

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ UÇAK VE UZAY BİLİMLERİ FAKÜLTESİ

**VAN RÜZGAR ENERJİ SANTRALİ TASARIM
VE UYGULAMASI**

TASARIM ÇALIŞMASI TEZİ

**Emir Hamza YÜCE
Fatma Sude SÖKİN
Sultan Sümeyye AYKANAT
Ömer Faruk AVCI**

İklim Bilimi ve Meteoroloji Mühendisliği

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Bahtiyar EFE

HAZİRAN 2026

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ UÇAK VE UZAY BİLİMLERİ FAKÜLTESİ

**VAN RÜZGAR ENERJİ SANTRALİ TASARIM
VE UYGULAMASI**

TASARIM ÇALIŞMASI TEZİ

**Emir Hamza YÜCE, 110200221
Fatma Sude SÖKİN, 110200244
Sultan Sümeyye AYKANAT, 110190226
Ömer Faruk AVCI, 110200231**

**Teslim Tarihi :
Savunma Tarihi :**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Bahtiyar EFE
Diğer Jüri Üyeleri: A
B
C**

HAZİRAN 2026

İTÜ, Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesinin 110200221, 110200244, 110190226, 110200231 numaralı öğrencileri **Emir Hamza YÜCE**, **Fatma Sude SÖKİN**, **Sultan Sümeyye**, **AYKANAT**, **Ömer Faruk AVCI** ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**VAN RÜZGAR ENERJİ SANTRALİ TASARIM VE UYGULAMASI**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuşlardır.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Bahtiyar EFE**
.....

İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **A**
.....

İstanbul Teknik Üniversitesi

B
.....

İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi :

Savunma Tarihi :

ÖNSÖZ

Günümüzde artan enerji ihtiyacı ve çevre kirliliği gibi sorunlar, bizleri rüzgar enerjisi gibi temiz kaynaklara yöneltmektedir. Bu bitirme çalışmasında, Van Rüzgar Enerji Santrali örneği üzerinden bir santralin tasarımdan kurulumuna kadar olan süreçleri, teknik ve ekonomik boyutlarıyla incelemeye çalıştık.

Tezin hazırlanması sürecinde bilgi ve tecrübeleriyle bize her zaman yol gösteren, desteğini esirgemeyen değerli danışman hocamız Sayın Doç. Dr. Bahtiyar EFE'ye en içten teşekkürlerimizi sunarız. Ayrıca çalışmalarım sırasında teknik konularda yardımlarını gördüğümüz Arş. Gör. Melek AKIN ve Arş. Gör. Nida ÇİFTÇİ'ye, bizlere kattıkları vizyon için İstanbul Teknik Üniversitesi İklim Bilimi ve Meteoroloji Mühendisliği Bölümü hocalarımıza çok teşekkür ederiz.

Son olarak, tez sürecinde bizlere destek olan ailelerimize, arkadaşlarımıza ve çalışma arkadaşlarımıza verdikleri moral ve teşvik için minnettar olduğumuzu belirtmek isteriz.

Bu çalışmanın, yenilenebilir enerji alanında gelecekte yapılacak araştırmalara ve rüzgar enerjisi santrallerinin geliştirilmesine katkı sağlamasını temenni ederiz.

Emir Hamza YÜCE
Fatma Sude SÖKİN
Sultan Sümeyye AYKANAT
Ömer Faruk AVCI

İstanbul, 2026

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER	iv
KISALTMALAR	xii
TABLO LİSTESİ.....	xiv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET	xxii
SUMMARY	xxiii
GİRİŞ	1
Literatür Taraması	1
1. Rüzgarın Tanımı ve Atmosferdeki Önemi	3
1.1 Rüzgarın Oluşum Mekanizmaları	3
1.1.1 Basınç Gradyanı Kuvveti.....	3
1.1.2 Coriolis Kuvveti	3
1.1.3 Yüzey Sürtünmesi.....	4
1.1.4 Jeostrofik ve Gradyan Rüzgarlar	4
1.2 Atmosferik Özellikler.....	4
1.2.1 Rüzgar Profili	4
1.2.2 Atmosferik Sınır Tabaka ve Türbülans.....	5
1.2.3 Günlük ve Mevsimsel Değişimler	5
1.3 Rüzgar Çeşitleri.....	5
1.3.1 Küresel Rüzgar Sistemleri	5
1.3.2 Yerel Rüzgarlar.....	6
2. Rüzgar Enerjisinin Küresel ve Türkiye'deki Mevcut Durumu.....	8
2.1 Türkiye ve Dünya Genelinde Rüzgar Enerjisi Potansiyeli.....	8
2.2 Türkiye'deki Aktif Rüzgar Bölgeleri.....	8
2.3 Yeni Avrupa Rüzgâr Atlası (NEWA) ve Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA).....	9
3. Rüzgar Enerjisinin Çevresel ve Ekonomik Faydaları	10
3.1 Çevresel Katkılar	10

3.2 Ekonomik Katkılar	11
4. Rüzgar Türbinleri ve Bileşenleri	12
4.1 Rüzgar Ölçümünün Amacı ve Önemi	12
4.1.1 Ölçüm ve Temsil Süresi	13
4.1.2 Ölçüm Yapılacak Noktanın Seçimi	13
4.2 Rüzgar Ölçüm Aletleri	14
4.2.1 Anemometre Tipleri	15
4.2.2 Yön Sensörleri	18
4.3 Rüzgar Ölçüm Direkleri	19
4.3.1 Direk Yüksekliği, Konumlandırma ve Orografik Etkiler	19
4.3.2 Direklerde Bulunması Gereken Sensörler	21
4.3.3 Ölçüm Noktasının Belirlenmesi: Arazinin Pürüzlülüğü, Engellerden Uzaklık	22
4.3.4 30 m – 60 m – 80 m Direk Farkları	22
4.3.5 Direk Tipi: Kafes ve Boru	24
4.4 Ölçüm Verisinin Kaydedilmesi	24
4.4.1 Veri Toplayıcı (Datalogger) ve Örnekleme Aralıkları	24
4.4.2 Veri Formatları	25
4.4.3 Veri Kaybı ve Eksik Veri Yönetimi	26
5. Rüzgar Türbinlerinin Çalışmasında Atmosferik Etkiler	27
5.1 Rüzgar Şiddeti	27
5.2 Rüzgar Yönü	28
5.3 Türbülans	30
5.4 Atmosferik Sınır Tabakası (ABL) ve Orografik Etkiler	30
6. Rüzgar Türbinlerinin Temel Tasarım Parametreleri	31
6.1 Rüzgar Enerjisi ve Temel Fizik	31
6.2 Aerodinamik ve Rotor Performans Parametreleri	32
6.3 Hub Yüksekliği ve Rüzgâr Profili	34
6.4 Güç Eğrisi	35
6.5 Verim Kavramı	36
6.6 Türbin Kapasite Faktörü	36
7. Yatay ve Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri	37

7.1 HAWT	37
7.2 VAWT	38
7.3 Darrieus Tipi VAWT	38
7.4 Savonius Tipi VAWT	39
7.5 Onshore ve Offshore Türbinleri	39
7.6 Türbin Kanat Sayısına Göre Farklar	40
7.6.1 Performans ve Verimlilik	41
7.6.2 Yük Dalgalanmaları ve Yorulma	42
7.6.3 Titreşim ve Hız Rejimleri	42
7.6.4 Gürültü ve GörSEL Etki	43
7.6.5 Maliyet ve Bakım	43
7.7 Rüzgar Türbinleri ve Bileşenleri	43
7.7.1 Yardımcı ve Kritik Parçalar	44
7.7.2 Kritiklik ve Arıza Eğilimleri	45
7.8 Enerji Dönüşüm Süreci	46
8. Standartlar ve Mevzuatlar	47
8.1 IEC 61400 Serisi	47
8.1.1 Genel Standartlar	48
8.1.2 Performans ve Test Standartları	49
8.1.3 Elektriksel Özellikler ve Şebeke Uyumu	50
8.1.4 Diğer Önemli Alt Standartlar	50
8.2 MEASNET ve TSE Standartları	51
8.2.1 MEASNET	51
8.2.1.1 Prosedürler	52
8.2.1.2 MEASNET'in Kalite Güvencesi ve Değerlendirme Mekanizması	57
8.2.1.3 MEASNET'in Endüstrideki Önemi ve Etkisi	57
8.2.1.4 Kritik Değerlendirme ve Sınırlar	57
8.2.2 TSE	58
8.2.2.1 TSE Standartları	58
8.2.2.2 TSE Standartlarının Hazırlanma Süreci	58
8.2.2.3 TSE Standartlarının Uygulanması	59

8.3 Ölçüm Tebliği	59	
8.4 Türkiye'de RES Projeleri İçin Mevzuatlar	61	
8.4.1 TSE Standartlarının Uygulanması.....	62	
8.4.2 Elektrik Piyasası Kanunu.....	62	
8.4.3 EPDK.....	63	
8.4.4 ÇED.....	63	
8.4.5 YEKDEM	66	
9. Lisanslı ve Lisanssız Elektrik Üretim Bilgileri Emisyon ve Emisyon Çeşitleri.....	68	
9.1 Lisanslı Elektrik Üretim Faaliyeti Genel Esaslar ve Süreç	68	
9.1.1 Lisans Alma Süreci Adımları	68	
9.1.2 Önlisans Başvuru Dilekçesi ve Diğer Gerekli Belgeler	69	
9.1.3 Maliyetler, Teknik ve Yasal Gereksinimler	69	
9.2 Lisanssız Elektrik Üretim Faaliyeti Genel Esaslar ve Süreç.....	70	
9.2.1 Lisanssız Rüzgâr Enerjisi Üretiminin Hukuki Dayanakları	70	
9.2.2 Lisanssız Üretim İçin Kurulu Güç Sınırı ve Tüketim İlişkisi.....	70	
9.2.3 Lisanssız Elektrik Üretim Süreci Aşamaları	71	
9.2.4 Başvuru İçin Gerekli Belgeler	72	
9.2.5 Destekleme Mekanizmaları ve Finansal Yapı	72	
9.2.6 Çevresel Gereklilikler (CED)	72	
9.2.7 Teknik Gereksinimler ve Şebeke Uyumluluğu	73	
10. Emisyon ve Hesaplamalar	76	
10.1.....	Emisyon ve Emisyon Çeşitleri	76
10.1.1	Sera Gazı Emisyonları.....	76
10.1.2	Partikül Madde Emisyonları.....	77
10.1.3	Gürültü Emisyonları.....	77
10.1.4	Gölge Emisyonları.....	77
10.1.5	Elektromanyet	

İk Alan Emisyonları	77
10.1.6	Atık Kaynaklı
Emisyonlar.....	77
10.1.7	Su ve Toprak
Emisyonları.....	77
10.2.....	Rüzgar
Enerjisi Santrallerinde Emisyon Kaynakları	77
10.2.1	İnşaat
Aşaması Emisyonları	78
10.2.2	İşletme
Aşaması Emisyonları	78
10.2.3	Söküm
Aşaması Emisyonları	78
10.2.4	Yaşam
Döngüsü Emisyonları (LCA).....	78
10.2.5	Rüzgar
Enerjisinin Emisyon Profili	78
10.3.....	Emisyon
Hesaplamaları.....	79
10.4.....	Karbon Ayak
İzi.....	79
10.4.1	Karbon Ayak
İzinin Tanımı ve Çeşitleri	80
10.4.2	Karbon Ayak
İzinin Hesaplanması ve Ölçüm Yöntemleri.....	80
10.4.3	Rüzgâr
Türbinlerinin Yaşam Döngüsü Boyunca Karbon Emisyonları.....	81
10.4.4	Rüzgâr
Türbinlerinde Onshore–Offshore LCA Karşılaştırması	81
11. İklim Değişikliği ve RES	82
11.1.....	İklim
Değişikliğinin Rüzgar Potansiyeline Etkisi.....	
11.2.....	İklim
Değişikliğinin Rüzgar Şiddeti ve Yönleri Üzerindeki Etkisi	
11.3.....	Rüzgarın
Mevsimsel ve Bölgesel Varyasyonları	
11.4.....	İklim
Değişikliğinin Rüzgar Modelleri Üzerindeki Etkisi	

11.5.....	İklim Modellerinden Elde Edilen Bulgular.....
11.6.....	Rüzgar Enerjisi Projelerinde İklim Değişikliği Risklerinin Değerlendirilmesi
11.7.....	Rüzgar Türbinlerinin Verimliliği Üzerindeki İklim Etkileri
11.8.....	Rüzgar Türbinlerinin Verimliliği Üzerindeki İklim Etkileri
11.9.....	İklim Modellemesi ve Rüzgar Enerjisi Projeksiyonları.....
11.9.1	CMIP6 ve SSP Senaryolarına Dayalı Görüşler.....
11.10.....	Uzun Vadeli Enerji Projeksiyonlarında Rüzgar Enerjisinin Rolü
12. İstatistiksel Analiz.....	
12.1.....	Rüzgar Verilerinin İstatistiksel Analizi ve RES Projelerindeki Kritik Önemi
12.2.....	Weibull ve Rayleigh
12.3.....	Model Doğrulama ve Hata Ölçüm Metrikleri
13. Rüzgar Enerjisinde Kullanılan Bilgisayar Programları	
13.1.....	WAsP
13.2.....	WindPro
13.3.....	WindFarmer
13.4.....	Windographer
13.5.....	HOMER
13.6.....	RETScreen
13.7.....	WindSim
13.8.....	PLC ve SCADA Sistemleri
13.9.....	ALWIN
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	
EKLER.....	

KAYNAKLAR.....

KISALTMALAR

AAP	:Applicant Assessment Procedure
ABL	:Atmospheric Boundary Layer
AEP	:Yıllık Enerji Üretimi
.csv	:Comma-Separated Values
ÇED	:Çevresel Etki Değerlendirmesi
dB :Desibel	
EoL	:End of Life
EİGM	:Enerji İşleri Genel Müdürlüğü
EPDK	:Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
EPK	:Elektrik Piyasası Kanunu
ETKB	:Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
GHG	:Sera Gazları (Green House Gases)
GW	:Giga Watt
GWh	:Giga Watt Saat
IEC	:International Electrotechnical Commission
IECRE	:Yenilenebilir Enerji Uygulamaları için Ekipman Standartlarına Uygunluk Sertifikasyonu IEC Sistemi
İDK	:İnceleme Değerlendirme Komisyonu
km :Kilometre	
kV :Kilo Volt	
kW	:Kilo Watt
kWh	:Kilo Watt Saat
LCA	:Life Cycle Assessment
LCOE	:Levelized Cost of Energy
LIDAR	:Light Detection and Ranging
MCP	:Measure-Correlate-Predict
MEASNET	:Measuring Network of Wind Energy Institutes of European
MGM	:Meteoroloji Genel Müdürlüğü
MICE	:Multivariate Imputation by Chained Equations
MW	:Mega Watt
MWh	:Mega Watt Saat
NEWA	:New European Wind Atlas
O&M	:Operation and Maintenance
OSB	:Organize Sanayi Bölgesi
REPA	:Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası
RES	:Rüzgar Enerji Santrali
SODAR	:Sonic Detection and Ranging
TSE	:Türk Standartları Enstitüsü
WAsP	:Wind Atlas Analysis and Application Program
WSC	:Wind Shear Coefficient

WRF	:Weather Research and Forecasting
YEKA	:Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanları
YEK	:Yenilenebilir Enerji Kaynağı
YEKDEM	:Yenilenebilir Enerji Kaynaklarını Destekleme Mekanizması

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 1a: 2,3 ve 4 kanatlı dikey eksenli rüzgar türbinler, (VAWT) için soliditeye göre optimum performans.....	42

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1: Deniz Meltemi.....	6
Şekil 1.2: Vadi ve Dağ Meltemi.....	7
Şekil 2.1: Türkiye Geneli 100 m Yükseklikteki Ortalama Rüzgar Hızı Dağılımı Haritası	10
Şekil 3.1: 3.6 MW ve 4.8 MW rüzgâr türbini modellerinin çevresel etki karşılaştırması.....	11
Şekil 3.2: Karasal (onshore) ve deniz üstü (offshore) rüzgâr türbinlerinde bileşen bazında ortalama duruş süresi karşılaştırması.....	12
Şekil 4.1: Küp anemometre Ris-70 model.....	15
Şekil 4.2: Kupa anemometre rotoruna rüzgar torkunun şematik diyagramı.....	16
Şekil 4.3: Küp anemometre ve rüzgar yelpazesinin birlikte bulunduğu bir meteorolojik ölçüm direğİ.....	16
Şekil 4.4: Ultrasonik anemometre çalışma prensibi.....	17
Şekil 4.5: Rüzgar Yelpazesi.....	18
Şekil 4.6: Rüzgar Ölçüm İstasyonunun Şematik Gösterimi.....	19
Şekil 4.7: Farklı fiyort bölgelerinde yer alan meteorolojik ölçüm direklerinde ortalama rüzgar geliş açısı (Mean Incidence Angle, IA) rüzgar yönüne göre değişimi.....	20
Şekil 4.8: Ortalama rüzgar hızının düşey dağılımı.....	20
Şekil 4.9: Wied Rini kulesindeki sensör yerleşimi.....	21
Şekil 4.10: GM Falkenberg'deki 99 metrelük kule boyunca rüzgar hızının ortalama günlük döngüsü (1998-2016).....	23
Şekil 4.11: 100 metre ve 40 metrede direkler için ölçülen rüzgar gülleri.....	23
Şekil 4.12: Veri toplayıcı (data logger) sisteminin genel çalışma prensibi.....	25
Şekil 4.13: Ölçüm serilerinde veri boşluklarının (gap) rüzgar şiddeti, yönü ve Weibull parametreleri üzerindeki etkisi.....	27
Şekil 5.1: Türbin Yönlendirme Sistemleri (Yaw Kontrolü).....	28
Şekil 5.2: Rotor tabakası boyunca sabah (mavi) ve akşam (kırmızı) geçişlerinde yönel ve hız kesmesi dağılımları.....	29
Şekil 5.3: Sabah ve akşam geçişlerinde hız ve yön kesmesi kombinasyonlarına göre turbinin normalize edilmiş güç üretimi.....	29
Şekil 5.4.: Farklı atmosferik kararlılık koşullarında (SBL, NBL, CBL) ve tepe arkası konumunda NREL 5 MW turbininin güç üretimi.....	31
Şekil 6.1: Uç hız oranı ve güç katsayıları arasındaki ilişki	33
Şekil 7.1: HAWT rüzgar türbini.....	37
Şekil 7.2: VAWT rüzgar türbini.....	38
Şekil 7.3: Darrieus tipi VAWT.....	39
Şekil 7.4: Savonius tipi VAWT.....	39
Şekil 7.5: Offshore (deniz) türbini.....	40
Şekil 7.6: Modern HAWT Rüzgar Turbini Kanat Sayısına Göre Verim Oranları.....	43
Şekil 7.7: Tipik bir 2 MW rüzgar turbininin farklı bileşenleriyle ilişkili maliyet.....	43
Şekil 7.8: Dişli kutusunun yapısı.....	44
Şekil 7.9: Rüzgâr turbininde enerji dönüşüm süreci.....	47
Şekil 8.1: Akış uniformitesi (akış homojenliği) testi için hacmin tanımı.....	52
Şekil 8.2: Rüzgar Ölçüm İstasyonu Şematik Gösterimi.....	60

VAN RÜZGAR ENERJİ SANTRALİ TASARIM VE UYGULAMASI

ÖZET

Van rüzgar enerji santrali tasarım ve uygulaması konusunu ele alan bu çalışma; bir RES projesinin temelini oluşturan ön planlama ve fizibilite süreçlerini teknik, çevresel ve ekonomik boyutlarıyla incelemektedir. Tezin temel amacı, santralin tasarım ve geliştirme aşamalarına rehberlik edecek saha seçimi, ölçüm stratejisi ve teknolojik altyapı için gerekli mühendislik temellerini oluşturmaktır.

Çalışma kapsamında rüzgar kaynağının karakteristiği, ölçüm altyapıları, türbin yerleşimi ve projenin ekonomik uygulanabilirliği detaylıca değerlendirilmiştir. Özellikle bir RES projesinin başarısı için hayatı öneme sahip olan güvenilir veri üretimi konusuna odaklanılmıştır. Bu doğrultusunda; ölçüm süresi, saha temsiliyeti, yüzey pürüzlülüğü ve sınır tabakası dinamikleri gibi faktörlerin optimum ölçüm konumuna etkisi analiz edilmiştir. Meteoroloji direklerinin konfigürasyonu, sensör tipleri ve LIDAR/SODAR gibi uzaktan algılama teknolojileri incelenmiştir.

Ayrıca, santral tasarımında kullanılan türbin tipleri; IEC 61400 standartları ve MEASNET prosedürleri çerçevesinde ele alınmış; projenin yasal ve çevresel uygunluğu ise ÇED (Çevresel Etki Değerlendirmesi) raporu süreçleri kapsamında irdelenmiştir. Sonuç olarak bu tez, Türkiye'nin yenilenebilir enerji potansiyelinin değerlendirilmesine katkı sunmayı amaçlamaktadır.

VAN WIND POWER PLANT DESIGN AND APPLICATION

SUMMARY

This thesis, titled "Van Wind Power Plant Design and Application," presents a detailed feasibility study and implementation plan for a wind energy project in the Van region. As energy demand increases globally and environmental concerns grow, shifting towards renewable resources has become essential. In this context, the study aims to provide a technical and scientific roadmap for the critical stages of the project, including site selection, measurement strategies, technological configuration, and regulatory compliance.

A major part of the research focuses on wind resource assessment, as reliable data is the most critical factor for the success of a wind farm. To ensure high-quality data, the study evaluates key parameters such as measurement duration, site representativeness, surface roughness, and the effects of local obstacles. The dynamics of the atmospheric boundary layer were also analyzed to determine the optimum locations for measurement masts. The configuration of these masts, the selection of sensors, and the use of remote sensing technologies like LIDAR and SODAR were examined to validate wind shear and reduce uncertainty.

On the engineering side, the selection of turbine types and components was conducted based on IEC 61400 standards and MEASNET procedures. The study analyzed technical specifications such as hub height and rotor diameter to maximize efficiency. Furthermore, the environmental impact assessment (EIA) process was incorporated to address legal requirements and evaluate the project's ecological footprint.

In conclusion, this study offers a comprehensive framework for the Van wind power plant, demonstrating its technical, economic, and environmental viability. It aims to support Turkey's energy transition goals by contributing to the development of sustainable wind energy infrastructure.

GİRİŞ

Günümüzde enerjiye olan talep hızla artarken, küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi çevresel sorunlar, tüm dünyayı fosil yakıtlar yerine temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yöneltmektedir. Bu süreçte rüzgar enerjisi, hem teknolojik olgunluğu hem de maliyet avantajlarıyla öne çıkmakta ve ülkelerin enerji stratejilerinde başrol oynamaktadır. Türkiye de sahip olduğu yüksek rüzgar potansiyeli ve coğrafi konumu sayesinde bu alanda önemli adımlar atmakta; rüzgar enerjisi kurulu gücünü her geçen yıl artırmaktadır.

Ancak verimli bir rüzgar enerjisi santrali projesinin hayatı geçirilmesi, sadece türbinlerin kurulmasından ibaret değildir. Doğru saha seçimi, güvenilir rüzgar verisi analizi, mikrokonuşlandırma (micrositing) ve ekonomik fizibilite gibi birçok farklı disiplinin bir arada değerlendirilmesini gerektirir. Özellikle sahanın topografik yapısına uygun türbin yerleşimi yapmak ve iz etkilerini en aza indirmek için izlenecek yöntemlerin doğru belirlenmesi, projenin başarısı açısından kritik öneme sahiptir.

Bu tez çalışması, Van ilinde kurulması planlanan Van rüzgar enerji santralinin tasarım ve uygulama süreçleri için gerekli olan teorik altyapıyı ve metodolojiyi oluşturmayı amaçlamaktadır. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen kapsamlı literatür taraması doğrultusunda; bölgeye ait meteorolojik verilerin analiz yöntemleri belirlenmesi amaçlanmıştır.

Teknik planlamanın yanı sıra, projenin ekonomik analizinde kullanılacak yatırım maliyetleri ve geri dönüş süresi hesaplama modelleri tanımlanmış; ÇED süreçleri kapsamında dikkate alınması gereken çevresel faktörler irdelenmiştir.

Bu çalışma ile Van bölgesinde yapılacak bir rüzgar santrali projesi için sağlam bir mühendislik zemini hazırlanması ve sonraki aşamalarda gerçekleştirilecek sayısal analizlere rehberlik edilmesi hedeflenmiştir.

Literatür Taraması

Rüzgar enerjisi santrali (RES) projelerinin başarısı; doğru saha seçimi, güvenilir meteorolojik ölçümler, uygun türbin teknolojisinin belirlenmesi ve atmosferik koşulların detaylı analizine dayanmaktadır. Bu kapsamda literatürde, rüzgar kaynağının modellenmesinden türbinlerin çevresel etkilerine kadar geniş bir yelpazede çalışmalar mevcuttur.

Rüzgar potansiyelinin belirlenmesi ve modellenmesi, RES projelerinin ilk ve en kritik adımıdır. Troen ve Petersen (1989), geliştirdikleri Avrupa rüzgar atlası çalışması ile rüzgar ikliminin istatistiksel özelliklerini belirleyerek, orografik etkilerin ve yüzey pürüzlüğünün rüzgar akışı üzerindeki etkilerini modelleyen WAsP metodolojisinin temellerini atmışlardır. Bu çalışma, modern rüzgar kaynağı değerlendirme süreçlerinin temel başvuru kaynağı olmuştur. Güncel çalışmalar ise bölgelik atlasların doğruluğu üzerine yoğunlaşmıştır. Dörenkämper ve dig. (2020) ile Hahmann ve dig. (2020), Yeni Avrupa Rüzgar Atlası (NEWA) projesi kapsamında yaptıkları çalışmalarda, özellikle karmaşık arazilerde ve deniz üstü alanlarda yüksek

çözünürlüklü modellemelerin önemini vurgulamışlardır. Bu çalışmalar, Türkiye gibi karmaşık topografyaya sahip bölgelerde, ERA5 verilerine dayalı model zinciri yaklaşımının, geleneksel yöntemlere kıyasla yerel rüzgar rejimini daha hassas bir şekilde temsil ettiğini ortaya koymuştur.

Ölçüm verilerinin güvenilirliği ve eksik verilerin tamamlanması, enerji üretim tahminlerinin doğruluğu açısından literatürde sıkça irdelenen bir diğer konudur. Derrick (1992), kısa süreli saha ölçümlerinin uzun dönemli referans verilerle ilişkilendirilmesini sağlayan MCP (Measure-Correlate-Predict) yöntemini geliştirerek, proje ömrü boyunca beklenen enerji üretiminin tahmin edilmesinde istatistiksel bir standart oluşturmuştur. Veri sürekliliğinin sağlanması üzerine çalışan Hocaoglu ve Kurban (2007), eksik rüzgar hızı verilerinin tahmin edilmesinde yapay zeka temelli yaklaşımın, geleneksel enterpolasyon yöntemlerine göre daha düşük hata oranlarına sahip olduğunu göstermiştir. Benzer şekilde Jonietz Alvarez ve dig. (2024), ölçüm serilerindeki veri boşluklarının (gap) artmasının, Weibull parametreleri ve rüzgar istatistikleri üzerinde ciddi sapmalara yol açtığını belirleyerek, uzun dönemli veri kalitesinin önemini vurgulamışlardır.

Atmosferik sınır tabaka özellikleri ve türbülansın türbin performansı üzerindeki etkileri de dinamik meteoroloji ve mühendislik arakesitinde incelenmiştir. Holton ve Hakim (2012), atmosferik hareket denklemleri üzerinden basınç gradyanı ve Coriolis kuvvetlerinin rüzgar profili üzerindeki teorik altyapısını sunarken; Sánchez Gómez ve Lundquist (2020), sabah ve akşam geçişlerinde atmosferik kararlılığın değişmesiyle oluşan rüzgar makaslaması (shear) ve yön sapmasının (veer) türbin verimliliğini düşürdüğünü tespit etmişlerdir. Liu ve Stevens (2021) ise atmosferik stabilité koşullarının ve orografik yapıların rüzgar türbinlerinin kuyruk (wake) etkileşimlerini nasıl şekillendirdiğini incelemiştir, özellikle stabil tabaka koşullarında wake etkisinin uzayarak rüzgar çiftliği verimini olumsuz etkilediğini ortaya koymuştur.

Türbin teknolojileri ve tasarımları üzerine yapılan karşılaştırmalı çalışmalarda, yatay ve dikey eksenli türbinlerin performans farkları öne çıkmaktadır. Johari ve dig. (2018), yatay eksenli (HAWT) ve dikey eksenli (VAWT) türbinleri deneysel olarak karşılaştırmış; HAWT sistemlerinin yüksek rüzgar hızlarında daha yüksek voltaj ürettiğini, ancak rüzgar yönündeki değişimlere karşı VAWT sistemlerinin daha kararlı bir performans sergilediğini belirtmişlerdir. Tju ve dig. (2015) ise Darrieus tipi dikey eksenli türbinlerin aerodinamik performansını

inceleyerek, bu türbinlerin özellikle düşük rüzgar hızlarında ve kentsel alanlarda avantaj sağladığını vurgulamışlardır. Ayrıca Tumse ve diğ. (2024), kara (onshore) ve deniz üstü (offshore) rüzgar enerjisi potansiyellerini karşılaştırarak, deniz üstü santrallerin daha yüksek kapasite faktörlerine ulaştığını ve geleceğin enerji projeksiyonlarında payının artacağını belirtmişlerdir.

Son olarak, rüzgar enerjisinin çevresel ve ekonomik sürdürülebilirliği, Yaşam Döngüsü Analizi (LCA) çalışmalarıyla değerlendirilmektedir. Atılgan ve Babuna (2024), Türkiye'deki rüzgar türbinleri üzerine yaptıkları LCA çalışmasında, çevresel etkinin büyük kısmının imalat aşamasındaki malzeme üretiminden kaynaklandığını ve geri dönüşüm oranlarının artırılması ile karbon ayak izinin %49 oranında azaltılabileceğini hesaplamışlardır. Mendecka ve diğ. (2019) ise rüzgar enerjisinin karbon yoğunluğunun fosil yakıtlara kıyasla %97 daha düşük olduğunu doğrulamışlardır. Ekonomik açıdan ise Dao ve diğ. (2019), işletme ve bakım stratejilerinin Seviyelendirilmiş Enerji Maliyeti (LCOE) üzerindeki etkisini inceleyerek, önleyici bakım uygulamalarının maliyetleri %10-15 oranında düşürebileceğini raporlamışlardır.

Mevcut literatür ışığında, bu tez çalışması kapsamında Van bölgesinde kurulması planlanan bir RES projesinin meteorolojik fizibilitesi, teknik yerlesimi ve yasal süreçleri bütüncül bir yaklaşımla ele alınacaktır.

1. Rüzgarın Tanımı ve Atmosferdeki Önemi

Rüzgar, atmosferde yüksek basınç alanlarından alçak basınç alanlarına doğru gerçekleşen yatay hava hareketidir. Bu hareket basınç farkları, dünyanın dönmesi (coriolis kuvveti) ve sürtünme kuvvetinin etkileşimiyle belirlenir. Atmosferde rüzgarlar, ısı ve nemin taşınmasında, küresel enerjinin korunmasında ve iklim sistemlerinin şekillenmesinde temel rol oynar. Dinamik meteoroloji, hava durumu ve iklimle ilişkili olarak dünya atmosferindeki hava hareketlerinin incelenmesidir. Bu hareketler, rüzgar, sıcaklık, bulut ve yağış desenleri aracılığıyla insan faaliyetlerini etkileyen belirgin dolaşım sistemlerine dönüşür. (Holton, Hakim, 2012)

Borhan (2021) ise rüzgarı, güneşin yeryüzüne eşit olmayan biçimde ısıtması sonucu ortaya çıkan basınç farklarının bir sonucu olarak tanımlar. Bu nedenle, rüzgar enerjisi dolaylı bir güneş enerjisi turevidir. Atmosferdeki bu sürekli hareket, hem doğal enerji döngülerinde hem de insan yapımı yenilenebilir enerji sistemlerinde temel bir kaynaktır. Rüzgar enerjisi, güneş enerjisinin ikincil bir biçimidir. Güneşin yeryüzüne farklı biçimlerde ısıtması, atmosferin genel sirkülasyonunu yönlendiren basınç gradyanlarını oluşturur. Fosil yakıtların azaltılması ve sera gazı emisyonlarının azaltılmasındaki rolü nedeniyle rüzgar enerjisi hızla yaygınlaşıyor. Temiz ve yenilenebilir bir enerji kaynağı ve onu kullanmak için gereken teknoloji de giderek ucuzluyor. Rüzgar her yerde, bu da ona yatırım yapan ülkelerin enerji kıtlığı veya fiyat artışları konusunda daha az endişe duyabileceği anlamına geliyor. Dünyanın enerji ihtiyacını karşılamadaki potansiyeli düşünüldüğünde ise yenilenebilir enerjinin geleceği açısından büyük bir yere sahiptir.

Rüzgarın nasıl ortaya çıktığını anlamak, rüzgar enerjisi potansiyelini doğru değerlendirebilmek için büyük önem arz eder. Basınç gradyan, coriolis kuvvetleri, yüzey sürtünmesi ve jeostrofik ve gradyan rüzgarları rüzgarın oluşum mekanizmaları arasında yer alırlar.

1.1 Rüzgarın Oluşum Mekanizmaları

Rüzgar enerji santralinin ana oluşturucu kuvveti olan rüzgarın kendini anlayabilmek için rüzgarın oluşum mekanizmalarını tanımlayabilmek ve anlayabilmek gerekir. Bu bölümde rüzgarın oluşum mekanizmalarından olan; basınç gradyan kuvveti, coriolis kuvveti, yüzey

sürtünmesi, jeostrofik ve gradyan rüzgarlardan bahsedilecektir.

1.1.1 Basınç Gradyanı Kuvveti

Basınç gradyanı kuvveti, atmosferde yüksek basınçtan alçak basınçta doğru yönelen temel kuvvettir. Rüzgarı doğrudan başlatan mekanizmadır. Bu kuvvet, iki nokta arasındaki basınç farkına bağlı olarak artar. Atmosferdeki hareket denklemlerinde bu kuvvet, genellikle $-1/p\nabla p$ biçiminde ifade edilir ve yoğunluk ile basınç değişiminin uzaysal türevine bağlıdır. (Holton, Hakim, 2012)

1.1.2 Coriolis Kuvveti

Coriolis kuvveti, dünyanın dönmesinden kaynaklanan görünür bir kuvvettir. Rüzgarın yönünü değiştirir: kuzey yarımkürede sağa, güney yarımkürede sola saptırır. Bu kuvvetin büyülüklüğü enleme bağlıdır. Rüzgarın sapmasını ve büyük ölçekli atmosferik akışların (örneğin siklonlar) yönünü belirleyen ana faktörlerden biridir. Bu kuvvet, rüzgarın yönünü rüzgar şiddetinde önemli bir etkiye sahiptir. Holton ve Hakim (2012) ise coriolis kuvvetinin dünyanın dönmesi vasıtıyla oluşan bir kuvvet olduğunu söyler. Bu kuvvet basınç gradyan kuvveti ile beraber çalışarak rüzgar akımlarının jeostrofik dengeye yaklaşmasını sağlar ve bu sayede büyük ölçekli atmosferik dolaşımın düzenlenmesinde kritik role sahiptir. Rüzgarın yönünü belirleyerek bazı bölgelerde hakim rüzgar rejimlerinin oluşmasına katkı sağladığından dolayı dahi olsa rüzgar enerji potansiyelinin bölgesel dağılımı üzerinde önemli bir etkisi vardır.

1.1.3 Yüzey Sürtünmesi

Yüzey sürtünmesi, atmosferin alt tabakalarında (özellikle ilk ~1 km'de) rüzgar hızını azaltan ve yönünü değiştiren etkidir. Binalar, bitki örtüsü ve arazi pürüzlülüğü, hava akımının momentumunu yavaşlatır. Momentum esas olarak türbülanslı girdap hareketleriyle taşınır. 100 kilometrenin altındaki atmosferde, moleküller viskozite yalnızca yüzeye yakın bölgelerde, düşey kesme hızının çok büyük olduğu yerlerde önemlidir. (Holton & Hakim, 2012) Arazi ne kadar engebelyise, rüzgârin gücü o kadar azalır. Açık alanlar ise rüzgârin daha kolay akıp gitmesine izin verir (Kaya, 2018). Sürtünme rüzgârı sadece yavaşlatmakla kalmaz, aynı zamanda onu düşük basınçlı bölgelere doğru iter. Bu etki, yerden ilk birkaç yüz metre yükseklikte en belirgindir.

1.1.4 Jeostrofik ve Gradyan Rüzgarlar

Basınç gradyanının itmesi ve Coriolis kuvvetinin dönmesi dengelendiğinde, jeostrofik rüzgar oluşur. Bu rüzgarlar izobarlara paralel olarak ilerler ve atmosferin daha yüksek kesimlerinde hakimiyet kurar. Ancak hava, alçak veya yüksek basınç sisteminin merkezi etrafında kıvrılmaya başlarsa, merkezcil kuvvet olarak adlandırılan başka bir kuvvet devreye girerek gradyan rüzgarlar olarak adlandırılan duruma yol açar. Bunlar, rüzgarın siklon ve antisiklonların etrafında nasıl hareket ettiğine dair daha iyi bir fikir verir.

Holton ve Hakim (2012) bu iki rüzgari şu şekilde açıklar:

Jeostrofik rüzgar, basınç gradyanı kuvveti ile Coriolis kuvvetinin dengede olduğu durumda ortaya çıkar. Rüzgar izobarlara paralel eser.

Gradyan rüzgar ise bu iki kuvvetin yanına merkezcil kuvvetin de eklendiği eğrisel akış dengesidir. Gradyan rüzgarlar, siklonik (alçak basınç) ve antisiklonik (yüksek basınç) sistemlerde görülür.

1.2 Atmosferik Özellikler

Bu bölüm; atmosferin fiziksel yapısından ve sınır tabaka dinamiğinden yola çıkarak, rüzgarın dikey profilini, türbülans etkileşimlerini, küresel ölçekten yerel ölçüye kadar gösterdiği mekansal dağılımı ve zamansal değişimleri teknik bir çerçevede incelemektedir.

1.2.1 Rüzgar Profili

Rüzgar profili, yerden yükseldikçe rüzgar hızında meydana gelen değişimi ifade eder ve rüzgar enerjisi planlamasında kritik öneme sahiptir. Atmosferik sınır tabakasında, yüzey sürüünmesi ve arazi pürüzlülüüğü nedeniyle yere yakın seviyelerde hız azalır; yükseklik arttıkça bu engelleyici etkiler azalarak rüzgar hızı artar. Bu fiziksel ilişki, rüzgar enerjisi uygulamalarında farklı yüksekliklerdeki hızları tahmin etmek için logaritmik profil veya pratik bir yöntem olan güç yasası ile modellenir. Türbin yüksekliğindeki rüzgar hızının ve enerji potansiyelinin belirlenmesi, bu modellemelere dayanır (Oke, 1987; Barry & Chorley, 2010).

1.2.2 Atmosferik Sınır Tabaka ve Türbülans

Atmosferik sınır tabaka, yüzeyle doğrudan etkileşimde bulunan ve türbülansın en belirgin şekilde gözlemlendiği alt atmosfer katmanıdır. Bu tabakanın kararlılık durumu günlük döngüye bağlı olarak değişim gösterir. Gündüz saatlerinde yüzeyin ısınmasıyla gelişen konvektif faaliyetler türbülansı güçlendirerek kararsız koşulları oluştururken, gece soğuması türbülansı baskılıyor kararlı bir yapı meydana getirir (Barry & Chorley, 2010). Türbülansın yol açtığı rüzgar hızı dalgalanmaları ve oluşturduğu yük değişimleri, rüzgar türbinlerinin enerji verimliliği ile mekanik dayanıklılığını doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, rüzgar enerjisi projelerinin güvenilirliği ve performansı, atmosferik sınır tabaka süreçlerinin derinlemesine anlaşılmamasına bağlıdır (Ahrens & Henson, 2016).

1.2.3 Günlük ve Mevsimsel Değişimler Küresel Rüzgar Sistemleri

Atmosferik koşullar günlük ve mevsimsel ölçekte belirgin değişimler gösterir. Gündüz artan güneş radyasyonu yüzeyi ısıtarak kararsız atmosferik koşulları oluştururken, gece soğuması kararlı bir yapıyı destekler. Mevsimsel değişimler ise güneşlenme açısı ve yüzey özelliklerindeki farklılıklarla şekillenerek rüzgâr enerjisi potansiyelini doğrudan etkiler (Barry & Chorley, 2010).

Atmosferik sınır tabakanın yapısı da gün boyunca dinamik bir değişim sergiler. Gündüz konvektif faaliyetlerle sınır tabaka kalınlığı 1-2 km'ye ulaşırken, gece soğumasıyla bu kalınlık 100-300 m seviyelerine kadar düşer ve kararlı bir yapı oluşur (Oke, 1987). Sabah saatlerinde yüzeyin yeniden ısınmasıyla kararsızlık artar ve karışım tabakası yükselmeye başlar. Bu günlük ve mevsimsel değişimler, rüzgâr hızı ve türbülans karakteristiğini belirleyerek rüzgâr enerjisi üretimini doğrudan etkiler. Türkiye'de yapılan çalışmalar da özellikle gece oluşan kararlı tabaka koşullarının rüzgâr hızlarını sınırlayıcı rolüne dikkat çekmektedir.

1.3 Rüzgar Çeşitleri

Rüzgârlar, atmosferdeki basınç farkları sonucu meydana gelen yatay hava

hareketleridir. Bu hareketler, küresel ölçekteki genel dolaşım sistemlerinden veya yerel topografik ve termal etkilerden kaynaklanabilir.

1.3.1 Küresel Rüzgar Sistemleri

Küresel rüzgâr sistemleri, Dünya'nın dönme hareketi (Coriolis kuvveti), Güneş'ten gelen farklı enerji dağılımı ve buna bağlı olarak oluşan basınç farklarının sonucunda meydana gelir. Holton'a (2004) göre bu sistemler, gezegenin enerji dengesini koruyan geniş ölçekli atmosferik dolaşımın bir parçasıdır. Atmosferin bu genel dolaşımı üç ana hücreyle açıklanır: Hadley hücresi, Ferrel hücresi ve Polar hücre. Her biri belirli enlem kuşaklarında etkili olup farklı yönlerdeki rüzgâr kuşaklarını oluşturur (Stull, 1988).

Hadley hücresi $0\text{--}30^\circ$ enlemleri arasında yer alır ve bu bölgede doğudan batıya doğru esen ticaret rüzgârlarını (trade winds) oluşturur. Bu rüzgârlar, tropikal iklimin karakteristik bir parçasıdır ve deniz taşımacılığı ile tropikal siklonların oluşumunda önemli rol oynar. $30\text{--}60^\circ$ enlemleri arasında yer alan Ferrel hücresi, batıdan doğuya esen batı rüzgârlarını (westerlies) oluşturur. Bu rüzgârlar orta enlem siklonlarının yönünü belirler ve iklimin ılıman karakterini sürdürür. Kutup doğu rüzgârları (polar easterlies) ise 60° enlemlerinin üzerindeki bölgelerde, kutuplardan ekvatora doğru esen soğuk ve kuru hava akımlarıdır (Garratt, 1992).

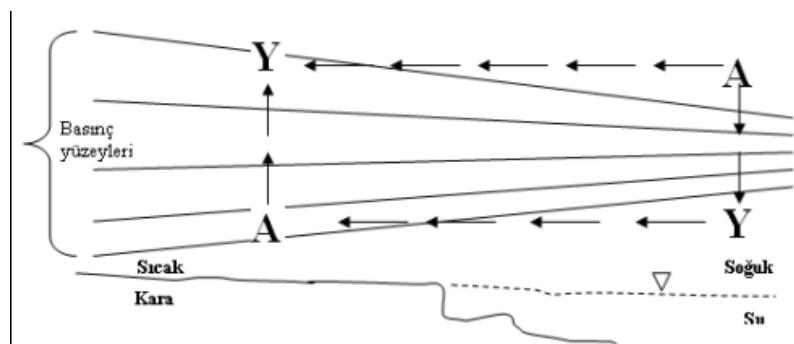
Ayrıca küresel dolaşım sisteminin üst troposferinde, $9\text{--}12$ km yüksekliklerde jet akımları (jet streams) bulunur. Bu dar ve hızlı hava akımları, orta enlemlerdeki hava sistemlerinin hızla batıdan doğuya taşınmasını sağlar ve hava taşımacılığı açısından büyük önem taşır (Ahrens & Henson, 2016). Bununla birlikte, bazı bölgelerde kara ve deniz yüzeylerinin farklı ısınma özelliklerinden kaynaklanan muson rüzgârları da görülür. Britannica'da (2021) bu rüzgârlar, mevsimsel olarak yön değiştiren geniş ölçekli hava akımları olarak tanımlanır. Musonlar özellikle Güney Asya'da yağış rejimlerini belirleyen en önemli sistemlerden biridir.

Küresel rüzgâr sistemleri, yalnızca atmosferik enerji taşınımı için değil, aynı zamanda iklim kuşaklarının oluşumu ve okyanus akıntılarının yönlendirilmesi açısından da temel öneme sahiptir. Bu sistemlerin davranışındaki değişimler, küresel ısınma ve iklim değişikliğiyle doğrudan ilişkilendirilmektedir (Wallace & Hobbs, 2006).

1.3.2 Yerel Rüzgarlar

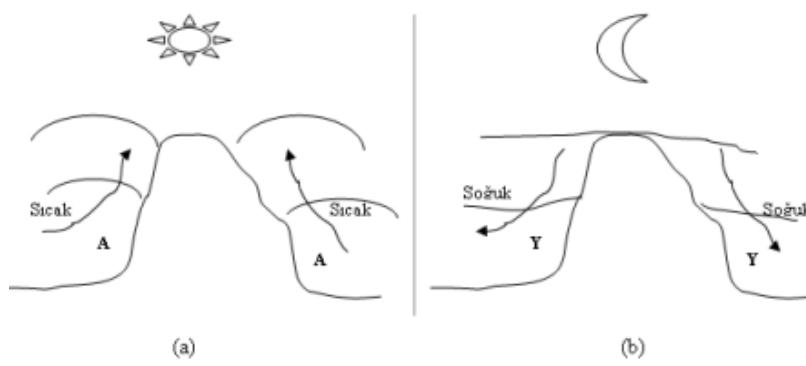
Yerel rüzgârlar, küresel sirkülasyondan farklı olarak sınırlı bölgelerde etkili olan, topografya, kara–deniz farkı ve günlük sıcaklık değişimleriyle şekillenen hava hareketleridir. Royal Meteorological Society (2018), yerel rüzgârları belirli alanlarda tekrarlayan ve kısa süreli atmosferik dolaşım örüntüleri olarak tanımlar. Bu rüzgârlar, hem yerel iklim koşullarını hem de enerji potansiyelini doğrudan etkiler.

En yaygın yerel rüzgâr türleri deniz meltemi ve kara meltemidir. Gündüz saatlerinde kara, denize göre daha hızlı ısındığından, denizden karaya doğru esen rüzgâr oluşur; bu rüzgâr “deniz meltemi” olarak adlandırılır. Geceleri ise kara daha hızlı soğur ve rüzgâr yön değiştirerek karadan denize doğru eser (Ahrens & Henson, 2009). Bu döngü, Türkiye'nin kıyı kentlerinde yaz aylarında oldukça belirgindir.



Şekil 1.1: Deniz Meltemi

Dağ ve vadi meltemleri, arazi yapısının ısınma ve soğuma hızlarındaki fark nedeniyle oluşur. Gündüzleri vadilerdeki hava ısınarak yükselir ve dağlara doğru hareket eder; geceleri ise dağ yamaçlarında soğuyan hava yoğunlaşarak vadilere doğru akar (Garratt, 1992). Bu tür rüzgârlar özellikle Toros Dağları çevresinde günlük sıcaklık değişimlerini belirginleştirir.



Şekil 1.2: Vadi (a) ve Dağ (b) Meltemi

Türkiye'de topografik ve coğrafi çeşitlilik, farklı bölgelerde karakteristik yerel rüzgârların görülmesine neden olur. Poyraz, kuzeydoğudan esen serin ve kuru bir rüzgâr olup özellikle Marmara ve Karadeniz'de etkilidir. Lodos güneybatıdan eser; sıcak ve nemli hava taşırlar, çoğu zaman Marmara ve Ege'de yağışlara neden olur (Kadioğlu, 2000). Karayel kuzeybatıdan, keşişleme ise güneydoğudan esen ve genellikle kısa süreli hava değişimlerine yol açan rüzgârlardır.

Bu rüzgârların yanı sıra, Türkiye'nin batı kıyılarda görülen imbat, Ege Bölgesi'nin en tanınmış yerel rüzgâridir. İmbat, öğle saatlerinden itibaren denizden karaya doğru esen serinletici bir deniz meltemidir. Özellikle İzmir Körfezi, Kuşadası ve Çeşme çevresinde etkili olur. Ahrens ve Henson (2009), bu tür deniz meltemlerinin, deniz üzerindeki serin havanın kara üzerindeki ısınmış havayı dengeleyerek yerel hava sirkülasyonunu sağladığını vurgular. Türkiye Meteoroloji Genel Müdürlüğü'ne (MGM, 2023) göre imbat, yaz aylarında öğleden sonra saatlerinde belirginleşir ve akşam saatlerinde etkisini kaybeder. Bölgedeki yaşam koşullarını serinlettiği gibi, kıyı ekosistemlerinin ve turizmin de düzenleyici bir unsuru olarak kabul edilir.

Bunun yanında, sam yeli adı verilen sıcak ve kuru rüzgâr, Arap Yarımadası üzerinden Türkiye'nin güneydoğusuna ulaşır; yaz aylarında yüksek sıcaklık ve düşük nem koşullarına neden olur (Türkeş, 1996). Bu rüzgâr, özellikle Güneydoğu Anadolu'da tarımsal faaliyetleri olumsuz etkileyebilmektedir.

Kadioğlu (2000), Türkiye'deki rüzgâr yönlerinin bölgesel basınç sistemleriyle yakından ilişkili olduğunu ve rüzgârların çoğunlukla mevsimsel hava kütleleri ile yön değiştirdiğini belirtmektedir. MGM'nin (2023) uzun dönemli gözlemleri, Türkiye'de batı ve güneybatı yönlü rüzgârların (özellikle lodos ve imbat gibi) enerji üretimi açısından en uygun yönleri oluşturduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, Türkiye'de yerel rüzgârlar sadece meteorolojik açıdan değil, aynı zamanda rüzgâr enerjisi planlaması ve bölgesel iklim konforu açısından da kritik öneme sahiptir. Özellikle Ege kıyılarda düzenli esen imbat rüzgârı, istikrarlı yapısı nedeniyle yenilenebilir enerji sistemlerinin optimizasyonu açısından dikkat çekmektedir (Ackermann &

Söder, 2002).

2. Rüzgar Enerjisinin Küresel ve Türkiye'deki Mevcut Durumu

Rüzgâr enerjisi, dünyada olduğu gibi Türkiye'de de giderek daha fazla önem kazanan yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir. Küresel ölçekte artan teknoloji yatırımları, düşen maliyetler ve enerji dönüşümüne yönelik politikalar rüzgâr enerjisinin yaygınlaşmasını hızlandırmaktadır. Türkiye ise sahip olduğu geniş kıyı şeridi, uygun topografiya ve farklı bölgelerde görülen istikrarlı rüzgâr koşullarıyla bu alanda yüksek bir potansiyele sahiptir.

2.1 Türkiye ve Dünya Genelinde Rüzgar Enerjisi Potansiyeli

Rüzgâr enerjisi, düşük karbonlu enerji dönüşümünde stratejik bir bileşen olarak öne çıkmaktadır. 2017 yılında 540 GW olan küresel rüzgar kurulu gücü, 2022'de 923 GW'a ulaşarak %70 artış göstermiştir (Tumse ve dig., 2024; Arshad & O'Kelly, 2019; Bilgili & Alphan, 2022). Uluslararası projeksiyonlar, 2030 yılında bu kapasitenin 3100 GW'a, 2050'de ise 8365 GW'a ulaşacağını göstermektedir (Darwish & Al-Dabbagh, 2020; Hackler ve dig., 2021). Rüzgâr enerjisinin küresel elektrik üretimindeki payı 2019 itibarıyle yaklaşık %4 iken, 2050 yılında %35'e ulaşması beklenmektedir (Tumse ve dig., 2024).

Offshore (deniz üstü) rüzgar kapasitesi, son on yılda en hızlı büyüyen segment olmuştur. 2020 yılında 35 GW seviyesinde olan kurulu güç, 2030'da 382 GW, 2050'de ise 2000 GW düzeyine çıkacaktır (Hoeser & Kuenzer, 2022; Bilgili & Alphan, 2022). Bu artışın temel nedenleri arasında, yüzer türbin teknolojilerinin gelişmesi, derin deniz alanlarının kullanımının artması ve yüksek verimlilik oranları bulunmaktadır (Watson ve dig., 2019; Bilgili & Alphan, 2022).

Küresel düzeyde Çin, Avrupa Birliği ve Birleşik Krallık, offshore kapasitede lider konumdadır. Çin son beş yılda yaklaşık 13 GW'lık kapasite artışıyla öne çıkmıştır (Bošnjaković ve dig., 2022). ABD, Almanya, Danimarka ve İspanya ise kara (onshore) rüzgar pazarında en yüksek büyümeye oranlarına sahip ülkeler arasındadır (Komarov ve dig., 2011; Timilsina ve dig., 2013).

2.2 Türkiye'deki Aktif Rüzgar Bölgeleri

Türkiye, son yıllarda rüzgar enerjisi alanında önemli bir ivme kazanmış ve hem kara (onshore) hem de deniz (offshore) kaynaklarını değerlendирerek enerji bağımsızlığını ve

sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda kayda değer ilerlemeler sağlamıştır. Ülkenin rüzgar enerjisi kapasitesi giderek artmaka olup, bu alandaki gelişmeler enerji arz güvenliğini güçlendirmekte ve fosil yakıtlara olan dışa bağımlılığı azaltmaktadır.

Güncel verilere göre Türkiye'de işletmede bulunan 99 rüzgar santrali toplamda 3.933 MW kurulu güce ve yılda 17.909,3 GWh üretim kapasitesine ulaşmıştır (Genç ve diğ., 2020; Yaniktepe ve diğ., 2013). Bu tesislerin üretim kapasitesi, ülke elektrik talebinin kayda değer bir bölümünü karşılamakta ve ulusal yenilenebilir enerji portföyünün önemli bir bileşenini oluşturmaktadır. Türkiye'nin teorik rüzgar enerjisi potansiyeli yaklaşık 48.000 MW düzeyindedir (Hepbaslı & Ozgener, 2004; Hanağasioğlu, 1999). Potansiyelin büyük bölümü Ege ve Marmara kıyılarında yoğunlaşmakta olup, bu bölgeler rüzgar hızları ve arazi uygunluğu bakımından ulusal ölçekte en verimli sahaları temsil etmektedir.

Kara (onshore) rüzgar enerjisi yatırımları bakımından en aktif bölgeler Ege ve Marmara kıyılarıdır. İzmir, Balıkesir ve Çanakkale illeri kurulu kapasite açısından ön sıralarda yer almaktır ve Türkiye'nin toplam rüzgar enerjisi üretiminde belirleyici rol oynamaktadır (Genç ve diğ., 2020). Bunun yanı sıra Akdeniz Bölgesi'nde Hatay ve Mersin çevresinde de yeni yatırımlar artış göstermekte, İç Anadolu'da ise yüksek rakımlı alanlarda orta ölçekli türbin projeleri planlanmaktadır (Şahin ve diğ., 2025).

Denizüstü (offshore) rüzgar enerjisi, Türkiye'de son yıllarda giderek daha fazla ilgi görmeye başlamıştır. Çalışmalar, Ege Denizi'nde Saros, Foça, Gökçeada, Bozcaada ve Bandırma; Marmara Denizi'nde Erdek, Silivri ve Adalar; Karadeniz kıyılarında ise Sinop ve Zonguldak çevresinin gelecekteki offshore türbin yatırımları için elverişli bölgeler olduğunu ortaya koymaktadır (Argin ve diğ., 2019; Duzcan & Kara, 2022; Yıldırım, 2022). Uygun derinlik koşullarında kurulum yapılabilecek bu alanların teknik olarak uygulanabilir offshore kapasitesi, mevcut ulusal kurulu gücü yaklaşıklık yarısına ulaşabilecek düzeydedir (Aksu & Gencer, 2025; Yıldırım, 2022). Özellikle yüzer (floating) türbin teknolojilerinin gelişmesi, derin deniz bölgelerinin enerji üretimi için değerlendirilebilmesine olanak tanımaktadır.

Türkiye'nin rüzgar enerjisi sektöründeki büyümeye, politika destekleri ve devlet teşvikleriyle hız kazanmıştır. Yenilenebilir enerji yatırımlarına yönelik alım garantileri, YEKA (Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanı) ihaleleri ve yatırım kolaylıklarları, sektörün gelişimini sürdürme kılmıştır (Yaniktepe ve diğ., 2013; Aksu & Gencer, 2025). Offshore projelerin hayata geçirilmesi ile birlikte enerji üretiminin çeşitlenmesi, karbon salımlarının azaltılması ve

dışa bağımlılığın düşürülmesi hedeflenmektedir (Genç ve diğ., 2020; Yıldırım, 2022).

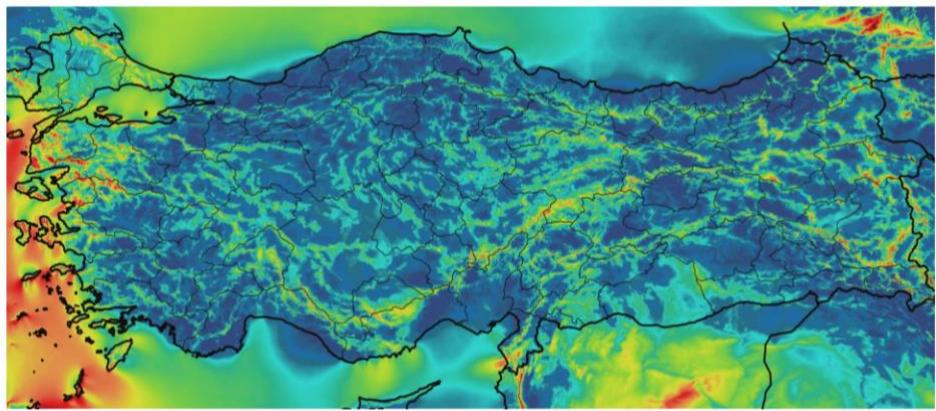
2.3 Yeni Avrupa Rüzgâr Atlası (NEWA) ve Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA)

Rüzgâr atlasları, belirli bölgelerde farklı yüksekliklerdeki rüzgâr hızı, yön ve turbülans özelliklerini yüksek çözünürlüklü haritalar hâlinde sunarak enerji projeksiyonları, türbin yerleşimi ve yatırım planlaması için kritik öneme sahiptir. Avrupa Birliği destekli New European Wind Atlas (NEWA) projesi, 2015–2020 yılları arasında yürütülmüş ve Avrupa ile komşu bölgeler (Türkiye dahil) için 30 m yatay çözünürlüklü, yüksek hassasiyetli rüzgâr iklimi haritaları üretmiştir (Dörenkämper ve diğ., 2020).

Proje kapsamında kullanılan WRF (Weather Research and Forecasting) modeli, ERA5 yeniden analiz verilerini temel alarak uzun dönemli mesoskal simülasyonlar gerçekleştirmiştir. Elde edilen sonuçlar, "model zinciri" (model chain) yaklaşımıyla mikroskal modellere (WAsP, CFD) entegre edilmiştir. Bu yapı, NEWA'nın karmaşık arazilerdeki rüzgâr akışını modelleme yeteneğini artırmıştır (Hahmann ve diğ., 2020).

Türkiye özelinde ise yasal mevzuata ve lisanslama süreçlerine esas teşkil eden kaynak, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından hazırlanan Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA)'dır. REPA, Türkiye'nin genel rüzgâr rejimini belirlemede temel başvuru kaynağı olsa da, bilimsel literatürde NEWA ile REPA arasında bazı teknolojik farklar vurgulanmaktadır:

- Veri Kaynağı ve Güncellilik: REPA daha eski meteorolojik veri setlerine dayanırken, NEWA en güncel ERA5 uydu ve yeniden analiz verilerini kullanır.
- Mekânsal Çözünürlük: NEWA, özellikle karmaşık topografyaya sahip bölgelerde (dağlık alanlar ve kıyı şeritleri) daha yüksek çözünürlüklü (3 km mesoskal → 30 m mikroskal) sonuçlar sunarak yerel sapmaları minimize eder.
- Kullanım Amacı: REPA, "Rüzgâr Enerjisi Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanları (YEKA)" ve lisans başvurularında resmi otorite iken; NEWA, yatırımcılar için teknik fizibilite (micrositing) ve finansal belirsizlik analizlerinde bilimsel doğrulama aracı olarak kullanılır.



Şekil

2.1: Türkiye Geneli 100 m Yükseklikteki Ortalama Rüzgar Hızı Dağılımı Haritası (Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli, t.y.)

Türkiye üzerine yapılan karşılaştırmalı analizlerde, NEWA simülasyonlarının özellikle Trakya, Çanakkale Boğazı, Balıkesir ve İzmir çevresinde rüzgâr hızını 100 m yükseklikte ortalama 7–9 m/s aralığında tahmin ettiği doğrulanmıştır. Ayrıca model, Karadeniz kıyılarında 120 m seviyelerinde deniz üzeri (offshore) rüzgâr potansiyelinin 10 m/s'ye yaklaştığını ortaya koyarak, REPA verilerini destekleyici nitelikte yüksek bir potansiyel işaret etmiştir (Hahmann ve dig., 2020).

Sonuç olarak; REPA ulusal strateji ve yasal çerçeveyi belirlerken, NEWA verileri Türkiye'nin karmaşık arazilerinde ve açık deniz alanlarında rüzgâr enerjisi potansiyelini yüksek doğrulukla belirlemekte; uzun dönem enerji üretimi tahmini açısından tamamlayıcı bir bilimsel güvenilirlik sağlamaktadır.

3. Rüzgar Enerjisinin Çevresel ve Ekonomik Faydaları

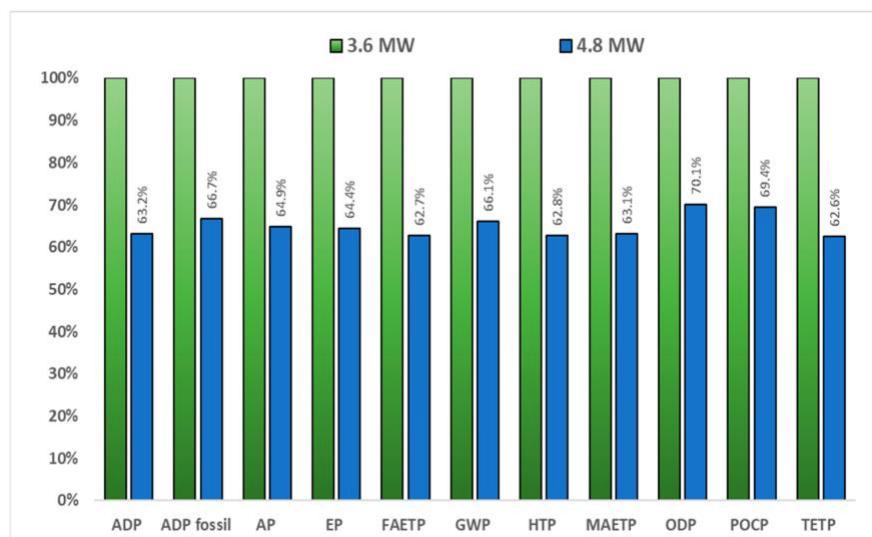
Bu bölüm; rüzgar enerjisini, yaşam döngüsü analizlerine dayalı çevresel sürdürülebilirlik performansı ve işletme-bakım stratejileri ile enerji arz güvenliğine katkı sağlayan ekonomik katma değeri açısından bütüncül bir yaklaşımla incelemektedir.

3.1 Çevresel Katkılar

Rüzgâr enerjisi, günümüzde iklim değişikliğiyle mücadelede en etkili yenilenebilir enerji teknolojilerinden biri olarak değerlendirilmektedir. Elektrik üretimi sırasında doğrudan sera gazı emisyonu oluşturmadığından, enerji sektörünün karbonsuzlaştırmasında temel bir

rol oynamaktadır. Ancak, çevresel etkilerin bütüncül biçimde değerlendirilebilmesi için yaşam döngüsü analizleri (Life Cycle Assessment – LCA) önem taşır. LCA yöntemi; rüzgâr turbinlerinin üretim, taşımacılık, kurulum, işletme, bakım, söküm ve geri dönüşüm aşamalarında ortaya çıkan çevresel etkilerin tamamını nicel olarak incelemektedir.

Türkiye koşullarında 3,6 MW ve 4,8 MW kapasiteli turbin modellerini kapsayan detaylı bir LCA çalışmasında, çevresel etkinin en büyük bölümünün çelik, epoksi ve fiberglas gibi malzemelerin üretim sürecinden kaynaklandığı belirlenmiştir. Aynı çalışmada, malzeme geri dönüşüm oranının artırılmasıyla toplam çevresel etkinin yaklaşık %49 oranında azalabileceği saptanmıştır. Bu bulgu, sürdürülebilir turbin tasarımları ve geri dönüşüm teknolojilerinin emisyon azaltımındaki önemini açıkça göstermektedir (Atılgan & Babuna, 2024).



Şekil 3.1: 3.6 MW ve 4.8 MW rüzgâr turbini modellerinin çevresel etki karşılaştırması (Atilgan Turkmen & Germirli Babuna, 2024)

Benzer biçimde, farklı turbin konfigürasyonlarına yönelik yapılan sistematik bir derleme çalışmasında, kara ve deniz tipi turbinlerin yaşam döngüsü emisyonları 5–20 g CO₂-eq/kWh aralığında hesaplanmıştır. Bu değerin fosil yakıtlı santrallerde 800–1000 g CO₂-eq/kWh düzeyinde olduğu dikkate alındığında, rüzgâr enerjisinin karbon yoğunluğunun geleneksel enerji kaynaklarına kıyasla yaklaşık %97 daha düşük olduğu görülmektedir (Mendecka ve diğ., 2019).

Bu bulgular birlikte değerlendirildiğinde, rüzgâr enerjisinin çevresel sürdürülebilirliğe katkısı üç ana başlık altında özetlenebilir:

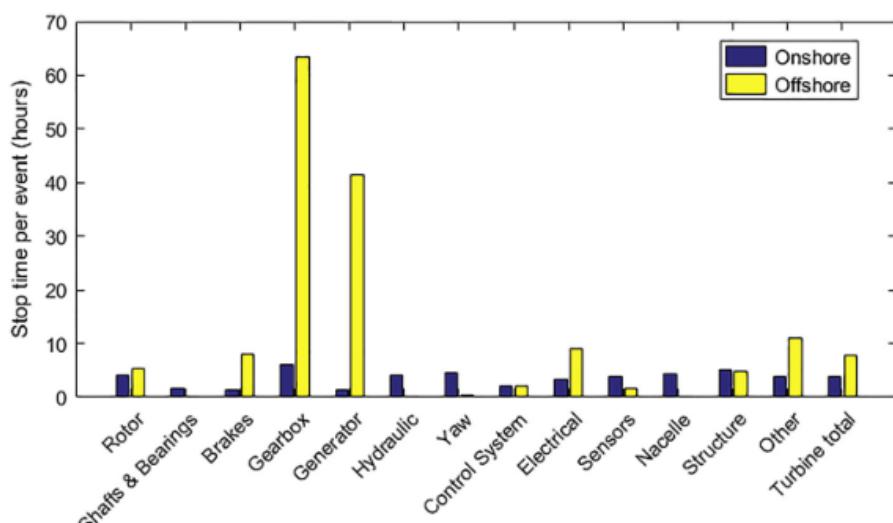
- Düşük Karbon Yoğunluğu: İşletme sürecinde neredeyse sıfır sera gazı salımı.
- Malzeme Döngüselliği: Geri dönüştürülebilir çelik ve kompozit malzeme kullanımıyla atık azaltımı.
- Uzun Ömürlü Altyapı: 20–25 yıllık türbin ömrü boyunca yüksek enerji geri kazanım oranı.

3.2 Ekonomik Katkılar

Rüzgâr enerjisi sektörü, yalnızca çevresel faydalar sağlamakla kalmaz; aynı zamanda ekonomik büyümeye, sanayi gelişimi ve istihdam açısından da güçlü bir katalizör işlevi görür. Türbin üretim zincirinde çelik, elektronik, kompozit, nakliye ve bakım gibi çok sayıda alt sektör yer almaktadır, bu da doğrudan ve dolaylı istihdam olanaklarını artırmaktadır.

Özellikle işletme ve bakım (O&M) süreçleri, santral ekonomisinin bel kemигini oluşturur. 500'den fazla türbin verisine dayanan geniş çaplı bir çalışmada, türbin bileşenlerinin arıza oranlarının enerji üretim maliyeti (Levelized Cost of Energy – LCOE) üzerinde doğrudan etkili olduğu saptanmıştır.

Araştırma sonuçlarına göre, önleyici bakım uygulamaları sayesinde LCOE değerinin %10–15 oranında azaltılabileceği gösterilmiştir. Bu durum, rüzgâr projelerinde ekonomik verimliliğin yalnızca kurulum maliyetlerine değil, operasyonel yönetim kalitesine de bağlı olduğunu ortaya koymaktadır (Dao ve diğ., 2019).



Şekil 3.2: Karasal (onshore) ve deniz üstü (offshore) rüzgâr türbinlerinde bileşen bazında ortalama duruş süresi karşılaştırması (Dao ve diğ., 2019)

Makro düzeyde rüzgâr enerjisi yatırımları, enerji ithalatına olan bağımlılığı azaltarak cari açığın düşürülmesine ve enerji arz güvenliğinin artırılmasına katkı sağlar. Rüzgâr santrallerinin yerli üretim oranının artması, ülkelerin dış ticaret dengesini olumlu yönde etkiler. Türkiye özelinde yapılan ekonomik analizler, rüzgâr enerjisine yapılan yatırımların uzun vadede fosil yakıt ithalatını azalttığını ve enerji bağımsızlığına katkı sunduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, rüzgâr enerjisi ekonomik açıdan iki yönlü bir fayda üretir:

- Kısa vadede istihdam yaratır, sanayi ekosistemini canlandırır ve yerel tedarik zincirlerini güçlendirir.
- Uzun vadede enerji ithalatını azaltarak dışa bağımlılığı düşürür ve ekonomik istikrar sağlar.

4. Rüzgar Türbinleri ve Bileşenleri

Bu bölümde, rüzgar türbini teknolojileri ile rüzgar ölçüm ve veri toplama süreçlerinin teknik esasları incelenmektedir.

4.1 Rüzgar Ölçümünün Amacı ve Önemi

Dünyamızın sahip olduğu yenilenebilir enerji potansiyeli yeryüzündeki ülkelerin enerji ihtiyaçlarının toplamını karşılayacak kapasitededir. Örneğin, günlük rüzgar enerjisi girdisinin %1'inin kullanımıyla dünya enerjisinin tamamını karşılamak mümkündür. (Durak & Özer, 2008)

Ekonomik kalkınma ve nüfus artışıyla birlikte enerji talebi artış eğilimi göstermiştir. Yenilenebilir enerji tükenmezdir ve çok az kirliliğe neden olur; bu da gelişme için geniş umutlar sunar. Son yıllarda rüzgar enerjisi, temel bir yenilenebilir enerji kaynağı olarak geliştirilmiştir. Rüzgar enerjisinin kullanımı oldukça çevre dostudur ve ekonomik büyümeye kritik bir rol oynar. Rüzgar enerjisinin özelliklerini ve potansiyelini değerlendirmek, rüzgar enerjisinin etkili bir şekilde geliştirilmesinde ilk adımdır. Belirli bir konumdaki rüzgar hızı dağılımı, mevcut rüzgar enerjisini belirler. Belirli bir bölgedeki rüzgar hızı verilerini modellemek için tüm potansiyel rüzgar hızı dağılım modelleri dikkate alınmalıdır.

4.1.1 Ölçüm ve Temsil Süresi

Temsil süresi, bir meteorolojik gözlemin, belirli bir bölgedeki genel atmosfer koşullarını ne kadar doğru yansittığını ifade eder. Tek bir istasyonun ölçümü, çevresindeki 10-30

kilometrelik bir alanın ortalama koşullarını temsil edebilir. Temsil süresi, veri kalitesini doğrudan etkiler. Düşük temsil süresine sahip veriler, modelleme ve analizlerde yanıltıcı sonuçlara yol açabilir. Bu nedenle, veri setlerinin temsil süresi dikkate alınarak analizler yapılmalıdır. (Nappo, C. J., 1983)

Ölçüm süresi, belirli bir yerde veri toplama süresini ifade eder. Rüzgar ölçüm süresinin yeterli uzunlukta olması, o bölgedeki mevsimsel ve yıllık değişkenlikleri temsil edebilmesi için gereklidir. Ölçüm süresi içinde veri kaybı oranı %20'yi geçmemeli, eksik veriler ise istatistiksel yöntemlerle (doğrusal interpolasyon, hareketli ortalama, korelasyon vb.) tamamlanmalıdır (Durak & Özer, 2008)

Kaya (2021), enerji üretim tahminlerinin güvenilir olması için ideal durumda 10 yıllık uzun dönem veriye ihtiyaç duyulduğunu; ancak bu sürenin ekonomik ve pratik olarak uygulanabilir olmaması nedeniyle MCP (Measure–Correlate–Predict) metodolojisinin kullanıldığını belirtmektedir. Bu yöntem, Kısa süreli ölçüm verilerini kullanarak uzun dönemli rüzgar kaynaklarını tahmin etmek için kullanılan istatistiksel bir yöntemdir. Özellikle rüzgar enerjisi projelerinde, kısa süreli ölçüm verilerinin uzun dönemli verilerle ilişkilendirilerek daha güvenilir tahminler elde edilmesini sağlar. MCP yöntemiyle, sahada ölçülen en az 1 yıllık veri, uzun dönem meteorolojik verilerle ilişkilendirilerek daha geniş zaman dilimlerine genellenir. (Derrick, M., 1992)

Bu yöntemin aşamaları şöyledir:

- Ölçüm (Measure): Hedef bölgedeki kısa süreli (genellikle 1 yıl) rüzgar şiddet ve yönü verileri toplanır.
- Korelasyon (Correlate): Bu kısa süreli veriler, yakınlardaki uzun dönemli (en az 10 yıl) referans istasyonlarından alınan verilerle karşılaştırılır. Veriler, rüzgar yönlerine göre grupperlendirilir ve her bir yön için doğrusal regresyon analizi yapılır.
- Tahmin (Predict): Elde edilen regresyon katsayıları kullanılarak, hedef bölgedeki uzun dönemli rüzgar hızı dağılımları tahmin edilir.

4.1.2 Ölçüm Yapılacak Noktanın Seçimi

Rüzgâr ölçüm istasyonlarının kurulacağı yerlerin belirlenmesi oldukça önemlidir. İstasyonun kurulacağı yer bölgeyi temsil etmelidir. Ölçüm direğinin çevredeki engellerle olan mesafesi, engel yüksekliğinin 10 katından az olmalıdır. Çünkü bir nesnenin ölçüm direğine olan uzaklığı yüksekliğinin 10 katı kadar mesafe içinde ise, bu nesne, yakın çevresel engel olarak

tanımlanır.

Daha uzak mesafelerdeki nesneler engel sınıfına girmez ve arazi pürüzlülüğü olarak değerlendirilir. Tepe arkalarında ve dağ eteklerinde olabilecek yer seçimleri tercih edilmemelidir. Aksi takdirde oluşacak türbülans nedeniyle ölçülecek rüzgâr hızı gerçek değerinden çok farklı olabilmektedir. Rüzgâr ölçüm istasyonunun kurulacağı yerlerde rüzgar akışının daima laminer (düzgün akış) olması ölçüm sonuçlarını daha gerçekçi yapacaktır. (Kaya,2021)

Rüzgar ölçüm istasyonu kurulacak noktanın seçimi, ölçüm verilerinin temsil gücü ve enerji potansiyeli hesaplamalarının doğruluğu açısından büyük önem taşır. Troen ve Petersen (1989), European Wind Atlas adlı çalışmalarında ölçüm noktasının seçiminde arazi pürüzlülüğü, engel etkisi ve orografik yapının dikkate alınması gerektiğini vurgulamıştır. Arazi üzerindeki engeller, özellikle binalar, ağaçlar veya tepeler, rüzgar akışında türbülans oluşturarak ölçüm sonuçlarını bozabilir. Bu nedenle ölçüm direği, engellerden en az on kat engel yüksekliği kadar uzak bir noktaya yerleştirilmelidir. Ayrıca, rüzgar yönüne dik gelen yamaç ve sırtlar rüzgarın hızını artırırken, vadiler ve engel arkasında kalan alanlar akışı zayıflatır. Troen ve Petersen'in geliştirdiği Wind Atlas Analysis and Application Program (WAsP) metodolojisi, bu arazi ve engel etkilerinin nicel olarak modellenmesini sağlamış ve ölçüm yerlerinin rüzgar kaynağını en iyi temsil edecek şekilde belirlenmesi için standart bir yaklaşım ortaya koymuştur. Bu bağlamda ölçüm noktası seçimi, yalnızca rüzgarın ortalama hızına değil, aynı zamanda arazinin topografik karakterine ve pürüzlülük sınıfına bağlı olarak yapılmalıdır.

