğru şekilde yönlendirilmesi, rotor eksenini ile rüzgâr doğrultusu arasındaki açı kontrol mekanizmasıyla sağlanır.

Rüzgâr türbinleri, belirli bir rüzgâr hızı aralığında enerji üretir, bu yüzden enerji üretim sisteminin kurulacağı bölgenin rüzgâr rejimi çok önemlidir. Rüzgârdan elde edilecek enerji, rüzgârın hızı, sürekliliği, esme süresi, yönü ve rotor göbek yüksekliğine bağlıdır. En önemli faktör rüzgârın hızıdır ve bu hız, yükseklik arttıkça artar. Ölçüm yapılan yükseklikten daha yüksek kuleler için rüzgâr hızının hesaplanmasında pürüzlülük değeri dikkate alınmalıdır.

Rüzgârdan güç elde edilmesinde birçok parametre etkili olup, elde edilecek güç rüzgâr hızının küpüyle doğru orantılıdır. Rüzgârın hızı iki katına çıktığında, elde edilecek güç 8

katına çıkar. Ayrıca, rotorun taradığı alan da güçle doğru orantılıdır; rotorun alanı iki kat arttığında enerji yaklaşık dört kat artar. Türbinden elde edilecek enerji, havanın yoğunluğu arttıkça da artar. Rüzgârdan elde edilen gücü hesaplayan formülde, P rüzgârın hızına, rotor alanına ve havanın yoğunluğuna bağlı olarak hesaplanır. Formülde P (watt), ρ havanın yoğunluğunu, A rotorun taradığı alanı (m^2) ve V rüzgârın hızını (m/s) ifade etmektedir [66].

Rüzgar Türbini çeşitleri;

Yatay eksenli rüzgâr türbinleri

Dikey eksenli rüzgâr türbinleri

Eğik eksenli rüzgâr türbinleri

Olarak üç ayrı kategoride incelenir.

Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri (YERT)

Yatay Eksenli Rüzgar Türbinlerinde; dönme eksenleri rüzgâr yönüne paralel, kanatlar ise rüzgâr yönüne diktir. Bu türbinlerde rotor kanatların sayısı azaldıkça rotor daha hızlı dönmektedir. Bu türbinlerin verimi yaklaşık olarak %45 civarındadır.

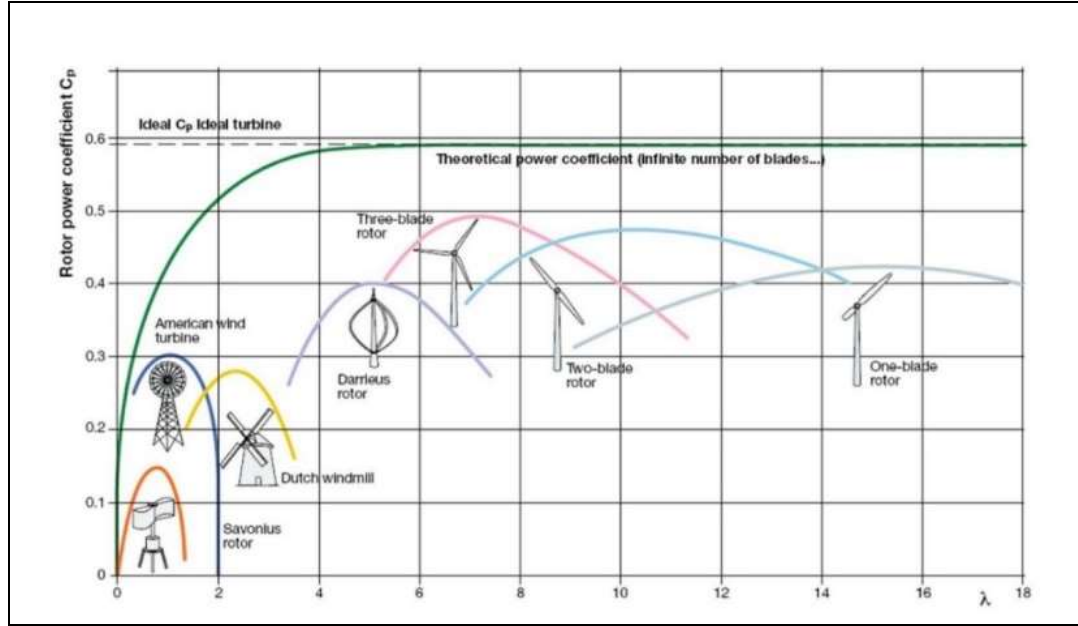
Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri (DERT)

Bu Türbinlerin, dönme eksenleri rüzgâr yönüne dik ve düşey olan bu türbinlerin kanatları da düşeydir. Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri rüzgârı her yönden kabul edebilme üstünlüğüne sahiptir. Bu türbinler rüzgârı sürükler veya kaldırır. İlk harekete geçişleri güvenilir değildir. Bu türbinlerin verimi yaklaşık olarak %35 civarındadır.

Eğik Eksenli Rüzgar Türbinleri (Wagner rüzgâr türbinleri)

Dönme eksenleri düşeyle, rüzgâr yönünde bir açı yapan rüzgâr türbinleridir. Bu tip türbinlerin kanatları ile dönme eksenleri arasında belirli bir açı bulunmaktadır.

Rüzgar Enerji Santralleri kurulumunda; rüzgâr şartları, kurulum yapılacağı alan ve büyük boyutlardaki kayıplardan kaçınmak için rüzgâr türbinlerinin özellikleri kesinlikle iyi bilinmelidir. Rüzgar türbinleri incelendiği üzere kanat çeşitleri, rüzgârı alış şekilleri ve kullanım alanlarına göre birkaç çeşitte imal edilebilmektedir[67].



Şekil 3.6. Rüzgar türbin performansları [68]

Çizelge 3.1. Büyüklüklerine göre türbinlerin karşılaştırılması [69]

	Kullanım Alanı	Bir Tek Türbin Gücü	Üretilen Enerjinin Verildiği Yer	Akü İhtiyacı	Bakım Masrafı	Kurulum Masrafı
Büyük RT'ler	Endüstriyel	50kW-2MW	Şebeke	Yok	Var	Yüksek
Küçük RT'ler	Kişisel	50W-20kW	Çiftlik evleri, Telekomünikasyon alıcısı, Radyo kulesi, Seralar Acil Telefonları vb.	Var	Yok	Düşük

Çizelge 3.2. Rüzgârı alış yönüne göre türbinlerin karşılaştırılması [69]

	Yaw Mekanizma İhtiyacı	Kanat Malzeme Yapısı	Kuleye Binen Yük	Rüzgârın Türbine Verdiği Zarar
Rüzgârı Önden Alan RT	Var	Sert	Ağır	Az
Rüzgârı Arkadan Alan RT	Yok	Esnek	Hafif	Çok

Çizelge 3.3. Kanat çeşitlerine göre türbinlerin karşılaştırılması [69]

	YERT				DERT	
	Tek Kanatlı	2 Kanatlı	3 Kanatlı	Çok Kanatlı	Savonius	Darrierus
Maliyet	Yüksek	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük	Düşük
Estetik Görünüm	Kötü	Kötü	İyi	İyi	İyi	İyi
Gürültü	Yüksek	Yüksek	Düşük	Az	Az	Az
Çalışma Hızı	Yüksek	Düşük	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük
Kule ihtiyacı	Var	Var	Var	Var	Yok	Yok
Günümüzde Kullanımı	Elektrik	Elektrik	Elektrik	Az Elektrik & Su pompalama	Az Elektrik & Su pompalama	Az Elektrik & Su pompalama
Rotorun Dönmesi İçin Rüzgarı	Kaldırır	Kaldırır	Kaldırır	Kaldırır & Sürükler	Kaldırır & Sürükler	Kaldırır & Sürükler

Genel olarak ticari olarak en yaygın kullanılan türbin tipi yatay eksenli rüzgâr türbinleridir (YERT). Bu türbinlerde genellikle 100 metre kanat çapı ve 75 metre kule yüksekliği bulunmaktadır. Kullanılacak türbinlerin özellikleri, uygulamanın gereksinimlerine uygun olmalıdır. Kanat sayısı ve dönme hızı arasındaki ilişki enerji üretimini doğrudan etkiler; az kanatlı ancak hızlı dönen türbinler, çok kanatlı ve yavaş dönen türbinlerle benzer düzeyde enerji üretebilmektedir. Bu durum, malzeme tasarrufu sağlayarak maliyet ve kule ağırlığını azaltmaktadır. Temel amaç, yüksek verim elde ederken maliyeti düşük tutmaktır. Bununla birlikte, küçük alanlarda türbin sayısının artışı toplam enerji miktarını artırsa da, rüzgâr çiftliği genel veriminde azalmaya yol açabilir. Bu nedenle, arazi yapısı, rüzgâr hızı ve kullanım amacı dikkate alınarak uygun türbin seçimi yapılmalıdır [69].

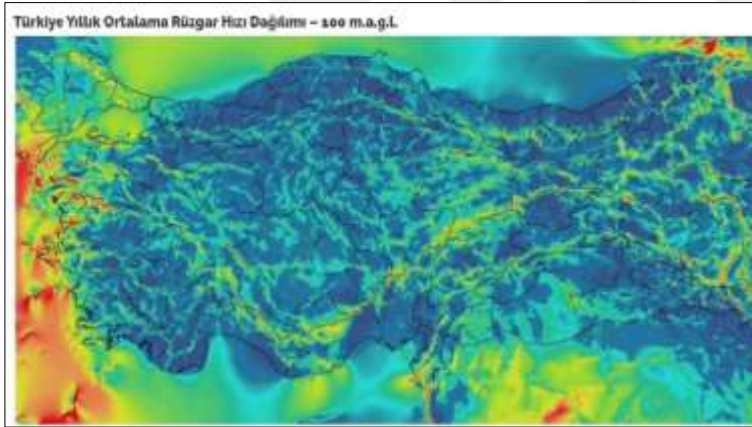
3.3. Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Belirleme Çalışmaları

1970'ler, 1980'ler ve 1990'larda petrol kıtlıkları ve artan maliyetler, alternatif enerji kaynaklarının gelişimini teşvik etmiştir. 1980'lerde enerji fiyatlarının artması ve yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilginin büyümesi, bu kaynakların yeniden değerlendirilmesine yol açmıştır, özellikle Türkiye'de, ancak teknolojinin benimsenmesi hala yavaştır. Bu yıllarda, fosil yakıtların kullanımının artmaya devam etmesi durumunda küresel ısınmada potansiyel değişiklikler gösterecek bilimsel çalışmalara yanıt olarak çevreye duyulan endişe artmıştır.

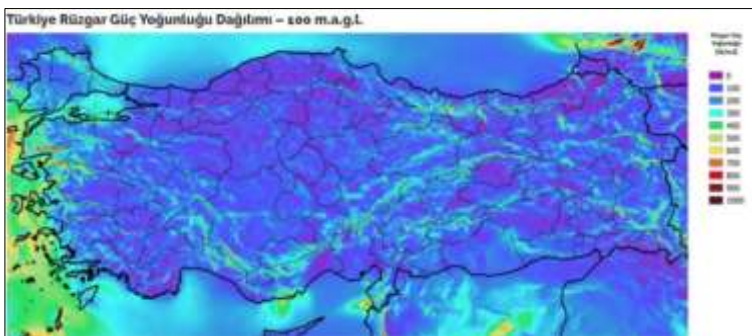
Teorik olarak, Türkiye'nin yıllık rüzgâr potansiyeli oldukça büyüktür ve ülkenin mevcut elektrik tüketiminin yaklaşık iki katıdır. Türkiye'nin teknik rüzgâr enerjisi potansiyeli 88.000

MW, ekonomik rüzgâr enerjisi potansiyeli ise yaklaşık 10.000 MW'dır. Devlet Elektrik İstatistikleri Kurulu'nun raporlarına göre, Türkiye'nin rüzgâr enerjisi potansiyeli yaklaşık 120 milyar kWh olarak tahmin edilmektedir. Yapılan çalışmalar, Türkiye'nin toplam rüzgâr enerjisi potansiyelinin, mevcut termal ve hidrolik enerji üretiminden daha yüksek olduğunu göstermektedir [4].

Türkiye karasal rüzgâr açısından zengin sayılabilecek bir konumdadır. Rüzgar potansiyeli bakımından zengin olan bölgelerimiz öncelikle Ege, Marmara ve Doğu Akdeniz kıyılarıdır. Elektrik İşleri Etüd İdaresi (EİE) tarafından hazırlanan “Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Atlası” (REPA)’ya göre yerleşim alanları dışında 50 m yükseklikteki rüzgâr hızları, Marmara, Batı Karadeniz, Doğu Akdeniz kıyılarında 6.0 – 7.0 m/s ve iç kesimlerinde 5.5 – 6.5 m/s. Batı Akdeniz kıyılarında 5.0 – 6.0 m/s ve iç kesimlerinde 4.5 – 5.5 m/s Kuzeybatı Ege kıyılarında 7.0 – 8.5 m/s ve iç kesimlerinde 6.5 – 7.0 m/s ‘dir [37].

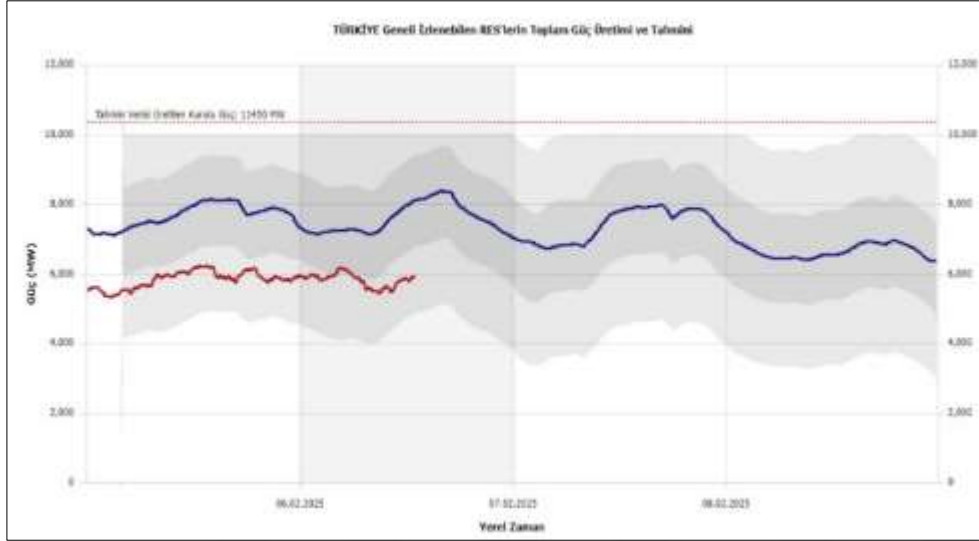


Harita 3.1. Türkiye yıllık ortalama rüzgar hızı dağılımı [61]



Harita 3.2. Türkiye rüzgar gücü yoğunluğu dağılımı [61]

Rüzgâr enerjisi potansiyelini doğru hesaplamak için, rüzgâr ölçüm sisteminin uygun bir yere kurulması ve en az bir yıl süresince veri toplanması gerekmektedir. Ölçüm istasyonlarından alınan rüzgâr hızı verilerinin frekans dağılımları analiz edilerek, hangi rüzgâr hızlarının daha sık gözlemlendiği belirlenebilir. Ayrıca, rüzgâr hızı verilerinin standart sapması 0 ile 3 m/s arasında olmalıdır [71].



Şekil 3.7. Türkiye geneli izlenebilen res'lerin toplam güç üretimi ve tahmini [61]

Ülkemizde, rüzgâr enerjisi potansiyelinin belirlenmesi için Elektrik İşleri Etüt İdaresi tarafından çeşitli yazılımlar (WindPro, WASP, Surfer vb.) ve yöntemler kullanılmaktadır [72].

Rüzgâr atlasının hazırlanmasında, ilgili istasyonlar için rüzgâr ölçüm verileri, arazi pürüzlülük bilgileri, çevresel engeller ve topoğrafya bilgileri gereklidir. Bu amaçla, ilk olarak 1/25000 ölçekli 193 pafta harita sayısallaştırılmış ve bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Ayrıca, 96 istasyona ait meteorolojik rüzgâr verileri, Devlet Meteoroloji İşleri (DMİ) tarafından temin edilmiştir.

Rüzgâr atlası çalışmasında, öncelikle Meteoroloji Genel Müdürlüğü istasyonlarına ait yakın çevresel engel bilgileri tespit edilir. Ardından, arazi pürüzlülük bilgileri sayısal harita üzerine işlenir. Tespit edilen çevresel engel bilgileri, arazi pürüzlülük verileri ve Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün rüzgâr ölçüm değerleri WASP formatına dönüştürülerek bilgisayar ortamına

aktarılır. Bu veriler, SURFER programı ile işlenir, haritalar oluşturulur, çıktılar alınır ve kullanılmak üzere yayınlanır.

Kullanılan WasP programı, “The Wind Atlas Analysis and Application Program” (Rüzgâr Atlası Analiz ve Uygulama Programı) ifadesinin kısaltmasıdır. Bu program, rüzgâr hızı ve yön bilgilerini, rüzgâr gözlem istasyonunun çevresindeki engelleri, arazi yüzey pürüzlülüğünü ve topografik özellikleri bir arada değerlendirerek, bölgesel rüzgâr atlası istatistikleri ve enerji potansiyelinin belirlenmesinde kullanılır [73].

Bu programda tahmin edilen veya hesaplanan güç üretimi değerleri, aynı bölgedeki ya da yakın çevresindeki ölçülen rüzgâr verilerine dayanır. Daha önce de belirtildiği gibi, WasP programı ile rüzgâr ölçüm analizleri yapmak, rüzgâr tarlası verimliliğini hesaplamak, rüzgâr türbinlerinin mikro yerleşimini tasarlamak ve güç üretimi hesaplamaları yapmak mümkündür [74].

WindPro programı, bir rüzgâr çiftliği alanının optimizasyonunu sağlar. Bu program, rüzgâr verilerine göre kurulabilecek rüzgâr çiftliğinin veya tesisinin kapasitesini hesaplar ve bu tesisin fizibilitesini bilgisayar ortamında kullanıcıya sunar.

WindPRO, rüzgâr enerjisi projelerinin tüm aşamalarını kapsayan kapsamlı bir yazılım aracıdır. Rüzgar verisi analizinden enerji verimliliği hesaplamalarına, belirsizliklerin kantifikasyonundan saha uygunluğu değerlendirmesine, çevresel etki hesaplamalarından görselleştirmeye kadar pek çok işlevi içerir. Ayrıca, windPRO, inşaat sonrası üretim verilerinin detaylı analizine de olanak sağlar. Tüm bu özellikler, ihtiyaca göre ayrı modüller olarak sunulmaktadır [75].

SURFER programı, rüzgâr potansiyeli olan bölgelerin haritalarını oluşturmak için kullanılan bir programdır. Bu program, grid (enlem ve boylam çizgileri) oluşturmanın yanı sıra, yükseltiler ve yer şekillerine göre yüzey haritalarının çıkarılmasına da olanak tanır [76].

Bu programlar kullanılarak, rüzgâr çiftliklerinin kurulabileceği alanlar için potansiyel belirleme çalışmaları yapılmaktadır. Ölçüm istasyonlarından elde edilen ortalama rüzgâr hızları, ülkemizin çoğu bölgesinin rüzgâr enerjisi uygulamaları için elverişli olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, yerli ve yabancı bazı firmaları rüzgâr santralleri kurmak için

cesaretlendirmiş ve kendi rüzgâr ölçümlerini yapmalarına neden olmuştur. Firmaların sunduğu ön fizibilite ve fizibilite raporları, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından hem yasal mevzuatlar açısından hem de WasP ve WindPro yazılımları ile santral sahasından üretilebilecek enerji miktarının tespiti ve optimum tarla tasarımının değerlendirilmesi açısından incelenmektedir [61].

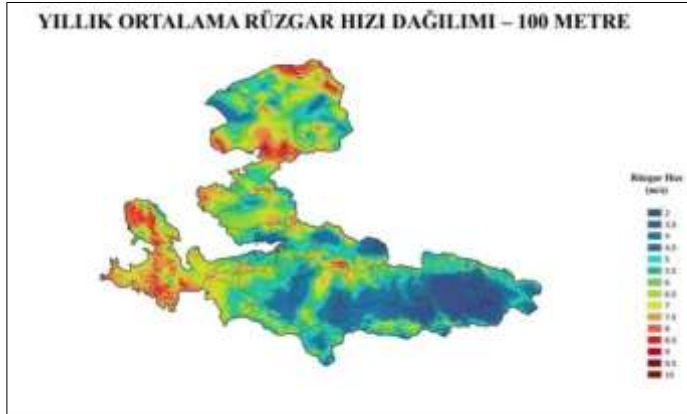
3.3.1. Türkiye rüzgar enerjisi potansiyel atlası (REPA)

Türkiye’de rüzgâr enerjisi potansiyelini belirlemek için Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA) hazırlanmıştır. Bu atlas, Türkiye’de rüzgâr enerjisi santrali kurulabilecek bölgeler hakkında bilgi sağlar. Ancak yatırım kararı alınmadan önce, belirlenen bölge için saha araştırmaları yapılmalı, standartlara uygun rüzgâr ölçümleri gerçekleştirilmeli ve bu veriler analiz edilerek yatırım kararı verilmelidir.

Türkiye’de yapılan REPA çalışmasına göre, Türkiye’nin rüzgâr potansiyeli, iyi ve üstü sınıflarla 47.849 MW, orta ve üstü sınıflarla ise 131.756 MW olarak hesaplanmıştır [77].

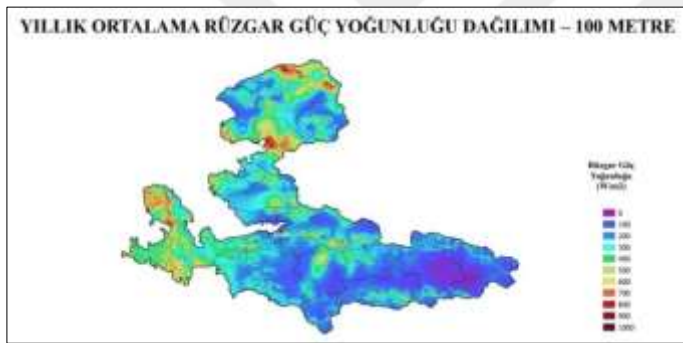
Rakımı 0-3.000 metre arasında olan ve yer seviyesinden 100 metre yükseklikteki yıllık ortalama rüzgâr hızlarının 6,5 m/s’ten fazla olduğu karasal alanlara, her kilometrekareye 5,3 MW gücünde türbinler kurulması durumunda, toplam 57.786 MW gücünde karasal rüzgâr santralleri kurulabileceği öngörülmektedir. Ayrıca, deniz seviyesinden 100 metre yükseklikteki yıllık ortalama rüzgâr hızlarının 7,5 m/s’ten fazla olduğu ve deniz derinliğinin 0-200 metre arasında olduğu deniz üstü sahalarda, 8,0 MW gücünde türbinlerle toplamda 20.788 MW kapasitesinde deniz üstü rüzgâr santralleri kurulabileceği hesaplanmaktadır [70].

İzmir için yıllık ortalama rüzgâr hızı dağılımı – 100 metre Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA), harita 3.3 te görülmektedir.



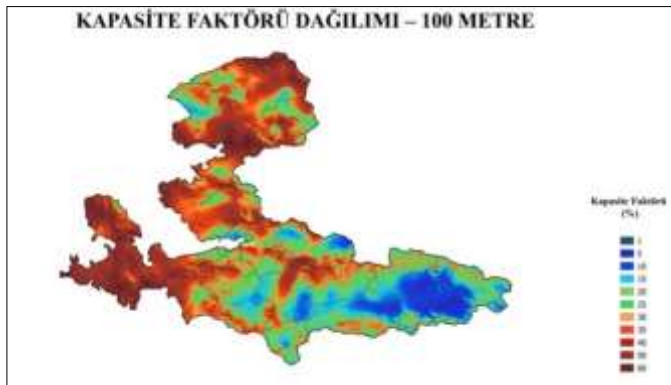
Harita 3.3. Yıllık ortalama rüzgar hızı dağılımı-100m [77]

İzmir için yıllık ortalama rüzgâr gücü yoğunluğu – 100 metre Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA), harita 3.4'te görülmektedir.



Harita 3.4. Yıllık ortalama rüzgar güç yoğunluğu dağılımı-100m [77]

İzmir için yıllık kapasite faktörü dağılımı – 100 metre Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA), harita 3.5'te görülmektedir.



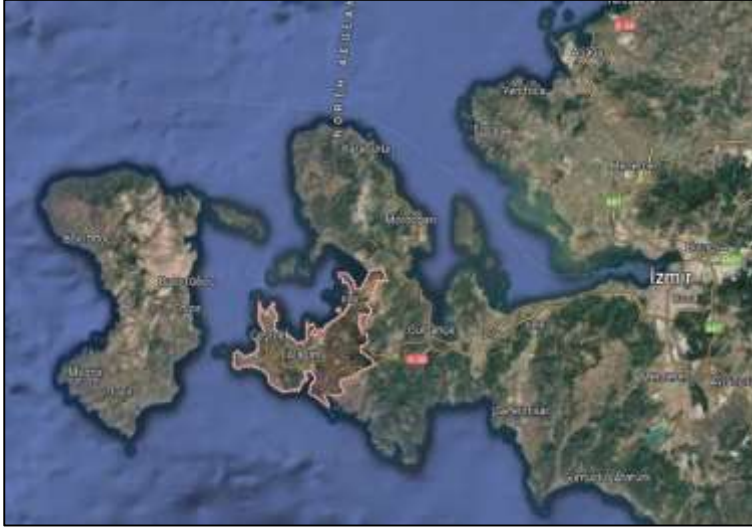
Harita 3.5. Kapasite faktörü dağılımı-100m [77]

Kapasite faktörü dağılımı haritası 3 MW gücündeki bir rüzgâr türbininin teknik değerleri dikkate alınarak hazırlanmıştır.

3.4. Çeşme'nin Coğrafi Özellikleri

Türkiye'nin rüzgâr enerjisi başkenti olarak nitelendirilen İzmir, rüzgâr enerjisinden elektrik üretimi alanındaki lider pozisyonunu rüzgâr türbini ekipmanları imalatı konusunda da sürdürmektedir. Bugün 1.907 MW RES kurulu gücüne sahip olan İzmir, Türkiye'nin ilk rüzgâr ölçüm direğine, rüzgâr türbinine ve rüzgâr enerjisi santraline de ev sahipliği yaptığı gibi Türkiye'nin ilk kanat ve kule fabrikasına, türbin bakım ve onarım tesisi ile Ar-Ge Merkezi'ne de ev sahipliği yapmaktadır. İzmir, karayolu ve denizyolu bağlantıları, lojistik altyapısı, nitelikli insan kaynağı, yatırımcıya ve çalışanlara sunduğu yüksek yaşam kalitesi, rüzgâr enerjisi potansiyeli ve sektördeki önemli uluslararası firmaların varlığı sayesinde kendi coğrafyasında rüzgâr enerjisi ve ekipmanlarının üretim üssüne dönüşmüştür [78].