Ölçüm noktası seçimi, aynı zamanda rüzgar enerji santrali sahasında türbinlerin yerleştirilmesi sürecini ifade eden micrositing kavramıyla doğrudan ilişkilidir. Micrositing, sahadaki rüzgar hızının, yönünün ve türbülans özelliklerinin arazi şekline bağlı olarak değişimini dikkate alan bir optimizasyon sürecidir. Troen ve Petersen (1989) tarafından geliştirilen WAsP metodolojisi, bu mikro ölçekli analizlerde temel fiziksel modelleri sağlamaktadır.

Doğu konumda yapılan rüzgar ölçümü, sahadaki akışın gerçeğe en yakın biçimde modellenmesini ve türbin yerleşimlerinin enerji verimliliği açısından optimize edilmesini mümkün kılar. Bu nedenle ölçüm noktasının arazi pürüzlülüğü, engel etkisi ve orografik yapıya göre doğru biçimde seçilmesi, yalnızca güvenilir ölçüm verilerinin elde edilmesini değil, aynı zamanda mikrositting çalışmalarının başarısını da doğrudan belirleyen temel unsurlardan biridir (Troen & Petersen, 1989).

4.2 Rüzgar Ölçüm Aletleri

Rüzgâr, atmosferde iki nokta arasındaki basınç farkından doğan ve genellikle yatay ya da yataya yakın yönde gerçekleşen hava kütlesi hareketidir. Bu hareket, belirli bir vektör boyunca etkili olan bir kuvvet şeklinde tanımlanabilir. Dolayısıyla rüzgâr, hız ve yön olmak üzere iki temel fiziksel bileşenle ifade edilir.

Rüzgâr hızı, havanın yatay düzlemdeki hareket süratini gösterir ve meteorolojik ölçümlerde farklı birimlerle ifade edilir. Sinoptik meteorolojide genellikle “knot”, klimatolojik çalışmalarda ise saniyede metre (m/s) veya saatte kilometre (km/h) şeklinde kullanılmaktadır. Rüzgâr hızının çeşitli tiplerdeki anemometre veya anemograf cihazlarıyla yapılır.

Rüzgâr yönü ise, rüzgârin ölçüm yapılan noktaya hangi doğrultudan geldiğini belirtir. Yön tayini, coğrafi kuzey esas alınarak saat ibresi yönünde derece cinsinden yapılır. Bu yön genellikle anemometrelerin üst kısmında bulunan rüzgâr okları ya da yön sensörleri yardımıyla belirlenir (Durak & Özer, 2008).

4.2.1 Anemometre Tipleri

- Basınç tablalı anemometre

Yön tayini rüzgar gülünden alınır ve 16 yön üzerinden değerlendirilir. Hız ise levhanın tutturulduğu yarıçember üzerindeki halkalardan okunur. Hız levhası kaçinci halkaya geliyorsa o halka bofor tablosunda hangi boforu gösteriyorsa o kayıt edilir. Alet 3 kısımda incelenir:

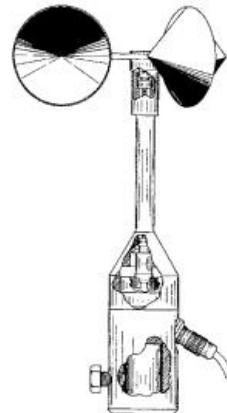
1- Kuvvet levhası (Beaufort Tablosu) : Tablanın boyutu 12×8 cm olup bu ölçü değişebilmektedir. Tabla rüzgar sakin iken yere dik olarak durmakta olup rüzgar hızına bağlı olarak hareketini 90 lik açı içerisinde yapar. Tablanın bağlı bulunduğu yarıçember şeklindeki kol üzerinde rüzgar hızını bofor cinsinden ifade eden 5 tane kırmızı bölme vardır. Tablanın bağlı bulunduğu kolun bölmeler üzerindeki yerine göre rüzgar şiddeti ölçülür. Kuvvet levhası kırmızı halkaya ulaşmadan sallanırsa rüzgar hızı 1 bofor olarak kabul edilir.

2- Yön göstergesi (jiruet): Bir ucu topuz şeklinde diğer ucu çift kanatlı olup rüzgar esis yönüne göre topuz hareket eder.

3- Yön harfleri: Jiruetten yön tayini 4 ana yön (N, W, S, E) esas alınarak yapılır. Büyük klimatoloji istasyonlarında 16 yön üzerinden, küçük klimatoloji istasyonlarında 8 yön üzerinden yapılır. (Durak & Özer, 2008).

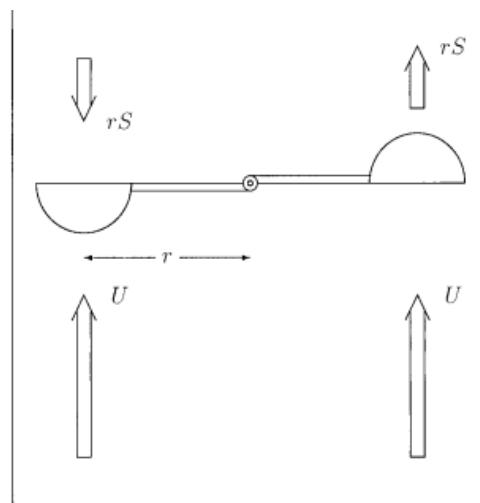
- Kupa (Cup) Anemometre

Kupa anemometreler, üç veya dört yarı kule biçimindeki kupaların rüzgâr akımı içindeki asimetrik sürükleme etkisi sonucu dönme hareketi üretmesine dayanır. Rüzgâra bakan yüzeyin sürükleme katsayısı, rüzgâr arkası kalan yüzeye göre daha büyük olduğundan kupalar üzerinde oluşan kuvvetler arasında bir fark meydana gelir ve bu fark, rotorun tek yönde dömesini sağlayan net torku oluşturur.



Şekil 4.1: Küp anemometre Ris-70 model Yüksekliği 0,27 m, rotor yarıçapı $r = 0,058$ m ve konik küp çapı 0,07 m'dir. Karbon takviyeli plastikten üretilen rotorun ağırlığı 0,04 kg. (Kristensen, 1999)

Kupaların boyutu, rüzgârla etkileşen alanı belirleyerek sürükleme kuvvetinin büyüklüğünü doğrudan etkiler; büyük kupalar daha yüksek tork üretir ancak yüksek hızlarda lineerlikten sapma eğilimi gösterebilir. Kol uzunluğu, kupaya etki eden kuvvetin dönme ekseni olan uzaklığını belirlediği için torkun etkinliğini doğrudan artırır; kol uzadıkça tork artar fakat rotorun ataleti de büyür ve ani hız değişimlerine yanıt yavaşlayabilir. Sürükleme katsayıları, özellikle rüzgâra bakan ve arkaya kalan yüzeyler arasındaki fark sayesinde net torkun büyülüğünü ve rotorun dönme hızını belirleyen temel aerodinamik unsurdur.



Şekil 4.2: Kupa anemometre rotoruna rüzgar torkunun şematik diyagramı (Kristensen, 1999)

Bu üç parametre birlikte çalışarak rotor dönme frekansı ile rüzgâr hızı arasındaki yaklaşık lineer ilişkinin kararlılığını ve ölçüm hassasiyetini belirler. Kristensen (1999), kupa anemometrelerin basit mekanik yapısı, kararlı kalibrasyon özellikleri ve yüksek dayanıklılıkları nedeniyle meteorolojik gözlemlerde ve rüzgâr enerjisi çalışmalarında uzun süredir standart hız ölçer olarak kullanıldığını vurgulamaktadır.



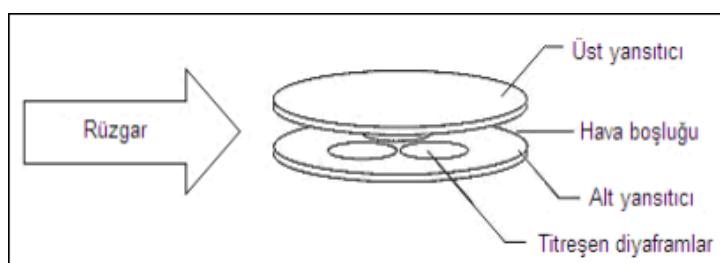
Şekil 4.3: Küp anemometre ve rüzgar yelpazesinin birlikte bulunduğu bir meteorolojik ölçüm direği (Ahrens, 2009)

- Propeller (Pervaneli) Anemometre

Propeller anemometreler, yatay eksende dönen pervane ve dikey eksende yön göstergesi içerir. Hem hız hem yön bilgisi aynı anda elde edilebilir. Mobil ve sabit istasyonlarda kullanılır, düşük ve orta hızlarda yüksek hassasiyet sağlar (Durak & Özer, 2008).

- Ultrasonik Anemometre

Ultrasonik anemometre, rüzgâr hızını ve yönünü ultrasonik (akustik) dalgaların bir algılayıcı sistemi içinde yayılım özelliklerini kullanarak ölçen mekanik temassız, yüksek hassasiyette bir rüzgâr ölçüm cihazıdır. Bu yöntemde herhangi bir döner ya da sürtünmeye maruz kalan parça bulunmadığından, sistem tüm hava koşullarında güvenilir bir performans sunar ve mekanik anemometrelerde görülen aşınma, buzlanma veya hareketli parçaların durması gibi sorunları ortadan kaldırır. (Durak & Özer, 2008)



Şekil 4.4: Ultrasonik anemometre çalışma prensibi (Durak & Özer, 2008)

- Sıcak Telli (Hot-Wire) Anemometre

Havanın tel üzerindeki ısı kaybına dayanarak hız ölçümü yapar. Laboratuvar ve düşük hız ölçümelerinde yüksek hassasiyet sağlar. Mikro ölçekli türbülans çalışmalarında kullanılır (Mortensen, 1994).

- Basınç Farkı (Pitot Tüpü) Anemometre

Pitot tüpleri, toplam basınç ile statik basınç arasındaki farkı ölçer ve bu fark rüzgârin dinamik basıncını temsil eder. Bu yöntem, yüksek frekansta ölçüm yapma, güçlü rüzgâr hızlarında yüksek doğruluk ve neredeyse lineer kalibrasyon avantajları sunar (Suomi & Vihma, 2018).

- LIDAR (Light Detection and Ranging)

Lazer ışınlarıyla yansiyan partiküllerden Doppler kayması ölçüleerek rüzgâr profili çıkarılır. 40–300 m aralığında ölçüm yapabilir, arazi etütlerinde ve türbin ön değerlendirmelerinde kullanılır (Mortensen, 1994).

- SODAR (Sonic Detection and Ranging)

Ses dalgaları kullanılarak atmosferik sınır tabakadaki rüzgâr ölçülür. LIDAR'a göre maliyeti düşük, ancak gürültüden etkilenebilir. Yüksek irtifa profili elde etmede tercih edilir (Suomi & Vihma, 2018).

4.2.2 Yön Sensörleri

- Mekanik Rüzgar Yelpazesi (Wind Vane)

Rüzgârin geldiği doğrultuyu ok veya kanat ile gösterir. Genellikle mekanik anemometrelerle birlikte kullanılır (Durak & Özer, 2008).



Şekil 4.5: Rüzgar Yelpazesi (Ahrens, 2009)

- Ultrasonik Yön Sensörleri

Ultrasonik anemometrelerde hız ve yön bilgisi eşzamanlı elde edilir. Üç eksenli modeller türbülans analizleri için uygundur (Suomi & Vihma, 2018).

- LIDAR ve SODAR Sistemlerinde Yön Ölçümü

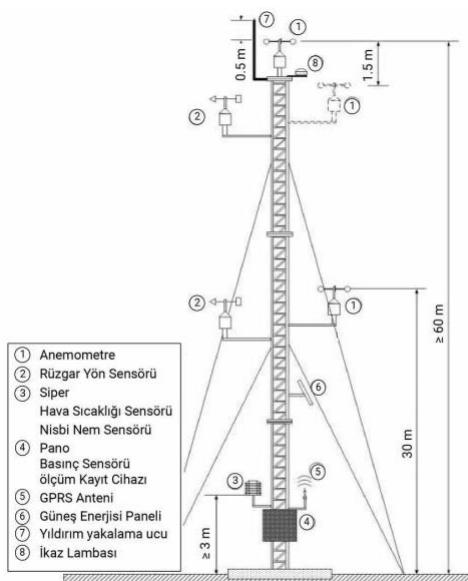
Doppler analiziyle hız bileşenleri ayırtıldığında yön bilgisi de elde edilir. Büyük türbin sahalarında rüzgâr profili çıkarımında kritik teknolojilerdir (Mortensen, 1994).

4.3 Rüzgar Ölçüm Direkleri

Rüzgar ölçüm direkleri, sahaya özgü rüzgar rejiminin güvenilir biçimde belirlenmesi için kullanılan temel arazi ölçüm altyapısıdır. Direk üzerinde farklı yüksekliklere yerleştirilen anemometre, rüzgar yön sensörleri ve yardımcı meteorolojik sensörler aracılığıyla uzun dönemli veri setleri elde edilir. Bu bölümde rüzgar ölçüm direklerinin yapısal özellikleri, yer seçiminde dikkate alınan kriterler ve çevresel koşulların ölçüm kalitesine etkileri tartışılmaktadır.

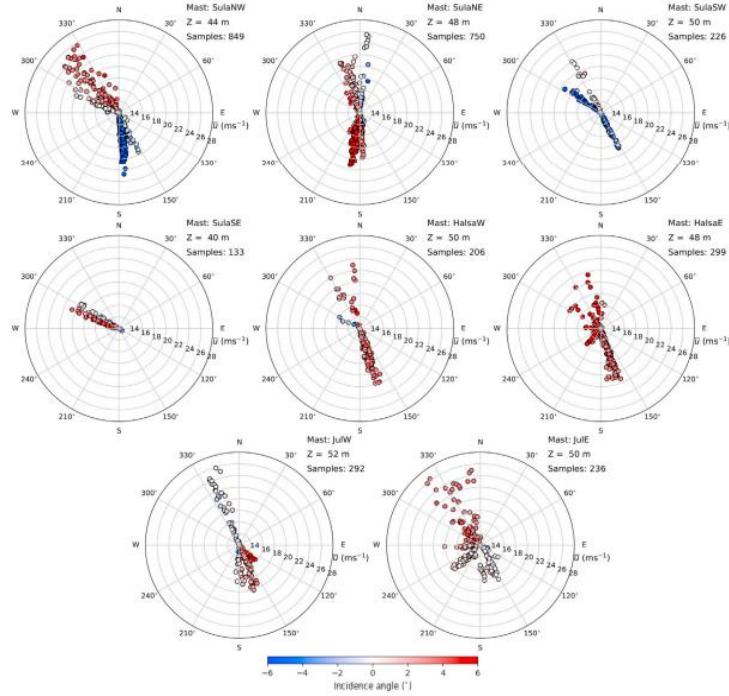
4.3.1 Direk Yüksekliği, Konumlandırma ve Orografik Etkiler

Rüzgar ölçüm direklerinin yüksekliği, yerleştirilmesi ve çevresel şartları, elde edilen verilerin doğruluğu ve sahayı yansıtma kapasitesi bakımından kritik bir öneme sahiptir. Özellikle karmaşık topografyalarda; dağlık vadiler, fiyortlar veya yoğun ormanlık alanlar gibi bölgelerde, yapılan gözlemler, direk yüksekliği ve yerleşiminin rüzgar hızı, türbülans şiddeti ve yön ölçümlerinde anlamlı farklar yarattığını göstermektedir (Midjiyawa ve dig., 2021; Jing ve dig., 2020; Hagemann ve dig., 2012; Zhang ve dig., 2020). Bu farklılıklar, hem rüzgar enerjisi tesisleri ön fizibilite analizlerinde hem de yapısal yük incelemelerinde ölçüm hataları oluşturabilmektedir.



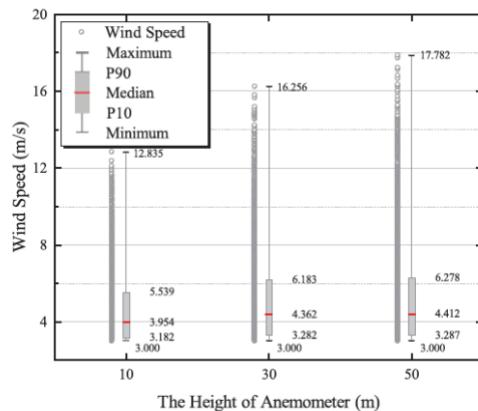
Şekil 4.6:Rüzgar Ölçüm İstasyonunun Şematik Gösterimi

Arazi yapıları ve bitki örtüsünün rüzgar ölçümleri üzerindeki etkisi, literatürde sıkça belirtilmiştir. Özellikle fiyort ve vadi tabanlarına kurulan ölçüm direklerinde, rüzgarın geliş açısı, yönelimi ve kayma profillerinde belirgin sapmalar meydana gelmektedir (Midjiyawa ve dig., 2021; Furevik ve dig., 2020). Bu durum, özellikle kompleks akış koşullarının hâkim olduğu dar vadilerde, ölçüm sonuçlarının yüksek varyans göstermesine neden olur. Hagemann ve dig. (2012), ormanlık alanlarda 200 m yüksekliğe kadar yapılan ölçümleerde, alt seviyelerde türbülans şiddetinin daha yüksek, üst seviyelerde ise hız gradyeninin daha belirgin olduğunu ortaya koymuştur.



Şekil 4.7: Farklı fiyort bölgelerinde yer alan meteorolojik ölçüm direklerinde ortalama rüzgar geliş açısının (Mean Incidence Angle, IA) rüzgar yönüne göre değişimi.
(Uyarlanmıştır: Midjiyawa ve diğ., 2021)

Direk yüksekliği, ölçümlerin doğruluğunda bir başka önemli faktördür. Yüksekliğin artırılması, atmosferik sınır tabakasındaki dikey rüzgar dağılımı ve türbülans yapısının daha hassas bir şekilde modellenmesine olanak tanır. Jing ve diğ. (2020) tarafından yürütülen dağ vadisi ölçümlerinde, 10 m ile 50 m yükseklikler arasında yapılan karşılaştırmalarda, rüzgar hızında %15–30 oranında artış ve türbülans şiddetinde azalma tespit edilmiştir. Bu bulgu, ölçüm direklerinin düşük konumlarda kalması durumunda enerji potansiyelinin olduğundan düşük tahmin edilebileceğini göstermektedir. Çoğu mühendislik uygulamasında 30 m'lik direkler yeterli kabul edilmekle birlikte, dağlık veya yüksek yapıların bulunduğu sahalarda 60–100 m aralığında direklerin kullanılması önerilmektedir (Hagemann ve diğ., 2012; Zhang ve diğ., 2020).



Şekil 4.8: Ortalama rüzgar hızının düşey dağılımı

4.3.2 Direklerde Bulunması Gereken Sensörler

Rüzgar ölçüm direkleri, atmosfer verilerinin doğru, sürekli ve yüksek temsil kabiliyetiyle toplanmasını sağlayan ölçüm altyapılarıdır. Bu direklerdeki sensörlerin tipi, konumu ve kalibrasyonu, ölçümün kalitesini doğrudan etkiler. Esasen, rüzgar yönü ve rüzgar hızı sensörleri direğin ana unsurlarını meydana getirir. Bunlara ek olarak sıcaklık, nem, basınç ve türbülans ölçümü yapan sensörler, atmosferik şartların daha detaylı incelenmesine imkan tanır.

Rüzgar hızı ölçümleri genellikle üç farklı sensör teknolojisiyle yapılır: mekanik anemometreler, ultrasonik anemometreler ve yeni nesil triboelektrik veya kapasitif sensörler. Mekanik sensörler (örneğin fincanlı anemometreler), uzun yıllardır standart kabul edilmekte birlikte hareketli parçalara bağlı oldukları için bakım gerektirir. Ultrasonik anemometreler ise ses dalgalarının geçiş süresini ölçerek rüzgar hızını belirler ve hareketli parça bulundurmadıkları için düşük bakım maliyeti ve yüksek hassasiyet sunar (Shan ve diğ., 2023; Ye ve diğ., 2022). Yeni nesil triboelektrik sensörler, piezoelektrik prensiplerle çalışarak hem rüzgar hızını hem de yönünü aynı anda ölçebilir (Wang ve diğ., 2018; Yi ve diğ., 2024).



Şekil 4.9: Wied Rini kulesindeki sensör yerlesimi (Seifert, J. K., Grant, I., ve Stull, R., 2012)

Ayrıca, sıcaklık ve nem sensörleri de rüzgar ölçüm direklerinde yaygın olarak bulunur, çünkü bu çevresel faktörler rüzgar ölçümünün doğruluğunu etkileyebilir ve enerji potansiyeli analizlerinde gereklidir. Modern ölçüm direklerinde, farklı yüksekliklerde birden fazla sensör yerleştirilerek rüzgar profilinin dikeyde de izlenmesi sağlanır.

Sonuç olarak, güvenilir bir rüzgar ölçüm direği sisteminde en az dört temel sensör bulunmalıdır:

- Rüzgar hızı sensörü (mekanik veya ultrasonik)
- Rüzgar yönü sensörü
- Sıcaklık sensörü
- Nem sensörü

Gelişmiş sistemlerde bunlara ek olarak basınç, türbülans yoğunluğu, partikül madde ve yağış sensörleri de eklenebilir.

4.3.3 Ölçüm Noktasının Belirlenmesi: Arazinin Pürüzlülüğü, Engellerden Uzaklık

Rüzgar ölçüm direklerinin yer seçimi, ölçüm verilerinin doğruluğunu ve uzun dönemli enerji potansiyeli tahminlerinin güvenilirliğini doğrudan etkileyen bir faktördür. Özellikle arazinin pürüzlülüğü (surface roughness) ve yakın çevredeki engellerden uzaklık, rüzgar akışının istikrarını ve ölçüm temsiliyetini belirleyen temel unsurlardır.⁹

Arazinin pürüzlülüğü, zeminin yüzey yapısına (örneğin açık tarım alanı, orman, yerleşim bölgesi veya su yüzeyi) bağlı olarak rüzgar hızında meydana gelen düşüş oranını ifade eder. Pürüzlük arttıkça, yüzeye yakın tabakalarda sürtünme artar ve rüzgar profili dikleşir. Bu etki, rüzgar kesmesi katsayısı (WSC) veya pürüzlük uzunluğu (z_0) parametreleriyle niceł olarak tanımlanır (Manwell ve diğ., 2010; Bañuelos-Ruedas ve diğ., 2010). Düz, açık arazilerde z_0 değeri 0.003 m civarındayken, ormanlık veya yapılaşmış alanlarda bu değer 0.3 m'yi aşabilir (Genç ve diğ., 2009). Aksaray örnekleminde yürütülen çalışmada, 0.003–0.01 m aralığındaki pürüzlük değerlerinin logaritmik model için en uygun sonuçları verdiği görülmüştür (Külüm ve diğ., 2023).

Engellerden uzaklık, ölçüm direğinin rüzgar akışından minimum sapma almasını sağlamak için gereklidir. Binalar, ağaçlar veya türbinler gibi engeller, rüzgar alanında gölgeleme (shadowing) ve türbülans oluşturur. IEC 61400-12-1 standardına göre, ölçüm direkleri çevredeki en yüksek engelden en az 10 katı mesafe uzağa yerleştirilmelidir. Bu sayede engelin yarattığı girdap ve yavaşlama etkileri ölçüm noktasına ulaşmadan sönmelenir (Madsen & Risø, 2008; MEASNET, 2016).

Külüm ve diğ. (2023) tarafından Aksaray, Türkiye'de yürütülen karşılaştırmalı LIDAR-mast ölçüm çalışması, arazi pürüzlüğünün rüzgar kesmesi ve türbülans üzerindeki doğrudan etkisini göstermiştir. LIDAR ve anemometre verilerinin korelasyonu 0.999 gibi yüksek bir değerde bulunmuş, bu da uygun yer seçimi ve pürüzlük değerinin doğruluğu açısından önemli bir göstergedir. Ayrıca, 92 m ile 125 m arasında rüzgar kesmesi etkisinin yüksek, 165 m üzerindeki yüksekliklerde ise pürüzlük kaynaklı etkilerin azaldığı saptanmıştır.

Sonuç olarak, ölçüm noktasının belirlenmesinde:

- Pürüzlük uzunluğu (z_0), arazinin türüne göre tanımlanmalıdır;
- Engellerden uzaklık, en az 10 kat yükseklik kuralına göre sağlanmalıdır;
- Yükseklik seçimi, hem pürüzlük hem de topografik yapı dikkate alınarak yapılmalıdır.

Bu kriterler, ölçüm direğinin rüzgar akışını temsil etme yeteneğini artırır, hatalı WSC tahminlerini azaltır ve uzun dönemli enerji modellemelerinde belirsizliği minimuma indirir.

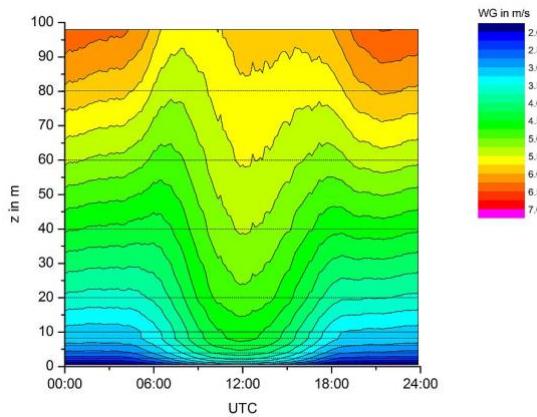
4.3.4 30 m – 60 m – 80 m Direk Farkları

Rüzgar hızının yükseklikle artması sınır tabaka dinamikleriyle ilgilidir. Yüzeye yakın bölgede sürtünme, arazi pürüzlülüğü ve engeller (örneğin binalar, ağaçlar) türbülansı artırır ve akış profilini bozar. 30 m seviyesinde ölçüm yapılan direkler bu yüzey etkilerine en çok maruz kalan sistemlerdir. Bu yükseklikte ölçülen rüzgar hızı genellikle düşük, türbülans yoğunluğu ise yüksektir. Bu nedenle 30 m direkler kısa türbinler veya ön inceleme ölçümleri için uygundur (Barber ve diğ., 2020).

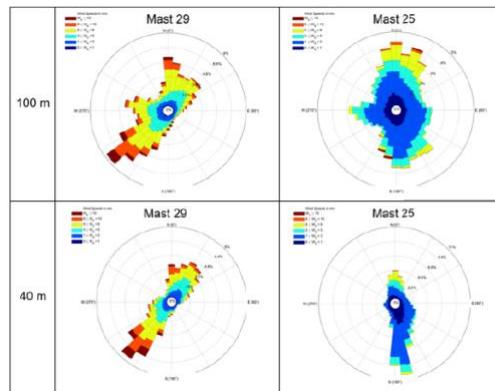
60 m direkler, yüzey etkilerinden kısmen uzaklaşarak daha dengeli bir akışın ölçülmesini sağlar. Bu yükseklik genellikle türbin göbek yüksekliği ile ilişkilidir ve rüzgar kesmesi (wind shear) analizleri için tercih edilir. Orta yüksekliklerdeki ölçümler, pürüzlülüğün ve atmosferik kararlılığın etkilerini ayırmada dengeli sonuçlar verir (DWD, 2024).

80 m seviyesinde ölçüm yapan direkler, yüzey etkilerinin büyük ölçüde azaldığı ve laminer akışın baskın olduğu bölgeye ulaşır. Bu yükseklikte rüzgar hızı yaklaşık %15–25 oranında artar, türbülans ise belirgin biçimde azalır (Jing ve dig., 2020). 80 m mastlar modern rüzgar türbinlerinin nominal göbek yüksekliğine en yakın ölçümü sağladıklından enerji tahminleri ve güç eğrisi doğrulamaları için en güvenilir veriyi verir.

Bu farklar, yükseklik arttıkça hem rüzgar hızı hem de istikrarın artmasıyla ilişkilidir. Bu nedenle saha analizlerinde 30–60–80 m arası çok seviyeli ölçümler kullanılarak hem kesme profili hem de türbülans yapısı belirlenir. Bu yaklaşım, logaritmik ve güç yasası modellerinin kalibrasyonu açısından zorluludur (Külüm ve dig., 2023).



Şekil 4.10: GM Falkenberg'deki 99 metrelük kule boyunca rüzgar hızının ortalama günlük döngüsü (1998-2016) (Deutscher Wetterdienst. (t.y.).



Şekil 4.11: 100 metre ve 40 metrede direkler için ölçülen rüzgar gülleri. (Barber, S., ve dig., 2020.)

4.3.5 Direk Tipi: Kafes ve Boru

Rüzgar ölçüm direklerinin yapısal tasarımları, hem ölçüm doğruluğunu hem de maliyet etkinliğini belirleyen temel unsurlardan biridir. Bu direkler genellikle iki ana tipte inşa edilir: boru tipi (tubular) ve kafes tipi (lattice). Her iki yapı türü, farklı mühendislik gereksinimlerine, zemin koşullarına ve proje ölcüklerine göre avantajlar sunar.

Boru tipi direkler, çelik veya alüminyumdan imal edilen silindirik kabuk elemanlarından oluşur. Bu direkler, yüksek rıjilik ve aerodinamik stabilite sağlayarak rüzgar yüklerinin düzgün bir biçimde dağılmasını mümkün kılar. Boru kesitli direklerin avantajı, yüksek mukavemet/ağırlık oranı ve minimum yüzey pürüzlülüğü sayesinde ölçüm sensörlerinin daha kararlı veri elde etmesini sağlamasıdır. Ancak yüksekliğin artmasıyla birlikte kabuk kalınlığı, temeldeki momentler ve üretim maliyetleri önemli ölçüde yükselir. Özellikle 100 m üzerindeki yapılar için boru kesitli direklerde burkulma (buckling) ve yerel stabilite problemleri gözlemlenebilir (Stavridou, Koltsakis & Baniotopoulos, 2020).

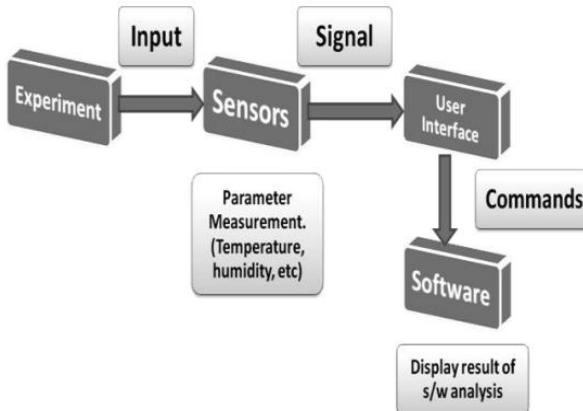
Kafes tipi direkler ise üçgen veya kare kesitli modüler çelik profillerden oluşturulur. Bu yapılar, ağırlık açısından daha verimli, taşınamabilirliği yüksek ve sahada montajı kolay sistemlerdir. Stavridou ve diğ. (2020) çalışmasında, kafes kulelerin aynı yükseklikteki boru kulelere göre yaklaşık %40 daha hafif olduğu, dolayısıyla nakliye ve kurulum maliyetlerinde belirgin bir azalma sağladığını belirtmiştir. Ayrıca kafes yapılarının rüzgar yükü altındaki deformasyon davranışları daha homojen olup, yük transferi çubuk elemanlar arasında dağıldığı için eğilme momentleri düşük seviyede kalır. Bu da temele aktarılan yükleri azaltır ve inşaat maliyetini düşürür. Yapısal açıdan bakıldığından, boru tipi direkler konsol davranışını sergilerken, kafes direkler çubuk sistemi uzay çerçevesi davranışını gösterir. Bu fark, özellikle yüksek rüzgar yüklerinin etkili olduğu sahalarda kafes sistemlerin burkulma dayanımını artırır. Ancak kafes direklerin dezavantajı, bakım ve montaj sırasında personel güvenliği açısından daha karmaşık erişim gerektirmesidir.

4.4 Ölçüm Verisinin Kaydedilmesi

Ölçümün bilimsel geçerliliğinin sağlanabilmesi için verilerin kaydedilme sürecinin yöntemsel olarak tanımlanması gerekmektedir.

4.4.1 Veri Toplayıcı (Datalogger) ve Örnekleme Aralıkları

Rüzgar ölçüm istasyonlarında elde edilen verilerin doğru ve güvenilir biçimde kaydedilmesi, ölçüm kampanyalarının başarısı açısından kritik öneme sahiptir. Ölçüm sistemlerinde sensörlerden elde edilen veriler, veri toplayıcı (data logger) adı verilen cihazlar aracılığıyla belirli zaman aralıklarında kaydedilir. Bu cihazlar, sıcaklık, basınç, rüzgar hızı ve yönü gibi parametreleri düzenli aralıklarla okuyarak dijital ortama aktarır. Veri toplayıcılar genellikle mikrodenetleyici temelliidir ve veriler EEPROM veya SD kart gibi kalıcı belleklerde saklanır.



Sekil 4.12: Veri toplayıcı (data logger) sisteminin genel çalışma prensibi (Sagarkumar S N Badhiye ve diğ., 2011)

Veri kaydı sürecinde kullanılan örnekleme aralığı (sampling interval), ölçümün amacı ve istenen veri çözünürlüğüyle doğrudan ilişkilidir. Kısa zaman ölçekli türbülans analizlerinde genellikle 1–2 saniyelik örnekleme aralıkları tercih edilirken, rüzgâr enerji potansiyeli veya türbin performansı değerlendirmelerinde 1–10 dakikalık ortalama değerler kullanılmaktadır. Bu örnekleme aralıkları, rüzgâr hızındaki yüksek frekanslı dalgalanmaların istatistiksel olarak dengelenmesini sağlar ve uzun dönemli enerji hesaplamalarında kararlılık sunar (Brower, 2012).

Ölçülen veriler, belirli zaman periyotlarında ortalama alınarak türbülansın etkisinden arındırılmış 10 dakikalık ortalama veri formatında kaydedilir. Bu yaklaşım, uluslararası rüzgâr enerji ölçüm standartlarında yaygın olarak benimsenmiştir. 10 dakikalık ortalama, hem Taylor hipotezi hem de Reynolds ayrıştırması prensiplerine dayanarak türbülansın rastlantısal bileşenlerini elimine eder ve yalnızca ortalama akım bileşenini temsil eder. Böylece rüzgâr enerjisi yoğunluğu ve güç tahminleri daha güvenilir şekilde hesaplanabilir (Stull, 1988).

Örnekleme aralığının belirlenmesi yalnızca bilimsel gerekliliklere değil, aynı zamanda ölçüm sisteminin teknik kapasitesine de bağlıdır. Kullanılan anemometre tipi, veri kaydedicinin hafıza kapasitesi ve enerji kaynağı gibi faktörler, kaydedilebilecek veri yoğunluğunu sınırlar. Çok kısa aralıklarla (örneğin 1 saniye) yapılan ölçümler yüksek çözünürlük sağlasa da, depolama alanı ve enerji tüketimini artırır. Bu nedenle saha kampanyalarında sıkılıkla 1 Hz (1 ölçüm/saniye) hızında veri kaydedilip, bu yüksek frekanslı kayıtlar üzerinden 10 dakikalık ortalamalar türetilir (Brower, 2012).

Ayrıca, 10 dakikalık ortalama rüzgâr hızı değerleri, enerji yoğunluğunun $\frac{1}{2} \times \rho \times v^3$ formülüne göre hesaplanması standart girdi olarak kullanılmaktadır. Daha kısa aralıkların seçilmesi, v^3 bağıntısı nedeniyle enerji tahminlerinde istatistiksel sapmalara yol açabilir. Bu nedenle standardize edilmiş ortalama aralıklar, hem enerji üretim tahminlerinin hem de türbin performans eğrilerinin karşılaştırılabilirliğini ve tutarlılığını sağlar (Manwell ve diğ., 2010).

4.4.2 Veri Formatları

Rüzgâr ölçüm istasyonlarında toplanan veriler genellikle .csv (Comma-Separated Values) veya .txt (düz metin) formatlarında kaydedilir. Bu formatlar, hem okunabilirlik hem de farklı analiz yazılımlarıyla (örneğin MATLAB, Python, Excel) kolay entegrasyon sağlaması nedeniyle tercih edilmektedir. CSV formatı, özellikle veri alışverişinde standarlaşyon

sağladığı için uluslararası rüzgâr enerji araştırmalarında temel veri yapısı olarak kullanılmaktadır.

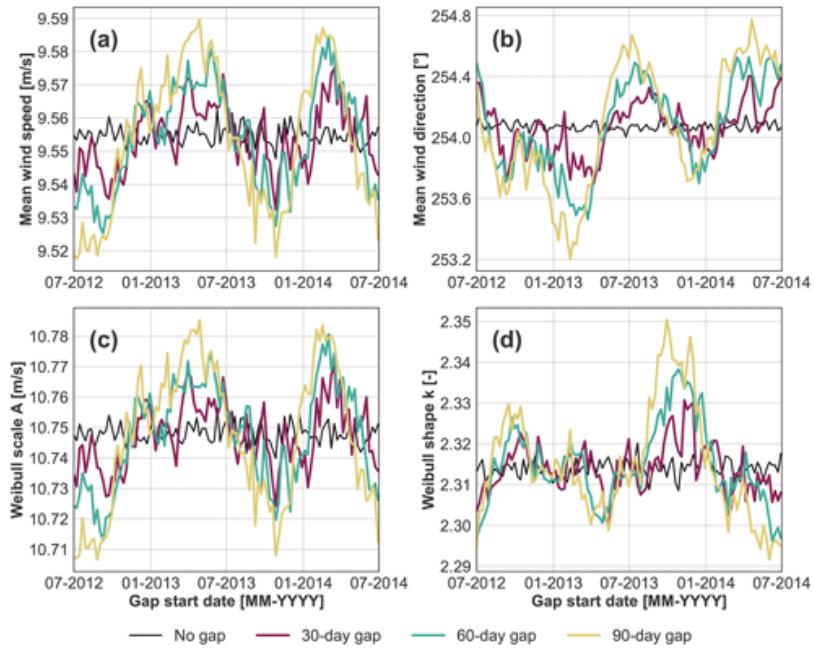
Veri kaydında kullanılan formatın yapısı, zaman damgası (timestamp), ölçüm birimleri ve sensör kimliği gibi meta verileri de içermelidir. Bu durum, hem uzun dönemli analizlerin doğruluğunu artırmakta hem de veri bütünlüğünü sağlamaktadır. Özellikle rüzgâr atlası ve türbin yer seçimi çalışmalarında bu tür standartlaştırılmış veri formatları analizlerin karşılaştırılabilirliğini mümkün kılmaktadır (Brower, 2012).

4.4.3 Veri Kaybı ve Eksik Veri Yönetimi

Rüzgâr ölçüm süreçlerinde çeşitli nedenlerle — sensör arızaları, enerji kesintileri, iletişim hataları veya veri aktarımındaki teknik problemler gibi — veri kaybı meydana gelebilmektedir. Veri kaybı oranı, ölçüm kampanyasının güvenilirlik düzeyini doğrudan etkileyen kritik bir parametredir. Ölçüm istasyonlarında kullanılabilir veri oranı %80'in altına düştüğünde, elde edilen sonuçların güvenilirliği önemli ölçüde azalmakta ve analizlerin istatistiksel geçerliliği zayıflamaktadır. Bu nedenle, eksik verilerin uygun yöntemlerle yeniden tahmin edilmesi ve veri setine entegre edilmesi gerekmektedir. Bu işlem literatürde gap filling olarak tanımlanmaktadır.

Eksik verilerin tamamlanmasında literatürde farklı yaklaşımlar önerilmektedir. Klasik yöntemler arasında lineer interpolasyon, ortalama veya medyan ile doldurma ve zaman serisi regresyon yöntemleri yer almaktadır. Lineer interpolasyon, kısa süreli veri boşluklarında doğrusal bir eğilim varsayımyla etkili sonuçlar üretirken; uzun süreli eksikliklerde doğruluk oranı düşmektedir. Ortalama veya medyanla doldurma yöntemleri uygulama kolaylığı açısından avantajlı olsa da, rüzgâr hızı gibi yüksek varyansa sahip değişkenlerde istatistiksel dağılımı bozabilemektedir. Buna karşın, zaman serisi regresyon modelleri geçmiş verilere dayalı olarak tahmin yapar ve otokorelasyonun yüksek olduğu durumlarda daha güvenilir sonuçlar sağlar (Manwell ve dig., 2010).

Son yıllarda, eksik veri yönetiminde yapay zekâ temelli yaklaşımlar öne çıkmıştır. Bu yöntemler, özellikle uzun süreli ölçüm serilerinde karmaşık ve doğrusal olmayan ilişkileri modelleyebilme kabiliyetleri nedeniyle tercih edilmektedir. MICE (Multivariate Imputation by Chained Equations) yöntemi, eksik değerleri çok değişkenli regresyon modelleriyle iteratif olarak tahmin ederken; yapay sinir ağları (ANN), k-en yakın komşu (k-NN) ve adaptif ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) gibi yöntemler, değişkenler arasındaki doğrusal olmayan ilişkileri yakalayarak daha gerçekçi tamamlama sonuçları üretmektedir (Hocaoglu & Kurban, 2007). Bu gelişmiş yaklaşımlar, özellikle uzun süreli rüzgâr ölçüm kampanyalarında eksik veri oranını minimize etmek ve enerji üretim tahminlerinin doğruluğunu artırmak amacıyla kullanılmaktadır.



Şekil 4.13: Ölçüm serilerinde veri boşluklarının (gap) rüzgar şiddeti, yönü ve Weibull parametreleri üzerindeki etkisi (Jonietz Alvarez ve diğ., 2024)

Şekil 17'de (a) Ortalama rüzgâr hızı, (b) ortalama rüzgâr yönü, (c) Weibull ölçek parametresi A ve (d) Weibull şekil parametresi k gösterilmektedir. Farklı renkli çizgiler 30, 60 ve 90 günlük veri boşluklarını temsil eder. Sonuçlar, boşluk süresi arttıkça rüzgâr istatistiklerinin giderek sapma gösterdiğini ve uzun süreli eksikliklerin analiz güvenilirliğini azalttığını ortaya koymaktadır.

Veri bütünlüğünün korunması yalnızca eksik verilerin tamamlanmasıyla sınırlı değildir. Ölçüm sistemlerinden elde edilen veriler, düzenli olarak doğruluk ve tutarlılık kontrollerinden (data validation) geçirilmelidir. Bu kapsamında üç değerlerin (outlier) belirlenmesi, sensör kalibrasyonunun düzenli olarak kontrol edilmesi ve ölçüm serilerinin istatistiksel tutarlılığının izlenmesi, güvenilir veri elde etmenin temel adımları arasında yer almaktadır (Brower, 2012).

5. Rüzgar Türbinlerinin Çalışmasında Atmosferik Etkiler

Rüzgar enerjisi sistemlerinin performansı büyük ölçüde yalnızca türbin teknolojisine değil aynı zamanda türbinlerin içinde yer aldığı atmosferik ortama da bağlıdır. Bu bağlamda, rüzgâr şiddeti, yönü ve turbülans gibi değişkenler ile atmosferik sınır tabakası (ABL) ve orografik etkiler türbin verimini, güvenilirliğini ve ömrünü doğrudan etkiler.

5.1 Rüzgar Şiddeti

Rüzgâr şiddetinin türbin performansındaki rolü oldukça önemlidir. Türbin rotorundan geçen kinetik enerji, teorik olarak rüzgâr hızının küpüyle orantılıdır. Ancak bu ideal durum, gerçek atmosfer koşullarında nadiren gözlenir; çünkü rüzgâr şiddeti hem yatay hem de dikey doğrultuda sürekli değişim gösterir. Yüksek şiddetler genellikle daha fazla enerji üretimi anlamına gelse de, türbinin tasarım sınırlarının dışında kalan değerlerde verim düşer veya sistem koruma moduna geçer.

Gerçekte rüzgâr, sabit bir akış yerine zamanla değişen ve turbülans içeren karmaşık bir

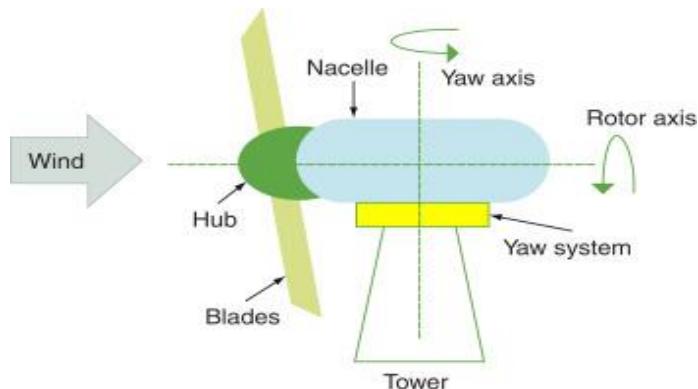
yapıya sahiptir. Bu nedenle atmosferik sınır tabakası içindeki dikey hız değişimleri (shear) ve yön farklılıklarını, türbin rotoruna ulaşan hava akışını doğrudan etkiler. Bu durum, dönüştürülebilir enerji miktarını belirleyen temel faktörlerden biridir. Örneğin, sabah ve akşam geçişlerinde hız ve yön kaymasının artması, atmosferik kararsızlık nedeniyle rotor yüzeyine gelen akışın yönü ve şiddetini dengesizleştirir. Bu durumda türbin kanatları, akışı ideal aerodinamik açıyla yakalayamaz ve kaldırma kuvveti azalır. Sonuç olarak, türbinin ürettiği güçte belirgin bir düşüş meydana gelir (Sánchez Gómez & Lundquist, 2020).

5.2 Rüzgar Yönü

Rüzgâr yönü, türbin performansını belirleyen bir diğer kritik faktördür. Türbine gelen yön kayması (veer) ve yatay yön değişimleri, rotor diskine ulaşan etkin rüzgâr bileşenini azaltabilir veya farklı açılardan etkileyebilir. Bu durumda türbinin aerodinamik verimi değişir ve güç üretiminde dalgalanmalar meydana gelir.

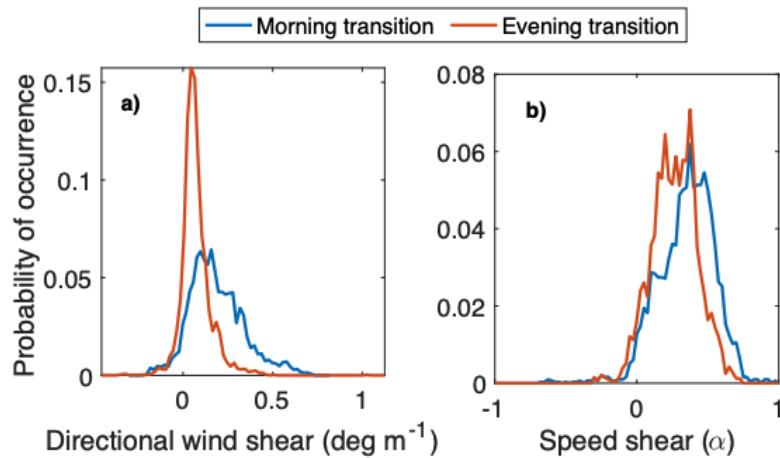
Yapılan araştırmalar, yön değişiminin yalnızca birkaç derece olmasının bile türbin çıkış gücünde önemli farklılıklara neden olabileceğini göstermektedir (Porté-Agel, Wu & Chen, 2013). Örneğin, sabah geçişlerinde yön kaymasının yüksek olması durumunda, atmosferik tabakanın yeniden yapılanması nedeniyle enerji üretiminde azalma gözlenebilir (Sánchez Gómez & Lundquist, 2020).

Bu bulgular, türbinlerin yönlendirme sistemlerinin (yaw kontrolü) doğru şekilde çalışmasının ve türbin yerleşiminde hâkim rüzgâr yönlerinin dikkatle analiz edilmesinin ne kadar kritik olduğunu ortaya koymaktadır. Türbinlerin hâkim rüzgâr yönüne uygun biçimde hizalanmaması, enerji üretiminde ciddi kayıplara yol açabileceği gibi yapısal yüklerin dengesiz dağılmasına da neden olabilir. Dolayısıyla, yön kontrolü ve yerleşim stratejisi, türbin performansını optimize eden en temel unsurlardan biridir.



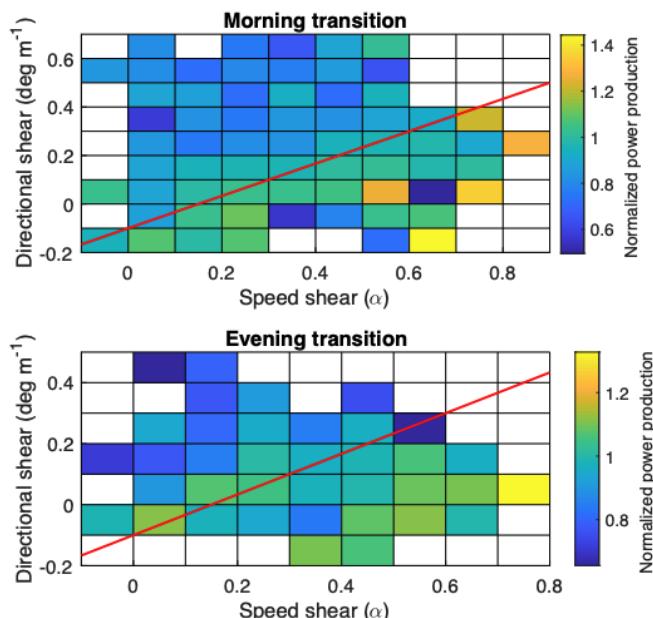
Şekil 5.1: Türbin Yönlendirme Sistemleri (Yaw Kontrolü) (Yaw Control - an Overview | ScienceDirect Topics, t.y.)

Rüzgâr türbinlerinde rotorun, rüzgâr akışına her zaman dik olacak şekilde yönelmesi gereklidir. Ancak rüzgâr yönü atmosferik koşullara bağlı olarak sürekli değiştiğinden, türbinin bu değişime otomatik olarak uyum sağlaması zorunludur. Bu uyumu sağlayan yaw sistemi, türbinin gövdesini (nacelle) ve rotorunu kule üzerinde döndürerek rüzgâr yönüne hizalar. Böylece türbin, rüzgârı en uygun açıyla karşılayarak hem enerji üretimini maksimize eder hem de yapısal yüklerin dengeli dağılmasını sağlar.



Şekil 5.2: Rotor tabakası boyunca sabah (mavi) ve akşam (kirmızı) geçişlerinde yönsele ve hız kesmesi dağılımları (Gomez & Lundquist, 2020)

Şekil 20, rotor tabakası boyunca sabah (mavi) ve akşam (kirmızı) geçişlerinde yönsele ve hız kesmesi dağılımlarını göstermektedir. Sabah saatlerinde yönsele kesmenin artması, atmosferin kararsız hale geldiğini ve rüzgâr yönündeki dalgalanmaların türbin rotoruna ulaşan akışı dengesizlestirdiğini gösterir. Bu durum, kaldırma kuvvetinin azalmasına ve güç üretiminde düşüşe yol açar. Akşam geçişinde ise yön değişiminin azalması kararlılığın arttığını, ancak hız kesmesinin devam etmesi rotor boyunca farklı yüksekliklerde rüzgâr hızının değiştigini ortaya koyar. Böylece şekil, atmosferik kararlılığın türbin verimi üzerindeki etkisini görsel olarak desteklemektedir.



Şekil 5.3: Sabah ve akşam geçişlerinde hız ve yön kesmesi kombinasyonlarına göre türbinin normalize edilmiş güç üretimi (Gomez & Lundquist, 2020)

Şekil 21, sabah ve akşam geçişlerinde hız ve yön kesmesiyle türbin güç üretimi

arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Sabah saatlerinde yüksek shear değerlerinde güç üretiminin azalması, atmosferik kararsızlığın rotor akışını dengesizlestirdiğini ortaya koyar. Akşam geçişinde ise shear değerlerinin düşmesiyle güç üretimi daha dengeli bir dağılım sergiler. Böylece şekil, shear değişimlerinin türbin verimliliği üzerindeki etkisini açık biçimde göstermektedir.Şekil 21, sabah ve akşam geçişlerinde hız ve yön kesmesiyle türbin güç üretimi arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Sabah saatlerinde yüksek shear değerlerinde güç üretiminin azalması, atmosferik kararsızlığın rotor akışını dengesizlestirdiğini ortaya koyar. Akşam geçişinde ise shear değerlerinin düşmesiyle güç üretimi daha dengeli bir dağılım sergiler. Böylece şekil, shear değişimlerinin türbin verimliliği üzerindeki etkisini açık biçimde göstermektedir.

5.3 Türbülans

Turbülans yoğunluğu, türbin performansı ve mekanik dayanım açısından kritik bir etkendir. Atmosferdeki turbülans, yani akış içindeki hız ve yön değişkenliği, türbine ulaşan rüzgârin düzenini bozar; rotor ve gövde üzerine binen yükleri dengesizleştirir. Bu durum kanatlarda titreşim ve mekanik yorgunluk oluşturur, dolayısıyla hem enerji üretim verimini hem de türbinin ömrünü olumsuz yönde etkiler. Yüksek turbülans yoğunluğu, rotor önündeki ortalama rüzgâr hızını azaltarak enerji kayiplarına neden olabilir (Porté-Agel ve diğ., 2020).

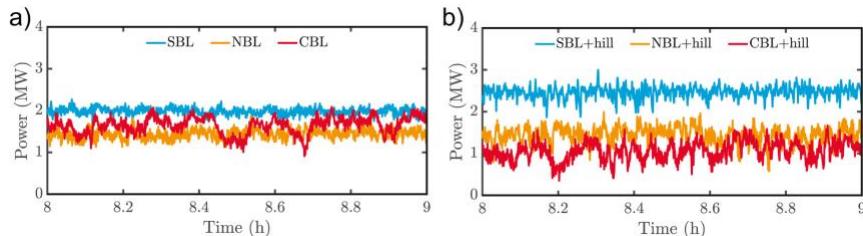
Bununla birlikte, turbülansın her zaman olumsuz bir etkisi yoktur. Yüksek turbülanslı koşullar, rotor arkasında oluşan düşük hızlı akış bölgesinin (wake) daha hızlı dağılmmasını sağlar. Bu, özellikle birden fazla türbinin bulunduğu rüzgâr çiftliklerinde önemli bir avantajdır; çünkü wake bölgesinin hızlı iyileşmesi, arka türbinlerin yeniden daha yüksek rüzgâr hızlarına maruz kalmasını sağlar. Böylece toplam enerji üretimi artabilir ve çiftlik genelinde daha dengeli bir performans elde edilir (Öztürk, 2022).

5.4 Atmosferik Sınır Tabakası (ABL) ve Orografik Etkiler

Atmosferik sınır tabakası (ABL) ve orografik etkiler de türbin performansını belirleyen temel faktörlerdir. ABL, yer yüzeyinden itibaren yukarıya doğru karışımın gerçekleştiği tabakadır ve rüzgâr türbinleri genellikle bu bölge içinde faaliyet gösterir. ABL'nin stabilité durumu — karışık, konvektif veya gece oluşan stabil tabaka — akış yapısını, turbülans seviyesini, rüzgâr hız profilini ve yön kaymasını belirler. Örneğin, gece oluşan stabil koşullarda turbülans düşük, hız profili daha düzgün, dolayısıyla rotor seviyesi ile üst atmosfer arasındaki hız farkı azdır. Bu durumda türbin kuyruğu (wake) daha uzun süre korunur ve güç üretimi azalabilir (Liu & Stevens, 2021).

Orografik etkiler, yani arazi yüksekliği, tepeler, vadiler ve yüzey sürtünmesindeki değişkenlikler, rüzgâr akışını yerel ölçekte hızlandırabilir, yönlendirebilir veya turbülans seviyesini değiştirebilir. Örneğin, bir tepenin üst kısmına yerleştirilen türbin, yamaçtan kaynaklanan hız artışı sayesinde daha fazla enerji üretebilir; ancak aynı zamanda artan turbülans nedeniyle mekanik yükler de yükselir (Liu & Stevens, 2021). Arazi karmaşıklığı ve yüzey pürüzlülüüğü, rüzgâr akışının hız ve yön dağılımını değiştirerek türbin performansını doğrudan etkiler. Karmaşık topoğrafya, rüzgârin eğimli yüzeylerde hızlanması, vadilerde ise yön değiştirmesine neden olur; bu da dikey hız gradiyenlerini (wind shear) ve yön sapmalarını (wind veer) artırır. Yüzey pürüzlülüği yüksek olan bölgelerde ise zemine yakın tabakalarda sürtünme artar, rüzgâr hızı azalır ve turbülans yoğunluğu yükselir. Bu koşullar, rotor düzleminde düzensiz yük dağılımlarına yol açarak aerodinamik verimliliği azaltabilir ve mekanik yorgunluğu hızlandırabilir (Zhang ve diğ., 2025).

Bu nedenle, bir rüzgâr çiftliği planlanırken ABL'nin stabilite dağılımı, yerel orografya, yüzey karakteristikleri (örneğin sürtünme uzunluğu) ve hâkim rüzgâr yönleri birlikte değerlendirilmelidir. Stabilite koşullarındaki değişimler, aynı türbinin gün içinde farklı performans göstermesine yol açabilir. Örneğin, konvektif karışık tabaka koşullarında turbülans seviyesi yüksek olduğu için kuyruk bölgesi daha hızlı dağılırlar, rüzgâr hızı yeniden artar ve bu durum özellikle çiftlik içindeki ardışık türbinler açısından olumlu sonuçlar doğurur (Öztürk, 2022).



Şekil 5.4: Farklı atmosferik kararlılık koşullarında (SBL, NBL, CBL) ve tepe arkası konumunda NREL 5 MW türbininin güç üretimi (Liu & Stevens, 2021)

Şekil 22, Stabil tabaka koşullarında (SBL) güç üretimi en yüksek, konvektif koşullarda (CBL) ise turbülans artışı nedeniyle en düşük düzeydedir. Tepe arkası konumunda wake etkisi güç üretiminin belirgin biçimde azaltmaktadır. Ancak bu durum, tek türbin için geçerlidir; türbinlerin ardışık yerleştiği rüzgâr çiftliklerinde stabil koşullarda wake birikimi artarak toplam enerji üretiminin azalmasına yol açabilir.

Sonuç olarak, rüzgâr türbinlerinin performansını maksimize etmek ve mekanik güvenilirliğini sağlamak için rüzgâr şiddeti, yönü, turbülans, atmosferik sınır tabaka ve orografik etkilerin birlikte değerlendirilmesi gereklidir.

6. Rüzgar Türbinlerinin Temel Tasarım Parametreleri

Rüzgâr türbinlerinin performansı ve enerji üretim kapasitesi, aerodinamik prensiplerden atmosferik rüzgâr profiline kadar uzanan bir dizi fiziksel ve tasarımsal parametreye bağlıdır. Bu parametrelerin doğru bir şekilde anlaşılması, türbinin hangi koşullarda en yüksek verimle çalışabileceğini belirlemesinden kritik önem taşır.

6.1 Rüzgar Enerjisi ve Temel Fizik

a. Rüzgârin Gücü ve Kinetik Enerji

Rüzgâr akımındaki güç, hareket eden havanın kinetik enerjisinden elde edilir. Güç, P, şu formülle hesaplanır :

$$P = (1 \div 2) \times \rho \times A \times U^3 \times 4 \times a \times (1 - a)^2$$

b. Güç katsayıları ve Betz limit

Rüzgar türbini rotor performansı genellikle güç katsayı ile karakterize edilir.

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \times \rho \times U^3 \times A}$$

Bu denklemde P'yi yerine koyup sadeleştirince güç katsayı şuna dönüşüyor :

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

Burada $a = 1/3$ alındığında ;

$= 16/27 = 0,5926$ olacaktır. Bu değer, betz limit, rüzgâr türbinlerinin fiziksel olarak, rüzgârin içinde bulunan toplam enerjinin en fazla %59'unu çıkarabileceğinin anlamına gelir.

Bu limit teorik üst sınırdır, ideal koşullarda, sürtünmesiz ve kayıpsız bir rotor içindir. Gerçek türbinler hiçbir zaman bu değere ulaşamaz. Gerçek türbinlerde bu değer 0,45-0,5 civarındadır. (Manwell & Rogers, 2010)

6.2 Aerodinamik ve Rotor Performans Parametreleri

a. Uç Hız Oranı (Tip Speed Ratio - λ)

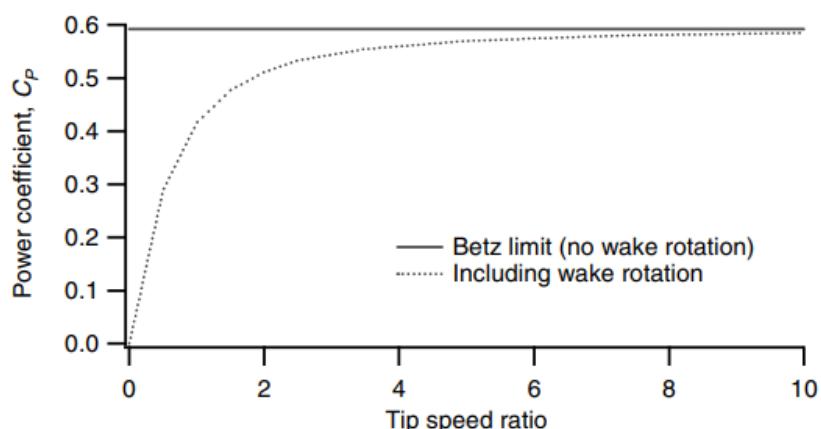
Uç Hız Oranı, rotorun açısal hızı ile gelen rüzgar hızı arasındaki oranı tanımlar ve rotor verimliliğinde kilit rol oynar.

$\lambda = \frac{\Omega R}{U}$ ile ifade edilir. Burada Ω dönen halkanın teğetsel hızıdır. R, rotor yarıçapı, U ise rüzgar hızı.

- Verimlilik(C_p) ile İlişkisi ve Optimum Değer

Optimum Çalışma Noktası: Maksimum güç katsayı elde etmek için, türbin belirli bir optimum uç hız oranında çalışmalıdır.

Değer Aralığı: Hızlı çalışan, modern üç kanatlı aerogeneratorler için bu optimum uç hız oranının genellikle 6 ile 9 arasında olduğu belirtilmiştir.



Şekil 6.1: Uç hız oranı ve güç katsayısı arasındaki ilişki (Manwell&Rogers, 2010)

Sonuçlar, uç hızı oranı ne kadar yüksek olursa, Cp'nin teorik maksimuma o kadar yaklaşabileceğini göstermektedir.(Manwell &Rogers, 2010)

b. Rotor Çapı (R)

Rotor çapı, bir rüzgâr türbininin yakalayabileceği rüzgâr enerjisini belirleyen en kritik geometrik parametrelerden biridir. Türbinin süpürdüğü alan (A), rotor çapının karesiyle orantılıdır:

$$A = \pi R^2$$

Bu nedenle rotor çapındaki küçük değişiklikler bile yakalanan güç üzerinde çok büyük etki yaratır.

Rotor çapı büyüğünde:

- Aerodinamik yükler (thrust load) artar
- Eğilme momenti (blade root bending moment) artar
- Kule tepe yükü yükselir
- Pitch kontrol gereksinimi artar
- Yorgunluk (fatigue) ömrü önemli hale gelir

c. Kanat Sayısı

Kanat sayısı, rotorun aerodinamik davranışını belirleyen temel parametrelerden biridir. Rüzgâr türbinlerinde en yaygın kullanılan kanat sayısı 3'tür.

Modern rüzgâr türbinlerinde 3 kanat seçilmesinin sebepleri:

- Aerodinamik verim (Cp) optimuma yakın
- Gürültü düşük
- Yük dağılımı dengeli
- GörSEL uyum ve titreşim minimizasyonu
- Yapısal yükler kontrol altında

6.3 Hub Yüksekliği ve Rüzgâr Profili

Rüzgâr hızının yükseklikle değişimi, rüzgâr türbinlerinin performansı, yükleri ve yıllık enerji üretimi üzerinde belirleyici bir etkendir. Rüzgâr hızı, yüzeyden uzaklaşıkça ortalama olarak artar ve bu değişim rüzgâr profil modelleriyle tanımlanır. (Manwell 2010) Bu ifade, türbin hub yüksekliğinin (H) rüzgâr türbini tasarımında kritik bir parametre olmasının temel nedenini açıklar. Yükseklik arttıkça ortalama rüzgâr hızı artar, bu da bağımlı güç denkleminden dolayı enerji üretiminde büyük artış sağlar.

a. Güç Yasası (Power Law)

Rüzgâr hızının yükseklikle değişimi için en yaygın kullanılan modellerden biri güç yasasıdır:

$$\frac{U_z}{U_{zr}} = \left(\frac{z}{z_r}\right)^{\alpha}$$

Burada α rüzgar kaymasıdır.(wind shear) Bu değer ortamın pürüzsüzlüğü hakkında bilgi verir. Açık denizlerde 0,1 civarındayken, şehir merkezlerin 0,25-0,4 aralığındadır.

Güç denkleminden: $P \sim U^3$

Dolayısıyla hub yüksekliği arttıkça küçük hız artışları bile enerji üretiminde küpik artış yaratır. Bu nedenle yüksek hub tercihleri modern türbin tasarımının temel eğilimlerindendir.

b. Logaritmik Rüzgâr Profili (Log Law)

Atmosferik sınır tabakası teorisine dayanan, fizikal olarak en doğru rüzgâr profili modelidir.

$$U(z) = \frac{u_*}{k} \times \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$$

U_* sürtünme hızı (friction velocity), k ise von karmann sabiti (0,4).

Burada z_0 yüzeyin pürüzsüzlüğünün ölçüsüdür. Manwell'e göre bazı pürüzsüzlük uzunluğu değerleri şöyle:

- Su yüzeyi : 0,0002m
- Açık kırsal alan : 0,03m
- Orman : 0,4-1,0m

c. Atmosferik kararlılık ve rüzgar profili

Rüzgâr hızının yükseklikle değişimi yalnızca yüzey pürüzlüğüne değil, aynı zamanda atmosferik kararlılığa bağlıdır. Atmosferin sıcaklık değişimi (lapse rate) yüzey yakınındaki türbülans miktarını belirler ve bu durum rüzgârin eğimini doğrudan etkiler. Bu nedenle hub yüksekliği optimizasyonu, yalnızca ortalama rüzgâr hızına göre değil, kararlılık sınıflarına göre de değerlendirilmelidir. (Manwell, 2010)

Kararlı atmosfer : Yüzey yakınındaki hava akışı sınırlıdır, türbülans zayıftır. Yüksek basınç merkeziyle ilişkilendirilir. Bunun sonucunda rüzgar kayması katsayısi önemli ölçüde yükselir, rüzgâr kayması artar ve rotor düzlemi boyunca büyük hız farkları oluşur.

Nötr atmosfer : Rüzgâr profili en iyi şekilde logaritmik güç yasası ile modellenir ve katsayısi arazi tipine göre standart değerler alır.

Kararsız atmosfer : Konvektif türbülans güçlündür.Karışım yoğundur, hava sürekli dikey hareket halindedir. Bu koşullarda dikey akış arttığı için momentum transferi kolaylaşır. Bu durum, yüzey ve hub seviyesi arasındaki hız farkını azaltır.

6.4 Güç Eğrisi

Bir rüzgâr turbininin güç eğrisi, farklı rüzgâr hızlarında ürettiği elektrik gücünü gösteren temel performans karakteristiğidir. Türbin tasarımını, kontrol stratejileri ve yıllık enerji üretimi (AEP) hesaplarının tamamı güç eğrisine dayanır. Üretici firmalar güç eğrilerini IEC 61400'e göre standartlaştırılmış ölçüm yöntemleriyle verir.

Güç eğrisi, rüzgâr hızına bağlı olarak üç ana bölge içerir:

- a. Cut-in : Türbinin enerji üretmeye başladığı minimum rüzgâr şiddetidir. Türbin bu şiddetten daha düşük seviyelerde durur. Bu noktadan rated güç noktasına kadar olan bölge Manwell'e göre turbinin "enerji toplama" bölgESİdir.
- b. Rated güç : Rüzgâr hızı rated speed değerine ulaştığında türbin maksimum tasarlanmış gücüne erişir. Bu noktadan sonra optimum uç hız oranını (λ) rotor aerodinamik olarak sınırlanır.
- c. Cut-out : Türbinin güvenlik nedeniyle durdurulduğu maksimum rüzgâr şiddetidir. Bu değerin üzerindeki dinamik ve statik yükler, turbinin yapısal bütünlüğünü tehdit edebilir.
- Güç eğrisi ve yıllık enerji üretimi ilişkisi

Güç eğrisi rüzgâr hızına bağlı anlık güç verir.

Yıllık enerji üretimi (AEP) ise rüzgâr hızlarının yıl içindeki dağılımı ile birlikte hesaplanır:

$$AEP = \sum_{i=1}^n P(U_i) t_i$$

Bu nedenle ,güç eğrisi doğru verilmezse ve saha rüzgâr dağılımı doğru modellenmezse AEP tahmini büyük hatalar içebilir.

6.5 Verim Kavramı

Rüzgâr turbinlerinde verim, turbinin rüzgârin taşıdığı teorik gücten ne kadarını mekanik veya elektriksel güçe dönüştürebildiğini ifade eder. Betz limit gereği, rüzgârin tamamı hiçbir zaman yakalanamaz. Bu fiziksel bir sınırıdır.

$$\text{Verim} = \frac{P_{\text{türbin}}}{P_{\text{rüzgar}}}$$

- a. Aerodinamik verim : Cp : %59,3
- b. Mekanik verim : Rotor–şaft–dişli kutusu gibi bileşenlerdeki sürtünme ve kayıplar nedeniyle : %95
- c. Elektriksel verimi : Elektrik üretimindeki kayıplar nedeniyle : %97

ç. Toplam sistem verimi : $C_p \times \text{Elektriksel verim} \times \text{Mekanik verim}$

Bu yüzden gerçek türbinlerde verim %45 civarındadır.

6.6 Türbin Kapasite Faktörü

Türbin kapasite faktörü (CF), türbinin sahadaki rüzgâr koşullarına, teknik kayıplarına ve çalışma süresine göre ne kadar etkin kullanıldığını gösterir.

Kapasite Faktörünü Etkileyen Ana Unsurlar

a. Rüzgâr Şiddet Dağılımı

Ortalama şiddet tek başına yeterli değildir. Türbinin güç eğrisiyle rüzgârin Weibull dağılımının eşleşmesi esastır.

b. Türbinin Güç Eğrisi

Cut-in hızı düşük türbinler düşük rüzgâr bölgelerinde avantajlıdır. Rated hızın sık görülmesi CF'yi yükseltir. Cut-out hızının sık aşılması CF'yi düşürür.

c. Atmosferik Koşullar

- Shear, turbülans yoğunluğu, ABL kararlılığı CF'yi etkiler.
- Stabil atmosfer → rotor üst-alt farkı fazla → yük artışı, verim düşüşü.
- Kararsız atmosfer → karışım fazla → daha uniform hız → CF artabilir.

ç. Wake (Gölge) Etkileri

Türbinler arası mesafe. Özellikle rüzgâr çiftliklerinde enerji üretimi belirgin düşer.

d. Teknik Duruşlar, Bakım, Arızalar

Modern türbinlerde yıllık kullanılabilirlik %95–98 civarındadır.

7. Yatay ve Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri

Bu çalışmada, üç kanatlı yatay eksenli rüzgar turbini (HAWT) ve Darrieus tipi dikey eksenli rüzgar turbini (VAWT), CATIA yazılımı kullanılarak tasarlanmış ve üç boyutlu baskı yöntemiyle üretilmiştir. Deneyel sonuçlar, HAWT'nin belirli koşullarda 8,99 V'a kadar daha yüksek voltaj üretildiğini göstermiştir. Ancak rüzgar açısından değişimle birlikte HAWT'nin çıkış voltajı sıfıra düşebilmektedir. Buna karşılık, VAWT daha düşük bir çıkış gerilimi (1,4 V) üretmekle birlikte, rüzgar açısından değişikliklerden etkilenmemekte ve sabit bir performans göstermektedir.(Johari, Jalil, & Shariff, 2018)

7.1 HAWT

HAWT, aerodinamik kaldırma kuvvetinden yararlanan ve rüzgar enerjisini yatay

eksende dönen kanatlar aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştüren bir türbindir. Bu türbin tipi, verimliliği ve olgunlaşmış teknolojik altyapısı nedeniyle en yaygın kullanılan rüzgar turbini tasarımidır. Sürekli rüzgar akışı altında yüksek enerji dönüşüm oranları sunar ve “backtracking effect” olarak bilinen geri izleme etkisine karşı oldukça dayanıklıdır. Bununla birlikte, HAWT’nin verimli çalışabilmesi için kanatlarının her zaman hâkim rüzgar yönüne doğru çevrilmesi gereklidir. Rüzgar yönü değişken olduğunda, türbinin doğru konumda kalmasını sağlamak amacıyla genellikle bir sapma sensörü (yaw sensor) ve sapma motoru (yaw motor) içeren mekanizmalar kullanılır. Küçük ölçekli türbinlerde bu görev basit bir rüzgar gülüyle sağlanabilirken, büyük sistemlerde daha karmaşık elektronik kontrol mekanizmalarına ihtiyaç duyulur. Bu nedenle HAWT’ler, yön değişimlerinin az olduğu, tutarlı ve düşük turbülanslı rüzgar alanlarında en yüksek performansı sergiler.(Adams, White, Rumsey, Farrar, 2011)



Şekil 7.1. HAWT rüzgar turbini (Johari, Jalil, & Shariff, 2018)

7.2 VAWT

VAWT sistemlerinde ise kanatlar yere dik konumda yer almaktır ve rotor dikey eksen etrafında dönmektedir. Bu türbinler, çalışma prensibine göre kaldırma kuvveti (lift), sürükleme kuvveti (drag) veya her ikisinin birleşimini kullanabilir. VAWT tasarımları genel olarak iki ana tipe ayrılır: Savonius ve Darrieus. Savonius tipi türbin, tıpkı bir su çarkı gibi çalışan sürükleme esaslı bir tasarıma sahiptir; buna karşılık Darrieus tipi türbin, aerodinamik kaldırma kuvvetinden yararlanarak dönme momenti üretir. HAWT’lerin optimum performans için sürekli olarak rüzgar yönüne hizalanması gereklidir, VAWT’ler çok yönlü bir yapıya sahiptir ve her yönden gelen rüzgarı enerjiye dönüştürebilir. Bu özellikleri sayesinde VAWT’ler, düşük hızlı ve turbülanslı rüzgar koşullarının hâkim olduğu kentsel alanlarda daha uygun bir çözüm sunmaktadır. Ayrıca, şanzıman kutusu ve jeneratör gibi ekipmanların yere daha yakın konumlandırılabilmesi, bakım maliyetlerini azaltmakta ve sistem kontrolünü kolaylaştırmaktadır.



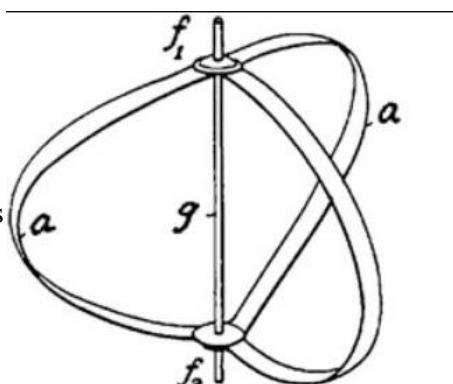
Şekil 7.2. VAWT rüzgar türbini (Johari, Jalil, & Shariff, 2018)

7.3 Darrieus Tipi VAWT

Darrieus tipi VAWT'ler, aerodinamik kaldırma kuvvetinden yararlanarak yüksek dönme hızlarına ulaşabilir ve görece yüksek güç katsayısun dēerleri sunar. Tjiu et. all(2015) çalışmasında bu türbinler, H-rotor ve kavisli kanat (egg-beater) konfigürasyonlarında incelenmiş ve özellikle yüksek uç hız oranlarında (Tip Speed Ratio, TSR) verimlerinin arttığı gösterilmiştir. Ancak düşük başlangıç torkları ve rotor yapısında meydana gelen dinamik yüklerin sebep olduğu yorulma sorunları, Darrieus türbinlerin başlıca dezavantajları arasında yer almaktadır. Bu nedenle bu türbinlerin, yüksek rüzgar hızlarına sahip bölgelerde veya Savonius tipi türbinlerle birlikte kullanılan hibrit sistemlerde tercih edilmesi önerilmektedir. (Tjiu, Marnoto, Mat, Ruslan, Sopian, 2013)

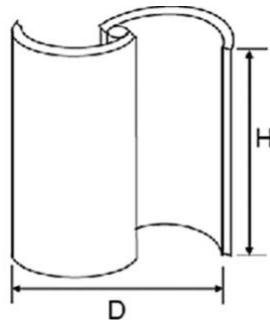
Şekil 7.3. Darrieus

(Ruslan, Sopian, 2013)



7.4 Savonius Tipi VAWT

Savonius tipi VAWT'ler yalı olarak çalışan, yapısal olarak daha basit ve düşük rüzgar hızlarında başlayabilen sistemlerdir. Dewan ve dīg. (2021) çalışmasında, Savonius rotorlarının düşük aerodinamik verimlerine rağmen, yön bağımsız çalışma kabiliyetleri, düşük üretim maliyetleri ve yüksek yapısal dayanıklılıkları sayesinde küçük ölçekli enerji üretiminde avantaj sağladıkları vurgulanmıştır. Ayrıca kanat geometrisinin, örtme oranının (overlap ratio) ve çok kademeli rotor konfigürasyonlarının optimize edilmesiyle bu türbinlerin performansının artırılabilcegi belirtilmiştir. Ancak VAWT'lerin genel olarak düşük başlangıç torkları, dinamik kararsızlık sorunları ve yüksek hızlarda verim kaybı yaşama eğilimi, bu türbinlerin en önemli kısıtları arasında yer almaktadır. (Dewan, Gautam, Goyal, 2021)



Şekil 7.4. Savonius tipi VAWT (Dewan, Gautam, Goyal, 2021)

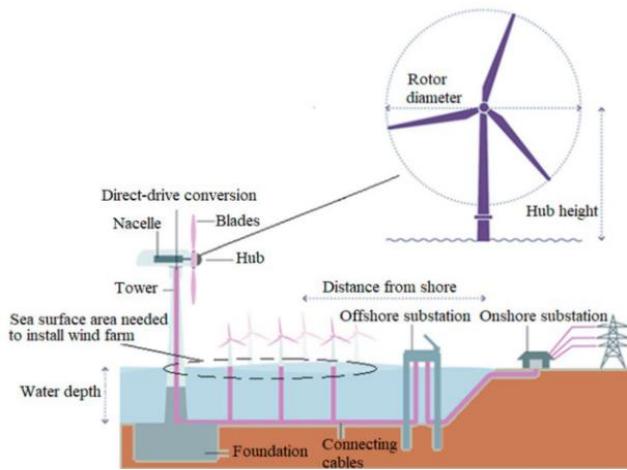
7.5 Onshore ve Offshore Türbinleri

Kara (onshore) ve açık deniz (offshore) rüzgar türbinleri, aynı temel prensibe dayansalar da, çevresel koşullar, tasarım gereksinimleri ve işletme hedefleri açısından önemli farklılıklar göstermektedir. Daha yüksek ve daha tutarlı rüzgar hızlarından (göbek yüksekliğinde yaklaşık 9 m/s) yararlanan açık deniz türbinleri, genellikle %50'nin üzerinde kapasite faktörlerine ulaşmakta ve türbin başına 15 MW'a kadar güç üretimi sağlayabilmektedir. Buna karşılık, kara türbinleri ortalama 5–8 m/s rüzgar hızlarında çalışmakta, %30–40 kapasite faktörüne ve 1,5–5 MW arasında değişen güç çıkışlarına sahiptir. Bu veriler, açık deniz türbinlerinin enerji verimliliği bakımından üstün olduğunu, kara türbinlerinin ise daha düşük maliyetli ve erişilebilir bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

Açık deniz türbinleri, deniz ortamlarının sunduğu güçlü ve kararlı rüzgarlardan yararlanmak üzere daha büyük boyutlarda ve yüksek güçlü olarak tasarlanmıştır. Bu durum, beraberinde yüksek inşaat ve bakım maliyetlerini getirmekte, ancak uzun vadede daha yüksek enerji verimiyle ekonomik denge sağlamaktadır. Kara türbinleri ise daha fazla türbülansın ve düşük rüzgar hızlarının görüldüğü bölgelerde çalıştığından, kompakt tasarımlara ve dikkatli saha seçimine ihtiyaç duyur. Lojistik kolaylık, altyapı yakınılığı ve bakım erişimi açısından kara sistemleri ekonomik olarak daha uygulanabilir olmaktadır.

Açık deniz türbinlerinin temel yapısal farkı, kurulum derinliğine göre seçilen temel sistemlerinden kaynaklanır. Yaklaşık 30 m derinliğe kadar olan sıç sularda, deniz tabanına çakılmış çelikten yapılmış tek kazıklı (monopile) temeller yaygın olarak kullanılmaktadır. 30–60 m arasındaki orta derinliklerde, stabiliteyi artıran kafes tipi ceket (jacket) temeller tercih edilmektedir. 100 m'den daha derin sularda ise, Hywind Scotland projesinde de uygulandığı üzere, deniz tabanına bağlama hatlarıyla sabitlenen yüzey temeller kullanılmaktadır. Bu yapılar, yüksek rüzgar hızları, gelgit akıntıları ve dalga kuvvetleri gibi zorlu deniz koşullarına dayanacak biçimde tasarlanmaktadır.

Buna karşılık, kara türbinleri genellikle 1,5–5 MW aralığında kapasiteye ve 150 m'den küçük rotor çaplarına sahiptir. 2010 yılında küresel kara rüzgar gücü kapasitesi toplam kurulu gücün %98,49'unu oluştururken, bu oran 2015'te %97,23'e ve 2022'de %92,9'a gerilemiştir. Bu düşüş, açık deniz rüzgar enerjisinin büyüyen payını yansımaktadır. Açık deniz sistemleri, daha güçlü ve istikrarlı rüzgar potansiyeli ile büyük türbin bileşenlerinin montajında sağladığı avantajlar nedeniyle her yıl artan oranda benimsenmektedir. (Tumse, Bilgili, Yıldırım, Şahin, 2024)



Şekil 7.5. Offshore (deniz) türbini (Tumse, Bilgili, Yıldırım, Şahin, 2024)

7.6 Türbin Kanat Sayısına Göre Farklar

Kanat sayısı, güç katsayısı, tip hız oranı aralığı, yük dalgalanmaları, titreşim, gürültü ve maliyet üzerinde belirleyicidir. Üç kanatlı yatay eksenli türbinler performans, dayanım ve akustik/estetik dengesi nedeniyle endüstri standartıdır (Schubel & Crossley, 2012).

7.6.1 Performans ve Verimlilik

Düşük-orta hızlarda dört kanada çıkmak tork daralmasını azaltır; yüksek hızlarda üç kanatlı tasarım genelde optimum aerodinamik-mekanik denge verir. Dikey eksenli çalışmalar, aynı soliditede kanat sayısı arttığında güç eğrilerinin benzeştiğini, verim farkının sınırlı kaldığını gösterir (Delafin ve diğ., 2016; Rezaeiha ve diğ., 2018).

Schubel ve Crossley (2012) yatay eksenli türbinlerde (HAWT) 3 kanatlı tasarımın aerodinamik moment, kanat uç girdapları ve gürültü seviyeleri arasında optimum denge sunduğunu belirtmiştir. Buna karşın 2 kanatlı türbinler daha yüksek dönüş hızlarında çalışabilir, ancak artan merkezkaç kuvvetleri ve dinamik dengesizlikler titreşimleri artırır (Wenehenubun ve diğ., 2015; Sule ve diğ., 2019).

Lisanssız RES'ler, şebeke bağlantı standartlarına uygun olmak zorundadır. Bu kapsamda:

- Türbin kontrol sistemlerinin şebeke kodlarına uygunluğu
- Reaktif güç kontrolü
- Koruma röleleri
- UFR/DFR sistemleri
- SCADA izleme
- Harmonik sınırları
- OG bağlantı kriterleri

kontrol edilir.

Savonius tipi dikey türbinlerde 3 kanatlı modellerin yüksek hızlarda, 4 kanatlıkların ise düşük hızlarda daha iyi tork ürettiği gözlenmiştir (Wenehenubun ve diğ., 2015). Bu, düşük rüzgar bölgelerinde çok kanatlı tasarımların tercih edilme nedenini açıklamaktadır.

σ	0.09	0.12	0.18	0.24	0.30	0.36
Rec ($\times 10^5$)	1.32	1.57	2.09	2.42	2.57	2.56
λ_{opt} (2 bladed)	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0
λ_{opt} (3 bladed)	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0
λ_{opt} (4 bladed)	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0
CP, max(2 bladed)	0.36 7	0.40 7	0.43 5	0.44 6	0.45 4	0.44 5
CP, max(3 bladed)	0.36 9	0.41 0	0.43 8	0.44 5	0.45 0	0.43 2
CP, max(4 bladed)	0.36 4	0.40 9	0.43 9	0.44 4	0.44 5	0.42 7

Tablo 1: 2, 3 ve 4 kanatlı dikey eksenli rüzgar türbinleri (VAWT) için soliditeye göre optimum performans (TI = %5) (Rezaeiha, A., Montazeri, H., ve Blocken, B., 2018)

7.6.2 Yük Dalgalanmaları ve Yorulma

Aynı soliditede iki kanattan üçe çıkmak tork, itme ve yanal kuvvet dalgalanmalarını belirgin düşürür; dörde çıkmak bu azalmayı çoğu hız oranında sürdürür. Maksimum yükler azalırken olay frekansı artar. Bu durum tasarım ömrünü iyileştirebilir ya da daha az malzeme kullanımına izin verebilir (Delafin ve diğ., 2016).

7.6.3 Titreşim ve Hız Rejimleri

Üç kanatlı rotorun simetrisi kritik rezonans risklerini azaltır. Yüksek tip hız oranlarında üç kanat kararlı davranışır; iki kanat nominal devirleri yükseltirken yük salınımını ve gövde tepkilerini artırır (Schubel & Crossley, 2012).

Blade Qty	efficiency
1	43%
2	47%
3	50%



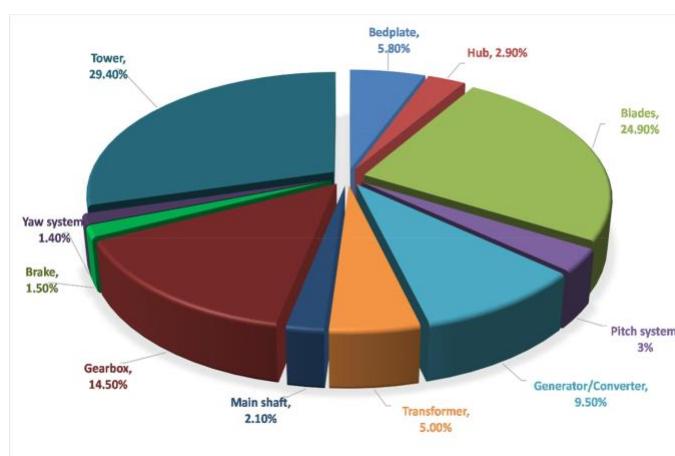
Şekil 7.6. Modern HAWT Rüzgar Türbini Kanat Sayısına Göre Verim Oranları (Schubel & Crossley, 2012)

7.6.4 Gürültü ve Görsel Etki

Uç hız oranı ve kanat sayısı arttıkça aerodinamik gürültü yükselir; üç kanatlılar akustik-görsel açıdan daha öngörülebilirdir (Schubel ve Crossley, 2012).

7.6.5 Maliyet ve Bakım

Kanat adedi arttıkça rotor ve yaw-pitch aktüatörleri üzerindeki toplam kütle ve bakım kapsamı büyür. Üç kanatlı standart, tedarik zinciri ve kontrol basitliği nedeniyle toplam sahip olma maliyetinde avantaj üretir (Schubel ve Crossley, 2012).



Şekil 7.7. Tipik bir 2 MW rüzgar turbininin farklı bileşenleriyle ilişkili maliyet.

7.7 Rüzgar Türbinleri ve Bileşenleri

Rotor rüzgarın kinetik enerjisini mekanik dönme enerjisine çevirir. Kanatlar genellikle cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) veya doğal fiber takviyeli polimer (NFRP) malzemelerden üretilir (Olabi ve diğ., 2021; Nejad ve diğ., 2021).

Nacelle, ana mil, dişli kutusu, jeneratör, fren sistemi ve kontrol birimlerini barındırır. Bu parçalar hafif ve korozyona dayanıklı malzemelerden yapılır (Nejad ve diğ., 2022).

Kule, rotor ve nacelle'ı destekler; yüksekliğin artması daha sabit rüzgar hızlarını sağlar (Kabeyi & Olanrewaju, 2023).

Temel, yükleri zemine aktararak türbin stabilitesini sağlar (Olabi ve diğ., 2021).

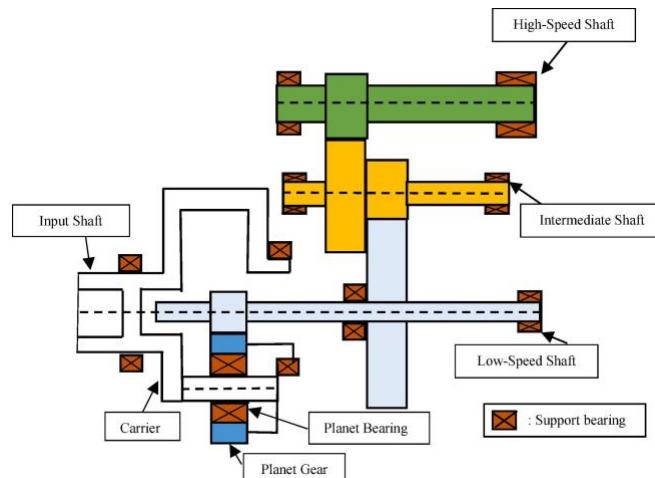
7.7.1 Yardımcı ve Kritik Parçalar

Rüzgâr türbinlerinin güvenilirliği ve işletme sürekliliği, yalnızca ana rotor sistemiyle değil, yardımcı ve kritik bileşenlerin kararlılığıyla da doğrudan ilişkilidir. Bu bileşenler, enerji dönüşüm zincirinin mekanik, tribolojik (sürtünme ve aşınma ilişkili), elektriksel ve kontrolesel süreçlerinde görev yapar.

Ana yataklar ve rulmanlar türbinin en fazla zorlanan elemanlarıdır. Rotor milinin dönme hareketi bu yataklar üzerinde taşınır; bu nedenle mil eksenindeki mikrometre düzeyindeki hizalama hataları bile aşırı sürtünme ve ısınmaya yol açar. Dhanola & Garg (2020) çalışmalarında, ana yatakların tribolojik sorunlarını inceleyerek, aşınma, yağ filmi bozulması ve kontaminasyonun (yağ içerisinde partikül karışması) en yaygın arıza nedenlerini olduğunu göstermiştir.

Hart ve diğ. (2019) ise rulmanların yük dağılımının asimetrik olduğu koşullarda mikroyorulma (micropitting) olduğunu, bu nedenle yük izleme sensörleri ve sıcaklık tabanlı erken uyarı sistemlerinin zorunlu hale geldiğini vurgulamıştır. Bu bileşenlerin tasarımindan elastohidrodinamik yağlama (EHL) prensibi dikkate alınır; yağ filminin kalınlığı ve viskozitesi, rulman ömrünü doğrudan belirler.

Dişli kutusu (gearbox) düşük hızlı rotor hareketini jeneratör için gerekli yüksek hızlara çevirir. Bu sistemde üç ana kademeli planet dişli düzeni bulunur.



Şekil 7.8. Dişli kutusunun yapısı

Jeneratör, türbinin mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren kalbidir. Modern sistemlerde çoğunlukla doubly-fed induction generator (DFIG) veya permanent magnet synchronous generator (PMSG) kullanılır. Márquez ve diğ. (2017) jeneratör arızalarının çoğundan sargı izolasyon hatası, stator kısa devresi veya rotor balanssızlığı kaynaklı olduğunu ve bu tür arızaların sistemin tamamında zincirleme duruşlara neden olabileceğini raporlamıştır.

Kontrol ve güç elektroniği sistemleri (pitch, yaw, converter, inverter, SCADA kontrolörü), türbinin güvenli ve verimli çalışmasını sağlar. Qiao & Lu (2015) kontrol elektroniğini türbinin “sinir sistemi” olarak tanımlamış, arızaların %25’inin bu bileşenlerden kaynaklandığını bildirmiştir. Milloway & McCarty (2024) kontrol sistemlerini kritiklik analizine tabi tutarak, bu sistemlerin hem yük optimizasyonu hem de acil durum frenlemesi açısından türbin güvenilirliğinde en hassas nokta olduğunu belirtmiştir. Pitch ve yaw kontrol motorları, aşırı rüzgâr koşullarında kanat açısını saniyeler içinde değiştirerek yükü dengelemeye çalışır.

7.7.2 Kritiklik ve Arıza Eğilimleri

Rüzgâr türbinlerinde yatak sistemleri, dişli kutusu, ana mil ve jeneratör gibi dönen bileşenlerin çalışmasını doğrudan etkileyen en hassas parçalardır. Türbinlerin ömrü genellikle 20–25 yıl olarak planlanmasına rağmen, yataklar bu sürede sürekli değişken yükler, sıcaklık dalgalanmaları ve dengesiz rüzgâr koşulları altında çalışıkları için güvenilirlikleri düşmektedir. Dhanola & Garg (2020) çalışmada, türbin rulmanlarının yalnızca %10'unun tasarlanan ömrleri boyunca arızasız çalışıldığı, arızaların ise büyük oranda yetersiz yağlama (%30), hatalı montaj (%40) ve imalat kusurları (%20) kaynaklı olduğu belirtilmiştir.

Saha verilerine göre türbin duruş sürelerinin önemli kısmı rulman arızalarına bağlıdır. Bu durum hem enerji üretim kaybına hem de yüksek bakım maliyetlerine yol açar. En sık arızalanan bileşenlerin dişli kutusu yatakları olduğu; bunları ana mil ve pitch sistemi yataklarının izlediği; jeneratör yataklarının ise en düşük arıza oranına sahip olduğu rapor edilmiştir.

2011 yılında ABD Enerji Bakanlığı, NREL ve Argonne Ulusal Laboratuvarı tarafından düzenlenen seminerde, yataklarda sık karşılaşılan tribolojik sorunlar çevresel etkilerle ilişkilendirilmiştir. Bu etkiler arasında nem kaynaklı korozyon, sıcaklık dalgalanmaları, kayma (skidding) ve yağ bozunuğu yer almaktadır. Bu koşullar altında yüzeylerde çeşitli arıza türleri gelişebilir:

- Scuffing: Yetersiz yağlama nedeniyle iki yüzey arasındaki sürtünme artar ve yüksek plastik deformasyon oluşur. Bu, yüzeyde metal teması ve çizik benzeri aşınma izlerine yol açar.
- Elektriksel oyuklaşma (Electro-pitting): Mil ile yatak arasında elektrik akımı geçmesi sonucu yüzeyde küçük erime çukurları oluşur. Yalıtım arızaları ve topraklama hataları bu tür arızalara neden olur.
- Mikroyorulma (Micropitting): Kayma veya yuvarlanma temasında kesme gerilmeleri yüzeyde mikroçatlaklığa neden olur. Bu çatlaklar zamanla birleşerek yüzeyin çukurlaşmasına ve verim kaybına yol açar.
- Beyaz Oyuk Çatlaklar (White Etching Cracks, WECs): Yüzeyin mikroyapısında beyazlaşma ve pul pul dökülme şeklinde görülen, genellikle erken yatak arızalarına neden olan karmaşık bir mekanizmadır.
- Fretting ve Sahte Brinelling: Özellikle pitch ve yaw sistemlerinde düşük genlikli titreşimler sonucu yoğun yüzeyden sıkışarak uzaklaşmasıyla oluşur. Bu durumda yağ filmi kaybolur, yüzeyler doğrudan temas eder ve yatak yuvalarında çukurlaşmalar meydana gelir.

Bu arıza türleri genellikle birlikte gelişir ve yapısal titreşimlerle birleştiğinde türbinin genel ömrünü kısaltır. Dhanola & Garg (2020) ayrıca Fault Tree Analysis (FTA) yaklaşımını

kullanarak aşınma tiplerini sınıflandırmış; aşındırıcı (abrasive), yapışkan (adhesive), korozyon (corrosive), erozyon (erosive), fretting, sahte brinelling, mikroyorulma ve yüzey yorulması (surface fatigue) tiplerinin rüzgâr turbini yataklarında en baskın aşınma biçimleri olduğunu göstermiştir.

7.8 Enerji Dönüşüm Süreci

Rüzgâr enerjisi sistemlerinde, türbin rotoruna ulaşan hava akışının kinetik enerjisinden elektrik üretimine kadar bir dizi fiziksel ve teknolojik dönüşüm gerçekleşir. Bu süreç, aerodinamik, mekanik ve elektriksel aşamaların uyum içinde çalıştığı karmaşık bir enerji zinciridir (Perera ve diğ., 2022).

- Kinetik Enerji → Aerodinamik Dönüşüm

Rüzgâr, atmosferdeki basınç farklarından doğan hava hareketidir. Türbin sahasına ulaştığında, kanatların aerodinamik profili etrafında bir basınç farkı oluşturur. Üst yüzeydeki hava basıncının azalması, alt yüzeydekinden daha yüksek bir kaldırma kuvveti yaratır ve kanatlar dönmeye başlar (U.S. Department of Energy, 2024).

Bu aşamada rüzgârin taşıdığı kinetik enerji, kanatların dönme hareketiyle yakalanarak türbin sisteme aktarılır. Kanat geometrisi, eğim açısı ve rüzgâr yönü bu dönüşümün verimliliğini belirleyen temel etkenlerdir (Perera ve diğ., 2022).

- Aerodinamik Dönüşüm → Rotor Mekanik Enerjisi

Kanatların hareketiyle oluşan dönme kuvveti, rotor miline aktarılır ve burada mekanik enerjiye dönüşür. Rotor şaftı, yataklar ve bazen dişli kutusu aracılığıyla bu hareketi jeneratöre ileter.

Günümüzde bazı modern türbinlerde, mekanik kayıpları azaltmak ve bakım gereksinimini düşürmek amacıyla dişli kutusu kullanılmadan doğrudan tahrikli sistemler tercih edilmektedir (Perera ve diğ., 2022).

Bu aşama, türbinin mekanik dayanımı ve enerji iletim verimi açısından kritik öneme sahiptir.

- Mekanik Enerji → Elektrik Enerjisi

Rotor milinden gelen mekanik güç, jeneratör içinde elektrik enerjisine dönüştürülür. Jeneratör, elektromanyetik induksiyon prensibine göre çalışır: dönen mıknatıslar bobinlerde elektrik akımı oluşturur (Lin ve diğ., 2023).

Modern türbinlerde bu aşamada güç elektroniği dönüştürücüler devreye girer. Bu sistemler, rüzgâr hızındaki dalgalandımlara rağmen üretilen elektriğin frekansını ve gerilimini sabit tutarak enerji kalitesini korur (Perera ve diğ., 2022).

- Elektrik Enerjisi → Şebeke Bağlantısı ve Teslimi

Jeneratörden çıkan elektrik, trafo ve dönüştürücü sistemlerinden geçerek iletim hattına uygun hale getirilir. Gerekli gerilim ve frekans ayarlamaları yapıldıktan sonra enerji, dağıtım şebekesine aktarılır.

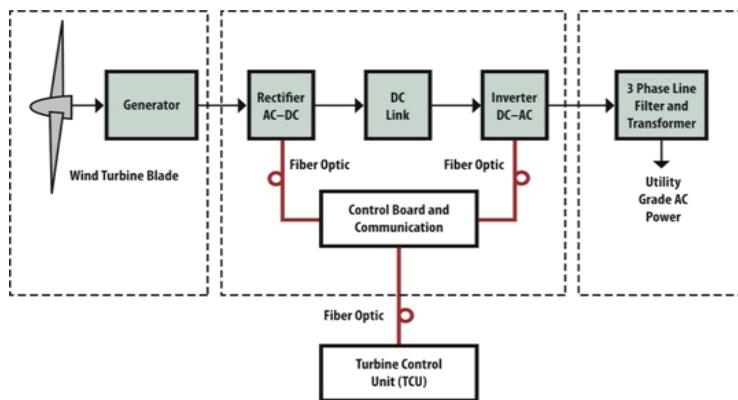
Bu aşamada şebeke kodlarına uygunluk, gerilim dengesi ve güç kalitesi gibi konular önem taşır. Rüzgâr hızı değiştiğinde türbinin kontrol sistemi üretimi otomatik olarak ayarlayarak şebekede dengesizlik oluşmasını engeller (U.S. Department of Energy, 2024).

- Kontrol, İzleme ve Optimizasyon

Tüm enerji dönüşüm süreci boyunca türbinin kontrol sistemleri aktif biçimde çalışır. Türbinin rüzgâr yönüne dönmeyi sağlayan yaw sistemi, kanat açısını ayarlayan pitch kontrolü ve aşırı rüzgâr koşullarında devreye giren frenleme sistemleri üretimin güvenli ve verimli olmasını sağlar (Perera ve dig., 2022).

Ayrıca modern türbinlerde kullanılan SCADA izleme sistemleri, rüzgâr hızı, sıcaklık, titreşim ve jeneratör performansını sürekli takip ederek olası arızaları önceden belirlemeye yardımcı olur (Lin ve dig., 2023).

Bu sayede hem enerji üretimi optimize edilir hem de türbin bileşenlerinin ömrü uzatılır.



Şekil 7.9: Rüzgâr türbininde enerji dönüşüm süreci. (Sawalha, 2017)

Türbin kanatlarının yakaladığı kinetik enerji, jeneratör aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülür. Üretilen akım, doğrultucu (AC-DC), DC bağlantı hattı ve evirici (DC-AC) aşamalarından geçerek şebeke standardına uygun hale getirilir. Kontrol birimi, sistemin gerilim, frekans ve güç kalitesini düzenleyerek güvenli ve verimli enerji üretimini sağlar.

8. Standartlar ve Mevzuatlar

8.1 IEC 61400 Serisi

Rüzgâr enerjisi teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte türbinlerin güvenliği, verimliliği ve çevresel sürdürülebilirliği açısından uluslararası standartlara duyulan ihtiyaç artmıştır. Bu kapsamında, Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC) tarafından yayımlanan IEC 61400 Serisi, rüzgâr türbinlerinin tasarımını, performansı, kurulumu, testi ve işletimi için teknik gereklilikleri tanımlayan uluslararası standartlar bütünüdür.

8.1.1 Genel Standartlar

Aşağıda, Uluslararası Elektroteknik Komisyonu'nun (IEC) resmi web sitesinde

açıklanan IEC 61400 serisine ait standartlar listelenmiştir (IEC, t.y.).

IEC 61400-1:2019: Rüzgâr Türbinleri için Tasarım Gereklikleri.

Rüzgâr turbinlerinin yapısal bütünlüğünü sağlamak amacıyla temel tasarım kurallarını belirler. Türbinin ömrü boyunca maruz kalabileceği rüzgâr yükleri, turbülans, aşırı rüzgâr hızları ve diğer çevresel etkiler için güvenlik sınırları tanımlar. Ayrıca kontrol ve koruma sistemlerinin tasarımını, mekanik-elektriksel bileşenlerin etkileşimi ve bakım planlaması gibi konuları da kapsar.

IEC 61400-2:2013: Küçük Türbinler için Özel Gereklikler.

100 kW'a kadar olan küçük rüzgâr turbinlerinin (SWT) güvenliği, kalite güvencesi ve mühendislik bütünlüğü için kurallar getirir. Bu standart, küçük ölçekli sistemlerde basitleştirilmiş bir tasarım yaklaşımı sunar ve elektriksel, mekanik ve destek yapılarına ilişkin gereklikleri açıklar.

IEC 61400-3-1:2019: Sabit Offshore Türbinler Standardı.

Deniz üstü rüzgâr turbinlerinin yapısal dayanımını ve deniz koşullarında güvenli çalışmasını sağlamak hedefler. Rüzgâr, dalga ve akıntı yüklerinin bileşik etkileri dikkate alınarak tasarım gereklilikleri belirlenmiştir.

IEC TS 61400-3-2:2019: Yüzer Offshore Türbinler (FOWT) için Tasarım Prensipleri

Sabit temelli sistemlerden farklı olarak, hareketli üzeren yapılar (spar, yarı batık, TLP) üzerinde kurulan turbinlerin dış koşullar altındaki mühendislik bütünlüğünü korumak amacıyla hazırlanmıştır. Bu standart, platform stabilitesi, bağlantı sistemleri ve çevresel yük etkilerini tanımlar.

IEC 61400-5:2020: Kanat Tasarımı.

Rüzgâr turbini kanatlarının tasarım, üretim ve bakım aşamalarında yapısal güvenliği korumak için gereklilikleri düzenler. Malzeme seçimi, üretim toleransları, kalite yönetimi ve test yöntemleri bu kapsamda değerlendirilir.

IEC 61400-6:2020: Kule ve Temel Tasarımı.

Türbinlerin taşıyıcı sistemlerinin güvenliğini değerlendirmek üzere jeoteknik koşullar, bağlantı elemanları, montaj yükleri ve bakım etkilerini dikkate alır.

IEC 61400-8:2024: Yapısal Bileşenlerin Tasarımı.

Türbin naseli (nacelle), ana mil, dişli kutusu ve destek çerçevesi gibi bileşenlerin dayanım gerekliliklerini tanımlar. Bu sayede turbinin iç mekanik bütünlüğü korunur.

8.1.2 Performans ve Test Standartları

Rüzgâr turbinlerinin performans ölçümleri, güvenilir enerji üretim tahminleri açısından

büyük önem taşır.

IEC 61400-11:2012: Akustik Gürültü Ölçüm Teknikleri.

Rüzgâr türbinlerinin akustik gürültü emisyonlarını belirlemek için kullanılan ölçüm yöntemlerini tanımlar. Bu standart, türbin ses seviyesinin rüzgâr hızına bağlı olarak nasıl değiştiğini analiz eder ve türbinlerin çevresel gürültü yönetmeliği sınırlarına uygunluğunu değerlendirir.

IEC TS 61400-11-2:2024: Alıcı Konumunda Gürültü Ölçüm Teknikleri.

Akustik gürültünün türbin çevresindeki alıcı konumlarında (örneğin yerleşim bölgelerinde) nasıl ölçüleceğini açıklayarak çevresel etkilerin değerlendirilmesini destekler.

IEC 61400-12 Serisi: Güç Performansı Ölçüm Standartları.

IEC 61400-12-1:2022: Tek bir türbinin güç eğrisinin belirlenmesi için referans standarttır.

IEC 61400-12-2:2022: Nacelle anemometrisine dayalı ölçüm yöntemlerini tanımlar.

IEC 61400-12-3:2022: Arazi kaynaklı hız sapmalarını belirlemek için ölçüm tabanlı saha kalibrasyonu sağlar.

IEC TR 61400-12-4:2020: Sayısal saha kalibrasyonu yöntemlerini açıklar. Bu standart, sayısal akış modellerine (örneğin CFD) dayalı olarak karmaşık topografyalarda performans doğruluğunu artırır.

IEC 61400-12-5:2022: Arazi ve engel etkilerinin değerlendirilmesi için yönergeler sunar.

IEC 61400-12-6:2022: Nacelle üzerindeki anemometre verileriyle serbest akış rüzgâr hızı arasındaki farkı belirleyen transfer fonksiyonunu tanımlar. Bu, nacelle tabanlı performans ölçümlerinin doğruluğunu artırır.

IEC 61400-13:2015: Mekanik Yük Ölçüm Standartları.

Türbinlerdeki mekanik yüklerin ölçümü ve bu ölçümlere dayalı model doğrulama esaslarını belirler. Bu standart, prototip testlerinde yüklerin güvenli sınırlar içinde kalıp kalmadığını değerlendirmek için kullanılır.

IEC TS 61400-14:2005: Tonal Gürültü (Tonality) Beyanı.

Türbinlerin tonal gürültü (tonality) özelliklerinin beyanına ilişkin rehberlik sağlar. Bir rüzgâr turbini grubunun ses gücü seviyesi ve tonallığının doğru biçimde raporlanması amaçlar ve genellikle IEC 61400-11 standarı ile birlikte kullanılır.

8.1.3 Elektriksel Özellikler ve Şebeke Uyumu

Rüzgâr türbinlerinin şebekeye entegrasyonu sırasında enerji kalitesi, harmonikler, reaktif güç ve gerilim dalgalandırmaları gibi faktörler büyük önem taşır.

IEC 61400-21 Serisi: Elektriksel Özelliklerin Ölçümü ve Değerlendirilmesi.

IEC 61400-21-1:2019: Şebekeye bağlı rüzgâr türbinlerinin elektriksel davranışını tanımlar, ölçüm yöntemlerini belirler ve türbinin güç kalitesi ile bağlantı gereksinimlerine uygunluğunu değerlendirmeye yönelik prosedürler sunar.

IEC 61400-21-2:2023: Enerji santrali düzeyinde test kriterlerini tanımlar; özellikle güç santrali kontrol cihazının (PPC) fonksiyonellliğini test etmek için standart bir ölçüm süreci sağlar.

IEC 61400-27 Serisi: Elektriksel Simülasyon Modelleri.

IEC 61400-27-1:2020: Rüzgâr türbinleri ve rüzgâr enerji santralleri için, güç sistemi ve şebeke kararlılığı analizlerinde kullanılan genel elektriksel simülasyon modellerini tanımlar.

IEC 61400-27-2:2020: Şebeke analizlerinde kullanılan bu modellerin doğrulama ve uygunluk testleri açıklar.

8.1.4 Diğer Önemli Alt Standartlar

IEC 61400-23:2014: Rotor Kanatlarının Mekanik Testleri.

Bu standart, türbin kanatlarının tam ölçekli yapısal testlerini ve test sonuçlarının değerlendirilmesini düzenler. Kapsamında statik yük, yorgunluk ve son yük testleri gibi deneySEL yöntemler bulunur. Amaç, kanatların bütünlüğünü doğrulamak ve üretici ile bağımsız denetleyiciler için güvenilir değerlendirme kriterleri sağlamaktır.

IEC 61400-24:2019: Yıldırımdan Korunma Gereklilikleri.

Rüzgâr türbinlerinin yıldırım riskine karşı korunması için izlenecek tasarım ve değerlendirme prensiplerini tanımlar. Bu belge, yıldırım akımının doğrudan ve dolaylı etkilerine karşı koruma, topraklama sistemlerinin tasarıımı ve risk analizi gibi konuları kapsar. Özellikle yüksek rakımlı veya açık deniz türbinlerinde, yıldırım kaynaklı hasarların önlenmesi açısından bu standart kritik öneme sahiptir.

IEC 61400-25 Serisi: İzleme ve Kontrol İletişimi.

Bu seri, rüzgâr santrallerinde kullanılan haberleşme altyapısı, veri modelleri ve bilgi değişim protokollerine ilişkin standartları kapsar.

IEC 61400-25-1:2017: Temel ilkeler, modeller ve genel tanımlar.

IEC 61400-25-2:2015: Veri türleri ve bilgi modelleri.

IEC 61400-25-3:2015: Bilgi değişim modelleri.

IEC 61400-25-4:2016: İletişim profiline eşleme.

IEC 61400-25-5:2017: Uyumluluk testi.

IEC 61400-25-6:2016: Durum izleme için mantıksal düğüm ve veri sınıfları.

IEC 61400-26 Serisi: Erişilebilirlik ve Güvenilirlik.

IEC 61400-26-1:2019: Türbinlerin zaman ve üretim tabanlı kullanılabilirlik göstergelerinin hesaplanması için bilgi modeli sunar.

IEC TS 61400-26-4:2024: Türbin güvenilirliğinin değerlendirilmesi için metriklerin ve raporlama kriterlerinin tanımlandığı teknik spesifikasyondur.

IEC TS 61400-29:2023: Türbinlerin Aydınlatma ve İşaretleme Gereklikleri.

Kara ve deniz üzerindeki rüzgâr türbinlerinin havacılık güvenliği açısından aydınlatma ve işaretleme koşullarını belirler. Gece görüş uyumluluğu (NVG) ve çevresel etkilerin azaltılması gibi konuları kapsar.

IEC TS 61400-30:2023: Türbin Güvenliği ve Sağlık Gereklikleri.

Rüzgâr türbinlerinin tasarımını, kurulumunu, işletimi ve bakımı sırasında sağlık ve güvenlik ilkelerini açıklar. Güvenli çalışma, denetim ve devre dışı bırakma süreçlerine ilişkin standart prosedürler sunar.

IEC TS 61400-31:2023: Yerleşim Risk Değerlendirmesi.

Rüzgâr türbinlerinin çevresindeki yerleşim alanlarına yönelik olası riskleri değerlendirdir. Türbin arızaları, aşırı rüzgâr, buz fırlaması, yıldırım, deprem veya yangın gibi durumları kapsar ve yatay eksenli kara tipi türbinler için geçerlidir.

IEC 61400-50 Serisi: Rüzgâr Ölçümü.

IEC 61400-50-1:2022: Meteoroloji direkleri, nacelle ve döner başlıklı cihazlarla yapılan ölçümlerin yöntemlerini belirler.

IEC 61400-50-2:2022: Yer üstü uzaktan algılama (LIDAR, SODAR) sistemlerinin uygulanmasına ilişkin gereklilikleri açıklar.

IEC 61400-50-3:2022: Nacelle monteli LIDAR cihazlarıyla yapılan ölçümlerin doğruluk ve raporlama prosedürlerini tanımlar.

8.2 MEASNET ve TSE Standartları

Bu bölümde, rüzgâr türbinlerinin performans değerlendirme, saha ölçümleri, güç eğrisi doğrulaması ve kalite kontrol süreçlerinde kullanılan uluslararası MEASNET standartları ile Türkiye'ye özgü TSE standartları ele alınmaktadır.

8.2.1 MEASNET

MEASNET (Measurement Network of Wind Energy Institutes), yani Rüzgâr Enerjisi Enstitüleri Ölçüm Ağı, rüzgâr enerjisi alanında faaliyet gösteren uluslararası bir ölçüm kuruluşları ağından oluşan bir organizasyondur.

Amacı:

- Rüzgâr ölçümü, güç eğrisi testleri, türbin performans değerlendirmeleri gibi konularda

- karşılaştırılabilir, izlenebilir, yüksek doğrulukta ölçümler sağlamak,
- Farklı ülkelerde yapılan ölçümlerin aynı kalite düzeyinde olmasını garanti etmek,
- Akredite laboratuvarlar arasında bir kalibrasyon ve standartizasyon ağı oluşturmaktır.

MEASNET, özellikle rüzgâr enerjisi projelerinde kullanılan IEC 61400 serisi standartları ile uyumlu ölçüm prosedürleri geliştirir. Böylece rüzgâr ölçüm direkleri, sensör kalibrasyonları ve performans testleri için ortak bir çerçeve sunar.

Resmi internet sitesinde bu ağın nasıl ve neden oluşturulduğu, ‘Ağ kurallarının gerekli oluşturulması ve ortaklaşa kabul edilen ölçüm yöntemlerinin belirlenmesi, Avrupa Komisyonu tarafından ortaklaşa yürütülen iki proje kapsamında sübvanse edildi. İlk kez, ticari rekabet içinde olan enstitüler, müşterilerinin yararına birlikte çalışmayı kabul etti ve amaçları, açık küresel bir pazarda endüstri için gerekli olan karşılıklı karşılaştırma ve kabul için yeterli, eşit kalitede ölçümler yapmaktı.’ olarak açıklanmıştır.

8.2.1.1 Prosedürler

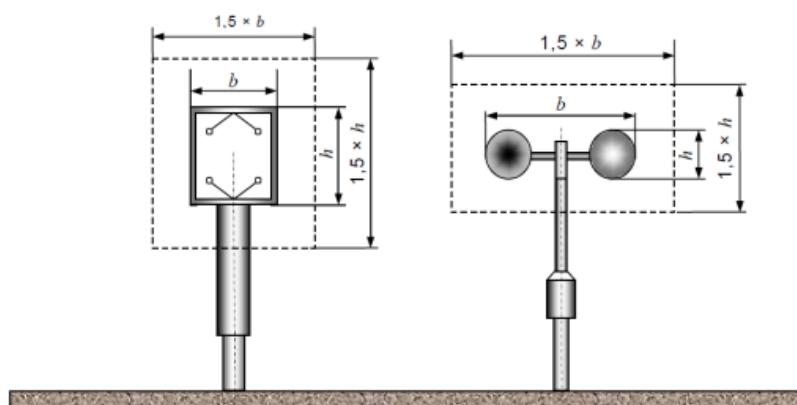
1. Anemometre Kalibrasyon Prosedürü (Versiyon 3, Aralık 2020)

Bu prosedür, IEC 61400-12-1 Ed. 2, Annex F'ye dayanır.

a. Rüzgâr Tüneli Gereksinimleri

Blockage (blokaj) Oranı: Tünelin blokaj oranı (anemometrenin ön alanı / test kesit alanı) en fazla 0,05 (yani %5) olmalıdır.

Akış Homojenliği (“Flow Uniformity”): Kalibrasyon hacmi, anemometrenin kapladığı enine alandan ($b \times h$) başlayarak akış yönünde $1,5 \times b$ kadar uzatılmalıdır.



Şekil 8.1: Akış uniformitesi (akış homojenliği) testi için hacmin tanımı (Anemometre Kalibrasyon Prosedürü, 2020)

Grid Ölçüm Çözünürlüğü: Flow-uniformity testlerinde her yönde 15 cm'den daha büyük aralık olmamalıdır (yatay, düşey ve akış yönü).

Akış Kararlılığı (Zamansal Stabilite): Test hızları olarak 4, 8, 12 ve 16 m/s'te akış stabilitesi ölçülmelidir.

Yatay Rüzgâr Gradyanı: Aynı hız seviyelerinde yatay hız gradyanı da ölçülmelidir. Eğer tünelde filtre ağı/net varsa, netlerin kirlenmesi gibi etkiler değerlendirilmelidir.

Anemometrenin Tünel Üzerine Etkisi: Anemometrenin referans ölçüm sistemine etkisi analiz edilmeli. Örneğin, sensör önce referans ölçüm sisteminin uzağına, sonra normal montaj konumuna yerleştirilerek ölçümler karşılaştırılmalıdır.

Uzunlamasına Türbülans Yoğunluğu (Axial Turbulence): IEC standardında tanımlandığı şekilde değerlendirilmelidir.

Tünel Kalibrasyon Faktörü: Tunelin kalibrasyon faktörü pitot tüpü ile 4–16 m/s hız aralığında hesaplanmalı. Alternatif olarak LDA (Lazer Doppler Anemometri) kullanılabilir, ancak belirsizliği pitot'a eşit veya daha düşük olmalıdır.

Reproduksiyon (Uzun Vadeli Kararlılık): Kalibrasyon tesisinin kararlılığı test edilmeli; en az 50 kalibrasyon, en az 3 aylık bir süre boyunca yapılmalıdır.

b. Montaj ve Cihaz Kurulumu

Anemometre, saha koşullarına benzer bir montaj düzeniyle tünelde yerleştirilmeli. Boru çapı toleransı ± 1 mm olmalıdır.

Yön sensörlü anemometrelerde montaj ve yön konfigürasyonu belgelenmeli.

Referans pitot tüpünün hizalaması $\pm 0,5^\circ$ 'yi geçmemeli.

c. Kalibrasyon Prosedürü

Kalibrasyon öncesinde “run-in” süreci: Anemometre en az 5 dakika, ~10 m/s hızda çalıştırılmalı.

Temel kalibrasyon aralığı 4–16 m/s hızlarıdır. Bu aralık dışında kalibrasyon yapılacaksa, akış kalite testleri ve belirsizlik analizi buna göre genişletilmeli. Lineer regresyon analizi yalnızca 4–16 m/s aralığında hesaplanmalıdır.

ç. Veri Analizi

LDA referanslı ölçümlerde; anemometrenin tünel etkisi (montaj ve sensör etkisi) için düzeltme katsayısi (k_p) kullanılmalıdır.

Hava yoğunluğu, sıcaklık ve basınç verileri de dikkate alınarak referans hızı hesaplamak için uygun formüller kullanılmalıdır.

d. Belirsizlik Analizi

Belirsizlik bileşenleri: laboratuvar sapmaları, referans cihaz belirsizliği, montajdan gelen hata, uzun vadeli kararlılık (reproduksiyon) vb.

MEASNET üyeleri düzenli olarak Proficiency Test (PT)'lere katılmak zorundadır.

Uyumluluk kriteri (Compliance Factor): Prosedürdeki ek kriterlere göre “Uyumluluk Faktörü” $\leq 1\%$ olmalıdır.

Kompatibilite İndeksi (Compatibility Index) $E \leq 1$ olmalıdır.

e. Raporlama Gereksinimleri

Kalibrasyon tesisi raporu: Tünelin akış kalitesi özelliklerini, referans cihaz konfigürasyonu, ölçüm koşulları ve analiz protokollerini dahil olmalıdır.

Kalibrasyon sertifikası, ölçülen hız seviyeleri, kalibrasyon katsayıları (offset ve kazanç), belirsizlik değerleri içermelidir.

Örnek belirsizlik hesabı (10 m/s için) prosedürde verilmiştir.

f. Uzmanlar Arası Karşılaştırma / Proficiency Test Kuralları (Annex A)

PT (Proficiency Test) planı: Katılımcılar, test planı oluşturup belgelendirmelidir.

Anemometre identifikasiyonu (seriye numarası, konfigürasyon), montaj yöntemi ve ölçüm parametreleri PT planında yer almalıdır.

İstatistiksel analiz adımları: Ölçülen hız değerleri üzerinden MEASNET referans hızı hesaplanır, sapmalar belirlenir, üç değerler elenir, “Kompliance Faktörü” değerlendirilir.

Anemometre fiziksel durumu PT öncesi ve sonrası incelenir; hasar, bozulma olan sensörler sonuç setinden çıkarılır.

g. Boru Çapı Etkisi Testi

Belgede yapılan testlerde, farklı montaj boru çapları ($\pm 1 \text{ mm}$ tolerans dahil) anemometrenin kalibrasyon değerleri üzerinde anlamlı sapmalar yaratmamıştır. Bu sonuç, IEC standardında önerilen çok dar boru çapı toleranslarının (örneğin $\pm 0,1 \text{ mm}$) her zaman gerekli olmadığını gösterir.

2. Güç Performansı Ölçüm Prosedürü (Versiyon 5 , Aralık 2009)

Esas olarak IEC 61400-12-1:2005(E) “Wind turbines – Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines” standardına dayanmaktadır. MEASNET bu referans ölçüm prosedürüne ek olarak ilave zorunluluklar koymustur; böylece ölçüm kalitesinin ve laboratuvarlar arası karşılaştırılabilirliğinin artırılması hedeflenmiştir.

a. Rüzgâr Hızı Ölçümü ve Anemometre Kalibrasyonu

Cup anemometreler kullanılmadan önce MEASNET akrediteli bir kuruluşla tünel kalibrasyonu için gönderilmeli ve ölçüm kampanyasından sonra yeniden kalibre edilmelidir.

Eğer kalibrasyonlar arasında sapma varsa ve bu sapma IEC standardında belirlenmiş sınırları aşarsa, bu durum ölçüm belirsizliğini artıracak şekilde ele alınmalı veya ilgili veri dönemi kullanılmaz hale getirilmeli (“data rejection”) ya da belirsizlik düzeltmesi yapılmalıdır.

Rüzgâr yönü ve hız profil değişiminin (“wind shear”) ölçümü sırasında, aynı tür ölçüm

cihazlarının kullanılması, ölçümelerin aynı konfigürasyon ile yapılması, yüksekliklerin (örneğin hub height $\pm 2,5\%$ ve lower blade tip height $\pm 10\%$ rotor çapı) uygun şekilde seçilmesi gibi şartlar getirilmiştir.

b. Rotasyon Hızı ve Pitch Açısı

Aktif güç kontrol sistemine sahip rüzgâr türbinlerinde, türbinin rotasyon hızı ve pitch açısı da ölçülmeli ve elektriksel güç ölçümleri ile birlikte kullanılarak türbin davranışını karakterize edilmelidir.

c. Veri Toplama, Red ve Normalizasyon

Hava basıncı, sıcaklık ve nem gibi çevresel değişkenler kalibre edilmiş uygun sensörlerle ölçülmeli; bu ölçümlerle birlikte rotasyon hızı ve pitch açısı gibi değerler de 10 dakikalık ortalamalar şeklinde, saniyede ≥ 1 ölçüm (1 Hz) veya daha hızlı bir örnekleme ile kaydedilmelidir.

Ölçüm kampanyasında buzlanma olasılığı olan şartlarda (örneğin sıcaklık $< 2^{\circ}\text{C}$ ve bağılı nem $> 80\%$) veri kabul edilmemelidir (“data rejection”).

Normalizasyon kapsamında, ölçüm sahasındaki ortalama hava yoğunluğu ile standart yoğunluk (1.225 kg/m^3) arasındaki fark $\pm 0,15 \text{ kg/m}^3$ 'ü geçiyorsa, standart yoğunluğa normalizasyon uygulandığı durumlarda ilave belirsizlik kabul edilmeli ve raporda bu durum belirtilmelidir.

ç. Raporlama Formatı

Sonuçların sunumu açısından, rüzgâr yönü ve hız sensörü için “north band gap” raporlanmalı, türbülans yoğunluğu (TI) ve rüzgâr yönü ekseni üzerinde histogram veya bin ortalamaları şeklinde sunulmalıdır.

Rüzgâr kayması (wind shear exponent, α) hesaplanmalı ve hem ortalama değeri hem standart sapmasıyla birlikte tablo ve grafiklerde yer almalıdır.

$$\alpha = \frac{\ln \left(\frac{V_{hub}}{V_{tip}} \right)}{\ln \left(\frac{Z_{hub}}{Z_{tip}} \right)}$$

V_{hub} : Hub yüksekliğindeki rüzgar şiddeti

V_{tip} : Alt bıçak ucundaki rüzgar şiddeti

Z_{hub} : Hub yüksekliği

Z_{tip} : Alt bıçak ucu yüksekliği

d. Engel/Obstakl Değerlendirmesi

Test sahasında bulunan engellerin türbin veya mast üzerindeki etkisi, Perera formülü aracılığıyla değerlendirilmelidir. Bir engelin etkisi $\% 1$ 'i aşarsa “significant” olarak kabul edilir. Büyük engellerin (örneğin geniş ormanlık alanlar, büyük depolar) tek bir yüksek engel olarak

değil, ~50 m genişliğinde alt engellere bölünerek değerlendirilmesi önerilir; bu sayede gerçekçi bir etki alanı hesaplaması yapılabilir.

e. Saha Kalibrasyonu (Site Calibration) ve Belirsizlik Değerlendirmesi

Mast ve türbin konumu için saha kalibrasyonu yapılrken sıcaklık, bağıl nem, hız düzeyi gibi parametreler dikkatle izlenmeli; geçersiz hız aralığı (örneğin <4 m/s veya >16 m/s) kayıtları reddedilebilir. Komşu yön sektörlerinde akış düzeltme katsayıları (f_i , f_{i+1}) arasındaki değişim %2'den fazla olmamalıdır. Ölçüm belirsizlikleri IEC standartı Annex D içinde verilen yönteme göre hesaplanmalı ve her “measurement” için değişkenler belgelenmelidir.

3. Wind Direction Sensor Calibration Procedure – Versiyon 1, Mayıs 2025

Prosedür, özellikle IEC 61400-50-1 (Ed. 1, 2022)-nin Ek A'sına (rüzgar tüneli kalibrasyon prosedürü – rüzgar yönü sensörleri için) dayanır ve MEASNET Uzman Grubu (Wind Sensor Calibration) tarafından hazırlanmıştır.

a. Terimsel Netleştirmeler

IEC standartında kullanılan bazı terimler belirsiz olduğundan, MEASNET öneri olarak bazı terimlerin hangi anlamda kullanılacağını belirtmiştir:

- “Reference wind direction sensor” ve “Quality control wind direction sensor”: MEASNET'e göre her ikisi de kalibrasyon laboratuvarı tarafından rüzgar tünelinin bütünlüğünü kontrol etmek üzere belirlenmiş sensöre işaret eder. Bu nedenle MEASNET, “quality control sensor” teriminin tercih edilmesini tavsiye eder.
- “Calibration certificate” ve “Calibration report” terimleri: ISO 17025 kapsamında eş anlamlı kabul edilse de, kullanım kolaylığı açısından “certificate” teriminin tercih edilmesi önerilmiştir.
- “Wind tunnel centreline”: MEASNET özellikle sınırlandırma getiriyor; tünel merkez hattı (centreline) her zaman akış yönüyle paralel olmayabilir; sensör kalibrasyonunda esas alınacak referans, tünel akış yönüdür.

b. Rüzgar Tüneli ve Akış Kalitesi Şartları

Tünel testi için “blockage ratio” (ön engelleme oranı) önemli bir kriterdir. Belgeye göre, yoğunluğu veya engellemesi fazla montaj sistemi test bölümünün toplam alanına göre oranı %5'i geçmemelidir. IEC standartında “0” ifadesi yer almasına rağmen MEASNET bunu tipografik hata olarak değerlendirmiştir ve kapalı ya da açık test bölümü için aynı mantığı yani %5 sınırını önerir.

Rüzgar tünelinin tekrar edilebilirlik (repeatability) ve yeniden üretilebilirlik (reproducibility) testlerini yapması gereklidir. MEASNET önerisi olarak :

- Tekrarlanabilirlik: Bir kalite kontrol sensörü ile 10 ardışık ölçümde maksimum 0.5° sapma sınırı önerilmiştir.
- Yeniden üretilebilirlik: En az 50 kalibrasyon ölçümünden oluşan ~3 ay süreli gözlemlerde 1° sapma sınırı yönünde öneri yapılmıştır.

c. Kalibrasyon Kurulumu ve Montaj Gereksinimleri

Referans açı ölçüm sensörü tünel içinde mümkün olduğunda akış yönüne hassas biçimde yerleştirilmeli, cihaz alt-üst sencörün sabit farklılık yaratmasına izin vermemelidir. MEASNET izin verilen maksimum hata değeri $\pm 0.1^\circ$ olarak önerilmiştir. Sensörün montaj borusunun çap toleransı ± 1.5 mm olarak önerilmiştir (özellikle kablo geçişi olan sensörlerde). Ayrıca, isteğe bağlı olarak müşterinin talebi doğrultusunda farklı montaj “boom”ları kullanılabilir — ancak bu durum kalibrasyon sertifikasında mutlaka raporlanmalıdır. Sensörün kuzey işaretini (north mark) ve kanat (fin) montajı, tünel akış yönüne uygun biçimde hizalanmalı; tünel merkez hattıyla sensör montaj yönü arasında fark olabileceği için akış yönü esas alınmalıdır.

ç. Kalibrasyon Prosedürü

Ölçüm adımlarında: her bir adımda ölçüm süresi, ölçüm sisteminin örnekleme frekansı ve sensörün ortalama alma süresi dikkate alınmalı; örnekleme sıklığı genellikle ≥ 1 Hz olmalıdır. Rüzgâr hızı kalibrasyon boyunca $8 \text{ m/s} \pm 0.8 \text{ m/s}$ sınırında tutulmalıdır.

d. Belirsizlik Analizi

Montaj belirsizliği bileşeni: sensörün “north mark” ve fin’ın tünel merkez hattına göre hizalanmasındaki belirsizlik ile tüneldeki yatay akış yönünün belirlenmesi belirsizliği birlikte değerlendirilmelidir. Sensörün elektriksel ya da dijital çıkıştı ölçerken oluşan belirsizlikler de hesaba katılmalıdır.

e. Raporlama Formatı

Kalibrasyon sertifikasında (certificate) ve ölçüm raporunda şu bilgiler zorunludur:

- Test ortamı ve tesisin açıklaması
- Tekrarlanabilirlik ve yeniden üretilenabilirlik dokümantasyonu
- Kalibrasyon noktalarının tablosu ve grafiksel sunumu (örneğin offset ve slope değerleri)
- Her ölçüm noktasına ilişkin belirsizliklerin gösterimi (grafiksel olarak “bin” biçiminde)
- “North dead-band width” (kutup yönündeki ölü bölge genişliği) ölçümünün standartta prosedürü verilmemiş olduğundan bu bilginin sunulmasına MEASNET şimdilik gerek görmemektedir.

4. Acoustic Noise Measurement Procedure – Versiyon 4, Ekim 2025

Bu belge, MEASNET'in rüzgâr türbinleri için yapılan akustik gürültü ölçümlerinde uygulanacak prosedürün 4. versiyonunu tanıtan kısa bir dokümandır. Eski versiyonda (v3) referans verilen IEC standardı artık eski olduğu için, bu prosedür güncellenmiş. Yeni prosedür sadece IEC 61400-11 ed3.1 (2018) standardına dayanıyor ve MEASNET bu prosedürde IEC'ye sapma eklememiş; yani tamamen IEC standardını takip ediyor. MEASNET'in kalite güvencesi sistemi (karşılaştırmalı testler ve kurumlar arası kontrol) devam etmektedir.

8.2.1.2 MEASNET'in Kalite Güvencesi ve Değerlendirme Mekanizması

Quality Evaluation Program: Üyeler, MEASNET prosedürlerini doğru uyguladıklarını göstermek için yıldönemsel veya periyodik değerlendirmelerden geçer. Bu değerlendirmeler; ölçüm rapor analizi, round-robin testleri, saha denetimleri vs. içerebilir.

Proficiency Tests (Yeterlilik Testleri): MEASNET, belirli ölçüm disiplinlerinde (örneğin anemometre kalibrasyonu, elektriksel karakteristik ölçüm) yeterlilik testleri düzenler. Bu testler, laboratuvarlar arasında karşılaştırma ve doğrulama sağlar.

Üyelik Değerlendirme: Yeni bir aday kurum, başvuru formunu doldurur, belgelerini sunar ve Applicant Assessment Procedure (AAP) kapsamında değerlendirilir.

Değerlendirme Süreci: AAP kapsamında, aday kurumun önceki laboratuvar deneyimi, ölçüm raporları incelenir; gerekirse saha ziyareti yapılır.

8.2.1.3 MEASNET'in Endüstrideki Önemi ve Etkisi

Yatırımcı Güveni: MEASNET onaylı ölçümler, finansman kuruluşları (bankalar, yatırımcılar) tarafından daha güvenilir kabul edilir çünkü belirsizlik analizi, izlenebilirlik ve kalite kontrol mekanizmaları vardır.

Standartlaştırılmış Prosedürler: Farklı ölçüm enstitülerinin aynı metodolojiyi kullanması, sonuçların karşılaştırılabilirliğini sağlar. Bu, proje geliştirme aşamasında tutarlılığı artırır.

Uluslararası Uyumluluk: MEASNET prosedürleri IEC standartlarıyla uyumludur ve ayrıca ICRE (IEC Renewable Energy) ile iş birliği vardır.

Teknolojik Güncellemeye: Yeni prosedür güncellemeleri (örneğin uzak algılama, heterojen arazi, trend analizi) ile MEASNET, teknolojik gelişmelere ve sektörel ihtiyaçlara adapte olmaktadır.

8.2.1.4 Kritik Değerlendirme ve Sınırlar

Sapmaların Yönetimi: Mevcut prosedürlerde sapmalar açıkça tanımlanıp raporlanmalı, ancak her senaryo için analitik olarak tam bir belirsizlik aralığı belirlemek her zaman mümkün olmayabilir; bu durum ek belirsizlik bileşenleri gerektirir.

Gözlem Süresi: Kısa dönemli (örneğin 1 yıl) ölçümler, uzun vadeli klimatolojik değişimleri yakalamakta sınırlı olabilir; bu nedenle ifade edilen “uzun-dönem ekstrapolasyon” metodolojileri kritik önem taşır.

Uzak Algılama Cihazları: LIDAR veya SODAR gibi cihazların kullanımı prosedüre eklenmiş olsa da, bunların ölçüm belirsizlikleri, kalibrasyon gereksinimleri ve uygulama sınırları hâlâ bazı bağlamlarda karmaşıktır.

Raporlama Standardizasyonu: Her üye laboratuvarın raporlama biçimini biraz farklı olabilir; MEASNET protokolü güçlü rehberlik sağlar, fakat tam uyum her zaman kolay değildir.

8.2.2 TSE

TSE (Türk Standardları Enstitüsü) Türkiye'nin ulusal standardizasyon kuruluşudur.

Görevleri:

Ülkemizde üretim, hizmet ve iş süreçleri için standartlar hazırlamak,

Uluslararası standartların (ISO, IEC vb.) ulusal düzeye uyarlanması sağlamak,

Belgelendirme, uygunluk değerlendirme, kalibrasyon, ölçüm doğrulama gibi hizmetler sunmak.

8.2.2.1 TSE Standartları

TSE standartları;

- Enerji,
- Elektrik-elektronik,
- İnşaat,
- Mekanik,
- Çevre,
- Kalite yönetimi

gibi birçok alanı kapsar.

TSE, rüzgâr enerjisi alanında özellikle IEC 61400 serisi standartlarını Türkçeye uyarlanmış biçimde yayınlar.

8.2.2.2 TSE Standartlarının Hazırlanma Süreci

TSE standartları uluslararası uygulamalara uyumlu biçimde şu aşamalardan geçerek oluşturulur:

1. İhtiyaç tespiti
- Kamu kurumları, özel sektör veya meslek kuruluşlarının talepleri üzerine başlatılabilir.
2. Teknik Komite oluşturma
- Konu uzmanları, akademisyenler, sanayi temsilcileri ve ilgili taraflardan oluşan komite kurulur.
3. Taslak standart hazırlanması
4. Kamuya görüşe açılması
- Taslak, paydaşların görüş ve önerilerine açılır.
5. Değerlendirme ve revizyo
6. TSE Teknik Kurullarınca onay
7. Resmî yayýmlanma

Bu süreç, ISO ve CEN'in standart oluşturma prosedürleriyle uyumludur.

8.2.2.3 TSE Standartlarının Uygulanması

TSE standartları üç şekilde kullanılabilir:

- Zorunlu Standartlar:

Devlet tarafından teknik mevzuat olarak zorunlu tutulabilir.

- İhtiyari (Gönüllü) Standartlar:

Sanayi veya hizmet sektörü tarafından isteğe bağlı uygulanır.

- Belgelendirme kapsamında kullanılan standartlar:

TSE Belgesi, TSEK, CE Uygunluğu, HYB vb. belgelendirmelerde referans alınır.

YEKA şartnamesi gibi resmi düzenlemelerde, TS EN 61400-22 (uygunluk / belgelendirme) ve TS EN 61400-1 (tasarım gereksinimleri) standartlarının geçerliliği açıkça vurgulanmıştır.

8.3 Ölçüm Tebliği

Türkiye'de rüzgâr ve güneş enerjisine dayalı lisanslı üretim tesisleri için sahaya özgü meteorolojik ölçümlerin lisans sürecinin ayrılmaz bir parçası haline gelmesi, 22 Şubat 2012 tarihli ve 28212 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanan "Rüzgâr ve Güneş Enerjisine Dayalı Lisans Başvurularına İlişkin Ölçüm Standardı Tebliği" ile kurumsal bir çerçeveye kavuşmuştur (Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu [EPDK], 2012).

Bu Tebliğ, lisans başvurularında sahaya kurulan ölçüm istasyonlarından beklenecek asgari ölçüm süresi, veri bütünlüğü, istasyonun sahayı temsil etme koşulları ve veri kayıt yapısı gibi temel kuralları ilk kez açık bir şekilde tanımlamıştır.

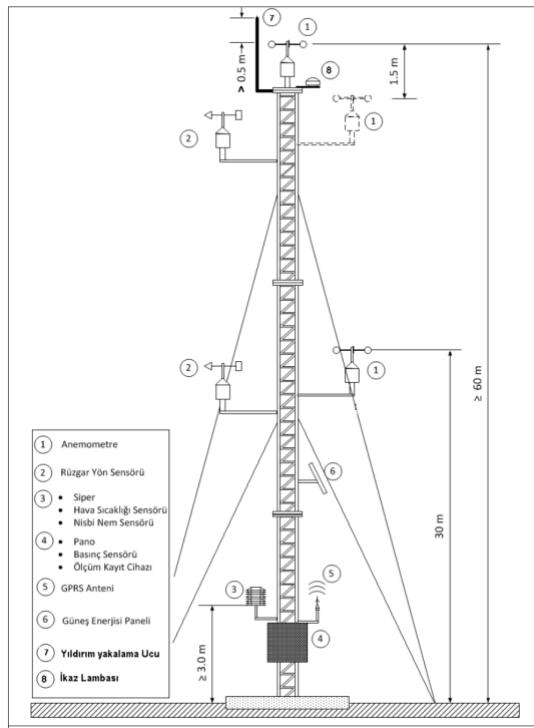
EPDK tarafından çıkarılan 2012 tarihli Ölçüm Standardı Tebliği, 4 Aralık 2013 tarihli "Rüzgâr ve Güneş Enerjisine Dayalı Lisans Başvurularına İlişkin Ölçüm Standardı Tebliğinin Yürürlükten Kaldırılmasına Dair Tebliğ" ile yürürlükten kaldırılmıştır (EPDK, 2013). Ancak ölçüm zorunluluğu ortadan kaldırılmamış, yeni Elektrik Piyasası Lisans Yönetmeliği çerçevesinde önlisans dönemine uyumlu yeni bir düzenleme yapılmıştır.

17 Haziran 2014 tarihli ve 29033 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanan "Rüzgâr ve Güneş Enerjisine Dayalı Önlisans Başvuruları İçin Yapılacak Rüzgâr ve Güneş Ölçümleri Uygulamalarına Dair Tebliğ" ile, ölçümlere ilişkin usul ve esaslar bu kez Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) sorumluluğunda ayrıntılı biçimde düzenlenmiştir (Meteoroloji Genel Müdürlüğü [MGM], 2014).

Rüzgâr ölçüm istasyonunda izlenecek meteorolojik değişkenler ve kullanılacak algilayıcılar da MGM Tebliği'nin EK-C bölümünde açıkça tanımlanır. Buna göre rüzgâr hızının ölçümünde rüzgâr hız ölçer/anemometre, rüzgâr yönünün ölçümünde rüzgâr yön ölçer, hava sıcaklığının ölçümünde hava sıcaklık ölçer/termometre, bağıl nemin ölçümünde bağıl nem ölçer, hava basıncının ölçümünde ise basınç ölçer/barometre kullanılması zorunlu tutulur.

Bu yapı, rüzgâr enerjisine dayalı projelerde hem aerodinamik yüklerin hem de türbin performansının değerlendirilmesi için gerekli temel atmosferik değişken setini oluşturur ve saha ölçümülerinin MGM tarafından tanımlanan standarda uygun biçimde yürütülmesini sağlar (Meteoroloji Genel Müdürlüğü [MGM], 2014, EK-C).

Bu mevzuat seti, rüzgâr ölçümlerinde ölçüm süresini en az bir yıl, veri kaybı sınırını ise maksimum yüzde yirmi olarak tanımlar.



Şekil 8.2. Rüzgar Ölçüm İstasyonu Şematik Gösterimi (MGM Rüzgar ve Güneş Enerjisine Dayalı Önlisans Başvuruları İçin Yapılacak Rüzgar ve Güneş Ölçümleri Uygulamalarına Dair Tebliğ 2014, Ek C)

Türkiye'nin artan enerji talebi ve iklim değişikliğiyle mücadele politikaları, yenilenebilir enerji yatırımlarının önemini giderek artırmaktadır. Bu politikalar çerçevesinde rüzgar enerjisi, hem mali yönden hem de Türkiye'nin yüksek rüzgar potansiyeli sebebiyle öne çıkmaktadır. Ancak RES projelerinin geliştirilmesi birtakım mevzuat sistemlerine bağlıdır. Bu mevzuatlar projelerin çevresel, teknik ve ekonomik boyutlarını aynı anda şekillendiren tanımlayıcı bir çerçeve sunmaktadır.

Rüzgâr ölçüm direğî boru veya kafes tipinde olmakla birlikte en az 60 metre yüksekliğinde olmalı ve paslanmaz malzemeden imal edilmiş gergi telleri ile zemine sabitlenmelidir. Direğin üzerine en az iki seviyede anemometre ve rüzgâr yön sensörü yerleştirilir. Ana ölçüm seviyeleri 30 metre ve direğin en üst noktasıdır. Gerektiğinde ara seviyelere ek anemometreler kurulabilir. Direk kesiti ile sensör bağlantı kollarının boyutları, tûrbülans etkisini en aza indirecek şekilde belirlenmiş, bağlantı kollarının hâkim rüzgâr yönüne dik yerleştirilmesi önerilmiştir (MGM, 2014, Ek C).

Yıldırımdan korunmaya ilişkin hükümler de aynı eklerde açıkça tanımlanmıştır. Rüzgâr ölçüm direğinin en üst seviyesinde, en üst anemometreden en az 50 santimetre yukarıda olacak şekilde ve anemometreyi yaklaşık 60 derecelik bir koruma açısı ile kapsayacak uzunlukta bakır bir yıldırım yakalama çubuğu kullanılması zorunludur.

Yakalama ucu, direğe sabitlenmiş iniş iletkeni aracılığıyla yere çakılan en az iki topraklama çubوغuna bağlanır. Topraklama direncinin en fazla 10 ohm olması gereklidir. Tüm topraklamaların tek noktada birleştirilmesi ve iniş iletkeninin yaklaşık iki metre aralıklarla direğe sabitlenmesi şarttır (MGM, 2014, Ek C).

Havacılık güvenliği açısından direğin görünürlüğü de yine bu tebliğ kapsamındadır. Direğin tepe noktasında kırmızı ışık yayan LED ikaz lambası bulundurulması zorunludur. Direğin kırmızı beyaz boyama düzeni ve lamba yerlesimi, hava araçları için engel teşkil etmemesi amacıyla belirlenmiştir (MGM, 2014, Ek C).

Rüzgâr ve güneş istasyonlarında datalogger, iletişim cihazları, enerji besleme üniteleri ve koruma devreleri ile birlikte IP66 koruma sınıfına sahip bir kutu içinde yer almalıdır. Kutu, yağış, güneşlenme, yüzey suyu ve mekanik etkilere karşı korunacak uygun bir yüksekliğe monte edilir. Datalogger, sensör sinyallerini meteorolojik verilere dönüştüren programı içerir. Her sensör için kullanılan kalibrasyon katsayıları bu program üzerinde dokümant edilmek zorundadır. Datalogger, en az bir yıllık ham veriyi saklama kapasitesine sahip olmalıdır (MGM, 2014, Ek C ve Ek D).

Ölçüm verilerinin kayıt formatı Tebliğ Ek E'de tanımlanır. Veriler dakikalık veya on dakikalık örnekleme ile UTC zamanına göre kaydedilir. Rüzgâr verileri "R" dosyasında, sıcaklık, basınç ve nem gibi parametreler "D" dosyasında, güneş verileri ise "G" dosyasında saklanır. Limit dışı değerler "-9999", sensör arızaları "-8888" kodu ile işaretlenir (MGM, 2014, Ek E).

Verilerin ölçüm gününü izleyen gün MGM sunucusuna gönderilmesi gereklidir. Kesintiden sonra bağlantı sağlandığında datalogger üzerindeki verilerin otomatik gönderimi beklenir. Bir yıllık ölçüm periyodunda veri kaybı oranının yüzde yirmiyi geçmemesi şarttır. Daha düşük kayıplar, istatistiksel yöntemlerle ve sahayı temsil eden referans istasyonlarla tamamlanabilir. Kullanılan yöntemler ve istasyonlar ayrı bir form ile raporlanır (MGM, 2014).

standartlarla uyumludur. Özellikle IEC 61400 12 1 standartı, güç performansı ölçümünün ve yıllık enerji üretimi hesaplamasının esaslarını tanımlar (International Electrotechnical Commission, 2022).

8.4 Türkiye'de RES Projeleri İçin Mevzuatlar

Türkiye'nin artan enerji talebi ve iklim değişikliğiyle mücadele politikaları, yenilenebilir enerji yatırımlarının önemini giderek artırmaktadır. Bu politikalar çerçevesinde rüzgar enerjisi, hem mali yönden hem de Türkiye'nin yüksek rüzgar potansiyeli sebebiyle öne çıkmaktadır. Ancak RES projelerinin geliştirilmesi birtakım mevzuat sistemlerine bağlıdır. Bu mevzuatlar projelerin çevresel, teknik ve ekonomik boyutlarını aynı anda şekillendiren tanımlayıcı bir çerçeve sunmaktadır.

8.4.1 TSE Standartlarının Uygulanması

Bu bölüm, Türkiye'de elektrik piyasasına ilişkin temel mevzuatın rüzgâr enerjisi yatırımları üzerindeki etkisini açıklar. Elektrik Piyasası Kanunu'nun gelişimi, lisans ve önlisans süreçlerinin çerçevesi ile yenilenebilir enerji yatırımlarına yönelik düzenleyici yaklaşım özetlenir. Özellikle rüzgâr enerjisi projelerinde izin, değerlendirme ve başvuru süreçlerinin hukuki dayanakları belirtilir

8.4.2 Elektrik Piyasası Kanunu

Elektrik sektörünü düzenleyen yasadır. Elektrik Piyasası Kanunu (EPK) ilk olarak 20/02/2001 tarih ve 4628 sayılı Resmi Gazete'nin 03/03/2001 tarihinde yayınlanan sayısında yürürlüğe girmiştir.

Bu kanunun amacı; elektriğin yeterli, kaliteli, sürekli, düşük maliyetli ve çevreyle uyumlu bir şekilde tüketicilerin kullanımına sunulması için, rekabet ortamında özel hukuk hükümlerine göre faaliyet gösterebilecek, mali açıdan güçlü, istikrarlı ve şeffaf bir elektrik enerjisi piyasasının oluşturulması ve bu piyasada bağımsız bir düzenleme ve denetimin sağlanması olarak tanımlanmıştır.

Kanunun kapsamı ise; elektrik üretimi, iletimi, dağıtım, toptan satışı, perakende satışı, perakende satış hizmeti, ithalat ve ihracatı ile bu faaliyetlerle ilişkili tüm gerçek ve tüzel

kişilerin hak ve yükümlülüklerini, EPDK'nın kurulması ile çalışma usul ve esaslarını ve elektrik üretim ve dağıtım varlıklarının özelleştirilmesinde izlenecek usul olarak belirlenmiştir. (4628 sayılı Elektrik Piyasası Kanunu, 2001)

4628 sayılı kanun değişiklige uğramıştır. Bu değişikliklerden en belirgin ve Elektrik Piyasasını en çok etkileyen değişiklik 26/07/2008 tarihindeki 5784 sayılı “Elektrik Piyasası Kanunu ve Bazı Kanunlarda Değişiklik Yapılmasına Dair Kanun” ile gerçekleşmiştir.

5784 sayılı kanunun “Yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı, kurulu gücü azami beş yüz kilovatlık üretim tesisi ile mikro kojenerasyon tesisi kuran gerçek ve tüzel kişiler, lisans alma ve şirket kurma yükümlülüğünden muaftır. Bu tüzel kişilerin ihtiyaçlarının üzerinde ürettikleri elektrik enerjisinin sisteme verilmesi halinde uygulanacak teknik ve mali usul ve esaslar Kurum tarafından çıkartılacak bir yönetmelikle belirlenir.” maddesi lisanssız üretimin teşviklenmesi yönünde önünü açmış bulunmaktadır. (5784 sayılı Elektrik Piyasası Kanunu, 2008)

5784 sayılı Kanun ile, 4628 sayılı Elektrik Piyasası Kanunu kapsamında rüzgar enerjisine dayalı üretim tesisi kurmak üzere yapılan veya yapılacak lisans başvuruları için yeni bir süreç tanımlanmıştır. Buna göre, başvurular önce EİEİ Genel Müdürlüğü tarafından teknik olarak, ardından EPDK tarafından mevzuat yönünden değerlendirilecek; gerekli şartları sağlayan başvuru sahipleri belirlenecektir. Aynı bölge ve/veya trafo merkezi için birden fazla başvuru olması halinde dosyalar TEİAŞ'a gönderilecektir.

5784 sayılı Kanunla revize edilen 4628 sayılı Elektrik Piyasası Kanunu, Resmi Gazete'nin 30/03/2013 tarihli 28603 sayılı nüshasında yayımlanan 14/03/2013 tarihli 6446 sayılı Elektrik Piyasası Kanunu (EPK) ile nihai halini almıştır.

6446 sayılı Kanun altı ana bölümden oluşmaktadır:

1.Amaç, kapsam ve tanımlar;

2.Elektrik piyasası faaliyetleri, önlisans-lisans süreçleri, üretim–iletim–dağıtım faaliyetleri, piyasa işletimi, EPİAŞ'ın kuruluşu, dış ticaret faaliyetleri, organize sanayi bölgelerin yetkileri ve lisanssız üretim;

3.Denetim ve yaptırımlara ilişkin hükümler;

4.Tarifeler, tüketici destekleri, özelleştirme, kamulaştırma ve arz güvenliği;

5–6. Diğer, geçici ve son hükümler

6446 sayılı EPK, lisans kavramını, kanun hükümleri uyarınca üzerinde kayıtlı piyasa faaliyetlerinin yapılabilmesi için tüzel kişilere verilen izin belgesi olarak tanımlamaktadır. Ancak lisans tanımı ile birlikte önlisans adı verilen üretim lisansı başvurusunda bulunan tüzel kişilere, üretim tesisi yatırıma başlaması için mevzuattan kaynaklanan izin, onay, ruhsat ve benzeri belgeleri edinebilmesi ve üretim tesisinin kurulacağı sahanın mülkiyet veya kullanım hakkını elde edebilmesi için EPDK tarafından belirli süreli verilen bir belge daha tanımlanmıştır. (6446 sayılı Elektrik Piyasası Kanun,2013)

8.4.3 EPDK

RES projelerinin elektrik piyasasında faaliyet gösterebilmesi için Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) tarafından yürütülen lisanslama süreçleri zorunludur. EPDK'nın mevzuat ve lisanslama çerçevesi, bir RES projesinin hukuki kimliğini belirleyen temel yapıyı oluşturur.

ÇED sürecinin tamamlanmasıyla birlikte başlayan “önlisans süreci”, yatırımcının projeyi gerçekleştirmeye kapasitesini teknik, idari ve mali açılarından kanıtlamasını gerektirir. Bu aşamada TEİAŞ'tan alınan şebeke bağlantı görüşü, rüzgâr ölçüm istasyonu verileri, imar planı uygunluğu, arazi izinleri, orman veya mera tahsisleri gibi birçok unsurun eş zamanlı olarak tamamlanması gereklidir. Bu adımlar, projenin teknik olarak şebekeye entegre edilebilir, çevresel açıdan uygulanabilir ve idari olarak gerçekleştirilebilir olduğunun göstergesidir.

Önlisans yükümlülüklerinin tamamlanmasının ardından proje “ürtim lisansı” almaya hak kazanır. Üretim lisansı santralin inşasına başlanabilmesi ve elektrik piyasasında faaliyet gösterilebilmesi için zorunlu bir belgedir. Bu lisans aynı zamanda yatırımcının TEİAŞ veri bildirim yükümlülüklerini, sayaç ölçüm gerekliliklerini, bağlantı ve sistem kullanım anlaşmalarını yerine getirme sorumluluğunu da içerir. (Yurdadoğ & Tosunoğlu, 2017)

Bu yönyle EPDK mevzuatı, RES projelerinin teknik, mali ve hukuki açıdan sağlam bir temele oturmasını sağlayan merkezi bir düzenleyici çerçevedir. Lisans sürecinin eksiksiz tamamlanması, projenin yatırımcı açısından güvenilirliğini artırırken, bankalar ve finans kuruluşları açısından da projeyi finanse edilebilir hâle getirir.