Çeşme Türkiye'nin batısında üç tarafı denizlerle çevrili kendi adını taşıyan yarımadaının üzerinde ve en ucunda kurulmuş güzel bir ilçedir. Toprakları doğuda Urla İlçesi, güneyde ve batıda Ege Denizi, Kuzeyde Karaburun İlçesi ile çevrili olan Çeşme, İzmir'e 80 km uzaklıktadır. Kadastro verilerine göre İlçemizin kıyı sahil şeridi uzunluğu 133 km'dir. Akdeniz ikliminin etkisi altında olan Çeşme'de dağların diğer Ege Sahillerinde olduğu gibi denize dik inmesi turizmin her zaman geçerli hammaddesi olan doğa güzelliklerini yaratmıştır. Arazi genellikle taşlık ve kayalık tepelerle kaplı olup, bunların arasında pek az düzlüklerden meydana gelen küçük ovacıklardan ibarettir. Arazi çoğunlukla meyillidir. Orman az olup, bozuk baltalık halindedir [79].



Harita 3.6. İzmir Çeşme bölgesine ait harita görüntüsü [80]

3.5. Çeşme Alaçatı Bölgesi İçin Rüzgâr Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesi

İzmir, coğrafi konumu, ekolojik yapısı ve gelişmiş tarım ile sanayi sektörüyle yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ve geliştirilmesi açısından öne çıkan bir ilimizdir. İzmir, jeotermal kaynaklar, biyokütle için sürdürülebilir hammadde sağlayacak tarımsal ve hayvansal çıktılar, yüksek güneş ve rüzgâr enerjisi potansiyeline sahiptir. Ancak, bu sektörler ayrı ayrı değerlendirildiğinde, İzmir’de rüzgâr enerjisi sektörünün hem mevzuat açısından hem de yatırımların sıklığı ve uygulanabilirliği bakımından daha belirgin bir konumda olduğu söylenebilir.

Türkiye Rüzgâr Atlası verilerine göre, İzmir’in rüzgâr hızı kapalı alanlarda 4,5-5,0 m/s (zayıf), açık alanlarda 5,5-6,5 m/s (düşük-orta), kıyılarda 6,0-7,0 m/s (orta), açık denizde 7,0-8,0 m/s (iyi-harika) ve tepe ile bayırlarda 8,5-10,0 m/s (mükemmel-sıradışı) olarak ölçülmüştür. Bu veriler, İzmir’in yüksek rüzgâr enerjisi potansiyeline sahip olduğunu ve enerji santrali kurmak için gereken 7 m/sn rüzgâr hızının sağlandığı pek çok bölgenin, enerji santrali kurulumuna uygun olduğunu göstermektedir.

Türkiye’de şebekeye bağlı elektrik üretimi 1998 yılında İzmir Çeşme’ye ilk Rüzgâr enerjisi santralini kurulması ile başlamış ve yapılan yasal düzenlemelerle kurulu güç ve santral sayısında belirgin artışlar olmuştur [77].

İzmir, Türkiye'nin rüzgâr enerjisi başkenti olarak, hem elektrik üretiminde hem de rüzgâr türbini ekipmanları imalatında lider konumdadır. 1.907 MW RES kurulu gücü ile İzmir, Türkiye'nin ilk rüzgâr ölçüm direği, türbini, enerji santrali, kanat ve kule fabrikası, türbin bakım tesisi ve Ar-Ge Merkezi'ne ev sahipliği yapmaktadır.

Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı koordinasyonunda, İzmir Kalkınma Ajansı (İZKA) tarafından sektörel kümeleme ve girişimcilik faaliyetleri desteklenmekte ve altyapı ihtiyaçları doğrultusunda yatırım ortamı iyileştirilmektedir. Bu kapsamda, “İzmir Denizüstü Rüzgar Enerjisi Yol Haritası” ve “İzmir İli Rüzgar Sanayii Lojistik İhtiyaç Analizi” raporları hazırlanmış, Çandarlı Limanı ile entegre İzmir Temiz Enerji İhtisas Organize Sanayi Bölgesi kurulması için çalışmalar başlatılmıştır. Bu projelerle, rüzgâr sanayii yatırımcıları için özel yatırım alanları ve uzmanlaşmış bir liman sağlanması hedeflenmektedir [78].

Çizelge 3.4. İzmir Çeşme’de kurulu rüzgâr enerjisi santrallerinin özellikleri [81]

Yatırımcı	Proje Adı	Kurulu Güç (MW)
Demirer Enerji	Mazı 1 Mare Rüzgar Santrali	56 MW
Bilgin Enerji	Zeytineli Rüzgar Santrali	50 MW
Bilgin Enerji	Mazı Rüzgar Santrali	30 MW
Boyut Grup Enerji	Karadağ Rüzgar Santrali	16 MW
Enda Enerji	Alaçatı Rüzgar Santrali	16 MW
Enerjisa Elektrik	Çeşme Rüzgar Santrali	16 MW
Enda Enerji	Egenda Germiyan Rüzgar Santrali	11 MW
Demirer Enerji	Çeşme Germiyan Rüzgar Santrali	11 MW
EÜAŞ	Alaçatı Rüzgar Santrali	7,20 MW
Güral Porselen	Güral Germiyan Rüzgar Santrali	6,60 MW

3.6. Araştırmanın Amacı ve Kapsamı

Rüzgar, doğanın dinamiğiyle oluşan güçlü bir hareket enerjisidir. Hiçbir maliyet gerektirmeden kendiliğinden ortaya çıkan bu enerji, yenilenebilir enerji sistemleriyle elektrik enerjisine dönüştürülebilir ve böylece bedava enerji elde edilebilir. Rüzgarın enerjisi, rüzgâr ölçüm direkleriyle sayısal olarak izlenebilir. Rüzgar enerjisinden en iyi şekilde faydalanabilmek için çeşitli ölçümler yapılması gerekmektedir. Bu ölçümler, gözetiminde rüzgâr ölçüm sistemleri kullanılarak gerçekleştirilir.

Türkiye, 2030 yılına kadar yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam elektrik üretimindeki payını artırmayı hedeflemektedir. Bu hedef doğrultusunda yerli rüzgâr türbini üretimi ve teknolojik gelişmeler stratejik bir önem taşımaktadır. Alaçatı Rüzgar Enerji Santrali'nde (RES) yürütülen yenileme projesi, yüksek güçlü yerli türbinlerin imalatını mümkün kılarak dışa bağımlılığın azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Proje kapsamında yerli üretim kapasitesinin artırılmasıyla birlikte, yenilenebilir enerji üretiminde artış, bakım maliyetlerinde azalma, istihdamın desteklenmesi ve rüzgâr türbini üretim ekosisteminin güçlendirilmesi hedeflenmektedir [82].

Bu çalışmada, Türkiye'nin ilk ticari rüzgâr santrali olan ve 1998 yılında İzmir ili, Çeşme ilçesi Alaçatı mevkiinde kurulan Alaçatı Rüzgâr Enerji Santrali, mevcut türbinlerin yaşları itibarıyla günümüz teknolojilerine kıyasla oldukça düşük verimlilik değerlerine sahip olması nedeniyle, saha rüzgâr enerjisi potansiyelinin etkin biçimde kullanılmadığı bir tesis hâline gelmiştir. Ayrıca, türbinlerin eski teknolojiye sahip olmaları nedeniyle sarf ve yedek parça temininde güçlükler yaşanmaktadır. Bu doğrultuda, proje sahasının rüzgâr potansiyelinin belirlenmesi ve mevcut şebeke bağlantı altyapısının daha etkin ve verimli kullanılmasının sağlanması amacıyla bir yenileme projesi yürütülmüştür.

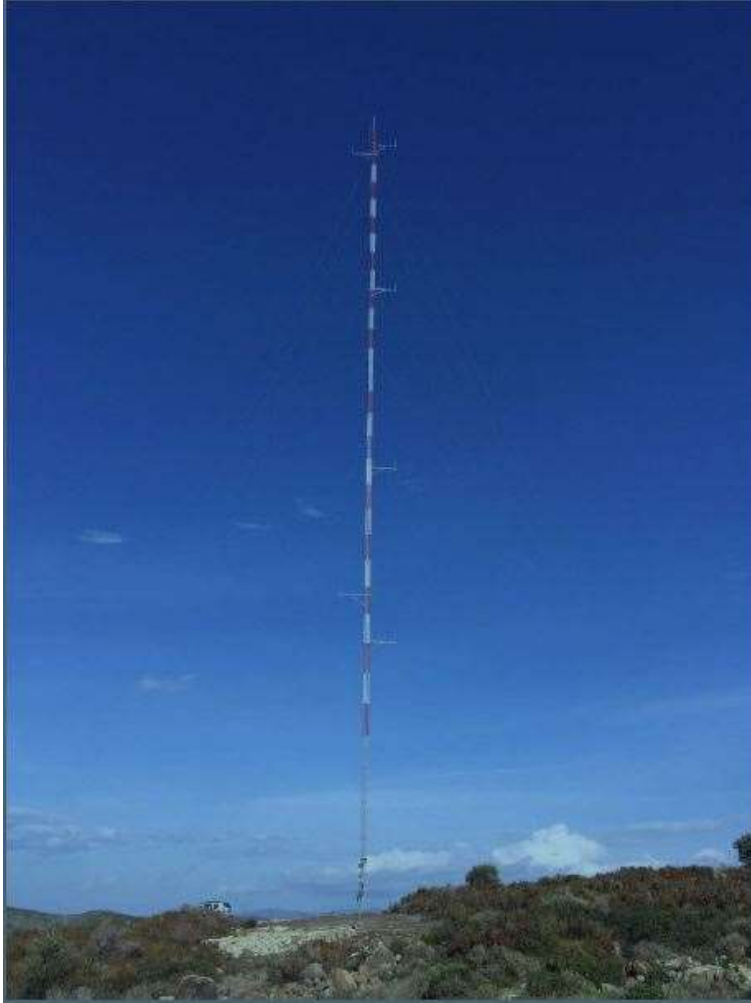
Bu proje kapsamında, İzmir ili Çeşme ilçesi Alaçatı bölgesi içerisinde bir adet, 2021 yılı sonu itibarıyla 100 metre yüksekliğinde bir adet rüzgâr ölçüm direği kurulmuş ve bu direktan elde edilen veriler kullanılarak enerji analizi gerçekleştirilmiştir. Kullanılan veriler, 2022 ve 2023 yılları arasında dört mevsimi temsil edecek şekilde Ocak, Nisan, Temmuz ve Ekim aylarına ait birer haftalık ölçüm değerlerini kapsamaktadır. Elde edilen bu veriler doğrultusunda, rüzgâr türbini kurulması planlanan bölgenin rüzgâr enerjisi potansiyelini ortaya koyan bir ön değerlendirme yapılmıştır.

Ayrıca, proje kapsamında tamamen yerli üretim olan iki adet rüzgâr türbini kurulumu çalışması da incelenmiştir. Bu bağlamda, Alaçatı RES yenileme projesi Türkiye'nin enerji bağımsızlığı ve sürdürülebilir kalkınma hedefleri açısından kritik bir adım olarak değerlendirilmektedir.

Çeşme Alaçatı rüzgâr enerji potansiyelinin belirlenmesi ve rüzgâr enerji potansiyeli belirleme çalışmaları yapılmış çalışma sonuçları ile 2 adet rüzgâr türbini kurulumu hedeflenmiştir. Bu çalışma kapsamında 2021 yılı sonu itibarıyla Çeşme'de 1 adet rüzgâr

ölçüm direği kurulmuştur ve 2022 yılı ocak ayından itibaren gerekli rüzgâr verileri kaydedilmeye başlanmıştır. Kullanılan direk üçgen kafes tipi direktir ve yapısal olarak Eurocode 0, Eurocode 1, Eurocode 3 standartlarına göre dizayn edilmiş olup ve IEC 61400-12-1:2017 standardında belirtilmiş olan gereksinimleri karşılamak üzere 100 metrelik olarak üretilmiştir.

Rüzgar ölçüm direğinin imalatında kullanılan S235JR, S355JR standartlarındaki çelik borular direğin konstrüksiyonlarının çok zorlu hava şartlarına mukavemetini sağlamakta ve böylelikle tüm iklim şartlarında rüzgâr ölçümlerine imkan vermektedir. Ayrıca yapısal olarak Eurocode 0, Eurocode 1, Eurocode 3 standartlarına göre tasarlanmıştır. Direklerin korozyondan etkilenmemesi için EN1461:1999 standartlarına uygun olarak sıcak daldırma galvaniz uygulanmıştır ve ardından beyaz ve kırmızı renklerde boyanmıştır [83].



Şekil 3.8. Rüzgar verilerinin izlenebilmesi için bölgede kurulmuş olan rüzgâr ölçüm direği

Şekil 3.8. de görülebileceği üzere bu çalışmada; rüzgârın hızını ölçmek üzere bir adet kafes tipi rüzgâr ölçüm direği kullanılmıştır. Bu tipi rüzgâr ölçüm direğinin üzerinde, 100. metrede 1 adet, 95. metrede 1 adet, 70. metrede 1 adet, 45. metrede 1 adet, 25. metrede 1 adet olmak üzere toplamda 5 adet rüzgâr hızı ölçüm cihazlarından olan anemometre kullanılmıştır. Rüzgarın yönünü tayin edebilmek amacıyla 94. metrede ve 30. metrelerde ise rüzgâr gülü kullanılmıştır. Ayrıca havanın sıcaklığını, nemini ve basıncını ölçebilmek için rüzgâr ölçüm cihazının 10. metresine gerekli cihazlar yerleştirilmiştir. Alınan verilerin kaydedilebilmesi için yine 10. metrede bir adet datalogger bulunmaktadır.



Harita 3.7. Rüzgar ölçüm direğinin konumuna ait görüntü

Rüzgar hızı, değişimlerle artar ve teorik güç, hızın küpüyle oluşur. Havanın düşük özgül basıncı nedeniyle elde edilecek enerji miktarı rüzgâr hızına bağlıdır. Rüzgarın hızı, gücü ve enerjisi artar. Özgülün rüzgâr gücü, birimlerin düşen güçleri olarak soğutma ve topografik değişiklikler buna göre değişir. Rüzgar Hızı 3,5 m/s'den düşük özgül güç 50 W/m²'nin altındayken, 11,5 m/s'den yüksekse 1800 W/m²'ye kadar çıkabilir[84].

3.6.1. Rüzgar ölçüm direği üzerinde bulunan ölçüm cihazları

Rüzgar enerjisi ölçümleme cihazları, rüzgâr potansiyelinin belirlenmesi ve rüzgâr enerjisi projelerinin planlanması için kritik öneme sahiptir. Bu cihazlar, rüzgâr hızını, yönünü,

sıcaklığını ve diğer meteorolojik verileri sürekli olarak izleyerek, güvenilir veri toplama ve analiz sağlarlar.

Rüzgar ölçüm cihazı, rüzgâr hızını ve yönünü hassas bir şekilde ölçmek için tasarlanmıştır. Güvenilir sensörleri ve yüksek çözünürlüklü veri toplama sistemleri, doğru ölçümler sağlar ve veri kaybını minimize eder. Bu cihazlar, zorlu hava koşullarına dayanabilecek şekilde dayanıklı bir tasarıma sahiptir. Dayanıklı malzemelerden yapılmış ve çeşitli çevresel faktörlere karşı koruma sağlayan kasa tasarımı, uzun ömürlü bir kullanım sağlar. Rüzgar ölçüm cihazı, kolay montaj ve kurulum için tasarlanmıştır. Genellikle, rüzgâr türbini kulesi veya bağımsız bir direğe monte edilir. Basit bağlantı noktaları ve hızlı kurulum süreci, zaman ve iş gücünden tasarruf sağlar.

Bu cihazlar genellikle uzaktan izleme ve veri toplama yeteneklerine sahiptir. Entegre iletişim modülleri sayesinde, rüzgâr hızı ve yönü verileri uzaktan erişim için kolayca erişilebilir hale gelir. Bu da, saha çalışmalarını azaltır ve veri analizini kolaylaştırır.

Rüzgar ölçüm cihazları, güvenilir performans ve veri doğruluğu sağlar. Kalibrasyonlu sensörler ve doğru ölçüm algoritmaları, güvenilir verilerin elde edilmesini sağlar ve rüzgâr enerjisi tesislerinin verimliliğini artırır [82].

Bu çalışmada; rüzgârın hızını ölçmek üzere rüzgâr ölçüm direği üzerinde, 100. metrede 1 adet, 95. metrede 1 adet, 70. metrede 1 adet, 45. metrede 1 adet, 25. metrede 1 adet olmak üzere toplamda 5 adet rüzgâr hızı ölçüm cihazlarından olan anemometre kullanılmıştır.

Anemometre

Anemometreler, rüzgâr hızını elektriksel sinyale çeviren sensörlerdir. Kepçe, ultrasonik ve propeller anemometreler olarak Üç temel tipi vardır.

- Kepçe anemometreler, bir rotorun dönüş süresine göre rüzgâr hızını ölçer ve en yaygın kullanılan türdür.
- Ultrasonik anemometreler, ses dalgalarının bir uçtan diğerine ulaşma süresini ölçerek çalışır.

- Propeller anemometreler, kepçe anemometrelerle benzer prensiple çalışır; rüzgâr yönüne göre monte edilerek yatay veya dikey rüzgâr hızını ölçebilir [85].

Rüzgâr yönünü tayin etmek amacıyla ise, 94. metrede 1 adet, 30. metrede 1 adet olmak üzere toplamda 2 adet yön sensörü kullanılmıştır.

Yön sensörü

Rüzgâr, belirli bir hâkim yönden ya da farklı yönlerden esebilir, bu yüzden rüzgâr yönünün de ölçülmesi gerekir. Yön sensörü rüzgâr yönünü elektriksel sinyale çeviren bir sensördür. Yön sensörü, rüzgârın yönünü 8, 12 veya 16 yöne göre gösterebilir, genellikle 30°'lik yön aralıkları kullanılır. Yön sensörü, 360 derece hareket ederek bölgedeki rüzgârın yön dağılımını belirler [85].

Türbin kurulacak bölgenin meteorolojik verilerini elde edebilmek için, havanın sıcaklık, nem ve basıncını ölçen cihazlar 2. metreye konumlandırılmıştır. Ayrıca tüm verilerin aktarılmasını ve izlenmesini sağlayan datalogger isimli kayıt cihazı da rüzgâr direği üzerinde 10. metrede yer almıştır.

Sıcaklık – nem sensörü

Sıcaklık sensörü (termometre), genellikle ölçüm direğinin 2. veya 3. metresine monte edilir. Bağıl nem, belirli bir sıcaklıkta havadaki nemin, o sıcaklıkta içerebileceği maksimum nem miktarına oranı olarak tanımlanır ve yüzde olarak ifade edilir. Bağıl nem formülü şu şekildedir:

Bağıl Nem (RH) = (Aktüel Su Buharı Miktarı / Maksimum Su Buharı Miktarı) x 100.
Nem sensörleri, genellikle karbon materyali kullanarak nem değişiminde direnç değişimini ölçer ve bağıl nemi belirler. Ayrıca, nem sensörleri bazen sıcaklık sensörleri ile birleştirilebilir.

Basınç sensörü

Barometre, atmosferdeki hava basıncını ölçen bir cihazdır. Bu cihazla, atmosferdeki açık hava basıncı milibar cinsinden ölçülür.

Veri toplayıcı

Veri toplayıcı, rüzgâr ölçüm direğinde kaydedilen tüm verilerin elektronik olarak saklandığı ve değerlendirildiği bir cihazdır. Farklı markalara ve tasarımlara sahip olabilir. Veri toplayıcı, düzenli aralıklarla (1, 10 dakika veya saatlik) ortalama, ekstrem değerler ve standart sapma gibi verileri hesaplar. Ayrıca, veri yongaları, piller ve nem alıcılar gibi bileşenler de bulunur[85]

3.7. Analizler

Enerji ve ekserji analizi

Bir rüzgâr türbininin enerji verimliliği genellikle aşağıda verilen güç katsayısı (C_p) ile karakterize edilir ve Betz kriterine göre C_p 'nin maksimum değeri 0.5926'dır.

$$C_p = \frac{W_e}{\eta_{\text{alternatör}} \times \eta_{\text{mechanic}} \times 0.5 \times \rho \times \pi \times R^2 \times V_r^3} \quad (3.1)$$

Bu çalışmada, elektriksel ekipman ve mekanik ekipman kayıplarının sırasıyla $\eta_{\text{alternatör}} = 0.98$ ve $\eta_{\text{mechanic}} = 0.97$ olarak kabul edildiği varsayılmıştır.

Burada:

W_e : türbinin elektriksel çıkış gücü (Watt cinsinden)

$\eta_{\text{alternatör}}$: 0.98 alternatör verimliliği

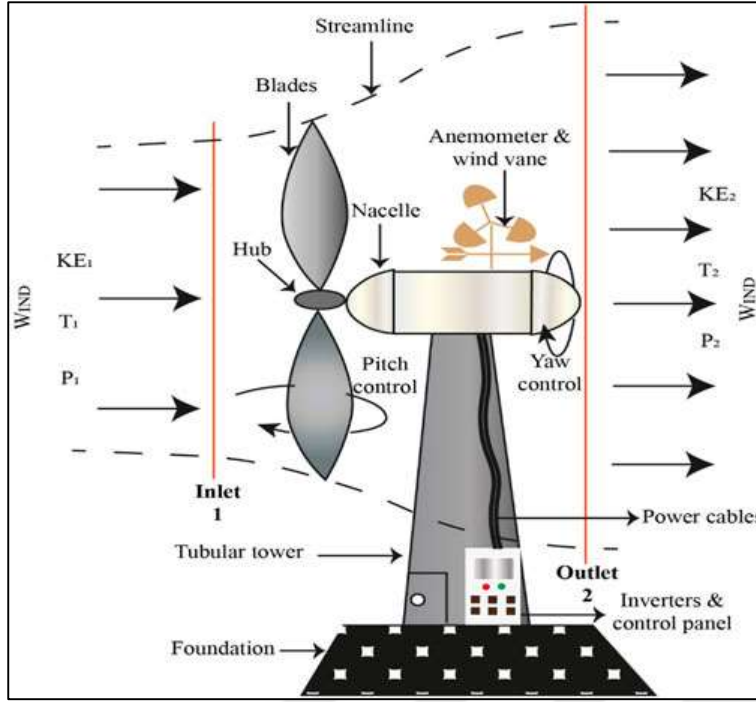
η_{mechanic} : 0.97 mekanik verimlilik

ρ : hava yoğunluğu (genellikle $\sim 1.225 \text{ kg/m}^3$)

R^2 : türbin kanat yarıçapı (m)

V_r^3 : rüzgâr hızı (m/s)

Havanın kinetik ekserjisi



Şekil 3.9. Rüzgar enerjisi analizi

$$k_e = \frac{v_r^2}{2} \quad (3.2)$$

Mevcut gücü belirlemek için, rüzgâr türbininin rotorundan geçen hava miktarını, yani kütle akış hızını bilmemiz gerekmektedir. Ortalama çevre koşulları dikkate alındığında, bu çalışmada havanın yoğunluğu ayrı ayrı hesaplanmıştır olarak kabul ve kütle akış hızı şöyledir:

$$\dot{m} = \rho \times A \times V_r = \rho \times \pi \times r^2 \times V_r \quad (3.3)$$

Yukarıdaki şekilde de görülebileceği üzere, giren kinetik enerjinin elektrik gücüne dönüştürülmeyen kısmı, rüzgâr türbininden çıkan kinetik enerji olarak ayrılır. Kütle akış hızının sabit kaldığı göz önünde bulundurularak, çıkış hızı, aşağıdaki denklem kullanılarak belirlenebilir:

$$\dot{m}k_{e2} = \dot{m}k_{e1}(1 - C_p) \quad (3.4)$$

$$0.5\dot{m}V_1^2(1 - C_p) = 0.5\dot{m}V_2^2 \quad (3.5)$$

$$V_2 = V_1\sqrt{1 - C_p} \quad (3.6)$$

Buna göre, mevcut güç aşağıdaki şekilde hesaplanır

$$\text{Mevcut güç} = W_a = \dot{m}ke_1 \quad (3.7)$$

Bu, rüzgâr türbinlerine sağlanabilir maksimum güç olarak tanımlanabilir. Bugün işletmede olan çoğu rüzgâr türbini, rüzgârın kinetik enerjisinin yaklaşık %20 ila %40'ını kullanır. Kinetik ekserji, mekanik enerjinin bir formudur ve bu nedenle tamamen işe dönüştürülebilir. Bu nedenle, bir sistemin kinetik enerjisinin iş potansiyeli veya ekserjisi, çevrenin sıcaklık ve basıncından bağımsız olarak, kinetik enerji ile aynıdır.

Ekserji her zaman bir referans çevreye göre değerlendirilir. Analizlerde, çevrenin sıcaklığı T_0 ve basıncı P_0 genellikle standart durum değerleri olarak alınır, örneğin 25°C ve 1 atm. Ancak, referans çevre koşulları uygulamaya bağlı olarak farklı şekilde belirtilebilir. T_0 ve P_0 genellikle sistemin çalıştığı yerin ortalama çevre sıcaklığı ve basıncı olarak alınır veya eğer sistem atmosferik havayı kullanıyorsa, ortam koşullarına göre belirlenebilir. T_0 , eğer hem hava hem de su doğal çevreden kullanılıyorsa, hava sıcaklığının ve su sıcaklığının ortalamasını alacak şekilde belirtilebilir. T_0 , hava ve suyun ortalama sıcaklıklarının en düşüğü olarak tanımlanabilir.

Ekserji verimliliği, faydalı iş (W_u) ve ekserji kaybı aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanabilir. Bir türbinin ekserji verimliliği, sıvının akış ekserjisinin ne kadar iyi bir şekilde inverter iş çıkışına dönüştüğünü ölçen bir parametre olarak tanımlanır. Bunu rüzgâr türbinlerine uygulayarak, ekserji verimliliğini şu şekilde elde ederiz:

$$\varepsilon = \frac{W_e}{W_u} = \frac{W_e}{EX_1 - EX_2} \quad (3.8)$$

Ekserji kayıpları şu şekilde tanımlanır:

$$L_{ex} = W_u - W_e = (EX_1 - EX_2) - W_e \quad (3.9)$$

Ekserji kayıpları, bir sistemde enerji dönüşüm süreçlerinde, ideal koşullara göre yapılamayan işin veya çevreyle etkileşim sonucu kaybedilen enerji potansiyelinin miktarıdır. Başka bir deyişle, ekserji kaybı, bir sistemin çevreye olan etkisi ve içsel verimsizlikler nedeniyle kaybolan veya işe dönüştürülemeyen enerji miktarını ifade eder.

Kütle dengesi denklemi

Kütlenin korunumu ilkesine göre, bir kontrol hacmine belirli bir zaman aralığı (Δt) boyunca giren net kütle transferi, kontrol hacmine giren kütleden çıkan kütlenin çıkarılmasıyla elde edilir. Bu durum aşağıdaki denklemle ifade edilir:

$$\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} = \frac{dm_{cv}}{dt} \quad (3.10)$$

Burada $\dot{m}_{in}$ ve $\dot{m}_{out}$ sırasıyla giriş ve çıkış noktalarındaki kütle akış hızlarını temsil eder.

Enerji dengesi denklemi

Birinci Termodinamik Kanunu; enerjinin korunumu kanunudur. Bu ilke, sabit akışlı bir sistem ve bir kontrol hacmi için dikkate alındığında, aşağıdaki denklem elde edilir:

$$\dot{Q}_{in} + \dot{W}_{in} + \sum_{in}^n \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) \quad (3.11)$$

$$= \dot{Q}_{out} + \dot{W}_{out} + \sum_{out} \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) \quad (3.12)$$

Burada:

- $\dot{Q}$: Isı transferi hızı (Watt, W)
- $\dot{W}$: İş yapma hızı (Watt, W)
- h : Özgül entalpi (J/kg)
- v : Hız (m/s)
- g : Yerçekimi ivmesi (9.81 m/s²)
- z : Yükseklik (m)

Bu terimler, bir kontrol hacminde enerji dengesini belirlemek için kullanılır. Sabit akışlı bir sistemde, enerji, kinetik enerji, potansiyel enerji ve entalpi gibi çeşitli faktörlerle ilişkilidir. Enerji dengesi, ısı transferi, yapılan iş ve sistemin giriş/çıkışındaki kütle akış hızlarını dikkate alarak hesaplanır.