8.4.4 ÇED

Çevresel Etki Değerlendirilmesi (ÇED) süreçleri, RES projelerinin çevresel tabanda sürdürülebilir bir yapıda hayata geçirilmesini sağlayan temel bir hukuki gereklilikdir. Bu yönetmeliğin amacı “Çevresel Etki Değerlendirmesi sürecinde uyulacak idari ve teknik usul ve esasları düzenlemektir.

09/08/1983 tarihli ve 2872 sayılı Çevre Kanununun 10 uncu maddesine dayanılarak, ÇED Yönetmeliği kapsamında, hangi projeler için ÇED raporu ya da Proje Tanıtım Dosyası hazırlanacağını ve bu sürecin hangi idari-teknik esaslara göre yürütüleceğini belirleyen temel çerçeveyi oluşturur. Ayrıca, değerlendirme komisyonlarının görevlerini ve projelerin uygulanma sürecinde yapılacak izleme ve denetim faaliyetlerini de düzenler.(Çed Yönetmeliği, 2022)

Bu yönetmelik, altı bölümden oluşur:

- 1.Amaç, Kapsam, Dayanak, Tanımlar ve Kısaltmalar
- 2.Genel Hükümler
- 3.Çevresel Etki Değerlendirmesi Uygulama Yöntemi
- 4.Seçme, Eleme Kriterleri Uygulama Yöntemi
- 5.İzleme ve Kontrol
- 6.Ceşitli ve Son Hükümler

Tüm büyük ölçekli enerji yatırımlarında olduğu gibi RES projelerinde de ÇED, çevresel etkilerin sistematik düzeyde analiz edilmesini ve olası olumsuz etkilerin azaltılmasını amaçlayan oldukça kapsamlı bir değerlendirme sürecidir. ÇED süreci; projenin tanımlanması, mevcut çevresel koşulların incelenmesi ve olası etkilerin değerlendirilmesi ile başlar. Uygun önlemler belirlenir ve hazırlanan ÇED raporu Bakanlığa sunularak halkın katılımına açılır. Ardından İDK tarafından teknik inceleme yapılır ve gerekirse revizyon istenir.

ÇED yönetmeliğine göre her RES sisteminin ÇED raporu hazırlanmasına gerek duyulmamaktadır. Bu raporunun hazırlanmasını istenmesi ilgili projenin büyüklüğüne göre değişiklik göstermektedir. Yönetmelikte geçen Ek-1 ve Ek-2 dosyalarından projenin hangi kategoriye girdiğini belirleyip projeye devam edilir. Eğer ilgili proje Ek-1'deki şartlara uyuyorsa “ÇED Gereklidir” kararı alıp proje tanıtım dosyası (PTD) hazırlamadan ÇED başvuru dosyası hazırlanır ve sonrasında ÇED raporu hazırlanır. Eğer ilgili proje Ek-2'deki şartlara

uyuyorsa proje tanıtım dosyası hazırlanır ve Çevre Şehircilik ve İklim Bakanlığı'na sunulur. Bakanlıktan gelen karara göre Ek-2'ye tabi olmasını beklenilen bir proje “ÇED Gereklidir” kararı alıp Ek-1 projesine uygun görülen kararlarına tabi olur.

ÇED başvuru dosyası, projenin genel çerçevesini çizerek asıl ÇED raporunun hazırlanacağı özel formatın (yol haritasının) Çevre Şehircilik ve İklim Bakanlığı'ndan alınmasını sağlayan başlangıç belgesidir. Bu dosya, genel hatlarıyla dörde kısma ayrılabilir. Projenin tanımı ve özellikleri belirlenir. Yatırımın tanımı, özellikleri, ömrü, hizmet maksatları, önem ve gerekliliği bu kısımda açıklanır. RES projesinin neden belirlenen bölgede kurulduğunun gerekçeleri sunulur. Özette projenin genel hatları çizilir.

Dosyanın devamında projenin yeri ve etki alanının mevcut çevresel özellikleri tespit edilir. Proje alanının ve önerilen proje nedeniyle etkilenmesi muhtemel olan çevrenin; nüfus, fauna, flora, jeolojik, hidrojeolojik özellikleri, doğal afet durumu, kültür varlığı, sit özellikleri ve hassasiyet derecesi gibi projenin, multidisipliner bir şekilde değerlendirilmesi gereken bileşenleri analiz edilerek proje faaliyetlerinin kısa ve uzun vadeli çevresel etkileri kapsamlı biçimde belirlenir.

ÇED başvuru dosyasının hazırlanmasında uyulması gereken birtakım mevzuatlar ve kanunlar vardır. 04/04/2014 tarihli 28962 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanarak yürürlüğe giren “Sulak Alanların Korunması Yönetmeliği” ve 1380 sayılı “Su Ürünleri Kanunu” bu kanun ve mevzuatlara örnek olarak verilebilir. RES projelerinde kurulacak türbinlerin sulak alanlara uzaklığı dikkate alınarak hiçbir şekilde zarar vermemesi ve müdahale edilmeyeceği yönündeki beyan raporun bu bölümünde verilir. Aynı şekilde eğer RES projesi, 11/08/1983 tarih ve 18132 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanarak yürürlüğe giren 2873 sayılı Milli Parklar Kanunu'nun ikinci maddesinde tanımlanan ve bu kanunun üçüncü maddesi uyarınca belirlenen milli parklar, tabiat parkları, tabiat anıtları ve tabiat koruma alanları sınırları içerisinde veya etkileşim sahasında kalması durumunda, söz konusu alanların koruma statüleri ve kaynak değerleri gözetilerek, projenin bu alanlara olası etkilerinin irdeleneceği ve ilgili kurumdan gerekli izin veya uygunluk görüşlerinin alınacağı hususundaki taahhütler de bu bölümde yer almıştır. Özette projenin etki alanlarının risk analizi ve olası etkilerin en aza indirgenmesi üzerine odaklanılır.

Dosyanın sonraki kısmı, projenin inşaat ve işletme aşamasındaki çevresel etkileri ve

alınacak önlemler üzerine yoğunlaşır. Çevreyi etkileyebilecek olası sorunların belirlenmesi, kirletici miktarı, alıcı ortamla etkileşimi, kümülatif etkilerin belirlenmesi gibi kavramların açıklığa kavuşmasını sağlar. Bunun yanında proje alanında 26/04/2006 tarih ve 5491 sayılı kanunla yapılan değişiklik ile yeniden düzenlenen 2872 Çevre Kanunu ve bu kanuna istinaden çıkarılan tüm mevzuat hükümlerine uyularak projenin bu kısımları düzenlenir.

ÇED başvuru raporunun son kısmında projenin bitmesi durumunda projeden etkilenmesi muhtemel ilgili halkın belirlenmesi ve halkın görüşlerinin ÇED çalışmasına yansıtılması için gereken çalışmalar hakkındaki son kısım düzenlenir. Halkın bilgilendirilmesi toplantısının amacı, faaliyetten etkilenmesi muhtemel bölge halkın faaliyet hakkında bilgilendirilmesi ve konu hakkındaki görüşlerinin dinlenerek değerlendirilmesidir. Gerçekleştirilecek faaliyetten etkilenecek taraflar; faaliyet alanına en yakın yerleşim birimi ya da birimleri ve faaliyet kapsamında gerçekleştirilecek işlemlerden faydalananak son kullanıcılardır. Söz konusu toplantıda faaliyetin gerekliliği, bu bölgenin seçilme nedeni, çevresel açıdan alınacak önlemler hakkında halk bilgilendirilecek, görüş ve önerileri alınacaktır. ÇED Raporunun hazırlanması sırasında söz konusu önlemler değerlendirilecektir.

ÇED Yönetmeliği'nin 9. maddesinin (5). fıkrasına göre paydaş katılım planı kapsamında belirlenen ilgili kurumlarla yürütülen izin süreçleri takip edilerek gerekli onaylar alınır ve ÇED raporunun ekler kısmına eklenir.

ÇED Başvuru Dosyasının sunulması, halkın katılımı toplantısının yapılması ve kurum görüşlerinin alınmasıyla sürecin çerçeve belirleme aşaması tamamlanmış olur. Bu noktadan sonra, Bakanlık tarafından kurulan komisyon, eldeki verileri ve halktan gelen talepleri değerlendirerek projeye özgü bir "ÇED Raporu Özel Forması" belirler. Bu format, hazırlanacak olan asıl ÇED Raporu için uyulması zorunlu bir yol haritasıdır.

ÇED Raporu, başvuru dosyasında sunulan genel bilgilerin ve taahhütlerin, mühendislik hesaplamaları ve saha verileriyle somutlaştırıldığı nihai dokümandır. Başvuru aşamasında teorik olarak dephinilen çevresel etkiler, bu raporda detaylı analizlerle incelenir. Özellikle RES projesi için raporun teknik kısmını meteorolojik veriler oluşturur. Sahada kurulan ölçüm istasyonlarından elde edilen en az bir yıllık rüzgar verileri, Weibull dağılımları, hakim rüzgar yönü ve türbülans analizleri bu bölümde detaylandırılır. Bu kapsamda, sadece rüzgar potansiyeli değil, turbin güvenliği ve verimliliği için kritik olan parametreler de incelenir.

Özellikle IEC 61400-1 standartlarına uygun olarak yapılan türbülans yoğunluğu hesaplamaları ve 50 yıllık ekstrem rüzgar şiddeti tahminleri, seçilen türbin modelinin saha koşullarına uygunluğunu kanıtlamak adına rapora eklenir. Meteorolojik ölçüm direğinden alınan zaman serileri üzerinden yapılan bu analizler, projenin teknik fizibilitesi ile çevresel güvenliği arasındaki ilişkiyi açıklar. Ayrıca türbinlerin çalışması ile oluşabilecek aerodinamik gürültü gibi etkiler, uluslararası standartlara uygun modelleme yazılımları kullanılarak hesaplanır ve etki alanları haritalara işlenir. Gürültü analizlerinde ise genellikle ISO 9613-2 standarı baz alınarak en yakın yerleşim yerlerinde olacak ses basınç düzeyleri modellenir. Bununla birlikte, RES projelerinde özgü bir diğer önemli çevresel etki olan “gölge titreşimi” (shadow flicker) analizi de bu aşamada gerçekleşir. Güneşin yıllık hareketi, türbin koordinatları ve kanat yapısı simülasyon yazılımlarına (Örn: WindPRO, WASP) entegre edilerek yerleşim yerleri üzerindeki günlük ve yıllık gölge düşme süreleri hesaplanır. Yönetmelikte belirtilen sınır değerlerin aşılıp aşılmadığı bu modellerle tespit edilir.

Projenin çevresel etkileri sadece kendi sahasıyla sınırlı tutulmaz; "Kümülatif Etki Değerlendirmesi" başlığı altında bölgedeki diğer enerji tesisleri ve planlanan projelerle birlikte toplam çevresel yük analiz edilir. Özellikle aynı havzada birden fazla RES projesinin bulunması durumunda, projelerin toplam gürültü etkisi ve ekosistem üzerindeki baskısı bir bütün olarak değerlendirilerek, bölgenin taşıma kapasitesinin aşılmışlığı bilimsel verilerle ortaya konur.

Biyolojik değerlendirme kısmında ise başvuru dosyasındaki literatür taramasının yerini saha çalışmaları alır. Proje sahasının kuş göç yolları üzerindeki durumu verileriyle desteklenerek analiz edilir. Yapılan tüm bu teknik incelemeler sonucunda, projenin çevresel etkilerinin yönetilebilir düzeyde olduğu bilimsel olarak ortaya konulursa, İnceleme ve Değerlendirme Komisyonu (İDK) tarafından "ÇED Olumlu" kararı verilir. Bu karar, projenin inşaat ve işletme aşamasına geçebilmesi için gereken nihai onayı temsil eder.

ÇED kararlarının zaman zaman hukuki süreçlere taşınması proje takvimlerinde gecikmelerden ziyade projenin tamamen iptal edilmesiyle bile sonuçlanabilir. Bu nedenle doğru saha seçimi ve ön etüt çalışmalarının titizlikle yapılması proje için hayatı bir önem teşkil etmektedir.

8.4.5 YEKDEM

yenilenebilir enerji yatırımlarının gelişimini doğrudan etkileyen en kritik ekonomik destek sistemidir. Bu mekanizma ile yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik için belirli sürelerle sabit fiyat garantisini sağlamakta ve yatırımcının piyasa fiyatlarındaki dalgalanmalardan etkilenmesi önemli ölçüde azaltılmaktadır. YEKDEM çerçevesinde 2011–2020 yılları arasında dolar bazlı tarifeler uygulanmış, 2021 sonrası dönemde ise TL bazlı desteklere geçilmiştir (YEKDEM, 2023). Bu sabit fiyat garantisini, özellikle yüksek yatırım maliyetine sahip RES projeleri için gelir istikrarı sağlayarak finansman süreçlerinin kolaylaşmasına katkıda bulunur.

YEKDEM aynı zamanda yerli ekipman kullanımını teşvik eden ek destekler içerir. Türbinin kule, kanat, jeneratör gibi ana bileşenlerinde yerli üretimin tercih edilmesi durumunda ek teşvikler sağlanması, Türkiye'de rüzgâr enerjisi tedarik zincirinin gelişmesine katkı sağlamaktadır. Bu teşvik mekanizması yalnızca çevresel fayda üretmeyi değil, yerli üretim kapasitesini artırarak sektörde kalkınmayı desteklemeyi de amaçlamaktadır. Bu yönyle YEKDEM, Türkiye'nin yenilenebilir enerji politikalarının ekonomik ayağını oluşturan en önemli bileşenlerden biridir.

RES projelerinde, EPDK mevzuatı projenin teknik ve hukuki uygulanabilirliğini belirleyen ana yapıyı sunarak şebeke bağlantı noktası, kurulu güç, türbin yerleşimi ve finansal yeterlilik gibi kritik unsurları değerlendirir ve ulusal şebeke güvenliği açısından TEİAŞ bağlantı görüşü ile uyumluluğu zorunlu kılar. Bu teknik altyapının üzerine, YEK Belgesi ve YEKDEM düzenlemeleri devreye girerek sabit fiyat güvencesi, düşük finansman riski ve yerli ekipman teşvikleri gibi mekanizmalarla projenin ekonomik fizibilitesini doğrudan etkiler; piyasa belirsizliklerine karşı güvence sunarak yatırımın cazip ve sürdürülebilir olmasını sağlar. Sonuç olarak, bu mevzuatlar, projenin başlangıcından işletme aşamasına kadar her süreci doğrudan şekillendiren birbirine sıkı sıkıya bağlı düzenlemelerdir ve çevresel uygunluk, teknik/hukuki altyapı ile ekonomik sürdürülebilirlik ancak bu üçlü mekanizmanın bütüncül olarak işletilmesi ile sağlanabilir.

9. Lisanslı ve Lisanssız Elektrik Üretim Bilgileri

Rüzgar enerjisi projelerinde elektrik üretimine yönelik faaliyetler, kapasite ve projenin niteliğine göre üç temel lisanslama türüne ayrılmaktadır:

- **Lisanslı:** Tam kapasiteli büyük ölçekli projeler için geçerlidir. Kurulu gücü 5 MW'ın üzerinde olan ve ön lisans sürecini başarıyla tamamlayan tesisler, EPDK'dan üretim lisansı alarak faaliyet gösterir.
- **Ön Lisanslı:** Lisans sürecinin ilk aşaması olup, projenin sınırlı kapasitesini ifade eder ve lisans alma yolunda atılan ilk adımdır.
- **Lisanssız:** Genellikle küçük ölçekli projeler için uygulanan, belirli bir kurulu gücün altındaki üretim faaliyetlerini kapsar. 6446 sayılı Elektrik Piyasası Kanunu'nun 14. maddesi uyarınca, lisanssız elektrik üretiminde temel kurulu güç üst sınırı 1 MW olarak belirlenmiştir. Ancak, Cumhurbaşkanına verilen yetki çerçevesinde yapılan düzenlemelerle, yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı üretim tesisleri için bu sınır 5 MW (5.000 kW) seviyesine kadar yükseltilmiştir. Bu kapsamdaki tesisler, lisans alma ve şirket kurma yükümlülüğünden muafdır.

9.1 Lisanslama İşlemleri

Lisanslı üretim, yenilenebilir enerji kaynakları için tam kapasiteli tesislerin kurulmasını sağlayan yasal süreci ifade eder. (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, t.y.)

9.1.1 Lisans Alma Süreci Adımları

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'na göre lisans alma süreci aşağıdaki adımları içerir:

Saha Belirleme ve Kapasite Açıklaması: Santral sahası belirlenir ve ne kadar elektrik üretileceği açıklanır.

Rüzgar Ölçüm ve Onay: En az bir yıl süreyle rüzgar ölçüm istasyonları kurulur (EK-1). Ölçüm sonuçları Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) veya akredite bir kurum tarafından onaylanır (EK-2).

Önlisans Başvurusu: Ölçüm onayı sonrası, Elektrik Piyasası Lisans Yönetmeliği kapsamında önlisans başvuru için evraklar hazırlanır.

İnceleme ve Yarışma: Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) önlisansı inceler; Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) ve Enerji İşleri Genel Müdürlüğü (EİGM) teknik değerlendirme yapar. TEİAŞ tarafından yarışma düzenlenir ve en yüksek fiyatı veren firma EPDK'ya bildirilir.

Lisans ve İzinler: Kazanan firma önlisans ve idari izinleri EPDK'dan alır, ardından EPDK üretim lisansını verir.

Kurulum ve İşletme: ETKB santral kurulumunu onaylarsa inşaata başlanır ve tesis kurulumu yapılır. Onaylardan sonra tesis işletime açılır.

9.1.2 Önlisans Başvuru Dilekçesi ve Diğer Gerekli Belgeler

Önlisans başvurusunda, projenin yasal, mali ve teknik yeterliliğini göstermek üzere aşağıdaki belgelerin sunulması zorunludur:

Önlisans Başvuru Dilekçesi: EPDK başvuru sistemi üzerinden yapılacak başvurularda sistem tarafından otomatik olarak oluşturulur. (EK-4)

Yetki Belgesi: Başvuruyu yapan kişinin veya kuruluşun, başvuru sürecinde yetkili olduğunu gösteren belgedir. Bu belge, usul ve esaslarda belirlenen asgari unsurlar çerçevesinde hazırlanmalıdır. Kurum nezdinde yetkili tanımlanması daha önce yapılmışsa, tekrar sunulmasına gerek yoktur. Yazılı olarak yapılan başvurular için başvuru ekinde sunulmalıdır.

Esas Sözleşme: Şirketin kuruluşunu ve faaliyetlerini düzenleyen temel belgedir. Şirket ortaklarında veya finansal durumlarında küçülmeye gidilirse, EPDK izni gerektiren sözleşmedir. Bu belge, şirketin yasal ve mali durumunu gösterir ve başvuru sürecinde sunulması zorunludur.

Üretim Tesisi Bilgi Formu: Bu form (EK-6), aşağıdakiler de dahil olmak üzere, tesisin teknik ve çevresel detaylarını içerir:

- Üretim tesisinin yerleşim yeri projesi

- Tek hat şeması
- ÇED belgesi (Çevresel Etki Değerlendirmesi) (Duyarlı Yöreler Beyanı, EK-7)
- İmar durumu belgesi (EK-8)
- Yasaklı alanlar beyanı (EK-11)
- Kaynak belgesi/beyanı

Ölçüm Belgesi: Son 8 yıl içinde tesisin kurulacağı bölgede MGM şartlarına uygun ölçüm istasyonu ile yapılan ölçümlerin onaylanmış halidir. (EK-1, EK-2, EK-3)

Yasaklı Olmama Beyanı: Şirket sahiplerinin ve yönetim kurulu üyelerinin EPDK tarafından yasaklı olmadığına dair beyandır. (EK-9, EK-10)

Ortaklık Yapısı Belgeleri: Şirketin ortaklık yapısına dair belgelerdir.

Kontrol Beyanı Belgeleri: Başvuru sahibinin kontrol ilişkisi olup olmadığına dair beyan belgesidir. (EK-12)

Teminat Belgesi: Başvuru sonrası 5 iş günü içinde banka teminat mektubunun aslinin EPDK'ya ibraz edilmesi gereklidir. (EK-5)

Önlisans Alma Bedeli: Önlisans başvurusunda bulunulan yıl itibarıyla geçerli önlisans alma bedelinin kurum hesabına yatırıldığına ilişkin belgedir.

9.1.3 Maliyetler, Teknik ve Yasal Gereksinimler

Maliyetler ve Finansman: Lisanslı üretim tesisleri için başlangıç maliyetleri, olası finansman kaynakları, Devlet teşvikleri ve destekleme mekanizmaları incelenmelidir.

Çevresel Etki Değerlendirmesi (ÇED): ÇED raporunun önemi, hazırlanma şekli, gereklilikleri ve onay süreçleri projenin çevresel uygunluğu için esastır.

Teknik Gereksinimler: Üretim tesislerinin teknik gereksinimleri (kullanılacak ekipman ve teknolojiler) ve bu gereksinimlerin karşılanma yolları belirlenmelidir.

Yasal Düzenlemeler: Lisanslı elektrik üretim faaliyetleri ile ilgili yasal düzenlemeler ve bu düzenlemelere uyum sağlama yolları belirlenmelidir.

9.2 Lisanssız Elektrik Üretim Faaliyeti Genel Esaslar ve Süreç

Lisanssız elektrik üretimi, Elektrik Piyasası Kanunu ve EPDK'nın “Lisanssız Elektrik Üretim Yönetmeliği” kapsamında düzenlenir ve belirli koşullar altında üretim faaliyetinin lisans alma yükümlülüğü olmadan yürütülmesine imkân tanır. Rüzgâr enerjisi santralleri (RES) de belirli güç sınırları içinde lisanssız üretim statüsünde kurulabilmektedir.

Lisanssız üretim faaliyetleri, esas olarak tüketim odaklı üretim modelidir. Kurulan rüzgâr türbini veya türbin grubu, aboneliğe kayıtlı tüketim tesisiin elektrik ihtiyacını karşılamak ve fazla üretim olması halinde şebekeye enerji vermek amacıyla işletilir.

Lisanssız üretim tesileri ticari satış amaçlı kurulamaz; üretim-tüketim ilişkisi zorunludur.

9.2.1 Lisanssız Rüzgâr Enerjisi Üretiminin Hukuki Dayanakları

- Elektrik Piyasası Kanunu (6446)
- EPDK Lisanssız Elektrik Üretim Yönetmeliği
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) düzenlemeleri
- TEİAŞ ve dağıtım şirketi şebeke bağlantı yönetmelikleri
- Çevresel Etki Değerlendirmesi (CED) mevzuatı
- İmar Kanunu, Mekânsal Planlar Yönetmeliği

Lisanssız RES'lerin kuruluşu boyunca bu düzenlemelere uyum zorunludur.

9.2.2 Lisanssız Üretim İçin Kurulu Güç Sınırı ve Tüketim İlişkisi

Mevzuata göre lisanssız RES'ler:

- Bir tüketim aboneliği ile ilişkilendirilmiş olmak zorundadır.
- Kurulu güç, bağlantı yapılacak dağıtım sisteminin kapasitesi ve ilgili teknik kriterlerle sınırlanır.
- Genellikle 1–5 MW ölçüindeki rüzgâr türbinleri lisanssız üretim kapsamındaki en yaygın uygulamalardır.

Bu model, özellikle OSB'ler, sanayi tesisleri, tarımsal sulama tesisleri ve ticari işletmeler tarafından tercih edilmektedir.

9.2.3 Lisanssız Elektrik Üretim Süreci Aşamaları

Lisanssız üretim süreci, lisanslı projelere kıyasla daha kısa, maliyet açısından daha düşük ve daha esnek bir yapıya sahiptir. Genel süreç adımları aşağıdaki gibidir:

- 1. Saha Seçimi ve Ön Etüt**

Proje geliştiricisi tarafından uygun rüzgâr sahası belirlenir.

Bu aşamada genellikle:

- Türkiye Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA)
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü rüzgâr istatistikleri
- Arazi eğim–pürüzlülük modellemeleri
- Yerleşim alanı ve imar durumu incelenir.

Lisanssız üretimde zorunlu bir yıllık rüzgâr ölçümleri bulunmamakla birlikte, yatırımın ekonomikliği açısından kısa süreli ölçümler veya yakın istasyon verileri kullanılır.

- 2. Başvuru ve Dağıtım Şirketi Değerlendirmesi**

Lisanssız RES başvurusu doğrudan ilgili dağıtım şirketine yapılır. Başvuru paketinde:

- Başvuru dilekçesi
- Türbine ait teknik özellikler
- Tek hat şeması ve üretim tesisi bilgi formu
- Türbin yerleşim planı
- Tüketim tesisi ile ilgili abonelik bilgileri

- Mülkiyet veya kira sözleşmesi
- ÇED kapsam dışı/kapsam belirleme belgesi (genellikle “ÇED Gerekli Değildir”) yer alır.

Dağıtım şirketi başvuruyu teknik ve şebeke uygunluğu açısından inceler. Uygun görülmesi halinde Çağrı Mektubu verilir.

3. Proje Onayı ve İzinlerin Tamamlanması

Çağrı mektubu alındıktan sonra teknik projeler hazırlanır:

- Elektrik uygulama projesi
- Mekanik proje
- Trafo merkezi ve OG bağlantı projeleri
- Türbin temel projeleri
- Gürültü raporu
- İmar uygunluğu / yükseklik izni

Gerekli izinler belediye, il özel idaresi, çevre birimleri ve dağıtım şirketinden alınır.

4. Tesisin İnşası ve Şebekeye Bağlantı

Türbin direğinin inşası, türbin montajı, kablo güzergâhi ve trafo tesisinin kurulumu gerçekleştirilir. Ardından:

- Bağlantı anlaşması
- Sistem kullanım anlaşması

imzalanır ve tesis geçici kabul için dağıtım şirketine bildirilir.

5. Geçici Kabul ve İşletmeye Alma

Dağıtım şirketinin yaptığı teknik kontroller sonucunda geçici kabul verilir. Sayaçlar devreye alınır ve tesis işletmeye başlar.

Üretilen enerji, tüketim tesisinin elektrik ihtiyacını karşılamak için kullanılır; fazla enerji dağıtım sisteme verilerek mahsuplaşma yapılır.

9.2.4 Başvuru İçin Gerekli Belgeler

- Başvuru dilekçesi
- Tüketim aboneliği belgeleri
- Tapu, kira sözleşmesi veya kullanım hakkı belgesi
- Üretim tesisi bilgi formu
- Tek hat şeması
- Türbin teknik veri sayfaları
- Türbin yerlesim planı
- ÇED Belgesi (genellikle “ÇED Gerekli Değildir” yazısı)
- İmar durumu ve yükseklik izni
- Gürültü mesafesi hesapları
- Trafo ve bağlantı projeler

Dağıtım şirketleri bazen bölgesel olarak ek belge talep edebilir.

9.2.5 Destekleme Mekanizmaları ve Finansal Yapı

Lisanssız RES’ler, lisanslı projelerdeki kadar büyük finansman gerektirmese de:

- YEKDEM çerçevesindeki alım garantileri
- Banka kredileri
- Kurumsal satın alma anlaşmaları (PPA)
- Sanayi tesisi için enerji maliyetlerini düşürücü etkileri

göz önünde bulundurularak ekonomik olarak değerlendirilir.

9.2.6 Çevresel Gereklilikler (ÇED)

Her ne kadar çoğu lisanssız RES projesi için “ÇED Gerekli Değildir” kararı verilse de

çevresel etki değerlendirmesi aşaması şu unsurları içerir:

- Gürültü düzeyi
- Kuş göç yolları ve habitat etkisi
- Görsel etki
- Doğal sit-koruma alanı kontrolü
- Tarım veya orman alanlarında izin süreçleri

Dağıtım şirketi, ÇED uygunluğu olmadan çağrı mektubu veya bağlantı anlaşması yapmaz.

9.2.7 Teknik Gereksinimler ve Şebeke Uyumluluğu

Lisanssız RES'ler, şebeke bağlantı standartlarına uygun olmak zorundadır. Bu kapsamında:

- Türbin kontrol sistemlerinin şebeke kodlarına uygunluğu
- Reaktif güç kontrolü
- Koruma röleleri
- UFR/DFR sistemleri
- SCADA izleme
- Harmonik sınırları
- OG bağlantı kriterleri

kontrol edilir.

10. Emisyon ve Hesaplamlar

Emisyon, atmosferdeki gaz, partikül, enerji, ısı, ışık veya kimyasal bileşiklerin insan faaliyetleri veya doğal süreçler sonucunda değişmesi anlamına gelir. Sanayileşme sonrası dönemde enerji üretimi, ulaşım ve endüstriyel süreçler kaynaklı salımlar atmosferin kimyasal yapısını önemli ölçüde etkilemiş ve özellikle sera gazı (GHG) emisyonları küresel ısınmanın temel belirleyicisi haline gelmiştir (IPCC, 2021).

10.1 Emisyon ve Çeşitleri

Kurumsal ve çevresel raporlama çerçevelerinde emisyonlar, kaynağı ve kontrol düzeyi temel alınarak üç kapsamda sınıflandırılır (ISO, 2018; GHG Protocol, 2015)

- a. Kapsam 1. Doğrudan emisyonlar : Kurumun veya projenin sahibi olduğu veya kontrol ettiği kaynaklardan çıkan emisyonlardır.
- b. Kapsam 2. Dolaylı Enerji Emisyonları : Kurumun kendi faaliyetlerini sürdürmek için dışarıdan satın aldığı elektriğin, ısının veya buharın üretilmesi sırasında oluşan emisyonlardır.
- c. Kapsam 3. Diğer Dolaylı Emisyonlar : En geniş ve hesaplanması en zor kategoridir. Şirketin sahibi olmadığı ancak tedarik zincirinde (upstream) veya müşterileri tarafından (downstream) gerçekleşen tüm emisyonları kapsar.

Emisyonlar kaynağına ve etkilediği çevreye göre birkaç farklı kategoride değerlendirilir.

10.1.1 Sera Gazı Emisyonları

Rüzgar enerjisinde doğrudan bir salınım yoktur fakat dolaylı emisyon kategorisinde sera gazı önemli bir yere sahiptir. Çimento gibi yapı malzemelerinin üretiminde CO_2 çoğulukta olmak üzere CH₄ salınımı söz konusudur. Bu malzemelerin lojistiğinde de yine araç ve makinelerin yakıtları sonucu CO_2 salınımı gerçekleşir. (IPCC,2017)

10.1.2 Partikül Madde Emisyonları

Partikül madde özellikle toz, kum gibi küçük ölçekli maddelerin taşınımı veya kullanımından kaynaklı ortaya çıkar. Türbinin kurulacağı alana ulaşım ve yol yapım faaliyetleri, türbin inşası, türbin ekipmanlarının taşınması gibi durumlarda artar. Böyle durumlarda kısa süreli görüş mesafesinde azalma, hava kirliliği ve dolayısıyla çevredekiler yerleşim alanlarına rahatsızlık söz konusu olabilir. Kontrol altına alınabilmesi için sulama, hız kontrolü yapılmalıdır. Bu, ÇED raporunda ‘toz kontrol’ adıyla zorunlu tedbir olarak yer alır.

10.1.3 Gürültü Emisyonları

Türbin inşaatında iş makineleri oldukça gürültülü olabilir. Türbinlerin dönmesi sırasında aerodinamik gürültü, jeneratör çalışması dolayısıyla da mekanik gürültü oluşur. Uluslararası standartlara uygun olarak 45-55 dBA limitleri korunur. Gürültü ölçme ve sınırlama, ÇED raporunda zorunlu bir bölümdür.

10.1.4 Gölge Emisyonları

Türbin kanatlarının dönmesiyle oluşan bir gölge-ışık döngüsü vardır. Bu durum türbin sahası yakınlarındaki yerleşim yerleri için dikkat edilmesi gereken bir noktadır. Kanatların uzunluğu, kule yüksekliği, saha konumu gibi parametrelere bağlı olarak gölge süresi hesaplanır. Uluslararası standartlarda maksimum süre 30 saat/yıl ve 30 dakika/gün'dür. (IFC,2012)

10.1.5 Elektromanyetik Alan Emisyonları

Jeneratörler, transformatörler gibi elektrik tesisatı tarafından oluşturulan emisyonlardır. Bu emisyonlar çok düşük seviyelerdedir ve sağlıksal bir risk oluşturmazlar.

10.1.6 Atık Kaynaklı Emisyonlar

Hem inşaat hem çalışma hem de bakım süreçlerinde kullanılan yağlar, hidrolik sıvılar tehlikeli atık olarak değerlendirilir. Depolanır. Ambalaj atıkları, harfiyat malzemeleri gibi atıklar da katı atık kategorisindedir. Bu atıklar toplanarak uzaklaştırılır.

10.1.7 Su ve Toprak Emisyonları

Tehlikeli atıkların yanlış depolamanması veya sızıntı riski olabilir, toprak ve su kalitesi bundan etkilenebilir. Bu durumlar haricinde rüzgar tesislerinde doğrudan su emisyonu yoktur. Türbin kurulma aşamasında orman tahribatı veya arazi bozulmaları olabilir. Bu durum emisyon olarak değerlendirilemez ama ÇED raporunda ‘emisyon etkisi’ başlığı altında yer alır.

10.2 Rüzgar Enerjisi Santrallerinde Emisyon Kaynakları

İnşaat, işletme ve söküm aşamalarında üstte anlatılan emisyon türleri ortaya çıkar. Enerji üretimi süreçleri, yalnızca üretim aşamasında değil; enerji üretiminin planlanması, üretim

aracıların imalatı, nakliyesi, montajı, bakım-onarımı ve ömrün sonunda geri dönüşüm ya da söküm gibi aşamaları da kapsadığında çevresel etkiler yaratır. Bu etkilerin ölçülebilmesi için kullanılan en yaygın yöntem Life Cycle Assessment (LCA – Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi)'dir. LCA'da, fonksiyonel birim olarak genellikle "1 kWh elektrik üretimi" alınır; bu sayede farklı üretim teknolojileri karşılaştırılabilir hâle gelir.

10.2.1 İnşaat Aşaması Emisyonları

Emisyonun en fazla olduğu dönemdir. Sahanın hazırlanması, temel kazılması, türbin kulesi dikilmesi, türbin parçalarının lojistiği ve kurulması gibi tüm süreçlerde iş makineleri çalışır ve yakıt tüketimi olur. CO_2 , CO , NO_x , $PM_{2,5}$, PM_{10} salınımı gerçekleşir.

10.2.2 İşletme Aşaması Emisyonları

Özellikle gürültü emisyonları bu süreçte önemlidir. Ayrıca bakım-onarım sırasında değiştirilen yağlar, hidrolik sıvılar atmosfere uçucu gaz salınımı yapabilir.

10.2.3 Söküm Aşaması Emisyonları

Bir rüzgar tesisinin ömrü yaklaşık olarak 20-25 yıldır. Sonrasında söküm işlemleri gerçekleştirilir. Bu işlemlerde, inşa aşamasında olduğu gibi iş makineleri kullanılır ve yakıt kullanımı söz konusudur. Ayrıca türbin parçaları, kule ve kablo gibi iç donanım ekipmanlarının geri dönüşüm sürecine alınması sağlanır.

10.2.4 Yaşam Döngüsü Emisyonları (LCA - Life Cycle Assessment)

Rüzgar türbinlerinin çevresel etkisini tam olarak anlamak için ISO 14040 ve 14044 standartlarına dayalı Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD) yöntemi kullanılır (ISO, 2006). Bu süreç şu aşamalardan oluşur ve emisyonlar bu aşamalarda kümülatif olarak hesaplanır:

- Hammadde ve Üretim: Türbin kulesi için çelik, kanatlar için fiberglas/reçine ve temel için beton üretimi, toplam yaşam döngüsü emisyonlarının yaklaşık %80-85'ini oluşturur.
- Nakliye ve Kurulum: Devasa bileşenlerin sahaya taşınması ve vinç operasyonları sırasında fosil yakıt tüketimi gerçekleşir.
- İşletme ve Bakım (O&M): Bakım araçlarının sahaya gidiş-gelişleri sınırlı bir emisyon

yaratır.

- Bertaraf ve Geri Dönüşüm: Ömrünü tamamlayan türbinin sökülmesi ve malzemelerin (özellikle kanatların) işlenmesi sürecidir

Literatürde karasal (onshore) rüzgar türbinleri için ortalama yaşam döngüsü emisyon değeri 11-12 g CO₂-eşdeğeri/kWh olarak kabul edilir. (IPCC, 2014; World Nuclear Association, 2021).

10.2.5 Rüzgar Enerjisinin Emisyon Profili

Rüzgar enerjisi santralleri (RES), elektrik üretim aşamasında (işletme fazı) doğrudan karbon emisyonu üretmezler; bu nedenle "sıfır emisyonlu" kaynaklar olarak nitelendirilirler. Ancak, bir rüzgar türbininin emisyon profili incelendiğinde, emisyonların santralin ömrü boyunca değil, "Beşikten Mezara" (Cradle-to-Grave) yaklaşımıyla en çok hammadde temini ve üretim aşamalarında yoğunluğu görülür. Fosil yakıtlı santrallerde emisyonun büyük çoğunluğu yakıtın yanması sırasında oluşurken, rüzgar enerjisinde emisyon yükü santral henüz dönmeye başlamadan önceki endüstriyel süreçlerde oluşur (NREL, 2021).

Rüzgar enerjisi, küresel ısınma potansiyeli (GWP) açısından en düşük etkiye sahip enerji kaynaklarından biridir. Sadece CO₂ değil, asit yağmurlarına neden olan Kükürt Dioksit (SO₂) ve Azot Oksitler (NO_x) açısından da fosil kaynaklara göre neredeyse sıfır emisyon avantajı sağlar (IEA, 2022). Ayrıca, su tüketiminin (water footprint) yok denecek kadar az olması, kuraklık riskinin arttığı iklim değişikliği senaryolarında rüzgar enerjisini, nükleer veya termik santrallere göre daha çevreci bir seçenek haline getirir.

10.3 Emisyon Hesaplamaları

Emisyon azaltımını hesaplamak için Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'nin (UNFCCC) Temiz Kalkınma Mekanizması (CDM) altında yayınladığı ACM0002 metodolojisi temel alınmalıdır (UNFCCC, 2023).

Temel hesaplama formülü şöyledir:

$$BE_y = EG_y \times EF_{grid}$$

BE_y = yılındaki temel durum emisyonları (ton CO₂)

EG_y = Proje tarafından yılında şebekeye verilen net elektrik miktarı (MWh)

EF_{grid} = Şebekenin Birleşik Marjinal (Combined Margin) Emisyon Faktörü (ton CO₂/MWh)

Türkiye için hesaplama yapılırken TEİAŞ verileri kullanılarak hesaplanan veya Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından yayınlanan "Şebeke Emisyon Faktörü" kullanılmalıdır. Söz konusu formda yer alan Birleşik marj emisyon faktörü (güneş, rüzgâr için= 0,6261 tCO₂/MWh) güneş veya rüzgârdan üretilen her 1 MWh'luk elektrik için 0,6261 ton CO₂ salınmaktadır anlamına gelmemektedir. Buradaki değer, yeni kurulacak bir güneş ya da rüzgâr enerji santrali ile üretilcek her 1 MWh'luk elektrik için 0,6261 ton CO₂ emisyondan kaçınılacağı anlamına gelmektedir. (ETKB, 2024)

10.4 Karbon Ayak İzi

Karbon ayak izinin kapsamlı biçimde değerlendirilebilmesi için öncelikle kavramın tanımı ve çeşitlerinin açık bir şekilde ortaya konması gerekmektedir.

10.4.1 Karbon Ayak İzinin Tanımı ve Çeşitleri

Karbon ayak izi, bir ürünün, hizmetin veya faaliyetin tüm yaşam döngüsü boyunca atmosfere saldığı toplam sera gazı miktarının karbondioksit eşdeğeri (CO₂e) cinsinden ifade edilen nicel bir göstergesidir. Bu hesaplama yalnızca CO₂ salımlarını değil; metan (CH₄), diazot monoksit (N₂O) ve çeşitli florlu gazlar gibi küresel ısınma potansiyeli (GWP) yüksek diğer sera gazlarını da kapsamaktadır. Bu nedenle karbon ayak izi, iklim değişikliği üzerindeki toplam etkilerin bütüncül şekilde değerlendirilmesine olanak sağlayan en kapsamlı çevresel göstergelerden biridir.

Bekiroğlu'na (t.y.) göre farklı sera gazlarının iklim değişikliği üzerindeki etkilerinin karşılaştırılabilmesi amacıyla, bu gazların CO₂ eşdeğer katsayılarının kullanılması zorunludur. Kyoto Protokolü’nde tanımlanan başlıca sera gazlarına ait GWP değerleri Tablo X’té özetlenmiştir.

Sembol	İsim	CO ₂ Eşdeğeri	Ana Kaynak
CO ₂	Karbon dioksit	1	Fosil Yakıtların Yanması, Orman Yangınları, Çimento Üretimi
CH ₄	Metan	21	Landfill Sahalar, Petrol ve Doğal Gazın Üretim ve Dağıtımı, Çiftlik Hayvanlarının Sindirim Sistemlerindeki Fermantasyon
N ₂ O	Nitroksit	310	N ₂ O Fosil Yakıtların Yanması, Gubreler, Naylon Üretimi
HFCs	Hidrofloro karbonlar	140~11.700	Buzdolabı Gazları, Alüminyum Eritme, Yarı İletken Üretimi
PFCs	Perfloro karbonlar	6.500~9.200	Alüminyum Üretimi, Yarı İletken Üretimi
SF ₆	Sülfür Heksaflorit	23.900	Elektrik İletim ve Dağıtım Sistemleri, Magnezyum Üretimi

Tablo X. Kyoto Protokolü'ne göre başlıca sera gazları ve CO₂ eşdeğerleri (Gielen & Kram, 1998).

Karbon ayak izi iki temel grupta incelenir: kişisel karbon ayak izi ve kurumsal karbon ayak izi.

1) Kişisel Karbon Ayak İzi

Bireylerin günlük yaşamlarındaki tüketim ve faaliyetler sonucunda ortaya çıkan toplam sera gazı emisyonlarını ifade eder. İki alt bileşenden oluşmaktadır:

- Birincil karbon ayak izi: Araç kullanımı, evsel ısınma gibi doğrudan fosil yakıt tüketiminden kaynaklanan emisyonlar.
- İkincil karbon ayak izi: Satın alınan ürünlerin üretim, taşınma, kullanım ve bertaraf süreçlerinde ortaya çıkan dolaylı emisyonlar.

2) Kurumsal Karbon Ayak İzi

Bir kurumun belirli bir yıl içinde tüm faaliyetleri sonucu oluşan sera gazı emisyonlarının toplamını ifade eder ve üç temel kapsam altında incelenir:

- Kapsam 1 – Doğrudan Emisyonlar: Kuruluşun kontrol ettiği araçlar, yakıt tüketimi ve proses kaynaklarından salınan emisyonlar.

- Kapsam 2 – Enerji Dolaylı Emisyonları: Satın alınan elektrik, ısı veya buhardan kaynaklanan emisyonlar.
- Kapsam 3 – Diğer Dolaylı Emisyonlar: Tedarik zinciri, iş seyahatleri, atık yönetimi ve ürün yaşam döngüsü gibi kurum dışı süreçlerle ilişkili emisyonlar.

Bekiroğlu (t.y.), birçok kurum için Kapsam 3 emisyonlarının toplam karbon ayak izi içinde en büyük paya sahip olduğunu ve hesaplanması en zor kategori olduğunu vurgulamaktadır.

10.4.2 Karbon Ayak İzinin Hesaplanması ve Ölçüm Yöntemleri

Karbon ayak izi hesaplamalarında en yaygın kullanılan yöntem Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (Life Cycle Assessment – LCA) yaklaşımıdır. LCA; bir ürünün veya hizmetin hammaddenin çıkarılmasından üretime, nakliyeye, kullanıma ve son bertaraf aşamasına kadar tüm süreçlerdeki çevresel etkilerin bütüncül biçimde analiz edilmesini sağlar (Pandey, Agrawal & Pandey, 2011).

LCA iki temel veri toplama yöntemi kullanır:

- Doğrudan ölçüm: Sensörler ve ölçüm cihazlarıyla gerçek zamanlı veri toplama; özellikle sanayi tesisleri ve enerji üretim sistemlerinde yüksek doğruluk sunar.
- Emisyon faktörleri yöntemi: Yakıt tüketimi, elektrik kullanımı veya malzeme miktarlarının standart emisyon katsayılarıyla çarpılması yoluyla hesaplama yapılır. Saha verisinin sınırlı olduğu durumlarda tercih edilmektedir.

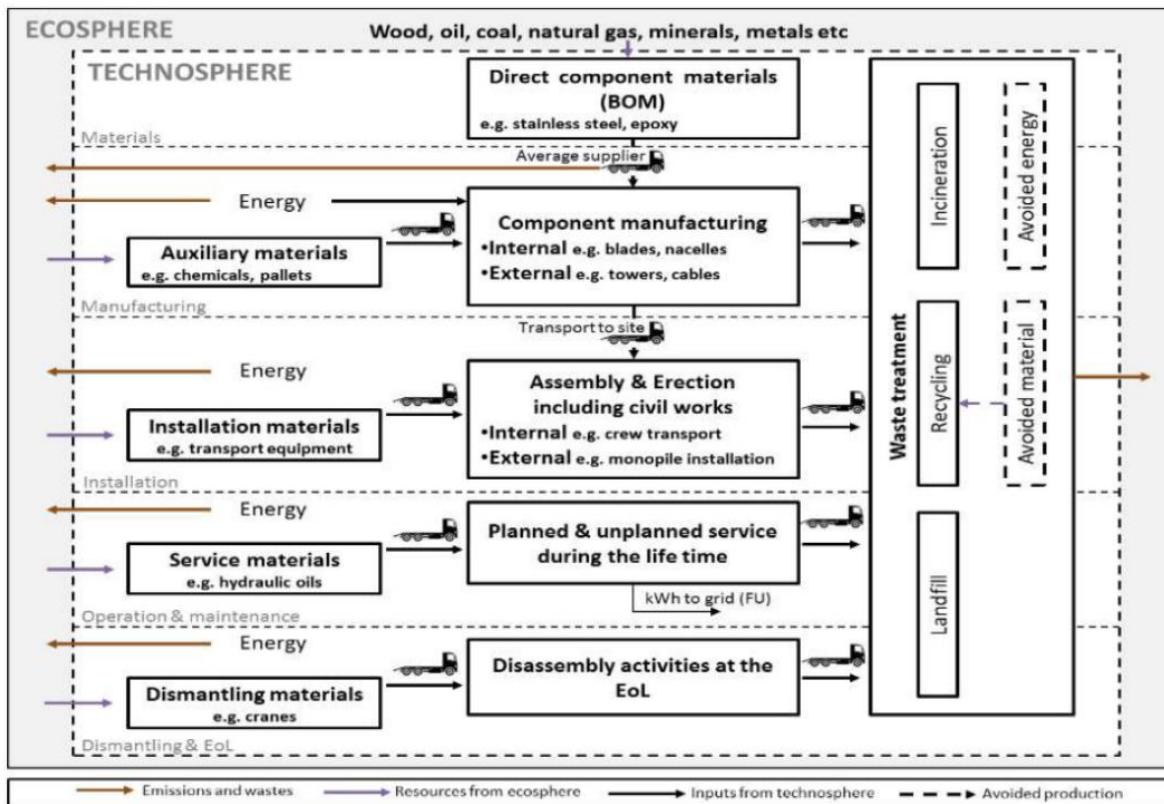
Bu yöntemler, bireysel ve kurumsal emisyonların faaliyet bazlı hesaplanmasıını sağlayarak, azaltım stratejilerinin geliştirilmesine ve sürdürülebilirlik programlarının oluşturulmasına zemin hazırlar. LCA aynı zamanda alternatif senaryoların çevresel etkilerini karşılaştırma imkânı sunması bakımından karar vericiler için önemli bir araçtır.

Bu yöntemlere ek olarak, karbon ayak izi hesaplamalarının doğruluğunu ve uluslararası geçerliliğini artırmak amacıyla kullanılan en önemli çerçevelerden biri de Gold Standard sertifikasyon sistemidir (Gold Standard, 2025). 2003 yılında WWF (Dünya Doğayı Koruma Vakfı) ve çeşitli sivil toplum kuruluşları öncülüğünde geliştirilen Gold Standard, gönüllü

karbon piyasalarında “çevresel bütünlük” ilkesini merkeze alarak projelerin şeffaflığını, doğrulanabilirliğini ve sürdürülebilirlik katkılarını güvence altına almaktadır (WWF, 2003). Bu standart, bir projenin yalnızca atmosferden çekilen veya salımı önlenen sera gazı miktarını doğrulamakla sınırlı kalmaz; aynı zamanda biyoçeşitlilik, ekosistem sağlığı, yerel ekonomik kalkınma ve toplumsal refah gibi çok boyutlu etkilerini de değerlendirmeye dahil eder. Gold Standard sertifikası alabilmek için projelerin, İklim Eylemi (SDG 13) başta olmak üzere en az üç farklı Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Hedefi’ne (SDG) somut katkılar sunduğunu kanıtlaması zorunludur (Gold Standard, 2025). Bu yönyle Gold Standard, özellikle rüzgâr enerjisi gibi yenilenebilir enerji projelerinin yalnızca düşük karbonlu elektrik üretim tesisleri olarak değil, aynı zamanda sosyal fayda sağlayan ve sürdürülebilir kalkınmayı destekleyen çevresel projeler olarak uluslararası geçerlilikte tescillenmesini mümkün kılmaktadır.

10.4.3 Rüzgâr Türbinlerinin Yaşam Döngüsü Boyunca Karbon Emisyonları

Rüzgâr turbinleri işletme dönemlerinde neredeyse sıfır emisyon üretse de üretim, nakliye, kurulum, işletme ve hizmetten çıkışma (EoL) süreçlerinde belirli miktarda sera gazı emisyonu oluşturmaktadır. Bu nedenle rüzgâr enerjisinin gerçek çevresel etkileri yalnızca LCA yaklaşımıyla doğru biçimde değerlendirilebilir.



Şekil X. Rüzgâr türbinlerinin yaşam döngüsü boyunca sistem sınırlarını ve malzeme-enerji akışlarını gösteren LCA diyagramı (Bonou, Laurent & Olsen, 2016).

Rüzgâr türbinlerinin karbon ayak izi değerlendirilirken tüm yaşam döngüsü süreçlerinin sistematik biçimde modellenmesi gerekmektedir. Şekil X, türbinlerin beşikten mezara yaşam döngüsü kapsamında ele alınan başlıca aşamalarını göstermektedir. Bu kapsamda; bileşenlerin üretiminde kullanılan çelik, beton, epoksi gibi malzemelerin ekosferden teknosfere olan akışı; bileşen imalatı sırasında gerçekleşen enerji tüketimi ve emisyon oluşumu; turbinin sahaya taşınması, montajı ve işletme boyunca gerçekleştirilen planlı/plansız bakım faaliyetleri diyagramda bütüncül bir şekilde sunulmaktadır. Ayrıca hizmet ömrü sonunda yapılan söküm (EoL) işlemleri, atık yönetimi seçenekleri (geri dönüşüm, yakma, depolama) ve bunların çevresel etkileri de sistem sınırları içerisinde gösterilmiştir.

- Üretim Aşaması Emisyonları

Üretim aşaması, rüzgâr türbinlerinin karbon ayak izinin en büyük bölümünü oluşturmaktadır. Guezuraga, Zauner & Pölz (2012) üretim sürecine ait bileşen bazlı karbon dağılımını şu aralıklarda rapor etmektedir:

- Çelik kule: %25–35
- Beton temel: %15–25
- Kanatlar (fiberglass/karbon fiber): %10–20
- Epoksi reçineleri ve kompozit malzemeler: %10–15

Bu değerler, özellikle çelik ve beton üretiminde kullanılan enerji yoğun proseslerin türbin karbon ayak izindeki belirleyiciliğini açıkça göstermektedir.

- Nakliye ve Kurulum Aşaması Emisyonları

Rüzgâr türbini bileşenlerinin büyük boyutları nedeniyle taşımacılık süreçleri önemli miktarda yakıt tüketimine yol açmaktadır. Offshore türbinlerde kurulum aşamasındaki karbon maliyeti daha da yüksektir; bunun temeli ağır kaldırma gemileri, montaj platformları ve diğer deniz operasyonlarının yoğun yakıt tüketimidir (Bonou, Laurent & Olsen, 2016).

- İşletme ve Bakım Aşaması Emisyonları

İşletme dönemi, türbinlerin yaşam döngüsündeki en düşük emisyona sahip aşamadır. Elektrik üretiminde fosil yakıt kullanılmadığı için neredeyse sıfır karbon salımı gerçekleşmektedir. Bakım faaliyetleri toplam emisyon içinde küçük bir paya sahiptir.

- Geri Dönüşüm Aşaması

Türbinlerde kullanılan çelik bileşenler yüksek geri dönüşüm oranlarına sahiptir. Ancak kompozit kanat malzemelerinin geri dönüşümü hâlâ güçlükler barındırmaktadır (Liu & Barlow, 2017). Bu alandaki teknolojik ilerlemeler gelecekte rüzgâr türbinlerinin karbon ayak izini daha da azaltma potansiyeline sahiptir.

10.4.4 Rüzgâr Türbinlerinde Onshore–Offshore LCA Karşılaştırması

Bonou, Laurent ve Olsen (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışma, onshore ve offshore rüzgâr türbinlerinin iklim değişikliği etkilerinin tüm yaşam döngüsü süreçleri dikkate alınarak hesaplanabileceğini göstermektedir.

Çalışmanın bulgularına göre:

Onshore türbinler: 7–11 g CO₂-eq/kWh

Offshore türbinler: 8–10 g CO₂-eq/kWh

Bu değerler rüzgâr enerjisinin fosil yakıtlı enerji üretim teknolojilerine kıyasla son derece düşük karbon yoğunluğuna sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Malzeme bazlı dağılım incelendiğinde:

Çelik bileşenler: %32–43

Beton temeller: %11–19

Kompozit kanatlar: %10–15

olduğu görülmektedir.

Offshore türbinlerde deniz tabanı temelleri ve destek yapıları için daha fazla çelik kullanılması nedeniyle çelik kaynaklı emisyonlar daha yüksektir. Ayrıca offshore kurulum aşaması, yoğun gemi operasyonları ve montaj ekipmanları nedeniyle onshore sistemlere kıyasla çok daha yüksek karbon maliyeti yaratmaktadır. Ancak offshore türbinlerin daha yüksek enerji üretim kapasitesi, bu yüksek kurulum emisyonunu yaşam döngüsü boyunca telafi etmektedir.

Çalışmanın önemli bulgularından biri de hem onshore hem offshore sistemlerde enerji geri ödeme süresinin (energy payback time) bir yıldan kısa olmasıdır. Türbinlerin üretim ve kurulumunda harcanan enerji, işletmenin ilk yılında geri kazanılmakta; sonraki yıllarda üretilen enerji neredeyse sıfır karbon maliyetiyle sağlanmaktadır.

11. İklim Değişikliği ve RES

11.1 İklim Değişikliğinin Rüzgar Potansiyeline Etkisi

Rüzgar enerjisi birçok karbonsuzlaştırma yolunun merkezinde yer almaktadır, ancak rüzgar kaynağı sabit değildir. İklim değişikliği büyük ölçekli dolaşımı, fırtına yollarını, sınır tabakası yapısını ve aşırı olayları değiştirir. Bu süreçler ortalama rüzgar hızlarını, rüzgar enerjisi yoğunluğunu ve değişkenliğini değiştirir. Yön ve büyüklük, bölgeye, mevsime, emisyon yoluna ve modelleme yaklaşımına göre farklılık gösterir.

İklim değişikliği, sıcaklık gradyanlarını, basınç alanlarını ve büyük ölçekli sirkülasyonu değiştirir. Bu değişim, rüzgar hızının ortalamasını, değişkenliğini ve mevsimsel dağılımını etkiler. Rüzgar enerjisi tarafında kritik nokta şudur. Küçük hız farkları bile güç üretiminde büyük fark yaratır. Çünkü rüzgar gücü rüzgar hızının küpüyle ölçeklenir. Bu ilişki, rüzgar

hızındaki küçük değişimlerin bile enerji üretiminde orantısız büyülükte farklar yaratmasına yol açar (Martinez & Iglesias, 2022).

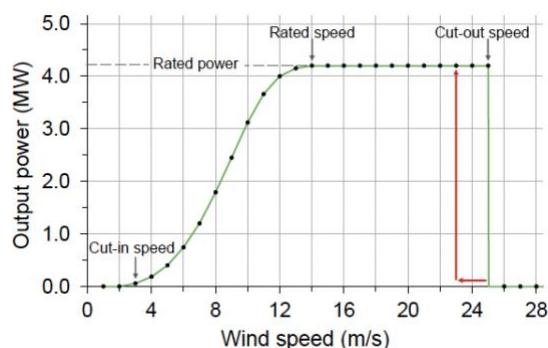
$$P = (1/2) \cdot \rho \cdot A \cdot v^3$$

Rüzgar yönü ve şiddeti, sinoptik ölçekli basınç sistemleri ve jet akımlarıyla şekillenir. Isınma, bu sistemlerin konumunu ve sürekliliğini değiştirerek baskın rüzgar rejimlerinde kayma yaratır. Bu kayma, santral yer seçimi, türbin sınıfı seçimi ve şebeke planlaması için doğrudan risktir.

Literatürde, iklim değişikliğinin rüzgar enerjisi üzerindeki etkilerinin bölgesel olarak farklı yönlerde ortaya çıkabildiği, bazı bölgelerde artış bazı bölgelerde azalış sinyali bulunduğu, ayrıca aşağı ölçekte yaklaşımlara bağlı belirsizliklerin yüksek olduğu belirtilir (Kara & Şahin, 2023). Bu çerçevede, tek bir genel sonuç yerine, bölgeye özgü iklim sinyali ve model belirsizliği birlikte raporlanmalıdır.

11.2 İklim Değişikliğinin Rüzgar Şiddeti ve Yönleri Üzerindeki Etkisi

İklim değişikliği atmosferik dolaşımı ve basınç gradyanlarını değiştirerek rüzgar şiddeti ve yön dağılımlarında kaymalara yol açabilir. Rüzgar enerjisi açısından kritik nokta şudur: Türbin güç eğrisi doğrusal değildir. Üretim, belirli bir “devreye giriş” hızından sonra artar, nominal güce ulaşır ve güvenlik gereğesiyle yüksek hızlarda türbin durdurulur. Bu nedenle rüzgar hız dağılımının hem orta kısmındaki hem de üst kuyruktaki değişimler üretime farklı mekanizmalarla yansır (Martinez & Iglesias, 2022). Ayrıca iklim değişikliğinin daha sık ekstrem rüzgar olayları üreterek türbinlerin daha sık kapanmasına ve üretimin daha sık kesilmesine neden olabileceği açıkça ifade edilmektedir (Liu vd., 2023, s. 870).

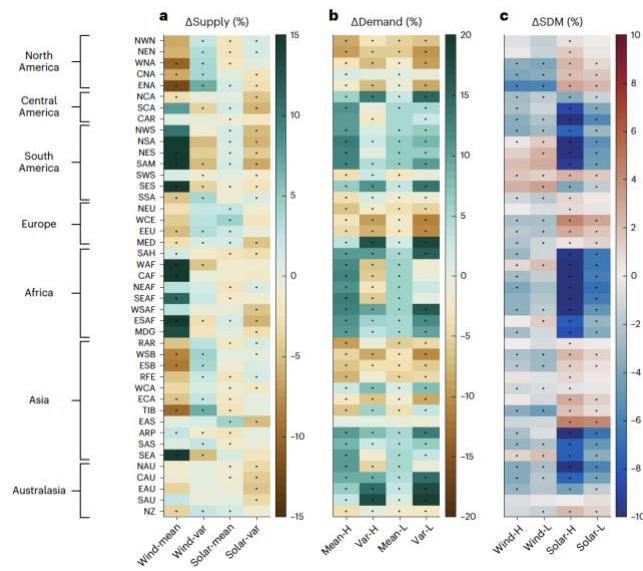


Şekil XX. 4,2 MW kapasiteli Enercon E-126 rüzgar turbininin güç eğrisi. Yeşil çizgi güç üretiminin rüzgar hızına bağlı değişimini, işaretler teknik eşik hızlarını (cut-in, rated, cut-out), kırmızı oklar ise yerleşik fırtına kontrol fonksiyonuna ait histerezis davranışını göstermektedir.

Rüzgar yönündeki değişimler ise bir santral sahasında türbinlerin “wake” etkileşimi, türbin yerleşimi ve şebeke bağlantı stratejileri üzerinden net üretimi etkiler. Yön dağılımındaki kaymalar, aynı ortalama hız seviyesinde dahi yıllık enerji üretimini değiştirebilir. Bu nedenle iklim etkileri incelenirken yalnızca hızın ortalaması değil, hız-yön ortak dağılımı değerlendirilmelidir.

11.3 Rüzgarın Mevsimsel ve Bölgesel Varyasyonları

Rüzgar rejimi mevsimsel olarak değişir ve bu değişim enerji arzının mevsimsel desenini belirler. İklim değişikliğinin etkisi, çoğu zaman “yıllık ortalama hız” üzerinden özetlense de, enerji sistemi açısından daha belirleyici olan mevsimsel üretim profili ve düşük üretim dönemlerinin sikligıdır. Bu noktada, rüzgar enerjisi çalışmalarının önemli bir kısmı “dunkelflaute” gibi düşük rüzgar dönemlerinin süre ve sıklıklarına odaklanır (Lehneis, 2025). Ayrıca iklim değişikliği, talep tarafını da dönüştürür. Isınma talebi azalırken soğutma talebi artar ve bu iki yönlü değişim, arz-talep uyumunu farklı bölgelerde farklı biçimde etkiler (Liu vd., 2023, s. 870).



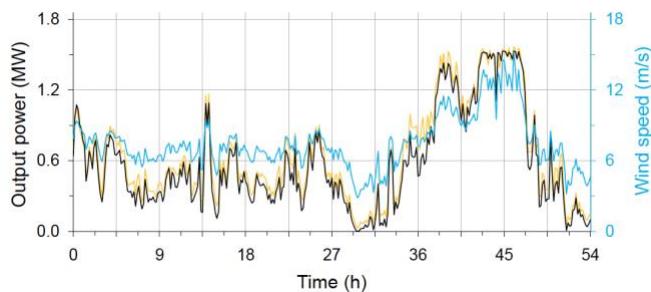
Şekil XX. SSP2-4.5 senaryosu altında küresel ölçekte rüzgar ve güneş sistemleri için arz, talep ve arz-talep uyumsuzluğundaki (SDM) bölgesel değişimler. Renkler ortalama ve değişkenlikteki yüzdesel değişimini, noktalar ise model uzlaşısı yüksek bölgeleri göstermektedir.

11.4 İklim Değişikliğinin Rüzgar Modelleri Üzerindeki Etkisi

Rüzgar projeksiyonlarında temel sorun, farklı iklim modellerinin ve aşağı ölçekleme yaklaşımlarının rüzgar hızını farklı hassasiyetlerle üretmesidir. Bu durum rüzgar hız

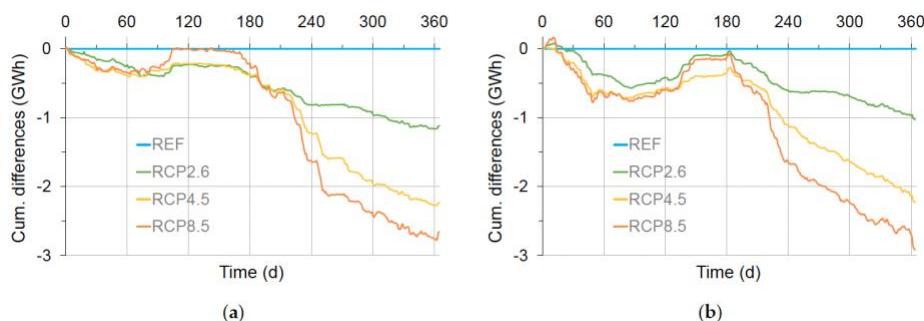
projeksiyonlarında tutarsızlıklar ve belirsizlikler doğurur (Kara & Şahin, 2023). Bu nedenle iklim etkisi analizi tek bir modele dayanılmamalı, mümkünse çoklu model ansambllarıyla çalışılmalı ve belirsizlik açık biçimde raporlanmalıdır.

Uygulamada iklim çıktılarının türbin göbek yüksekliğine taşınması gereklidir. Bu dönüşüm çoğu analizde dikey profil kabulleri ile yapılır ve seçilen yöntem sonuçları etkiler. Ayrıca türbin performans modellemesinde kullanılan “hava yoğunluğu” gibi değişkenlerin standart koşullara göre mi, yoksa iklim senaryoları altında değişen sıcaklık ve basınçla göre mi ele alındığı üretim simülasyonlarını etkileyebilir. Örneğin güç eğrilerinin sıkılıkla standart hava yoğunluğu, sıcaklık ve basınç koşullarında tanımlandığı gösterilmektedir (Lehneis, 2025, s. 7).



11.5 İklim Modellerinden Elde Edilen Bulgular

Son dönem çalışmalar, iklim değişikliğinin rüzgar üretiminin bölgesel olarak azaltabileceğini ve bu etkinin senaryo şiddetiyle artabileceğini göstermektedir. Almanya Körfezi örneğinde yapılan bir çalışma, farklı RCP senaryoları altında türbin ansamblı üretiminin senaryo şiddeti arttıkça azaldığını raporlamaktadır (Lehneis, 2025, s. 1). Daha geniş çerçevede, rüzgar ve güneş arz-talep uyumunu çoklu iklim modeliyle değerlendiren küresel bir analiz, emisyon senaryoları altında birçok bölgede arz-talep uyumunda düşüşler görülebileceğini ve bu düşüşlerin hem ortalama iklim değişiminden hem de iklim değişkenliği ve uç olaylardan kaynaklandığını vurgular (Liu vd., 2023, s. 870-871).



Şekil XX. 2008 ve 2010 yılları için günlük çözünürlükte, RCP2.6, RCP4.5 ve RCP8.5

senaryolarında türbin topluluğu elektrik üretiminin referans senaryoya göre kümülatif farkları.

Türkiye bağlamında ise literatür, Akdeniz havzası gibi bazı bölgelerde rüzgar hızında azalış sinyali olabileceğini, buna karşın farklı coğrafyalarda artışların da mümkün olduğunu ve sonuçların kullanılan modelleme yaklaşımına duyarlı olduğunu öne çıkarır (Kara & Şahin, 2023).

11.6 Rüzgar Enerjisi Projelerinde İklim Değişikliği Risklerinin Değerlendirilmesi

İklim riski değerlendirmesi, enerji üretim miktarı kadar üretimin sürekliliği, aşırı olay kaynaklı duruşlar ve altyapı dayanımı üzerinden ele alınmalıdır. Bu değerlendirmede üç hat kritik önem taşır.

Birincisi, üretim riski. Rüzgar hızındaki küçük sapmaların üretimde büyük değişimlere yol açması nedeniyle, iklim trendleri finansal performansı etkiler (Martinez & Iglesias, 2022). İkincisi, operasyonel kesinti riski. Daha sık ekstrem rüzgar olayları türbin kapanmalarını artırarak üretim kaybı oluşturabilir (Liu vd., 2023, s. 870). Üçüncüsü, sistem riski. Arz ve talebin eşzamanlı değişmesi, yalnızca üretim ortalamasına bakılarak anlaşılamaz; arz-talep uyumu bozulduğunda şebeke güvenliği ve yedek kapasite ihtiyacı artar (Liu vd., 2023, s. 871).

Bu nedenle risk değerlendirmesi, en azından şu çıktıları üretmelidir:

- Yıllık ve mevsimsel enerji üretimi değişimi,
- Düşük üretim dönemlerinin sıklığı ve süresi,
- Ekstrem rüzgar nedeniyle kapanma olasılığı,
- Arz-talep uyumu metriği ve
- Belirsizlik aralıkları.

11.7 Rüzgar Türbinlerinin Verimliliği Üzerindeki İklim Etkileri

Türbin verimliliği ve net üretim, yalnızca rüzgar hızına değil, performans eğrilerine, duruş eşiklerine ve çevresel koşullara bağlıdır. Güç eğrileri türbinin belirli bir rüzgar hızından sonra üretmeye geçtiğini ve yüksek hızlarda güvenlik için kapandığını açık biçimde ortaya koyar (Martinez & Iglesias, 2022). Ayrıca üretim, meteorolojik girdiler olan rüzgar hızı ve sıcaklık gibi değişkenlerle doğrudan kontrol edilir (Liu vd., 2023, s. 870).

11.8 Rüzgar Türbinlerinin Verimliliği Üzerindeki İklim Etkileri

Aşırı rüzgar olayları, hem yapısal yükleri artırabilir hem de türbinin güvenlik nedeniyle kapanmasına yol açarak üretimi kesebilir. Daha sık ekstrem rüzgar olaylarının türbinleri daha sık durdurabileceği açıkça belirtilmektedir (Liu vd., 2023, s. 870). Bu nedenle iklim etkisi çalışmaları, yalnızca ortalama hız değişimini değil, ekstrem rüzgar sıklığındaki değişimi de içermelidir.

11.9 İklim Modellemesi ve Rüzgar Enerjisi Projeksiyonları

İklim projeksiyonlarının RES planlamasında kullanımı, senaryo seçimi, model ansamblı, aşağı ölçekleme ve türbin modellemesi adımlarını içerir. İnceleme literatürü, rüzgar projeksiyonlarında tutarsızlıkların ve belirsizliklerin özellikle aşağı ölçekleme GCM çıktılarıyla ilişkili olabildiğini vurgular (Kara & Şahin, 2023). Küresel ölçekte ise CMIP6 tabanlı çoklu model yaklaşımıyla arz-talep uyumunun değerlendirilebilediği ve SSP245 ile SSP585 senaryolarının birlikte kullanıldığı gösterilir (Liu vd., 2023, s. 871).

11.9.1 CMIP6 ve SSP Senaryolarına Dayalı Görüşler

Senaryo temelli yaklaşımada, temel fark emisyon yolunun şiddeti ve buna bağlı iklim tepkisidir. Çoklu modelli küresel analiz, SSP245 ve SSP585 altında gelecekte arz-talep uyumunun bölgesel olarak bozulabileceğini, bazı yerlerde arz artışı olsa bile talep artışının uyumu düşürebileceğini ortaya koyar (Liu vd., 2023, s. 871). Bu sonuç, “arz artıyor” yorumlarının tek başına yeterli olmadığını gösterir.

11.10 Uzun Vadeli Enerji Projeksiyonlarında Rüzgar Enerjisinin Rolü

Rüzgar enerjisi, yaşam döngüsü emisyonlarının düşük olması nedeniyle azaltım stratejisinin temel bileşenidir. İnceleme çalışması, rüzgarın operasyon sırasında sera gazı salmadığını ve yaşam döngüsü emisyonlarının fosil yakıtlara göre anlamlı derecede düşük olduğunu vurgular (Kara & Şahin, 2023, s. 4). Bununla birlikte, uzun vadeli projeksiyonlar, üretimin hava koşullarına bağımlılığı nedeniyle iklim değişikliği etkilerini sistem planlamasına dahil etmeyi zorunlu kılar. Bu zorunluluk, arz-talep uyumu düşüsleri ve ekstrem olay kaynaklı kesintiler üzerinden daha da güçlenmektedir (Liu vd., 2023, s. 870-871).

12. İstatistiksel Analiz

Rüzgar hızı; zamansal ve mekansal ölçekte sürekli değişkenlik gösteren, kaotik yapıda

ve rastgele karakterli bir atmosferik parametredir (Manwell vd., 2010). Bir Rüzgar enerjisi santrali (RES) projesinin teknik ve ekonomik fizibilitesinin sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi, yalnızca bölgedeki ortalama rüzgar hızının bilinmesiyle mümkün değildir. Atmosferik sınır tabaka içerisindeki rüzgar profilinin türbülans yapısı, esme sıklığı ve enerji yoğunluğu gibi karakteristik özelliklerinin matematiksel olarak modellenmesi, projenin başarısı için bir zorunluluktur. Bu bölümde, Van Gevaş sahasındaki rüzgar rejimini karakterize etmek için kullanılan istatistiksel dağılım yöntemleri ve uygulanan modellerin doğruluğunu test eden hata metrikleri detaylandırılmıştır.

12.1 Rüzgar Verilerinin İstatistiksel Analizi ve RES Projelerindeki Kritik Önemi

Rüzgar türbinlerinin enerji üretim karakteristiği lineer bir yapı sergilemez; üretilen aerodinamik güç, rüzgar hızının küpü ($P \sim v^3$) ile orantılıdır (Burton vd., 2011). Bu fiziksel ilişki nedeniyle, rüzgar hızında meydana gelen küçük değişimler veya modelleme aşamasında yapılan minimal hatalar, Yıllık Enerji Üretimi (AEP) tahminlerinde kabul edilemez büyülükte sapmalara neden olabilmektedir. Ayrıca her rüzgar turbini, belirli bir devreye giriş (cut-in) ve devreden çıkış (cut-out) hızı aralığında çalışmaktadır. Dolayısıyla, rüzgarın yıl boyunca hangi hız aralıklarında ne kadar süreyle estiğini gösteren frekans dağılımının doğru belirlenmesi hayatı önem taşır. Olasılık dağılım fonksiyonları (PDF), bu noktada devreye giren en temel araçtır. Bu fonksiyonlar sayesinde elde edilen veriler; Van Gevaş sahası için en uygun turbin tipinin seçilmesinde, türbinlerin sahadaki yerleşim optimizasyonunda ve projenin finansal yapılabilitliği açısından kritik olan kapasite faktörünün hesaplanmasında temel teşkil eder (Manwell vd., 2010). Doğru kurgulanmış bir istatistiksel modelleme, yatırım riskini minimize ederek projenin güvenilirliğini artırmaktadır. İstatistiksel analiz yöntemleri belirlenirken, eldeki verinin yapısı dikkate alınmalıdır. İstatistik biliminde olasılık dağılımları, değişkenin türüne göre "kesikli" ve "sürekli" olmak üzere iki ana kategoride sınıflandırılır:

Kesikli Olasılık Dağılımları: Değişkenin yalnızca belirli, sayılabilir tam sayı değerlerini alabildiği durumlar için geliştirilmiştir. Örneğin; bir deneydeki başarı/başarısızlık sayısını modelleyen binom dağılımı veya belirli bir zaman aralığında nadiren gerçekleşen olay sayısını, örneğin; trafik kazaları veya hatalı üretim sayısı, modelleyen Poisson Dağılımı bu sınıfa girer (Walpole vd., 2012).

Kısıtlar ve Yöntem Seçimi: Rüzgar hızı, doğası gereği kesikli bir değişken değildir. Rüzgar anlık olarak 5 m/s'den 6 m/s'ye sıçramaz; 5.1, 5.12, 5.125 m/s gibi sonsuz sayıda ara

reel değer alarak sürekli bir değişim gösterir. Bu fiziksel gerçeklik nedeniyle, binom veya poisson gibi kesikli dağılım fonksiyonları, rüzgar hızı yoğunluğunu ve enerji potansiyelini karakterize etmek için uygun değildir. Bu nedenle, bu tez çalışmasında rüzgarın sürekli yapısına uygun olan sürekli olasılık dağılım fonksiyonları temel alınmıştır.

12.2 Weibull ve Rayleigh

Rüzgar enerjisi literatüründe, rüzgar hızı karakteristiğini modellemek için en yaygın kabul gören yöntemler Weibull ve rayleigh dağılımlarıdır. Bu analizlerde iki temel fonksiyon kullanılır: Rüzgarın belirli bir hızda esme sıklığını gösteren olasılık yoğunluk fonksiyonu (PDF) ve rüzgarın belirli bir hızın altında veya üstünde esme olasılığını veren kümülatif dağılım fonksiyonu (CDF). CDF, özellikle rüzgar türbinlerinin devreye giriş ve çıkış hızları arasında kalan toplam çalışma süresini hesaplamak için kritik öneme sahiptir.

Weibull Dağılımı: Rüzgar enerjisi endüstrisinin standarı olarak kabul edilen Weibull dağılımı, esnek yapısı sayesinde çok çeşitli rüzgar rejimlerini modelleme kabiliyetine sahiptir. İki parametreli Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu ($f(v)$) ve kümülatif dağılım fonksiyonu ($F(v)$) sırasıyla aşağıdaki eşitliklerle ifade edilir:

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right)\left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}$$

$$F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}$$

Bu eşitlikte “v” rüzgar hızını (m/s) temsil ederken, fonksiyonun karakterini belirleyen iki temel parametre bulunmaktadır:

- **Şekil Parametresi (k) :** Rüzgar rejiminin kararlılığını ve dağılımin genişliğini ifade eden boyutsuz bir katsayıdır. “k” değerinin yüksek olması rüzgarın daha düzenli ve kararlı estiğini, düşük olması ise rüzgarın değişken ve türbülanslı olduğunu gösterir. Gevaş bölgesinin karmaşık orografik yapısının rüzgar üzerindeki etkisi, bu parametre aracılığıyla modele yansıtılmaktadır.
- **Ölçek Parametresi (c):** Bölgedeki ortalama rüzgar hızı ile doğrudan ilişkili olan ve rüzgar potansiyelini gösteren parametredir (m/s)

Rayleigh Dağılımı: Weibull dağılıminin basitleştirilmiş bir özel halidir. Weibull fonksiyonundaki şekil parametresinin sabit olarak $k=2$ kabul edildiği durumu ifade eder. Genellikle detaylı zaman serisi verisinin bulunmadığı ön fizibilite çalışmalarında

tercih edilir. Rayleigh dağılıminin olasılık yoğunluk ($f(v)$) ve kümülatif dağılım ($F(v)$) fonksiyonları şu şekildedir:

$$f(v) = \frac{\pi v}{2v^2} e^{-\frac{\pi}{4}(\frac{v}{\bar{v}})^2}$$

$$F(v) = 1 - e^{-\frac{\pi}{4}(\frac{v}{\bar{v}})^2}$$

Ancak Rayleigh dağılımı, sabit $k=2$ varsayımlı nedeniyle, özellikle Gevaş gibi karmaşık arazi yapısına sahip bölgelerdeki rüzgar dağılımını tam hassasiyetle yansıtmayabilir. Bu sebeple, bu tez çalışmasında hata payını minimize etmek adına, parametreleri saha verilerine göre özel olarak hesaplanan Weibull dağılımı ana model olarak kullanılmıştır.