Entropi dengesi denklemi

Termodinamiğin İkinci Yasası'na göre, katılımcı sistemlerin entropilerinin toplamında bir artış vardır. Bir kontrol hacmine uygulanan entropi dengeleme denklemi şu şekilde ifade edilebilir:

$$\dot{S}_{gen} = \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_i s_i - \sum \frac{\dot{Q}_k}{T_k} + \frac{dS_{cv}}{dt} \quad (3.13)$$

Rüzgar türbininden elde edilen ortalama güç aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$P_w = \frac{1}{2} \eta_{wt} \rho_{air} A_{wt} C_p V^3 \quad (3.14)$$

Burada:

- η_{wt} : Rüzgar türbini verimliliği,
- ρ_{air} : Hava yoğunluğu (kg/m^3),
- A_{wt} : Rüzgar türbini alanı (m^2),
- C_p : Türbin güç katsayısı,
- V^3 : Rüzgarın ortalama hızı (m/s) olarak ifade edilir.

Rüzgar türbininin ekserji verimliliği şu şekilde ifade edilir:

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{W}_{wt}}{\dot{E}X_{wt}} \quad (3.15)$$

Burada, $\dot{E}X_{wt}$ rüzgâr türbininin ekserjisini temsil eder ve şu şekilde hesaplanır:

$$\dot{E}X_{wt} = \frac{1}{2} \rho_{air} A_{wt} V^3 \quad (3.16)$$

Rüzgar gücü potansiyeli

$$\dot{W}_{\text{kullanılabilir}} = \frac{1}{2} \dot{m} V^2 \quad (3.17)$$

Bu güç, belirli bir V rüzgâr hızında rüzgâr türbininin üretebileceği maksimum güçtür.

Kütleli debi, aşağıdaki şekilde elde edilebilir.

$$\dot{m} = \rho A V \quad (3.18)$$

Burada ρ yoğunluk, A Rüzgar türbini çarkının süpürdüğü alandır.

Rüzgar gücü yoğunluğu

$$\text{Rüzgar Gücü Yoğunluğu} = \frac{\dot{W}_{\text{kullanılabilir}}}{A} = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad (3.19)$$

Rüzgar türbini verimi

$$\eta_{rt} = \frac{\dot{W}_{\text{mil}}}{\dot{W}_{\text{kullanılabilir}}} = \frac{\dot{W}_{\text{mil}}}{\frac{1}{2} \rho V^3} \quad (3.20)$$

Rüzgar türbini kullanılabilir güç potansiyelinin yalnızca belli bir yüzdesini gerçek mil gücüne dönüştürebilir. Bu yüzdeye de rüzgâr verimi denir. Bu formülde $\dot{W}_{\text{mil}}$ rotor mili güç çıkışını göstermektedir. Mil gücü ile elektrik gücü ilişkisi ise aşağıdaki gösterilmiştir.

$$\dot{W}_{\text{elektrik}} = \eta_{\text{dişli kutusu/jeneratör}} \times \dot{W}_{\text{dişli}} \quad (3.21)$$

Bir rüzgâr türbininin verimi, elde edilen elektrik gücünün kullanılabilir rüzgâr gücüne oranı olarak tanımlanabilir:

$$\eta_{rt, \text{toplam}} = \frac{\dot{W}_{\text{elektrik}}}{\dot{W}_{\text{kullanılabilir}}} = \frac{\dot{W}_{\text{elektrik}}}{\frac{1}{2} \rho V^3} \quad (3.22)$$

Yıllık enerji üretimi

$$E_{yillik} = P_{nominal} \times 8760 \times 0.40 \quad (3.23)$$

$$E_{yillik} = 8,3 \times 8760 \times 0.40$$

$$E_{yillik} = 30.1 \text{ GWh/yıl}$$

Amortisman (Geri Ödeme) Hesabı

$$T = \frac{\text{Yatırım}}{\text{Yıllık Gelir}} \quad (3.24)$$

Yıllık Gelir Hesabı

$$\text{Güncel Piyasa Elektrik Fiyatı} = 2,500 \text{ TL/MWh}$$

$$\text{Gelir} = 30100 \times 2500 = 54750000 \text{ TL/yıl} \quad (3.25)$$

Yeni nesil rüzgâr türbinleri için kabul gören yatırım maaliyeti değeri 1,1 milyon USD / MW olarak alındığında ayrıca döviz kuru, diğer giderlerle beraber toplam yatırım maaliyeti yaklaşık 331,1 milyon TL olarak kabul edildiğinde her bir rüzgâr türbini için basit geri ödeme süresi; yaklaşık olarak 6,1 yıl seviyelerinde bulunabilir. Bu durum en iyi ihtimali ifade eder. Bu hesaplama rüzgâr türbinlerinin tam kapasitede enerji üretebildiği durum için yapılmıştır. Fakat sahaya ait ortalama rüzgâr verileri ile yapılan hesaplamalarda amortisman süresi ortalama 7,7 yıl olarak bulunmuştur. Kurulacak olan yeni türbinlerle birlikte yıllık gelirin 54,75milyon TL dolaylarında olacağı hesaplanmış bu fiyatın elektrik satış fiyatlarıyla birlikte değişebileceği göz önünde bulundurulmuştur.

Ülkemiz, 2030 yılına kadar yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam elektrik üretimindeki payını artırmayı hedeflemektedir. Bu hedef doğrultusunda, yerli rüzgâr türbini üretimi ve teknolojik gelişmeler büyük bir önem arz etmektedir. İzmir'in Çeşme ilçesinde bulunan EÜAŞ'a ait Alaçatı RES'te gerçekleştirilen yenileme projesi, bu hedeflere ulaşmada önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir.

Alaçatı RES’te yürütülen yenileme çalışmaları, Türkiye’nin yenilenebilir enerji hedefleri ve yerli üretim stratejileri açısından büyük bir öneme sahiptir. Bu proje, enerji sektöründe yerli teknolojilerin kullanımını artırarak, ülkenin enerji bağımsızlığına katkı sağlayacaktır.

Yerli rüzgâr türbini üretimi, Türkiye’nin enerji sektöründe dışa bağımlılığını azaltmak ve ekonomik kalkınmayı desteklemek açısından büyük önem taşımaktadır. Aselsan’ın yanı sıra, Türkiye’de faaliyet gösteren diğer firmalar da rüzgâr türbini ve bileşenlerinin üretiminde rol almaktadır. Örneğin, TPI Composites, Siemens Gamesa ve Enercon gibi firmalar, Türkiye’de rüzgâr türbini üretimi ve montajı yapmaktadır.

Yürütülmekte olan bu yenileme çalışmaları kapsamında; Alaçatı RES’te bulunan toplam 7,2 megavat elektrik (MWe) kurulu gücüne sahip 12 adet rüzgâr türbini, teknolojik olarak eskimiş olmaları ve yedek parça temininde yaşanan zorluklar nedeniyle, maddi kaynakları Elektrik Üretim Anonim Şirketi tarafından karşılanacak şekilde yenilenmektedir. 2021 yılında yerli türbin kurulumu için imzalanan anlaşma kapsamında, her biri 100 metre kule yüksekliği, 136 metre rotor çapı ve 4,3 MWe kurulu gücüne sahip iki yeni rüzgâr türbini kurulacaktır. Gerçekleştirilen fizibilite çalışmaları neticesinde proje sahasında bağlantı güç limiti 7.2 MW olduğu anlaşılmış ve maksimum 2 adet türbin yerleşimi yapılabildiği sonucuna varılmıştır. Bu türbinlerden biri %80, diğeri ise %65 yerlilik oranına sahip olacaktır. Projede jeneratör, güç dönüştürücü, kontrol sistemi yazılımları ve SCADA sistemi gibi kritik bileşenlerin geliştirilmesi planlanmıştır.

Yenileme çalışmalarının 2025 yılının ilk yarısında tamamlanarak, yeni türbinlerin devreye alınması hedeflenmiştir. Bu sayede, Alaçatı RES’in toplam kurulu gücü artırılarak, enerji üretiminde verimlilik sağlanacak. Ayrıca, yerli üretim sayesinde dışa bağımlılık azalacak ve enerji sektöründe yerli teknolojilerin kullanımı teşvik edilecek [93].

Çizelge 3.5. Projede kullanılan yerli rüzgar türbininin teknik özellikleri [94]

Projede Kullanılan Yerli Rüzgar Türbininin Teknik Özellikleri	
Kurulu Gücü	4.3 MW
Rotor Çapı	136 m
Süpürme Alanı	14,526 m ²
Devreye Girme Hızı	3 m/s
Devreden Çıkma Hızı	25 m/s
Kule Yüksekliği	80–130 m
Generatör Tipi	≥4.3 MW, 0.9 güç faktörlü sincap kafes asenkron motor

Çizelge 3.5. (devam) Projede kullanılan yerli rüzgar türbininin teknik özellikleri [94]

Güç Dönüştürücü	5 MW, 4 bölgesi, su soğutmalı
Fren Sistemi	Aerodinamik (pitch) ve mekanik disk fren
Standartlar	IEC 61400 Serisi, OD 501 Serisi
Sınıf	TC2, TC3, S



Şekil 3.10. Yerli türbin parçaları üretim aşamasından görüntü



Şekil 3.11. Yerli türbin parçaları üretim aşamasından görüntü



Şekil 3.12. Türbin parçaları üretim aşamasından görüntü



Şekil 3.13. Türbin parçaları üretim aşamasından görüntü



Şekil 3.14. Türbin parçaları üretim aşamasından görüntü



Şekil 3.15. Türbin parçaları üretim aşamasından görüntü



Şekil 3.16. Türbin parçaları üretim aşamasından görüntü

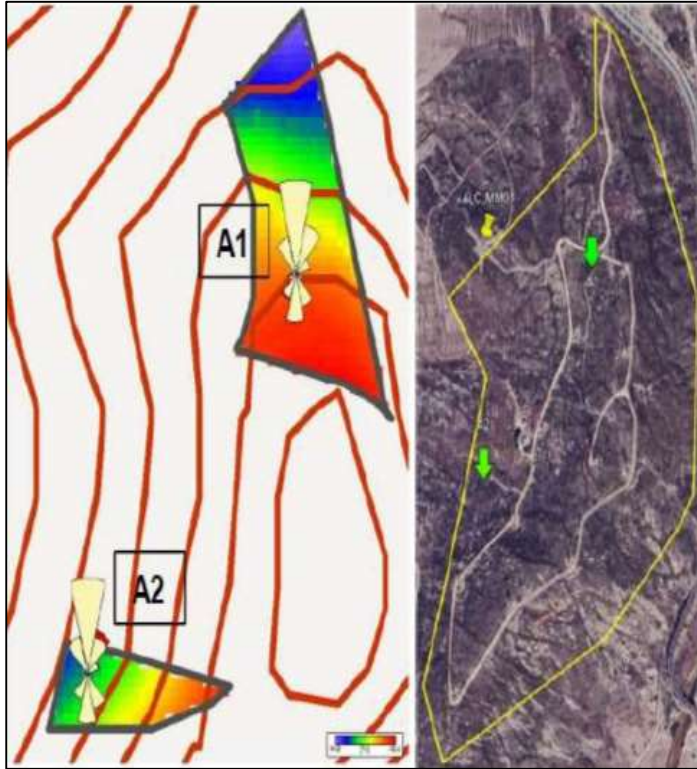


Şekil 3.17. Türbin temel atma aşamasından görüntü



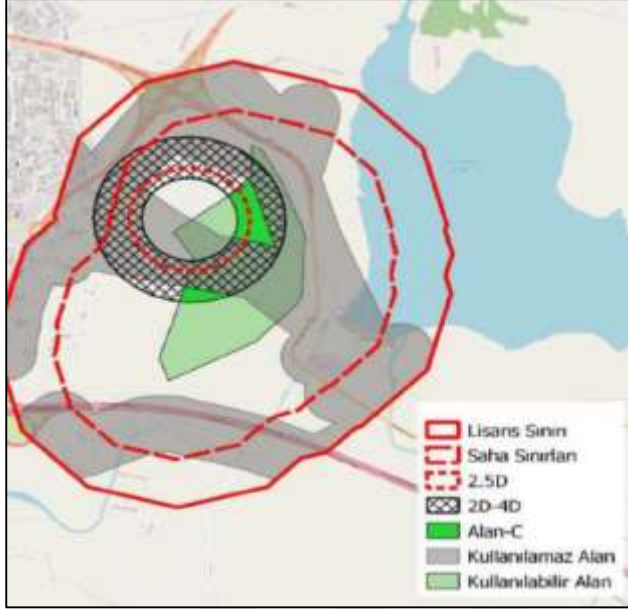
Şekil 3.18. Türbin temel atma aşamasından görüntü

Rüzgâr hızını etkileyen temel unsurlar arasında yerel yüzey yapısı, bitki örtüsü ve yüksek yapılar önemli rol oynamaktadır. Rüzgâr türbinlerinin konumlandırılmasında bu faktörler dikkate alınmalı; türbinler düz arazilerde en yüksek noktalara, vadilerde ve geçitlerde ise hâkim rüzgâr yönünü en verimli şekilde alabilecek ve yerleşim bölgelerinden uzak olmayacak biçimde yerleştirilmelidir. Ayrıca, rüzgâr çiftliklerinde türbinlerin birbirinin rüzgâr akışını engellemeyecek biçimde, gölgeleme etkisini en aza indirecek şekilde konumlandırılması enerji verimliliği açısından büyük önem taşımaktadır [95].



Şekil 3.19. Türbinlerin konumlandırılma çalışması

Rüzgâr türbinlerinin konumlandırılmasında, türbülans etkilerini minimize etmek ve enerji üretim verimliliğini artırmak amacıyla türbinler arası mesafe, rotor çapı esas alınarak belirlenmektedir. Bu değerler arazinin topografik özellikleri, hâkim rüzgâr yönü ve türbin modeline bağlı olarak optimize edilmektedir [85].



Şekil 3.20. Türbinlerin konumlandırma çalışması

IEC 61400-12-1:2022 standardı çerçevesinde, rüzgâr ölçüm verileri, türbinlerin birbirine olan asgari yaklaşma mesafeleri, enerji iletim ve dağıtım hatlarına olan uzaklıklar gibi kriterler dikkate alınarak mikrokonumlandırma çalışmaları gerçekleştirilmiş ve türbinlerin koordinatları belirlenmiştir [78].



Harita 3.8. Türbinin kurulacağı konum [80]

Yukarıdaki görüntüde yer aldığı üzere konuma ait koordinat bilgileri; Emlem:38.292311409
Boylam: 26.396203911 şeklindedir. Proje sahasında bağlantı güç limiti 7.2 MW olduğu için
maksimum 2 adet türbin yerleşimi yapılabilir. İki türbin arasında 1.2 km mesafe
vardır.



Harita 3.9. Türbinin kurulacağı konum [80]

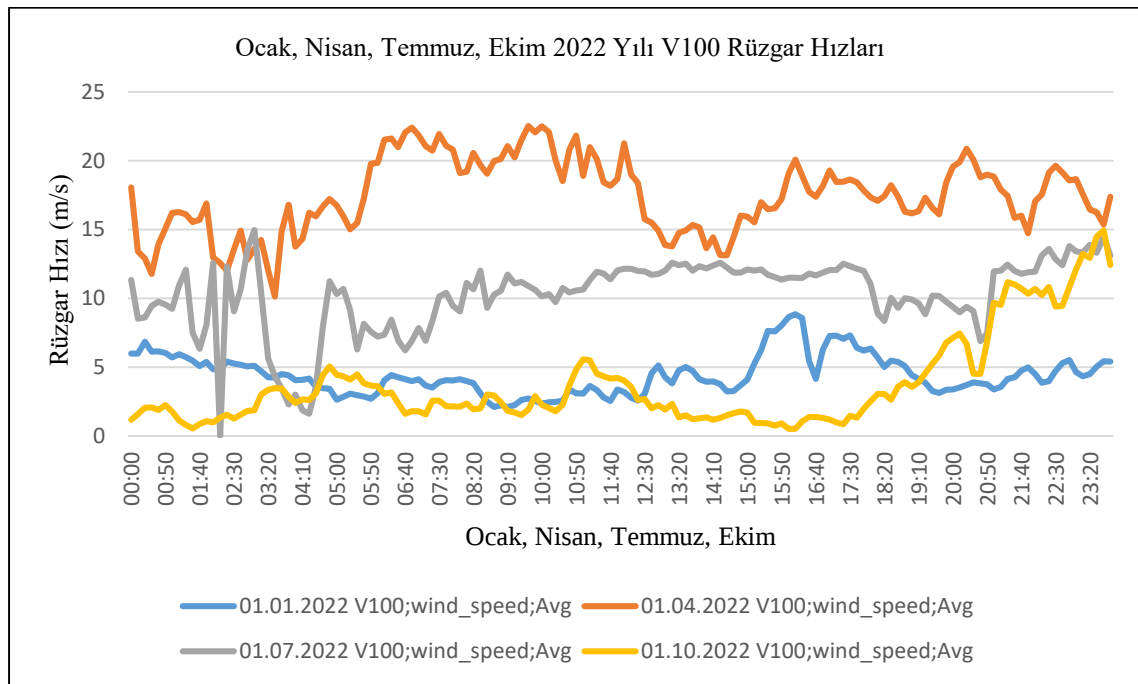
Yukarıdaki görüntüde yer aldığı üzere konuma ait koordinat bilgileri; Emlem:38.285383236
Boylam: 26.393151249 şeklindedir.



4. SONUÇLAR VE BULGULAR

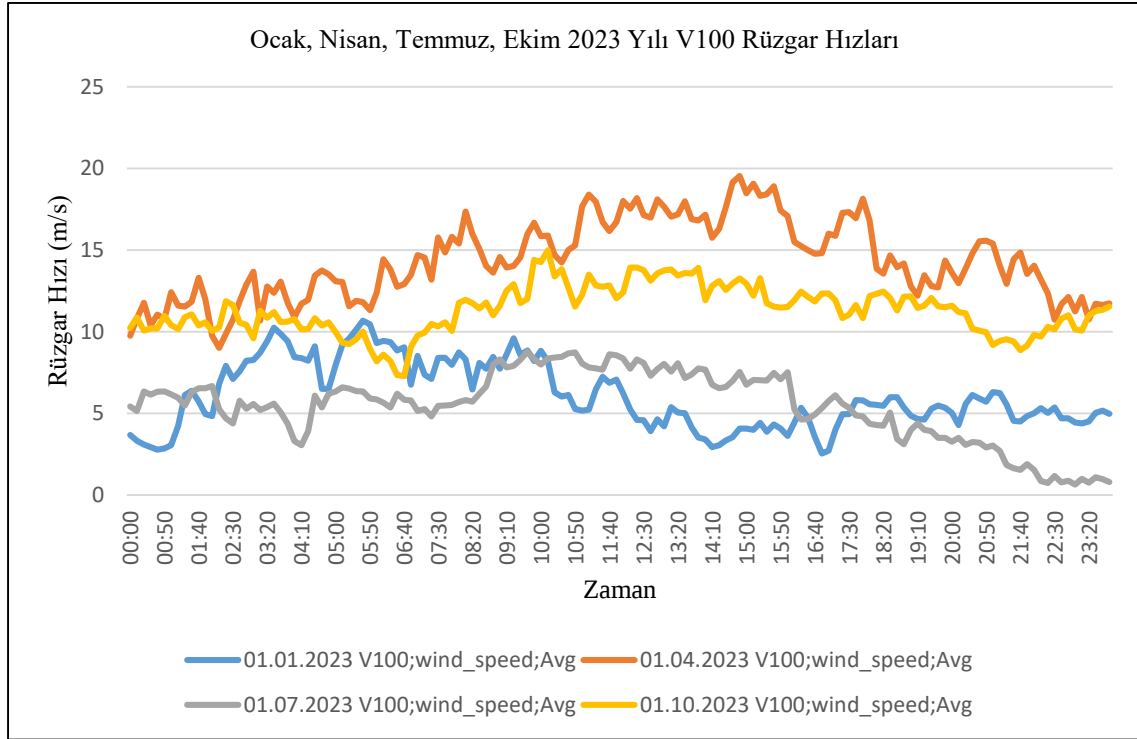
Bu çalışma, Çeşme Alaçatı bölgesinin rüzgâr enerjisi potansiyelinin belirlenmesi amacıyla yapılmıştır. Çalışmada iki yıllık periyotta ölçülen rüzgâr hızı, yönü, sıcaklık, nem ve basınç verileri değerlendirilmiş, mevsimsel değişimler incelenmiştir.

4.1. Rüzgar Hızı Analizi



Şekil 4.1. Ocak, Nisan, Temmuz, Ekim 2022 Yılı V100 Rüzgar hızlarının zaman içindeki değişimi

2022 yılına ait 100 m yükseklik rüzgâr hızı verilerinin aylık ortalamaları incelendiğinde, Nisan ayının diğer aylara kıyasla en yüksek rüzgâr hızlarına sahip olduğu görülmektedir. Bu dönemde rüzgâr hızlarının günün büyük bölümünde 10 m/s'nin üzerinde seyretmesi, potansiyel enerji üretimi açısından oldukça elverişli koşullar sunmaktadır. Temmuz ayı, Nisan'dan sonra ikinci en yüksek ortalama değerlere sahiptir. Ocak ve Ekim aylarında ise rüzgâr hızlarının düşük seyretmesi, mevsimsel değişimlerin rüzgâr enerjisi üretim potansiyeli üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Günlük saatlik dağılımlar incelendiğinde, özellikle akşam saatlerinde rüzgâr hızında hafif bir artış gözlenmiş; bu durum, türbin işletme stratejilerinin zamansal optimizasyonu açısından dikkate alınabilir bir parametre olarak değerlendirilebilir.

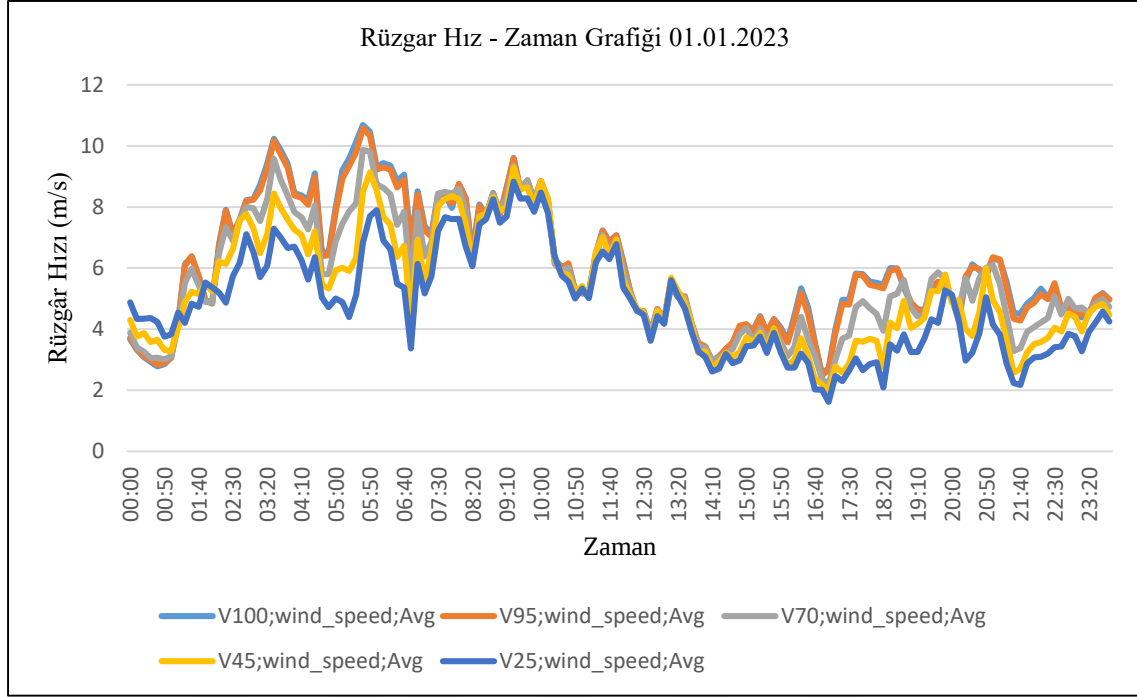


Şekil 4.2. Ocak, Nisan, Temmuz, Ekim 2023 Yılı V100 Rüzgar hızlarının zaman içindeki değişimi

2023 yılına ait verilerde, özellikle Nisan, Temmuz, ve Ekim aylarında rüzgâr hızlarında belirgin dalgalanmalar gözlemlenmiştir. Nisan 2023'te rüzgâr hızları sabah saatlerinde artarken, Temmuz 2023'te rüzgâr hızının daha düşük olduğu, Ekim 2023'te ise akşam saatlerinde belirgin bir artış olduğu görülmüştür. Bu durum, mevsimsel değişimlerin rüzgâr hızı üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır.

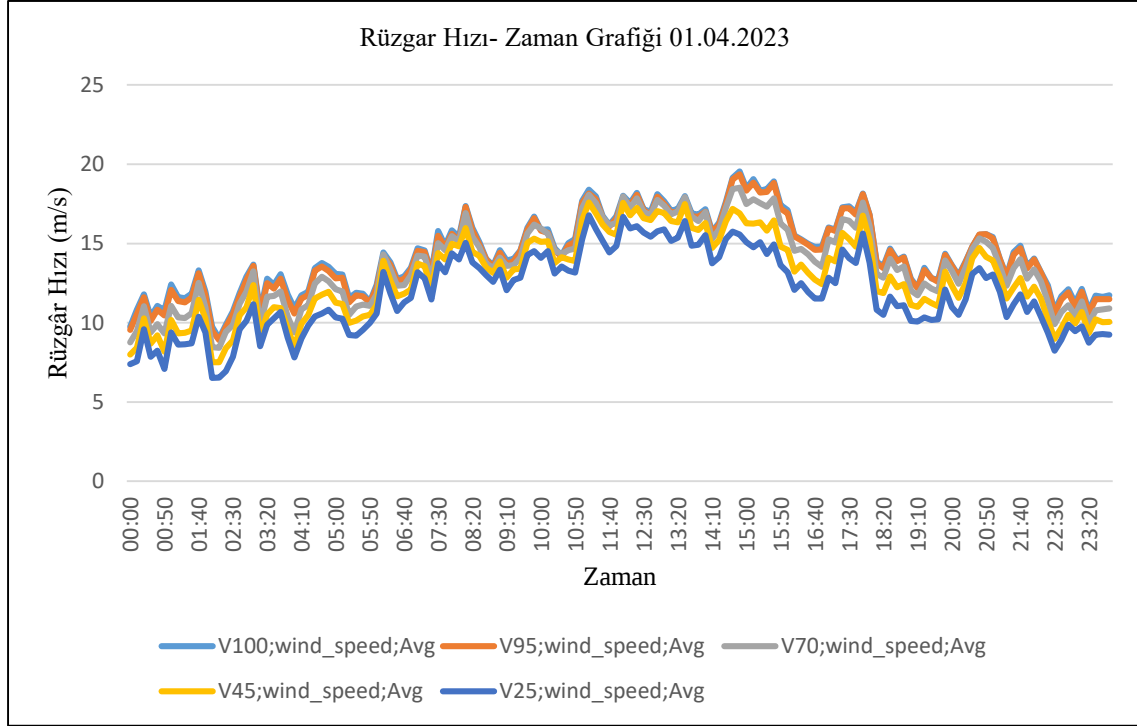
2022 yılı verileri de benzer şekilde, Ocak ve Temmuz aylarında rüzgâr hızlarının düşük olduğunu, Nisan ve Ekim aylarında ise hızın arttığını göstermektedir. Bu yıllık farklılıklar, rüzgâr hızlarının mevsimsel olarak değişiklik gösterdiğini ve rüzgâr enerjisi üretimi açısından önemli bir faktör oluşturduğunu göstermektedir.