12.3 Model Doğrulama ve Hata Ölçüm Metrikleri

Tez çalışması kapsamında uygulanan rüzgar şiddeti ekstrapolasyonu ve olasılık dağılım modellerinin güvenilirliği, bilimsel geçerlilik açısından kanıtlanmak zorundadır. Kullanılan teorik modellerin Van Gevaş sahasındaki gerçek atmosferik koşullarla ne kadar örtüşüğünü belirlemek amacıyla uyum iyiliği testleri uygulanmıştır. Tahmin edilen veriler ile ölçülen gerçek veriler arasındaki farkların analizi için aşağıdaki istatistiksel metrikler kullanılması öngörülümüştür.

Hata Kareler Ortalamasının Karekökü (RMSE - Root Mean Square Error):

Modelin tahmin ettiği değerler ile gerçek değerler arasındaki farkların karesinin ortalamasının kareköküdür. Rüzgar gücü hesabındaki kübik ilişki nedeniyle, hız tahmininde yapılan büyük hataların enerji üretimindeki etkisi çok daha yıkıcıdır. RMSE, farkların karesini alarak büyük hataların etkisini belirginleştirir ve modelin bu tür sapmalara karşı duyarlığını ölçer. Bu nedenle, rüzgar modeli validasyonunda en kritik göstergesi olarak kabul edilmiştir. (Willmott, 1981)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}$$

Ortalama Mutlak Hata (MAE - Mean Absolute Error): Tahmin edilen ve ölçülen değerler arasındaki farkların mutlak değerlerinin ortalamasını ifade eder. Modelin genel hata boyutu hakkında bilgi verir ancak hatanın yönü hakkında fikir vermez.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i|$$

Belirlilik Katsayısı (R^2 - Coefficient of Determination): Kurulan modelin eldeki veri setindeki değişkenliği ne kadar açıklayabildiğini gösteren boyutsuz bir istatistiksel ölçütür. 0 ile 1 arasında değer alır. Değerin 1'e yaklaşması, kullanılan matematiksel modelin ve seçilen parametrelerin Van Gevaş sahasındaki rüzgar profili ile yüksek uyumluluk gösterdiğini kanıtlar.

Ortalama Karesel Hata (MSE): İstatistiksel modellerin performansını değerlendirmek amacıyla kullanılan, gözlemlenen gerçek değerler ile modelin ürettiği kestirimler arasındaki sapmaların karesel ortalamasını ifade eden bir performans ölçütüdür.

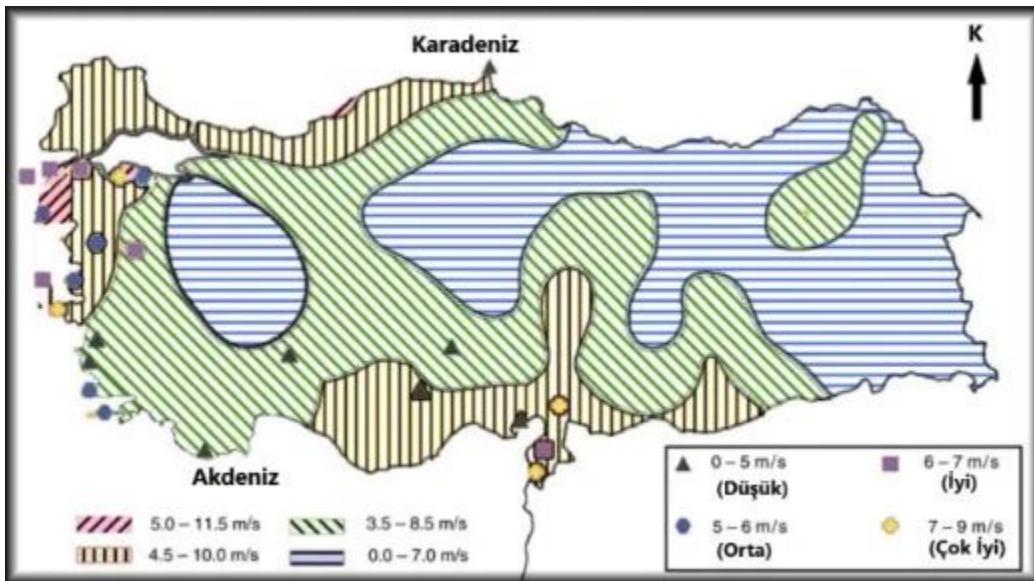
$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2$$

13. Rüzgar Enerjisinde Kullanılan Bilgisayar Programları

Rüzgâr enerjisinden elektrik üretiminde dikkat edilmesi gereken en önemli aşamalardan biri, santralin kurulacağı sahada yapılan ölçümler kullanılarak üretilcek enerji miktarının doğru bir biçimde hesaplanmasıdır. Rüzgâr hızının zamana ve mekâna bağlı olarak değişkenlik göstermesi, bu hesaplamların doğrudan ölçüm verileriyle yapılmasını zorlaştırmaktır. Bu nedenle rüzgâr enerjisi potansiyelinin belirlenmesinde istatistiksel analizler, fiziksel modeller ve simülasyon teknikleri kullanan çeşitli bilgisayar programları geliştirilmiştir. Bu yazılımlar, rüzgâr verilerinin analizinden saha optimizasyonuna, fizibilite hesaplarından çevresel etkilerin değerlendirilmesine kadar geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılmaktadır.

13.1 WAsP

WAsP (the Wind Atlas Analysis and Application Program) 1987 yılında DTU Risø National Laboratory Wind Energy and Atmospheric Physics bölümünden oluşturulmuştur (Yeşeren Enerji, 2021). Bu program ilk olarak Avrupa'da ve 2002 yılında Türkiye rüzgâr atlasının hazırlanmasında kullanılmıştır.



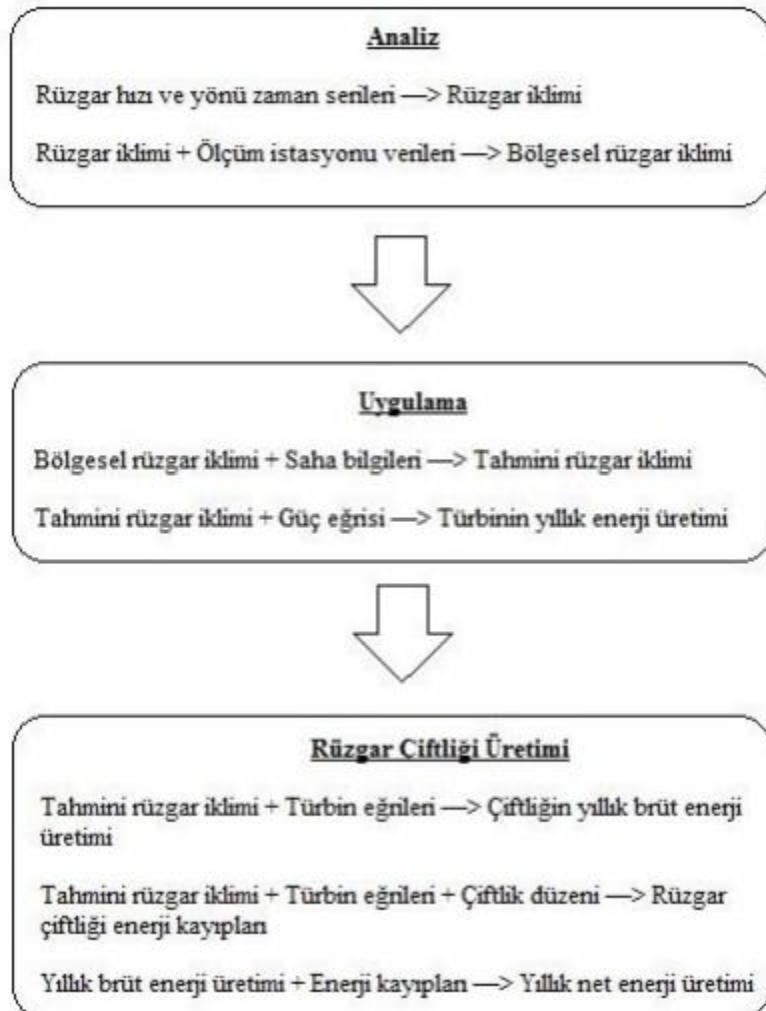
Şekil.X. Türkiye Rüzgar Atlası (WAsP, 2002)

WAsP yazılımı, veri analizlerini, rüzgar hız verilerinin Weibull dağılımına uygun bir dağılım gösterdiğini varsayıarak yapmaktadır (Güzel,2014).

WAsP yazılımının kullandığı temel bilgiler şunlardır:

- rüzgar verisi
- pürüzlülük bilgileri
- yakın çevre engel bilgileri
- bölgenin topografiyası

Rüzgâr enerjisi potansiyelinin belirlenmesi sürecinde öncelikle sahada gerçekleştirilen rüzgâr ölçümelerinden elde edilen veriler analiz edilmektedir. Bu analiz iki şekilde olabilir : OWC (Observed Wind Climate) ve WAsP İklim Analizi (Climate Analyst). Bu veriler, belirlenen koşullar ve referans kriterler doğrultusunda düzenlenerek rüzgâr atlaslarının oluşturulmasında kullanılmaktadır. Elde edilen rüzgâr atlasları yardımıyla, farklı konumlar için rüzgâr hızlarına ilişkin tahminler yapılabilmektedir. Bu aşamayı takiben, türbinlere ait güç eğrileri esas alınarak rüzgârin üretebileceği güç hesaplanmakta ve son olarak türbinlerin konumsal yerleşimleri de dikkate alınarak rüzgâr santralinin toplam net güç değeri belirlenmektedir. (Güzel,2014;Yeşeren Enerji,2021)



Şekil.X. WAsP Programının Ana İşleyişi (Güzel,2014)

Rüzzgâr enerjisi analizlerinde en yaygın kullanılan yazılımlar arasında WAsP ve WindPRO programları yer almaktadır. WindPRO, Danimarkalı rüzzgâr enerjisi danışmanlık firması EMD tarafından geliştirilmiş olup, 1986 yılından bu yana rüzzgâr enerjisi projelerinde aktif olarak kullanılmaktadır. Programın geliştirilmesi günümüzde de devam etmekte ve dünya genelinde bankalar, yetkili kurumlar, büyük enerji şirketleri ve yatırımcılar tarafından kabul görmektedir.

WAsP programı kompleks yapıdaki arazilerde önemli oranlarda tahmin hatası yapabilir. En doğru tahmini yapabilmesi için gerekli maddeler şunlardır :

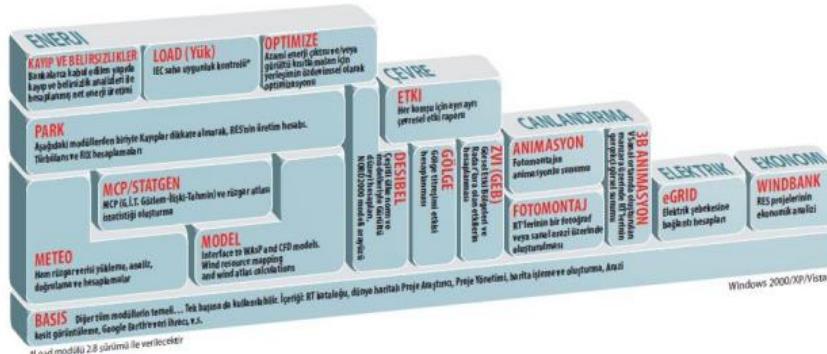
- Referans saha (ölçüm noktası) ve tahmin edilen saha (türbin noktası) genel itibariyle aynı rüzzgâr rejimine sahip olması,
- Her iki nokta için rüzzgâr rejiminin dengeli olması,
- Yapılan ölçümelerin standartlara uygun olması,

- Arazinin mümkün mertebe az eğimli olması,
- Kullanılan haritaların güvenilir olması. (Güzel,2014)

13.2 WindPro

Rüzgâr enerjisi analizlerinde en yaygın kullanılan yazılımlar arasında WAsP ve WindPRO programları yer almaktadır. WindPRO, Danimarkalı rüzgâr enerjisi danışmanlık firması EMD tarafından geliştirilmiş olup, 1986 yılından bu yana rüzgâr enerjisi projelerinde aktif olarak kullanılmaktadır. Programın geliştirilmesi günümüzde de devam etmekte ve dünya genelinde bankalar, yetkili kurumlar, büyük enerji şirketleri ve yatırımcılar tarafından kabul görmektedir.

WindPRO, rüzgâr çiftliklerinin planlanması, tasarıımı ve inşaat sonrası üretim performansının ayrıntılı analizi için kullanılan endüstri lideri bir yazılımdır. Program; rüzgâr verilerinin analizi, enerji üretim hesapları, belirsizlik değerlendirmeleri, saha uygunluk analizleri, çevresel etkilerin hesaplanması ve görselleştirilmesi gibi çok sayıda süreci bütüncül bir yaklaşımla ele almaktadır.



Şekil X. WindPRO programı modül tanıtımı (Güzel,2014)

Güzel (2014)'te belirtildiği üzere WindPRO, temelde beş ana yapıdan (enerji, çevre, ekonomi, elektrik ve animasyon) oluşmakta ve bu yapılar altında yaklaşık yirmi farklı modül barındırmaktadır. Bu modüler yapı sayesinde rüzgâr enerjisi projeleri teknik, çevresel ve ekonomik açıdan kapsamlı bir şekilde değerlendirilebilmektedir.

Enerji Yapısı ve İlgili Modüller

Enerji yapısı, rüzgâr enerjisi potansiyelinin belirlenmesi ve enerji üretim hesaplarının yapılmasına yönelik modülleri içermektedir. Bu yapı kapsamında yer alan BASIS modülü, WindPRO'nun temel modülü olup proje yönetimi, harita yönetimi, rüzgâr türbini katalogları ve veri giriş araçlarını içermektedir. Diğer tüm modülerin çalışabilmesi için BASIS modülüne

İhtiyaç duyulmaktadır.

METEO modülü, ölçüm direklerinden elde edilen rüzgâr verilerinin programa aktarılması, görsel ve istatistiksel olarak incelenmesi ve hatalı verilerin elenmesi için kullanılmaktadır. Bu modül, ölçülmüş rüzgâr verilerine dayanarak, ek bir hesaplama modülüne ihtiyaç duymadan tekil türbinler için yaklaşık enerji üretim tahmini yapılmasına da imkân sağlamaktadır.

MODEL modülü, WAsP ve ATLAS gibi rüzgâr akış modelleri için bir arayüz görevi görmektedir. Bu modülde araziye ait pürüzlülük, eş yükselti eğrileri ve engel bilgileri tanımlanmakta; METEO modülünde girilen rüzgâr verileri ile birlikte enerji üretim hesaplamaları yapılmaktadır. Hesaplamalar tek bir noktada birden fazla türbin tipi için gerçekleştirilebilmektedir.

PARK modülü, bir veya daha fazla rüzgâr türbininin uzun dönemli enerji üretimini hesaplamak için kullanılmaktadır. Bu modülde iz (wake) etkileri, turbulans, RIX hesaplamaları, ortam sıcaklığı ve basınç gibi parametreler dikkate alınmakta; elde edilen sonuçlar detaylı raporlar halinde sunulmaktadır.

MCP (Measure—Correlate—Predict) modülü, kısa dönem rüzgâr ölçüm verilerinin uzun dönem verilerle korelasyonunun kurulmasında kullanılmaktadır. Lineer regresyon, matris yöntemi, Weibull ölçekleme ve rüzgâr endeksi gibi yöntemler bu modül kapsamında yer almaktadır.

OPTIMIZE modülü, belirli saha sınırları ve kısıtlar altında rüzgâr türbinlerinin maksimum enerji üretimi sağlayacak şekilde yerleştirilmesini amaçlayan optimizasyon hesaplamalarını gerçekleştirmektedir.

Çevre Yapısı ve İlgili Modüller

Çevre yapısı, rüzgâr enerji santrallerinin çevresel etkilerinin değerlendirilmesine yönelik modülleri kapsamaktadır.

DECIBEL modülü, rüzgâr türbinlerinden kaynaklanan gürültü seviyelerini hesaplayarak gürültü sınır değerlerinin aşılmadığı türbin yerleşimlerinin belirlenmesini sağlar.

SHADOW modülü, türbin kanatlarının dönmesi sonucu oluşan gölge etkisinin yıllık süresini hesaplayarak yerleşim alanları üzerindeki etkileri analiz eder.

ZVI ve IMPACT modülleri ise görsel etki ve çevresel etkileşimlerin değerlendirilmesinde kullanılmaktadır.

Ekonomi Yapısı

Ekonomi yapısı kapsamında yer alan WindBANK modülü, bir rüzgâr enerji santrali yatırımının mali ve ekonomik uygunluğunun değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Yatırım

maliyetleri, enerji gelirleri ve finansal göstergeler bu modül aracılığıyla analiz edilmektedir.

Elektrik Yapısı

Elektrik yapısı, rüzgâr türbinlerinin elektrik şebekesine entegrasyonuna yönelik hesaplamaları içermektedir. eGRID modülü, şebeke bağlantı tasarıımı, kablolama ve elektriksel kayıpların analizinde kullanılmaktadır.

Animasyon Yapısı

Animasyon yapısı, rüzgâr enerji santrallerinin görselleştirilmesine yönelik modülleri kapsamaktadır. PHOTOMONTAGE, ANIMATION ve 3D-Animator modülleri, santralin inşaat öncesi ve sonrası durumunun gerçekçi görseller ve animasyonlar ile sunulmasını sağlamaktadır.

WindPRO, sahip olduğu modüler yapı sayesinde rüzgâr enerjisi projelerinin planlama, tasarım, çevresel değerlendirme, ekonomik analiz ve görselleştirme aşamalarının tamamını kapsayan bütüncül bir analiz imkânı sunmaktadır. Yaklaşık 25 yılı aşkın deneyimi, dünya genelindeki yaygın kullanımı ve sürekli geliştirilen modülleri ile WindPRO, rüzgâr enerjisi sektöründe en güvenilir ve en kapsamlı yazılımlardan biri olarak öne çıkmaktadır.

13.3 WindFarmer

WindFarmer, WindPRO yazılımına benzer şekilde modüler bir yapıya sahip olup, rüzgâr enerji santrallerinin tasarımını, analizi ve değerlendirilmesi amacıyla geliştirilen bir bilgisayar programıdır. Program, rüzgâr türbinlerinin yerleşiminden enerji üretim tahminlerine, çevresel etkilerden ekonomik analizlere kadar farklı aşamaları kapsayan modüllerden oluşmaktadır (Güzel, 2014; Yeşeren Enerji, 2021).

WindFarmer yazılımı içerisinde yer alan başlıca modüller aşağıda açıklanmıştır.

Temel Modül

Temel modül, WindFarmer yazılımının ana yapı taşı niteliğindedir ve rüzgâr santralinin sayısal bir modeli olarak değerlendirilmektedir. Bu modülde rüzgâr türbinlerinin konumları belirlenmekte ve santral yerleşimi oluşturulmaktadır. Türbinlerin yerleşimi sırasında enerji üretimini artırmaya yönelik çeşitli araçlar ve parametreler kullanılmakta, böylece santral verimliliğinin en uygun düzeye çıkarılması hedeflenmektedir. Bu modül, diğer tüm analizlerin başlangıç noktası olup WindFarmer programının vazgeçilmez bileşenidir (Güzel, 2014; Yeşeren Enerji, 2021).

Görselleştirme Modülü

Görselleştirme modülü, rüzgâr türbinlerinin ve rüzgâr santralinin görsel olarak modellenmesini sağlamaktadır. Bu modül aracılığıyla rüzgâr türbinlerinin animasyonları

oluşturulmakta ve türbinlerin çevre üzerindeki etkilerini gösteren haritalar hazırlanmaktadır. Elde edilen görseller ve haritalar belge hâline getirilebilmekte, böylece proje sunumları ve raporlamalar daha anlaşılır ve etkili bir biçimde gerçekleştirilebilmektedir. Görselleştirme modülü, özellikle proje tanıtımı ve çevresel değerlendirme süreçlerinde önemli bir rol oynamaktadır (Güzel, 2014; Yeşeren Enerji, 2021).

Finans (Denetleme) Modülü

Finans modülü, rüzgâr enerji santralinin ekonomik boyutunun değerlendirilmesine yönelik olarak kullanılmaktadır. Bu modülde projede kullanılan tüm ekipman ve bileşenlerin sayısal ve mali analizleri yapılmaktadır. Türbin sayısı, kullanılan kablo uzunlukları ve proje kapsamında gerçekleştirilen harcamalar bu modül içerisinde hesaplanan parametrelerden bazlıdır. Finans modülü, rüzgâr santralinin yatırım maliyetlerinin belirlenmesi ve ekonomik uygunluğunun değerlendirilmesi açısından önemli bilgiler sunmaktadır (Güzel, 2014; Yeşeren Enerji, 2021).

Elektrik Modülü

Elektrik modülü, rüzgâr santrallerinin elektrik altyapısının tasarlanmasıne yönelik analizleri kapsamaktadır. Bu modül sayesinde kabloların, trafoların ve enerji iletim hatlarının yıllık elektrik kayıpları hesaplanabilmektedir. Ayrıca topografik yapı ve arazi eğimleri dikkate alınarak yer altı kablolarının ve yer üstü hatlarının uzunlukları belirlenmekte, trafolarda, hatlarda ve kablolar meydana gelebilecek aşırı yüklenmeler analiz edilmektedir. Elektrik modülü, rüzgâr enerji santralinin güvenli ve verimli bir şekilde şebekeye entegrasyonunu sağlamak amacıyla kritik bir öneme sahiptir (Güzel, 2014; Yeşeren Enerji, 2021).

13.4 Windographer

Windographer, rüzgâr ölçüm direklerinden, LiDAR ve SoDAR sistemlerinden elde edilen rüzgâr verilerinin analiz edilmesi amacıyla kullanılan bir yazılımdır. Program, rüzgâr verilerinin kalite kontrolü, istatistiksel değerlendirilmesi ve görselleştirilmesi için geliştirilmiştir (Güzel, 2014; Yeşeren Enerji, 2021).

Windographer, rüzgâr hızı, rüzgâr yönü ve türbülans yoğunluğu gibi temel meteorolojik parametreleri analiz edebilmekte; aylık ve yıllık ortalamalar, frekans dağılımları ve Weibull parametreleri gibi istatistiksel çıktılar üretebilmektedir. Ölçüm verilerinde bulunan hatalı veya eksik kayıtlar filtrelenerek daha güvenilir veri setleri oluşturulmaktadır.

Program, doğrudan rüzgâr akış modellemesi yapmamakta; bu nedenle WAsP, WindPRO ve WindSim gibi yazılımlar için veri hazırlama aşamasında tamamlayıcı bir araç olarak kullanılmaktadır. Bu yönyle Windographer, rüzgâr enerjisi projelerinde ön analiz ve

veri doğrulama sürecinde önemli bir rol üstlenmektedir.

13.5 HOMER

HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables), rüzgâr enerjisinin diğer yenilenebilir ve konvansiyonel enerji kaynaklarıyla birlikte değerlendirildiği hibrit enerji sistemlerinin tasarımları ve analizi amacıyla kullanılan bir bilgisayar programıdır. Program, enerji üretimi, sistem maliyeti ve çevresel etkilerin birlikte değerlendirildiği kapsamlı bir karar destek aracı olarak öne çıkmaktadır (Güzel, 2014; Yeşeren Enerji, 2021).

HOMER yazılımı, analiz sürecini temel olarak simülasyon, optimizasyon ve hassasiyet analizi olmak üzere üç ana yapı üzerine kurmaktadır.

Simülasyon Yapısı

Simülasyon aşamasında HOMER, tanımlanan enerji sistemi için saatlik zaman adımlarıyla çalışarak sistemin teknik performansını değerlendirmektedir. Rüzgâr türbinleri, güneş panelleri, jeneratörler, bataryalar ve yük profilleri gibi bileşenler birlikte ele alınmakta; her bir bileşenin sistem içerisindeki davranışını detaylı olarak simüle edilmektedir. Bu sayede enerji üretimi, tüketimi, enerji açığı ve sistem güvenilirliği gibi parametreler belirlenmektedir. Simülasyon yapısı, farklı sistem konfigürasyonlarının teknik olarak çalışabilir olup olmadığını ortaya koymaktadır (Güzel, 2014; Yeşeren Enerji, 2021).

Optimizasyon Yapısı

Optimizasyon aşamasında HOMER, simülasyon sonucu teknik olarak uygulanabilir bulunan sistem konfigürasyonlarını ekonomik kriterlere göre sıralamaktadır. Bu aşamada toplam net bugünkü maliyet, birim enerji maliyeti ve işletme giderleri gibi ekonomik göstergeler dikkate alınmaktadır. HOMER, bu parametreleri kullanarak enerji ihtiyacını en düşük maliyetle karşılayabilecek sistem tasarımlarını belirlemekte ve kullanıcıya farklı senaryolar sunmaktadır. Optimizasyon yapısı, özellikle yatırım kararlarının alınmasında önemli bir rol oynamaktadır (Güzel, 2014; Yeşeren Enerji, 2021).

Hassasiyet Analizi Yapısı

Hassasiyet analizi, HOMER yazılımının belirsizlikleri değerlendirmek amacıyla kullandığı temel bileşenlerden biridir. Bu analiz kapsamında rüzgâr hızı, yakıt fiyatları, yatırım maliyetleri ve yük talebi gibi parametrelerde meydana gelebilecek değişimlerin sistem performansı ve maliyetler üzerindeki etkisi incelenmektedir. Hassasiyet analizi sayesinde, farklı koşullar altında en uygun sistem konfigürasyonlarının nasıl değiştiği ortaya konulmaktadır. Bu yapı, özellikle uzun vadeli enerji planlamalarında risklerin değerlendirilmesini sağlamaktadır (Güzel, 2014; Yeşeren Enerji, 2021).

HOMER, detaylı rüzgâr akış modellemesi ve saha bazlı türbin yerleşimi analizleri içermemekle birlikte, hibrit enerji sistemlerinin teknik ve ekonomik açıdan değerlendirilmesinde güçlü bir yazılımdır. Simülasyon, optimizasyon ve hassasiyet analizlerini birlikte sunması sayesinde HOMER, rüzgâr enerjisi projelerinde ön fizibilite ve sistem tasarımları aşamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Güzel, 2014; Yeşeren Enerji, 2021).

13.6 RETScreen

RETScreen Temiz Enerji Yönetim Programı, Kanada Hükümeti'ne bağlı CANMET Enerji Araştırma Laboratuvarı tarafından geliştirilmiş ve ilk olarak 30 Nisan 1998 tarihinde ücretsiz olarak kullanıma sunulmuştur. Rüzgâr enerjisi projeleri dâhil olmak üzere yenilenebilir enerji sistemlerinin teknik, ekonomik ve çevresel fizibilite analizlerinin yapılmasına olanak tanıyan bu program, basit ve kullanıcı dostu arayüzü sayesinde birçok projede yaygın olarak tercih edilmektedir (Güzel, 2014; Yeşeren Enerji, 2021).

Yenilenebilir Enerji ve Enerji Verimli Teknoloji Tarama yazılımı anlamına gelen RETScreen, günümüzde çok sayıda dil desteğine sahip olup dünya genelinde geniş bir kullanıcı kütlesi tarafından kullanılmaktadır. Program, rüzgâr santrali projelerinde tüm fizibilite hesaplarının tek bir platform üzerinden yapılabilmesini sağlamaktadır.

RETScreen programı temel olarak “ana durum” ve “önerilen durum” olmak üzere iki ana kısımdan oluşmaktadır. Ana durum, mevcut veya referans enerji sistemini temsil ederken; önerilen durum, kurulması planlanan rüzgâr enerji sistemine ait teknik ve ekonomik parametreleri içermektedir. Programın girdilerinde rüzgâr hızı verileri ve rüzgâr turbinine ait teknik özellikler kullanılmakta; çıktılarında ise enerji üretimi, güç grafikleri ve sistem karakteristikleri elde edilmektedir. Ayrıca yatırım maliyetinin geri dönüş süresi de program tarafından hesaplanabilmektedir (Güzel, 2014).

RETScreen analiz süreci, bu iki temel kısım çerçevesinde birbirini izleyen aşamalar şeklinde gerçekleştirilmektedir.

İlk aşamada, sistemin üreteceği enerji miktarının hesaplanabilmesi için kullanılacak yenilenebilir enerji türü ve sistemin kurulacağı bölge, programa girilen parametreler yardımıyla tanımlanmaktadır. Bu aşama, rüzgâr enerjisi potansiyelinin belirlenmesine yönelik teknik değerlendirmeleri kapsamaktadır.

İkinci aşamada, sistemin kurulumu ve işletilmesi sırasında ortaya çıkacak maliyetler hesaplanmaktadır. Bu aşamada yatırım giderleri, işletme ve bakım masrafları dikkate alınarak sistemin ne kadar sürede kendini amorti edeceği belirlenmektedir. Böylece projenin ekonomik fizibilitesi değerlendirilmiş olmaktadır.

Üçüncü aşama opsiyonel olup, kurulması planlanan rüzgâr enerji sisteminin sera gazı emisyonları üzerindeki etkisini analiz etmektedir. Bu aşamada sistemin çevresel faydaları niceł olarak ortaya konulmaktadır.

Dördüncü aşamada, sistemin sağlayacağı kazançlar ve oluşacak maliyetler ayrıntılı raporlar hâlinde sunulmaktadır. Bu raporlamada kredi koşulları, enflasyon oranları, teşvikler, indirimler ve vergi oranları gibi ekonomik parametreler kullanılmaktadır.

Beşinci ve yine opsiyonel olan aşamada ise risk analizi gerçekleştirilmektedir. Bu aşamada sistemde oluşabilecek olası sorunlar ve bu sorunların proje üzerindeki etkileri değerlendirilerek belirsizlikler analiz edilmektedir.

13.7 WindSim

WindSim, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) tabanlı bir rüzgâr enerjisi yazılımıdır. Program, özellikle karmaşık topoğrafyaya sahip sahalarda rüzgâr akışının üç boyutlu olarak modellenmesini sağlamaktadır (Güzel, 2014; Yeşeren Enerji, 2021).

WindSim, rüzgâr hızları ve türbülans yoğunluklarını yüksek çözünürlükle hesaplayarak türbin yerleşimi ve enerji üretim tahminlerinde daha gerçekçi sonuçlar sunmaktadır. CFD tabanlı yapısı sayesinde eğimli ve heterojen arazi koşullarında lineer modellere kıyasla daha ayrıntılı analizler yapılabilmektedir.

Bununla birlikte WindSim, yüksek hesaplama maliyeti ve detaylı veri gereksinimi nedeniyle genellikle ileri seviye projelerde ve detaylı mühendislik çalışmalarında tercih edilmektedir.

13.8 PLC ve SCADA Sistemleri

PLC (Programmable Logic Controller) ve SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) sistemleri, rüzgâr enerji santrallerinde üretim sürecinin izlenmesi, kontrol edilmesi ve yönetilmesi amacıyla kullanılan yazılım ve donanım tabanlı sistemlerdir. Bu sistemler, rüzgâr enerjisi potansiyelinin hesaplanması ziyade, santralin işletme aşamasında güvenli ve verimli çalışmasını sağlamaya yönelik olarak kullanılmaktadır.

PLC sistemleri, rüzgâr türbinleri ve yardımcı ekipmanlardan gelen sinyalleri işleyerek türbinlerin çalışma durumlarını kontrol etmektedir. SCADA sistemleri ise PLC'lerden gelen verileri merkezi bir kontrol ekranında toplayarak operatörlerin santrali uzaktan izlemesine ve yönetmesine olanak tanımaktadır. Bu sistemler aracılığıyla üretim değerleri, arıza durumları, bakım gereksinimleri ve performans göstergeleri anlık olarak takip edilebilmektedir.

PLC ve SCADA sistemleri, rüzgâr enerjisi projelerinde enerji üretiminin sürekliliğini

sağlamak, arızalara hızlı müdahale edebilmek ve işletme maliyetlerini azaltmak açısından kritik bir role sahiptir. Bu nedenle, rüzgâr enerji santrallerinin işletme ve bakım süreçlerinde vazgeçilmez bir bileşen olarak değerlendirilmektedir (Yeşeren Enerji, 2021).

13.9 ALWIN

ALWIN, rüzgâr enerjisi projelerinde meteorolojik veriler kullanılarak ortalama güç ve enerji üretiminin hesaplanması yönelik geliştirilmiş bir bilgisayar programıdır. Program, rüzgâr verilerini analiz ederek rüzgâr enerjisi potansiyeline ilişkin sonuçları grafiksel ve sayısal çıktılar halinde sunmaktadır.

ALWIN yazılımı, özellikle saha bazlı rüzgâr verilerinin değerlendirilmesi ve enerji üretim potansiyelinin ön analizinin yapılmasında kullanılmaktadır. Program, rüzgâr hız dağılımları üzerinden ortalama güç değerlerini hesaplamakta ve elde edilen sonuçları kullanıcıya yorumlanabilir biçimde aktarmaktadır.

Ancak ALWIN, detaylı rüzgâr akış modellemesi, türbin yerleşim optimizasyonu veya çevresel etki analizleri gibi ileri düzey hesaplamalar içermemektedir. Bu nedenle daha çok ön değerlendirmeye ve destekleyici analiz aracı olarak kullanılmakta olup, kapsamlı rüzgâr santrali tasarımlarında diğer profesyonel yazılımlarla birlikte değerlendirilmektedir (Yeşeren Enerji, 2021).

14. Rüzgâr Şiddeti Zaman Serilerinde Eksik Veri Tamamlama Analizi

Bu bölümde, rüzgâr şiddeti zaman serilerinde bulunan eksik gözlemler farklı istatistiksel ve makine öğrenmesi tabanlı yöntemler kullanılarak tamamlanmış ve yöntemlerin performansları karşılaştırılmış olarak değerlendirilmiştir.

14.1 Eksik Veri Nedir ve Neden Oluşur?

Eksik veri, bir veri setinde ölçülmesi veya kaydedilmesi beklenen gözlemlerin çeşitli nedenlerle elde edilememesi durumunu ifade etmektedir (Little & Rubin, 2002). Zaman serisi analizlerinde eksik veriler, ölçüm sürekliliğini bozarak istatistiksel analizlerin ve modelleme çalışmalarının güvenilirliğini olumsuz yönde etkileyebilmektedir.

Meteorolojik gözlemlerde eksik veriler genellikle ölçüm cihazlarının arızalanması, enerji kesintileri, sensör kalibrasyon hataları, veri iletim problemleri, bakım süreçleri veya çevresel koşullara bağlı olarak sensörlerin geçici olarak devre dışı kalması gibi nedenlerden

kaynaklanmaktadır. Özellikle rüzgar şiddeti gibi yüksek zamansal değişkenlik gösteren parametrelerde, kısa süreli veri kayıpları dahi analiz sonuçları üzerinde belirgin etkilere yol açabilmektedir (Wilks, 2011).

Eksik verilerin uygun yöntemlerle ele alınmaması durumunda, model yanılılığı artmakta, belirsizlikler büyümekte ve özellikle istatistiksel ve makine öğrenmesi tabanlı tahmin modellerinin performansı düşebilmektedir. Bu nedenle eksik veri probleminin nedenleriyle birlikte değerlendirilmesi, güvenilir analiz ve modelleme çalışmaları açısından kritik öneme sahiptir.

14.2 Eksik Veri Sınıflandırmaları

Eksik veriler, oluşum mekanizmalarına göre üç ana sınıfta incelenmektedir (Little & Rubin, 2002):

1. Tamamen rastgele eksik veri (Missing Completely at Random – MCAR)

Bu durumda, bir gözlemin eksik olma olasılığı veri setindeki herhangi bir değişkenle ilişkili değildir. Eksiklikler tamamen rastgele olmaktadır, eksik verilerin varlığı gözlenen veya gözlenemeyen değişkenlerden bağımsızdır. MCAR varsayıımı sağlandığında, eksik veriler istatistiksel analizlerde yanlışlık oluşturmadan ele alınabilmektedir.

2. Rastgele eksik veri (Missing at Random – MAR)

MAR durumunda, eksik veri olasılığı doğrudan eksik olan değişkenin kendisiyle değil, veri setinde gözlenen diğer değişkenlerle ilişkilidir. Başka bir ifadeyle, eksiklik mekanizması gözlemlenebilen bilgilerle açıklanabilmektedir. Bu tür eksik verilerde, uygun istatistiksel veya makine öğrenmesi tabanlı yöntemler kullanılarak güvenilir tahminler elde edilebilmektedir.

3. Rastgele olmayan eksik veri (Missing Not at Random – MNAR)

MNAR durumunda, eksik veri olasılığı doğrudan eksik olan değişkenin kendisiyle ilişkilidir. Eksiklik mekanizması gözlenemeyen faktörlere bağlı olduğundan, bu tür verilerde eksikliği doğru biçimde modellemek daha zordur ve yanlış varsayımlar ciddi yanlılıklara yol açabilmektedir.

14.3 Veri Setinin Tanımı

Bu çalışmada kullanılan veri seti, Van Gevaş bölgesi için 1 Ocak 2021 – 31 Aralık 2022

tarihleri arasında 30 dakikalık zaman çözünürlüğünde ölçülmüş meteorolojik gözlemlerden oluşmaktadır. Veri seti toplam 35.047 satır ve 14 değişken içermekte olup; rüzgâr şiddeti, rüzgâr yönü ve sıcaklık parametreleri 10 m, 50 m, 75 m ve 100 m yükseklik seviyeleri için sağlanmaktadır.

Zaman bilgisi içeren time değişkeni, sabit tarih formatı (%d-%m-%Y_%H:%M:%S) kullanılarak yeniden ayırtılmıştır. Biçim uyuşmazlığı nedeniyle parse edilemeyen 7 satır, analiz bütünlüğünü bozmamak amacıyla veri setinden çıkarılmıştır. Bu işlem sonrasında analizler 35.040 satır üzerinden gerçekleştirılmıştır. Veri setinin zaman çözünürlüğü 30 dakika, toplam kapsadığı süre ise yaklaşık 730 gün olarak hesaplanmıştır.

14.4 Eksik Veri Yapısının İncelenmesi

Çalışmanın ana hedef değişkenleri olan 75 m ve 100 m rüzgâr şiddeti serilerinde anlamlı düzeyde eksik veri bulunduğu tespit edilmiştir. 75 m rüzgâr şiddeti serisinde 3464 gözlem (%9.89), 100 m rüzgâr şiddeti serisinde ise 5158 gözlem (%14.72) eksiktir.

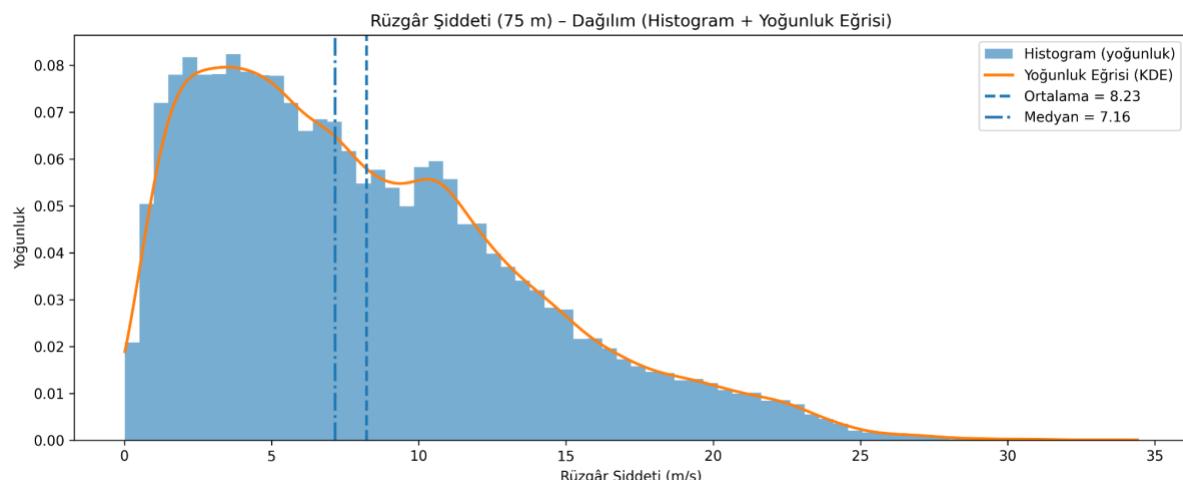
Eksik veriler yalnızca rastgele dağılmamış; aksine uzun süreli ardışık bloklar halinde kümelenmiştir. Eksik blok analizi sonuçlarına göre:

- 75 m rüzgâr şiddeti için 39 adet eksik blok bulunmakta olup, en uzun eksik blok 1322 örnek uzunluğundadır.
- 100 m rüzgâr şiddeti için 212 adet eksik blok tespit edilmiş, en uzun eksik blok uzunluğu 540 örnek olarak hesaplanmıştır.

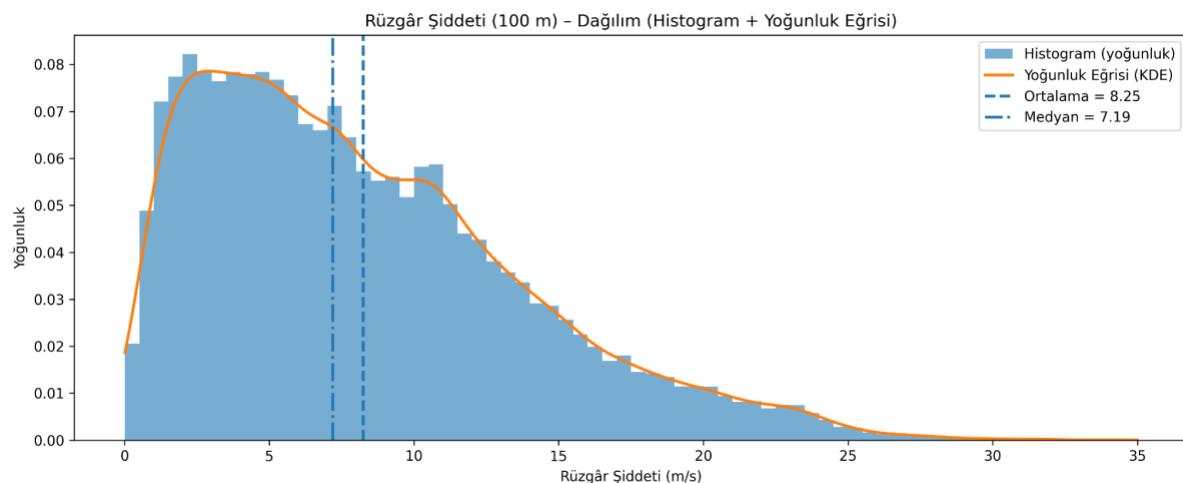
Bu yapı, eksik veri probleminin basit yöntemlerle çözülmesinin sınırlı olabileceğini ve ileri yöntemlerin değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır.

14.5 Tanımlayıcı İstatistikler

Hedef değişkenlere ait temel istatistikler, rüzgâr şiddetlerinin dağılımının yüksek değişkenlik gösterdiğini ortaya koymaktadır. 75 m ve 100 m seviyelerinde ortalama rüzgâr şiddetleri sırasıyla 8.23 m/s ve 8.25 m/s, medyan değerleri ise yaklaşık 7.2 m/s olarak hesaplanmıştır. Maksimum değerlerin 35 m/s seviyelerine ulaşması, zaman zaman güçlü rüzgâr olaylarının gerçekleştigiğini göstermektedir.



Şekil X-a. 75 m yüksekliğindeki rüzgar şiddeti dağılımı.



Şekil X-b. 100 m yüksekliğindeki rüzgar şiddeti dağılımı.

Şekil X-a ve Şekil X-b, 75 m ve 100 m yüksekliklerindeki rüzgâr şiddeti dağılımları histogram ve yoğunluk eğrileri ile gösterilmektedir. Ortalama değerlerin medyan değerlerden daha yüksek olması ve dağılımin sağ tarafında uzun bir kuyruk bulunması, rüzgâr şiddeti dağılımının sağa çarpık (pozitif çarpık) bir yapıya sahip olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Bu durum, nadir fakat yüksek şiddetli rüzgâr olaylarının dağılım üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

14.6 Eksik Veri Tamamlama Yöntemleri

Eksik rüzgâr şiddeti verilerinin tamamlanması amacıyla dört farklı yöntem uygulanmıştır:

1. Zamansal interpolasyon

Zamansal interpolasyon, eksik gözlemleri zaman serisi boyunca komşu zaman adımlarındaki mevcut değerler arasında süreklilik varsayımlı altında tahmin eden deterministik bir yöntemdir ve özellikle kısa süreli eksik veriler için yaygın olarak kullanılmaktadır (Little & Rubin, 2002).

$$x(t) = x(t_1) + (t - t_1) / (t_2 - t_1) \cdot [x(t_2) - x(t_1)]$$

Bu eşitlikte $x(t)$, eksik zaman adımındaki rüzgar şiddetini; $x(t_1)$ ve $x(t_2)$ ise eksik gözlemin öncesindeki ve sonrasında en yakın gözlemleri temsil etmektedir. Yöntem, rüzgar şiddetinin kısa zaman aralıklarında doğrusal bir değişim gösterdiği varsayımlına dayanmaktadır.

2. Doğrusal regresyon

Doğrusal regresyon, hedef değişken ile bağımsız değişkenler arasındaki doğrusal ilişkiyi istatistiksel olarak modelleyerek, en küçük kareler yaklaşımıyla parametre tahmini yapan temel bir regresyon yöntemidir (Montgomery et al., 2012).

$$y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \dots + \beta_p \cdot x_p + \epsilon$$

Burada y tahmin edilmek istenen rüzgar şiddetini, x_i bağımsız değişkenleri, β_i regresyon katsayılarını ve ϵ hata terimini ifade etmektedir. Model parametreleri, gözlenen ve tahmin edilen değerler arasındaki farkların karelerini minimize eden en küçük kareler yaklaşımı ile belirlenmektedir.

3. XGBoost regresyon modeli

XGBoost regresyon modeli, gradyan artırma prensibine dayalı olarak ardışık karar ağaçları eğiten, düzenlileştirme içeren ve karmaşık doğrusal olmayan ilişkileri modelleyebilen bir makine öğrenmesi algoritmasıdır (Chen & Guestrin, 2016).

$$L = \sum l(y_i, \hat{y}_i) + \sum \Omega(f_k)$$

$$\Omega(f) = \gamma \cdot T + (1/2) \cdot \lambda \cdot \sum w_j^2$$

Bu amaç fonksiyonunda $l(y_i, \hat{y}_i)$ tahmin hatasını temsil eden kayıp fonksiyonunu, $\Omega(f_k)$ ise model karmaşıklığını cezalandıran düzenlileştirme terimini ifade etmektedir. Düzenlileştirme yapısı sayesinde modelin aşırı öğrenme eğilimi azaltılarak genelleme başarısı artırılmaktadır.

XGBoost modeli, zayıf öğreniciler olarak kullanılan regresyon ağaçlarının ardışık biçimde eğitilmesine dayanmaktadır. Model mimarisinde her yeni ağaç, önceki ağaçların oluşturduğu tahmin hatalarını minimize edecek şekilde gradyan bilgisi kullanılarak oluşturulmaktadır. Ağaç yapısı, veri uzayını ikili bölmelere ayıran karar düğümleri ve bu düğümlere karşılık gelen yaprak değerlerinden oluşmakta olup, düzenlileştirme terimleri ağaç derinliği ve yaprak ağırlıkları üzerinde kontrol sağlayarak model karmaşıklığını sınırlıtmaktadır.

4. LightGBM regresyon modeli

LightGBM regresyon modeli, histogram tabanlı öğrenme yaklaşımı ve yaprak-odaklı ağaç büyütme stratejisi kullanarak gradyan artırmalı karar ağaçlarını daha verimli biçimde eğiten bir makine öğrenmesi yöntemidir (Ke et al., 2017).

$$L = \sum l(y_i, \hat{y}_i) + \Omega(f)$$

LightGBM, XGBoost ile benzer bir gradyan artırma çerçevesini temel almaktır birlikte, klasik seviye-odaklı büyümeye yerine yaprak-odaklı büyümeye stratejisi kullanmaktadır. Bu mimaride, her iterasyonda kayıp fonksiyonunu en fazla azaltan yaprak genişletilerek daha derin ve asimetrik ağaçlar oluşturulmaktadır. Ayrıca giriş değişkenlerinin histogramlara ayrılması sayesinde bellek kullanımını azaltılmakta ve eğitim süreci hızlandırılmaktadır. Bu mimari yapı, özellikle büyük veri setlerinde yüksek hesaplama verimliliği sağlamaktadır.

Makine öğrenmesi tabanlı modellerde, hedef değişken haricindeki tüm sayısal meteorolojik değişkenler ile birlikte zaman bilgisinden türetilen saat, dakika, ay ve yılın günü gibi öznitelikler kullanılmıştır. Eğitim-test ayırmı, zaman serisi yapısına uygun olacak şekilde gerçekleştirilmiş; ayrıca rastgele seçilen holdout noktaları ile modellerin genelleme performansı test edilmiştir. Bu bağlamda holdout, model eğitimi sırasında kullanılmayan ve yalnızca model performansının bağımsız olarak değerlendirilmesi amacıyla ayrılan veri alt kümelerini ifade etmektedir.

14.7 Model Performanslarının Holdout Noktalarındaki İstatistiksel Değerlendirilmesi

Yöntemlerin performansı, ortalama mutlak hata (MAE), kök ortalama kare hata (RMSE), belirlilik katsayı (R²), Pearson korelasyon katsayı (PCC) ve sapma (bias) ölçütleri üzerinden değerlendirilmiştir. Analiz sonuçları, her iki hedef değişken için de doğrusal

regresyon yönteminin hata metrikleri açısından en başarılı yaklaşım olduğunu ortaya koymaktadır.

Yöntem	MAE	RMSE	R2	PCC	BIAS
Zamansal interpolasyon	0.227733	0.444742	0.993711	0.996851	0.002014
Doğrusal regresyon	0.020674	0.029151	0.999972	0.999986	-0.000167
XGBoost regresyon modeli	0.031401	0.081289	0.999784	0.999892	-0.000154
LightGBM regresyon modeli	0.031042	0.083069	0.999775	0.999888	0.001338

Tablo X-a. 75 m yüksekliğinde rüzgâr şiddeti için eksik veri doldurma yöntemlerinin performans karşılaştırması.

Yöntem	MAE	RMSE	R2	PCC	BIAS
Zamansal interpolasyon	0.224142	0.419235	0.994322	0.997161	0.007458
Doğrusal regresyon	0.041195	0.056640	0.999896	0.999948	-0.000566
XGBoost regresyon modeli	0.067940	0.111244	0.999600	0.999802	0.000113
LightGBM regresyon modeli	0.057775	0.103873	0.999651	0.999826	0.000939

Tablo X-b. 100 m yüksekliğinde rüzgâr şiddeti için eksik veri doldurma yöntemlerinin performans karşılaştırması.

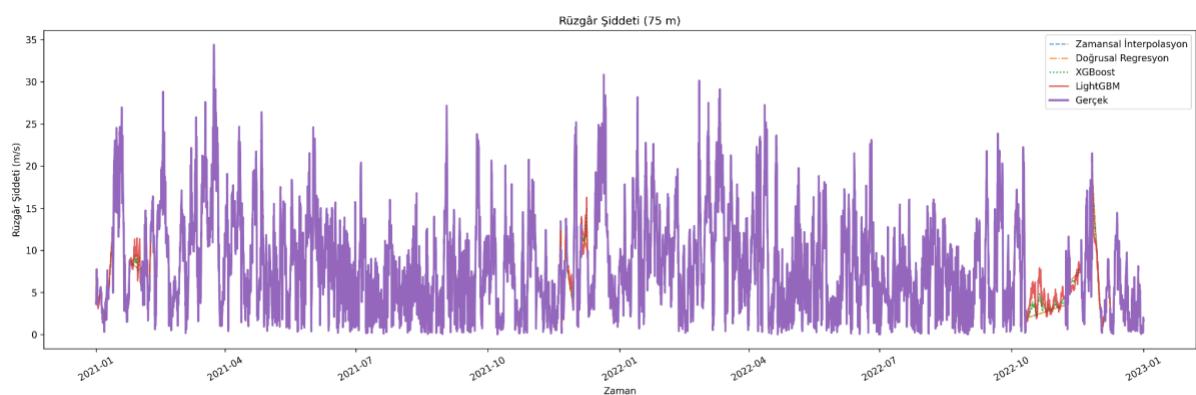
75 m rüzgâr şiddeti için doğrusal regresyon yöntemi, 6315 adet holdout gözlemi

üzerinden yapılan değerlendirmede ortalama mutlak hata (MAE) = 0.0207 m/s değerine ulaşmıştır. Benzer şekilde, 100 m rüzgâr şiddeti için 5976 adet holdout gözlemi kullanılarak gerçekleştirilen analizde MAE = 0.0412 m/s olarak hesaplanmıştır. Aynı zamanda belirlilik katsayısı (R^2) ve Pearson korelasyon katsayısı (PCC) değerleri her iki yükseklik için de 0.999'un üzerinde bulunmuş olup, modelin gerçek rüzgâr şiddeti verilerini son derece başarılı bir şekilde temsil ettiğini göstermektedir.

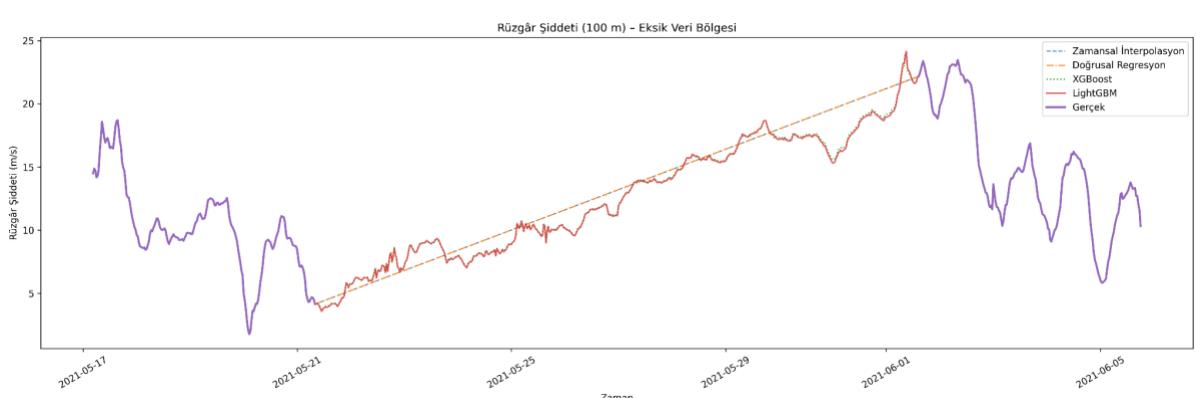
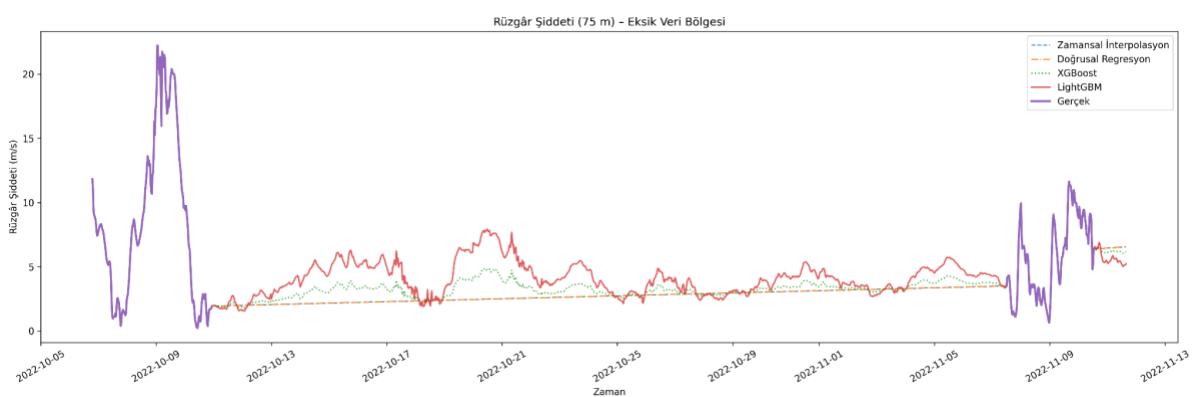
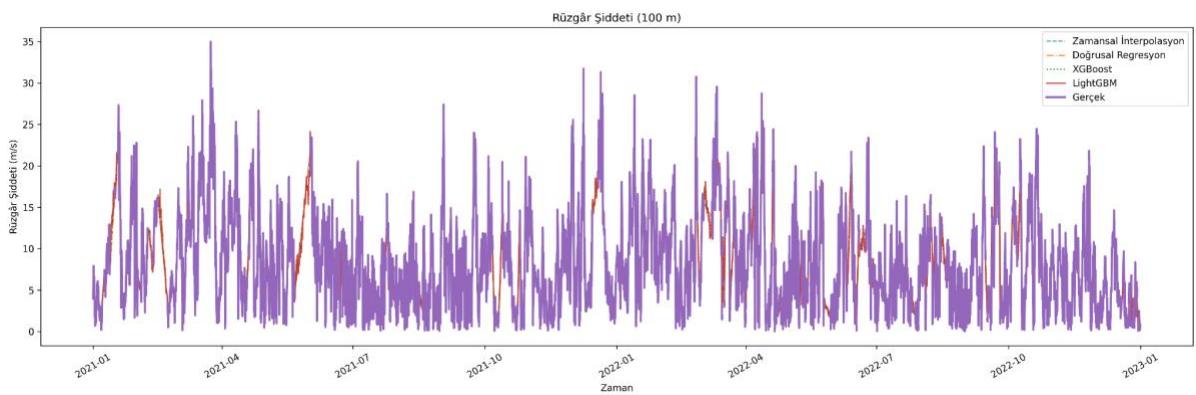
Zamansal interpolasyon yöntemi, özellikle uzun süreli eksik veri bloklarında belirgin biçimde daha yüksek hata üretmiştir. XGBoost ve LightGBM tabanlı regresyon modelleri ise interpolasyon yöntemine kıyasla daha başarılı sonuçlar vermekle birlikte, hata metrikleri açısından doğrusal regresyon yönteminin gerisinde kalmıştır.

14.8 Görsel Analiz ve Model Davranışlarının Holdout Noktaları Üzerindeki Karşılaştırılması

Tüm zaman serisini kapsayan grafiklerde, dört yöntemin genel eğilimleri karşılaştırılmıştır. Doğrusal regresyon ve LightGBM sonuçlarının birçok bölgede birbirine yakın seyrettiği görülmekle birlikte, eksik veri bölgelerine yakınlaştırılmış grafiklerde yöntemler arasındaki farklar daha net biçimde ortaya çıkmaktadır.



Şekil X. 75 m yüksekliğinde rüzgâr şiddeti için farklı eksik veri doldurma yöntemleri ile elde edilen zaman serilerinin karşılaştırılması.



Şekil X. 100 m yüksekliğinde rüzgâr şiddeti için eksik veri bölgesinde farklı doldurma yöntemlerinin karşılaştırılması.

Zamansal interpolasyon yöntemi, eksik veri blokları boyunca doğrusal bir geçiş üretmekte ve rüzgâr şiddetindeki doğal zamansal dalgalanmaları temsil edememektedir. XGBoost ve LightGBM modelleri kısa süreli değişimleri kısmen yakalayabilmekle birlikte, bazı zaman aralıklarında aşırı (overestimation) veya bastırılmış (underestimation) tahminler üretmektedir. Buna karşın doğrusal regresyon yöntemi, çevresel değişkenlerle fiziksel olarak daha tutarlı, düzgün ve istikrarlı bir tahmin profili sunmaktadır.

Elde edilen sonuçlar, daha karmaşık makine öğrenmesi tabanlı modellerin doğrusal regresyona kıyasla üstün bir performans sergilemediğini göstermektedir. Bunun temel nedeni, rüzgâr şiddetinin farklı yükseklikler arasında yüksek derecede doğrusal ve fiziksel olarak anlamlı bir ilişkiye sahip olması ve kullanılan girdi değişkenlerinin hedef değişkenlerle güçlü korelasyon göstermesidir. Ayrıca, uzun süreli eksik veri bloklarının ağaç tabanlı modellerin genelleme yeteneğini sınırladığı, buna karşılık doğrusal regresyonun zaman türevli özniteliklerle birlikte daha kararlı ve tutarlı sonuçlar ürettiği değerlendirilmektedir. Bu bulgular, meteorolojik zaman serilerinde her zaman daha karmaşık modellerin daha iyi performans sunmadığını ortaya koymaktadır.

14.9 Gerçek Eksik Veri Noktalarında Eksik Veri Tamamlama Performansının Değerlendirilmesi

Önceki bölümde, eksik veri tamamlama yöntemlerinin performansı, ölçülmüş ve eksiksiz veri seti üzerinde rastgele seçilen holdout noktaları kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım, modellerin mevcut veri dağılımı içerisindeki kısa ölçekli genelleme yeteneğini ortaya koymakla birlikte, eksik verilerin zaman içerisinde rastgele değil, çoğunlukla ardışık ve uzun süreli bloklar halinde meydana geldiği gerçek veri koşullarını tam olarak temsil etmemektedir. Bu nedenle çalışmanın bu bölümünde, eksik veri tamamlama yöntemlerinin başarımı, eksiltilmiş veri setinde gerçekten eksik olan zaman adımları esas alınarak yeniden analiz edilmiştir.

Bu kapsamda, eksiltilmiş veri setindeki rüzgâr şiddeti ölçümlerinde eksik olan zaman adımları maske olarak tanımlanmış; her bir yöntemle doldurulan tahminler, aynı zaman adımlarındaki gerçek ve eksiksiz referans veri ile birebir karşılaştırılmıştır. Böylece performans değerlendirmesi, önceki bölümde olduğu gibi “bilerek gizlenen” gözlemler üzerinden değil, gerçek eksik veri senaryolarında üretilen tahminlerin doğruluğu üzerinden gerçekleştirılmıştır. Bu yaklaşım, eksik veri tamamlama yöntemlerinin pratik uygulamalardaki davranışını daha

gerçekçi biçimde ortaya koymayı amaçlamaktadır.

Yöntem	MAE	RMSE	PCC
LightGBM regresyon modeli	3.28806 5	4.60819 1	0.58406 2
XGBoost regresyon modeli	3.94676 1	5.51530 7	0.36751 7
Zamansal interpolasyon	4.34828 1	6.11733 5	0.29884 6
Doğrusal regresyon	4.37392 8	6.14606 4	0.21186 5

Tablo X. 75 m için gerçek eksik veri noktaları üzerinde eksik veri tamamlama yöntemlerinin hata metrikleri.

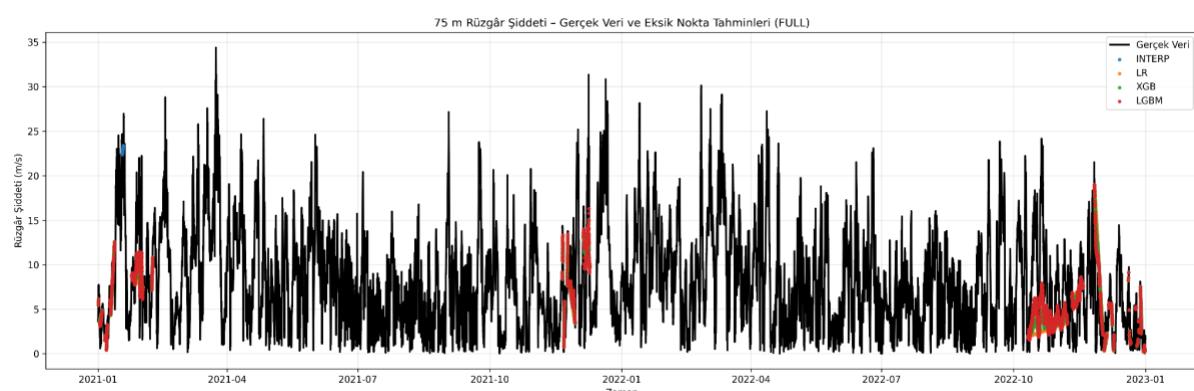
Yöntem	MAE	RMSE	PCC
LightGBM regresyon modeli	2.46447 6	3.48971 2	0.81946 9
XGBoost regresyon modeli	2.60445 1	3.69229 4	0.79658 6
Zamansal interpolasyon	2.90891 5	4.14114 4	0.74808 9
Doğrusal regresyon	2.92041 1	4.15391 2	0.73881 1

Tablo X. 100 m için gerçek eksik veri noktaları üzerinde eksik veri tamamlama yöntemlerinin hata metrikleri.

Gerçek eksik veri noktaları üzerinde hesaplanan hata metrikleri, 75 m ve 100 m yükseklik seviyeleri için ayrı ayrı olmak üzere Tablo X'te sunulmaktadır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, her iki yükseklik seviyesi için de ağaç tabanlı makine öğrenmesi modellerinin, özellikle hata büyülükleri açısından geleneksel yöntemlere kıyasla daha başarılı performans sergilediği görülmektedir. Bu bağlamda LightGBM regresyon modeli, hem 75 m hem de 100 m rüzgâr şiddeti için en düşük MAE ve RMSE değerlerini üretmiş ve en tutarlı tahminleri sağlamıştır. XGBoost modeli benzer bir eğilim sergilemekle birlikte, hata değerleri bakımından LightGBM modelinin gerisinde kalmıştır.

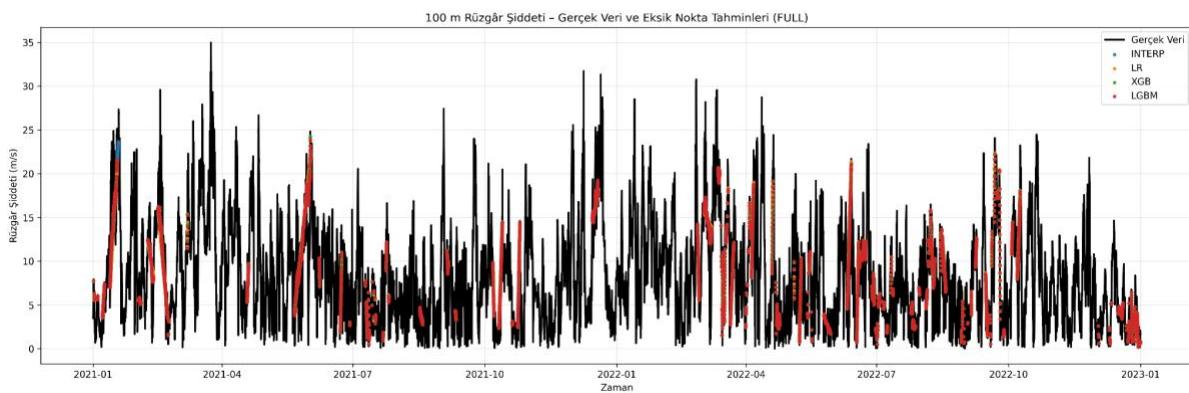
Zamansal interpolasyon ve doğrusal regresyon yöntemleri ise, özellikle uzun süreli ve ardışık eksik veri bloklarının bulunduğu zaman aralıklarında daha yüksek hata değerleri üretmiştir. Bu durum, söz konusu yöntemlerin zaman serisindeki karmaşık ve doğrusal olmayan değişkenliği temsile etmekte sınırlı kaldığını göstermektedir. Özellikle eksik veri süresi uzadıkça, bu yöntemlerde tahmin hatalarının belirgin biçimde arttığı gözlenmiştir.

75 m rüzgâr şiddeti için elde edilen sonuçlar, eksik veri tamamlama probleminin bu yükseklikte daha zorlayıcı olduğunu ortaya koymaktadır. Yüzeye daha yakın seviyelerde rüzgâr alanındaki zamansal değişkenliğin artması, tüm yöntemler için hata değerlerinin 100 m seviyesine kıyasla daha yüksek olmasına neden olmuştur. Buna karşın, LightGBM ve XGBoost modellerinin, bu zorlayıcı koşullar altında dahi diğer yöntemlere göre daha düşük hata değerleri üreterek göreli üstünlüklerini koruduğu görülmektedir.



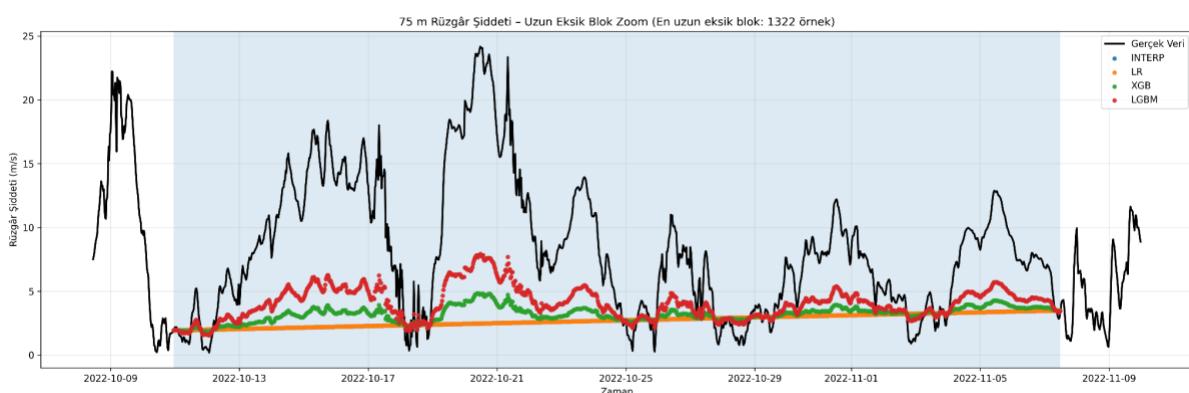
Şekil X. 75 m rüzgâr şiddeti için gerçek veri ve eksik nokta tahminlerinin zaman serisi karşılaştırması.

Bu şekilde, 75 m yükseklikte rüzgâr şiddeti ölçümleri için gerçek veri ile eksik veri noktalarında üretilen tahminler birlikte sunulmaktadır. Tahminler yalnızca eksik zaman adımlarında gösterilerek, yöntemlerin gerçek veri ile olan uyumu ve sapma karakteristikleri görsel olarak değerlendirilmiştir.



Şekil X. 100 m rüzgâr şiddeti için gerçek veri ve eksik nokta tahminlerinin zaman serisi karşılaştırması.

Bu şekilde, 100 m yükseklikte ölçülen rüzgâr şiddetinin gerçek zaman serisi ile eksik veri noktalarında farklı yöntemler kullanılarak üretilen tahminler birlikte gösterilmektedir. Siyah çizgi gerçek ölçümleri temsil ederken, renkli işaretler yalnızca eksik olan zaman adımlarında hesaplanan tahminleri göstermektedir. Grafik, yöntemlerin eksik veri noktalarındaki davranışını tüm zaman aralığı boyunca karşılaştırmalı olarak inceleme imkânı sunmaktadır.



Şekil X. 75 m rüzgâr şiddeti için en uzun eksik veri bloğu çevresinde gerçek veri ve tahminlerin karşılaştırılması.

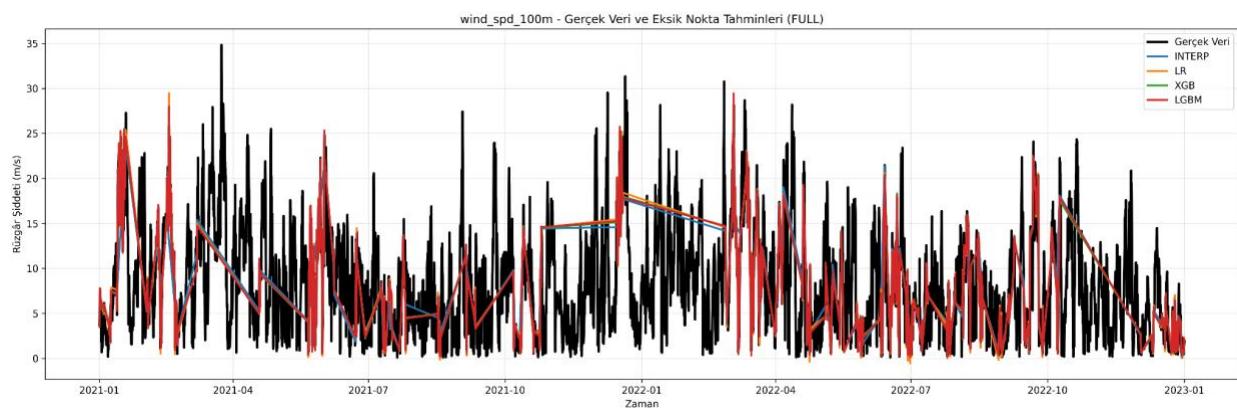
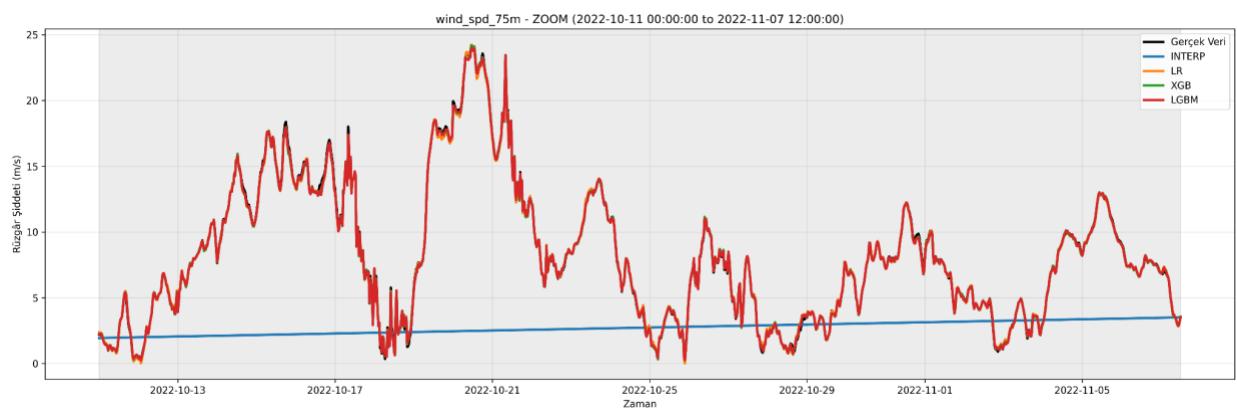
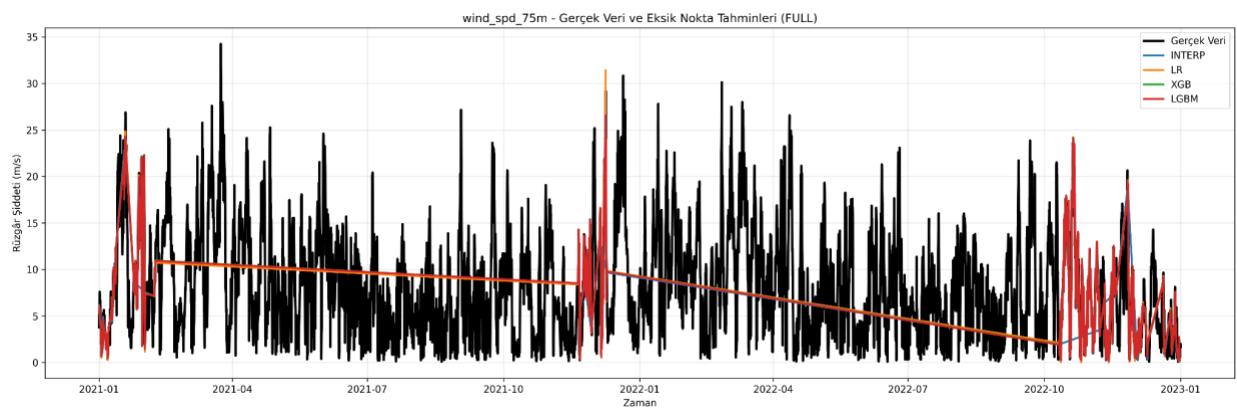
Bu şekilde, 75 m rüzgâr şiddeti zaman serisindeki en uzun eksik veri bloğu etrafında, gerçek ölçüler ile eksik noktalarda üretilen tahminler karşılaştırılmaktadır. Sonuçlar, yüzeye daha yakın seviyelerde rüzgâr değişkenliğinin artmasıyla birlikte, uzun süreli eksik veri bloklarında tahmin belirsizliğinin belirgin biçimde arttığını göstermektedir.



Şekil X. 100 m rüzgar şiddeti için en uzun eksik veri bloğu çevresinde gerçek veri ve tahminlerin karşılaştırılması.