Her iki yılın verileri, rüzgâr hızlarındaki dalgalanmaların özellikle ilkbahar ve sonbahar aylarında belirginleştiğini ve yaz aylarında ise rüzgâr hızlarının düştüğünü göstermektedir. Bu bulgular, rüzgâr enerjisi potansiyelinin mevsimsel faktörlere bağlı olarak değişkenlik gösterdiğini ve rüzgâr türbinlerinin verimliliğinin, yıllık iklimsel koşullara göre optimize edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.



Şekil 4.3. 01.01.2023 tarihine ait 25 m, 45 m, 70 m, 95 m ve 100 m yüksekliklerinde ölçülen ortalama rüzgâr hızlarının zaman içindeki değişimi

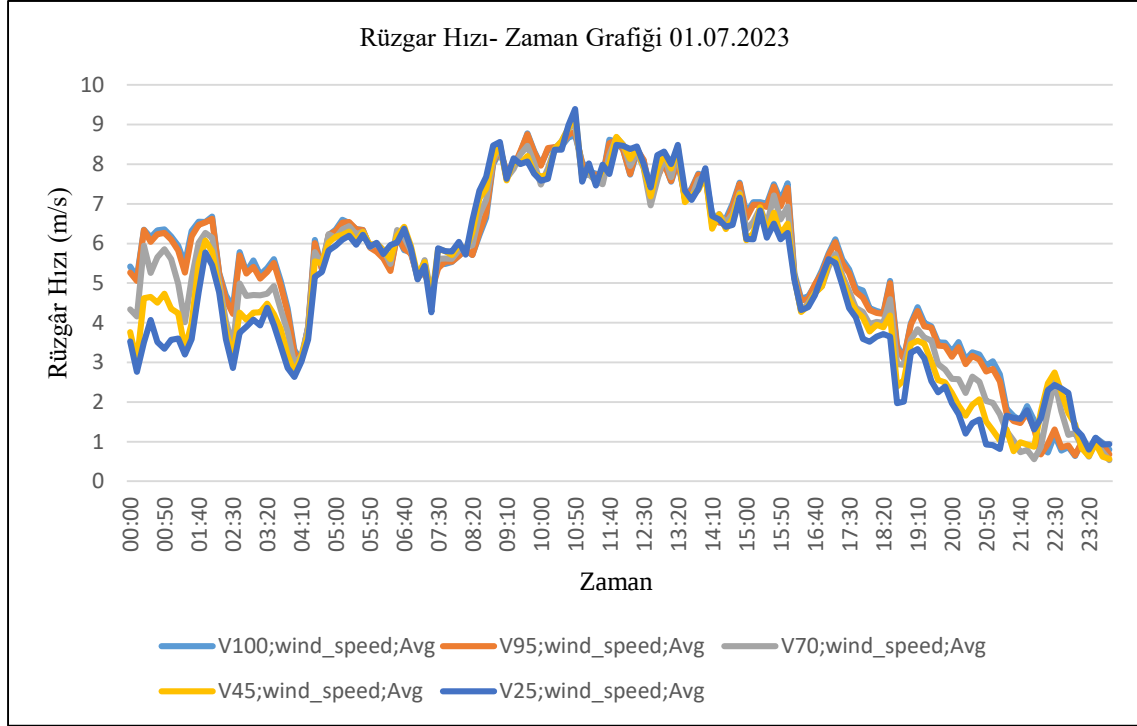
Şekil 4.3'te, 01.01.2023 tarihine ait farklı yüksekliklerde ölçülmüş ortalama rüzgâr hızlarının gün içerisindeki değişimi sunulmaktadır. Rüzgâr hızları sabahın erken saatlerinde artış göstererek 06:00–08:00 aralığında maksimum değerlere ulaşmış, daha sonra gün ortasında azalmış ve akşam saatlerinde tekrar hafif bir artış eğilimi göstermiştir. Yükseklik arttıkça rüzgâr hızının da arttığı gözlenmiş olup, bu durum atmosferik sınır tabakasındaki sürtünme etkisinin alt seviyelerde daha yüksek olmasına bağlanabilir. Tüm yüksekliklerde benzer günlük değişim eğilimlerinin gözlenmesi, ölçüm periyodu boyunca dikey hız profilinin stabil kaldığını göstermektedir.



Şekil 4.4. 01.04.2023 tarihine ait farklı yüksekliklerde ölçülen ortalama rüzgâr hızının zamana göre değişimi

Şekil 4.4'te 01 Nisan 2023 tarihinde 25 m, 45 m, 70 m, 95 m ve 100 m yüksekliklerinde ölçülen ortalama rüzgâr hızlarının zaman içerisindeki değişimi görülmektedir. Günün erken saatlerinde (00:00–06:00) rüzgâr hızlarının tüm yüksekliklerde görece düşük olduğu, sabah saatlerinden itibaren artış gösterdiği ve 14:00 civarında maksimum değerlere ulaştığı gözlenmiştir. Öğleden sonra saatlerinden itibaren ise rüzgâr hızlarında kademeli bir azalma meydana gelmiştir.

Grafikten görüldüğü üzere, genel olarak yükseklik arttıkça rüzgâr hızının da arttığı tespit edilmiştir. Bu durum, atmosferik sınır tabakasındaki sürtünme etkisinin alt seviyelerde daha belirgin olmasıyla açıklanabilir. En yüksek rüzgâr hızları 100 m seviyesinde, en düşük değerler ise 25 m seviyesinde ölçülmüştür. Gün içindeki değişim eğilimi tüm seviyelerde benzer bir seyir göstermektedir.



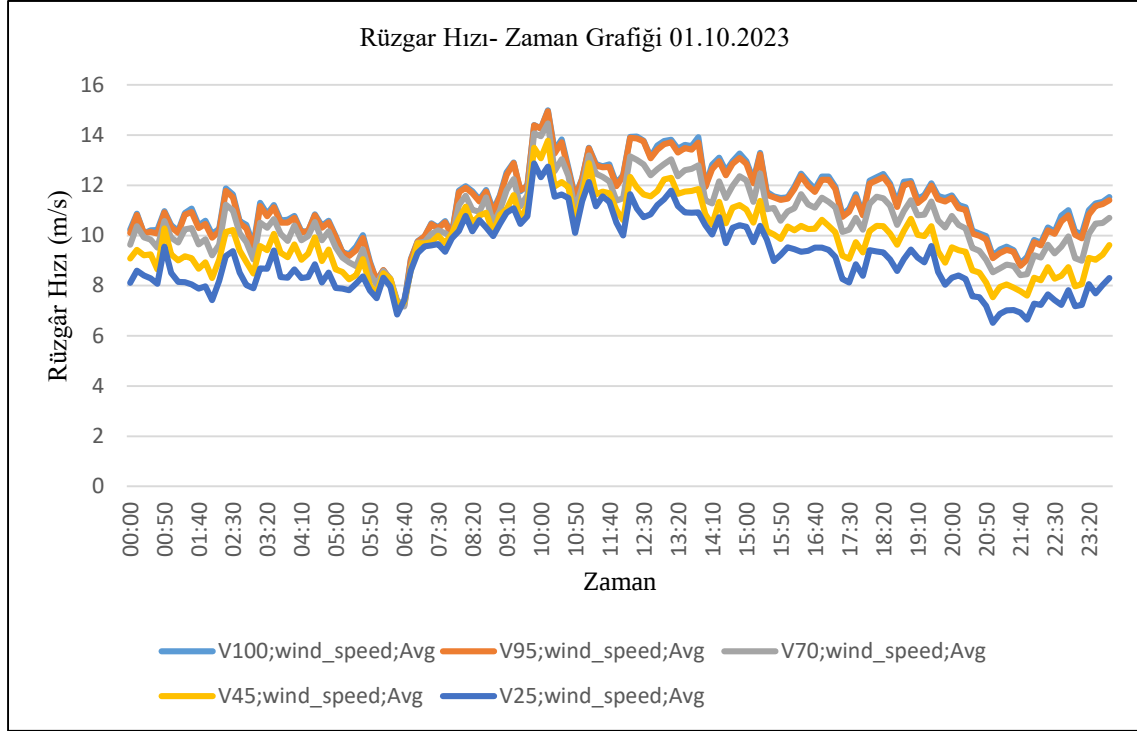
Şekil 4.5. 01 Temmuz 2023 tarihinde 25 m, 45 m, 70 m, 95 m ve 100 m yüksekliklerinde ölçülen ortalama rüzgâr hızlarının gün içindeki değişimi

01.07.2023 tarihli ölçümler, yaz döneminde rüzgâr hızlarının yüksek genlikli günlük dalgalanmalara sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, gün içi enerji üretiminde dalgalanmalara yol açabilir. Özellikle öğle saatlerinde yüksek rüzgâr hızları, türbinlerin nominal güç bölgelerinde çalışmasını desteklerken; sabah erken ve akşam geç saatlerdeki düşük hızlar kısmi yükte çalışma rejimlerini temsil etmektedir.

Nisan ve Ocak aylarıyla kıyaslandığında Temmuz ayında:

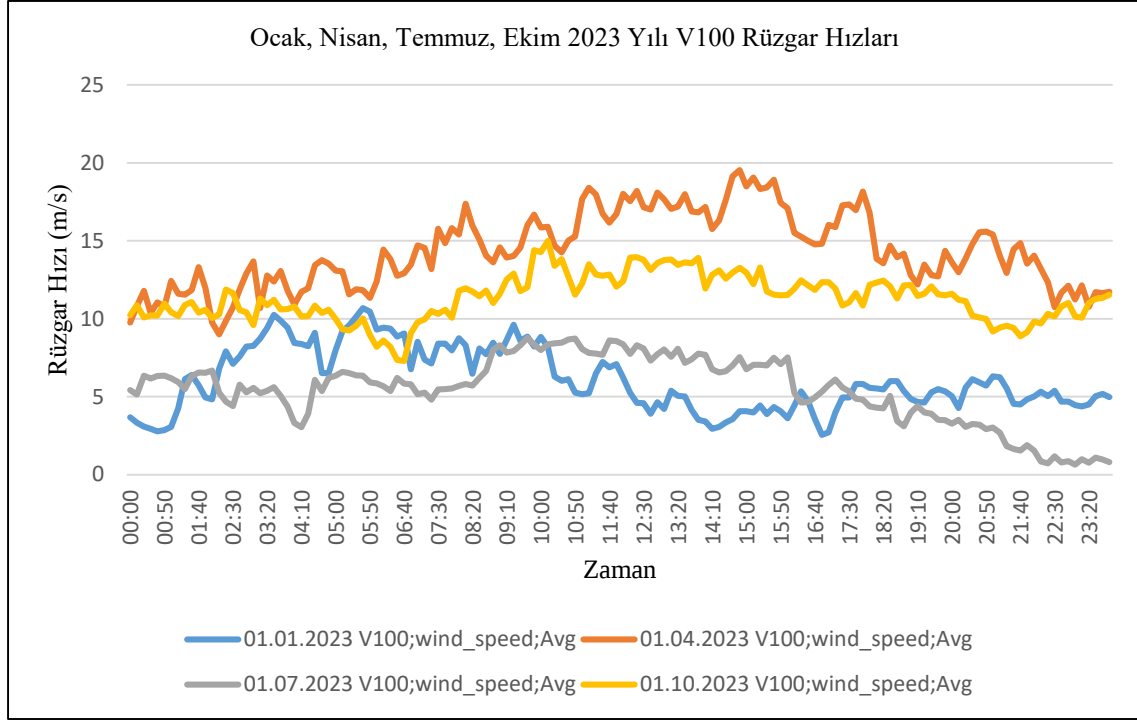
- Gün ortasında maksimum hızların daha yüksek olduğu,
- Gece ve sabah erken saatlerde rüzgâr hızlarının daha düşük seyrettiği,
- Günlük değişim genliğinin belirgin biçimde arttığı tespit edilmiştir.

Bu sonuç, yaz aylarında rüzgâr enerjisi üretim potansiyelinin kısa süreli olarak yükseldiğini, ancak süreklilik açısından kış aylarına göre daha değişken bir karaktere sahip olduğunu göstermektedir. Rüzgâr enerji santrali performans analizlerinde bu tür mevsimsel değişkenliğin dikkate alınması, enerji üretim tahminlerinin doğruluğu açısından önemlidir.



Şekil 4.6. 01 Ekim 2023 tarihinde 25 m, 45 m, 70 m, 95 m ve 100 m yüksekliklerinde ölçülen ortalama rüzgâr hızlarının gün içindeki değişimi

Şekil 4.6’da, 01 Ekim 2023 tarihinde 25 m, 45 m, 70 m, 95 m ve 100 m yüksekliklerinde ölçülen ortalama rüzgâr hızlarının zaman içerisindeki değişimi görülmektedir. Tüm yüksekliklerde benzer eğilim gözlenmekte, ancak yükseklik arttıkça (özellikle 95 m ve 100 m seviyelerinde) rüzgâr hızının belirgin şekilde daha yüksek olduğu görülmektedir. Özellikle 95 m ve 100 m seviyelerinde elde edilen 14–15 m/s’lik ortalama değerler, bölgenin rüzgâr enerjisi üretimi açısından yüksek potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

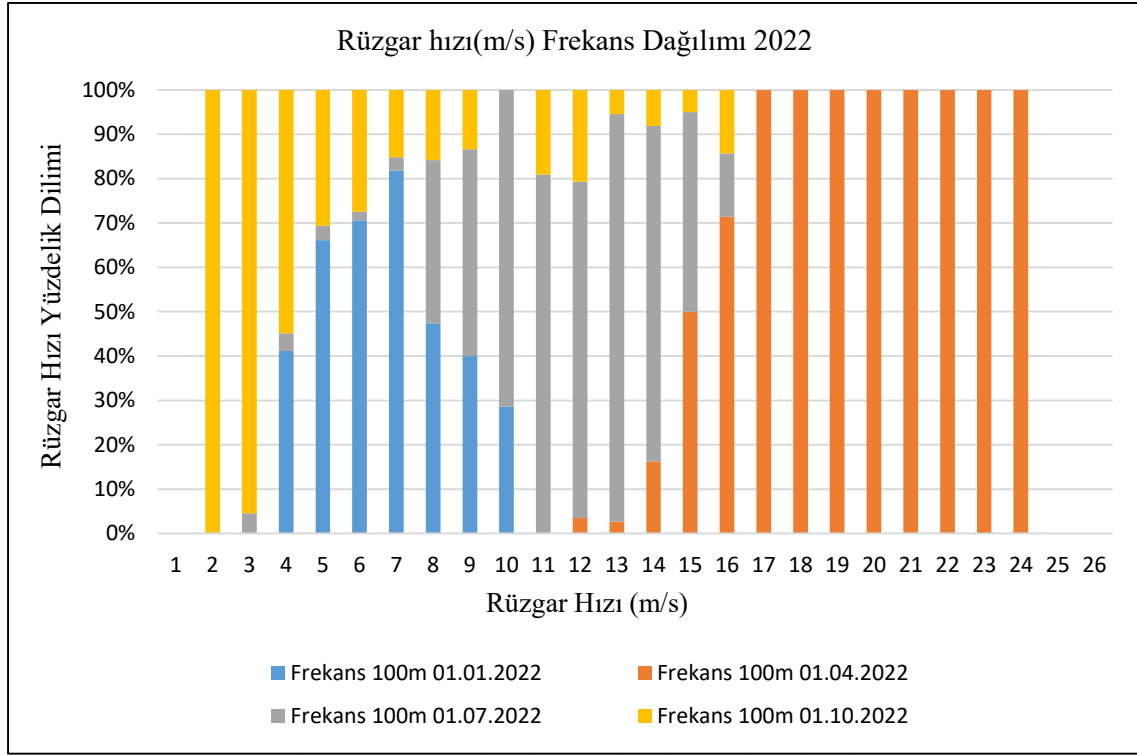


Şekil 4.7. Ocak, Nisan, Temmuz, Ekim 2023 Yılı V100 Rüzgar hızlarının zaman içindeki değişimi

2023 yılına ait Ocak, Nisan, Temmuz ve Ekim aylarında 100 m yükseklikten ölçülen ortalama rüzgâr hızlarının gün içi değişimleri incelenmiştir. Sonuçlar, mevsimsel farklılıkların rüzgâr potansiyeli üzerinde belirgin etkili olduğunu göstermektedir. En yüksek hızlar Nisan (10–18 m/s) ve Ekim (9–15 m/s) aylarında, en düşük hızlar ise Ocak (3–7 m/s) ayında gözlenmiştir. Temmuz ayında hızlar orta seviyede (5–8 m/s) ve nispeten stabildir. Nisan ve Ekim aylarında sabah saatlerinden itibaren artış gösteren rüzgâr hızları öğle saatlerinde maksimum değerlere ulaşmaktadır. Bu bulgular, rüzgâr enerjisi üretimi açısından ilkbahar ve sonbahar aylarının en verimli dönemler olduğunu ortaya koymaktadır.

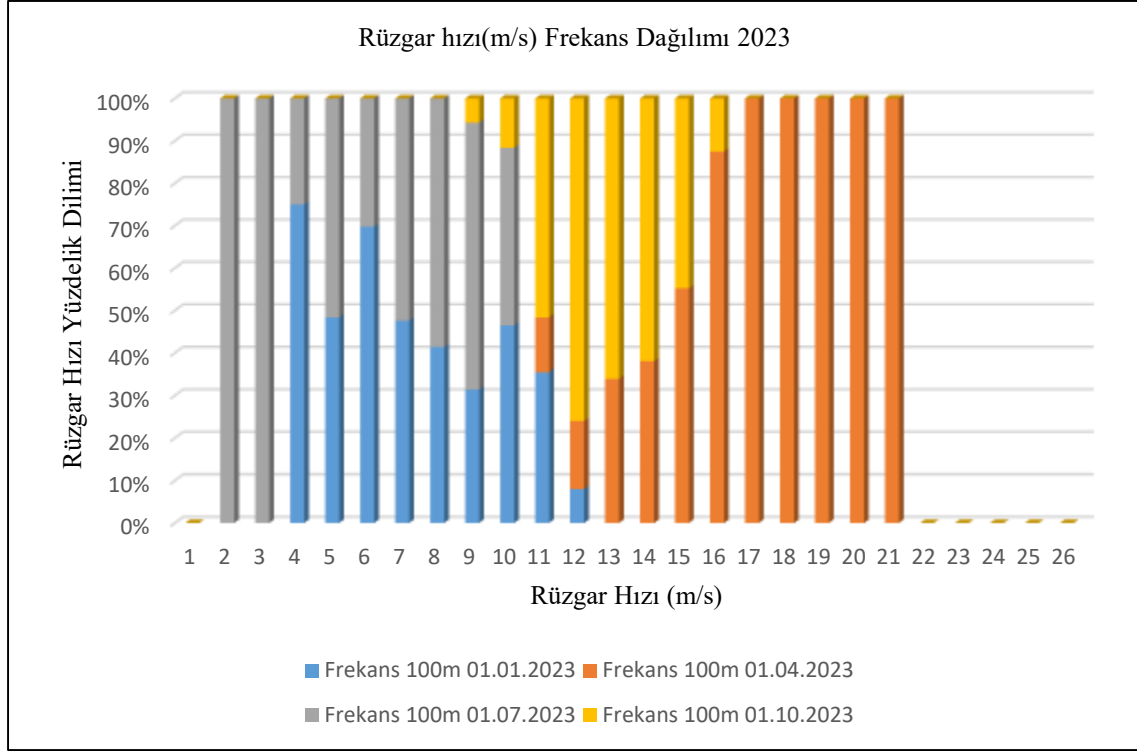
4.1.1. Rüzgâr hızı frekans dağılımlarının istatistiksel analizi

Bu bölümde 2022 ve 2023 yıllarına ait 100 m yükseklikten ölçülen rüzgâr hızı verilerinin mevsimsel frekans dağılımları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Grafikler, her iki yılın dört farklı tarihini (01 Ocak, 01 Nisan, 01 Temmuz ve 01 Ekim) temsil eden dönemsel rüzgâr hızlarının yüzdelik frekanslarını göstermektedir. Bulgular, yıllar arasında belirgin mevsimsel değişimler bulunduğunu ve bu değişimlerin sahadaki rüzgâr enerji potansiyeli açısından önemli etkiler yarattığını ortaya koymaktadır.



Şekil 4.8. 2022 Yılı rüzgâr hızı frekans dağılımlarının istatistiksel analizi

Şekil 4.8. ve 4.9. da 2022 ve 2023 yıllarına ait 100 m yükseklikte ölçülen rüzgâr hızı frekans dağılımları değerlendirilmiştir. Ocak, nisan, temmuz ve ekim aylarına karşılık gelen dönemsel frekans değerleri, sahadaki rüzgâr rejiminin mevsimsel değişimini açık bir şekilde ortaya koymaktadır.



Şekil 4.9. 2023 Yılı rüzgâr hızı frekans dağılımlarının istatistiksel analizi

2023 yılı dağılımı incelendiğinde, ocak ve temmuz aylarında rüzgâr hızlarının ağırlıklı olarak 1–10 m/s aralığında gerçekleştiği görülmektedir. Ocak ayında orta hız sınıflarında (6–10 m/s) belirgin bir yoğunlaşma bulunurken, temmuz ayında düşük ve orta hızların daha geniş bir bantta dağıldığı tespit edilmiştir. Nisan döneminde 13 m/s ve üzeri hızlarda frekans artışı gözlenmiş olup, ilkbahar aylarında rüzgâr hızlarının daha yüksek değerlere ulaştığı anlaşılmaktadır. Ekim ayı verileri ise 11–15 m/s aralığında yoğunlaşarak sonbaharın rüzgâr enerjisi açısından elverişli bir dönem olduğunu göstermektedir.

2022 yılı frekans dağılımları genel olarak 2023 yılı ile benzer bir eğilim sergilemekle birlikte, özellikle nisan ayında yüksek hızlara karşılık gelen sınıflarda daha belirgin bir yoğunluk görülmektedir. Bu durum iki yıl arasında ilkbahar rüzgâr rejimi açısından anlamlı bir fark olduğunu göstermektedir. Temmuz ve ocak aylarında ise düşük ve orta hızların baskın olduğu, ekim ayının ise 10–15 m/s aralığında kararlı bir dağılım sunduğu tespit edilmiştir.

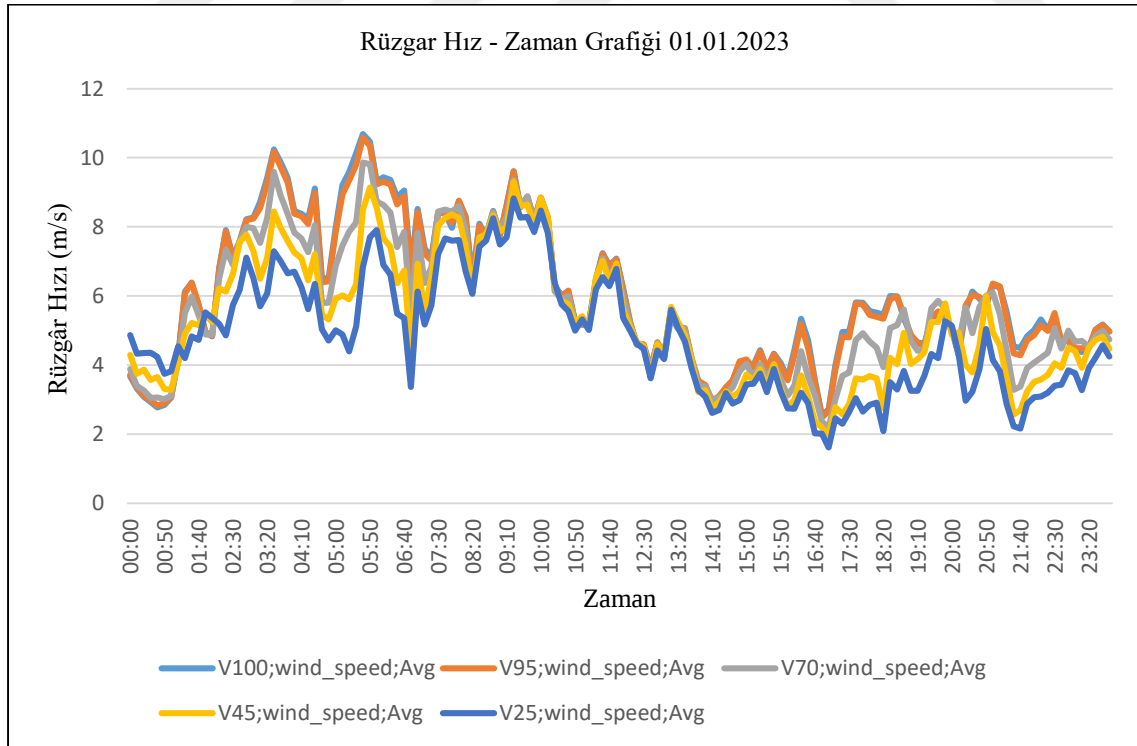
Her iki yıl birlikte değerlendirildiğinde, sahada mevsimsel rüzgâr karakteristiğinin belirgin olduğu, düşük ve orta hızların kış ve yaz aylarında, yüksek hızların ise özellikle ilkbahar ve

kısmen sonbahar dönemlerinde öne çıktığı anlaşılmaktadır. Ayrıca 2022 yılında yüksek hızlara ait frekansın 2023 yılına göre daha yüksek seviyelerde gerçekleşmesi, sahada yıllar arası varyasyonun dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Bu bulgular, çalışma alanının rüzgâr enerjisi üretimi açısından potansiyel sunduğunu ve mevsimsel değişimlerin enerji üretim tahminlerinde önemli rol oynadığını ortaya koymaktadır.

Sahadaki rüzgâr hızlarının yıl boyunca yoğunlaştığı temel aralık 6–15 m/s olarak belirlenmiştir. Bu değerler, modern rüzgâr türbinlerinin çalışma karakteristikleriyle karşılaştırıldığında aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

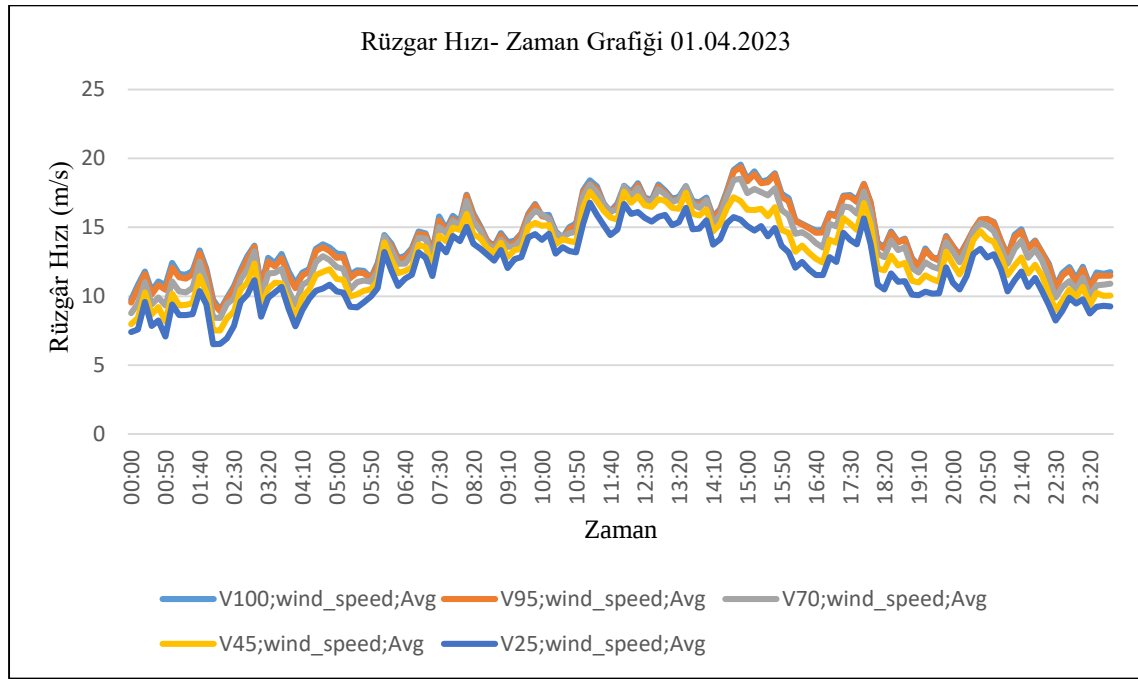
4.2. Mevsimsel Rüzgar Rejimi Analizi

Bu bölümde, 2023 yılına ait dört farklı dönemde (01.01.2023, 01.04.2023, 01.10.2023 ve 01.07.2023) 25 m, 45 m, 70 m, 95 m ve 100 m yüksekliklerinde ölçülen rüzgâr hızı verileri incelenmiş ve rüzgâr hızlarının gün içindeki değişimleri mevsimsel olarak karşılaştırılmıştır. Elde edilen veriler Şekil 38 Şekil 39 Şekil 40 ve Şekil 41’de gösterilmiştir.



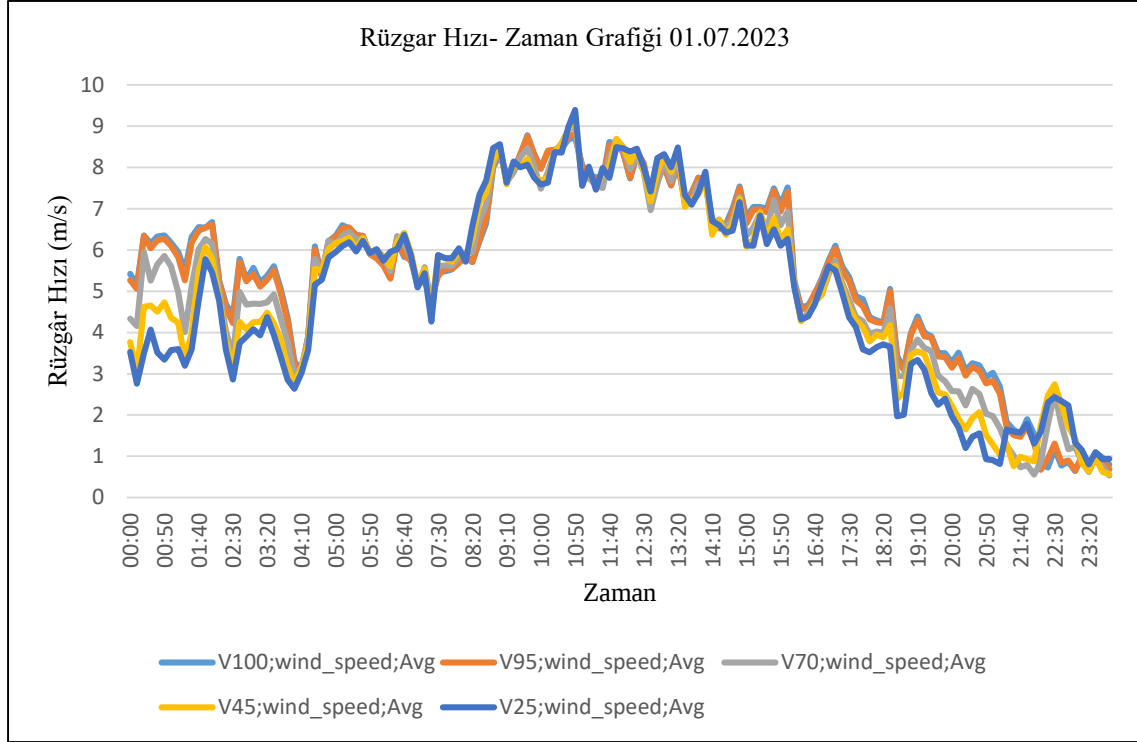
Şekil 4.10. 01.01.2023 Mevsimsel Rüzgar Rejimi Analizi

Kış mevsimine ait ölçümlerde rüzgâr hızları genel olarak 4–9 m/s aralığında değişmiştir. Günlük değişim eğrisi incelendiğinde, gece ve sabah erken saatlerinde artış eğilimi, öğle saatlerinde azalma, akşam saatlerinde ise hafif artış gözlenmiştir. Bu durum, kış aylarında atmosferik kararlılığın yüksek olması ve termal türbülansın zayıf gelişmesi ile açıklanabilir. Yükseklik arttıkça rüzgâr hızının da arttığı belirlenmiştir. Ortalama hızlar bakımından kış dönemi, kararlı fakat düşük enerjili bir rüzgâr rejimi sergilemektedir.



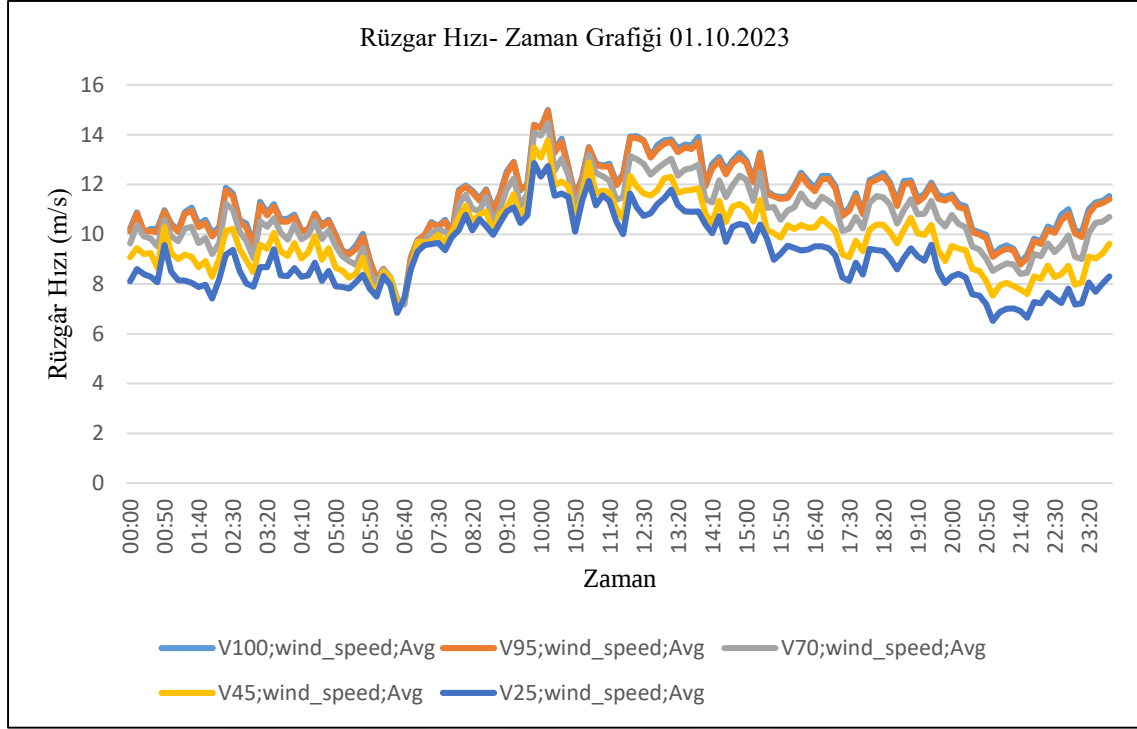
Şekil 4.11. 01.04.2023 Mevsimsel rüzgâr rejimi analizi

İlkbahar döneminde rüzgâr hızlarının belirgin şekilde arttığı gözlenmiştir. Gün boyunca rüzgâr hızları sabah saatlerinden itibaren yükselmiş, öğle saatlerinde (yaklaşık 14:00 civarında) maksimum değerlere (16–18 m/s) ulaşmıştır. Bu artış, güneşlenme süresinin uzaması, yüzey ısınmasının artması ve atmosferik kararsızlığın güçlenmesi sonucunda oluşan termal konveksiyon etkisi ile ilişkilidir. Bu dönemde rüzgâr hızları enerji üretimi açısından oldukça elverişli değerlere ulaşmıştır.



Şekil 4.12. 01.07.2023 Mevsimsel rüzgâr rejimi analizi

Yaz mevsiminde rüzgâr hızlarının gün içi değişim genliği artmış, maksimum hızlar sabah geç saatlerde (10:00–12:00) gözlenmiştir. Özellikle 45 m yüksekliğinde ölçülen maksimum değerler 12 m/s'nin üzerine çıkmıştır. Gün ortasında güçlü yüzey ısınması sonucu konvektif karışım artmış, bu da rüzgâr hızlarının kısa süreli ancak yüksek değerler almasına neden olmuştur. Öğleden sonra ve akşam saatlerinde atmosferik kararlılığın yeniden oluşmasıyla hızlar düşüş eğilimine geçmiştir. Yaz dönemi, yüksek anlık rüzgâr hızları ile karakterize edilmekte ancak süreklilik bakımından değişken bir profil göstermektedir.



Şekil 4.13. 01.10.2023 Mevsimsel rüzgâr rejimi analizi

Sonbahar döneminde yaz dönemine göre rüzgâr hızlarının arttığı gözlenmiştir. Günlük ortalama rüzgâr hızları sabah erken saatlerde minimum seviyede iken (yaklaşık 7–9 m/s), öğle saatlerinde maksimum değerlere ulaşmıştır (yaklaşık 14–15 m/s).

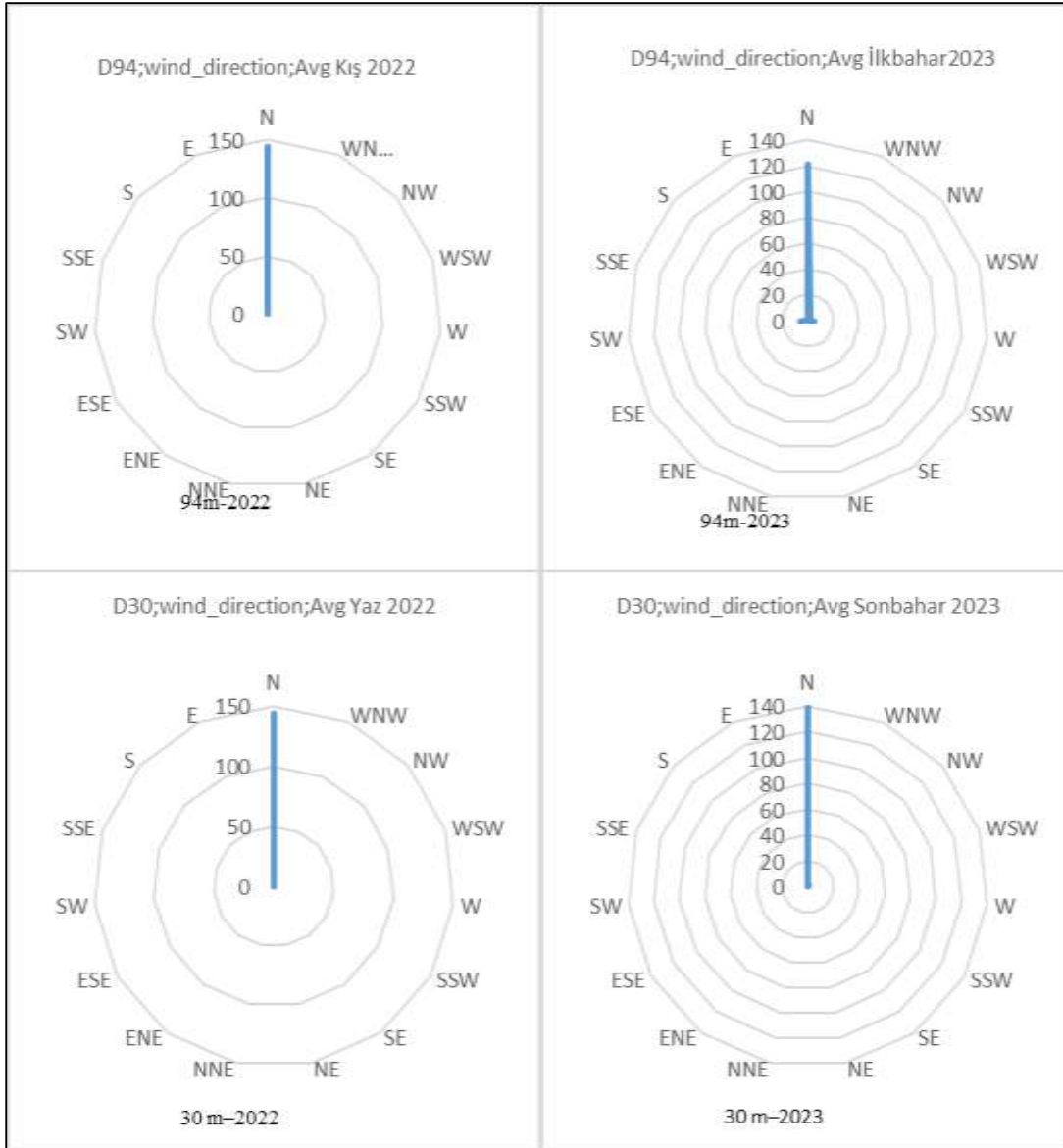
Çizelge 4.1. 2022 ve 2023 yılları için mod, medyan ve baskın hız aralıklarının özetlenmesi

Yıl / Dönem	Mod (m/s) (En Sık Görülen Değer)	Medyan (m/s) (Ortakdaki Değer)	Baskın Enerji Aralığı (m/s)
2023 Ocak	6–9	6–8	8–12
2023 Nisan	13–15	12–14	10–15
2023 Temmuz	6–9	6–8	7–12
2023 Ekim	11–14	10–12	10–15
2022 Ocak	6–8	6–7	8–12
2022 Nisan	14–17	13–15	12–17
2022 Temmuz	6–8	6–8	7–12
2022 Ekim	10–15	10–12	10–15

4.3. Rüzgâr yönü ve frekans dağılımı analizi

2022 ve 2023 yıllarına ait hem 94. metrede hem 30. metrede bulunan rüzgâr yönü ölçerden alınan rüzgâr yönü verileri mevsimsel olarak değerlendirilmiş ve Şekil 37-41’de

gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde, her iki yılın tüm mevsimlerinde rüzgâr yönünün, ağırlıklı olarak kuzey (N) yönünden estiği tespit edilmiştir. Elde edilen analiz sonuçlarına göre, rüzgâr yönünün yıl genelinde ağırlıklı olarak, baskın hakim rüzgâr yönünün Kuzey ve ikincil yönün ise Kuzeydoğu doğrultusunda estiği belirlenmiştir. Yükseklik arttıkça rüzgâr yönünün belirginleştiği gözlenmiştir.



Şekil 4.14. 2022 ve 2023 yıllarına ait kış mevsimi rüzgâr yönü dağılımları (94 m ve 30 m)

2022 ve 2023 yıllarına ait dört mevsim için 30 m ve 94 m yüksekliklerde ölçülen ortalama rüzgâr yönü dağılımlarını gösteren grafiklerde rüzgârın her iki yılda da ağırlıklı olarak kuzey yönünden estiği, yükseklik artışının hâkim rüzgâr yönünde belirgin bir değişime neden olmadığı görülmektedir. Farklı yüksekliklerde yönelimin benzer olması, bölgedeki hâkim

rüzgâr sistemlerinin kararlı olduğunu ve topografyanın yön üzerinde belirgin bir etki oluşturmadığını göstermektedir.

2022 yılı ilkbahar, yaz, sonbahar, kış dönemlerinde şekilde de görüldüğü üzere, rüzgâr yönü belirgin şekilde kuzey yönünde yoğunlaşmaktadır. Benzer şekilde 2023 yılı ilkbahar, yaz, sonbahar, kış dönemlerinde de hâkim yönün kuzey olduğu görülmektedir.

Diğer mevsimlerde de bu yönelimin devam ettiği, dolayısıyla çalışma alanında yıl genelinde kuzey yönlü rüzgârların baskın olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu durum, bölgedeki topografik yapı veya yerel basınç sistemleriyle ilişkili olabilir.

Çeşme bölgesine ait 2022–2023 yılları meteorolojik verileri incelendiğinde, rüzgârın ağırlıklı olarak kuzey yönünden estiği görülmüştür. Bu yönlerden esen rüzgârların ortalama hız değerlerinin diğer yönlerle kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Bu durum, bölgenin coğrafi konumu ve topografik özellikleri ile açıklanabilir. Çeşme Yarımadası'nın kuzeyi ve kuzeybatısı açık denizle çevrili olduğundan, bu yönlerden gelen hava akımları sürtünme ve engel etkisinin az olduğu bir rotadan geçer. Bu nedenle rüzgâr hızı bu yönlerde daha yüksek ölçülmektedir.

Buna karşılık, güney ve doğu yönlerinden esen rüzgârlar kara üzerinden geldiği için yüzey pürüzlülüğü, ısı farkları ve türbülans etkileri nedeniyle hız kaybına uğramaktadır. Bu fark, bölgedeki rüzgâr enerjisi potansiyelinin yönsel bağımlılığını göstermektedir.

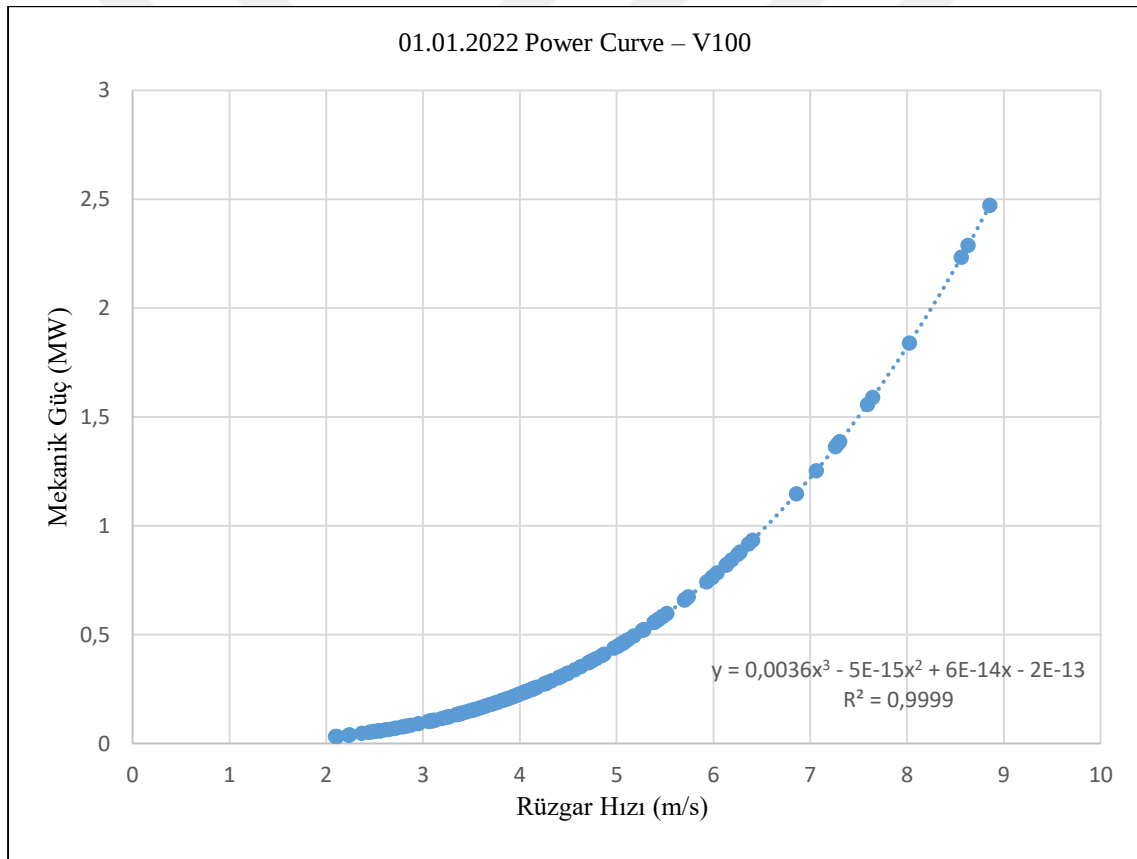
Sonuç olarak, Çeşme bölgesinde rüzgâr yönü ile rüzgâr hızı arasında anlamlı bir ilişki bulunmakta; hakim kuzey yönlü rüzgârlar aynı zamanda en yüksek hız değerlerini üretmektedir. Bu yönün, rüzgâr türbinlerinin konumlandırılması ve rotor yönünün belirlenmesinde öncelikli dikkate alınması gereken yön olduğu söylenebilir.

4.4. Mekanik Güç – Rüzgâr Hızı Güç Eğrisi Analizi

Bu bölümde incelenen Mekanik Güç – Rüzgâr Hızı eğrisi, türbinin farklı rüzgâr hızlarında üretebildiği mekanik gücü nicel olarak ortaya koymaktadır. Güç eğrisi, rüzgâr türbininin performans karakteristiğinin temel göstergelerinden biri olup, türbinin enerji üretim

kapasitesinin belirlenmesinde kritik rol oynamaktadır. Bu çerçevede grafik, cut-in hızından nominal rüzgâr hızına kadar güç artışının, nominal hız sonrası ise güç sınırlamasının nasıl gerçekleştiğini değerlendirmek amacıyla analiz edilmiştir.

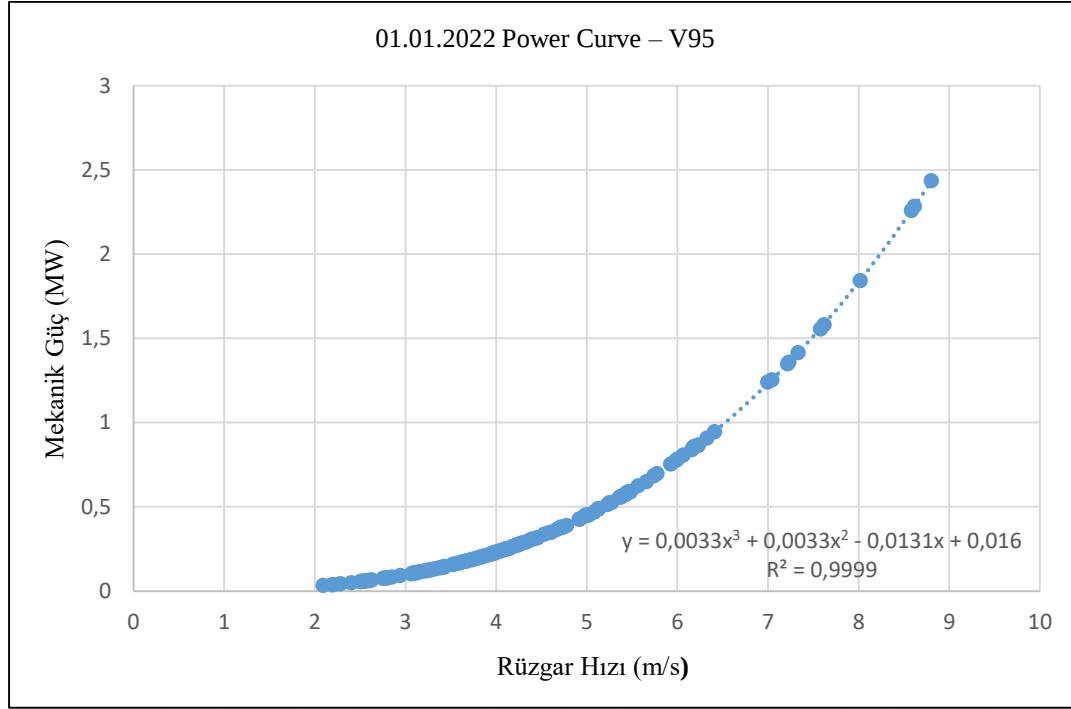
01.01.2022 tarihine ait güç eğrileri incelendiğinde, dört farklı ölçüm yüksekliği (V100, V70, V45 ve V25) için rüzgâr hızı (m/s) ile mekanik güç (MW) arasındaki ilişkinin belirgin biçimde artımlı ve doğrusal olmayan bir karakter sergilediği görülmektedir. Tüm seviyelerde, rüzgâr hızındaki artışa bağlı olarak mekanik gücün üstel (yaklaşık kübik) biçimde yükseldiği tespit edilmiştir. Bu durum, klasik aerodinamik güç yasasına uygun bir eğilim göstermektedir.



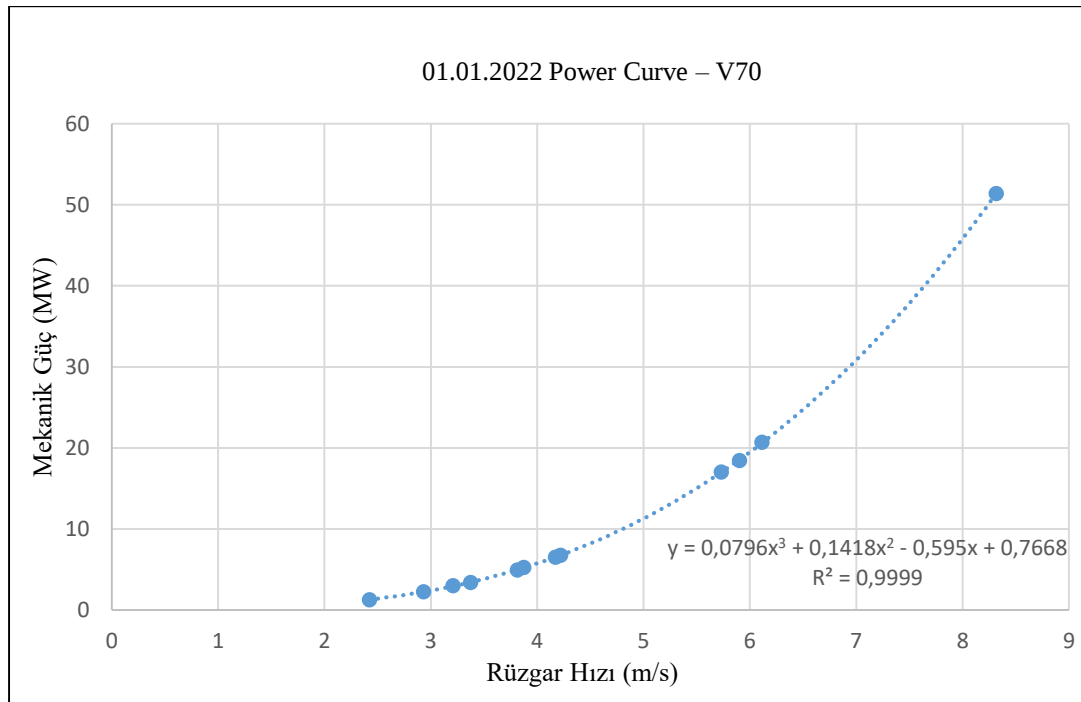
Şekil 4.15. 01.01. 2022 100m için mekanik güç – rüzgâr hızı güç eğrisi

Her bir ölçüm yüksekliği için elde edilen regresyon denklemleri, güç eğrilerinin matematiksel olarak polinomsal biçimde temsil edilebildiğini göstermektedir. Elde edilen R^2 değerlerinin tamamı 0.95 ile 1.00 arasında değişmekte olup, bu da kurulan modellerin yüksek doğrulukla ölçüm verilerini yansıttığını ortaya koymaktadır. Özellikle V100 ($R^2 =$

1.0) ve V70 ($R^2 \approx 0.995$) seviyelerinde bu uyumun mükemmel yakın olduğu görülmektedir. Bu bulgu, yüksek irtifalarda rüzgâr akışının daha kararlı ve türbülans etkilerinden daha az etkilendiğini, dolayısıyla güç üretiminin daha verimli gerçekleştiğini göstermektedir.