Bu bulgular, önceki bölümde elde edilen holdout-temelli sonuçlarla karşılaştırıldığında önemli bir metodolojik farkı ortaya koymaktadır. Holdout yaklaşımı ile elde edilen gørece yüksek performans metrikleri, modellerin ölçülmüş veri aralığı içerisindeki lokal ve kısa süreli örüntüleri başarıyla öğrendiğini göstermektedir. Ancak gerçek eksik veri senaryolarında, özellikle uzun süreli ve ardışık eksik veri bloklarının varlığı durumunda, model performansının belirgin biçimde düşüğü görülmektedir. Bu durum, hem doğrusal yöntemlerin hem de makine öğrenmesi tabanlı modellerin, eksik veri süresi uzadıkça atmosferik değişkenliğin dinamik yapısını yeniden üretmekte zorlandığını ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, bu bölümde gerçekleştirilen analiz, eksik veri tamamlama yöntemlerinin performansının yalnızca rastgele holdout noktaları üzerinden değerlendirilmesinin yanıltıcı olabileceğini ve gerçek eksik veri noktalarının mutlaka ayrı bir doğrulama aşaması olarak ele alınması gerektiğini göstermektedir. Ağaç tabanlı makine öğrenmesi modelleri, özellikle 100 m rüzgar şiddeti için daha başarılı sonuçlar üretmiş olsa da, eksik veri tamamlama performansının hem yükseklik seviyesine hem de eksik veri yapısının süresel ve zamansal karakterine güçlü biçimde bağlı olduğu açıkça görülmektedir. Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar, uzun süreli ve ardışık eksik veri bloklarında yalnızca zaman serisi tabanlı istatistiksel ve makine öğrenmesi yöntemlerinin sınırlı bir performans sergileyebileceğini göstermektedir. Bu tür durumlarda, yeniden analiz verileri veya sayısal hava tahmin modelleri gibi fizik tabanlı ek bilgi kaynaklarının entegrasyonu, eksik veri tamamlama doğruluğunu artırabilecek potansiyel bir yaklaşım olarak değerlendirilebilir.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	target	model	scenario	start	end	n	MAE	RMSE	PCC
2	wind_spd_75m	INTERP	full_2years_missing_points	1.01.2021	31.12.2022 23:30	3464	4.348281110914648	6.117334921230378	0.298846044
3	wind_spd_75m	LR	full_2years_missing_points	1.01.2021	31.12.2022 23:30	3464	0.10361272069175391	0.14112614172568894	0.9996874865938785
4	wind_spd_75m	XGB	full_2years_missing_points	1.01.2021	31.12.2022 23:30	3464	0.10432728854552187	0.18290191915843942	0.9994698504639865
5	wind_spd_75m	LGBM	full_2years_missing_points	1.01.2021	31.12.2022 23:30	3464	0.10342634779149851	0.1843706643481648	0.9994639723899974
6									
7	wind_spd_75m	INTERP	fixed_zoom_window	11.10.2022	7.11.2022 12:00	1321	5.819784638679418	7.677583476668889	-0.243058943
8	wind_spd_75m	LR	fixed_zoom_window	11.10.2022	7.11.2022 12:00	1321	0.10790989933759354	0.1537799773540259	0.9996469754287508
9	wind_spd_75m	XGB	fixed_zoom_window	11.10.2022	7.11.2022 12:00	1321	0.10267669280580637	0.14099922692064523	0.9996733692510659
10	wind_spd_75m	LGBM	fixed_zoom_window	11.10.2022	7.11.2022 12:00	1321	0.097156856	0.1370910357235746	0.9996876705899717
11									
12	wind_spd_100m	INTERP	full_2years_missing_points	1.01.2021	31.12.2022 23:30	5158	2.9074420650557116	4.139949704441475	0.7482177385564697
13	wind_spd_100m	LR	full_2years_missing_points	1.01.2021	31.12.2022 23:30	5158	0.1972144168966522	0.26958741780393286	0.9990270769754483
14	wind_spd_100m	XGB	full_2years_missing_points	1.01.2021	31.12.2022 23:30	5158	0.17287423808348643	0.25555738229221375	0.999128891
15	wind_spd_100m	LGBM	full_2years_missing_points	1.01.2021	31.12.2022 23:30	5158	0.17209986262609991	0.25798498593231756	0.9991102971408717
16									
17	wind_spd_100m	INTERP	fixed_zoom_window	21.05.2021	1.06.2021 12:00	553	4.821595067581801	6.094759169558583	0.48182941111625793
18	wind_spd_100m	LR	fixed_zoom_window	21.05.2021	1.06.2021 12:00	553	0.21810086640918788	0.30892705884032945	0.9983464720912225
19	wind_spd_100m	XGB	fixed_zoom_window	21.05.2021	1.06.2021 12:00	553	0.1915757878132799	0.2743912827211238	0.9987338931829355
20	wind_spd_100m	LGBM	fixed_zoom_window	21.05.2021	1.06.2021 12:00	553	0.18060049266265615	0.26609696568995966	0.9988263678161239
21									

15. Rüzgâr Enerjisi Potansiyelinin Değerlendirilmesi

15.1 Tanımlayıcı İstatistikler

2021	2m (T)	10m (m/s)	50m (T)	50m (m/s)	75m (T)	75m (m/s)	100m (T)	100m (m/s)
Maks.	297,14	32,83	295,90	33,53	295,63	34,40	295,37	34,99
Min.	252,83	0,01	255,32	0,05	255,11	0,03	254,93	0,07
Ort.	276,46	8,73	277,02	8,34	276,85	8,54	276,68	8,69

Tablo.X 2021 yılı için maksimum ve minimum değerler

2022	2m (T)	10m (m/s)	50m (T)	50m (m/s)	75m (T)	75m (m/s)	100m (T)	100m (m/s)
Maks.	297,50	27,29	295,84	29,24	295,56	30,14	295,30	30,78
Min.	250,12	0,02	253,84	0,008	253,71	0,02	253,60	0,01
Ort.	275,85	8,07	276,44	7,68	276,26	7,86	276,10	8,00

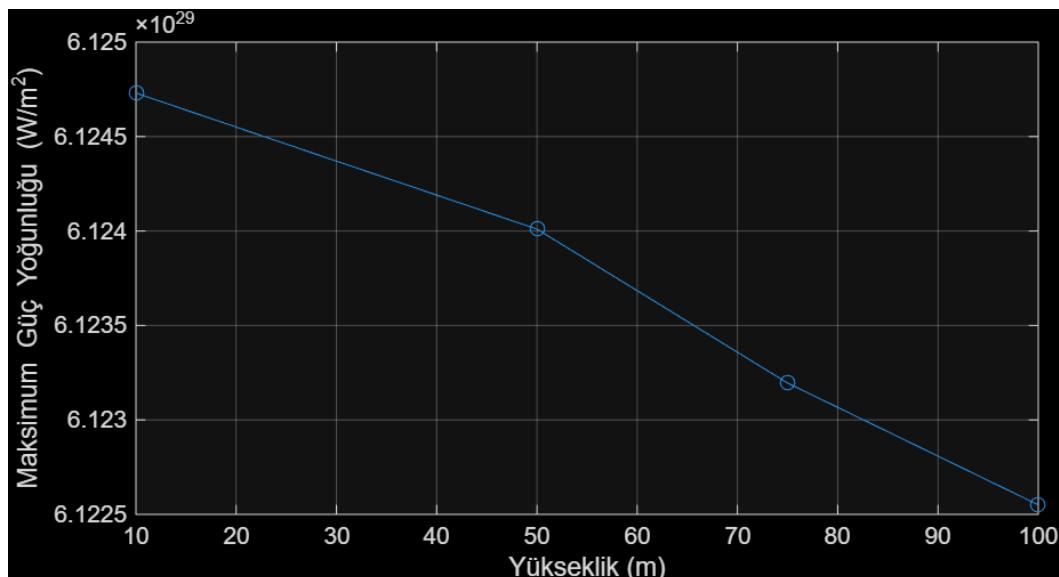
Tablo.X 2022 yılı için maksimum ve minimum değerler

2021-2022	2m (T)	10m (m/s)	50m (T)	50m (m/s)	75m (T)	75m (m/s)	100m (T)	100m (m/s)
Maks.	297,50	32,83	295,90	33,53	295,63	34,40	295,37	34,99
Min.	250,12	0,01	253,84	0,008	253,71	0,02	253,60	0,01
Ort.	276,16	8,40	276,73	8,01	276,55	8,20	276,39	8,35

Tablo.X Toplam veri için maksimum ve minimum değerler

Yükseklik	10m	50m	75m	100m
Maks. Güç Yoğunluğu	6.1247e+29	6.1240e+29	6.1232e+29	6.1226e+29

Tablo.X Yüksekliklere Göre Maksimum Güç Yoğunluğu



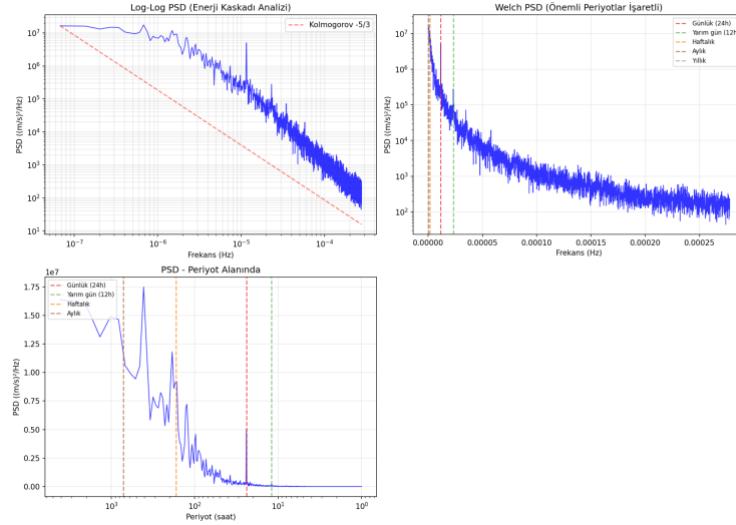
Şekil.X Yükseklikle Güç Yoğunluğu Değişimi

Her yükseklik için rüzgâr hızlarından hesaplanan güç yoğunluğu zaman serisi içerisinde maksimum değerler belirlenmiş ve yükseklikle değişimi incelenmiştir.

15.2 Çok Yükseklikli Rüzgar Ölçüm Verilerinin Zaman-Frekans Analizi ve İstatistiksel Değerlendirmesi

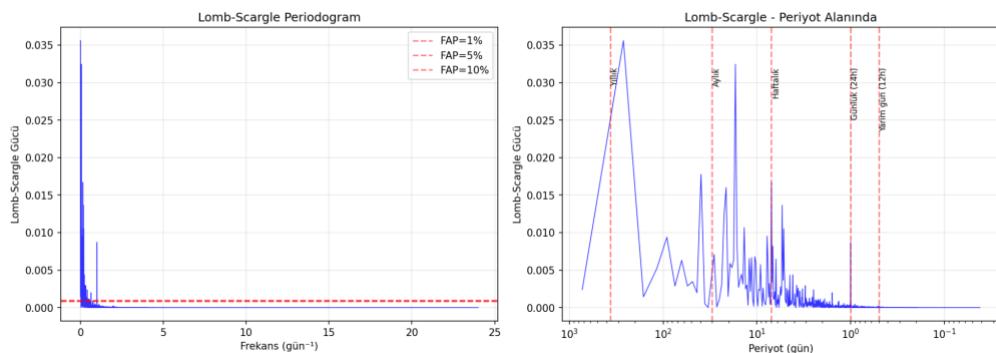
Rüzgar hızı verilerinin frekans alanı karakterizasyonu için çeşitli spektral analiz yöntemleri uygulanmıştır. Güç spektral yoğunluğu (PSD), %50 örtüşme oranı ve Hann pencere fonksiyonu kullanılarak Welch yöntemiyle hesaplanmıştır. Düzensiz örnekleme etkilerini minimize etmek amacıyla Lomb-Scargle periodogramı da uygulanmış ve yanlış alarm olasılığı (FAP) seviyeleri hesaplanmıştır. Zamanla değişen frekans içeriğini incelemek için kısa zamanlı Fourier dönüşümü (STFT) kullanılarak spektrogram elde edilmiştir. Zaman serisinin bağımlılık yapısı otokorelasyon fonksiyonu (ACF) aracılığıyla değerlendirilmiştir. Tüm analizler 50 m, 75 m ve 100 m yüksekliklerindeki ölçüm verileri için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir.

Güç Spektral Yoğunluğu Analizi



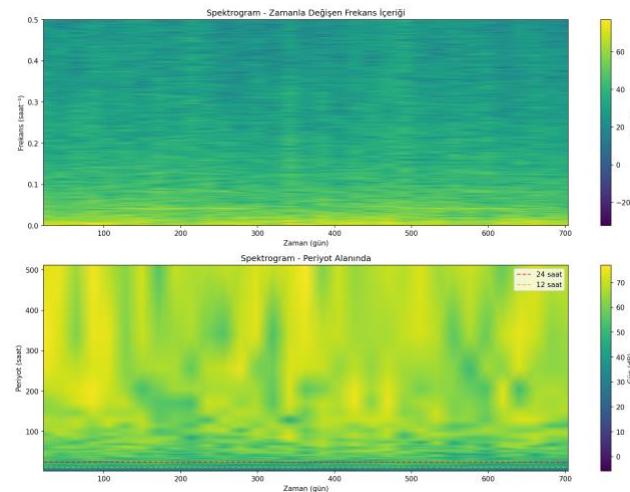
Şekil X. Gevaş (38.24°K , 42.84°D) sahasında 100 m yükseklikte ölçülen rüzgar hızı verilerinin Welch yöntemiyle hesaplanan güç spektral yoğunluğu (PSD). (a) Log-log ölçekte PSD grafiği; kesikli çizgi Kolmogorov $-5/3$ türbülans eğimini temsil etmektedir. (b) Yarı logaritmik ölçekte PSD; günlük (24 saat), yarım günlük (12 saat) ve mevsimsel periyotlar işaretlenmiştir. (c) Periyot alanında PSD gösterimi. (d) Tespit edilen baskın periyotlar ve karşılık gelen spektral güç değerleri.

Lomb-Scargle Periodogram



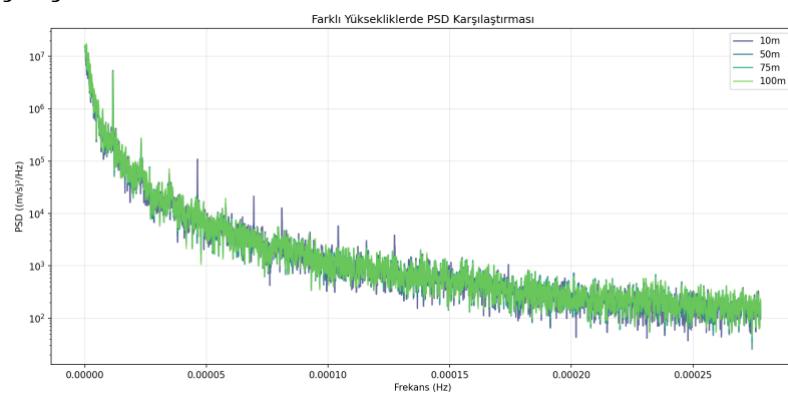
Şekil X. Rüzgar hızı zaman serisinin Lomb-Scargle periodogramı. (a) Frekans alanında (gün^{-1}) periodogram; yatay kesikli çizgiler sırasıyla $\%1$, $\%5$ ve $\%10$ yanlış alarm olasılığı (FAP) eşiklerini göstermektedir. (b) Periyot alanında (gün) periodogram; dikey çizgiler günlük ve mevsimsel döngüleri işaret etmektedir. FAP eşiklerinin üzerinde kalan pikler istatistiksel olarak anlamlı periyodik bileşenleri ifade etmektedir.

Spektrogram



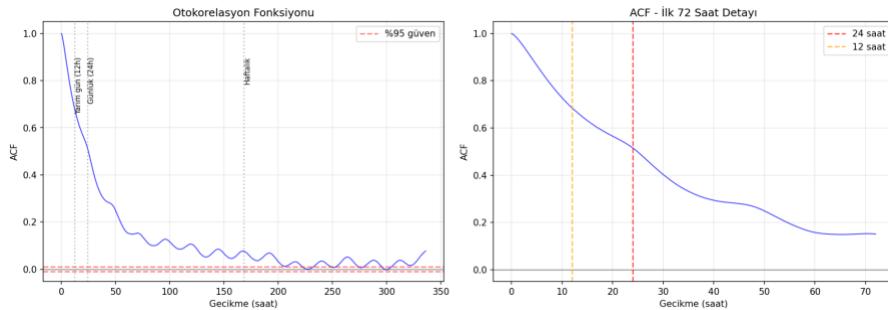
Şekil X. Rüzgar hızı zaman serisinin kısa zamanlı Fourier dönüşümü (STFT) ile elde edilen spektrogramı. (a) Frekans-zaman düzleminde güç dağılımı (dB cinsinden). (b) Periyot-zaman düzleminde güç dağılımı; 24 saatlik ve 12 saatlik periyodik bileşenlerin zamanla değişimi görülmektedir. Renk skalası spektral güç yoğunluğunu (dB) temsil etmektedir.

Yükseklik Karşılaştırması



Şekil X. Farklı ölçüm yüksekliklerinde (50 m, 75 m ve 100 m) hesaplanan güç spektral yoğunlıklarının karşılaştırması. Tüm yüksekliklerde benzer spektral karakteristik gözlemlenmekte olup, yükseklik artışıyla birlikte spektral enerji seviyesinde artış görülmektedir.

Otokorelasyon



Şekil X. Rüzgar hızı verilerinin otokorelasyon fonksiyonu (ACF). (a) 14 güne kadar olan gecikme değerleri için ACF; kesikli yatay çizgiler %95 güven aralığını göstermektedir. (b) İlk 72 saatlik detay görünümü; 24 ve 12 saatlik periyodik bileşenler açıkça görülmektedir. ACF'nin periyodik davranışları, rüzgar hızı verisindeki gün içi ve günlük döngülerin varlığını doğrulamaktadır.

15.3 Çok Yükseklikli Rüzgar Hızı Verilerinin Weibull Dağılım Analizi

Rüzgar hızı verilerinin olasılıksal karakterizasyonu, rüzgar enerjisi potansiyel değerlendirmelerinde temel bir adımı oluşturmaktadır. Bu çalışmada, 50 m, 75 m ve 100 m yüksekliklerinde ölçülen rüzgar hızı verilerinin istatistiksel dağılımı incelenmiştir.

Rüzgar hızı dağılımının modellenmesinde, rüzgar enerjisi literatüründe yaygın olarak kabul gören iki parametreli Weibull dağılımı kullanılmıştır. Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu (PDF) aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır:

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{(k-1)} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right]$$

Burada v rüzgar hızını (m/s), k boyutsuz şekil parametresini ve c ölçek parametresini (m/s) ifade etmektedir. Şekil parametresi rüzgar hızı dağılımının çarpıklığını ve sıvrilik derecesini belirlerken, ölçek parametresi dağılımın karakteristik hız değerini temsil etmektedir. Weibull dağılım parametreleri, maksimum olabilirlik kestirim (Maximum Likelihood Estimation - MLE) yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Bu yöntem, gözlenen veri setini üreten parametre değerlerinin olabilirliğini maksimize ederek en uygun parametre tahminlerini sağlamaktadır. Parametre kestirimini için SciPy kütüphanesinin `weibull_min.fit()` fonksiyonu kullanılmış olup, konum parametresi sıfıra sabitlenmiştir (`loc = 0`). Model uyumunun değerlendirilmesi, gözlenen verilerin empirik kümülatif dağılım fonksiyonu (CDF) ile teorik Weibull CDF'nin görsel karşılaştırması yoluyla gerçekleştirilmiştir. Empirik CDF, sıralanmış gözlem değerlerine karşılık gelen kümülatif olasılıkların hesaplanmasıyla elde edilmiştir:

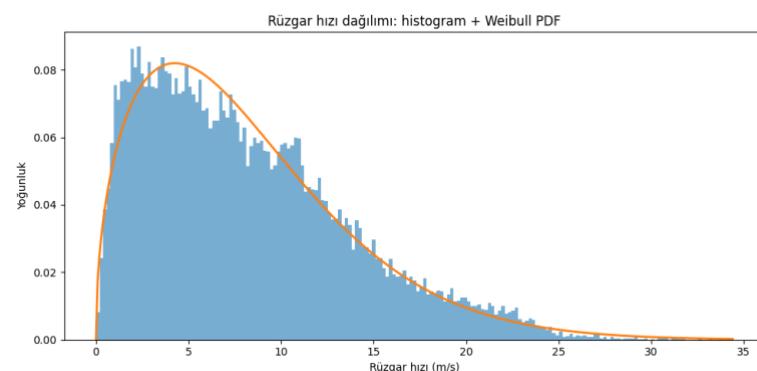
$$F_n(v_i) = \frac{i}{n}, i = 1, 2, \dots, n$$

Burada v_i artan sırada düzenlenmiş i 'inci gözlem değerini ve n toplam gözlem sayısını göstermektedir. Farklı yüksekliklerdeki rüzgar hızı dağılımlarının karşılaştırılmalı analizi için kutu-bıyık (box-whisker) grafikleri oluşturulmuştur. Bu gösterimde merkezi eğilim ölçüleri

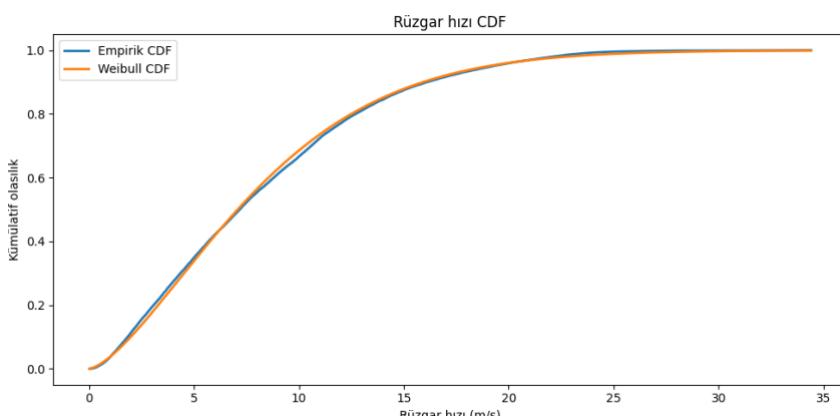
(medyan), yayılım ölçüleri (çeyrekler arası aralık) ve aykırı değerler eş zamanlı olarak görselleştirilmektedir. Veri kalitesini sağlamak amacıyla, fiziksel olarak anlamsız değerler (negatif hızlar) ve aşırı aykırı değerler ($v \geq 60$ m/s) veri setinden çıkarılmıştır.

Yükseklik	Ortalama	Std Sapma	Weibull k	Weibull c
50m	8.01 m/s	5.42 m/s	1.488	8.86 m/s
75m	8.20 m/s	5.57 m/s	1.483	9.07 m/s
100m	8.35 m/s	5.68 m/s	1.481	9.23 m/s

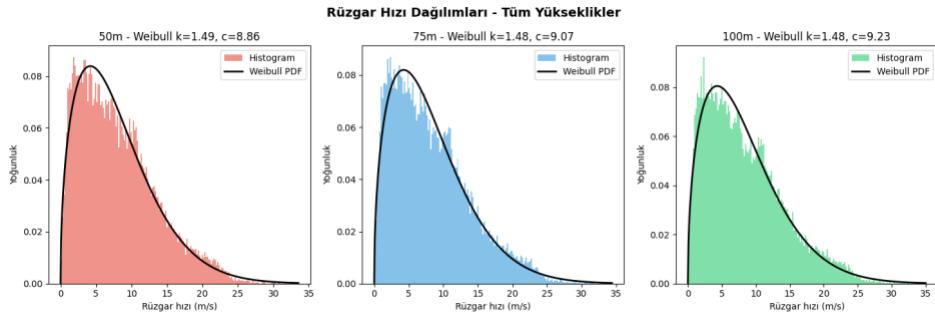
Tablo X.



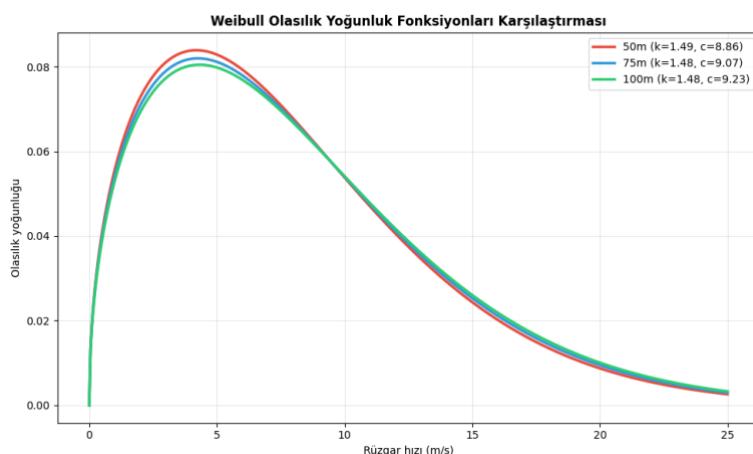
Şekil X. Rüzgar hızı frekans dağılımı ve Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu (PDF) uyumu. Histogram çubukları normalize edilmiş gözlem frekanslarını, turuncu eğri ise maksimum olabilirlik yöntemiyle uydurulmuş iki parametreli Weibull PDF'yi temsil etmektedir. Dağılım, rüzgar hızının 0–35 m/s aralığında yayıldığını ve en sık gözlenen değerlerin 2–6 m/s arasında yoğunlaştığını göstermektedir.



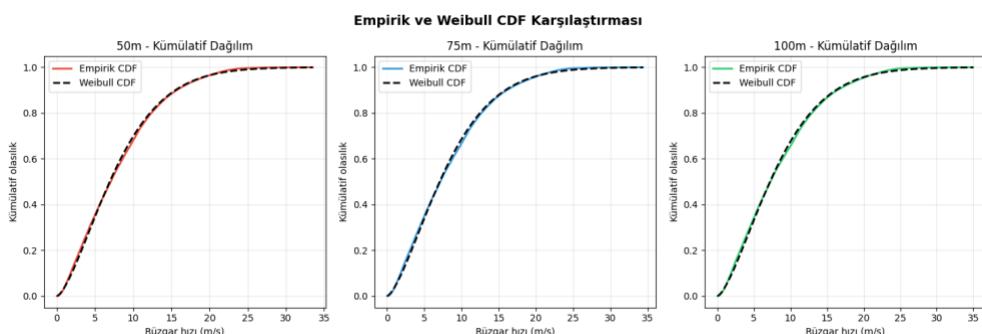
Şekil X. Rüzgar hızı verilerinin kümülatif dağılım fonksiyonu (CDF) karşılaştırması. Mavi eğri gözlenen verilerin empirik CDF'sini, turuncu eğri ise uydurulmuş Weibull CDF'yi temsil etmektedir. İki eğrinin yüksek örtüşme derecesi, Weibull dağılımının rüzgar hızı verilerine iyi uyum sağladığını göstermektedir.



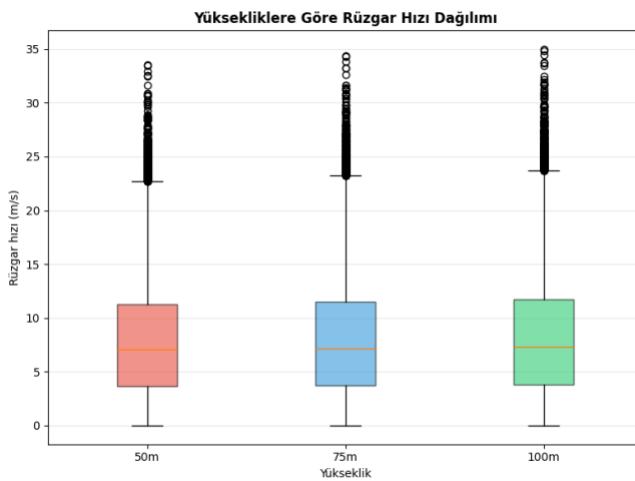
Şekil X. Farklı ölçüm yüksekliklerinde rüzgar hızı frekans dağılımları ve Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu (PDF) uyumu. Soldan sağa: 50 m (kırmızı), 75 m (mavi) ve 100 m (yeşil). Histogram çubukları normalize edilmiş gözlem frekanslarını, siyah eğriler ise maksimum olabilirlik yöntemiyle uydurulmuş Weibull PDF'yi temsil etmektedir. Her yükseklik için hesaplanan şekil parametresi (k) ve ölçek parametresi (c , m/s) değerleri panel başlıklarında verilmiştir. Şekil parametresinin tüm yüksekliklerde yaklaşık $k \approx 1.48\text{--}1.49$ olması, dağılımların benzer çarpıklık karakteristiğine sahip olduğunu; ölçek parametresinin yükseklikle artması ($c = 8.86 \rightarrow 9.07 \rightarrow 9.23$ m/s) ise beklenen rüzgar hızının yükseklikle arttığını göstermektedir.



Şekil X. Üç farklı ölçüm yüksekliğinde (50 m, 75 m, 100 m) uydurulmuş Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonlarının karşılaştırması. Yükseklik artışıyla birlikte ölçek parametresinin (c) artması, dağılım eğrilerinin sağa kaymasına ve maksimum olasılık yoğunluğunun daha yüksek hız değerlerine doğru ötelenmesine neden olmaktadır. Şekil parametresinin ($k \approx 1.48\text{--}1.49$) üç yükseklikte de yakın değerlerde kalması, rüzgar hızı değişkenliğinin yükseklikten büyük ölçüde bağımsız olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil X. Farklı ölçüm yüksekliklerinde empirik kümülatif dağılım fonksiyonları (CDF) ile uydurulmuş Weibull CDF'lerinin karşılaştırması. Soldan sağa: 50 m (kırmızı), 75 m (mavi) ve 100 m (yeşil). Renkli sürekli çizgiler gözlenen verilerin empirik CDF'sini, kesikli siyah çizgiler ise teorik Weibull CDF'sini göstermektedir. Tüm yüksekliklerde empirik ve teorik eğrilerin yüksek örtüşmesi, Weibull dağılımının bu saha için uygun bir model olduğunu doğrulamaktadır.



Şekil X. Farklı ölçüm yüksekliklerinde (50 m, 75 m, 100 m) rüzgar hızı dağılımlarının kutu grafiği (box plot) ile karşılaştırması. Kutular birinci çeyreklik (Q1) ile üçüncü çeyreklik (Q3) arasındaki değerleri, kutu içindeki yatay çizgi medyan değerini, büyükler $1.5 \times \text{IQR}$ (çeyrekler arası aralık) sınırları içindeki değerleri ve daire işaretleri aykırı değerleri temsil etmektedir. Medyan rüzgar hızı tüm yüksekliklerde yaklaşık 7 m/s civarında olup, yükseklik artışıyla birlikte hafif bir artış eğilimi göstermektedir. Aykırı değerlerin 22–35 m/s aralığında yoğunlaşması, sahadaki ekstrem rüzgar olaylarını yansımaktadır.

15.4 Rüzgar Enerjisi Potansiyeli ve Güç Yoğunluğu Analizi

Rüzgar enerjisi potansiyelinin nicel değerlendirmesi için rüzgar güç yoğunluğu (Wind Power Density - WPD) hesaplanmıştır. Birim süpürme alanı başına mevcut rüzgar gücü, aşağıdaki bağıntı ile ifade edilmektedir:

$$P = \frac{1}{2} \rho V^3$$

Burada P güç yoğunluğunu (W/m^2), ρ hava yoğunluğunu (kg/m^3) ve V anlık rüzgar hızını (m/s) temsil etmektedir. Hesaplamlarda standart atmosfer koşulları varsayılarak hava yoğunluğu $\rho = 1.225$ kg/m^3 olarak alınmıştır. Saha rakımı ve yerel meteorolojik koşulların (sıcaklık, basınç) hava yoğunluğu üzerindeki etkileri bu çalışmanın kapsamı dışında tutulmuştur. Ortalama güç yoğunluğu, ölçüm periyodu boyunca hesaplanan anlık güç yoğunluğu değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak elde edilmiştir:

$$\underline{P} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i \quad P_i = \frac{Q}{2N} \sum_{i=1}^N V_i^3$$

Yıllık enerji yoğunluğu (Annual Energy Density - AED), ortalama güç yoğunluğunun yıllık saat sayısı ile çarpılmasıyla hesaplanmıştır:

$$E_{\text{yıllık}} = P \times 8760 \text{ (Wh/m}^2/\text{yıl)}$$

Sonuçlar kWh/m²/yıl biriminde sunulmuştur.

Rüzgar enerjisi potansiyelinin zamansal değişkenliğini incelemek amacıyla güç yoğunluğu verileri farklı zaman ölçeklerinde analiz edilmiştir:

- a) Günlük Analiz: Yüksek frekanslı dalgalanmaları filtrelemek ve uzun dönemli eğilimleri ortaya koymak amacıyla anlık güç yoğunluğu değerleri günlük ortalamalar şeklinde yeniden örneklenmiştir.
- b) Aylık Analiz: Her ay için ortalama güç yoğunluğu hesaplanarak yıl içi değişim karakterize edilmiştir.
- c) Mevsimsel Analiz: Veriler kuzey yarımküre mevsim tanımlarına göre gruplandırılmıştır:

Kış: Aralık, Ocak, Şubat

İlkbahar: Mart, Nisan, Mayıs

Yaz: Haziran, Temmuz, Ağustos

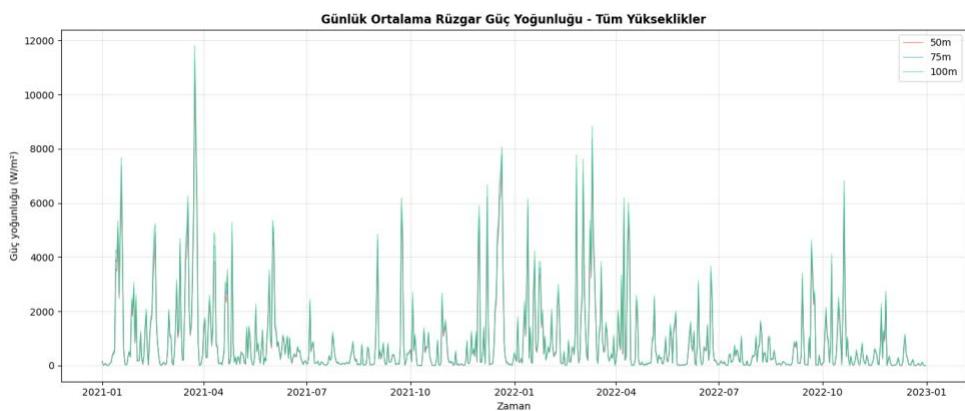
Sonbahar: Eylül, Ekim, Kasım

Her mevsim için ortalama güç yoğunluğu değerleri hesaplanarak mevsimsel enerji potansiyeli değişimi incelenmiştir. Bu analiz, rüzgar enerjisi santrallerinin kapasite faktörü tahminleri ve şebeke entegrasyonu planlaması açısından önem taşımaktadır.

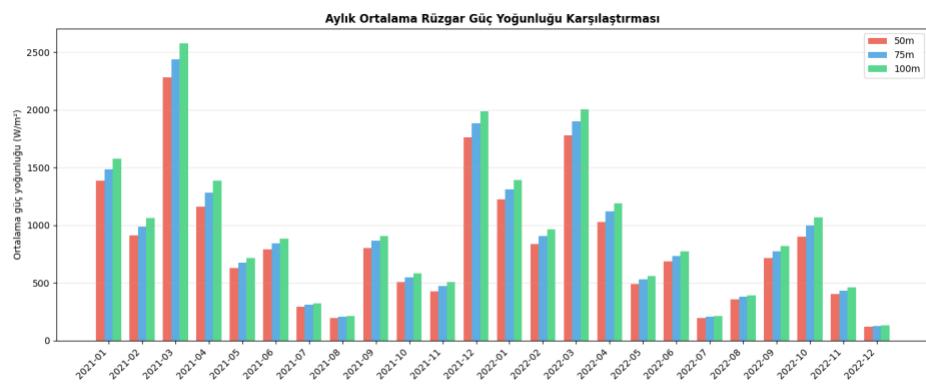
Güç yoğunluğu dağılımının karakterizasyonu için logaritmik ölçekli histogramlar kullanılmıştır. Rüzgar hızının küpüyle orantılı olan güç yoğunluğu, geniş bir değer aralığına yayılmakta ve belirgin bir pozitif çarpıklık sergilemektedir. Bu nedenle logaritmik ölçek, dağılımin tüm değer aralığının görselleştirilmesinde daha uygun bir temsil sağlamaktadır.

Yükseklik	Ort. Güç Yoğunluğu	Yıllık Enerji Yoğunluğu
50m	828.91 W/m ²	7,261 kWh/m ² /yıl
75m	892.91 W/m ²	7,822 kWh/m ² /yıl
100m	946.36 W/m ²	8,290 kWh/m ² /yıl

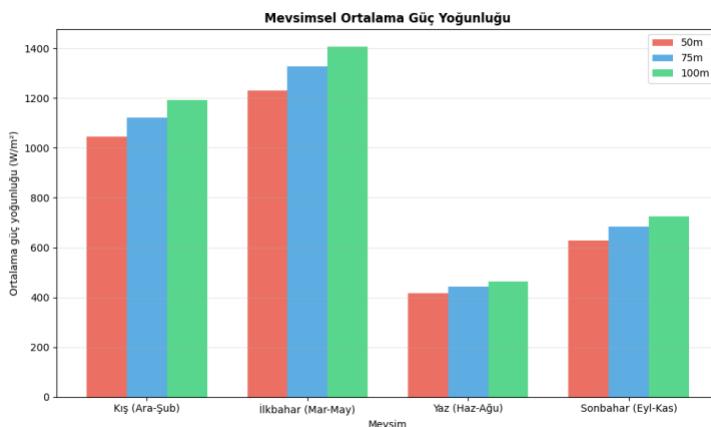
Tablo X.



Şekil X. Farklı ölçüm yüksekliklerinde (50 m, 75 m, 100 m) günlük ortalama rüzgar güç yoğunluğunun Ocak 2021 – Ocak 2023 dönemindeki zamansal değişimi. Güç yoğunluğu ($P = \frac{1}{2} QV^3$) bağıntısı ile hesaplanmıştır ($\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$). Grafikte belirgin mevsimsel dalgalanmalar gözlemlenmekte olup, kiş ve ilkbahar aylarında güç yoğunluğu değerlerinin $8000\text{--}12000 \text{ W/m}^2$ seviyelerine ulaştığı, yaz aylarında ise önemli ölçüde düşTÜÜ görÜlmektedir.



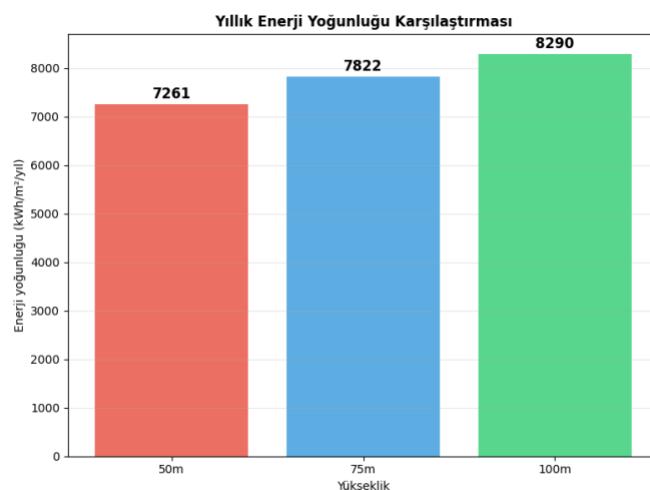
Şekil X. Farklı ölçüm yüksekliklerinde (50 m: kırmızı, 75 m: mavi, 100 m: yeşil) aylık ortalama rüzgar güç yoğunluğu değerlerinin karşılaştırması. En yüksek güç yoğunluğu değerleri Mart 2021 ($\approx 2500 \text{ W/m}^2$) ve Mart 2022 ($\approx 2000 \text{ W/m}^2$) aylarında gözlemlenirken, en düşük değerler Ağustos aylarında ($\approx 200 \text{ W/m}^2$) kaydedilmiştir. Tüm aylarda yükseklik artışıyla birlikte güç yoğunlığında tutarlı bir artış görülmektedir.



Şekil X. Mevsimsel ortalama rüzgar güç yoğunluğunun yüksekliğe göre değişimi. Mevsimler kuzey yarımküre tanımlarına göre gruplandırılmıştır: Kış (Aralık–Şubat), İlkbahar (Mart–Mayıs), Yaz (Haziran–Ağustos), Sonbahar (Eylül–Kasım). En yüksek güç yoğunluğu İlkbahar mevsiminde (100 m'de $\approx 1400 \text{ W/m}^2$), en düşük değerler ise yaz mevsiminde (100 m'de $\approx 470 \text{ W/m}^2$) elde edilmiştir. İlkbahar/yaz oranı yaklaşık 3:1 olup, bu durum sahanın belirgin mevsimsel değişkenlik sergilediğini göstermektedir.



Şekil X. Farklı ölçüm yüksekliklerinde rüzgar güç yoğunluğu frekans dağılımları. Soldan sağa: 50 m (ortalama: 828.9 W/m^2), 75 m (ortalama: 892.9 W/m^2) ve 100 m (ortalama: 946.4 W/m^2). Güç yoğunluğunun geniş değer aralığı ($1\text{--}10^4 \text{ W/m}^2$) nedeniyle yatay eksen logaritmik ölçekte gösterilmiştir. Dağılımların çan eğrisi benzeri simetrik yapısı, logaritmik ölçekte güç yoğunluğunun yaklaşık log-normal dağılım sergilediğini düşündürmektedir. Yükseklik artışıyla birlikte ortalama güç yoğunlığında %14 oranında artış (50 m'den 100 m'ye) gözlemlenmektedir.



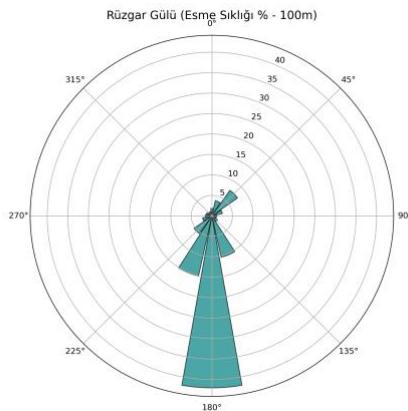
Şekil X. Farklı ölçüm yüksekliklerinde hesaplanan yıllık enerji yoğunluğu değerlerinin karşılaştırması. Yıllık enerji yoğunluğu, ortalama güç yoğunluğunun yıllık saat sayısı (8760 saat) ile çarpılmasıyla elde edilmiştir. Sonuçlara göre 50 m yükseklikte $7261 \text{ kWh/m}^2/\text{yıl}$, 75 m yükseklikte $7822 \text{ kWh/m}^2/\text{yıl}$ ve 100 m yükseklikte $8290 \text{ kWh/m}^2/\text{yıl}$ enerji yoğunluğu hesaplanmıştır. Bu değerler, 50 m'den 100 m'ye yükseklik artışının yıllık enerji potansiyelinde yaklaşık %14 artış sağladığını ortaya koymaktadır.

15.5 Rüzgar Güç Yoğunluğu ve Rüzgar Gülü

Rüzgar güç yoğunluğu (WPD), rüzgarın taşıdığı kinetik enerjinin birim kesit alanından geçen miktarını ifade eden ve sahanın enerji üretim potansiyelini belirlemeye sadece rüzgar hızından daha kapsayıcı bir göstergede olarak kabul edilen kritik bir parametredir. Çalışma sahası olan Van ili Gevaş ilçesinde, 100 metre yükseklik seviyesindeki bu potansiyeli belirlemek amacıyla yapılan teknik analizler sonucunda, ortalama rüzgar güç yoğunluğu değeri $708,78 \text{ W/m}^2$ olarak hesaplanmıştır. Hesaplama sürecinde, sahadan elde edilen basınç ve sıcaklık verileri kullanılarak her zaman dilimi için dinamik hava yoğunluğu değerleri saptanmış ve bu değerler rüzgar hızı verileriyle $(\frac{1}{2} * \rho * v^3)$ formülasyonu çerçevesinde ilişkilendirilmiştir. Elde edilen $708,78 \text{ W/m}^2$ lik bu sonuç, yüksek rüzgar potansiyeli barındırmaktadır. Bu yüksek enerji yoğunluğu, Gevaş bölgesinin rüzgar enerjisi santrali kurulumu ve teknik verimlilik açısından oldukça elverişli bir meteorolojik profile sahip olduğunu ve sürdürülebilir enerji üretimi için stratejik bir potansiyel taşıdığını bilimsel olarak ortaya koymaktadır.

Rüzgar hızı frekans dağılımı, bir sahadaki rüzgar rejiminin zaman içindeki istatistiksel sürekliliğini ve türbinlerin operasyonel hız aralıklarında ne kadar süre kalacağını belirleyen temel unsurdur. Gevaş bölgesi için 100 metre yükseklik seviyesinde hazırlanan hız histogramı incelendiğinde, verilerin geniş bir yelpazeye yayıldığı ve düşük hızlardan ziyade enerji üretimi için kritik olan orta ve yüksek hız gruplarında yoğunlaştığı görülmektedir. Bu dağılım, rüzgarın sadece anlık bir güç sunmadığını, yıl genelinde istikrarlı bir enerji arzı sağlama kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Histogram üzerinde gözlemlenen bu karakteristik yapı, türbin seçim sürecinde güç eğrisi uyumluluğunun optimize edilmesi ve yıllık enerji üretim (AEP) tahminlerinin yüksek doğrulukla yapılabilmesi için temel oluşturmaktadır.

Rüzgar gülü analizi, rüzgarın geliş yönlerini ve bu yönlerin esme sıklıklarını vektörel olarak özetleyen, türbin yerleşim planlaması ve saha optimizasyonu için hayatı önem taşıyan bir görselleştirme aracıdır. Gevaş lokasyonunda 100 metre yükseklikteki yönsel veriler üzerinden oluşturulan rüzgar gülü, bölgedeki rüzgar koridorlarının ve hakim rüzgar yönünün net bir şekilde belirli bir eksende toplandığını ortaya koymaktadır. Topografik yapının yönlendirdiği bu belirgin yönelim, rüzgar türbinlerinin konumlandırılmasında iz etkisi adı verilen kayıpların minimize edilmesi ve türbinlerin hakim rüzgar yönüne en yüksek verimle karşılaşması açısından stratejik öneme sahiptir. Bu yönsel frekans dağılımı, sahanın meteorolojik karakteristiğinin tasarım için yüksek düzeyde öngörülebilirlik sunduğunu doğrulamaktadır.



Şekil X: Van Gevaş 100 Metredeki Rüzgar Gülü

ÇED Raporu

29 Temmuz 2022 tarihli ve 31907 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanarak yürürlüğe giren Çevresel Etki Değerlendirmesi (ÇED) Yönetmeliği uyarınca, Ek-1 ve Ek-2 listelerinde tanımlanan projelerin ÇED süreci farklı usullere tabi kılınmıştır. Ek-1 listesi kapsamındaki projeler, doğrudan kapsamlı bir ÇED sürecine tabidir. Bu projeler için öncelikle, projenin temel özelliklerini, olası çevresel etkilerini ve alınacak önlemleri içeren bir ÇED Başvuru Dosyası hazırlanarak Bakanlığa sunulur. ÇED Başvuru Dosyası, Yönetmelik Ek-3’té belirtilen ÇED Genel Formatına uygun şekilde hazırlanır. Bakanlık, sunulan dosyayı biçim ve içerik yönünden inceler; uygun bulunması halinde İnceleme ve Değerlendirme Komisyonu (İDK) oluşturarak süreci devam ettirir. İDK, ilgili kurum ve kuruluşların temsilcilerinden oluşur ve projenin çevresel kapsamını belirlemek, ÇED Raporu için özel formatı hazırlamak ile sonrasında raporu inceleyip değerlendirmekle görevlidir (ÇED Yönetmeliği, 2022).

ÇED sürecinin erken aşamasında, Halkın Bilgilendirilmesi ve Sürece Katılımı Toplantısı düzenlenir. Bu toplantı, projeden etkilenmesi muhtemel yöre halkın proje hakkında bilgilendirmek ve onların görüşlerini almak amacıyla, Bakanlıkça belirlenen yer ve tarihte halka açık olarak gerçekleştirilir. Toplantıda proje tanıtılır; halkın soruları, görüş ve önerileri sözlü ve yazılı olarak toplanarak bir tutanakla kayıt altına alınır. Yeni Yönetmelikte, halkın katılımının etkinleştirilmesi için projeye ilişkili paydaşlarla iletişim süreçlerini planlayan Paydaş Katılım Planı (PKP) hazırlanması zorunlu kılınmıştır. Paydaş Katılım Planı, projenin tüm aşamalarında etkilenecek veya proje ile ilgisi olabilecek kişi ve kurumlarla hangi yöntem

ve araçlarla iletişim kurulacağını detaylandıran bir plandır. Bu plan, Bakanlıkça yeterlik almış kurum/kuruluş tarafından hazırlanıp ÇED Başvuru Dosyası ekinde sunulur ve halkın bilgilendirilmesi sürecinde uygulanır. Böylece, halktan ve paydaşlardan gelen görüşlerin ÇED sürecine sistematik biçimde dahil edilmesi amaçlanmaktadır.

Halkın katılımı toplantısı gerçekleştirildikten ve ilgili kurumlardan gelecek görüşler alındıktan sonra, proje için ÇED Raporu Özel Formatı belirlenir. Bakanlık, İDK üyelerinin katkıları ve halktan gelen görüşleri dikkate alarak proje özelinde hazırlanacak ÇED Raporunun ana başlık ve içeriklerini tanımlayan bu “özel formatı” hazırlar ve proje sahibine iletir. Proje sahibi, özel formata uygun şekilde ÇED Raporunu hazırlar ve Bakanlığa sunar. Sunulan ÇED Raporu, İDK tarafından teknik ve bilimsel yönden detaylı incelemeye tabi tutulur; eksik veya yetersiz görülen kısımlar varsa raporun düzeltilmesi istenir. Nihai hale getirilen ÇED Raporu ve ekleri, proje sahibinin taahhüdü altında hazırlandığına dair bir yazı ile birlikte teslim edilir ve 10 takvim günü süreyle halkın görüş ve incelemesine açılır. Bakanlık, bu süre sonunda gelen halk görüşlerini ve İDK değerlendirmelerini de dikkate alarak proje hakkında nihai kararını verir. Bu karar, “ÇED Olumlu” veya “ÇED Olumsuz” şeklinde ilan edilir (ÇED Yönetmeliği, 2022).

“ÇED Olumlu” kararı, projenin çevreye olası olumsuz etkilerinin alınacak tedbirler sayesinde ilgili mevzuat ve bilimsel esaslara göre kabul edilebilir düzeyde olduğunun tespit edildiğini ve bu haliyle projenin gerçekleştirilmesinde çevre açısından sakınca görülmediğini ifade eder. Proje ancak bu şartlarla yürütülebilir. “ÇED Olumsuz” kararı ise projenin çevresel etkilerinin ciddi boyutta olduğunu veya önerilen önlemlerle dahi kabul edilebilir düzeye indirilemediğini gösterir; bu durumda projenin mevcut haliyle uygulanmasına izin verilmez. Verilen ÇED Olumlu kararı süresiz değildir: 5 yıl içinde yatırıma başlanmayan projelerde bu karar hükümsüz sayılır. Böyle bir durumda projenin gerçekleştirilmesi için yeniden değerlendirme gereklidir.

Ek-2 listesinde yer alan projeler, “çevresel etkileri ön incelemeye tabi” olup bunlar için daha basitleştirilmiş bir süreç öngörlülmüşür. Ek-2 kapsamındaki bir proje için ÇED Raporu hazırlanmaksızın, projenin teknik özelliklerini ve potansiyel çevresel etkilerini içeren bir Proje Tanıtım Dosyası (PTD) hazırlanarak Bakanlığa sunulur. PTD de belli bir formata tabidir: Yönetmelik Ek-4’te belirtilen PTD Genel Formatına uygun olarak hazırlanmalıdır. Bakanlık, sunulan PTD’yi aldıktan sonra 5 iş günü içinde format yönünden inceler; dosya Ek-4 formatına

uygun hazırlanmadıysa tamamlanmak üzere iade eder. PTD format açısından uygun bulunursa, Bakanlık proje hakkında teknik değerlendirmesini yapmaya başlar. Bu aşamada, Ek-2 projeleri için halkın katılımı toplantısı yapılmaz; ancak Bakanlık gerekli görürse ilgili kurumlardan yazılı görüş isteyebilir veya belirli kurumlarla sınırlı bir toplantı düzenleyebilir. Kurumlardan görüş istenmesi halinde 30 gün içinde yanıt gelmeyen kurumların görüşü “olumlu” kabul edilir. Bu süreç sonunda PTD, içeriği bilgi ve önlemler yönyle yeterli bulunursa karar aşamasına geçilir.

PTD değerlendirmesi tamamlandığında, proje için ya “ÇED Gereklidir” ya da “ÇED Gerekli Değildir” kararı verilir. “ÇED Gerekli Değildir” kararı, öngörülen önlemler uygulandığı takdirde projenin çevresel etkilerinin kabul edilebilir düzeyde olduğunu ve dolayısıyla tam bir ÇED çalışması yapılmasına gerek kalmadığını belirtir. Bu karar, projeye şartlı bir çevresel onay niteliğindedir; proje, PTD’de taahhüt edilen çevresel tedbirlerin aynen uygulanması koşuluyla gerçekleştirilebilir. “ÇED Gereklidir” kararı ise projenin potansiyel etkilerinin daha kapsamlı incelenmesi gerektiğini gösterir ve projeyi ÇED sürecine tabi kılar. Bu durumda proje sahibi, ÇED Başvuru Dosyası hazırlayıp tam ÇED süreci için Bakanlığa başvurmakla yükümlüdür. Kısaca, Ek-2 süreci bir eleme işlevi görür: Eğer projenin etkileri düşük bulunursa “ÇED gerekli değildir” ile süreç sonlanır; aksi halde proje Ek-1 prosedürüne dahil edilir. ÇED süreci sonunda verilen karar ne olursa olsun, proje sahibinin çevresel yükümlülükleri devam eder. ÇED Yönetmeliği, izleme ve denetim başlığı altında, “ÇED Olumlu” veya “ÇED Gerekli Değildir” kararı çıkan projelerin, karara esas raporlarında/PTD’lerinde taahhüt ettikleri şartlara uygun yürütülp yürütülmediğinin Bakanlıkça takip edileceğini hükmе bağlamıştır. Bakanlık, proje inşaat ve işletme dönemlerinde gerekli çevresel önlemlerin uygulanmasını izler, kontrol eder ve denetler. Özellikle “ÇED Olumlu” kararlı projelerde, projenin ilerleyişi hakkında Bakanlığa düzenli bilgi verilmesi zorunlu tutulmuştur. Proje sahibi, İDK tarafından belirlenen aralıklarla, o projeye ÇED raporu hazırlama sürecinde dahil olmamış bağımsız bir yeterlik sahibi kuruluşa Proje İlerleme Raporları hazırlatmak ve bunları çevrimiçi ÇED sistemine yükleyerek Bakanlığa sunmakla yükümlüdür. Bu raporlar, projenin inşaatının kaydedilen gelişmelerini ve ÇED’de belirtilen şartlara uyumu ortaya koyar. Bakanlık, ilerleme raporlarını inceleyerek çevresel taahhütlerin yerine getirilip getirilmediğini doğrular; ciddi aykırılıklarda projeyi durdurmaya varan yaptırımlar uygulanabilir.

yenilikler getirmiştir. Özellikle, iklim değişikliği ile mücadele, kümülatif etki analizi ve sürdürülebilir çevre yönetimi konularında önceki yönetmelikte yer almayan yeni bölümler eklenmiştir. ÇED Genel Formatına “Bölüm IV: Kümülatif Çevresel Etki Değerlendirmesi” ve “Bölüm V: Çevresel ve Sosyal Eylem Planı” başlıklarını eklenmiştir; ayrıca “Halkın Bilgilendirilmesi ve Sürece Katılımı ile Paydaş Katılım Planı” başlığı altında yeni bir bölüm açılmıştır. Benzer şekilde, PTD Genel Formatına da kümülatif etki değerlendirme (Bölüm IV) ve çevresel-sosyal eylem planı (Bölüm V) bölümleri eklenmiştir. Kümülatif etki değerlendirme, planlanan projenin diğer mevcut veya gelecekteki faaliyetlerle birleştiğinde yol açacağı toplam çevresel etkilerin analizini kapsar; artık Ek-1 kapsamındaki projeler gibi Ek-2 projelerinin de bu analizi yapması istenmektedir. Yırica, İklim değişikliğine etkiler ve uyum konusu ÇED kapsamına alınmış; ÇED raporlarında projenin sera gazı emisyonları ve iklim değişikliğinin proje üzerindeki riskleri ayrı alt başlıklar halinde değerlendirilmesi zorunlu hale getirilmiştir.

Yeni eklenen “Çevresel ve Sosyal Eylem Planı” (Bölüm V), projenin çevresel ve sosyal boyutlarını bütüncül şekilde ele alan bir çerçeve sunmaktadır. Bu bölüm altında, proje kaynaklı çevresel-sosyal risklerin tespiti, alınacak önlemlerin planlanması ve uygulanacak yönetim planları bir arada sunulur. Çevresel ve Sosyal Eylem Planı, iki alt plandan oluşur: Çevre İzleme Planı (V-1) ve Sürdürülebilirlik Planı (V-2). Çevre İzleme Planı, projenin inşaat ve işletme aşamalarında çevreye etkilerinin nasıl izleneceğini detaylandırır; izlenecek parametreler, izleme yöntem ve sıklıkları, sorumlu kurumlar gibi unsurlar bu planda belirtilir. Sürdürülebilirlik Planı ise projenin sürdürülebilir kalkınma ilkeleri doğrultusunda yürütülmesini sağlamak üzere hazırlanacak alt planları içerir. Özellikle, Sıfır Atık Planı, Trafik Yönetim Planı, Sera Gazı Azaltım Planı ile Çevresel ve Sosyal Yönetim Planı gibi alt planların tümü Sürdürülebilirlik Planı başlığı altında geliştirilerek ÇED Raporuna dahil edilir. Bu alt planlar, projenin arazi hazırlığı, inşaat ve işletme dönemleri boyunca uygulanacak çevresel yönetim önlemlerini ve iyi uygulamaları tanımlar; projenin değişen koşullarına göre gerekiğinde güncellenmelidir.

PROJENİN TEKNİK OLMAYAN ÖZETİ

Bölüm 1: PROJENİN ÖZELLİKLERİ

XXX tarafından Van ili Gevaş ilçesi sınırları içinde, Gevaş ilçe merkezine yaklaşık 29.403 km mesafede, 1/25.000 ölçekli XXX paftaları üzerinde yer alan XXX mevkilerinde XXX adet türbinden oluşan, toplam XXX MWe / XXX MWm kurulu güce sahip Gevaş Rüzgar Enerji Santrali (RES) kurulması ve işletilmesi planlanmaktadır.

Proje sahasının yaklaşık coğrafi koordinatları 38,27 derece kuzey enlemi ve 43,10 derece doğu boylamıdır. Proje alanı, Van Gölü'nün güney kıyısında, Gevaş yerleşim merkezinin güneybatısında yer alan dağlık ve engebeli topografya üzerinde konumlanır. Türbinlerin yerleştirileceği sahalarda ortalama rakımı 2000-2400 metredir.

Kurulması planlanan santral kapsamında her biri XXX MW kurulu güce sahip XXX adet büyük tip türbin ve her biri XXX MW kurulu güce sahip XXX adet küçük tip türbin kurulacaktır. Toplam mekanik kurulu güç XXX MWm, elektriksel kurulu güç XXX MWe olacaktır. Türbin tipleri, rüzgar ölçüm sonuçları, türbin üreticisinin teknik dökümanları ve TEİAŞ bağlantı görüşü doğrultusunda seçilecektir. Türbin model adları, rotor çapları, kanat uzunlukları ve göbek yükseklikleri, türbin yerleşim planını içeren ek tabloda ayrıntılı verilecektir.

Projede, her türbin için üç kanatlı yatay eksenli rüzgar türbinleri öngörmektedir. Türbinlerin rotor göbek yüksekliklerinin ortalama XXX metre, rotor çapının XXX metre olması, böylece her türbin için süpürülen alan çapının XXX metreye ulaşması planlanmaktadır. Türbinler arası mesafe hâkim rüzgar yönü doğrultusunda en az XXX rotor çapı, hâkim rüzgar yönüne dik doğrultuda en az XXX rotor çapı olacak şekilde belirlenerek uyumlu çalışma ve gölgeleme etkilerinin sınırlanılması hedeflenir.

Santral sahasında planlanan XXX adet türbin, 34,5 kV nominal gerilim seviyesinde işletilecek yeraltı enerji iletim kabloları ile şalt sahasında yer alan ana trafolara bağlanacaktır. Üretilen enerji, sahaya en yakın uygun TEİAŞ trafo merkezi veya enerji iletim hattına XXX kV gerilim seviyesinde tesis edilecek XXX km uzunlığında bir enerji iletim hattı üzerinden girdi çıktı bağlantı şeklinde verilecektir. Bağlantı noktası kodu ve teknik özellikler TEİAŞ bağlantı anlaşması ve görüş yazısına göre belirlenecek ve ekte sunulacaktır.

Santralin proje ömrü yaklaşık 49 yıl olarak planlanmaktadır. Bu süre boyunca türbinler ve yardımcı tesisler üretici tavsiyeleri ve ulusal mevzuat çerçevesinde periyodik bakım ve kontrole tabi tutulacaktır. Proje süresi sonunda türbinlerin sökülmesi, alanın rehabilitasyonu ve atıkların yönetimi için ayrı bir kapatma ve iyileştirme planı hazırlanacaktır.

Projeye yönelik Çevresel Etki Değerlendirmesi süreci, 29.07.2022 tarihli ve 31907 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanan Çevresel Etki Değerlendirmesi Yönetmeliği hükümleri doğrultusunda yürütülecektir. Kurulu gücü ve proje bileşenlerine bağlı olarak proje, ilgili ek listede rüzgar enerji santralleri için öngörülen eşik değerler çerçevesinde değerlendirilir.

2. PROJE SAHASI VE KONUM ÖZELLİKLERİ

Proje alanı, Van ili Gevaş ilçesi idari sınırları içinde yer alır. İlçe merkezi adresi Gevaş, Van, Türkiye şeklindedir. Türbin noktaları, şalt sahası ve iletim hattı güzergahı bu idari sınırlar içinde kalacak şekilde belirlenmiştir.

Saha, Van Gölü güney kıyısına bakan yamaçlar ile bu yamaçların arkasında yer alan yüksek plato ve sırtlardan oluşan topografik yapı üzerinde yer alır. Alan genelinde eğim değerleri orta ve yüksek eğimli sınıfa girer. Türbin yerleri, hem rüzgar potansiyeli hem de inşaat ve ulaşım açısından uygun eğim ve zemin koşulları dikkate alınarak seçilecektir.

Proje alanına en yakın yerleşim birimleri, Gevaş ilçe merkezi ve çevresindeki köylerdir. Türbin konumları, yerleşim alanları ile yürürlükteki mevzuatta yer alan minimum mesafeleri sağlayacak şekilde belirlenir. Türbin - yerleşim mesafeleri türbin tipine, gürültü emisyon değerlerine ve topografik yapıya bağlı olarak hesaplanacak ve gürültü modellemesi sonuçlarıyla desteklenecektir.

Proje sahasına ulaşım, mevcut il ve ilçe yolları üzerinden sağlanacaktır. Türbin sahalarına erişim için bir kısmı mevcut orman ve köy yollarının iyileştirilmesi, bir kısmı da yeni servis yollarının açılması öngörlür. Yeni yol güzergahları, eğim, erozyon riski, toprak yapısı ve ormanadastro durumu dikkate alınarak belirlenecektir. Her yeni yol izi için yaklaşık

platform genişliği XXX metre, üst yapı kalınlığı XXX santimetre seçilecek, kesit ve profil çizimleri eklerde sunulacaktır.

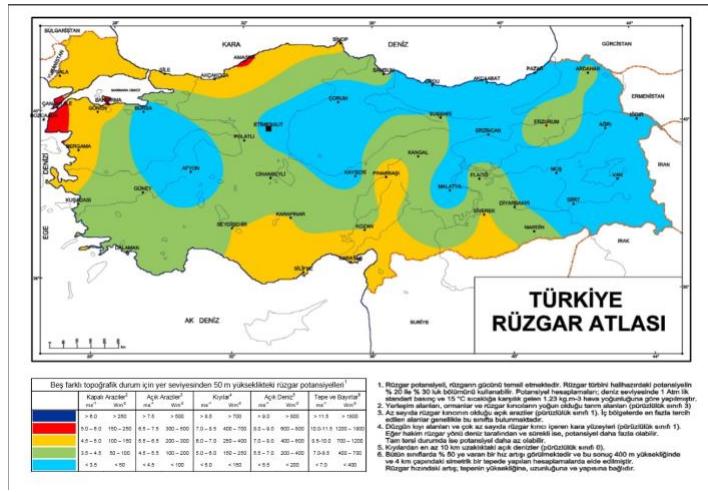
3. PROJENİN AMACI VE GEREKÇESİ

Türkiye'de enerji talebi, ekonomik büyümeye, nüfus artışı ve sanayileşme düzeyi ile birlikte uzun süredir artış eğilimindedir. Elektrik talebinin güvenilir, kaliteli ve çevreye duyarlı bir şekilde karşılanması için yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı üretim tesislerinin gelişmesi stratejik önem taşır.

Ulusal enerji politikası temel hedefleri arasında enerji arz güvenliği, dışa bağımlılığın azaltılması, yerli kaynakların azami değerlendirilmesi ve uzun vadede sera gazı emisyonlarının sınırlanması yer alır. Kalkınma planları, Ulusal Enerji Verimliliği Stratejisi ve iklim değişikliği ile ilgili üst düzey politika belgeleri bu hedefleri destekler niteliktedir.

Rüzgar enerjisi, fosil yakıtlara dayalı üretime alternatif bir kaynak olarak, yakıt maliyeti bulunmayan, sera gazı emisyonu yaratmayan ve ithal kaynak bağımlılığını azaltan bir üretim seçenekleri sunar. Proje, Van ili ve çevresinde rüzgar enerjisi potansiyelinin değerlendirilmesine, bölgesel enerji arz güvenliğine, yenilenebilir enerji hedeflerine ve yerel istihdama katkı sağlamayı amaçlar.

Ayrıca, proje sahasının topografik özellikleri, rüzgar rejimi ve mevcut iletim altyapısına olan mesafesi dikkate alındığında, bu alanın rüzgar enerjisi yatırımı için uygun özellikler taşıdığı değerlendirilir. Detaylı rüzgar ölçüm raporları ve enerji üretim simülasyonları gibi bu değerlendirmeyi teknik açıdan destekleyecek temel belgeler eklerde eklenmiştir.



Şekil XX. Türkiye Rüzgar Atlası

3. PROJENİN AMACI VE GEREKÇESİ

Türkiye'de Rüzgar Enerjisi

Yenilenebilir enerji kaynakları içinde rüzgar enerjisi, son yıllarda kurulu güç artışı açısından öne çıkan kaynaklardan biridir. Rüzgar türbin teknolojisindeki gelişmeler ve yatırım maliyetlerindeki düşüş, rüzgar enerjisini hem teknik hem ekonomik açıdan rekabetçi hale getirmiştir.

Rüzgar enerjisinin başlıca üstünlükleri şu başlıklarda özetlenebilir:

- Yakıt gerektirmeyen bir üretim yapısı söz konusu olduğundan ithal yakıta bağımlılığı azaltır.
- İşletme sırasında doğrudan sera gazı emisyonu meydana gelmez.
- Kurulu güç artışı modüler şekilde gerçekleşir, bu durum şebeke planlaması açısından esneklik sağlar.
- Türbinler arası alan tarım, mera veya orman dışı faaliyetler için kullanılmaya devam edebilir.
- Kırsal alanlarda yeni istihdam ve gelir fırsatları yaratır.

Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA) ve Meteoroloji Genel Müdürlüğü rüzgar atlasları, Ege ve Marmara bölgeleri yanında doğu ve güneydoğu Anadolu'da da belirli yükseltilerde uygun hızlara ulaşıldığını göstermektedir. Van ili ve çevresindeki sırt ve plato alanları, rüzgar enerjisi açısından değerlendirilmesi gereken bölgeler arasında yer alır. Proje için seçilen sahada yapılacak uzun süreli rüzgar ölçümleri, model sonuçlarını doğrulayacak ve enerji üretim tahminlerine temel oluşturacaktır.

YIL	PUANT GÜC TALEBİ (MW)*	ARTIŞ (%)	ENERJİ TALEBİ (GWh)	ARTIŞ (%)	MİN.YÜK (MW)	MİN.YÜK / PUANT YÜK ORANI (%)
2014	41.003	7,1	257.220	4,4	14.927	36
2015	43.289	5,6	265.724	3,3	16.269	38
2016	44.734	3,3	279.286	5,1	17.448	39
2017	48.807	9,1	296.702	6,2	18.336	38
2018	49.304	1,0	304.167	2,5	18.212	37
2019	49.281	-0,05	303.320	-0,3	18.300	37
2020	49.852	1,2	306.109	0,9	15.690	31
2021	56.304	12,9	332.871	8,7	20.611	37
2022	52.286	-7,1	331.105	-0,5	19.451	37
2023	55.150	5,5	335.168	1,2	19.337	35

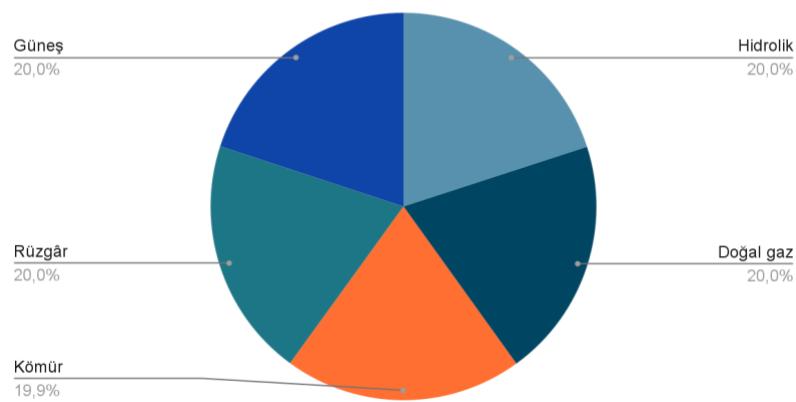
Tablo XX. 2014 - 2023 Yılları Ulusal Paunt ve Enerji Tüketimi

Türkiye Elektrik Enerjisi Üretiminin Kaynaklara Göre Dağılımı

Türkiye elektrik üretiminde doğal gaz ve kömür gibi fosil yakıtlara dayalı termik santraller uzun süre yüksek paya sahip olmuştur. Yenilenebilir kaynaklara dayalı üretimin payı, yeni yatırımlar sayesinde artış gösterse de talep artışı göz önüne alındığında ilave yatırımlara ihtiyaç devam eder.

Bu çerçevede, TEİAŞ Faaliyet Raporları ve ilgili istatistik yayınları kullanılarak son üç yıla ait elektrik üretiminin birincil enerji kaynaklarına göre dağılımı aşağıdaki grafik formatında sunulacaktır.

Türkiye Elektrik Enerjisi Üretiminin Birincil Enerji Kaynaklarına Göre Dağılımı



Ayrıca TEİAŞ talep projeksiyon dokümanları kullanılarak önmüzdeki yıllara ilişkin toplam elektrik talebi tahmini tablo xx'de gösterildiği gibidir.

YILLAR	DÜŞÜK SENARYO	ARTIŞ (%)	BAZ SENARYO	ARTIŞ (%)	YÜKSEK SENARYO	ARTIŞ (%)
2025	218.093		231.212		244.744	
2026	221.731	1,7	236.764	2,4	252.613	3,2
2027	225.438	1,7	242.315	2,3	260.323	3,1
2028	229.142	1,6	247.885	2,3	268.068	3,0
2029	232.784	1,6	253.396	2,2	275.782	2,9
2030	236.334	1,5	258.857	2,2	283.505	2,8
2031	239.852	1,5	264.312	2,1	291.262	2,7
2032	243.329	1,4	269.750	2,1	299.046	2,7
2033	246.584	1,3	274.983	1,9	306.661	2,5
2034	249.902	1,3	280.307	1,9	314.413	2,5

Tablo XX. Dağıtım Sistemine Bağlı Tüketicilerin Tüketim Tahminleri(GWh)

Bu tablolar, proje gerekçesi bölümünde öne çıkan “talep artışı” ve “kapasite gereksinimi” argümanlarını sayısal veriler ile desteklemek amacıyla kullanılacaktır.

Kalkınma Planı ve Enerji Politikaları

Türkiye’de enerji sektörüne ilişkin temel yönelik, On Birinci Kalkınma Planı (2019–2023) ile çerçevelenmiştir. Plan, Cumhurbaşkanlığı Hükümet Sisteminin ilk kalkınma planı olup, “daha fazla değer üreten, daha adil paylaşan, daha güçlü ve müreffeh Türkiye” vizyonu doğrultusunda; istikrarlı ve güçlü ekonomi, rekabetçi üretim ve verimlilik, yaşıanabilir şehirler

ve sürdürülebilir çevre gibi eksenler üzerinden enerji sektörünü stratejik bir kaldırıç olarak tanımlamaktadır.

Planın Enerji(XXX) başlığı altında, enerji arzının kesintisiz, güvenli, sürdürülebilir, çevresel etkileri gözeten ve ekonomik koşullarda sağlanması temel amaç olarak belirlenmiştir. Bu amaç doğrultusunda, rekabete dayalı, mali açıdan güçlü, şeffaf, öngörlülebilir ve tüketiciyi koruyan bir enerji piyasasının sürekliliği öngörülmekte; orta ve uzun vadeli arz–talep planlamalarının yapılması, elektrik ve doğal gaz piyasalarında maliyet bazlı fiyatlandırma ilkelerinin esas alınması ve talep tarafı katılımını mümkün kılacak piyasa altyapısının geliştirilmesi hedeflenmektedir.

On Birinci Kalkınma Planı'na göre, Türkiye'nin elektrik talebinin 2018 yılında 303,3 TWh düzeyinden 2023'te 375,8 TWh seviyesine yükselmesi beklenmektedir. Elektrik kurulu gücünün ise aynı dönemde 88.551 MW'tan 109.474 MW'a çıkarılması, elektrik üretiminde doğal gazın payının yüzde 29,85'ten yüzde 20,7'ye düşürülmesi, yenilenebilir kaynakların payının yüzde 32,5'ten yüzde 38,8'e yükseltilmesi ve yerli kaynaklara dayalı üretimin 150 TWh düzeyinden 219,5 TWh seviyesine çıkarılması öngörlülmektedir.

Rüzgar Türbinleri

Toplam XXX adet türbin kurulacaktır. Her türbin için türbin gövdesi, kule, rotor ve kanatlar, nacelle bölümü, güç elektroniği ve yardımcı sistemler yer alır. Türbin temelleri, jeoteknik etütler doğrultusunda seçilecek temel tipine göre projelendirilecektir. Temel çapı yaklaşık XXX metre, kazı derinliği XXX metre aralığında olacaktır.

Türbin yerleşimi, rüzgar rejimi, topografya, mevcut yollar ve yerleşim alanlarına uzaklık kriterleri dikkate alınarak hazırlanmış olan türbin yerleşim planına göre yapılacaktır. Plan, koordinatları ile birlikte Proje Tanıtım Dosyası eklerinde sunulacaktır.

Şalt Sahası ve Enerji İletim Hattı

Şalt sahası, proje alanı içinde ulaşımı kolay, zemin koşulları uygun ve TEİAŞ bağlantı noktasına optimum uzaklıkta bir bölgede konumlandırılacaktır. Şalt sahası alanı yaklaşık XXX metrekare olarak öngörlülmektedir. Şalt sahasında ana güç trafoları, bara sistemleri, ayırıcılar,

kesiciler, ölçü trafoları, koruma ve kontrol panoları ile yardımcı tesisler bulunur.

Enerji iletim hattı, şalt sahasından TEİAŞ'ın uygun gördüğü trafo merkezine veya iletim hattına bağlanacaktır. Hattın gerilim seviyesi XXX kV, yaklaşık uzunluğu XXX km olacaktır. Hat direk tipleri, açıklıklar ve temel detayları, TEİAŞ teknik şartnameleri ve ilgili standartlar doğrultusunda tasarılanacaktır. Güzergah seçiminde orman alanları, tarım alanları, yerleşimler, kültürel ve doğal sit alanları, korunan alanlar ve jeolojik riskler dikkate alınacaktır.

İç Yollar ve Ulaşım

Yeni açılacak yolların toplam uzunluğu yaklaşık XXX km, iyileştirilecek mevcut yolların toplam uzunluğu yaklaşık XXX km olarak öngörmektedir. Yol genişliği ortalama XXX metre, platform yapısı kırmataş dolgu ve uygun üst kaplama tabakasından oluşacaktır. Türbinlere ulaşım sırasında kanat ve kule bölümlerinin taşınması için platform genişlikleri, kurp yarıçapları ve eğimler ilgili lojistik hesaplara göre belirlenir.

İdari Bina ve Yardımcı Tesisler

Santral sahası içinde bir kontrol merkezi ve idari bina planlanmaktadır. Bu yapı içinde kontrol ve izleme odası, SCADA sistemi, bakım atölyesi, yedek parça deposu, çalışan sosyal alanları ve teknik odalar yer alır. Toplam kapalı alan yaklaşık XXX metrekare olacaktır. Ayrıca, şantiye döneminde geçici konteyner yapılar, stok sahaları ve montaj alanları oluşturulacak, işletme döneminde bu alanlardan gerekli olanlar kalıcı hale getirilecektir.

PROJENİN YAŞAM DÖNGÜSÜ, İŞLETME SÜRESİ VE KAPASİTE KULLANIMI

Proje yaşam döngüsü üç ana safhada ele alınır:

1. İnşaat ve montaj dönemi: Yaklaşık XXX ay sürmesi öngörülen bu dönemde yollar, türbin temelleri, şalt sahası, kablo hatları ve türbin montajı tamamlanacaktır.
2. İşletme dönemi: Yaklaşık XXX yıl sürecek işletme döneminde santral tam kapasite ile devrede olacaktır. Yıllık teknik duruş ve bakım süreleri dikkate alınarak kapasite kullanım faktörü XXX yüzde civarında planlanmaktadır. Enerji üretim tahmini, rüzgar

ölçüm verileri ve türbin güç eğrileri kullanılarak hazırlanacaktır.

3. Söküm ve rehabilitasyon dönemi: İşletme süresi sonunda türbinlerin ve yardımcı tesislerin sökülmesi, temellerin uygun seviyeye kadar kaldırılması, toprak dolgusunun tamamlanması ve arazi rehabilitasyonu yapılacaktır. Bu dönem için ayrıntılı bir kapanış planı hazırlanacaktır.

Yıllık ortalama enerji üretiminin XXX MWh civarında olması hedeflenmektedir. Bu değer, Türkiye ortalama hane halkı elektrik tüketimine göre yaklaşık XXX hane halkın yıllık elektrik gereksinimine eşdeğer bir üretim düzeyi oluşturur. Net sera gazı azaltım etkisi, Türkiye elektrik üretim karışımındaki emisyon faktörleri kullanılarak hesaplanacak ve ÇED raporuna eklenecektir.

1.1 Projenin ve Yerin Alternatifleri (Proje Teknolojisinin ve Proje Alanının Seçilme Nedenleri)

Van İli, Gevaş İlçesi sınırları içerisinde planlanan Rüzgar Enerji Santrali (RES) projesi için yapılan yer seçim çalışmasında; meteorolojik verimlilik, çevresel kısıtlar, jeolojik uygunluk ve mülkiyet durumu gibi parametreler bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmiştir. Yapılan ön fizibilite çalışmaları neticesinde, proje sahası olarak Artos Dağı'nın kuzey yamaçları ile Balaban Mevkii doğusuna uzanan sırt hattı (2000-2600 metre rakım aralığı) belirlenmiştir. Bu seçimin temel gerekçeleri aşağıda detaylandırılmıştır.

Öncelikle, enerji üretim potansiyeli açısından bölge incelendiğinde; Gevaş ilçe merkezi ve göl kıyısındaki düşük rakımlı alanların aksine, seçilen dağ sırtı bölgesinin rüzgar sürekliliği ve şiddet dağılımı açısından çok daha verimli olduğu tespit edilmiştir. Hakim rüzgar yönü olan kuzey-kuzeydoğu sektörlü rüzgarlar, Van Gölü havzası ile Artos Dağı kütlesi arasındaki orografik sıkışma etkisiyle hızlanmaktadır, bu da bölgedeki kapasite faktörünü artırmaktadır.

Arazi kullanımı ve mülkiyet yapısı açısından proje sahası, tarımsal üretim potansiyeli düşük olan marginal tarım arazisi veya mera vasfindaki kamu arazilerinden oluşmaktadır. Vadi tabanında yer alan verimli tarım arazilerinin ve sulak alanların korunması ilkesi gereği, proje sahası bu alanların dışına taşınmıştır. Bu tercih, hem gıda güvenliği açısından tarım arazilerinin korunmasını sağlamakta hem de kamulaştırma maliyetlerini minimize ederek projenin ekonomik uygulanabilirliğini güçlendirmektedir.

Jeolojik ve jeoteknik açıdan saha değerlendirildiğinde; Van Gölü havzasının genel tektonik yapısı göz önüne alınarak, sivilashma riski taşıyan alüvyal zeminlerden kaçınılmıştır. Seçilen dağlık bölge, rüzgar türbinlerinin statik ve dinamik yüklerini güvenle taşıyabilecek sağlam anakaya formasyonlarına sahiptir. Bu durum, temel mühendisliği ve deprem güvenliği açısından projenin riskini düşürmektedir.

Son olarak, çevresel ve sosyal etki yönetimi kapsamında; proje sahası yerleşim yerlerinden (Gevaş merkezi ve çevre köyler) gürültü ve shadow flicker sınır değerlerini aşmayacak güvenli mesafelerde konumlandırılmıştır. Ayrıca, bölgenin turistik ve tarihi önemi ile ekolojik hassasiyeti (kuş göç yolları) dikkate alınarak, türbin yerleşimleri görsel ve ekolojik baskıyı en aza indirecek micrositing prensiplerine göre optimize edilmiştir.

Van Gevaş Rüzgar Enerji Santrali (RES) projesinin hukuki ve ticari ömrü, Türkiye Cumhuriyeti enerji mevzuatı kapsamında, özellikle 6446 sayılı Elektrik Piyasası Kanunu ve ilgili yönetmelikler çerçevesinde değerlendirilmiştir. Doğal kaynakların devletin hüküm ve tasarrufu altında olması ilkesi gereği, rüzgar enerjisinden elektrik üretimi faaliyeti, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) tarafından verilen "Üretim Lisansı" ile yürütülmektedir.

Proje kapsamında, mevzuatın izin verdiği maksimum süre olan 49 yıl süreli üretim lisansı başvurusu temel alınmıştır. Bu süre, projenin yatırım maliyetlerinin geri dönüşü ve uzun vadeli enerji arz güvenliği açısından optimum işletme periyodu olarak belirlenmiştir.

Projenin gelir akışı, 5346 sayılı Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun kapsamında işletilecektir.

Bu çerçevede:

İlk 10 Yıl (YEKDEM Dönemi): Santralin işletmeye girişinden itibaren ilk 10 yıl boyunca, Yenilenebilir Enerji Kaynaklarını Destekleme Mekanizması (YEKDEM) kapsamında devlet alım garantisinden faydalanaacaktır. Bu dönemde gelirler, döviz endeksli sabit tarife üzerinden garanti altına alınarak yatırım riski minimize edilmiştir. (YEKDEM Yönetmeliği, 2023)

Kalan 39 Yıl (Serbest Piyasa Dönemi): YEKDEM süresinin bitimini takiben, lisans

süresinin kalan 39 yıllık kısmında üretilen elektrik, Gün Öncesi Piyasası (GÖP) ve ikili anlaşmalar yoluyla oluşan Piyasa Takas Fiyatı (PTF) üzerinden ticari işleme konu edilecektir.(6446 sayılı Elektrik Piyasası Kanun, 2013)

Modern rüzgar türbinlerinin, IEC 61400 standartlarına göre, ekonomik ve teknik ömrüleri, dinamik yükler ve malzeme yorgunluğu nedeniyle ortalama 20-25 yıl olarak kabul edilmektedir. Projenin 49 yıllık lisans süresi boyunca maksimum verimle işletilebilmesi için, işletme döneminin ortasına denk gelen 25. yılın sonunda bir güç yenileme yatırımı planlanmıştır.

Bu strateji kapsamında; teknolojik ömrünü tamamlayan türbinlerin, o günün teknolojisine sahip daha verimli türbinlerle değiştirilmesi veya majör bileşen revizyonuna gidilmesi öngörlülmüştür. Böylece 49 yıllık yasal hakkın tam kapasiteyle kullanılması hedeflenmektedir.

1.2 Projenin İş Akım Şeması, Kapasitesi, Kapladığı Alan, Teknolojisi, Çalışacak Personel Sayısı

1.2.1 İş Akım Şeması

Van Gevaş bölgesinde Artos Dağı'nın yamaçlarına kurulacak RES projesinin işletme ömrü 49 yıl olarak planlanmaktadır. İnşaat süresi ise, proje sahasının yüksek rakımda bulunması ve sert kış koşulları nedeniyle inşaat sezonunun sınırlı olması, ayrıca arazi topografyasının gerektirdiği kapsamlı yol iyileştirme çalışmaları göz önüne alındığında, inşaat süresinin 18 ay olarak planlanması öngörlülmektedir.

Projenin iş akışı:

- Arazi Hazırlığı ve Ulaşım Yollarının Açılması

Artos Dağı eteklerinden Gevaş mevkiine ulaşacak servis yollarının açılması, şantiye alanının kurulması.

Ekipman: Dozer, Kepçe, Kamyon, Arazöz

Atıklar: Hafriyat toprağı, Toz emisyonu, Gürültü, Egzoz gazı

- Kazı ve Temel Açma

Türbin temel çukurlarının kazılması, zemin iyileştirmesi ve betonarme temellerin atılması.

Ekipman: Beton Mikseri, Beton Pompası, Ekskavatör, Silindir.

Atıklar: Atık beton, Demir/Çelik atıkları, Ambalaj atıkları (tahta kalıp, çimento torbası vb.), Gürültü.

- Ekipman Nakliyesi ve Montaj

Türbin parçalarının sahaya getirilmesi ve vinçler yardımıyla birleştirilmesi.

Ekipman: Tırlar, Ana Montaj Vinci, Yardımcı Vinç.

Atıklar: Gürültü, Egzoz emisyonu, Montaj atıkları

- Elektrik Bağlantıları

Türbinler arası ve şalt sahası arası enerji iletim hatlarının yer altına döşenmesi.

Ekipman: Kablo Çekme Makinası, Kanal Kazıcı

Atıklar: Kablo atıkları (bakır/alüminyum), İzolasyon plastik atıkları, Hafriyat.

- İşletme Dönemi

Tesisin devreye alınması, 49 yıllık elektrik üretimi ve periyodik bakımlar.

Ekipman: SCADA Kontrol Sistemi, Bakım Servis Araçları (4x4 Pick-up).

Atıklar: Atık sanayi yağları (Bakım kaynaklı - Tehlikeli Atık), Aerodinamik gürültü.

- Söküm ve Rehabilitasyon

Ekonomik ömrü biten tesisin sökülmESİ ve arazinin eski haline getirilmesi.

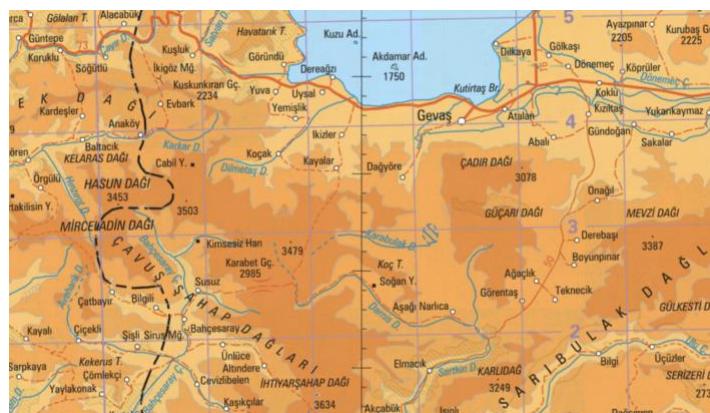
Ekipman: Vinçler, Kırıcı İş Makineleri, Kamyonlar.

Atıklar: Hurda metaller, Beton molozu, Gürültü, Toz.

şeklindedir.

1.2.2 Proje Alanı

Proje sahası Artos Dağı kuzey yamacında, yaklaşık 2200 metre rakımlı sırt hattı üzerindedir. Toplam ÇED alanı 2 hektardır. Topografya haritası incelendiğinde, Gevaş'ın güneyindeki Artos Dağı silsilesinin oluşturduğu 2.000 metre üzerindeki sırt hattı, rüzgar hızlandırma etkisi bakımından en uygun micrositing alanı olarak belirlenmiştir. 6.000 feet ve üzeri bölgeleri, hava yoğunluğunun düşüklüğüne rağmen, rüzgar hızının küpü ile orantılı artan güç potansiyeli nedeniyle santral kurulumu için seçilmiştir.



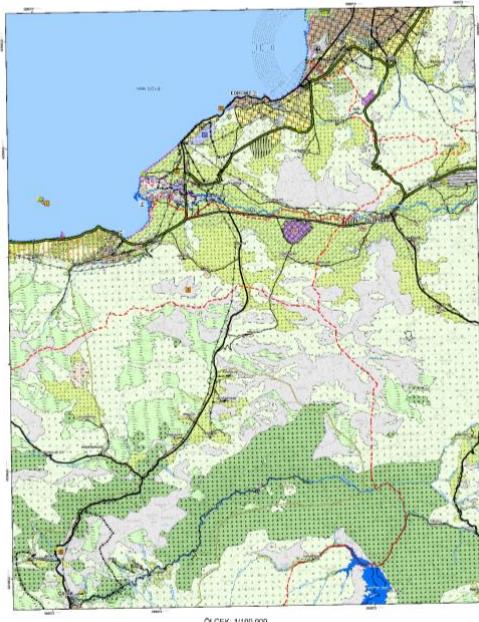
Şekil XX: Gevaş Bölgesi Topografya Haritası (Atlas, Harita Genel Müdürlüğü)

Rüzgâr turbinini yer seçimi için ise, bölgedeki hâkim rüzgâr yönü belirlenerek turbinin kurulacağı alandaki ortalama rüzgâr hızının en az 6 m/s ve üzerinde olması gerekmektedir. Rüzgâr enerji santrallerinde, turbinler birbirlerinden en az yatayda 3 kanat uzunluğu, dikeyde 7 kanat uzunluğu, çapraz mesafedeki turbinler arasında 5 kanat uzunluğu mesafede dururlar (Durak & Özer, 2008)

Artos Dağı'nın kuzey yamacında, 38.27° Kuzey enlemi ve 43.10° Doğu boyamları

arasına yerleştirilmesi öngörülen projenin topografya haritasının örneği. Topografik analizde, eşyükselti eğrilerinin sıklaştığı sırt hattı tercih edilerek orografik rüzgar hızlanmasından faydalanalması hedeflenmiştir. Türbinler, hakim rüzgar yönüne (Güney) dik olacak şekilde Doğu-Batı ekseninde lineer bir hat üzerinde kurgulanmış, böylece birbirleri üzerinde izdüşümü kaybı yaratmaları engellenmiştir. Yerleşim yerlerine olan dikey mesafe korunarak çevresel etki minimize edilmiştir.

Rüzgar enerji santrali (RES) projelerinin mikrosite aşamasında, enerji verimliliğini maksimize etmek amacıyla sıklıkla başvurulan sırt hattı yerleşimi stratejisi, türbinlerin hakim rüzgar yönüne dik uzanan topografik yükseltiler üzerine konumlandırılmasını esas almaktadır. Bu yerleşim stratejisi, atmosferik sınır tabakanın tepe noktalarında sıkışmasıyla oluşan topoğrafik hızlanma etkisinden yararlanmayı hedeflemektedir; nitekim rüzgar gücünün hızın küpü ile orantılı olması sebebiyle, sırt hattında sağlanacak kısmi bir hız artışı dahi santralin yıllık enerji üretiminde belirgin kazanımlar sağlamaktadır (Burton vd., 2011). Ancak bu yöntemin uygulanabilirliği, arazinin eğim özellikleriyile sınırlıdır; rüzgarı karşılayan yamaç eğiminin kritik eşiği aşması durumunda, akışın yüzeyden ayrılarak hız kaybına ve mekanik yükleri artıran turbülansa yol açtığı bilinmektedir, bu durum IEC 61400-1 standartları kapsamında detaylı karmaşık arazi analizlerini zorunlu kılmaktadır (Manwell vd., 2010; IEC, 2019). Bu teorik altyapı ve kısıtlar doğrultusunda Van Gevaş RES projesi için yapılan analizlerde; Artos Dağı'nın kuzey yamacında, 38.27° Kuzey enlemi ve 43.10° Doğu boyamları arasındaki eşyükselti eğrilerinin sıklaştığı sırt hattı, orografik hızlanmadan faydalanalmak üzere proje sahası olarak belirlenmiştir. Türbinler, bölgedeki hakim rüzgar yönü olan Güney sektörüne dik olacak şekilde Doğu-Batı ekseninde lineer bir hat üzerinde kurgulanmış, böylece hem aerodinamik verim artırılmış hem de türbinlerin birbirleri üzerinde oluşturabileceği izdüşümü kayipları engellenmiştir. Yerleşim yerlerine olan dikey mesafenin de korunduğu bu optimize edilmiş yerleşim planı ve topografik detaylar, Şekil X'de sunulan harita üzerinde gösterilmiştir.



Şekil XX: Muş - Bitlis - Van Planlama Bölgesi
1/100.000 Ölçekli Çevre Düzeni Planı (Mpgm.Csb.Gov.Tr, t.y.)

1.2.3 Çalışacak Personel Sayısı

Gevaş Rüzgar Enerji Santrali projesinin hayata geçirilmesi sürecinde, projenin teknik kapsamı ve iş programı dikkate alınarak inşaat ve işletme aşamalarında istihdam edilecek personel yapısı ve çalışma düzeni planlanmıştır. Projenin arazi hazırlık, yol iyileştirme, temel inşaatı ve türbin montajını kapsayan inşaat çalışmaları süresince; teknik ve idari kadro dahil olmak üzere toplam 30 kişilik bir ekibin çalıştırılması öngörmektedir. İstihdam edilecek personelin büyük çoğunluğunun, projenin sosyal katkısını artırmak amacıyla öncelikli olarak Gevaş ilçesi ve yakın yerleşim birimlerinden temin edilmesi hedeflenmektedir.

İnşaat faaliyetlerinin, meteorolojik koşulların elverdiği dönemlerde ayda 25 gün ve günde 10 saat, tek vardiya esasına göre yürütülmesi planlanmaktadır. Ancak beton dökümü veya kritik türbin montajı gibi teknik nedenlerle kesintiye uğramaması gereken işlemlerde, iş sağlığı ve güvenliği mevzuatına uygun olarak çalışma saatlerinde esneklik sağlanabilecektir. Şantiye sahasında personelin barınma, yemek ve sosyal ihtiyaçlarını karşılamak üzere, şantiye alanı içerisinde geçici prefabrik konteynerler tesis edilecektir. İnşaat çalışmalarının tamamlanmasının ardından bu geçici yapılar sahadan kaldırılarak alan rehabilite edilecektir.

Santralin devreye alınmasından sonraki işletme aşamasında ise tesisin 7/24 izlenmesi, periyodik bakımların yapılması ve saha güvenliğinin sağlanması amacıyla toplam 5 personelin daimi olarak istihdam edilmesi planlanmaktadır. İşletme personeli için santral sahası içerisinde kalıcı bir idari ve sosyal bina hizmet verecektir.

1.3 Doğal Kaynakların Kullanımı (Arazi Kullanımı, Su Kullanımı, Kullanılan Enerji Türü vb.)

1.3.1 Arazi Kullanımı

Gevaş Rüzgar Enerji Santrali (RES) projesinin tasarım aşamasında, Artos Dağı'nın kuzey yamaçları üzerinde meteorolojik verimlilik ve inşaat uygunluğu açısından en elverişli lokasyonlar belirlenmiş olup bu alanlarda toplam 5 adet rüzgar turbininin konuşlandırılması planlanmıştır. Her bir turbin ünitesi için temel kazısı, pad alanı ve vinç manevra sahası dahil olmak üzere yaklaşık 3.000 m^2 'lik ($50 \text{ m} \times 60 \text{ m}$) bir kalıcı müdahale alanı öngörmüştür. Proje kapsamında tesis edilecek 5 adet turbin, geniş bir ruhsat sahası içerisinde yermasına rağmen, fiili olarak kullanılacak toplam arazi miktarı turbinler için 1,5 hektar, şalt sahası ve idari yapılar için ise yaklaşık 0,5 hektar olmak üzere toplamda 2 hektar seviyesinde kalacaktır. Bu değer, projenin toplam kalıcı ayak izinin ruhsat sahasının %1'inden daha az bir alanı kapsayacağını ve arazinin geri kalan büyük bölümünün mevcut doğal dokusunu koruyarak ekolojik bütünlüğün sürdürüleceğini göstermektedir.

Santral sahasındaki micrositing çalışmaları, turbinler arası aerodinamik etkileşimleri ve izdüşüm kayıplarını minimize edecek şekilde kurgulanmıştır. Seçilen Nordex N149 turbin teknolojisinin 149 metre rotor çapına sahip olması nedeniyle, turbinlerin birbirlerinden en az 450 ila 900 metre (hakim rüzgar yönüne göre rotor çapının 3 ila 6 katı) uzaklıklarda konumlandırılması sağlanmıştır. Bu yerleşim stratejisi, Ek-X'te sunulan yerleşim planında detaylandırılmıştır. Projenin inşaat ve montaj aşamalarında kullanılacak geçici şantiye alanı ise yaklaşık 1.000 m^2 büyüklüğünde planlanmış olup, inşaat faaliyetlerinin tamamlanmasını takiben bu alanın sökülkerek arazinin eski doğal yapısına kavuşturulması hedeflenmektedir.

Ek-X:

Proje sahasının vejetasyon yapısı ve arazi örtüsü incelendiğinde, çalışma alanının ağaç

sınırının üzerinde yer aldığı ve hakim bitki örtüsünün yüksek dağ bozkırı formasyonlarından olduğu görülmektedir. Saha için yapılan literatür taraması ve ön etütler, proje alanının büyük bölümünün geven ve benzeri dikenli çalılardan meydana geldiğini, ekonomik değere sahip endüstriyel orman emvali veya yoğun ağaç dokusunun bulunmadığını ortaya koymuştur. Bu sebeple, Gevaş RES projesinde türbin alanları ve servis yolları için önemli düzeyde bir ağaç kesimi söz konusu olmayacağıdır. İnşaat ve işletme aşamalarında kullanılacak servis yolları, mevcut topografyanın izin verdiği ölçüde optimize edilmiştir. İhtiyaç duyulan yeni yol uzunluğu yaklaşık 6 kilometre ile sınırlanmış; böylece hafriyat miktarı ve topografik bozulma minimum düzeye indirilmiştir.

Mülkiyet durumu açısından proje sahası ağırlıklı olarak devletin hüküm ve tasarrufu altındaki araziler statüsünde olup, mera vasıflı alanlardan oluşmaktadır. Proje sahasında, 5403 sayılı Toprak Koruma ve Arazi Kullanımı Kanunu kapsamında mutlak tarım arazisi vasfında alanlar bulunmamakta olup, faaliyetler ağırlıklı olarak marginal araziler üzerinde yürütülecektir. Mera vasfindaki alanlar için 4342 sayılı Mera Kanunu uyarınca tahsis amacı değişikliği yapılarak enerji üretim izni alınması süreci yürütülecektir. Santralin işletmeye geçmesini takiben, türbin kulelerinin ve şalt sahasının kapladığı alan dışındaki tüm bölgelerin, yöre halkın hayvancılık faaliyetleri için erişimine açık tutulmaya devam edilmesi planlanmaktadır.

1.3.2 Su Kullanımı

Gevaş RES projesinin inşaat ve işletme aşamalarında su kullanımı; temel olarak çalışan personelin içme ve kullanma suyu ihtiyacı ile inşaat faaliyetleri sırasında oluşabilecek tozumanın önlenmesine yönelik nemlendirme çalışmalarını kapsamaktadır. Proje sahasında herhangi bir endüstriyel işlem veya su soğutmalı sistem kullanılmayacaktır.

Projenin arazi hazırlık, türbin temellerinin atılması ve montaj işlemlerini kapsayan inşaat aşamasında çalışacak personel sayısının, idari ve teknik kadro dahil olmak üzere 30 kişi olması planlanmaktadır. Şantiye koşullarında kişi başına günlük su tüketimi 150 L/kİŞİ-gün olarak esas alınmıştır. Buna göre, inşaat aşamasındaki evsel nitelikli günlük su ihtiyacı günlük 4500 litre olarak hesaplanmıştır.

Ayrıca, proje sahasına ulaşımı sağlayan stabilize servis yollarında ve kazı alanlarında, özellikle yaz aylarında oluşabilecek toz emisyonunu minimize etmek amacıyla arazözlerle düzenli sulama yapılacaktır. Gevaş bölgesinin meteorolojik verileri ve çalışma alanının büyüklüğü dikkate alındığında, toz bastırma işlemleri için günlük ortalama 4 m^3 su kullanımı öngörmektedir.

Sonuç olarak, inşaat döneminde toplam günlük su ihtiyacının yaklaşık $8,5\text{ m}^3$ civarında gerçekleşeceği tahmin edilmektedir.

Santralin devreye alınmasını takiben işletme aşamasında, bakım, onarım ve idari işler için daimi olarak 5 personelin görev yapması planlanmaktadır. İşletme dönemi günlük su ihtiyacı günlük 750 litre olarak hesaplanmıştır. İşletme aşamasında endüstriyel su kullanımı söz konusu olmayacağındır.

Proje sahası Artos Dağı üzerinde, yerleşim yerlerinden uzak ve yüksek rakımlı bir bölgede bulunduğuundan, alanda mevcut bir şebeke suyu hattı bulunmamaktadır. Bu nedenle içme suyu, piyasadan temin edilecek damacana sularla karşılaşacaktır. Şantiye deposunda stoklanacak kullanma suyu ve arazözler için gerekli su, Gevaş Belediyesi veya yetkili özel firmalara ait tankerler vasıtasıyla taşınarak temin edilecektir. Herhangi bir kuyu açılması veya yüzey sularının doğrudan kullanılması planlanmamaktadır.

1.3.3 Kullanılan Enerji Türü

Santralin kurulum aşamasında şebeke elektriği bağlantısı henüz tesis edilmemiş olacağından, şantiye alanındaki elektrik ihtiyacı mobil dizel jeneratörler vasıtasıyla karşılaşacaktır. İnşaat çalışmalarının Van ilinin sert kış koşullarına denk gelmesi durumunda, şantiye ofislerinin ve personel konteynerlerinin ısıtılması için elektrikli ısıtıcılar kullanılacaktır.

Arazi hazırlığı, kazı, dolgu ve montaj işlerinde kullanılacak ekskavatör, vinç, kamyon, gibi ağır iş makineleri ve servis araçları için yakıt olarak motorin kullanılacaktır. İş makinelerinin yakıt ikmali, mevzuata uygun mobil tankerler aracılığıyla şantiye sahasında kontrollü olarak sağlanacaktır.

Rüzgar Enerji Santrali işletmeye alındıktan sonra, türbinlerin kontrol sistemleri, kanat yönlendirme ve gövde yönlendirme mekanizmaları, havacılık ikaz lambaları, SCADA sistemi ve idari binanın enerji ihtiyacı; öncelikle santralin kendi ürettiği elektrik enerjisinden, üretimin olmadığı durumlarda ise enterkonnekte şebekeden çekilen elektrik enerjisi ile karşılaşacaktır.

İşletme döneminde sahada bulunacak bakım araçları için fosil yakıt kullanımını devam edecek olup, bunun dışında herhangi bir yakıt kullanımını söz konusu değildir.

1.4 Atık Miktarı (Katı, Sıvı, Gaz ve Benzeri) ve Atıkların Kimyasal, Fiziksel ve Biyolojik Özellikleri

1.4.1 Sıvı Atıklar

Gevaş Rüzgar Enerji Santrali projesinin inşaat ve işletme aşamalarında oluşması muhtemel sıvı atıklar, temel olarak çalışan personelin günlük ihtiyaçlarından kaynaklanan evsel nitelikli atık sularda ibarettir. Su kullanım hesaplamalarında belirtilen tüketim miktarlarının tamamının atık suya dönüşeceği yönündeki yaklaşım esas alınarak yapılan hesaplamalara göre; inşaat aşamasında günlük azami $4,5 \text{ m}^3$, işletme aşamasında ise günlük azami $0,75 \text{ m}^3$ evsel nitelikli atık su oluşumu öngörmektedir.

İnşaat aşamasında şantiye sahasında oluşacak evsel nitelikli atık sular, proje sahasında kanalizasyon şebekesi bulunmadığı için, "Lağım Mecrası İnsası Mümkün Olmayan Yerlerde Yapılacak Çukurlara Ait Yönetmelik" hükümlerinde belirtilen teknik standartlara uygun olarak inşa edilecek sızdırmaz fosseptik deposunda toplanacaktır. Fosseptik çukuru, yeraltı sularına sızmayı engelleyecek şekilde izole edilecek ve kapasitesi şantiye nüfusuna göre belirlenecektir.

Depoda biriken atık sular, doluluk oranına göre periyodik olarak Van Su ve Kanalizasyon İdaresi (VASKİ) veya yetkili özel firmalara ait vidanjörler vasıtasıyla çektilerek, bölgedeki en yakın atık su arıtma tesisine nakledilecektir. Bu işlem için inşaat çalışmaları başlamadan önce ilgili idare ile gerekli protokoller yapılacaktır.

İşletme döneminde idari binada oluşacak sınırlı miktardaki evsel atıksu için de aynı sızdırmaz fosseptik sistemi kullanılacak ve vidanjörle çekim yöntemiyle giderme süreci devam ettirilecektir. Proje kapsamında oluşacak atık suların doğrudan veya dolaylı olarak alıcı ortama

atılması kesinlikle söz konusu olmayacağıdır.

Tüm atıksu yönetimi sürecinde; 31.12.2004 tarihli ve 25687 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanan "Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği" hükümlerine tam uyum sağlanacağı taahhüt edilmektedir.

Ayrıca, türbin temellerinin inşasında hazır beton kullanılacağı için sahada beton harcı hazırlanması kaynaklı bir atık su oluşumu beklenmemektedir. Hazır beton, Van ve Gevaş civarında faaliyet gösteren lisanslı beton santrallerinden transmikserlerle temin edilecektir. İş makinelerinin ve araçların bakım ve onarımları, sahada atık yağ ve yağlı su oluşumunu engellemek amacıyla, proje sahası dışında yer alan yetkili servislerde veya sızdırmaz zeminli alanlarda kontrollü olarak yapılacaktır.

1.4.2 Katı ve Tehlikeli Atıklar

Evsel Nitelikli Katı Atıklar:

Gevaş RES projesinin inşaat ve işletme aşamalarında oluşacak evsel nitelikli katı atık miktarı, çalışacak personel sayısı ve kişi başına düşen günlük atık üretim değerleri esas alınarak hesaplanmıştır. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre Türkiye'de kişi başına düşen ortalama belediye katı atık miktarı yaklaşık 1,09 kg/gün aralığında kabul edilmektedir. Projenin inşaat aşamasında çalışacak 30 personelin günlük katı atık üretiminin hesabı yaklaşık 32,7 kg/gün olması öngörmektedir. İşletme aşamasında ise daimi olarak çalışacak 5 personel kaynaklı evsel katı atık miktarının yaklaşık 5,45 kg/gün seviyesinde gerçekleşeceği tahmin edilmektedir. Genel kabul gören atık yönetimi istatistiklerine göre katı atıkların ağırlıkça yaklaşık %30'unu ambalaj atıkları oluşturmaktadır. Bu oran dikkate alındığında, inşaat aşamasında günlük yaklaşık 9,8 kg, işletme aşamasında ise günlük yaklaşık 1,6 kg ambalaj atığı oluşumu beklenmektedir. (TÜİK, 2024)

Proje sahasında oluşacak evsel nitelikli katı atıklar ve ambalaj atıkları, "Sıfır Atık Yönetmeliği" ve "Atık Yönetimi Yönetmeliği" hükümleri doğrultusunda kaynağında ayrı toplanacaktır. Şantiye sahasında ve işletme binasında oluşturulacak geçici depolama alanlarında; kağıt, plastik, cam, metal ve organik atıklar için ayrı renklerde, sızdırmaz ve kapaklı biriktirme ekipmanları bulundurulacaktır. Geri kazanımı mümkün olan ambalaj atıkları

lisanslı geri dönüşüm firmalarına teslim edilerek ekonomiye kazandırılacak, geri dönüştürülemeyen evsel atıklar ise sızdırmaz çöp torbaları ile biriktirilerek Gevaş Belediyesi veya Van Büyükşehir Belediyesi'nin atık toplama sistemine teslim edilerek bertaraf edilecektir. Atıkların çevreye rastgele atılması, toprağa gömülmesi veya yakılması kesinlikle yasaklanmış olup, tüm süreçlerin ilgili mevzuat hükümlerine uygun yürütülmesi taahhüt edilmektedir.

Hafriyat Atıkları:

Proje kapsamında tesis edilecek 5 adet rüzgar türbini için yapılacak temel kazıları ve platform düzenlemeleri sırasında oluşacak hafriyat miktarı, zemin yapısı ve türbin temel boyutları dikkate alınarak hesaplanmıştır. Her bir türbin için yaklaşık 50 m x 50 m ebatlarında ve ortalama 1,5 metre derinliğinde bir kazı yapılmayı varsayımyla, türbin başına 3.750 m^3 , toplam 5 türbin için ise 18.750 m^3 hafriyat olması öngörmektedir. Ayrıca, yaklaşık 6 km uzunluğunda ve 6 metre genişliğindeki servis yollarının açılması sırasında, ortalama 30 cm bitkisel toprak sıyrılması işlemi sonucunda yaklaşık 10.800 m^3 kazı fazlası malzeme oluşacağı hesaplanmıştır. Proje genelinde toplam hafriyat miktarının yaklaşık 29.550 m^3 seviyesinde olması beklenmektedir.

Kazı çalışmaları sırasında delme ve patlatma yönteminin kullanılmaması, çalışmaların iş makineleri ile yürütülmesi esastır.

Atık Yağlar ve Tehlikeli Atıklar:

Projenin inşaat aşamasında kullanılacak iş makinelerinin yakıt ikmali, yağ değişimi ve ağır bakımlarının proje sahası dışında yer alan yetkili servislerde veya lisanslı akaryakıt istasyonlarında yapılması planlanmaktadır. Ancak zorunlu hallerde sahada yapılması gereken küçük çaplı bakımlar ve yağ değişimleri, sızdırmaz zemin üzerinde ve gerekli önlemler alınarak gerçekleştirilecektir. İşletme aşamasında ise türbinlerin dişli kutusu, hidrolik üniteleri ve trafo merkezindeki soğutma yağlarının periyodik değişimleri söz konusu olacaktır. Her bir türbin için yıllık ortalama yağ kullanım ve atık yağ oluşum miktarları üretici firmaların bakım prosedürlerine göre belirlenecek olup, tahmini olarak tesis genelinde yıllık 800-1000 litre civarında atık yağ oluşumu muhtemeldir.

Oluşacak atık motor, şanzıman ve hidrolik yağlar ile yağa kontamine olmuş üstübü,

eldiven, filtre gibi tehlikeli atıklar, “Atık Yağların Yönetimi Yönetmeliği” hükümlerine uygun olarak, zemin geçirimsizliği sağlanmış, üstü kapalı ve güvenlik önlemleri alınmış tehlikeli atık geçici depolama alanında, türlerine göre etiketlenmiş sızdırmaz kaplarda muhafaza edilecektir. Bu atıklar, yasal süresi içerisinde Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı’ndan lisans almış yetkili geri kazanım veya bertaraf tesislerine, lisanslı araçlarla teslim edilecektir.

Diger Atıklar (Tıbbi, Pil, Lastik, Bitkisel Yağ):

Proje sahasında revir bulunmayacak olup, olası iş kazalarında en yakın sağlık kuruluşlarından hizmet alınacağından, sahada tıbbi atık oluşumu beklenmemektedir. Ancak ilk yardım kutularından kaynaklanabilecek az miktarda tıbbi atık oluşması durumunda, bu atıklar “Tıbbi Atıkların Kontrolü Yönetmeliği”ne uygun olarak kırmızı poşetlerde biriktirilerek yetkili kuruluşlara teslim edilecektir. İş makinelerinden ve araçlardan kaynaklanacak ömrünü tamamlamış lastikler ve aküler, ilgili yönetmelikler çerçevesinde yenisiyle değiştirilmek üzere yetkili servislere veya lisanslı toplayıcılara verilecektir. Yemekhane hizmetlerinin dışarıdan temin edilmesi veya personel sayısının azlığı nedeniyle, oluşacak bitkisel atık yağı miktarının minimum düzeyde kalması öngörlülmekte olup, oluşması halinde bu yağlar da lisanslı biyodizel tesislerine gönderilmek üzere ayrı biriktirilecektir.

1.4.3 Emisyonlar

Rüzgar Enerji Santrali (RES) projeleri, temiz enerji statüsünde olup işletme aşamasında herhangi bir baca gazı veya işlem emisyonu üretmemektedir. Ancak, projenin arazi hazırlık ve inşaat aşamalarında geçici süreli toz ve yanma gazı emisyonları olması kaçınılmazdır.

Hafriyat ve Arazi Hazırlığı Kaynaklı Toz Emisyonları:

Proje sahasının Artos Dağı eteklerinde, yüksek eğimli ve kayalık bir yapıda olması nedeniyle, türbin temelleri ve servis yollarının açılması sırasında hafriyat işlemleri gerçekleştirilecektir. Her bir türbin temeli için yaklaşık 400 m^2 taban alanı ve servis yolları için 6 km uzunluğunda bir güzergah üzerinde çalışma yapılabileceği öngörlülmüştür. Toz emisyonu hesaplamalarında; 03.07.2009 tarihli Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği ve ilgili kılavuzlarda belirtilen emisyon faktörleri kullanılmıştır. Söz konusu hafriyat çalışmaları sırasında oluşacak toz miktarı; kazı yapılacak malzemenin nem içeriğine, rüzgar

hızına ve iş makinelerinin çalışma temposuna bağlıdır. Bölgenin rüzgar potansiyelinin yüksek olması, doğal tozumayı artırıcı bir faktördür. Bu nedenle hesaplamalarda kontrollü emisyon faktörleri esas alınmıştır. Hesaplanan emisyon değerlerinin, yönetmelikte belirtilen sınır değerlerin (1.0 kg/saat) altında kalması hedeflenmektedir. Bu amaçla sahada şu önlemler alınacaktır: Kazı alanları ve servis yolları arazözler ile düzenli olarak nemlendirilecektir. Hafriyat taşıyan kamyonların üzerleri branda ile kapatılacaktır. Arazi yapısının volkanik kayaç ağırlıklı olması nedeniyle, kazı malzemesi bitkisel toprağa göre daha az tozuma potansiyeline sahiptir. Kazı fazlası malzeme, proje sahası içerisinde belirlenen döküm sahalarında depolanacak ve üzeri rehabilite edilecektir.

İş Makinelerinden Kaynaklanan Egzoz Emisyonları:

İnşaat süresince kullanılacak ekskavatör, vinç, mikser ve kamyon gibi ağır iş makineleri dizel yakıt kullanmaktadır. Bu araçlardan kaynaklanan Karbonmonoksit (CO), Azot Oksitler (NOx) ve Hidrokarbon (HC) emisyonları, EPA (ABD Çevre Koruma Ajansı) tarafından belirlenen "Non-Road Diesel Engine Emission Standards" faktörlerine göre değerlendirilmiştir. İnşaat sahasının geniş bir alana yayılması ve açık arazi koşulları nedeniyle, egzoz gazlarının atmosferde dağılımı hızlı gerçekleşecektir ve yerel hava kalitesinde kalıcı bir bozulmaya yol açmayacaktır.

1.4.4 Gürültü ve Vibrasyon

Meteorolojik faktörlerin ses yayılımı üzerindeki etkisi, RES projelerinde gürültü modellemesinin temelini oluşturur.

İnşaat faaliyetleri sırasında gürültü kaynakları; iş makineleri ve taşit trafiğidir. "Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği (ÇGDYY)" kapsamında şantiye alanları için belirlenen sınır değerler dikkate alınmıştır.

Kullanılacak iş makinelerinin ses gücü düzeyleri (L_w) kullanılarak, toplam ses gücü düzeyi (L_{wt}) logaritmik olarak aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$L_{WT}=10 \cdot \log(\sum_{i=1}^n 10^{0.1Lwi})$$

Sesin mesafeye bağlı olarak azalımı (yayılımı) ise atmosferik yutusun da dikkate alındığı şu formül ile modellenmiştir:

$$L_{pt}=L_{WT}+10 \cdot \log\left(\frac{C}{\pi r^2}\right) - A_{atm}$$

Burada:

Lpt: Toplam ses basıncı düzeyi (dB)

Q: Yönelme katsayısı (Yarı küresel dağılım için Q=2)

r: Kaynaktan uzaklık (m)

Aatm: Atmosferik yutuş(havanın nemine ve sıcaklığına bağlı sönümlenme)

Van Gevaş bölgesinin rakımının yüksek olması, hava yoğunluğunun düşmesine neden olmakla birlikte, açık arazide sesin yayılmasını etkileyen en önemli faktör rüzgardır.

Proje sahasına en yakın yerleşim yeri olan Pınarbaşı Mahallesi, inşaat sahasına yaklaşık 2 km mesafededir. Yapılan modellemede, yerleşim yerlerinde hissedilecek gürültü düzeyinin yönetmelik sınır değerlerinin çok altında kalacağı öngörmektedir.

İşletme Aşaması Gürültüsü (Aerodinamik Gürültü):

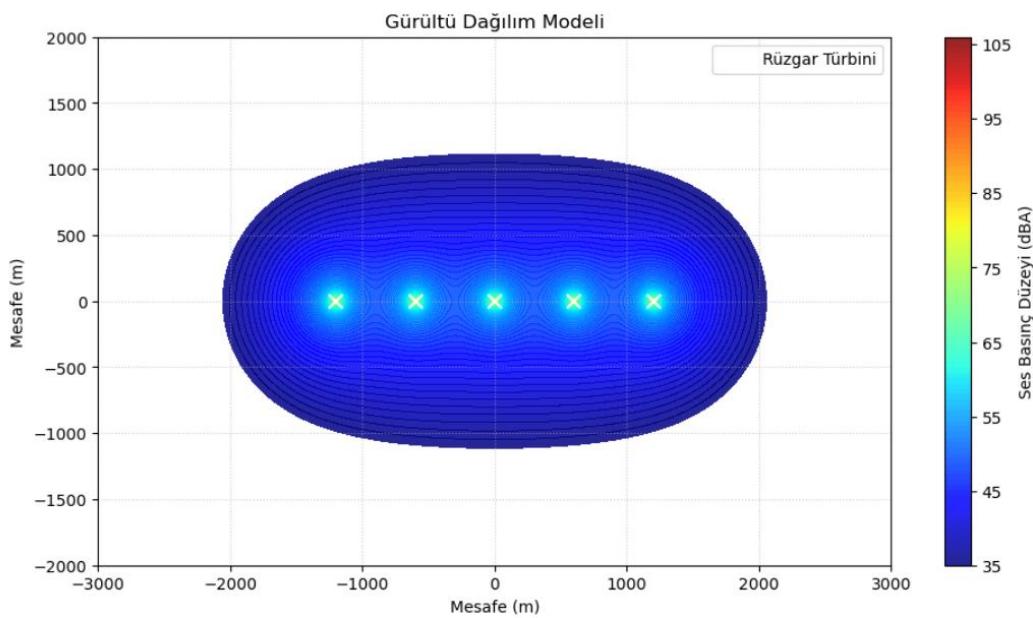
RES işletme aşamasında iki tür gürültü kaynağı mevcuttur:

Mekanik Gürültü: Dişli kutusu ve jeneratörden kaynaklanır

Aerodinamik Gürültü: Rüzgarın kanatlarla etkileşimi sonucu oluşan, geniş bantlı gürültüdür ve rüzgar hızıyla artış gösterir.

Meteoroloji mühendisliği perspektifinden bakıldığından; rüzgarın estiği yöne doğru ses dalgaları kırılmaya uğrayarak yere daha yakın ilerler ve daha uzağa taşınır. Rüzgara karşı ise ses yukarı doğru kırılıarak yer seviyesinde azalır.

Projede kullanılacak türbinlerin üretici verilerine göre, kanat ucunda oluşan maksimum ses gücü düzeyi yaklaşık 100-105 dBA seviyesindedir. Sesin mesafeye göre dağılımı hesaplanmış ve gürültü haritası (izopletler) oluşturulmuştur.



Şekil X: İşletme Aşaması Temsili Gürültü Dağılım Haritası (İzoplet Haritası)

En yakın yerleşim biriminde işletme sırasında oluşacak gürültü seviyesinin 35-40 dBA aralığında olacağı hesaplanmıştır. Bu değer, ÇGDYY kapsamında gürültüye hassas kullanımlar için belirlenen gece sınır değerinin (45-50 dBA) altındadır. Ayrıca, arka plan gürültüsü rüzgarın kendisinden kaynaklandığı için, yüksek rüzgar hızlarında türbin sesi rüzgarın doğal sesi içinde kaybolacaktır.

Vibrasyon: Proje sahasının zemin yapısı volkanik kayaçlardan oluşmakta olup, kazı işlemleri ağırlıklı olarak hidrolik kırıcılar ile yapılacaktır. Sahada patlayıcı madde (dinamit vb.) kullanımı planlanmamaktadır.

Bu nedenle, zeminde titreşim yaratacak şok dalgaları oluşmayacaktır. İşletme aşamasında ise türbin direklerinin statik ve dinamik yükleri sönmeyecek şekilde tasarlanması ve en yakın yerleşimin uzaklığı sebebiyle, insan sağlığını veya yapıları etkileyebilecek bir yer titreşimi söz konusu değildir.

1.5 Kullanılan Teknoloji ve Malzemelerden Kaynaklanabilecek Kaza Riski

Gevaş Rüzgar Enerji Santrali projesi kapsamında, tesisin inşaat ve işletme dönemlerinde meydana gelebilecek olası iş kazaları, yangın, doğal afet ve teknik arızalar gibi risklere karşı; ulusal mevzuat, uluslararası standartlar çerçevesinde gerekli tüm önlemler alınacaktır. Projede

kullanılacak Nordex N149 türbin teknolojisi, entegre güvenlik sistemlerine sahip olup, riskleri kaynağında minimize edecek şekilde tasarlanmıştır.

Tesis genelinde uygulanacak acil eylem planı, aşağıdaki temel bileşenleri kapsamaktadır:

Yangın Güvenliği: Türbin nasellerinde ve şalt sahasında otomatik yangın algılama ve söndürme sistemleri tesis edilecektir. Proje sahasında yanıcı nitelikteki ahşap vb. malzemelerin kullanımı minimum düzeyde tutularak yangın yükü azaltılacaktır.

İş Sağlığı ve Güvenliği: Tüm personel için düzenli İSG eğitimleri verilecek, "Sıfır Kaza" politikası benimsenecektir.

Kritik Altyapının Korunması: Enerji iletim kabloları yeraltından geçirilecek, ana trafo ve kumanda merkezinde acil durum kesicileri bulunacaktır.

İletişim ve Koordinasyon: Tesis idari binasında kesintisiz iletişim araçları ve acil durum irtibat listeleri hazır bulundurulacaktır.

1.5.1 İnşaat Aşaması

Projenin inşaat aşamasında karşılaşılmazı muhtemel riskler; temel kazıları, ağır iş makinelerinin çalışması, yüksekte çalışma ve ağır tonajlı malzemelerin montajı sırasında oluşabilecek iş kazalarıdır. Bu risklerin yönetimi için yüklenici firma tarafından 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu ve ilgili yönetmelikler titizlikle uygulanacaktır.

İnşaat sahasında alınacak temel güvenlik önlemleri şunlardır:

Kişisel Koruyucu Donanım (KKD): Tüm çalışanlara baret, reflektörlü yelek, çelik burunlu iş ayakkabısı, koruyucu gözlük ve eldiven gibi KKD'ler zimmetlenecek ve kullanımı zorunlu tutulacaktır.

Yüksekte Çalışma: Türbin montajı gibi yüksekte çalışma gerektiren işlerde, paraşüt tipi emniyet kemeleri, yaşam hatları ve düşüş durdurucu sistemler kullanılacaktır. Çalışanlar yüksekte çalışma eğitimi" ve mesleki yeterlilik belgesine sahip olacaktır.

Makine Emniyeti: Vinç ve iş makinelerinin periyodik kontrolleri akredite kuruluşlarca yapılacak ve operatörlerin yetki belgeleri denetlenecektir.

Saha Güvenliği: Şantiye sahasına yetkisiz girişleri önlemek için uyarı levhaları asılacak ve güvenlik personeli istihdam edilecektir.

Ayrıca, inşaat aşamasında tehlikeli kimyasalların kullanımı söz konusu olmayıp, sadece iş makineleri için gerekli olan yakıt ve yağlar sızdırmaz kaplarda ve güvenli alanlarda depolanacaktır. Olası bir kaza durumunda ilk müdahale için şantiye alanında tam donanımlı ilk yardım dolapları ve yanım tüpleri hazır bulundurulacaktır.

1.5.2 İşletme Aşaması

İşletme aşamasında tesisin normal çalışma koşullarında insan ve çevre sağlığı açısından doğrudan bir tehlike oluşturulması beklenmemektedir. Ancak bakım-onarım faaliyetleri ve ekstrem meteorolojik koşullar belirli riskler barındırmaktadır. Bu risklere karşı aşağıdaki önlemler alınacaktır:

Teknik Emniyet: Türbinler, aşırı rüzgar hızı veya titreşim algılandığında otomatik olarak duruşa geçecek güvenlik sistemleri ile donatılmıştır.

Yıldırımdan Korunma: Türbin kanatlarında ve kulede IEC 61400-24 standardına uygun paratoner ve topraklama sistemleri tesis edilerek yıldırım riskine karşı koruma sağlanacaktır.

Buzlanma Riski: Artos Dağı'nın kış koşulları nedeniyle kanatlarda oluşabilecek buz yüküne karşı buz algılama ve ısitma sistemi devreye girecek, buz atma riski olan durumlarda türbin otomatik olarak durdurulacak ve saha güvenliği sağlanacaktır.

Bakım Çalışmaları: Periyodik bakımlar sırasında enerji kesme ve kilitleme (EKED) prosedürleri uygulanarak, bakım personeli türbin içindeyken sistemin kazara çalışması engellenecektir.

İşletme personeline; yanınla mücadele, ilk yardım, yüksek gerilimde çalışma ve acil

durum tahliyesi konularında düzenli eğitimler verilerek yetkinlikleri artırılacaktır.

Bölüm 2: PROJE YERİ VE ETKİ ALANININ MEVCUT ÇEVRESEL ÖZELLİKLERİ

2.1 Projenin ve Yerin Alternatifleri (Proje Teknolojisinin ve Proje Alanının Seçilme Nedenleri)

Enerji yatırımlarında yer seçimi ve teknoloji tercihi meteorolojik verimlilik, çevresel kısıtlar, mülkiyet yapısı ve enterkonnecte sisteme bağlanabilirlik gibi çok parametreli analizlere dayanmaktadır. Van rüzgar enerji santrali projesi için yer seçimi ve teknoloji alternatifleri aşağıdaki kriterler doğrultusunda değerlendirilmiş ve Artos Dağı kuzey yamaçları optimum lokasyon olarak belirlenmiştir.

a) Yer Seçimi ve Alternatiflerin Değerlendirilmesi: Bölgesel ölçekte yapılan ön fizibilite çalışmalarında aşağıdaki alternatifler irdelenmiştir:

Gevaş Ovası ve göl kıyısı alternatif: Rüzgar şiddeti tatmin edici olsa da; tarımsal üretim yoğunluğu, sulak alanlara yakınlık, kuş göç yolları riski ve yerleşim yerlerine olan yakınlık nedeniyle çevresel ve sosyal kısıtlar kapsamında uygun bulunmamış ve elenmiştir.

Artos Dağı zirve hattı alternatif: Rüzgar potansiyeli en yüksek bölge olmasına rağmen zorlu kış şartları, ulaşım yolu maliyetlerinin yüksekliği ve Önemli Doğa Alanı (ÖDA) hassasiyeti nedeniyle teknik ve ekonomik açıdan uygulanabilir görülmemiştir.

Mevcut seçilen lokasyon: Yaklaşık 2.200 – 2.400 metre kotlarında yer alan mevcut proje sahası orografik rüzgar hızlanması faydalananı, yerleşim yerlerine 2 kilometreden fazla mesafede olması ve arazinin verimsiz taşlık, kayalık yapısı nedeniyle en uygun alternatif olarak seçilmiştir.

b) Teknoloji Seçimi: Gevaş RES projesinin teknoloji seçim sürecinde, proje sahasının yüksek rakımlı yapısı ve buna bağlı olarak düşen hava yoğunluğu en belirleyici parametre olmuştur. Rüzgar gücünün hava yoğunluğu ile doğru orantılı olması fiziksel kuralı gereği; yüksek irtifada azalan hava molekülü yoğunluğunu telafi etmek ve hedeflenen enerji üretimini yakalayabilmek amacıyla, standart türbinler yerine geniş rotorlu teknoloji sınıfı tercih

edilmiştir. Bu kapsamında, 149 metre rotor çapına ve 4,5 MW nominal güce sahip, düşük rüzgar hızlarında ve seyrek hava koşullarında dahi yüksek aerodinamik verimlilik sağlayan türbin modeli Nordex N149 projeye entegre edilmiştir. Ayrıca, Artos Dağı'nın sert kış koşulları ve buzlanma riski dikkate alınarak, seçilen teknolojinin kanat ısıtma sistemlerini içermesi zorunlu kılmıştır. Alternatif olarak çok sayıda düşük kapasiteli türbin kullanımı seçeneği ise; gerektireceği daha fazla yol yapımı, artan hafriyat miktarı ve genişleyen arazi tahribatı nedenleriyle çevresel sürdürülebilirlik açısından uygun bulunmayarak ekenmiştir. Sonuç olarak, 5 adet ancak yüksek kapasiteli türbin kullanımı ile hem çevresel ayak izinin minimize edilmesi hem de tesis verimliliğinin maksimize edilmesi hedeflenmiştir.

2.1.1 Mevcut Arazi Kullanımı

Van İli, Gevaş İlçesi sınırları içerisinde, Artos Dağı'nın kuzey yamaçlarında ve sırt hattında yer alan proje sahasının arazi kullanım durumu; Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü (TKGM) Parsel Sorgulama Sistemi (MEGSİS) verileri üzerinden incelenmiştir. Yapılan sorgulamalar neticesinde, proje sahasında yer alan parcellerin tapu kütüğündeki niteliğinin büyük oranda mera, ham toprak ve yüksek rakımlı kesimlerde kayalık vasfında olduğu tespit edilmiştir.

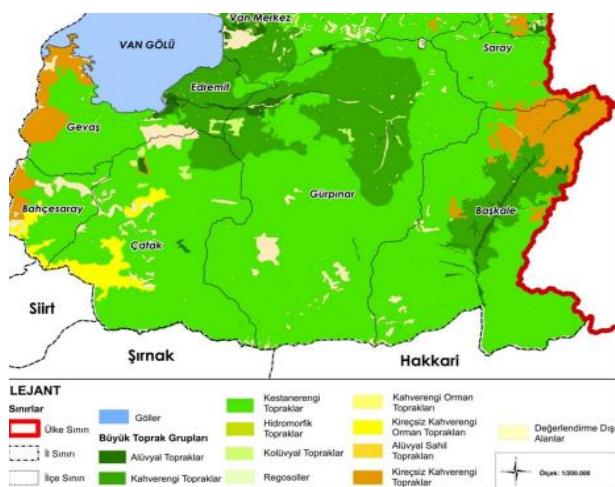
Proje alanı yaklaşık 2.000 – 2.400 metre rakım aralığında yer almaktır, arazi topografyasının yüksek eğimi ve ana kayanın yüzeyde olması nedeniyle tarımsal işlemeye uygun değildir. TKGM kayıtlarındaki arazi nitelikleri ve saha gözlemleri birlikte değerlendirildiğinde; söz konusu alanların 5403 sayılı "Toprak Koruma ve Arazi Kullanımı Kanunu" kapsamında mutlak veya dikili tarım arazisi özelliği taşımadığı, "Marjinal Tarım Arazisi" niteliğinde olduğu anlaşılmaktadır. Türbinlerin yerleştirileceği lokasyonlarda aktif tarımsal üretim (sulu veya kuru tarım) faaliyeti bulunmamaktadır.

Saha, bitki örtüsü bakımından İran-Turan fitocoğrafya bölgesi elementlerini bulunduran yüksek dağ bozkırı, bir diğer adıyla alpin step, formasyonundadır. Bölge halkı tarafından yaz aylarında mevsimsel olarak küçükbaş hayvan otlatma alanı olarak kullanılmaktadır. Proje sahasının mülkiyet durumu ağırlıklı olarak "Devletin Hüküm ve Tasarrufu Altındaki Araziler" ve "mera" statüsündedir. Bu kapsamında, 4342 sayılı Mera Kanunu'nun 14. maddesi uyarınca "Tahsis Amacı Değişikliği" yapılarak enerji üretimi amaçlı kullanım izni süreçleri

yürüttülecektir (4342 Sayılı Mera Kanunu, 1998).

2.1.2 Büyük Toprak Grupları

Proje sahası ve yakın çevresinin toprak yapısı incelenirken; bölge özelinde (Artos Dağı ve Gevaş çevresi) yapılan akademik çalışmalar referans alınmıştır.



Şekil x: Proje Sahası ve Çevresinin Büyük Toprak Grupları Haritası (Turna, 2016)

Van Gölü Havzasının genel yapısı ve proje sahasının yer aldığı Artos Dağı eteklerinin karakteristiği incelendiğinde; sahada baskın olarak Kestane Rengi Topraklar (C), yüksek kesimlerde Kireçsiz Kahverengi Orman Toprakları (N) ve eğimli yamaç eteklerinde Kolüvyal Topraklar (K) bulunduğu görülmektedir. Bu toprak gruplarının tanımları aşağıda verilmiştir:

Kestane Rengi Topraklar: Bölgenin yarı kurak iklim kuşağında ve step vejetasyonu altında oluşan topraklardır. Genellikle 800 metreden yüksek platolarda ve dağ eteklerinde görülür. Organik madde bakımından orta düzeydedir ve renkleri koyu kahverengi ile kestane rengi arasında değişir. Kireç birikimi genellikle alt katmanlarda görülür. Proje sahasındaki türbin lokasyonlarının bulunduğu alanlarda, anakayanın yüzeye yakın olması nedeniyle sıçrılık bir yapı sergilemektedirler.

Kolüvyal Topraklar: Proje sahası gibi yüksek eğimli arazilerin eteklerinde; yerçekimi, yüzey akışı ve yan dereler ile kısa mesafelerden taşınan materyallerin birikmesiyle oluşmuş genç topraklardır. "yamaç döküntüsü" olarak da nitelendirilebilirler. Türbinlerin yerleştirileceği

sırt hatlarına giden servis yollarının geçtiği vadi yamaçlarında bu toprak grubuna rastlanmaktadır. Drenajları iyidir ancak su tutma kapasiteleri düşüktür. Taşlı ve çakılı bir yapıya sahip olduklarıdan tarımsal verimlilikleri düşüktür.

Kireçsiz Kahverengi Orman Toprakları: Daha çok kuzeye bakan ve nemliliğin nispeten yüksek olduğu yamaçlarda, meşe çalılıkları veya seyrek ağaççıklar altında gelişmiş topraklardır. Organik maddece zengindir ancak bölgenin volkanik yapısına bağlı olarak asidik karakter gösterebilirler.

2.1.3 Arazi Kullanım Kabiliyet Sınıfı

Proje sahası, topografik yapısı itibarıyla Artos Dağı'nın yüksek eğimli yamaçları üzerinde yer almaktadır. Sahada yapılan incelemeler ve Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü (TKGM) kayıtlarına dayalı parsel sorgulamaları neticesinde; proje alanını oluşturan parcellerin büyük çoğunluğunun "ham Toprak", "kayalık" ve "mera" vasfında olduğu tespit edilmiştir.

Bölgemin arazi kullanım özellikleri şu başlıklar altında değerlendirilmiştir:

Toprak Yapısı ve Eğim: Rüzgar türbinlerinin yerleştirileceği noktalar, %20 ve üzeri eğime sahip, ana kayanın yüzeylediği ve toprak derinliğinin sıç olduğu alanlardır. Bu fiziksel kısıtlılıklar, sahada makineli tarım yapılmasını imkansız kılmaktadır.

Tarımsal Potansiyel: Sahada sulu veya kuru tarım faaliyeti yürütülmemektedir. Mevcut bitki örtüsü, tarımsal ürünlerden ziyade doğal step ve bozkır bitkilerinden oluşmaktadır. Bu nedenle proje sahası, 5403 sayılı Toprak Koruma ve Arazi Kullanımı Kanunu kapsamında "Marjinal Tarım Arazisi" niteliği taşımaktadır.

Korunan Tarım Alanları: Proje sahası içerisinde I., II. veya III. sınıf niteliğinde "mutlak tarım arazisi" veya "dikili tarım arazisi" bulunmamaktadır. Tarımsal üretim alanları, proje sahasının daha alt kotlarında ve yerleşim yerlerine yakın düzlüklerde yoğunlaşmıştır.

2.1.4 Erozyon Derecesi

Proje sahası, topografik olarak yüksek eğimli ve bitki örtüsü bakımından seyrek (step)

bir yapıya sahiptir. Bu durum, sahayı erozyon riskine açık hale getirmektedir.

Bölgedeki erozyon durumu, Gıda, Tarım ve Hayvancılık Bakanlığı standartlarına göre değerlendirildiğinde:

Proje sahasının genelinde 3. Derece (Şiddetli) Su Erozyonu gözlemlenmektedir. Özellikle ilkbahar aylarında kar erimeleri ve sağanak yağışlar, bitki örtüsünün zayıf olduğu yamaçlarda yüzey akışına geçerek toprak kaybına neden olmaktadır.

Ayrıca, bölgenin rüzgar rejimi ve açık arazi yapısı nedeniyle Rüzgar Erozyonu da etkilidir.

Heyelan ve Afet Durumu: Proje sahasında yapılan ön jeolojik etütlerde, türbinlerin yerleştirileceği noktalarda aktif bir heyelan kütlesine rastlanmamıştır. Zemin, taşıma gücü yüksek volkanik kayaçlardan oluşmaktadır. Proje sahası "afete maruz bölge" sınırları içerisinde yer almamaktadır.

2.1.5 Tarım Alanı

Proje alanı, Artos Dağı'nın yüksek rakımlı, eğimli ve kayalık yapısı üzerinde yer almaktadır. Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü (TKGM) Parsel Sorgulama uygulaması üzerinden gerçekleştirilen incelemelere göre; proje sahasındaki parcellerin niteliği 'ham toprak' ve 'mera' vasfında olup, tarımsal üretim potansiyeli düşük, toprak derinliğinin sıçrıldığı ve ana kayanın yüzeylediği alanlardan oluşmaktadır.

5403 Sayılı Toprak Koruma ve Arazi Kullanımı Kanunu hükümleri çerçevesinde yapılan incelemede:

Proje sahasında "mutlak tarım arazisi", "özel ürün arazisi" veya "dikili tarım arazisi" vasfında alanlar bulunmamaktadır.

Gevaş ilçesinin ekonomik tarımsal faaliyetleri (şeker pancarı, fasulye, meyvecilik vb.) proje sahasının kuzeyindeki vadi tabanında ve göl kıyısında yoğunlaşmış olup, RES projesinin bu alanlarla fiziksel bir çakışması yoktur.

Proje sahasının kısmen "kuru marginal tarım arazisi" olarak sınıflandırılabilenek bölgeleri için, Van Valiliği İl Tarım ve Orman Müdürlüğünden "tarım dışı kullanım izni" alınacaktır. Tesisin işletmeye geçmesini takiben, türbin kulelerinin kapladığı alan dışındaki bölgelerde mevcut hayvancılık ve otlatma faaliyetlerinin devam etmesine engel bir durum söz konusu değildir. (5403 Sayılı Toprak Koruma ve Arazi Kullanımı Kanunu, 2005; Gevaş İlçe Tarım Müdürlüğü Verileri, 2024)

2.1.6 Ormanlık Alan

Proje sahasının mülkiyet durumu ve orman rejimi içerisindeki konumu; Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü (TKGM) Parsel Sorgulama Uygulaması veri tabanı üzerinden yapılan güncel sorgulamalar neticesinde incelenmiştir.

Yapılan parsel ve nitelik sorgulamalarında; Van İli, Gevaş İlçesi sınırlarında, Artos Dağı kuzey yamaçlarına denk gelen proje sahasının büyük bir kısmının mülkiyetinin maliye hazinesi adına kayıtlı olduğu, arazi vasfinin ise kayıtlarda ağırlıklı olarak "devlet ormanı", "kayalık" ve "ham toprak" olarak geçtiği tespit edilmiştir. Artos Dağı'nın kuzey yamaçlarında yer yer bozuk meşe çalılıkları ve seyrek ağaççık formasyonları görülmekle birlikte; TKGM verileri ve uydu görüntüleri çakıştırıldığında, türbinlerin yerleştirileceği 2.200 metre ve üzeri rakımların, ağaç sınırının üzerinde veya sınırında kaldığı görülmektedir.

Resmi kayıtlarda orman vasfi taşıyan parsellerin fiili durumunun; kapalılık oranı %10'un altında olan, teknik ormancılık terimiyle "OT" (Orman Toprağı) veya "BM" (Bozuk Meşe) niteliğindeki açıklık alanlar olduğu anlaşılmaktadır. Dolayısıyla proje kapsamında kesilmesi gereken verimli, endüstriyel nitelikli bir orman bulunmamaktadır.

Projenin orman sınırları içerisinde kalan kısımları için; 6831 Sayılı Orman Kanunu'nun 17/3. Maddesi gereğince, "Ormanlık alanlarda kamu yararı ve zaruret bulunması" hükmüne istinaden Orman Bölge Müdürlüğü'nden "orman kesin izni" alınacaktır. (TKGM Parsel Sorgulama Sistemi, 2025; 6831 Sayılı Orman Kanunu, 2023).

Öz nitelik Bilgisi	
İl	Van
İlçe	Gevaş
Mahalle/Köy	Dağyöre
Mahalle No	54395
Ada	102
Parsel	29
Tapu Alanı	1.933.765,06
Nitelik	Mera
Mevkii	-
Zemin Tip	Ana Taşınmaz
Pafta	L50-A-21-C

Şekil X: Van Gevaş Öz nitelik Bilgisi (TKGM Parsel Sorgulama Sistemi, 2025)

2.1.7 Planlı Alan

Proje alanı içerisinde planlı alan bulunmamaktadır.

2.1.8 Su Yüzeyi

Proje sahasının bulunduğu Van İli, Türkiye'nin en büyük kapalı havzası olan Van Gölü Kapalı Havzası içerisinde yer almaktadır. Havza, etrafı yüksek dağlarla çevrili, dışa akışı olmayan volkanik set gölü karakterindeki Van Gölü ve onu besleyen su kaynaklarından oluşmaktadır.

İl sınırları içerisindeki en önemli su kütlesi, dünyanın en büyük sodalı gölü olma özelliğini taşıyan Van Gölü'dür ($3713 km^2$). Göl suyu yüksek oranda soda içermekte olup, pH değeri yaklaşık 9.8 civarındadır ve tuzluluk oranı yaklaşık binde on dokuz seviyesindedir. Gevaş ilçesi, Van Gölü'nün güney kıyısında yer almaktır, ilçenin hidrolojik karakterini göl ve gölü besleyen akarsular şekillendirmektedir. Bölgedeki önemli akarsular arasında; havzanın doğusundan kaynağını alan ve Gevaş sınırları içerisinde geçerek Van Gölü'ne dökülen Engel Çayı bir diğer adıyla Dönemeç Suyu ve Gevaş Suyu (Pınarbaşı) bulunmaktadır. Engel Çayı, özellikle İlkbahar aylarında kar erimesiyle birlikte debisi artan ve Van Gölü'ne döküldüğü noktada delta oluşumu sergileyen önemli bir akarsudur. Ayrıca Artos Dağı eteklerinden inen ve tarımsal sulamada kullanılan irili ufaklı dere yatakları mevcuttur. Yeraltı suyu seviyesi, göl kıyısındaki düzlüklerde, örneğin Gevaş Ovası, yüzeye yakınlık, proje sahasının bulunduğu

yüksek kesimlerde topoğrafyaya bağlı olarak derinleşmektedir.

Planlanan RES projesi, Gevaş ilçe merkezinin güneybatı yönünde, Artos Dağı'nın kuzey yamaçları üzerindeki sırt hatlarında yer almaktadır. Proje sahası, Van Gölü kıyısından kuş uçuşu yaklaşık 5 km uzaklıkta ve göl seviyesinden yaklaşık 2000 metre daha yüksek bir kotta konumlanmıştır.

Proje alanı içerisinde sürekli akış gösteren büyük bir akarsu veya doğal göl bulunmamaktadır. Ancak, topografik yapıya bağlı olarak yağışlı mevsimlerde ve kar erimeleri sırasında aktif hale gelen, yaz aylarında ise kuruyan mevsimlik dere yatakları mevcuttur. Türbin yerleşim noktaları, bu kuru dere yataklarının taşkın yatakları dışına ve sırt hatlarına yapıldığından, yüzeysel su akışına doğrudan bir müdahale söz konusu değildir. Proje sahasının Van Gölü'ne olan mesafesi ve işletme aşamasında işlem suyu kullanımı olmaması sebebiyle, projenin göl ekosistemi veya su kalitesi üzerinde olumsuz bir etkileşimi beklenmemektedir.

2.1.9 Benzeri Alanlar

Nüfusça Yoğun Alanlar ve Demografik Yapı:

Proje sahasının idari sınırları içerisinde yer aldığı Van İli, Doğu Anadolu Bölgesi'nin nüfus yoğunluğu ve ekonomik hareketlilik bakımından en önemli merkezlerinden biridir. Proje sahasının çevresinde doğrudan etkilenmesi muhtemel büyük ölçekli bir yerleşim birimi bulunmamakla birlikte, sosyo-ekonomik etki alanı Gevaş İlçesi ve ona bağlı kırsal mahalleleri kapsamaktadır.

Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) tarafından gerçekleştirilen Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi (ADNKS) sonuçlarına göre; Van İli'nin 2024 yılı toplam nüfusu 1.118.087 kişi olarak belirlenmiştir. Bu sayının 2025 yılında 1.120.572 kişi olması öngörmektedir. İlde kadın ve erkek nüfus oranları birbirine yakın seyretmekle birlikte (%50,94 Erkek - %49,06 Kadın), genç nüfus oranının Türkiye ortalamasının üzerinde olduğu dikkat çekmektedir. Van İli, 2014 yılında yürürlüğe giren 6360 sayılı kanun ile "büyükşehir" statüsü kazanmış, bu kapsamda köyler "mahalle" statüsüne dönüştürülmüştür. Bu idari değişiklik, kırsal ve kentsel nüfus analizlerinde dikkate alınması gereken bir husustur. Van İli ve Gevaş İlçesi'ne ait son yıllarda nüfus değişimi Tablo X'de verilmiştir.

Yıl	Van Nüfusu	Gevaş Nüfusu	Van Değişimi	Gevaş Değişimi
2020	1.149.342	28.242	-	-
2021	1.141.015	27.442	% -0,72	% -2,83
2022	1.128.749	26.918	% -1,08	% -1,91
2023	1.127.612	27.437	% -0,10	% +1,93
2024	1.118.087	26.597	% -0,84	% -3,06

Tablo X: Van İli ve Gevaş İlçesi'nin Yıllara Göre Nüfus Değişimi (Son 5 Yıl)]

Projenin uygulanacağı Gevaş İlçesinin nüfusu ise 2025 yılı için verileri açıklanmamış olsa da tahmini 26.339 kişi olacağı öngörlülmektedir. Gevaş, Van Gölü'nün güney kıyısında yer alması ve Artos Dağı eteklerine yaslanması nedeniyle dağınık bir yerleşim dokusuna sahiptir.

Söz konusu RES projesinin, yerleşim yerlerinden uzak, rüzgar potansiyeli yüksek sırt hatlarında kurulması planlanmaktadır. Proje sahasına en yakın yerleşim yeri, kuş uçuşu yaklaşık 2 km mesafede bulunan Pınarbaşı Mahallesi'dir. Mahalle yaklaşık 65-70 haneden oluşmakta olup, hane halkı büyülüğu bölge ortalaması olan 4,6 seviyelerindedir. Proje sahası ve yakın çevresindeki yerleşim birimlerinin konumu Şekil X'deki uydu haritası üzerinde gösterilmiştir



Şekil X: Proje Alanı ve En yakın Yerleşim Yerlerinin Uydu Haritası (Google Maps)

Göç Hareketleri: Van İli, özellikle 2011 yılında yaşanan depremler sonrasında ciddi bir demografik hareketlilik yaşamıştır. Ancak son yıllarda yapılan yeniden yapılanma çalışmaları ve teşvikler ile nüfus stabilizasyona girmiş, hatta çevre illerden göç almaya başlamıştır. Projenin inşaat aşamasında istihdam edilecek personelin bir kısmının yöre halkından sağlanacak olması, yerel ekonomiye ve nüfus hareketliliğine pozitif katkı sağlayacaktır.

Tarım ve Hayvancılık:

Van İli genelinde ekonomik yapı büyük ölçüde tarım ve hayvancılığa dayanmaktadır. İlin arazi varlığı incelendiğinde; çayır ve mera alanlarının geniş yer kapladığı görülmektedir. Gevaş İlçesi özelinde ise mikroklima özelliği gösteren kıyı kesimlerinde meyvecilik ve sebzecilik yapılırken, proje sahasının bulunduğu yüksek rakımlı kesimlerde kuru tarım ve hayvancılık hakimdir. Bölgedeki arazi kullanım durumu Tablo X'de özetlenmiştir.

Arazi Varlığı Sınıfı	Alan (Hektar)	Toplam Alana Oranı (%)
Tarım Alanı (İşlenen)	14.250	% 19,5
Çayır ve Mera Alanı	47.100	% 64,5
Orman ve Fundalık Alan	3.850	% 5,3
Tarım Dışı Alan (Yerleşim, Su yüzeyi vb.)	7.820	% 10,7
TOPLAM	73.020	% 100,0

Tablo X: Gevaş İlçesi Arazi Kullanım Durumu ve Dağılım

Proje alanı, 5403 sayılı "Toprak Koruma ve Arazi Kullanımı Kanunu" kapsamında değerlendirildiğinde, türbinlerin yerleştirileceği alanların büyük çoğunluğunun marjinal tarım arazisi ve mera vasfında olduğu görülmektedir. Tarım arazileri genellikle eğimin az olduğu vadi tabanlarında yoğunlaşmıştır.

Hayvancılık: Gevaş ekonomisinin bel kemiği hayvancılıktır. Özellikle küçükbaş hayvancılık, bölgenin step bitki örtüsüne uyum sağlamıştır. Rüzgar santralleri, diğer enerji santrallerinin aksine arazinin olatma amacıyla kullanılmasına engel teşkil etmez. İşletme döneminde türbin direklerinin çevresinde hayvan olatılmasına devam edilebilecektir.

Su Ürünleri:

Proje sahası, dünyanın en büyük sodalı gölü olan Van Gölü Havzası içerisindeindedir. Van Gölü ve onu besleyen akarsular, endemik inci kefali (*Alburnus tarichi*) için hayatı öneme sahiptir. Planlanan RES projesi göl kıyısından yaklaşık 5 km uzaklıkta ve rakım olarak göl seviyesinden yaklaşık 2000 metre yukarıda, dağlık kesimde yer almaktadır. Proje sahasında balık yetiştirciliğine uygun daimi bir su kaynağı bulunmamaktadır.

Tarihsel, Kültürel, Arkeolojik ve Benzeri Önemi Olan Alanlar:

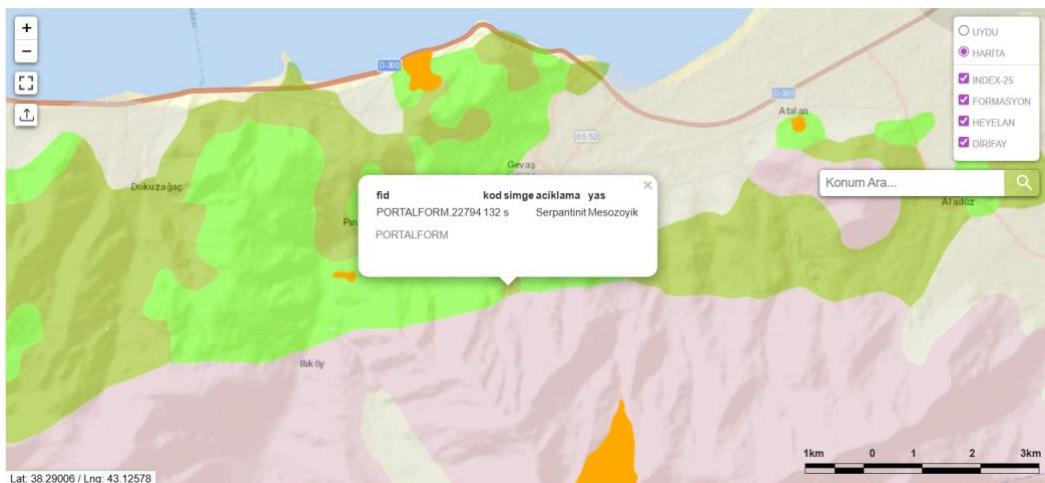
M.Ö.8-7 yüzyılları arasında Urartu Medeniyetinin başkenti Tuşpa olarak bilinen Van bölgesi, tarih boyunca pek çok medeniyete ev sahipliği yapmış zengin bir arkeolojik potansiyele sahiptir. Gevaş ilçesi sınırları içerisinde; Akdamar Adası, Halime Hatun Kümbeti gibi önemli eserler bulunmaktadır. Ancak, proje sahası olarak seçilen yüksek rakımlı arazide, 2863 sayılı Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Kanunu kapsamında tescillenmiş herhangi bir sit alanı bulunmamaktadır. Proje sahasının tescilli alanlara olan mesafesi Şekil X'te gösterilmiştir.



Şekil 2.3: Proje Sahası ve Çevresindeki Korunan Alanların Proje Sahasına Mesafesi

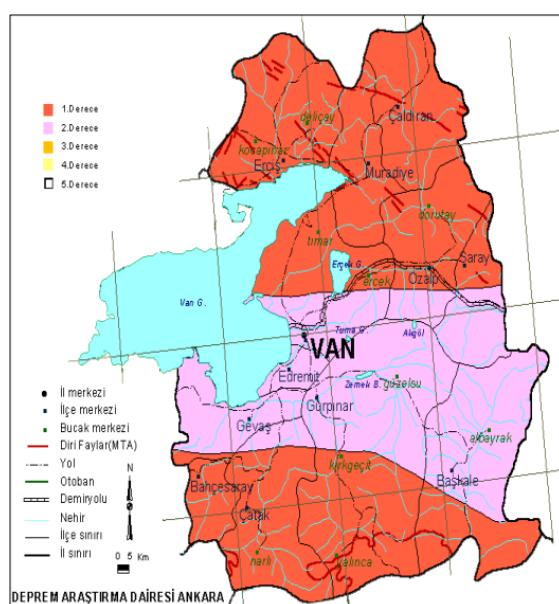
Erozyon, Heyelan ve Jeolojik Özellikler:

Proje sahası, Artos Dağı silsilesinin kuzey yamaçlarında yer almaktadır. Bölgenin genel jeomorfolojik yapısı ve bitki örtüsünün zayıf (step) olması, sahayı erozyona açık hale getirmektedir. Türbinlerin yerleştirileceği noktalar kütle hareketleri açısından risk taşımayan kayaç birimler üzerine konumlandırılmıştır. Bölgenin jeolojik yapısı Şekil X'te verilen jeoloji haritasında görülmektedir.



Şekil X: Proje Alanı ve Çevresi Jeoloji Haritası

Şekil X'e göre proje sahası ve çevresi 2. Derece Deprem Bölgesi (yüksek yer ivmesi riski) içerisinde yer almaktadır.