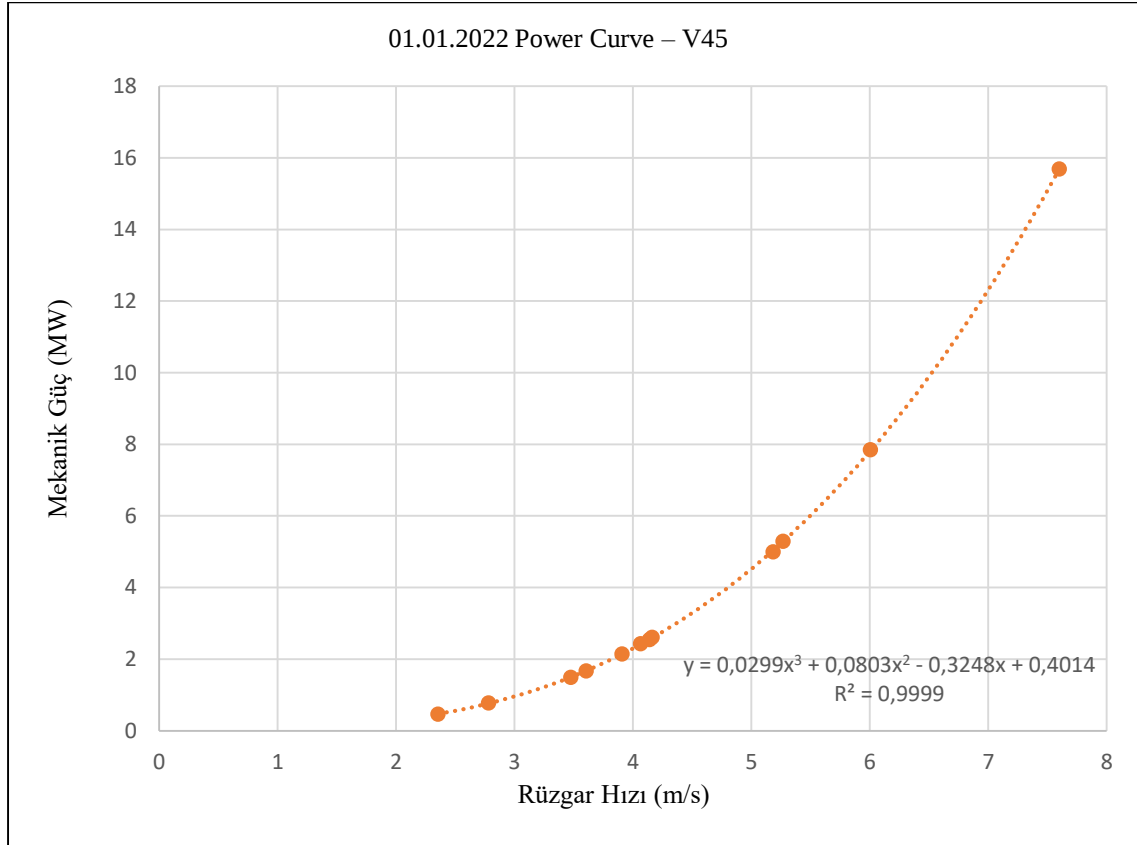


Şekil 4.16. 01.01. 2022 95m için mekanik güç – rüzgâr hızı güç eğrisi



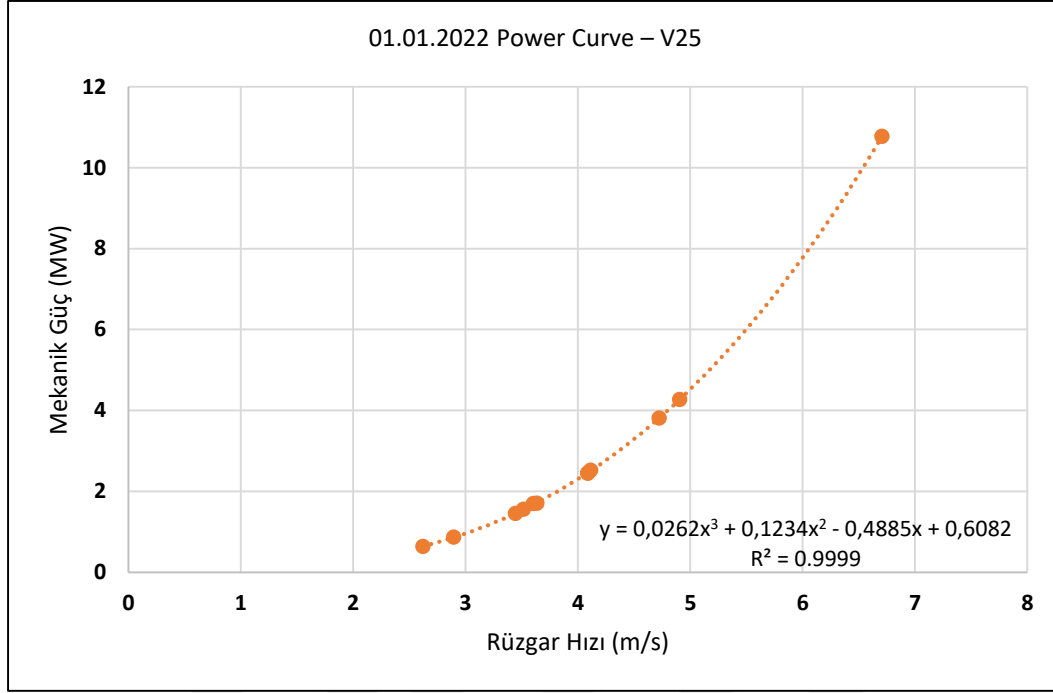
Şekil 4.17. 01.01. 2022 70m için mekanik güç – rüzgâr hızı güç eğrisi

V70, V45 ve V25 seviyelerine ait eğriler karşılaştırıldığında, eğrilerin eğimlerinin giderek azaldığı ve düşük rüzgâr hızlarında (2–4 m/s aralığında) türbinlerin güç üretiminin oldukça sınırlı olduğu görülmektedir. Bu durum, alt seviyelerdeki hava akımlarının yüzey pürüzlülüğü, engeller ve yerel türbülans koşullarından daha fazla etkilenmesinden kaynaklanmaktadır.



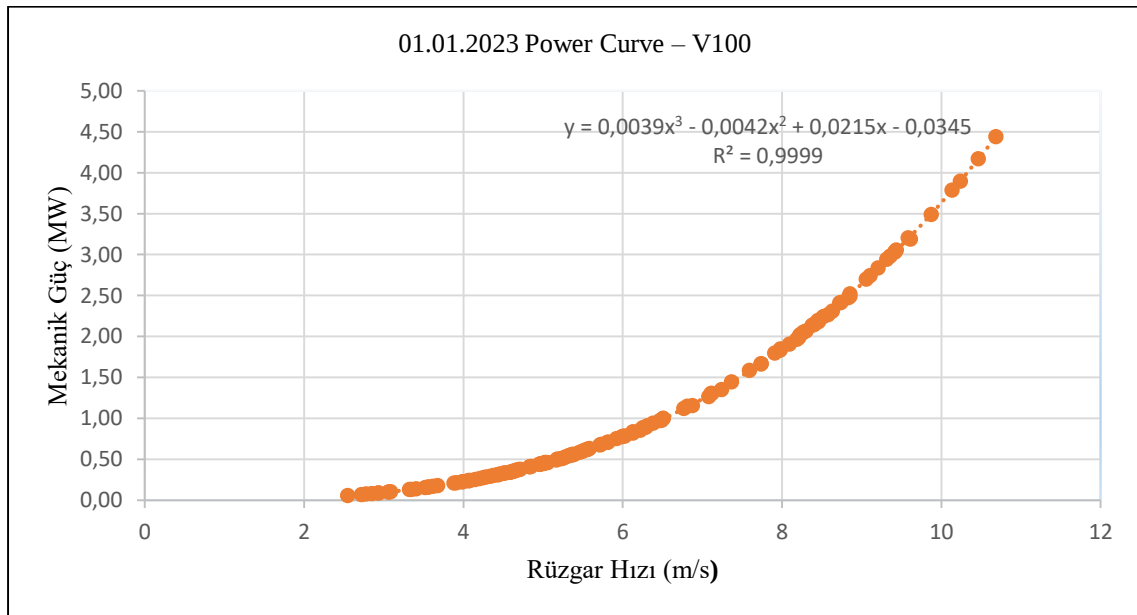
Şekil 4.18. 01.01. 2022 45m için mekanik güç – rüzgâr hızı güç eğrisi

Grafikler arasında belirgin bir yükseklik etkisi de gözlenmektedir. Ölçüm yüksekliği azaldıkça hem ortalama rüzgâr hızı hem de maksimum mekanik güç değerleri azalmaktadır. V100 seviyesinde mekanik güç yaklaşık 3 MW düzeyine ulaşırken, V25 seviyesinde bu değer yaklaşık 10–12 kat daha düşük, yani 0,25–0,3 MW seviyelerindedir. Bu fark, atmosferik sınır tabaka içinde hız profilinin yükseklikle artışı tanımlayan rüzgâr kesme (wind shear) etkisinin tipik bir sonucudur.



Şekil 4.19. 01.01. 2022 25m için mekanik güç – rüzgâr hızı güç eğrisi

Sonuç olarak, 2022 yılına ait güç eğrileri rüzgâr enerjisi potansiyelinin yüksek irtifalarda yoğunlaştığını, alt seviyelerde ise sınırlı güç üretimi ve daha düzensiz akış koşullarının hakim olduğunu göstermektedir. Elde edilen bu eğriler, bölgedeki rüzgâr profilinin yüksekliğe bağlı davranışını açık biçimde ortaya koymakta ve türbin yerleşim yüksekliğinin enerji verimliliği üzerindeki kritik önemini desteklemektedir.

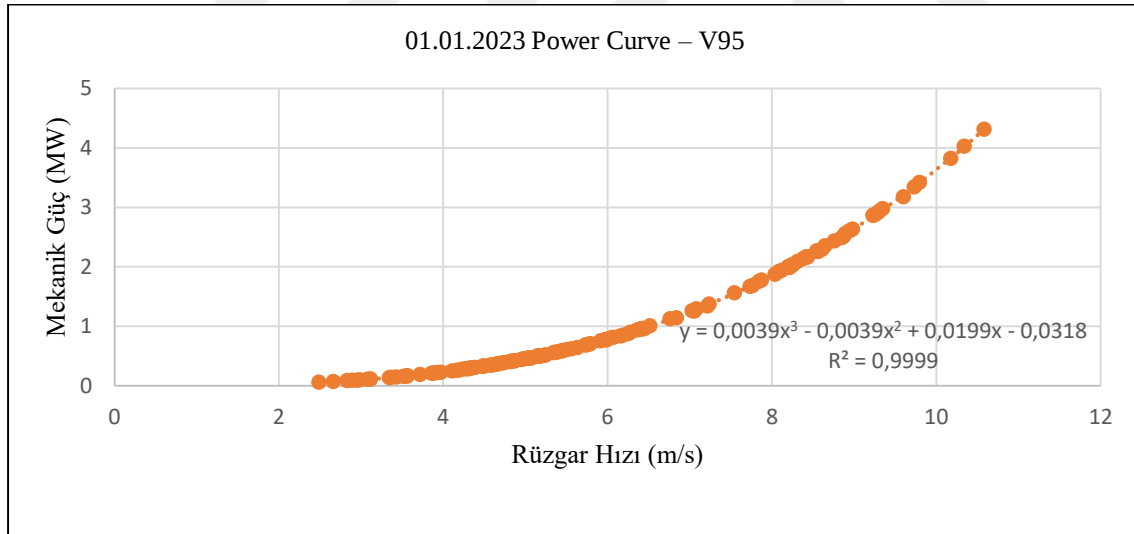


Şekil 4.20. 01.01. 2023 100m için mekanik güç – rüzgâr hızı güç eğrisi

Şekil 4.20’de 01.01.2023 tarihindeki rüzgâr hızı (m/s) ve türbinin mekanik güç üretimi (MW) arasındaki ilişki gösterilmektedir. Ölçülen veriler üzerine uygulanan üçüncü dereceden polinom regresyon modeli, güç üretimi ile rüzgâr hızı arasındaki kuvvetli korelasyonu yansıtmaktadır. Burada x rüzgâr hızını, y ise mekanik gücü temsil etmektedir.

Polinom model, rüzgâr hızındaki artışın mekanik güç üretiminde üstel (kübik) artışa sebep olduğunu göstermekte, bu da rüzgâr enerjisi teorisindeki güç-hız küpü ilişkisinin doğrulanması açısından önemlidir. Özellikle rüzgâr hızlarının 2 m/s ile 9 m/s aralığında artması, mekanik güçte anlamlı bir yükseliş sağlamaktadır. Bu sonuç, türbinin belirlenen hız aralığında verimli çalıştığını ve güç üretim kapasitesinin rüzgâr hızına yüksek derecede bağımlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, uygulanan polinom regresyon modeli, rüzgâr türbin performansının değerlendirilmesi ve enerji üretim tahminlerinde kullanılabilecek sağlam bir araç olarak öne çıkmaktadır.



Şekil 4.21. 01.01. 2023 95m için mekanik güç – rüzgâr hızı güç eğrisi

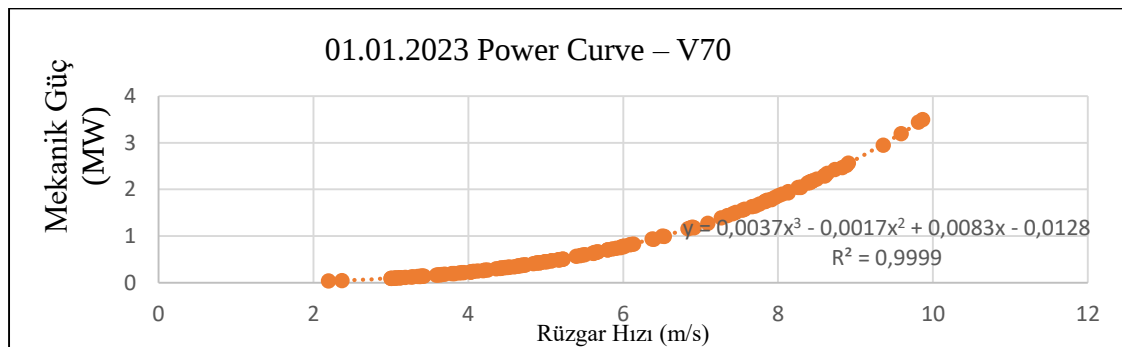
Elde edilen 01.01.2022 ve 01.01.2023 tarihli güç eğrileri, rüzgâr hızı ile mekanik güç arasındaki ilişkinin hem yıllar hem de yükseklikler açısından tutarlı biçimde devam ettiğini göstermektedir. Tüm ölçüm seviyelerinde rüzgâr hızındaki artışa bağlı olarak mekanik gücün polinomsal bir eğilim izlediği ve bu artışın yaklaşık olarak kübik (v^3) davranış sergilediği görülmektedir. Bu durum, klasik aerodinamik güç yasasını doğrulamaktadır.

Her iki yılda da belirlenen R^2 değerlerinin 0.95 ile 1.00 arasında değişmesi, modelin ölçüm verileriyle yüksek düzeyde uyum sağladığını ve elde edilen güç eğrilerinin güvenilir olduğunu göstermektedir. Özellikle V100 ve V70 seviyelerinde $R^2 \approx 1$ olması, bu yüksekliklerdeki rüzgâr akışının daha kararlı ve türbülans etkilerinden daha az etkilendiğini göstermektedir. Bu bulgu, atmosferik sınır tabaka içinde irtifa arttıkça türbülans yoğunluğunun azalması ve rüzgâr profilinin daha düzgün bir şekilde gelişmesiyle açıklanabilir.

Yükseklik arttıkça hem ortalama rüzgâr hızının hem de elde edilen maksimum mekanik güç değerinin yükseldiği görülmektedir. 2022 yılına ait verilerde V100 seviyesinde yaklaşık 3 MW, 2023 yılında ise 4 MW seviyesinde maksimum mekanik güç elde edilmiştir. Alt seviyelerde (özellikle V25 ve V45) güç üretimi belirgin şekilde daha düşük kalmıştır. Bu fark, rüzgâr profilinin logaritmik dağılımı ve yüzey pürüzlülüğünün etkisiyle ilişkilidir.

Yıllar arası karşılaştırma, rüzgâr rejiminde büyük bir değişim olmadığını, ancak 2023 yılında üst seviyelerde rüzgâr hızlarının hafif bir artış gösterdiğini düşündürmektedir. Bu artış, atmosferik kararlılık koşullarındaki farklılıklar ya da mevsimsel sıcaklık gradyanlarından kaynaklanmış olabilir.

Sonuç olarak, analiz edilen dönemlerde rüzgâr enerjisi potansiyelinin yüksek irtifalarda hem daha istikrarlı hem de daha yüksek enerji yoğunluklu olduğu açıkça görülmektedir. Bu durum, rüzgâr türbini yerleşiminde optimum kule yüksekliğinin belirlenmesinde kritik bir faktördür. Elde edilen eğriler, bölgedeki rüzgâr hız profilinin türbin performansı üzerindeki etkisini nicel olarak ortaya koymakta ve ilerleyen bölümlerde yapılacak enerji verimliliği hesaplamaları için güvenilir bir temel sağlamaktadır.

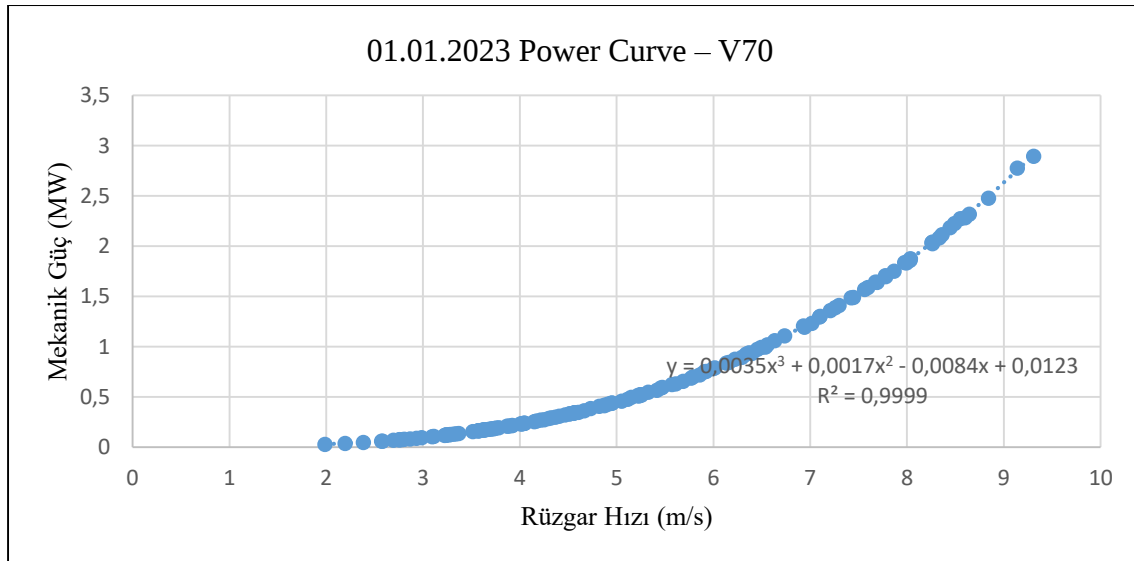


Şekil 4.22. 01.01. 2023 70m için mekanik güç – rüzgâr hızı güç eğrisi

Elde edilen 01.01.2022 ve 01.01.2023 tarihli güç eğrileri, rüzgâr hızı ile mekanik güç arasındaki ilişkinin hem yıllar hem de yükseklikler açısından tutarlı biçimde devam ettiğini göstermektedir. Tüm ölçüm seviyelerinde rüzgâr hızındaki artışa bağlı olarak mekanik gücün polinomsal bir eğilim izlediği ve bu artışın yaklaşık olarak kübik (v^3) davranış sergilediği görülmektedir. Bu durum, klasik aerodinamik güç yasasını doğrulamaktadır.

Her iki yılda da belirlenen R^2 değerlerinin 0.95 ile 1.00 arasında değişmesi, modelin ölçüm verileriyle yüksek düzeyde uyum sağladığını ve elde edilen güç eğrilerinin güvenilir olduğunu göstermektedir. Özellikle V100 ve V70 seviyelerinde $R^2 \approx 1$ olması, bu yüksekliklerdeki rüzgâr akışının daha kararlı ve türbülans etkilerinden daha az etkilendiğini göstermektedir. Bu bulgu, atmosferik sınır tabaka içinde irtifa arttıkça türbülans yoğunluğunun azalması ve rüzgâr profilinin daha düzgün bir şekilde gelişmesiyle açıklanabilir.

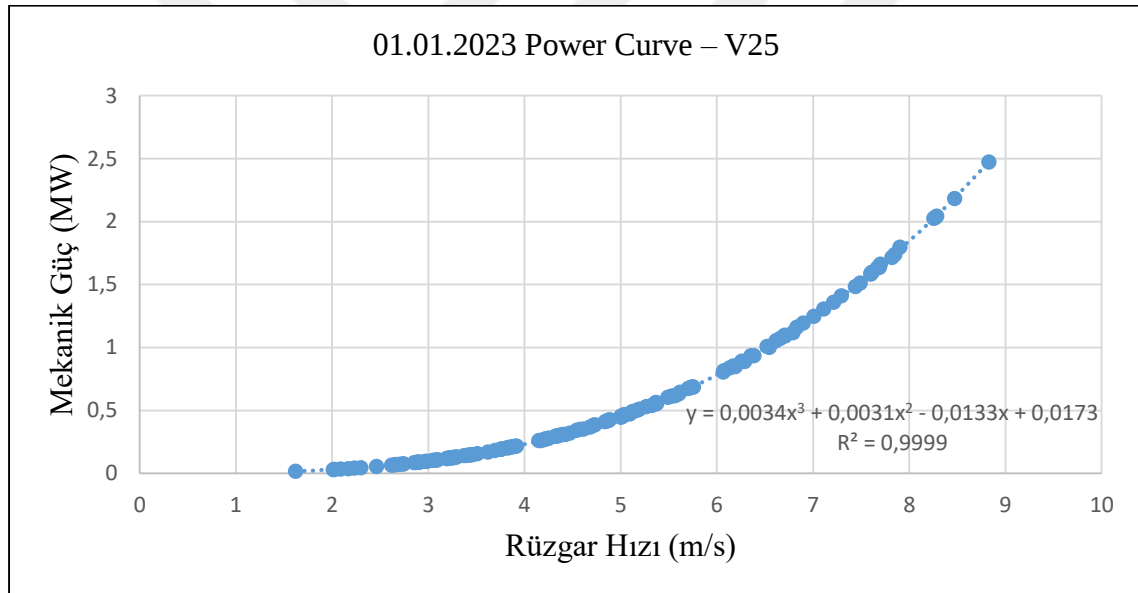
Yükseklik arttıkça hem ortalama rüzgâr hızının hem de elde edilen maksimum mekanik güç değerinin yükseldiği görülmektedir. 2022 yılına ait verilerde V100 seviyesinde yaklaşık 3 MW, 2023 yılında ise 4 MW seviyesinde maksimum mekanik güç elde edilmiştir. Alt seviyelerde (özellikle V25 ve V45) güç üretimi belirgin şekilde daha düşük kalmıştır. Bu fark, rüzgâr profilinin logaritmik dağılımı ve yüzey pürüzlülüğünün etkisiyle ilişkilidir.



Şekil 4.23. 01.01. 2023 45m için mekanik güç – rüzgâr hızı güç eğrisi

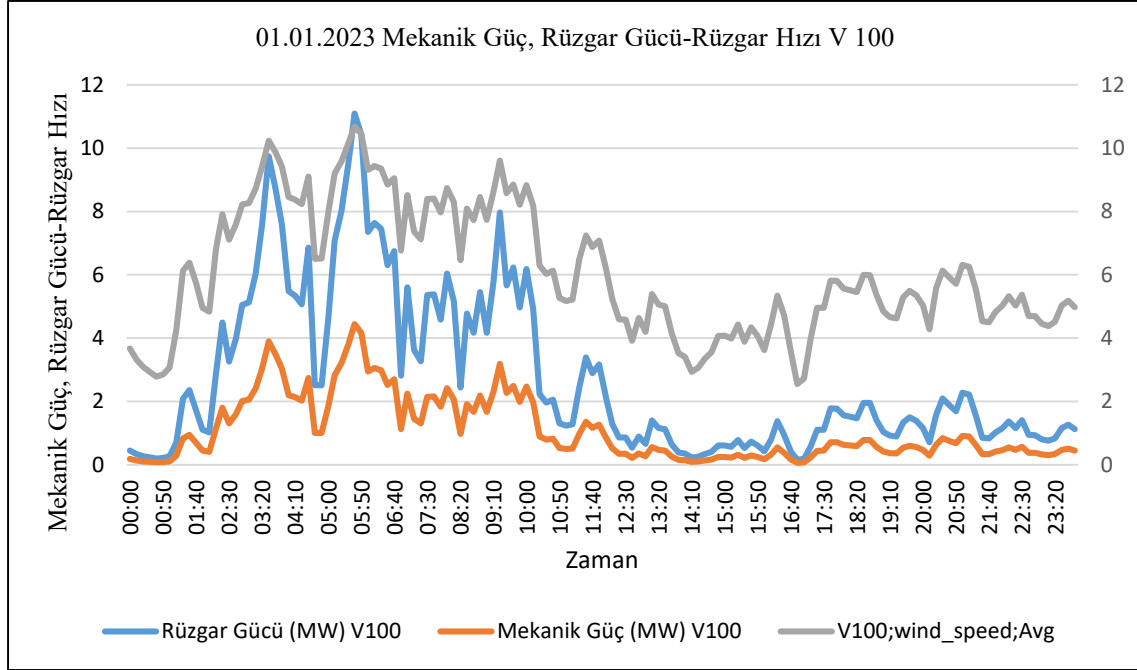
Yıllar arası karşılaştırma, rüzgâr rejiminde büyük bir değişim olmadığını, ancak 2023 yılında üst seviyelerde rüzgâr hızlarının hafif bir artış gösterdiğini düşündürmektedir. Bu artış, atmosferik kararlılık koşullarındaki farklılıklar ya da mevsimsel sıcaklık gradyanlarından kaynaklanmış olabilir.

Sonuç olarak, analiz edilen dönemlerde rüzgâr enerjisi potansiyelinin yüksek irtifalarda hem daha istikrarlı hem de daha yüksek enerji yoğunluklu olduğu açıkça görülmektedir. Bu durum, rüzgâr türbini yerleşiminde optimum kule yüksekliğinin belirlenmesinde kritik bir faktördür. Elde edilen eğriler, bölgedeki rüzgâr hız profiline türbin performansı üzerindeki etkisini nicel olarak ortaya koymakta ve ilerleyen bölümlerde yapılacak enerji verimliliği hesaplamaları için güvenilir bir temel sağlamaktadır.

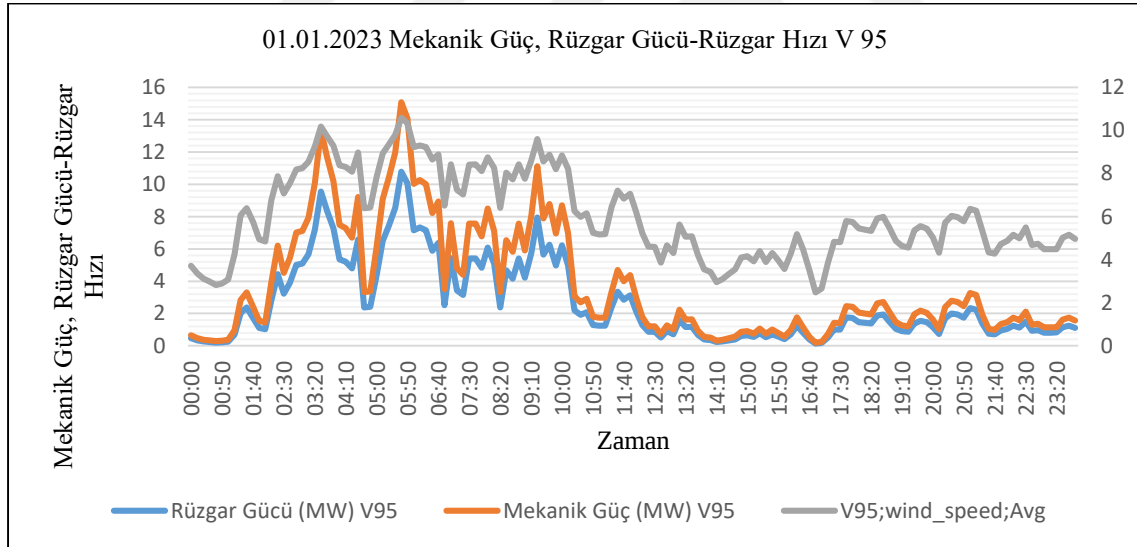


Şekil 4.24. 01.01. 2023 25m için mekanik güç – rüzgâr hızı güç eğrisi

Farklı yüksekliklerde (25 m, 45 m ve 70 m 95m 100m) ölçülen güç eğrileri, rüzgâr hızındaki artışın mekanik güç üretimi üzerindeki belirgin etkisini ortaya koymaktadır. Elde edilen polinom denklemlerin tümünde R^2 değerinin 1 olması, modelin ölçüm verileriyle tam uyum içerisinde olduğunu göstermektedir. Yükseklik arttıkça, özellikle kübik terimin katsayısının büyümesi, rüzgâr hızının artışına bağlı olarak güç üretim kapasitesinin önemli ölçüde yükseldiğini kanıtlamaktadır. Bu durum, rüzgâr türbinlerinin optimum yerleşimi açısından yüksek irtifalı bölgelerin tercih edilmesinin enerji verimliliği açısından daha uygun olacağını göstermektedir.

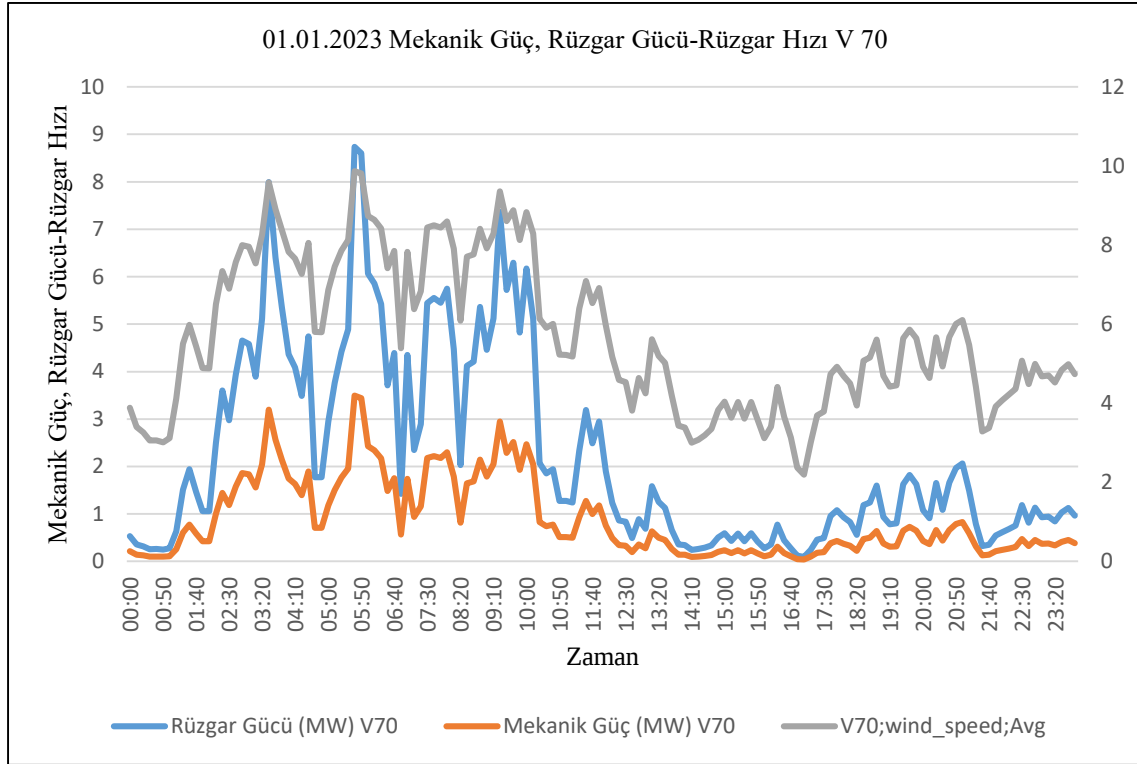


Şekil 4.25. 01.01. 2023 100m için mekanik güç – rüzgâr hızı güç eğrisi



Şekil 4.26. 01.01. 2023 95m için mekanik güç – rüzgâr hızı güç eğrisi

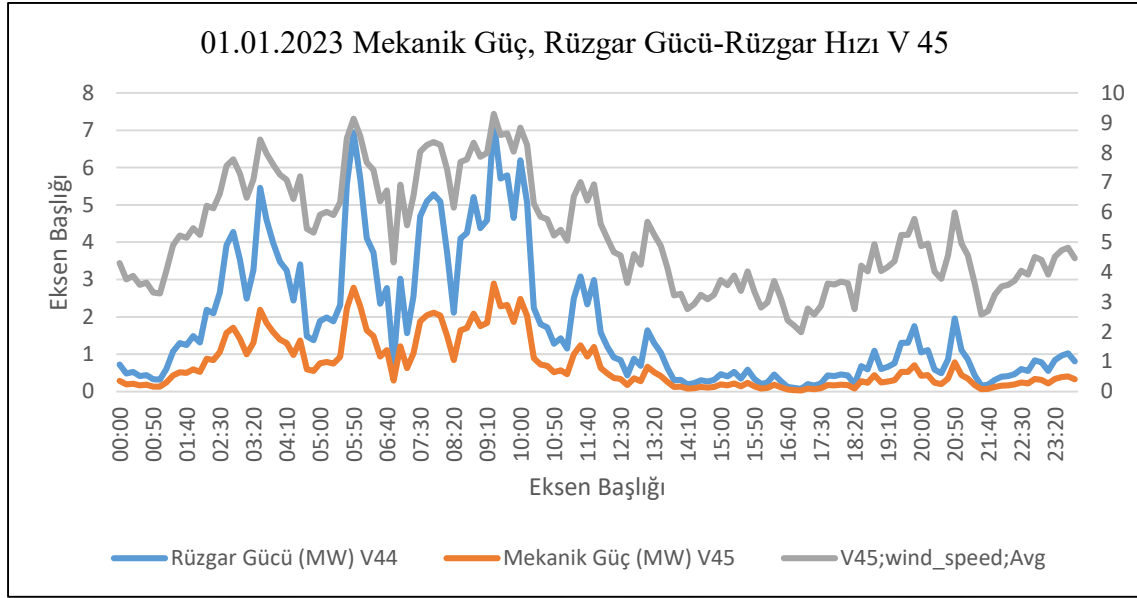
Grafikte görüldüğü üzere, rüzgâr gücü ve buna bağlı olarak mekanik güç ile elektriksel güç çıkışı zamanla paralel bir şekilde değişmektedir. Özellikle rüzgâr gücündeki artışlar mekanik güçte de yükselişe sebep olmaktadır.



Şekil 4.27. 01.01. 2023 70m için mekanik güç – rüzgâr hızı güç eğrisi

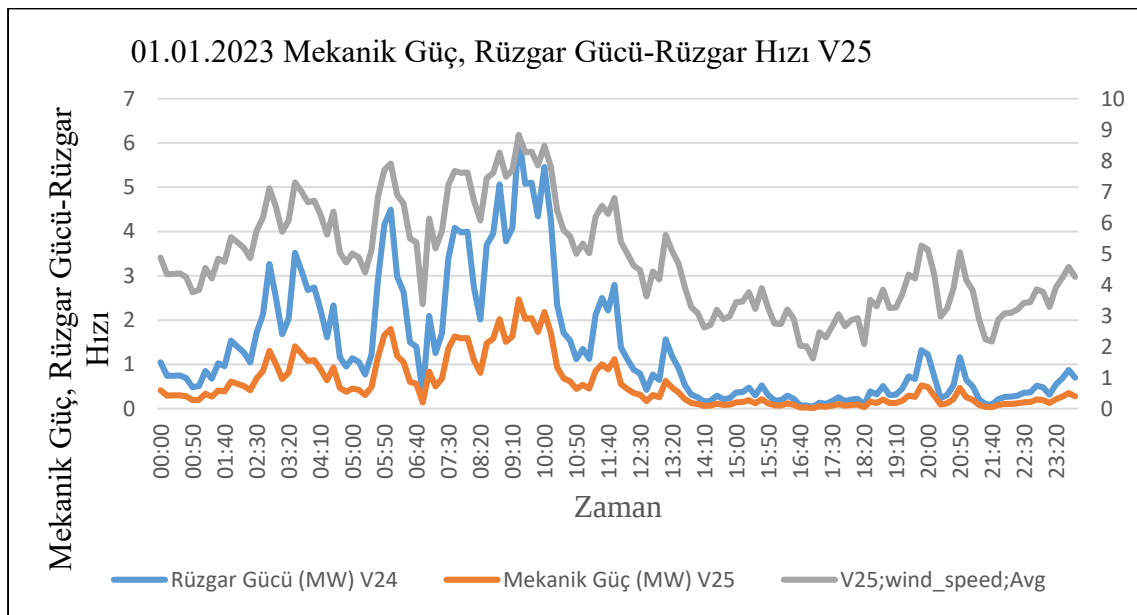
Yukarıdaki çalışmalarda 01.01.2022 tarihindeki farklı yüksekliklerde (25 m, 45 m, 70 m, 95 m ve 100 m) ölçülen rüzgâr hızı ile mekanik güç ve rüzgâr gücü arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Elde edilen grafikler, rüzgâr hızının zamana bağlı değişimi ile mekanik güç ve rüzgâr gücündeki dalgalanmaların paralel seyir izlediğini göstermektedir.

Özellikle 15:00-17:00 saatleri arasında rüzgâr hızında belirgin bir artış gözlemlenmiş, buna bağlı olarak hem mekanik güç hem de rüzgâr gücünde anlamlı yükselişler gerçekleşmiştir. Bu durum, rüzgâr hızındaki artışın mekanik ve elektriksel güç üretimini doğrudan etkilediğini doğrulamaktadır. Ayrıca, farklı yüksekliklerde ölçülen rüzgâr hızlarının büyüklüğüne bağlı olarak mekanik güç ve rüzgâr gücündeki değişimlerin şiddeti ve zamanlamasında küçük farklılıklar gözlenmiştir.



Şekil 4.28. 01.01. 2023 45m için mekanik güç – rüzgâr hızı güç eğrisi

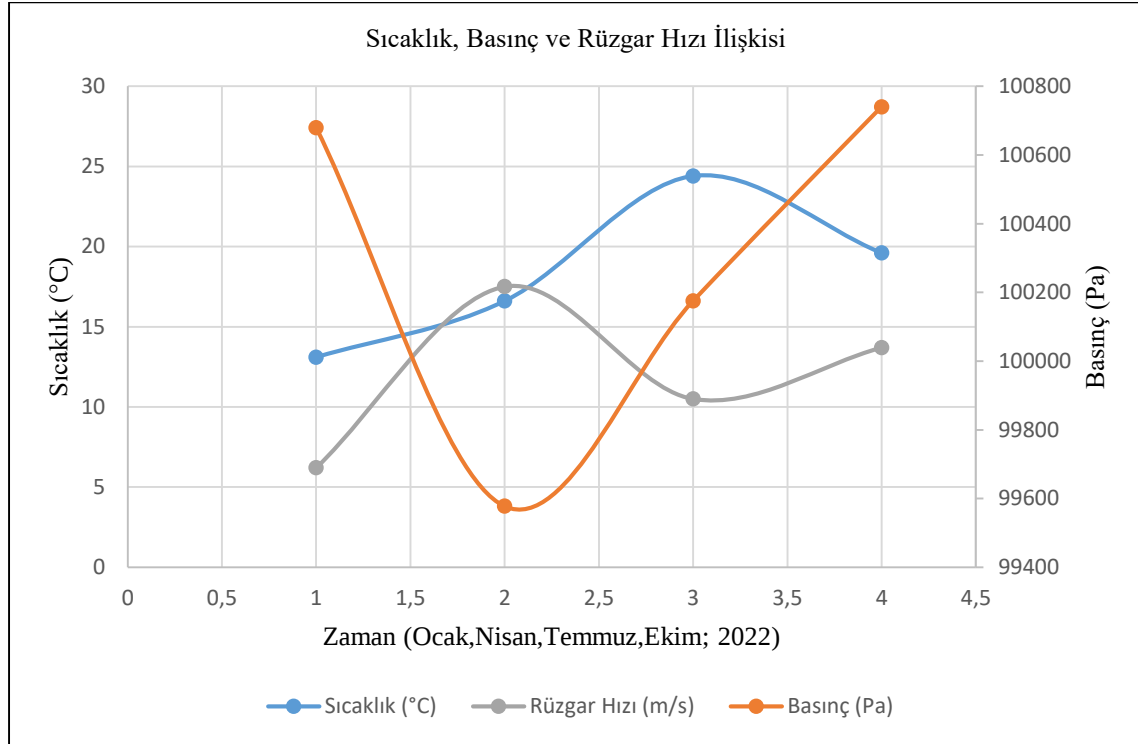
Yükseklik arttıkça rüzgâr hızının ve buna bağlı güç değerlerinin genel olarak yükseldiği ve daha stabil seyrettiği dikkati çekmektedir. Bu da rüzgâr enerjisi santrallerinde rotor yüksekliğinin optimizasyonunun önemini vurgulamaktadır. Ancak, güçteki ani dalgalanmalar ve rüzgâr hızındaki değişkenlik, enerji üretiminde dalgalanmalara sebep olabileceği için, sistemlerin bu değişkenliği dengeleyebilecek şekilde tasarlanması gerektiği ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4.29. 01.01. 2023 45m için mekanik güç – rüzgâr hızı güç eğrisi

Sonuç olarak, elde edilen veriler rüzgâr enerjisi üretiminin doğrudan rüzgâr hızına bağlı olduğunu göstermekte, ayrıca yükseklik faktörünün rüzgâr enerjisinin verimliliği üzerinde belirleyici rol oynadığı sonucuna varılmıştır.

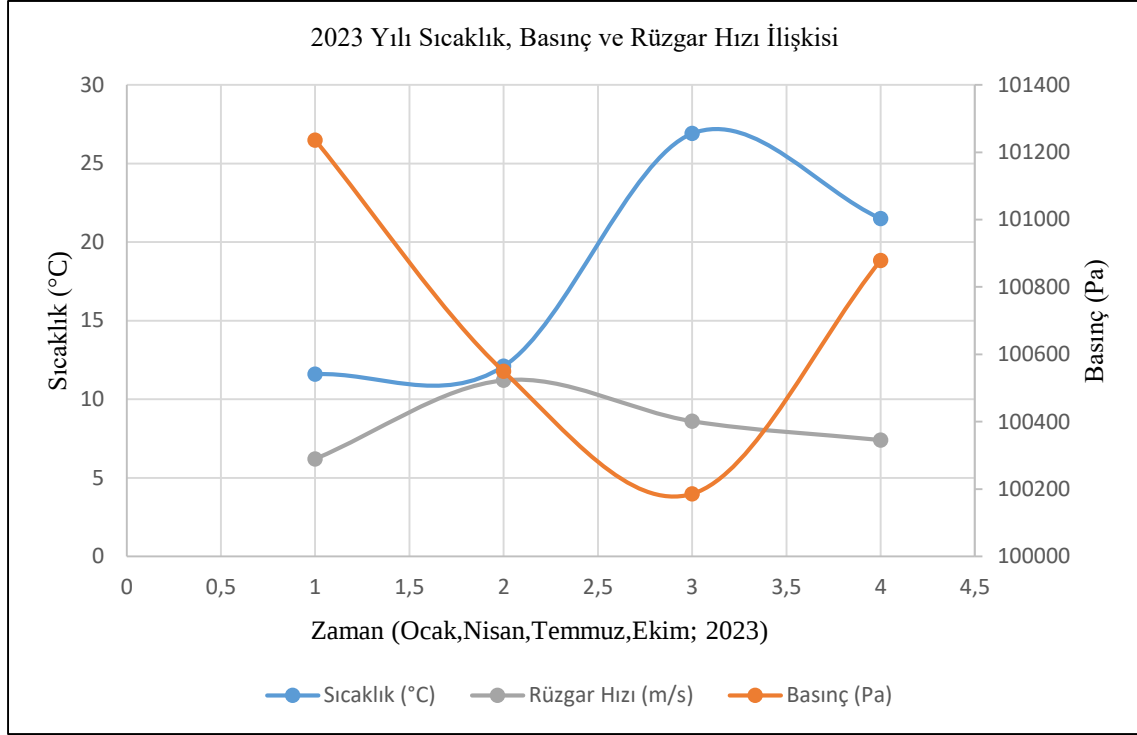
4.5. Sıcaklık, Basınç-Rüzgar Hızı İlişkisi



Şekil 4.30. Sıcaklık, basınç ve rüzgar hızı ilişkisi (Ocak, Nisan, Temmuz, Ekim 2022)

Şekil 4.30'da, yılın farklı aylarında ölçülen sıcaklık (°C), hava basıncı (Pa) ve rüzgâr hızı (m/s) değerlerinin zamana bağlı değişimi gösterilmektedir. Sıcaklık verisi, Ocak ayından itibaren artış eğilimi göstermekte olup Temmuz ayında maksimum seviyeye ulaşmıştır; ardından Ekim ayında hafif bir azalma gözlemlenmektedir. Basınç değerleri ise Ocak ayında en yüksek seviyede başlayıp Nisan ayında önemli bir düşüş sergilemiş, Temmuz ve Ekim aylarında tekrar yükselmiştir. Rüzgâr hızı ise nispeten daha stabil seyretmekle birlikte Nisan ayında artış göstermiş, Temmuz ayında azalarak Ekim ayında hafifçe yükselmiştir.

Bu değişimler, mevsimsel iklim koşullarına bağlı olarak atmosferik parametrelerin dinamiklerini yansıtmaktadır.



Şekil 4.31. Sıcaklık, basınç ve rüzgar hızı ilişkisi (Ocak, Nisan, Temmuz, Ekim 2023)

Şekil 4.30'da 2022 yılı için Çeşme bölgesine ait sıcaklık (°C), basınç (Pa) ve rüzgâr hızı (m/s) değerlerinin zamana (Ocak, Nisan, Temmuz, Ekim) göre değişimi gösterilmiştir. Veriler incelendiğinde sıcaklık değerlerinin yılın ilk aylarından yaz dönemine doğru belirgin şekilde arttığı, sonbahar döneminde ise yeniden düşüş eğilimi gösterdiği gözlenmektedir. Bu durum, bölgenin Akdeniz iklimi özellikleriyle uyumlu bir mevsimsel değişimdir.

Rüzgar hızları incelendiğinde, yıl içinde en yüksek değerlerin ilkbahar ve yaz aylarında, en düşük değerlerin ise kış ve sonbahar dönemlerinde gerçekleştiği görülmektedir. Bu eğilim, Çeşme'nin coğrafi konumu gereği özellikle yaz aylarında deniz–kara meltemlerinin etkisiyle artan rüzgâr hızlarını işaret etmektedir. Ortalama rüzgâr hızının 6–8 m/s civarında seyrettiği bu dönemler, bölgenin rüzgâr enerjisi üretimi açısından en verimli zaman aralığını temsil etmektedir.

Basınç değerleri ile rüzgâr hızı arasında ters yönlü bir ilişki gözlenmektedir. Özellikle basıncın en düşük olduğu Temmuz ayında rüzgâr hızının görece yüksek olduğu, basıncın yükseldiği dönemlerde ise rüzgâr hızının azaldığı tespit edilmiştir. Bu durum, rüzgârın temel oluşum mekanizması olan basınç gradyanlarıyla uyumludur; basınç farkı arttıkça hava akımları hızlanmakta ve rüzgâr hızı artmaktadır.

Analiz edilen veriler, rüzgâr hızının tekil atmosferik basınç değerlerinden ziyade iki nokta arasındaki basınç farkının büyüklüğü ile ilişkili olduğunu göstermektedir. Bu durum, meteoroloji literatüründe rüzgârın hızını belirleyen temel etkenin basınç gradyanı olduğu yönündeki yaklaşımla uyumludur. Çalışmada elde edilen bulgular, basınç gradyanı arttıkça rüzgâr hızının da yükseldiğini ortaya koyarak, kuramsal açıklamalarla paralellik göstermektedir. Nitekim literatürde yer alan genel kabul, aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

Atmosferik basınç ile rüzgâr hızı arasında doğrudan bir ters orantı bulunmamakta olup, rüzgâr hızını belirleyen temel unsur iki nokta arasındaki basınç gradyanının büyüklüğüdür. Rüzgâr, yüksek basınç alanlarından alçak basınç alanlarına doğru yönelmekle birlikte, hızındaki artış veya azalış tek bir bölgedeki mutlak basınç değerine değil, söz konusu bölgeler arasındaki basınç farkının şiddetine bağlıdır. Basınç gradyanının yüksek olduğu durumlarda rüzgâr hızı artmakta, gradyanın zayıf olduğu koşullarda ise rüzgâr daha düşük hızlarda seyretmektedir. Bu nedenle atmosferik basınç ile rüzgâr hızı arasındaki ilişki, basınç farkının oluşturduğu dinamik kuvvetlerin sonucunda ortaya çıkan bir etkileşim olarak değerlendirilmelidir [73].

4.6. Rüzgâr Türbini Seçeneklerinin Teknik Karşılaştırması

Bu bölümde çalışma sahasının rüzgâr rejimi (6–15 m/s aralığında yoğunlaşan hız dağılımı) dikkate alınarak yerli üretim rüzgâr türbini ile uluslararası üreticilerin aynı güç sınıfındaki türbinleri teknik parametreler açısından karşılaştırılmıştır.

IEC 61400 standardına göre türbin sınıfları incelendiğinde, çalışma alanının:

- Orta-yüksek rüzgâr rejimine
- Rated hızlara sık ulaşan bir yapıya sahip olmasına
- Cut-out hızlarının düşük frekansta görülmesine

Bağlı olarak IEC Sınıf II türbinlerle uyumluluk gösterdiği değerlendirilmektedir.

Saha verileri, türbin seçimi açısından hem rüzgâr yükleri hem de yıllık ortalama hızlar bakımından Sınıf II kategorisinin tercih edilmesini desteklemektedir. Bununla birlikte Sınıf

III türbinlerin de düşük hız dönemleri nedeniyle alternatif olarak değerlendirilebileceği belirtilmelidir.

Tipik bir IEC Sınıf II türbin için çalışma hızları:

- Cut-in: 3–4 m/s
- Rated: 11–13 m/s
- Cut-out: 20–25 m/s

Sahadaki rüzgâr dağılımı bu hızlarla yüksek uyum göstermektedir:

- Ocak ve temmuz aylarında rüzgâr, cut-in hızının oldukça üzerinde uzun süre kalmaktadır.
- Nisan ve ekim aylarında dağılım rated hız aralığına sıkça ulaşmaktadır.
- 20 m/s üzeri değerler düşük frekansta gözlemlendiğinden türbin duruşları sınırlı olacaktır.

Bu bağlamda, çalışma sahası enerji üretimi bakımından verimli bir rüzgâr rejimine sahiptir.

Yerli rüzgâr türbini 4,3 MW anma gücü, 136–147 m rotor çapı ve 3–25 m/s çalışma aralığı ile orta–yüksek rüzgâr sınıfları için optimize edilmiş bir tasarım sunmaktadır. Geniş süpürme alanı, özellikle 6–12 m/s bandında sık tekrarlanan hızların hâkim olduğu sahalarda enerji yakalama kapasitesini artırmaktadır. Ayrıca türbinin %65'in üzerinde yerlilik oranı, yerli tedarik zincirinin etkinliği, bakım-onarım süreçlerinde erişilebilirlik ve işletme maliyetlerinin düşürülmesi açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır. Tam ölçekli güç dönüştürücüsü ve gelişmiş SCADA/denetim altyapısı, türbinin şebeke uyumu ve kontrol kararlılığı açısından olumlu teknik özellikler sunmaktadır.

Yabancı üreticilerin karşılaştırılan türbinleri ise geniş uluslararası saha tecrübesi, uzun yıllara dayanan performans verileri ve yüksek güvenilirlikleriyle öne çıkmaktadır. Bu türbinler genellikle daha oturmuş güç eğrilerine, farklı rüzgâr sınıfları için kapsamlı sertifikasyonlara ve uzun dönem işletme verilerine sahiptir. Ayrıca bazı modellerde doğrudan tahrik (gearless) veya düşük bakım gerektiren hibrit güç aktarım sistemleri bulunmakta, bu da uzun dönem işletme sürekliliği açısından avantaj sunabilmektedir. Bununla birlikte, ithal türbinlerin tedarik ve bakım maliyetleri yerli türbine kıyasla daha yüksektir ve yedek parça temin süreleri daha uzun olabilmektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, yerli rüzgâr türbini çalışma sahasının rüzgâr hız profilini teknik açıdan karşılayabilecek kapasitede olup, yüksek yerlilik oranı sayesinde yatırım ve işletme maliyetleri açısından stratejik bir avantaj sunmaktadır. Yabancı türbin modelleri ise daha geniş bir küresel kullanım geçmişine ve performans güvencesine sahip olmakla birlikte tedarik ve bakım maliyetleri bakımından dezavantajlı olabilmektedir. Bu nedenle, saha rüzgâr karakteristiği, işletme stratejisi ve ekonomik parametreler bir arada değerlendirildiğinde, yerli türbin seçeneği teknik ve ekonomik açıdan güçlü bir alternatif olarak öne çıkmaktadır.

Çizelge 4.2. Alaçatı Rüzgâr Enerji Santrali için yenileme (repowering) öncesi ve sonrası teknik ve enerji üretim performanslarının karşılaştırılması

Parametre	Yenileme Öncesi (Mevcut Durum)	Yenileme Sonrası (Önerilen Senaryo)
Türbin sayısı	12	2
Türbin teknolojisi	Eski nesil, ithal	Yeni nesil, yerli
Birim türbin gücü (MW)	$\approx 0,6$	4,3
Toplam kurulu güç (MW)	$\approx 7,2$	8,6
Ortalama rüzgâr hızı (m/s)	–	12 (varsayım)
Kapasite faktörü	Düşük ($\approx 0.10-0.15$)	0.40
Yıllık elektrik üretimi (GWh/yıl)	$\approx 3,5$	$\approx 30,1$
Üretim kaybı nedenleri	Yaşlanma, düşük verim, bakım sorunları	–
Teknolojik yeterlilik	Yetersiz	Yüksek
Yerlilik oranı	Düşük	%65 – %80

Çizelge 4.2.’de sunulan karşılaştırma, Alaçatı RES’in mevcut durumu ile önerilen yenileme senaryosu arasındaki farkı açık bir şekilde ortaya koymaktadır. Yenileme öncesinde, santralde yer alan eski nesil ve düşük kapasiteli türbinler nedeniyle yıllık elektrik üretimi yaklaşık 3.5 GWh seviyelerinde kalmaktadır. Buna karşılık, yenileme sonrasında daha az sayıda ancak daha yüksek kapasiteli ve teknolojik olarak gelişmiş yerli rüzgâr türbinlerinin kullanılmasıyla, kapasite faktörünün önemli ölçüde artacağı ve yıllık elektrik üretiminin yaklaşık 30.1 GWh seviyesine ulaşabileceği hesaplanmıştır. Yerli türbini, çalışma sahasının rüzgâr profiline teknik olarak uygun kapasite ve rotor alanı sunmakta, yüksek yerlilik oranı sayesinde bakım ve işletme maliyetlerini azaltmaktadır. Yabancı türbin modelleri ise daha geniş saha verisi ve uzun dönem güvenilirlik avantajına sahip olmakla birlikte tedarik ve bakım açısından yerli türbine göre dezavantajlıdır. Bu karşılaştırma, saha rüzgâr karakteristiği ve ekonomik parametreler dikkate alındığında yerli rüzgâr türbininin teknik ve ekonomik açıdan güçlü bir alternatif olduğunu göstermektedir.

4.7. Öneriler

Geleneksel enerji üretim yöntemlerinin çevresel sorunlara yol açması, ülkeleri çevre dostu, sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji portföyündeki payını artırmaya yöneltmiştir. Ayrıca, petrol, kömür ve doğal gaz gibi birincil fosil yakıtların tükenebilir olması, küresel ölçekte yenilenebilir enerjiye geçişin zorunluluğunu pekiştirmektedir. Günümüzde küresel enerji üretiminin yaklaşık %81'inin hâlâ fosil kaynaklara dayandığı dikkate alındığında, alternatif enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaştırılması gerekliliği daha net biçimde ortaya çıkmaktadır. Bu bağlamda, hızla büyüyen ekonomisi ve artan enerji talebiyle Türkiye açısından da yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimin stratejik bir önem taşıdığı söylenebilir [96].

Ülkemizde ekim 2025 sonu itibariyle rüzgâr enerjisi kurulu gücü yaklaşık 14.152 MW büyüklüğündedir[97]. Tez konusu alanında incelenen rüzgâr enerji potansiyeline bakıldığında rüzgâr enerjisinin olabildiğince büyük bir kısmının elektrik enerjisine dönüştürülmesi istenmektedir. Böylece birim zamanda üretilen enerji miktarının artırılması amaçlanmaktadır. Türkiye, 2030 yılına kadar yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam elektrik üretimindeki payını artırmayı hedeflemektedir ve bu doğrultuda, yerli rüzgâr türbini üretimi ve teknolojik gelişmeler büyük önem taşımaktadır. Alaçatı RES'te gerçekleştirilen yenileme projesi, bu hedeflere ulaşmada önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir. Türkiye'nin ilk rüzgâr enerji santrali olan Alaçatı RES, yüksek enerji üretimi kapasiteye sahip olmasına rağmen, son yıllarda üretim miktarında büyük oranda düşüş yaşanmıştır. Bu düşüşün temel nedenleri; türbinlerin yaşlı olması, düşük verim ve teknolojik yetersizliklerdir.

Türkiye'nin ilk rüzgâr enerji santrali olma özelliğini taşıyan Alaçatı Rüzgâr Enerji Santrali (RES), ilk kurulumunda yaklaşık 19 GWh/yıl brüt elektrik üretim kapasitesine sahip olmasına rağmen, santralde yer alan türbinlerin ekonomik ve teknik ömürlerini doldurması, artan bakım-onarım gereksinimleri, düşük verimlilik ve teknolojik yetersizlikler nedeniyle son yıllarda yıllık elektrik üretimi yaklaşık 3.5 GWh seviyelerine kadar gerilemiştir.

Bu çalışma kapsamında değerlendirilen yenileme (repowering) senaryosunda, her biri 4.3 MW gücünde iki adet yeni nesil yerli rüzgâr türbininin devreye alınması öngörülmüştür. Türbinlerin sayısı belirlenirken, proje sahasının bağlantı güç limiti güç limiti dikkate

alınmıştır. Toplam kurulu gücü 8.6 MW olan bu sistem için kapasite faktörü 0,40 olarak kabul edilmiş ve saha için ortalama rüzgâr hızları gözetilerek yıllık elektrik enerjisi üretimi yaklaşık 30.1 GWh/yıl olarak hesaplanmıştır.

Elde edilen sonuçlar, yenileme projesi ile Alaçatı RES'in mevcut üretim seviyesine kıyasla yaklaşık sekiz katın üzerinde bir üretim artışı potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, hesaplanan bu üretim değeri, santralin ilk kurulumundaki brüt üretim kapasitesinin de önemli ölçüde üzerine çıkıldığını ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, söz konusu yenileme uygulaması yalnızca enerji üretim miktarının artırılması açısından değil, aynı zamanda yerli rüzgâr türbini teknolojilerinin sahada uygulanabilirliğinin gösterilmesi bakımından da stratejik bir önem taşımaktadır.

Proje sonunda, yüksek güçteki yerli türbinlerin imalatı sağlanacak ve bu alandaki yurt dışına bağımlılık azaltılacak. Yerli türbinlerle birlikte yenilenebilir enerjilerden elde edilen elektrik üretiminin payının daha da artırılması, rüzgâr türbini imalatı ekosisteminin oluşturulması, istihdama katkıda bulunulması, yüksek bakım maliyetlerinin azaltılması da hedefler arasındadır.

Alaçatı RES Yerli Rüzgâr Türbinleri Yenileme Projesi kapsamında, her biri 4.3 MW gücündeki iki yerli rüzgâr türbininin 2025'te devreye alınması planlanmaktadır. Bu türbinler, mevcut toplam 7.2 MW gücündeki eski ünitelerin yerine daha yüksek verim ve yerli teknoloji ile ikame edilerek, rüzgâr enerjisi üretim kapasitesinin ve teknolojik bağımsızlığın artırılmasına yönelik stratejik bir adım teşkil etmektedir.

Alaçatı RES'te yürütülen yenileme çalışmaları, Türkiye'nin yenilenebilir enerji hedefleri ve yerli üretim stratejileri açısından büyük bir öneme sahip. Bu proje, enerji sektöründe yerli teknolojilerin kullanımını artırarak, ülkenin enerji bağımsızlığına katkı sağlayacaktır.

Bu hedefler doğrultusunda rüzgâr enerji potansiyeli belirlemek maksadıyla Çeşme/ Alaçatı bölgesinde rüzgâr ölçüm direğinden alınan iki yıla ait veri setinin karşılaştırmalı analizi sonucunda, Çeşme bölgesinde 2022 yılı boyunca rüzgâr hızlarının mevsimsel olarak değişkenlik gösterdiği, özellikle ilkbahar ve yaz aylarında rüzgâr enerjisi potansiyelinin arttığı belirlenmiştir. Basınç değişimleri ile rüzgâr hızı arasında güçlü bir ters ilişki tespit edilmiş, düşük basınç koşullarının rüzgâr hızlarını artırdığı gözlenmiştir.

Elde edilen bulgular, çalışma sahasında rüzgâr hızlarının güçlü bir mevsimsel değişkenlik gösterdiğini ve bu değişkenliğin enerji potansiyeli değerlendirmelerinde mutlaka dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. Özellikle ilkbahar döneminde yüksek rüzgâr hızlarının gözlenmesi, bölgenin rüzgâr enerjisi üretimi açısından uygun bir karaktere sahip olduğunu göstermektedir. Buna karşılık yaz döneminde yıllar arasında önemli farklılıkların ortaya çıkması, uzun süreli ölçümlerin enerji üretimi tahminleri açısından kritik olduğunu doğrulamaktadır.

Ayrıca, sıcaklık artışına paralel olarak rüzgâr hızının da artması, bölgenin termal kaynaklı rüzgâr oluşumuna (meltem etkisine) oldukça elverişli olduğunu göstermektedir. Bu bulgular, Çeşme'nin rüzgâr enerjisi yatırımları açısından sürdürülebilir ve yüksek potansiyele sahip bir bölge olduğunu desteklemektedir.

Yapılan analizler Çeşme Alaçatı bölgesinde yılın belirli dönemlerinde rüzgâr hızlarının enerji üretimi için kritik eşiğin üzerinde seyrettiğini, dolayısıyla bu dönemlerin türbin performansı ve enerji verimliliği açısından en uygun zaman aralıklarını oluşturduğunu ortaya koymuştur.

Türkiye, 2030 yılına kadar yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam elektrik üretimindeki payını artırmayı hedeflemektedir ve bu doğrultuda, yerli rüzgâr türbini üretimi ve teknolojik gelişmeler büyük önem taşımaktadır. Alaçatı RES'te gerçekleştirilen yenileme projesi, bu hedeflere ulaşmada önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir. Dışa bağımlı olunan türbin, jeneratör ve kontrol sistemlerinin elektrik üretim santralleri için hayati önem taşıdığı bir dönemde yerli ve millî imkânlarla bu ekipmanların üretilmesi amacıyla çalışmalar yürütülmektedir.

Proje sonunda, yüksek güçteki yerli türbinlerin imalatı sağlanacak ve bu alandaki yurt dışına bağımlılık azaltılacak. Yerli türbinlerle birlikte yenilenebilir enerjilerden elde edilen elektrik üretiminin payının daha da artırılması, rüzgâr türbini imalatı ekosisteminin oluşturulması, istihdama katkıda bulunulması, yüksek bakım maliyetlerinin azaltılması da hedefler arasındadır.

Alaçatı RES’te yürütülen yenileme çalışmaları, Türkiye’nin yenilenebilir enerji hedefleri ve yerli üretim stratejileri açısından büyük bir öneme sahip. Bu proje, enerji sektöründe yerli teknolojilerin kullanımını artırarak, ülkenin enerji bağımsızlığına katkı sağlayacaktır.





KAYNAKLAR

1. Ishaq, H., Dincer, I., Crawford, C. (2022). A review on hydrogen production and utilization: Challenges and opportunities. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(62), 26238-26264.
2. Ellabban, O., Abu-Rub, H., Blaabjerg, F. (2014). Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 748-764.
3. Kaygusuz, K. (2009). Temiz ve sürdürülebilir bir enerji geleceği için rüzgâr enerjisi. *Enerji Dergisi*, 4(1), 122-133.
4. İlkiliç, C. (2012). Rüzgar enerjisi ve Türkiye'deki rüzgâr enerjisi potansiyelinin değerlendirilmesi. *Yenilenebilir ve Sürdürülebilir Enerji İncelemeleri*, 16(2), 1165-1173.
5. İslam, M.R., Mekhilef, S., Saidur, R. (2013). Progress and recent trends of wind energy technology. *Renewable and Sustainable. Energy Reviews*, 21, 456-468.
6. Özlü, S., Dinçer, İ. (2015). Güneş ve rüzgâr enerjisine dayalı çok üretimli bir sistemin geliştirilmesi ve analizi. *Güneş Enerjisi*, 122, 1279-1295.
7. Eriksson, S., Bernhoff, H., Leijon, M. (2008). Evaluation of different turbine concepts for wind power. *Renewable and Sustainable. Energy Reviews*, 12(5), 1419-1434.
8. Öztürk, M., Çalışır, O., Genç, G. (2021). Energy, exergy and economic (3E) evaluation of the photovoltaic/thermal collector-assisted heat pump domestic water heating system for different climatic regions in Turkey. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 145, 1431-1443.
9. Gökçek, M., Bayülken, A., Bekdemir, Ş. (2007). Investigation of wind characteristics and wind energy potential in Kırklareli, Turkey. *Renewable Energy*, 32(10), 1739-1752.
10. Kılıç, B. (2019). Determination of wind dissipation maps and wind energy potential in Burdur province of Turkey using geographic information system (GIS). *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 36, 100555.
11. Emeksiz, C., Demirci, B. (2019). Yenilikçi hibrit saha seçimi yöntemi kullanılarak Türkiye'nin açık deniz rüzgâr enerjisi potansiyelinin belirlenmesi. *Sürdürülebilir Enerji Teknolojileri ve Değerlendirmeleri*, 36, 100562.
12. Oral, F., Behçet, R. (2019). Rüzgar verilerinin enerji üretimi amaçlı değerlendirilmesi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 4(2), 18-43.
13. Chobadi, L.M. (2017). Israel's practical transition plan to 100% all-sector clean renewable. *Energy Reviews*. 20(3), 50-77.

14. Yang, Z., Dong, S. (2024). A semi-parametric trivariate model of wind speed, wind direction, and air density for directional wind energy potential assessment. *Energy Conversion and Management*, 314, 118735.
15. Bilgili, M. (2007). *Predictions of Wind Speed and Wind power potential using artificial neural networks*. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
16. Kurban, E. (2021). *Yalova Üniversitesi'nde Rüzgâr Potansiyeli belirleme ve örnek uygulama*. Yüksek Lisans Tezi, Yalova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
17. Özek, F. (2022). *Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin WAsP Programı ile belirlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ. 182.
18. Çınar, N. S. (2023). *Investigation of the Factors Affecting Wind energy investments in Türkiye*. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Sosyal Bilimler Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara. 243.
19. Khan, S.Y. (2023). *Forecasting of Wind Power Generation: A comparative study*. Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul. 171.
20. Adewumi, A.O. (2019). *Kuzey Nijerya'daki Rüzgâr enerjisi potansiyelinin güç üretim kaynağı olarak değerlendirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Yakın Doğu Üniversitesi, İstanbul. 130.
21. Balat, M. (2009). Modern rüzgâr türbini teknolojisinin bir incelemesi. *Enerji Kaynakları*, 31(17), 1561-1572.
22. Akpınar, E.K., Akpınar, S. (2004). Determination of the wind energy potential for Maden-Elazığ, Turkey. *Energy Conversion and Management*, 45(18-19), 2901-2914.
23. Aneke, M., Wang, M. (2016). Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review. *Applied Energy*, 179, 350-377.
24. Barton, J.P., Infield, D.G. (2004). Energy storage and its use with intermittent renewable energy. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 19(2), 441-448.
25. Bilal, B. (2021). Determination of wind potential characteristics and techno-economic feasibility analysis of wind turbines for Northwest Africa. *Energy*, 218, 119558.
26. Castillo, A., Gayme, D.F. (2014). Grid-scale energy storage applications in renewable energy integration: A survey. *Energy Conversion and Management*, 87, 885-894.
27. Yildiz, S.S. (2023). Determining wind energy potential using geographic information system functions: A case study in Balıkesir, Turkey. *Applied Sciences*, 13(16), 9183.
28. Liu, S., (2019). *The development of Renewable Energy: A comparative analysis of renewable energy policies and political structures between China and the United States*. Master of Thesis, University of London, London. 241.

29. Woźniak, M. (2021). Yenilenebilir enerji kaynakları Polonya'daki enerji sektörünün ve iklimin geleceği olarak – Toplumun görüşüne göre gerçek mi, efsane mi? *Energies*, 15(1), 45.
30. Krut, A.C. (2019). *Potential and Uncertainty of Wind energy in the Swiss Alps*. Master of Thesis, EPFL University, İsviçre. 195.
31. Hadjipaschalis, I., Poullikkas, A., Efthimiou, V. (2009). Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6-7), 1513-1522.
32. Joensen, A. (2002). *Short-Term Wind Power Prediction*. Master of Thesis, Technical University of Denmark, Department of Mathematical Modelling.
33. Kalair, A. (2021). Role of energy storage systems in energy transition from fossil fuels to renewables. *Energy Storage*, 3(1), e135.
34. Kazmi, S.W.S., Sheikh, M.I. (2019). Hybrid geothermal-PV-wind system for a village in Pakistan. *SN Applied Sciences*, 1(7), 754.
35. McKenna, R., Gantenbein, S. Fichtner, W. (2013). Determination of cost–potential–curves for wind energy in the German federal state of Baden-Württemberg. *Energy Policy*, 57, 194-203.
36. Mukulo, B.M., Ngaruiya, J.M. Kamau, J.N. (2014). Determination of wind energy potential in the Mwingi-Kitui plateau of Kenya. *Renewable Energy*, 63, 18-22.
37. Gökdemir, A. (2017). *Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin belirlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Muğla. 186.
38. Köse, F., (2005). *Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Ölçümü ve Rüzgâr Türbini Seçimi*. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya. 206.
39. Şekerci, E., Elfarra, M., Albasan, C. (13-19 Ekim 2009). *Rüzgâr türbini tahmini yıllık enerji üretim hesaplama yöntemleri ve araziye uygun rüzgâr türbini seçimi*. Rüzgâr Enerjisi Sempozyumunda, Ankara. 28-33.
40. Mengi, D.F. Metlek, S. (2020). Türkiye'nin Akdeniz Bölgesine ait rüzgâr ekserjisinin çok katmanlı yapay sinir ağı ile modellenmesi. *International Journal of Engineering and Innovative Research*, 2(2), 102-120.
41. Akdağ, S.A., (2008). *Rüzgar Enerjisi Potansiyeli ve Ekonomik Analizinde Weibull Dağılımının Kullanımı*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü. İstanbul, 91.
42. Pradotto, M. (2022). *Estimation, Quantification and Analysis of Real Constraints of Wind Potential in Sardinia*. Master of Thesis, University of Turin, Torino. 109.

43. Yaniktepe, B., Koroglu, T. Savrun, M.M. (2013). Investigation of wind characteristics and wind energy potential in Osmaniye, Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 703-711.
44. İmal, M., Şekkeli, M., Yıldız, C. (2013). Investigation and evaluation of wind power estimation at the campus area of Kahramanmaraş Sütçü İmam University. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15(2), 11-16.
45. Germeç, M.G. (2022). *Yenilenebilir enerji kaynaklarının finansmanında kurumsal yatırımcıların rolü*. Yüksek Lisans Tezi, Hitit Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Çorum. 167.
46. Karagöl, E.T., Önal, C. (17-20 Ekim 2018). *Yenilenebilir enerji ve enerji arz güvenliği*. International Congress of Energy Economy and Security, İstanbul. 97-103.
47. İnternet: EÜAŞ. URL-1: <https://www.euas.gov.tr> / Son Erişim Tarihi: 09.11.2024.
48. İnternet: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. Elektrik enerjisi bilgi merkezi. URL-2: <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik> Erişim Tarihi: 03.09.2024 Son Erişim Tarihi: 19.10.2025.
49. Çiçek, N. (2013). Demand response and supply optimization in smart grids with renewable energy sources: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 18(2),64-72.
50. İnternet: Mühendisk. Yenilenebilir enerji nedir, kaynakları nelerdir? URL-3: <https://muhendisk.com/yenilenebilir-enerji-nedir-kaynaklari-nelerdir/> Son Erişim Tarihi: 04.07.2024.
51. Sağır, İ.H. (2021). *Türkiye’de Enerji Üretiminde Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Yeri*. Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Konya, 271.
52. Koç, E., Kaya, K. (2015). Enerji kaynakları – Yenilenebilir enerji durumu. *Mühendis ve Makine Dergisi*, 56(668), 36-47.
53. Aydın, S. (2020). *Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri ile Değerlendirilmesi: Türkiye Örneği*. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Erzurum. 278.
54. Evli, S. (2018). *Türkiye’de Sürdürülebilir Kalkınma ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları*. Yayınlanmamış. Yüksek Lisans Tezi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Tekirdağ. 163.
55. İnternet: International wind energy development world market update. URL-4: <http://www.btm.dk/world-index.htm> Son Erişim Tarihi: 03.09.2024
56. Kaçmaz, Ş. (2024). *PV güneş enerjisi destekli hava soğutmalı çift kademeli ORC jeotermal enerji santrali performans değerlendirmesi: Sultanhisar jeotermal enerji santrali örneği*. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Konya, 113.

57. Kılıç, F. (2023). *Alternatif Bir Kaynak Olarak Türkiye’de Hidrojen Enerjisi*. Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük. 122.
58. Ay, A. (2010). *Energy Sources and Investment Project Assessment: A Case Study About Wind Energy in Turkey*. Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü. İstanbul. 156.
59. Hepbasli, A., Ozdamar, A., Ozalp, N. (2001). Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynaklarının mevcut durumu ve potansiyeli. *Enerji Dergisi*, 23(7), 631-648.
60. Kapluhan, E. (2014). Enerji coğrafyası açısından bir inceleme: Dalga enerjisinin dünyada ve Türkiye’deki kullanım durumu. *International Journal of Eurasia Social Sciences*, 5(17), 63-98.
61. İnternet: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. Rüzgar enerjisi. URL-5: <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-ruzgar> Son Erişim Tarihi: 15.10.2025.
62. Değirmenci, S. (2016). *Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Çevresel Etkisi ve Kapasite Analizi: Türkiye’de Rüzgâr Enerjisinin Örnek Çalışması*. Yüksek Lisans Tezi, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü. İzmir. 173.
63. İnternet: Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi. (2021). 2021 küresel rüzgâr raporu. URL-6: <https://dunyaenerji.org.tr/2021-kuresel-ruzgar-raporu/> Son Erişim Tarihi: 15.10.2025.
64. Koçaslan, G. (2006). *Türkiye’nin enerji kaynakları ve alternatif bir kaynak olarak rüzgâr enerjisinin değerlendirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü. İstanbul. 144.
65. Hayli, S. (2001). Rüzgâr enerjisinin önemi, Dünya’da ve Türkiye’deki durumu. *Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 11(1), 1-26.
66. Köse, B., Recebli, Z., Yazıcı, M. Özkaymak, M. (11-15 Mayıs 2014). *Rüzgâr enerjisinin potansiyelinin belirlenmesi ve türbin seçimi*. Conference: 20. Uluslararası Enerji Ve Çevre Fuarı Ve Konferansı, İstanbul. 147-153.
67. Hayli, S. (2001). Rüzgâr enerjisinin önemi, Dünya’da ve Türkiye’deki durumu. *Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 11(1), 1-26.
68. İnternet: Rüzgar enerjisi ve Türkiye’deki durumu. URL-7: https://www.emo.org.tr/ekler/4986d86a17424ee_ek.pdf Son Erişim Tarihi: 16.09.2025.
69. İnternet: Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü. Rüzgar enerjisi. URL-8: <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklari-ruzgar> Son Erişim Tarihi: 03.12.2024.
70. Kurban, M., Kantar, Y., Hocaoglu, F.O. (2006). Rüzgar enerji potansiyelinin araştırılmasında Weibull ve Rayleigh dağılımlarının kullanılması. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10(1), 42-59.

71. Bayrakçı, C.H., Delikanlı, K. (2007). Türkiye’de rüzgâr enerjisi ve potansiyel belirleme çalışmaları. *Mühendis ve Makine Dergisi*, 48(569), 78-80.
72. Çalışkan, M. (2010). *Türkiye rüzgâr enerjisi potansiyeli*. Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü ve Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği (TÜREB) Rüzgar Enerjisi Semineri.
73. İnternet: Wind Atlas Analysis and Application Program (WAsP). URL-9: <http://www.wasp.dk> Son Erişim Tarihi: 15.01.2024.
74. İnternet: Golden Software. Surfer. URL-10: <http://www.goldensoftware.com/products/surfer/surfer.shtml> Son Erişim Tarihi: 15.01.2024.
75. İnternet: Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA). URL-11: <https://repa.enerji.gov.tr/REPA/bolgeler/TURKIYE-GENELI.pdf> Son Erişim Tarihi: 27.08. 2025.
76. İnternet: Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği (TÜREB). URL-12: <http://www.tureb.com.tr> Son Erişim Tarihi: 09.11.2024.
77. İnternet: Çeşme Belediyesi. Tarihi ve coğrafi yapısı. URL-13: <http://www.cesme.gov.tr/tarihi-ve-cograf-yapisi> Son Erişim Tarihi: 11.06.2025.
78. İnternet: Google Maps. URL-14: <https://www.google.com.tr/maps> Son Erişim Tarihi: 09.06.2025.
79. İnternet: Çeşme rüzgâr enerji santrali. URL-15: <https://www.enerjiatlası.com/ruzgar/cesme-ruzgar-enerji-santrali.html> Son Erişim Tarihi: 15.11.2024.
80. İnternet: Rüzgar ölçüm sistemleri. URL-16: <https://www.ruzgar.com.tr/farmel-enerji/ruzgar-olcum-sistemleri/> Son Erişim Tarihi: 17.11.2024.
81. İnternet: U-Sens. URL-17: <https://u-sens.com/> Son Erişim Tarihi: 17.11.2024.
82. Şenol, Ü. (2017). *Rüzgar Enerjisi ve Rüzgâr Enerjisi Potansiyelinin Yapay Sinir Ağları Yöntemiyle Tahmini*. Yüksek Lisans Tezi, Yozgat Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yozgat. 183.
83. İnternet: Rüzgar Enerjisi Birliği. Rüzgar ölçümü ve metotları. URL-18: <https://www.ruzgarenerjisi.com.tr/bolum-2-ruzgar-olcumu-ve-metotlari/#221-ruzgar-hiz-sensoru-anemometre> Son Erişim Tarihi: 09.04.2025.
84. İnternet: European Wind Energy Association (EWEA) Wind map URL-19: http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/documents/publications/statistics/07_0129_Wind_map_2006.pdf Son Erişim Tarihi: 09.11.2024.
85. İnternet: International wind energy development world market update. URL-20: <http://www.btm.dk/world-index.htm> Son Erişim Tarihi: 03.09.2024.

86. İnternet: Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK). URL-21: <http://www.epdk.gov.tr> Son Erişim Tarihi: 03.09.2024.
87. Baskut, O., Ozgener, O. Ozgener, L. (2009). Second law analysis of wind turbine power plants. *Fuel and Energy Abstracts*, 36(5),2535-2542.
88. Ozgener, L. (2010). Investigation of wind energy potential of Muradiye in Manisa, Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 3232-3236.
89. İnternet: Yeşil Haber. Alaçatı RES'te yerli rüzgâr türbinleri dönemi başlıyor. URL-22: <https://yesilhaber.net/alacati-reste-yerli-ruzgar-turbinleri-donemi-basliyor> Son Erişim Tarihi: 16.09.2024.
90. İnternet: Aselsan.ART4.Xr üzgar türbini teknik broşürü. URL-23: https://wwwcdn.aselsan.com/api/file/ART4.X-RUZGAR_TURBINI_TR.pdf Son Erişim Tarihi:17.09.2024.
91. Karataş, B. (2022). *Türkiye'deki Rüzgâr, Biyokütle ve Dalga-Akıntı-Gelgit Enerjisi Alanında Tescillenmiş Ulusal Patent ve Faydalı Modellerin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara. 214.
92. İnternet: Enerji Ajansı. Türkiye'nin kurulu gücü. URL-24: <https://enerjiajansi.com.tr/turkiyenin-kurulu-gucu/> Son Erişim Tarihi: 21.10.2025.





Gazili olmak ayrıcalıktır