Şekil X: Van Deprem Tehlike Haritası (Turna, 2016)

Flora ve Fauna:

Flora (Bitki Örtüsü): Proje alanı, fitocoğrafik olarak İran-Turan bölgesi elementleri hakimdir. Sahada baskın olan türler Tablo X'te listelenmiştir.

Bilimsel Adı (Latince)	Türkçe Adı	Familya	Endemizm Durumu	IUCN Kategorisi*	Fitocoğrafik Bölge
<i>Astragalus gummifer</i>	Geven	Fabaceae	Hayır	LC (Düşük Risk)	İran-Turan
<i>Acantholimon acerosum</i>	Kardeşkani / Kardikeni	Plumbaginacea e	Endemik	LC	İran-Turan
<i>Gundelia tournefortii</i>	Kenger Otu	Asteraceae	Hayır	LC	İran-Turan
<i>Verbascum cheiranthifolium</i>	Sığırkuyruğu	Scrophulariacea e	Hayır	LC	İran-Turan
<i>Artemisia austriaca</i>	Yavşan Otu	Asteraceae	Hayır	LC	Geniş Yayılışlı
<i>Thymus kotschyanus</i>	Kekik	Lamiaceae	Hayır	LC	İran-Turan
<i>Poa bulbosa</i>	Yumrulu Salkım Otu	Poaceae	Hayır	LC	Geniş Yayılışlı
<i>Eryngium billardieri</i>	Boğadikeni	Apiaceae	Hayır	LC	İran-Turan
<i>Centaurea virgata</i>	Peygamber Çiçeği	Asteraceae	Hayır	LC	İran-Turan
<i>Salvia multicaulis</i>	Çok Gövdeli Adaçayı	Lamiaceae	Hayır	LC	İran-Turan

Tablo X: Proje Sahasında Tespit Edilen Baskın Flora Türleri (Behçet ve Kaval, 2017)

Fauna (Hayvan Varlığı): Bölge faunası, step ekosistemine uyum sağlamış türlerden oluşmaktadır. Bern Sözleşmesi Ek-II (Kesin Koruma Altına Alınan Fauna Türleri) ve Ek-III

(Korunan Fauna Türleri) listelerinde yer alan türler ve koruma statüleri Tablo X'te detaylandırılmıştır.

Sınıf (Classis)	Türkçe Adı	Bilimsel Adı (Latince)	IUCN Statüsü	Bern Sözleşmesi
Memeliler	Bozayı	<i>Ursus arctos</i>	LC (Düşük Risk)	Ek-II (Kesin Koruma)
Memeliler	Kurt	<i>Canis lupus</i>	LC (Düşük Risk)	Ek-II (Kesin Koruma)
Memeliler	Kızıl Tilki	<i>Vulpes vulpes</i>	LC (Düşük Risk)	-
Memeliler	Yaban Tavşanı	<i>Lepus europaeus</i>	LC (Düşük Risk)	Ek-III (Korunan)
Memeliler	Körfare	<i>Nannospalax nehringi</i>	DD (Yetersiz Veri)	-
Memeliler	Cüce Yarasa	<i>Pipistrellus pipistrellus</i>	LC (Düşük Risk)	Ek-II (Kesin Koruma)
Memeliler	Büyük Nalburlu Yarasa	<i>Rhinolophus ferrumequinum</i>	LC (Düşük Risk)	Ek-II (Kesin Koruma)
Memeliler	Uzun Ayaklı Yarasa	<i>Myotis capaccinii</i>	VU (Hassas)	Ek-II (Kesin Koruma)
Kuşlar	Kaya Kartalı	<i>Aquila chrysaetos</i>	LC (Düşük Risk)	Ek-II (Kesin Koruma)
Kuşlar	Kınalı Keklik	<i>Alectoris chukar</i>	LC (Düşük Risk)	Ek-III (Korunan)
Kuşlar	Kerkenez	<i>Falco tinnunculus</i>	LC (Düşük Risk)	Ek-II (Kesin Koruma)
Kuşlar	Küçük Akbaba	<i>Neophron percnopterus</i>	EN (Tehlikede)	Ek-II (Kesin Koruma)
Sürüngenler	Tosbağa	<i>Testudo graeca</i>	VU (Hassas)	Ek-II (Kesin Koruma)
Sürüngenler	Van Kertenkelesi	<i>Darevskia sapphirina</i>	LC (Düşük Risk)	Ek-III (Korunan)
Balıklar	İnci Kefali	<i>Alburnus tarichi</i>	NT (Neredeyse Tehdit Altında)	Ek-III (Korunan)

Tablo X: Bölgede Bulunan Fauna Türleri ve Koruma Statüleri (Bern/IUCN)

IUCN Kategorileri:

LC (Least Concern): Asgari Endişe (Yaygın tür)

VU (Vulnerable): Hassas (Doğada soyu tükenme riskine açık)

EN (Endangered): Tehlikede (Yüksek risk altında)

NT (Near Threatened): Neredeyse Tehdit Altında (Şu an tehlikede değil ama yakında olabilir)

Bern Sözleşmesi:

Ek-II: Kesin Koruma Altına Alınan Fauna Türleri (Avlanması, öldürülmesi kesinlikle yasak).

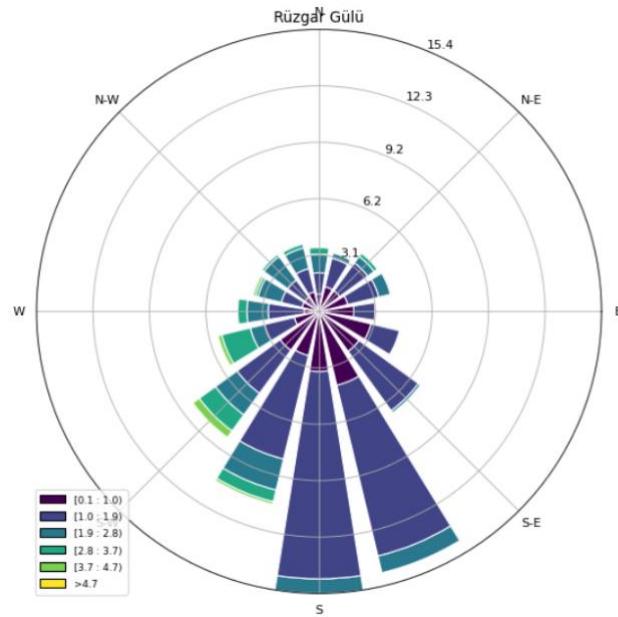
Ek-III: Korunan Fauna Türleri (Avlanması belli mevsimlerde ve kurallara bağlı olanlar).

Meteorolojik Özellikler:

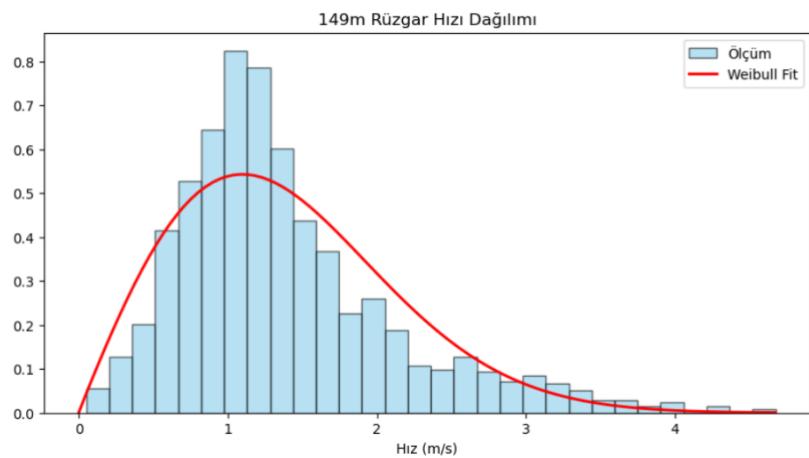
Proje sahasının meteorolojik karakteristiğinin ve rüzgar enerjisi potansiyelinin belirlenmesinde iki farklı veri kaynağı kullanılmıştır.

-Genel İklim Verileri: Bölgenin sıcaklık, basınç, nem ve yağış gibi genel klimatolojik parametreleri için Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) tarafından işletilen ve proje sahasını temsil kabiliyeti en yüksek olan Gevaş Meteoroloji İstasyonunun uzun yıllar (1980-2020) verilerinden yararlanılmıştır.

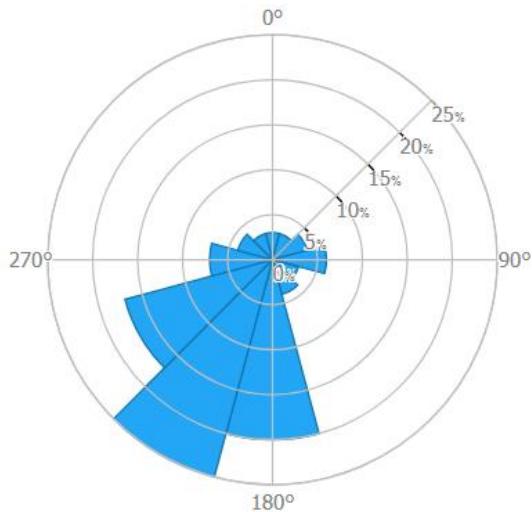
-Rüzgar Verileri: Proje sahasında yerinde ölçüm verisi bulunmadığından, rüzgar hızı ve yönü analizleri için Global Rüzgar Atlası (Global Wind Atlas - GWA 3.0) veritabanı ve Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA) verileri temel alınmıştır. Bu veri tabanları, yüksek çözünürlüklü atmosferik modeller kullanılarak oluşturulmuş olup, ön fizibilite çalışmalarında uluslararası kabul görmüş güvenilir veri setleridir.



Şekil X: Era5 Verisiyle Hazırlanmış Rüzgar Gülü Analizi



Şekil X: Rüzgar Hızı Dağılımı ve Weibull Parametreleri



Şekil X: Van Gevaş Sahası Rüzgar Gülü Diyagramı ve Hâkim Rüzgar Yönü (Global Wind Atlas, 2025)

Analizler, proje sahasının merkez koordinatları baz alınarak, türbin göbek yüksekliğine enterpolasyon yapılarak gerçekleştirilmiştir.

Genel iklim ve sıcaklık rejimi uzun yıllar verilerine göre bölgenin yıllık ortalama sıcaklığı yaklaşık $8,77^{\circ}\text{C}$ 'dir. Bölgeye ait uzun yıllık sıcaklık ve yağış verileri Tablo X'te sunulmuştur.

VAN	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Yıllık
Ölçüm Periyodu (1939 - 2024)													
Ortalama Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	-3,1	-2,4	1,7	7,9	13,2	18,3	22,3	22,3	17,9	11,4	5,0	-0,3	9,5
Ortalama En Yüksek Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	2,0	2,7	6,6	13,0	18,6	24,1	28,3	28,5	24,4	17,5	10,3	4,6	15,0
Ortalama En Düşük Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	-7,5	-7,0	-2,7	2,7	7,1	10,9	14,7	14,7	10,8	5,7	0,4	-4,4	3,8
Ortalama Güneşlenme Süresi (saat)	4,7	5,5	6,0	7,4	9,3	11,7	12,1	11,4	9,8	7,1	5,6	4,3	7,9
Ortalama Yağışlı Gün Sayısı	10,15	9,87	12,26	12,08	11,15	5,07	1,97	1,29	2,35	8,24	8,97	9,80	93,2
Aylık Toplam Yağış Miktarı Ortalaması (mm)	36,7	33,5	46,9	54,9	46,6	18,1	6,2	5,8	15,3	46,5	47,1	37,5	395,1
Ölçüm Periyodu (1939 - 2024)													
En Yüksek Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	12,6	14,3	22,7	27,2	29,3	33,5	37,5	36,7	35,0	28,8	20,1	15,5	37,5
En Düşük Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	-28,7	-28,2	-22,7	-13,1	-3,5	-2,6	3,6	5,0	-0,1	-14,0	-18,6	-21,3	-28,7

Tablo X: Van İli Uzun Yıllar Meteorolojik Verileri (1939- 2024) (MGM, 2025)

Rüzgar Yönü ve Hızı Proje sahasının rüzgar enerjisi potansiyeli analiz edilmiştir. Bölgedeki hakim rüzgar yönü güneydir.

Yüksek rakım nedeniyle hava yoğunluğu düşüktür. Ancak ölçülen ortalama rüzgar şiddeti 7,54 m/s olup, bu değer projeyi ekonomik açıdan uygulanabilir kılmaktadır.

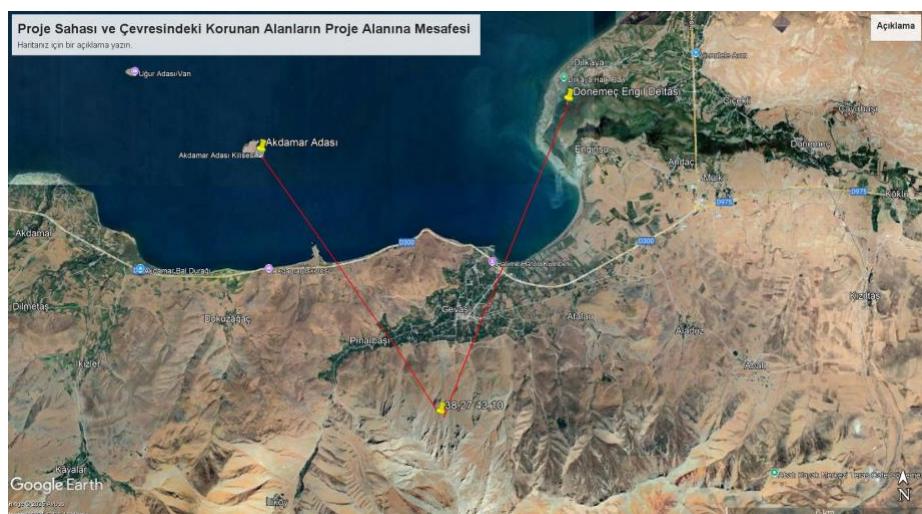
2.2 EK-XX'deki Duyarlı Yöreler Listesi Dikkate Alınarak Korunması Gereken Alanlar

Bu bölümde, proje sahası ve yakın çevresinin, ulusal mevzuat ve uluslararası sözleşmeler kapsamında koruma statüsüne sahip alanlara göre konumu irdelenmiştir.

2.2.1 Ülkemiz Mevzuatı Uyarınca Korunması Gerekli Alanlar:

a. Milli Parklar, Tabiat Parkları ve Tabiat Anıtları: 2873 sayılı Milli Parklar Kanunu'nun 2. ve 3. maddeleri uyarınca belirlenen "Milli Park", "Tabiat Parkı", "Tabiat Anıtı" ve "Tabiatı Koruma Alanı" statüsündeki sahalar, rüzgar türbinlerinin yerleştirileceği proje sahası içerisinde bulunmamaktadır.

Bölgedeki en önemli korunan alan statüsündeki yerler; proje sahasının kuş uçuşu yaklaşık 8 km kuzeyinde, Van Gölü içerisinde yer alan Akdamar Adası ve kuş uçuşu yaklaşık 9 km kuzeydoğusunda yer alan Dönemeç (Engil) Deltası sulak alanıdır. Artos Dağı ve çevresi, doğal peyzaj değeri yüksek bir alan olmakla birlikte, proje sahası resmi olarak ilan edilmiş bir milli park sınırları içerisinde kalmamaktadır. Proje sahasının korunan alanlara mesafesi Şekil X'da gösterilmiştir.



Şekil X: Proje Sahası ve Çevresindeki Korunan Alanların Proje Alanına Mesafesi

b. Yaban Hayatı Koruma ve Geliştirme Sahaları: Proje alanı, 4915 sayılı Kara Avcılığı Kanunu uyarınca belirlenen "Yaban Hayatı Koruma Sahaları" veya "Yaban Hayatı Geliştirme Sahaları" sınırları içerisinde yer almamaktadır. Ancak bölge, yaban keçisi ve bazı yırtıcı kuş türleri için potansiyel yaşam alanı niteliğindedir.

c. Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Kanunu Kapsamındaki Alanlar: Van İli ve Gevaş İlçesi, Urartu Medeniyeti başta olmak üzere pek çok tarihi uygarlığın izlerini taşımaktadır. 2863 sayılı Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Kanunu kapsamında yapılan literatür taraması ve yüzey incelemeleri neticesinde; türbinlerin kurulacağı yüksek rakımlı sırt hatları üzerinde tescilli herhangi bir 1., 2. veya 3. Derece Arkeolojik Sit Alanı bulunmadığı tespit edilmiştir.

Proje sahasına en yakın kültür varlığı, Gevaş ilçe merkezinde bulunan tarihi Selçuklu Mezarlığı ve Halime Hatun Kümbeti olup, bu alanlar proje sahasına kuş uçuşu yaklaşık 4,5 km mesafededir ve projenin etki alanı dışındadır. Akdamar Adası'ndaki Kutsal Haç Kilisesi ise proje sahasından net bir şekilde görülebilmekle birlikte, fiziksel bir etkileşim söz konusu değildir. Proje kapsamında yürütülecek hafriyat çalışmaları sırasında herhangi bir taşınır veya taşınmaz kültür varlığına rastlanması durumunda, çalışmalar derhal durdurulacak ve Van Müze Müdürlüğü bilgilendirilecektir.

d. Su Ürünleri İstihsal ve Üreme Sahaları: 1380 sayılı Su Ürünleri Kanunu kapsamında; Van Gölü ve göle dökülen akarsular (Dönemeç Çayı vb.) endemik İnci Kefali (Alburnus tarichi) türünün üreme ve yaşam alanıdır. Proje sahası içerisinde sürekli akış gösteren bir akarsu bulunmamaktadır. Ancak, sahada oluşabilecek erozyonun dere yataklarını doldurarak aşağı havzadaki üreme alanlarını etkilememesi için inşaat aşamasında gerekli sediment kontrol önlemleri (sediment tutucu bariyerler vb.) alınacaktır.

e. Orman ve Mera Kanunu Kapsamındaki Alanlar:

Orman Alanları: Proje sahası, orman rejimi içerisinde yer alan verimli orman alanlarını kapsamamaktadır. Ancak 6831 sayılı Orman Kanunu'na tabi bozuk orman veya makilik alanlar varsa, gerekli izinler Orman Genel Müdürlüğü'nden alınacaktır.

Mera Alanları: 4342 sayılı Mera Kanunu proje sahası için en kritik mevzuattır. Proje sahasının büyük bir bölümü, bölge halkı tarafından yaylak olarak kullanılan mera vasıflı arazilerdir. Bu alanlarda enerji yatırımı yapılabilmesi için Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) ve Tarım ve Orman İl Müdürlüğü nezdinde "Tahsis Amacı Değişikliği" işlemleri yürütülecektir.

f. Diğer Kanun ve Yönetmelikler:

Kıyı Kanunu: Proje sahası Van Gölü kıyı kenar çizgisinden yaklaşık 5 km içerisinde yer aldığından, 3621 sayılı Kıyı Kanunu kapsamında bir kısıtlama bulunmamaktadır.

Sulak Alanlar: Proje sahası "Sulak Alanların Korunması Yönetmeliği"nde belirtilen alanlar içerisinde değildir. Ancak Van Gölü Havzası bir bütün olarak değerlendirildiğinde, proje sahasından kaynaklı atıksuların veya kirleticilerin havzaya ulaşmaması için sızdırmaz fosseptik uygulamaları yapılacaktır.

2.2.2 Ülkemizin Taraf Olduğu Uluslararası Sözleşmeler Uyarınca Korunması

Gerekli Alanlar:

a. **BERN Sözleşmesi (Avrupa'nın Yaban Hayatı ve Yaşama Ortamlarını Koruma Sözleşmesi):** Proje sahası, BERN Sözleşmesi uyarınca koruma altına alınan bazı kuş ve memeli türlerinin habitatı ile örtüşebilmektedir. Van Gölü Havzası, göçmen kuşlar için önemli bir güzergahtadır. Proje sahasında Bern Sözleşmesi Ek-II (Kesin Koruma Altına Alınan Türler) listesinde yer alan yırtıcı kuşların (Kartal, Şahin vb.) çarşıma riskini minimize etmek için türbin yerleşimlerinde "tampon bölge" bırakılmasına dikkat edilmiştir.

b. **RAMSAR Sözleşmesi (Sulak Alanlar):** Proje sahası içerisinde RAMSAR alanı bulunmamaktadır. Bölgedeki en yakın potansiyel RAMSAR alanı niteliğindeki yerler Van Gölü kıyıları ve Erçek Gölü'dür. Proje sahasının bu alanlara olan uzaklığı nedeniyle doğrudan bir olumsuz etkisi öngörülmemektedir.

c. **Dünya Kültür ve Tabiat Mirası (UNESCO):** Van Kalesi ve Akdamar Kilisesi,

UNESCO Dünya Mirası Geçici Listesi'nde yer almaktadır. Proje sahası, bu varlıkların "koruma bandı" veya "görsel etki alanı" içerisinde olumsuz bir silüet oluşturmayacak mesafededir.

2.2.3 Korunması Gereken Alanlar

- a. Tarım Alanları: 5403 sayılı “Toprak Koruma ve Arazi Kullanımı Kanunu” çerçevesinde; türbinlerin yerleştirileceği alanlar büyük oranda tarım dışı alanlar (VII. ve VIII. sınıf araziler) ve meralardan oluşmaktadır. Vadi tabanlarında yer alan I. ve II. sınıf sulu tarım arazilerine türbin yerleşimi yapılmamıştır.
- b. İçme ve Kullanma Suyu Koruma Alanları: Proje sahası, Gevaş ilçesinin içme suyu ihtiyacını karşılayan Pınarbaşı kaynağının mutlak veya kısa mesafeli koruma kuşağı içerisinde yer almamaktadır. Yeraltı suyu beslenim alanlarına zarar vermemek adına, türbin temellerinde kullanılacak betonun yeraltı suyuna karışmasını önleyici yalıtım tedbirleri alınacaktır.
- c. Biyogenetik Rezerv Alanları: Bölgede resmi olarak ilan edilmiş bir biyogenetik rezerv bulunmamaktadır. Ancak Van Gölü Havzası'nın kendine özgü floristik yapısı nedeniyle, inşaat öncesinde endemik bitki türlerinin tespiti için detaylı flora çalışmaları yapılması taahhüt edilmektedir.

Bölüm 3: PROJENİN İNŞAAT VE İŞLETME AŞAMASINDA ÇEVRESEL ETKİLERİ VE ALINACAK ÖNLEMLER

25.11.2014 tarih ve 29186 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanan Çevresel Etki Değerlendirmesi (CED) Yönetmeliği hükümleri uyarınca; projenin "CED Olumlu" veya "CED Gerekli Değildir" kararı alınmasının ardından, taahhüt edilen hususların yerine getirilip getirilmediği ilgili Bakanlık ve Valilik birimlerince izlenmektedir.

Bu kapsamda, Van Gevaş Rüzgar Enerji Santrali (RES) projesi için proje sahibi, karar aşamasından sonraki başlangıç, inşaat, işletme ve işletme sonrası süreçlerde yürütülecek faaliyetlerin ulusal çevre mevzuatına uygunluğunu taahhüt eder. Projenin çevresel etkilerinin izlenmesi ve kontrolü amacıyla hazırlanacak raporlar, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'na ve Van Valiliği'ne sunulacaktır.

3.1 İnşaat Aşaması

Projenin inşaat aşamasında çevre üzerinde oluşabilecek toz, gürültü, atık gibi olumsuz etkilerin asgari seviyede tutulması temel hedeftir. İnşaat süresi boyunca sahadaki tüm faaliyetler, ilgili çevre mevzuatı, yönetmelik ve tüzüklerde tam uyum çerçevesinde yürütülecektir. Bu süreçte dikkat edilecek temel hususlar şunlardır:

Hafriyat ve Atık Yönetimi: Kazı ve inşaat çalışmaları sırasında oluşan hafriyat atıklarına yönelik tüm uygulamalarda, "Hafriyat Toprağı, İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği" hükümlerine riayet edilecektir.

Bitkisel Toprağın Korunması: Türbin temelleri ve yollar için yapılacak kazılarda yüzeyden sıyrılan verimli bitkisel toprak, saha içerisinde belirlenen ayrı bir alanda üzeri kapatılarak muhafaza edilecektir. Bu toprak, inşaat bitiminde proje alanı içerisinde peyzaj ve rehabilitasyon çalışmaları için kullanılacaktır.

Gürültü Takibi: İnşaat aşamasında iş makinelerinden kaynaklı gürültü etkilerinin sınır değerleri aşmaması için düzenli kontroller yapılacaktır. Gürültü seviyesinin "Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği"nde belirtilen sınır değerleri aşmaması için gerekli önlemler alınacaktır.

3.2 İşletme Aşaması

Van Gevaş RES projesinin işletmeye alınmasıyla birlikte, öncelikle fosil yakıt tüketimini azaltarak sera gazı emisyonlarının ve karbon ayak izinin düşürülmesi yönünde pozitif bir çevresel etki yaratılması hedeflenmiştir. Proje, işletme süresi boyunca atmosfere karbondioksit salımı yapmayarak iklim değişikliği ile mücadeleye doğrudan katkı sağlayacaktır.

Bununla birlikte, oluşabilecek diğer çevresel etkiler, modern türbin teknolojileri ve uygun yer seçimi çalışmaları ile minimize edilmiştir. İşletme aşamasında öngörülen temel etkileşim başlıklarını şunlardır:

- Türbinlerin çalışması kaynaklı ses düzeyi
- Radyo, TV ve radar sistemlerinde olası parazit etkileri
- Elektromanyetik alan etkisi

- Görsel etki ve arazi kullanımı
- Kuş göç yolları takibi

3.2.1 Ses Düzeyi

Rüzgar türbinlerinin işletilmesi sırasında oluşan çevresel gürültü, temel olarak mekanik ve aerodinamik olmak üzere iki ana kaynaktan meydana gelmektedir. Mekanik gürültü; dişli kutusu, jeneratör ve soğutma fanları gibi hareketli aksamlardan kaynaklanırken, aerodinamik gürültü kanatların hava ile etkileşimi ve dönüşü sırasında oluşan hava akımı turbülansından kaynaklanmaktadır.

Günümüz rüzgar enerjisi teknolojisinde kullanılan modern türbinler, üretikleri enerji kapasitesine oranla oldukça düşük gürültü emisyonuna sahiptir. Mekanik gürültü, tasarım aşamasında nacelle içeresine uygulanan akustik izolasyon malzemeleri ve titreşim sönmleyici takozlar kullanılarak kaynağında minimize edilmektedir. Aerodinamik gürültü ise kanat ucu hızlarının optimize edilmesi ve kanat profillerinin gürültüyü azaltacak şekilde tasarılanması ile kontrol altına alınmaktadır.

Gevaş RES projesi kapsamında yapılan gürültü modelleme çalışmalarında, sahadaki rüzgar yönü, topografik yapı ve yerleşim yerlerine olan mesafeler dikkate alınmıştır. Proje sahasına en yakın yerleşim birimi, santral alanının Kuzeybatı yönünde ve kuş uçuşu yaklaşık 2000 metre mesafede bulunan Pınarbaşı Mahallesi'dir.

Yapılan hesaplamalar neticesinde, en yakın yerleşim yerinde hissedilecek ses düzeyinin yaklaşık 22 dBA aralığında olacağı öngörlmektedir. Bu değer, Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği'nde belirtilen; gürültüye hassas kullanıcılar için tanımlanan sınır değerlerin altında kalmaktadır. Bu bağlamda, Van Gevaş RES projesinin işletme aşamasında tüm türbinlerin tam kapasite ile çalıştığı senaryoda dahi, çevredekilerde insan sağlığını veya konforunu olumsuz etkileyebilecek bir gürültü kirliliği oluşması beklenmemektedir.

3.2.2 Alıcılarda Parazit

Radyo, televizyon ve telekomünikasyon sinyallerinin, verici ve alıcı arasındaki engellerden etkilendiği fiziksel bir gerçekdir. Rüzgar türbinlerinde hareket halindeki kanatlar, sinyallerin yansımmasına veya saptırılmasına neden olarak teorik bir parazit riski

oluşturabilmektedir.

Ancak, Van Gevaş RES projesinde kullanılması planlanan modern rüzgar türbinlerinin kanatları, elektromanyetik dalgaları geçirme özelliğine sahip sentetik ve kompozit malzemelerden üretilmektedir. Metal bileşen içermeyen bu kanat yapısı sayesinde, sinyal yansımıası problemi ihmali edilebilir düzeye indirilmiştir.

Ayrıca proje sahası belirlenirken, bölgedeki mevcut radar hatları, radyo link güzergahları ve baz istasyonları dikkate alınmıştır. Konuya ilgili olarak ilgili kamu kurumlarından (Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu, Devlet Hava Meydanları İşletmesi) gerekli kurum görüşleri alınacak olup, elektronik haberleşme sistemlerinin performansını etkileyebilecek herhangi bir olumsuz durumun önüne geçilmesi hedeflenmektedir.

3.2.3 Elektromanyetik Alan Etkisi

Rüzgar türbinlerinde elektromanyetik alan oluşturma potansiyeline sahip ana bileşenler; kulenin tepesindeki jeneratör ve kulenin tabanında veya hemen yanında bulunan güç transformatörleridir.

Rüzgar türbinlerinin yaydığı elektromanyetik alan (EMF) oldukça zayıftır ve kaynaktan uzaklaşılıkça hızla sönmektedir. Projede kullanılacak türbinlerin göbek yüksekliği yer seviyesinden yaklaşık 150 metre yukarıdadır. Bu mesafe, jeneratör kaynaklı manyetik alanın zemin seviyesinde herhangi bir etki yaratmasını imkansız kılmaktadır.

Zemin seviyesinde bulunan trafo ve elektrik bağlantı üniteleri ise uluslararası standartlara uygun olarak izole edilmekte ve güvenlik kafesleri ile çevrelenmektedir. Güvenlik çitleri, elektromanyetik etkinin tamamen sönmendiği mesafeye yerleştirilecektir. Dolayısıyla, Van Gevaş RES sahasında işletme personeli veya yöre halkı için elektromanyetik radyasyona maruz kalma riski bulunmamaktadır ve bu konuda insan sağlığını tehdit edecek bir unsur söz konusu değildir.

3.2.4 Kuş Göç Yolları

Rüzgar enerji santrallerinin yer seçimi aşamasında en kritik parametrelerden biri olan kuş göç yolları, proje sahasının Van Gölü Havzası gibi ekolojik açıdan hassas bir

biyocoğrafyada yer alması nedeniyle detaylıca irdelenmiştir. Proje sahası, Artos Dağı'nın kuzey yamaçları ile Van Gölü güney kıyıları arasındaki koridorda yer almaktadır. Literatür taramaları ve saha gözlemleri; bölgenin ana bir "göç darboğazı" olmamakla birlikte, ikincil geçiş rotaları ve günlük beslenme uçuşları açısından önem taşıdığını göstermektedir

Özellikle Erçek Gölü, Göründü Sazlıklarını ve Gevaş kıyı deltaları gibi sulak alanlar, göçmen kuşlar için hayatı mola noktalarıdır. Bölgede yapılan gözlemlerde; Flamingo (*Phoenicopterus roseus*), Angıt (*Tadorna ferruginea*), Sakarca Kazı ve çeşitli kıyı kuşlarının (*Charadriiformes*) mevsimsel hareketliliği tespit edilmiştir. Ayrıca Artos Dağı yamaçlarında oluşan termal hava akımları, Şahin, Kızıl Şahin ve Atmaca gibi süzülen yırtıcı kuşlar tarafından enerji tasarrufu sağlamak amacıyla kullanılmaktadır (Doğa Araştırmaları Derneği, t.y.).



Şekil X. Kuş Göç Yolları (Kantarcı, Ertan, 2025)

Bu kapsamda, Doğa Koruma ve Milli Parklar Genel Müdürlüğü (DKMP) hassasiyetleri ve Bern Sözleşmesi yükümlülükleri doğrultusunda projemizde şu önlemlerin alınması taahhüt edilmiştir. (Bern Sözleşmesi, 1984; DKMP, 2023):

1-Aktif Radar Sistemi ve Şartlı Durdurma: Standart gözlem yöntemlerine ek olarak, proje sahasına kuş tespit radarı kurulacaktır. Bu sistem, özellikle sisli havalarda ve gece uçuşlarında sürünlere ait hareketleri tespit ederek SCADA sistemine sinyal gönderecek ve riskli geçiş anlarında türbinlerin otomatik olarak durdurulmasını sağlayacaktır

2-İzleme Çalışmaları: Santral işletmeye alındıktan sonra, ilk 2 yıl boyunca (ilkbahar ve sonbahar göç dönemlerinde) uzman ornitologlar eşliğinde kuş ölümleri ve çarpışma izleme

çalışması (Carcass Monitoring) yürütülecek ve 6 aylık periyotlarla DKMP İl Şube Müdürlüğü'ne raporlanacaktır.

3-Görünürlük: Türbin kanat uçları, görünürlüğü artırmak amacıyla uluslararası havacılık ve çevre standartlarına uygun olarak (kırmızı/turuncu) işaretlenecektir (Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü, 2018).

3.2.5 Görsel Etki

Rüzgar türbinleri, yapısal özellikleri gereği uzak mesafelerden algılanabilen endüstriyel yapılardır. Van RES projesi, Artos Dağı'nın kuzey yamacında, yaklaşık 2.200 metre kotunda planlanmıştır. Proje alanına en yakın yerleşim birimleri olan Gevaş İlçe Merkezi ve kıyı şeridindeki mahalleler ile proje sahası arasında yaklaşık 2.000 metre yatay mesafe ve 500 metreden fazla dikey kot farkı bulunmaktadır. Bu mesafe ve yükseklik farkı, türbinlerin yerleşim yerleri üzerindeki baskın görsel etkisini azaltmaktadır.

Bölgemin en önemli turizm değeri olan Akdamar Adası ve Kilisesi açısından yapılan görsel etki analizi sonucunda türbinlerin adanın tarihi siluetini doğrudan bölen bir hatta yer almazı, adanın güneyindeki dağ silsilesinin sırt hattında, gökyüzü ile bütünleşik bir görünüm sergileyeceği belirlenmiştir.

3.2.6 Arazi Kullanımı

Rüzgar Enerji Santralleri , konvansiyonel enerji üretim tesisleri ile kıyaslandığında, birim enerji başına ihtiyaç duyduğu fiziksel ayak izi bakımından en verimli teknolojilerden biridir. Projenin ruhsat sahası harita üzerinde geniş bir yüzölçümünü kapsıyor gibi görünse de; bu alanın büyük bir kısmı rüzgarın serbest dolaşımı için bırakılan tampon bölge niteliğindedir. Türbin temelleri, şalt sahası ve ulaşım yolları gibi kalıcı yapıların fiilen işgal edeceği alan, toplam proje sahasının sadece %1-2'lik çok küçük bir bölümüne tekabül etmektedir. Dolayısıyla arazinin geri kalan %98'lik kısmı, mevcut doğal dokusunu korumaya devam edecktir. (Denholm vd., 2009)

Bölge halkının geçim kaynakları açısından kritik öneme sahip olan tarım ve hayvancılık faaliyetleri, projemizle bir çatışma değil, birlikte var olma prensibiyle yürütülecektir. Proje

sahasının yaylak ve mera olarak kullanılan kısımlarında; sadece inşaat dönemindeki yoğun iş makinesi trafiği ve kazı çalışmaları sırasında, can ve mal güvenliğini sağlamak amacıyla geçici kısıtlamalara gidilecektir. Türbinlerin montajı tamamlanıp tesis işletmeye alındıktan sonra ise, yalnızca türbin kulelerinin tabanına denk gelen alanlar tel çitle çevrilecek, bunun dışındaki tüm mera alanları tekrar yöre halkın ve hayvanların kullanımına açılacaktır. Rüzgar türbinlerinin çalışması, hayvanların olatılmasına fiziksel veya kimyasal hiçbir engel teşkil etmemektedir.

Ayrıca, inşaat sürecinde servis yolları açılırken oluşacak şevler ve kazı alanları kaderine terk edilmeyecektir. Projenin inşaat sonrası aşamasında, erozyon riskini önlemek ve meranın bitkisel bütünlüğünü korumak amacıyla, kazı alanları bölgenin doğal florasına uygun tohumlama yöntemiyle rehabilite edilecektir. Bu kapsamda uygulanacak temel onarım stratejisi Tablo X'te özetlenmiştir.

Müdahale Alanı	Olası Sorun	Onarım Yöntemi	Kullanılacak Bitki Türü
Türbin Temel Çevresi	Toprak kaybı, görsel kirlilik	Nebati toprağın geri serilmesi ve çimleme	Poa bulbosa (Salkım Otu) ve Çayır karışımı
Servis Yolu Şevleri	Erozyon, şev kayması	Püskürtme çim veya Teraslama	Astragalus sp. (Geven) - Kök yapısı toprağı tutar
Şantiye Alanı	Toprak sıkışması	Toprağın havalandırılması (Sürüm)	Thymus sp. (Kekik) ve yerel step bitkileri

Tablo X: Temel Onarım Stratejisi

Bölüm 4: EKONOMİK ANALİZ VE FİNANSAL YAPI

Bu bölümde, Van İli, Gevaş İlçesi sınırları içerisinde, Artos Dağı mevkiinde tesis edilmesi planlanan Van Gevaş Rüzgar Enerji Santrali (RES) projesinin ekonomik yapılabilitiği, yatırım maliyetleri ve finansman kaynakları irdelenmiştir. Projenin ulusal ve yerel ekonomiye olan katkıları, 5346 sayılı Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun ve ilgili mevzuat hükümleri çerçevesinde, Türk

Lirası (TL) bazında gerçekleştirilen analizlerle değerlendirilmiştir (Resmi Gazete, 2005). Ayrıca bölgenin enerji potansiyeli değerlendirilirken Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası verileri esas alınmıştır (ETKB, 2024).

4.1 Yenilenebilir Enerji Destekleme Mekanizması (YEKDEM) ve Yerli Aksam Kullanımı

Türkiye'nin enerji arz güvenliğinin sağlanması stratejisi doğrultusunda, proje kapsamında üretilen elektrik enerjisi YEKDEM kapsamında değerlendirilecektir (EPDK, 2025). Santralde kullanılacak elektromekanik ekipmanların (türbin, jeneratör, kanat vb.) yurt içinden tedarik edilmesi durumunda, "Yerli Aksam Desteği" uygulamasından faydalанılması planlanmaktadır (Resmi Gazete, 2013).

Projenin ekonomik analizinde aşağıdaki hususlar esas alınmıştır:

- Mevzuat Uyumu: Projede yerli aksam kullanılması durumunda, ilgili yönetmeliklerde belirtilen birim fiyatlar üzerinden TL bazında ilave tarife geliri elde edilecektir (EPDK, 2025).
- Ekonomik Katkı: Yerli ekipman kullanımı ile yatırımin geri dönüş süresinin kısalacağı ve projenin iç karlılık oranının artacağı öngörmektedir. Bu durum, sektördeki benzer proje örnekleriyle de tutarlılık göstermektedir (TÜREB, 2024).
- Stratejik Hedefler: Yerli teknoloji kullanımının teşvik'i ile ithalat kalemlerinin azaltılması ve yerel sanayiye katma değer sağlanması hedeflenmektedir.

4.2 Yatırım Maliyetleri ve Proje Giderleri

Projenin toplam sabit sermaye yatırım tutarı; arazi hazırlığı, inşaat işleri, türbin ve elektromekanik teçhizat tedariki, enerji nakil hattı tesisi, ulaşım yolları ve proje geliştirme giderlerini kapsamaktadır.

Yatırım bütçesi oluşturulurken aşağıdaki parametreler dikkate alınmıştır:

- Tüm maliyet kalemleri, projenin gerçekleştirileceği dönemdeki piyasa koşulları ve birim fiyatlar baz alınarak Türk Lirası (TL) cinsinden hesaplanmıştır.
- Yatırım süreci boyunca oluşabilecek enflasyonist etkiler ve fiyat artışları, maliyet

analizlerinde risk faktörü olarak değerlendirilmiş ve beklenmedik giderler (contingency) bütçeye dahil edilmiştir.

- Projenin işletmeye alınmasıyla birlikte oluşacak işletme ve bakım (O&M) giderleri, yıllık sabit ve değişken maliyetler olarak nakit akış tablolarına yansıtılmıştır.

4.3 Karbon Azaltımı ve Çevresel Fayda Analizi

Projenin hayata geçirilmesiyle, fosil yakıtlı santrallerden üretilen elektriğin ikame edilmesi ve buna bağlı olarak sera gazı emisyonlarının azaltılması sağlanacaktır. Bu kapsamında elde edilecek çevresel faydalar, Gönüllü Karbon Piyasaları nezdinde ticari bir değere dönüştürülecektir (İklim Değişikliği Başkanlığı, 2025).

- Emisyon Azaltımı: Proje ömrü boyunca engellenecek CO₂ emisyon miktarı hesaplanmış olup, bu azaltım "Doğrulanmış Karbon Birimi" (Verified Carbon Standard - VCS veya Gold Standard) olarak sertifikalandırılacaktır.
- Ekonomik Değer: Sertifikalandırılan karbon kredilerinin satışı ile elektrik satış gelirlerine ek olarak, TL karşılığı yan gelir akışı oluşturulması ve projenin ekonomik fizibilitesine katkı sağlanması planlanmaktadır.

4.4 Finansman Kaynakları ve Yapısı

Projenin finansmanı, yatırımcı firmanın özkaynakları ve finans kuruluşlarından temin edilecek uzun vadeli krediler ile karşılaşacaktır. Finansman modeli oluşturulurken projenin nakit yaratma kapasitesi ve borç servis karşılama oranları dikkate alınmıştır (EPDK, 2025).

- Sermaye Yapısı: Yatırım tutarının belirli bir oranı Özkaynak, kalan kısmı ise Dış Kaynak (Kredi) şeklinde finanse edilecektir.
- Kredi Koşulları: Projenin gelir yapısının TL olması sebebiyle, kur riskinin bertaraf edilmesi amacıyla TL cinsinden veya TL referans faizine endeksli kredi kullanımı öngörlülmüştür.

4.5 Sigorta ve Risk Yönetimi

Yatırımin ve işletme döneminin finansal sürdürülebilirliğini teminen, risk yönetimi kapsamında gerekli sigorta poliçeleri düzenlenecektir.

- İnşaat Dönemi: İnşaat Tüm Riskler (All Risk) Sigortası.
- İşletme Dönemi: Makine Kırılması, Yangın, Doğal Afetler ve Kâr Kaybı (İş Durması) Sigortaları. Bu sigortalar ile olası hasar durumlarında oluşacak maddi kayıpların ve gelir kayıplarının tazmin edilmesi hedeflenmektedir.

4.6 Mali Analiz ve Karlılık Göstergeleri

Projenin ekonomik ömrü boyunca sağlayacağı nakit girişleri ve çıkışları, İskontolanmış Nakit Akışı (DCF - Discounted Cash Flow) yöntemi ile analiz edilmiştir. Analizlerde Türk Lirası (TL) bazlı veriler kullanılmıştır.

4.6.1. Yıllık Gelir Projeksiyonu

Yıllık brüt gelir, santralin net elektrik üretimi ile YEKDEM mekanizması çerçevesinde belirlenen güncel satış fiyatının çarpımı sonucu elde edilmektedir (Resmi Gazete, 2005).

Hesaplama Formülü:

$$\text{Yıllık Gelir (TL)} = \text{Net Üretim (kWh)} \times [\text{YEKDEM Fiyatı (TL/kWh)} + \text{Yerli Aksam İlavesi (TL/kWh)}]$$

Net üretim hesabı ise şu şekildedir:

$$\text{Net Üretim (kWh)} = \text{Kurulu Güç (MW)} \times 8760 \text{ (Saat)} \times \text{Kapasite Faktörü}$$

4.6.2. Toplam Yatırım Tutarı (CAPEX)

Projenin toplam ilk yatırım maliyeti aşağıdaki formülasyon ile özetlenmektedir:

$$\text{Toplam Yatırım (TL)} = (\text{Kurulu Güç [MW]} \times \text{Birim Maliyet [TL/MW]}) + \text{Diğer Yatırım Giderleri}$$

4.6.3. Net Bugünkü Değer (NBD) Analizi

Projenin ekonomik verimliliğinin tespiti amacıyla, gelecekteki nakit akışlarının sermaye maliyeti oranıyla bugüne indirgenmiş değeri hesaplanmıştır.

Formül:

$NBD = \text{Toplam } [\text{Yıllık Net Nakit Akışı} / (1 + \text{İskonto Oranı})^{\text{Yıl}}] - \text{Başlangıç Yatırım Tutarı}$

Burada:

Net Nakit Akışı: Gelirler - (Giderler + Vergiler)

İskonto Oranı: TL bazlı sermaye maliyeti

Yıl: Projenin ekonomik ömrü süresince geçen yıllar (t)

4.6.4. Geri Ödeme Süresi (Payback Period)

Yatırımın kendini amorti etme süresi, toplam yatırım maliyetinin yıllık ortalama net nakit akışına bölünmesi suretiyle hesaplanmıştır.

Geri Ödeme Süresi (Yıl) = $\text{Toplam Yatırım Tutarı (TL)} / \text{Yıllık Ortalama Net Nakit Akışı (TL)}$

Bu analiz sonucunda projenin ekonomik açıdan yapılabılır olduğu belirlenmiştir.

Bölüm 5: Rüzgâr Şiddeti Zaman Serilerinde Eksik Veri Tamamlama Analizi

5.1 Veri Setinin Tanımı

Bu çalışmada kullanılan veri seti, Van Gevaş bölgesi için 1 Ocak 2021 – 31 Aralık 2022 tarihleri arasında 30 dakikalık zaman çözünürlüğünde ölçülmüş meteorolojik gözlemlerden oluşmaktadır. Veri seti toplam 35.047 satır ve 14 değişken içermekte olup; rüzgâr şiddeti, rüzgâr yönü ve sıcaklık parametreleri 10 m, 50 m, 75 m ve 100 m yükseklik seviyeleri için sağlanmaktadır.

Zaman bilgisi içeren time değişkeni, sabit tarih formatı (%d-%m-%Y_%H:%M:%S) kullanılarak yeniden ayrıstırılmıştır. Biçim uyuşmazlığı nedeniyle parse edilemeyen 7 satır, analiz bütünlüğünü bozmamak amacıyla veri setinden çıkarılmıştır. Bu işlem sonrasında analizler 35.040 satır üzerinden gerçekleştirılmıştır. Veri setinin zaman çözünürlüğü 30 dakika, toplam kapsadığı süre ise yaklaşık 730 gün olarak hesaplanmıştır.

5.2 Eksik Veri Yapısının İncelenmesi

Çalışmanın ana hedef değişkenleri olan 75 m ve 100 m rüzgâr şiddeti serilerinde anlamlı düzeyde eksik veri bulunduğu tespit edilmiştir. 75 m rüzgâr şiddeti serisinde 3464 gözlem (%9.89), 100 m rüzgâr şiddeti serisinde ise 5158 gözlem (%14.72) eksiktir.

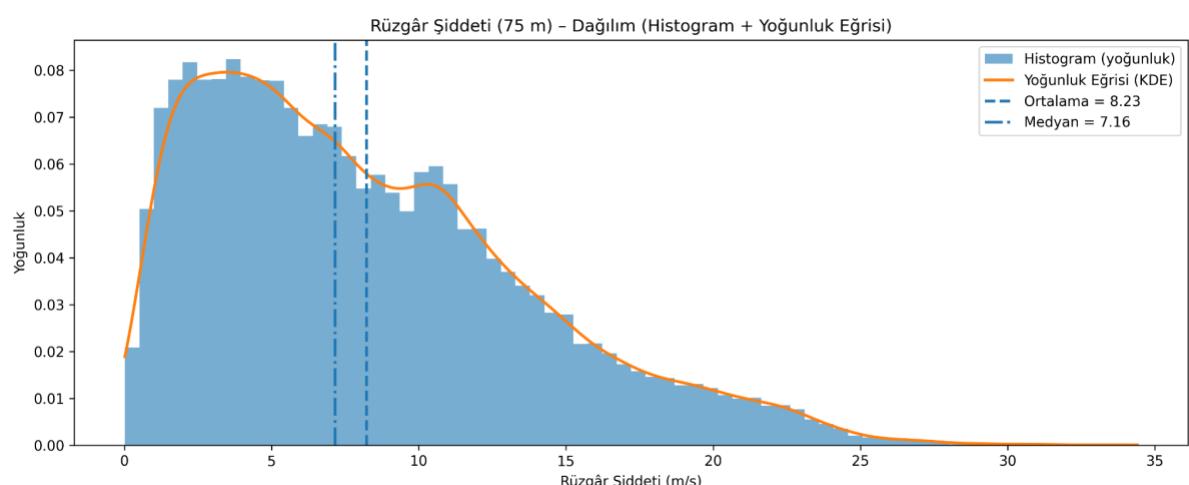
Eksik veriler yalnızca rastgele dağılmamış; aksine uzun süreli ardışık bloklar halinde kümelenmiştir. Eksik blok analizi sonuçlarına göre:

- 75 m rüzgâr şiddeti için 39 adet eksik blok bulunmakta olup, en uzun eksik blok 1322 örnek uzunluğundadır.
- 100 m rüzgâr şiddeti için 212 adet eksik blok tespit edilmiş, en uzun eksik blok uzunluğu 540 örnek olarak hesaplanmıştır.

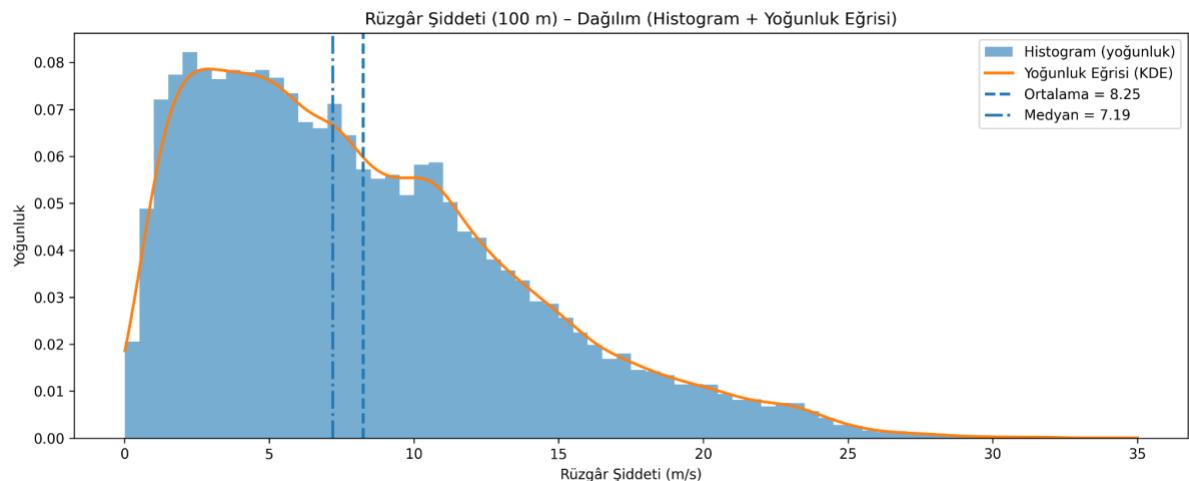
Bu yapı, eksik veri probleminin basit yöntemlerle çözülmesinin sınırlı olabileceğini ve ileri yöntemlerin değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır.

5.3 Tanımlayıcı İstatistikler

Hedef değişkenlere ait temel istatistikler, rüzgâr şiddetlerinin dağılımının yüksek değişkenlik gösterdiğini ortaya koymaktadır. 75 m ve 100 m seviyelerinde ortalama rüzgâr şiddeteri sırasıyla 8.23 m/s ve 8.25 m/s, medyan değerleri ise yaklaşık 7.2 m/s olarak hesaplanmıştır. Maksimum değerlerin 35 m/s seviyelerine ulaşması, zaman zaman güçlü rüzgâr olaylarının gerçekleştiğini göstermektedir.



Şekil X-a. 75 m yüksekliğindeki rüzgar şiddeti dağılımı.



Şekil X-b. 100 m yüksekliğindeki rüzgar şiddeti dağılımı.

Şekil X-a ve Şekil X-b, 75 m ve 100 m yüksekliklerindeki rüzgâr şiddeti dağılımları histogram ve yoğunluk eğrileri ile gösterilmektedir. Ortalama değerlerin medyan değerlerden daha yüksek olması ve dağılımin sağ tarafında uzun bir kuyruk bulunması, rüzgâr şiddeti dağılımının sağa çarpık (pozitif çarpık) bir yapıya sahip olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Bu durum, nadir fakat yüksek şiddetli rüzgâr olaylarının dağılım üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

5.4 Eksik Veri Tamamlama Yöntemleri

Eksik rüzgar şiddeti verilerinin tamamlanması amacıyla dört farklı yöntem uygulanmıştır:

5. Zamansal interpolasyon

Zamansal interpolasyon, eksik gözlemleri zaman serisi boyunca komşu zaman adımlarındaki mevcut değerler arasında süreklilik varsayımlı altında tahmin eden deterministik bir yöntemdir ve özellikle kısa süreli eksik veriler için yaygın olarak kullanılmaktadır (Little & Rubin, 2002).

6. Doğrusal regresyon

Doğrusal regresyon, hedef değişken ile bağımsız değişkenler arasındaki doğrusal ilişkiyi istatistiksel olarak modelleyerek, en küçük kareler yaklaşımıyla parametre tahmini yapan temel bir regresyon yöntemidir (Montgomery et al., 2012).

7. XGBoost regresyon modeli

XGBoost regresyon modeli, gradyan artırma prensibine dayalı olarak ardışık karar ağaçları eğiten, düzenlileştirme içeren ve karmaşık doğrusal olmayan ilişkileri modelleyebilen bir makine öğrenmesi algoritmasıdır (Chen & Guestrin, 2016).

8. LightGBM regresyon modeli

LightGBM regresyon modeli, histogram tabanlı öğrenme ve yaprak-odaklı ağaç büyütme stratejisi kullanarak gradyan artırmalı karar ağaçlarını daha verimli biçimde eğiten ve büyük veri setlerinde hızlı tahmin olanağı sağlayan bir yöntemdir (Ke et al., 2017).

Makine öğrenmesi tabanlı modellerde, hedef değişken haricindeki tüm sayısal meteorolojik değişkenler ile birlikte zaman bilgisinden türetilen saat, dakika, ay ve yılın günü gibi öznitelikler kullanılmıştır. Eğitim-test ayrimı, zaman serisi yapısına uygun olacak şekilde gerçekleştirilmiş; ayrıca rastgele seçilen holdout noktaları ile modellerin genelleme performansı test edilmiştir. Bu bağlamda holdout, model eğitimi sırasında kullanılmayan ve yalnızca model performansının bağımsız olarak değerlendirilmesi amacıyla ayrılan veri alt kümesini ifade etmektedir.

5.5 Model Performanslarının İstatistiksel Değerlendirilmesi

Yöntemlerin performansı, ortalama mutlak hata (MAE), kök ortalama kare hata (RMSE), belirlilik katsayısı (R^2), Pearson korelasyon katsayısı (PCC) ve sapma (bias) ölçütleri üzerinden değerlendirilmiştir. Analiz sonuçları, her iki hedef değişken için de doğrusal regresyon yönteminin hata metrikleri açısından en başarılı yaklaşım olduğunu ortaya koymaktadır.

Yöntem	MAE	RMSE	R2	PCC	BIAS
Zamansal interpolasyon	0.22773 3	0.444742	0.993711	0.996851	0.002014
Doğrusal regresyon	0.02067 4	0.029151	0.999972	0.999986	- 0.000167
XGBoost regresyon modeli	0.03140 1	0.081289	0.999784	0.999892	- 0.000154
LightGBM regresyon modeli	0.03104 2	0.083069	0.999775	0.999888	0.001338

Tablo X-a. 75 m yüksekliğinde rüzgâr şiddeti için eksik veri doldurma yöntemlerinin performans karşılaştırması.

Yöntem	MAE	RMSE	R2	PCC	BIAS
Zamansal interpolasyon 2	0.224142	0.419235	0.994322	0.997161	0.007458
Doğrusal regresyon 5	0.041195	0.056640	0.999896	0.999948	-0.000566
XGBoost regresyon modeli 0	0.067940	0.111244	0.999600	0.999802	0.000113
LightGBM regresyon modeli 5	0.057775	0.103873	0.999651	0.999826	0.000939

Tablo X-b. 100 m yüksekliğinde rüzgâr şiddeti için eksik veri doldurma yöntemlerinin performans karşılaştırması.

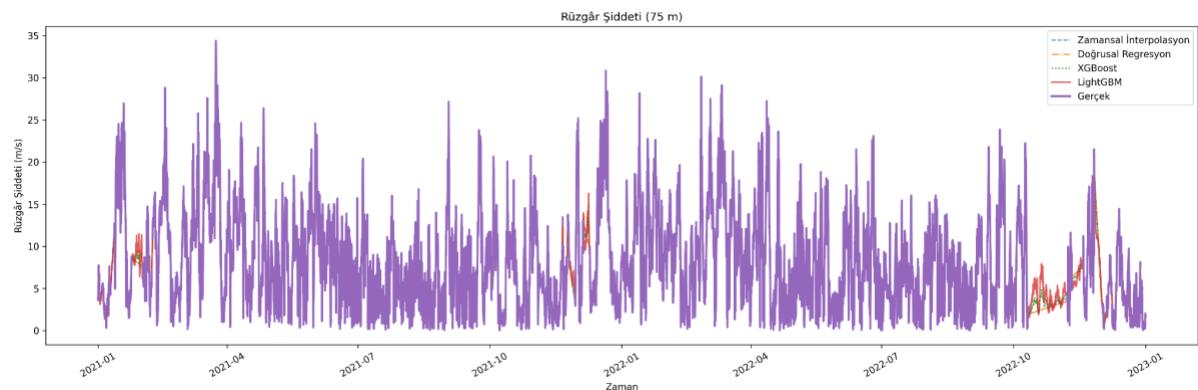
75 m rüzgâr şiddeti için doğrusal regresyon yöntemi, 6315 adet holdout gözlemi üzerinden yapılan değerlendirmede ortalama mutlak hata (MAE) = 0.0207 m/s değerine ulaşmıştır. Benzer şekilde, 100 m rüzgâr şiddeti için 5976 adet holdout gözlemi kullanılarak gerçekleştirilen analizde MAE = 0.0412 m/s olarak hesaplanmıştır. Aynı zamanda belirlilik katsayısı (R^2) ve Pearson korelasyon katsayısı (PCC) değerleri her iki yükseklik için de 0.999'un üzerinde bulunmuş olup, modelin gerçek rüzgâr şiddeti verilerini son derece başarılı bir şekilde temsil ettiğini göstermektedir.

Zamansal interpolasyon yöntemi, özellikle uzun süreli eksik veri bloklarında belirgin biçimde daha yüksek hata üretmiştir. XGBoost ve LightGBM tabanlı regresyon modelleri ise interpolasyon yöntemine kıyasla daha başarılı sonuçlar vermekle birlikte, hata metrikleri açısından doğrusal regresyon yönteminin gerisinde kalmıştır.

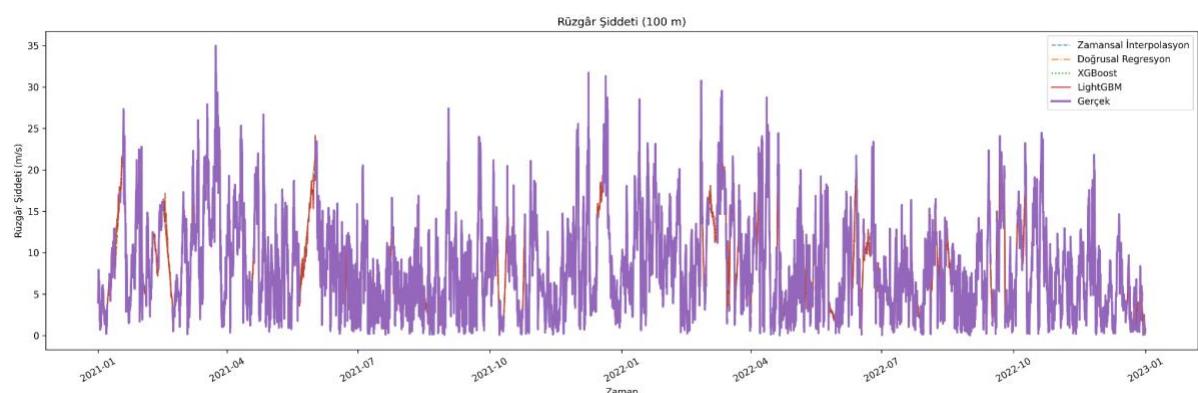
5.6 Görsel Analiz ve Model Davranışlarının Karşılaştırılması

Tüm zaman serisini kapsayan grafiklerde, dört yöntemin genel eğilimleri karşılaştırılmıştır. Doğrusal regresyon ve LightGBM sonuçlarının birçok bölgede birbirine

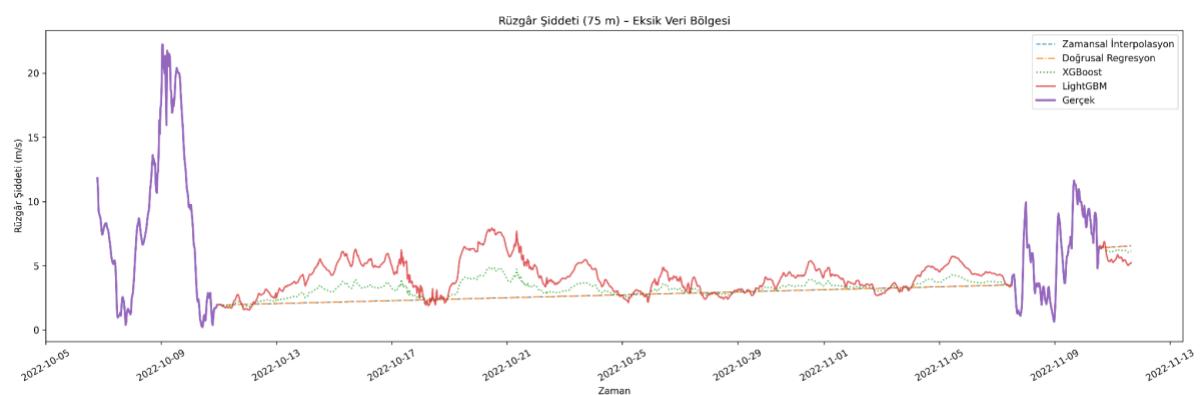
yakın seyrettiği görülmekle birlikte, eksik veri bölgelerine yakınlaştırılmış grafiklerde yöntemler arasındaki farklar daha net biçimde ortaya çıkmaktadır.



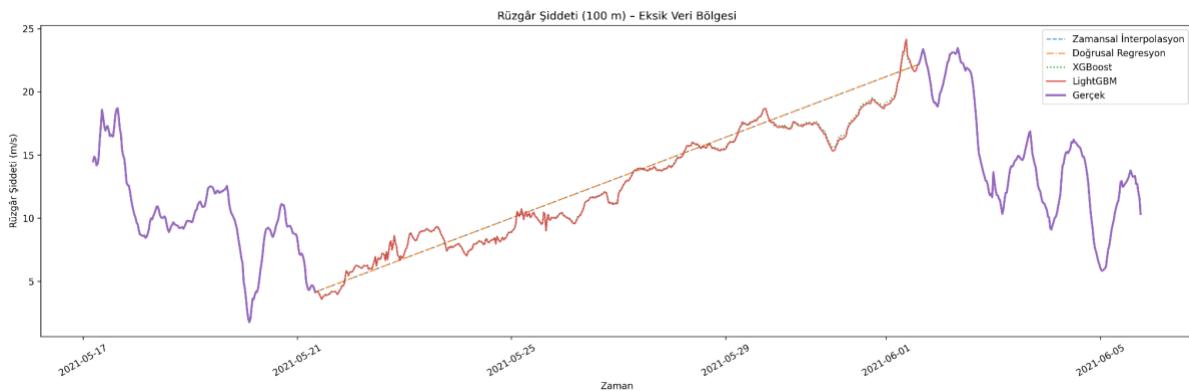
Şekil X. 75 m yüksekliğinde rüzgâr şiddeti için farklı eksik veri doldurma yöntemleri ile elde edilen zaman serilerinin karşılaştırılması.



Şekil X. 100 m yüksekliğinde rüzgâr şiddeti için farklı eksik veri doldurma yöntemleri ile elde edilen zaman serilerinin karşılaştırılması.



Şekil X. 75 m yüksekliğinde rüzgâr şiddeti için eksik veri bölgesinde farklı doldurma yöntemlerinin karşılaştırılması.



Şekil X. 100 m yüksekliğinde rüzgâr şiddeti için eksik veri bölgesinde farklı doldurma yöntemlerinin karşılaştırılması.

Zamansal interpolasyon yöntemi, eksik veri blokları boyunca doğrusal bir geçiş üretmekte ve rüzgâr şiddetindeki doğal zamansal dalgalanmaları temsil edememektedir. XGBoost ve LightGBM modelleri kısa süreli değişimleri kısmen yakalayabilmekle birlikte, bazı zaman aralıklarında aşırı (overestimation) veya bastırılmış (underestimation) tahminler üretmektedir. Buna karşın doğrusal regresyon yöntemi, çevresel değişkenlerle fiziksel olarak daha tutarlı, düzgün ve istikrarlı bir tahmin profili sunmaktadır.

Elde edilen sonuçlar, daha karmaşık makine öğrenmesi tabanlı modellerin doğrusal regresyona kıyasla üstün bir performans sergilemediğini göstermektedir. Bunun temel nedeni, rüzgâr şiddetinin farklı yükseklikler arasında yüksek derecede doğrusal ve fiziksel olarak anlamlı bir ilişkiye sahip olması ve kullanılan girdi değişkenlerinin hedef değişkenlerle güçlü korelasyon göstermesidir. Ayrıca, uzun süreli eksik veri bloklarının ağaç tabanlı modellerin genelleme yeteneğini sınırladığı, buna karşılık doğrusal regresyonun zaman türevli özniteliklerle birlikte daha kararlı ve tutarlı sonuçlar ürettiği değerlendirilmektedir. Bu bulgular, meteorolojik zaman serilerinde her zaman daha karmaşık modellerin daha iyi performans sunmadığını ortaya koymaktadır.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

EKLER

EK-1

RÜZGAR ÖLÇÜM İSTASYONU KURULUM RAPORU *

Başvuru sahibi tüzel kişi					
İstasyonun yeri	İli				
	İlçesi				
	Mevkii				
RÖİ Bilgileri	RÖİ Koordinatı (UTM 6 derece - ED50 Datum)		Maksimum ölçüm yüksekliği (m)	Rakum (m)	RÖİ Yerinin Dilim Orta Boylamı (6 derece - ED50)
	Doğu (sağa değer)	Kuzey (yukarı değer)			
Pafta adı					
İstasyonun kurulum tarihi					
Ölçüm direğinin yüksekliği (metre)					
İstasyonda kullanılan cihazlar					
Cihaz	Üretici firma	Tipi	Seri no	Yüksekliği (m)	Açıklama
Anemometre					
Yön Sensörü					
Sıcaklık Sensörü					
Basınç Sensörü					
Bağıl Nem Sensörü					
Ölçüm kayıt cihazı					

** Ölçüm direğinin üzerindeki sensörler, Dünya Meteoroloji Teşkilatı tarafından belirlenen (WMO/CIMO Rehber No.8) ölçüm kriterlerini sağlamaktadır ve Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün (veya ... Akredite Kuruluşunun) kendi gözlem ağında kullandığı sensör özellikleri ile aynı veya daha iyi özelliktedir ve direğin tarafından oluşturulacak türbülstan ve direğin fiziki konumundan etkilenmemektedir.

*** Bu rapor yerinde inceleme yapılarak onaylanması halinde geçerlidir.

EKLER:

- 1) İstasyonda kullanılan cihazlara ilişkin belgeler (üretici firma, tipi, seri numarası, kalibrasyon sertifikası vb.)
- 2) Sahaya esas ölçüm izninin aslı veya saha sahibi gerçek veya tüzel kişi tarafından onaylı sureti
- 3) İstasyonun kurulum sonrası fotoğrafları
- 4) İstasyonun kurulumuna ilişkin fatura ve rapor
- 5) Elektronik ortamda kurulum raporu (Kuruma sunulan bilgi ve belgeleri içeren taşınabilir bellek)

HAZIRLAYAN (Önlisans Başvurusunda Bulunacak Tüzel Kişi)	ONAYLAYAN (Meteoroloji Genel Müdürlüğü veya Akredite Kuruluş)
İmza	İmza
Kaşe	Kaşe
Tarih	Tarih

* MGM veya akredite kuruluş tarafından sunulur.

EK-2**RÜZGAR ÖLÇÜM SONUÇ RAPORU ***

Başvuru sahibi tüzel kişi					
Ölçüme başlama tarihi					
Ölçüm bitiş tarihi					
RÖİ Bilgileri	RÖİ Koordinatı (UTM 6 derece - ED50 Datum)		Maksimum ölçüm yüksekligi (m)	Rakım (m)	RÖİ Yerinin Dilim Orta Boylamı (6 derece - ED50)
	Doğu (sağa değer)	Kuzey (yukarı değer)			
YILLIK ORTALAMA RÜZGAR HIZI (m/s)					
xx metre	Xx	<p>HAKİM RÜZGAR YÖNÜ</p> <p>Güç Frekans</p>			

**Bu rapor, yüzde 20 üzeri veri kaybı gerçekleşmeden hazırlanmıştır.

HAZIRLAYAN (Önlisans Başvurusunda Bulunacak Tüzel Kişi)	ONAYLAYAN (Meteoroloji Genel Müdürlüğü veya Akredite Kuruluş)
İmza	İmza
Kaşe	Kaşe
Tarih	Tarih

* MGM veya akredite kuruluş tarafından sunulur.

EK-3

RÜZGAR / GÜNEŞ VERİSİ – VERİ TAMAMLAMA BİLGİ FORMU

Ölçüm İstasyonu No.			
Başvuru Sahibi Tüzel Kişi			
Ölçüm İstasyonu	<input type="checkbox"/> Rüzgar	<input type="checkbox"/> Güneş	
Ölçüm Başlama Tarihi			
Ölçüm Bitiş Tarihi			
% 20'ye kadar Eksik Veri Tamamlama			
Ölçüm periyodu boyunca veri kaybı var mı?	<input type="checkbox"/> Evet <input type="checkbox"/> Hayır		
Kayıp veri yüzdesi	%		
Ölçüm periyodu boyunca oluşan veri kayıplarının tarihleri (Sağdaki örnek formata uygun olarak ekli text,Excel vb. dosyada sunulur.) ⁽¹⁾	Başlama Tarih-Saat-Dak.	Bitiş Tarih-Saat-Dak.	Toplam Veri Kayıp Süresi (Dak.)
Eksik veri tamamlama çalışmasında kullanılan istasyon (MGM veya Diğer)			
Veri Tamamlama Yöntemi ⁽²⁾			

Güneş Ölçüm İstasyonu Verileri				
	Veri Periyodu ve Süresi (gün)	Toplam Global Güneş İşinimi (kWh/m ²)	Toplam Güneşlenme Süresi (Saat)	Ortalama Hava Sıcaklığı (°C)
Ölçüm Süresi İçerisindeki Veri Seti				

Rüzgar Ölçüm İstasyonu Verileri		
Veri Periyodu ve Süresi	Rüzgar Verileri	
	Ortalama Rüzgar Hızı (m/s)	Hakim Rüzgar Yönü
30 m Yükseklikteki Rüzgar Verileri		
Direğin En Üst Seviyesindeki (.... m) Rüzgar Verileri		
Diğer Seviyeler (..... m)		
Diğer Seviyeler (..... m)		
Diğer Ölçümler		
Ortalama Sıcaklık (°C) (.....m)		
Ortalama Basınç (hPa) (.....m)		
Ortalama Nem (%) (.....m)		

Rüzgar Güç ve Frekans Tablosu ⁽³⁾										
Yönlər	30 m. Yükseklik					En üst seviye .. m. Yükseklik				
	Ortalama Rüzgar hızı	Güç		Frekans		Ortalama Rüzgar hızı	Güç		Frekans	
		Değer	Yüzde	Değer	Yüzde		Değer	Yüzde	Değer	Yüzde
Yönlər	m/san.	Watt/m ²	%	Esme sayısı	%	m/san.	Watt/m ²	%	Esme sayısı	%
Sakin										
N										
NNE										
NE										
ENE										
E										
ESE										
SE										
SSE										
S										
SSW										
SW										
WSW										
W										
WNW										
NW										
NNW										
	Toplam	Toplam	Toplam	Toplam		Toplam	Toplam	Toplam	Toplam	

Yıllık Ortalama Rüzgar hızı (m/san)	Rüzgar hızı yıllık standart sapma	Maksimum Esme Sayısı ve Hakim Yön	Yıllık Ortalama Rüzgar hızı (m/san)	Rüzgar hızı yıllık standart sapma	Maksimum Esme Sayısı ve Hakim Yön

MGM, rüzgar ölçümelerinden güç hesabını aşağıdaki formül kullanılarak kontrol edecektir.

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

P : Güç yoğunluğu (Watt/m²)

ρ : Hava Yoğunluğu (kg/m²) (Hava yoğunluğu 15 °C ve deniz seviyesinde yaklaşık 1.2 kg/m² dir.)

V : Rüzgar Hızı (m/san.)

Hava Yoğunluğu Formülü :

$$\rho = \frac{P}{R * T}$$

P: Hava Basıncı (Pa.)

ρ : Hava Yoğunluğu (kg/m²)

R : Gaz Sabiti :287 J/kg.°K

t : Hava Sıcaklığı (°C)

T: Hava Sıcaklığı (°K) (t + 273.15)

- ¹⁾ Ölçüm periyodu boyunca oluşan veri kayıpları tablosu elektronik ortamda (CD,DVD vb.) tamamlanan veriler ile birlikte firma tarafından MGM'ye verilir.
- ²⁾ Kullanılan istatistiksel eksik veri tamamlama yöntemi ile yaptığı işlemleri detaylı olarak açıklayan doküman firma tarafından MGM'ye verilir.
- ³⁾ Rüzgar hesaplamalarını açıklayan detaylı doküman firma tarafından MGM'ye verilir.

BAŞVURU SAHİBİ	
İmza	Kaşe
Tarih	

ÖNLİSANS BAŞVURU DİLEKÇESİ*

**T.C.
ENERJİ PİYASASI DÜZENLEME KURUMU
ELEKTRİK PİYASASI DAİRESİ BAŞKANLIĞINA**

.....(ilinde/illerinde).....(ilçesinde/ilçelerinde) kurulması planlanan enerji kaynağına dayalı projesi için önlisans almayı talep etmekteyiz.

Önlisans başvurumuzun kabulünü ve tüzel kişiliğimize önlisans verilmesini arz ederiz.

<u>Tüzel Kişi/Yetiştirme Yetkili Kişi veya Kişilerin Adı-Soyadı</u>
İmza
Kaşe
Tarih

Tüzel kişinin ticaret unvanı:

Tüzel kişinin Ticaret ve/veya Sanayi Odasına kayıtlı olduğu il:

Tüzel kişinin ticaret sivil numarası:

Tüzel kişinin vergi numarası:

Tüzel kişinin kanuni ikametgah adresi:

Telefon:

Faks:

E-posta:

Kayıtlı elektronik posta adresi (KEP):

Ulusal Elektronik Tebligat Sistemi (UETS) adresi:

Ekler: Önlisans ve Lisans İşlemleri İle İlgili Başvurulara İlişkin Usul ve Esaslar'ın Ek-3'ünde belirtilen bilgi ve belgeler eklenecektir

*: 3 üncü maddenin ikinci fıkrası çerçevesinde başvurunun yazılı olarak yapılması halinde sunulur.

Üretim lisansı başvurusunda Kuruma sunulacak teminat mektubu örneği

Tarih :
No :

TEMİNAT MEKTUBU
T.C.

ENERJİ PİYASASI DÜZENLEME KURUMU BAŞKANLIĞINA
Mustafa Kemal Mahallesi 2078. Sok No:4 06510 Çankaya-ANKARA

..... ili ilçesi, mevkiiinde kurulması planlanan,(1) dayalı (2) MW_m kurulu gücünde ve(3) MWh kapasitesinde..... adındaki üretim tesisi için Enerji Piyasası Düzenleme Kurumuna (Kurum) önlisans başvurusunda bulunacak/önlisans verilen.....'nın (Şirket), Kuruma vermek zorunda olduğu teminat tutarı olan (rakam ve yazı ile) TL.'yi Bankamız garanti ettiğinden, 6446 sayılı Elektrik Piyasası Kanunu ve Elektrik Piyasası Lisans Yönetmeliğinde belirtilen teminat mektubunun irat kaydedilmesini gerektiren hallerin gerçekleştiğine Kurul tarafından karar verildiği taktirde, protesto çekmeye, hükmü ve Şirketin iznini almaya gerek kalmaksızın ve Şirket ile Kurum arasında ortaya çıkacak herhangi bir uyuşmazlık ve bunun akibet ve kanuni sonuçları nazarı itibara alınmaksızın ve kayıtsız şartsız, yukarıda yazılı tutarı ilk yazılı talebiniz üzerine derhal ve gecikmeksiz Kurumunuza veya emrinize nakden ve tamamen ve talep tarihinden ödeme tarihine kadar gelecek günlere ait temerrüt faizi ile birlikte ödeyeceğimizi, Bankanın imza atmaya yetkili temsilcisi ve sorumlusı sıfatıyla ve Banka ad ve hesabına gayrı kabil rücu kabul, beyan ve taahhüt ederiz.

İşbu teminat mektubu kesin, süresiz ve limit dışıdır.

..... BANKASI A.Ş.
..... SUBESİ
Banka yetkililerinin isim, unvan ve imzaları

- (1) numaralı boşluğa üretim tesisinin enerji kaynağı yazılacaktır. Birden çok kaynaklı elektrik üretim tesislerinde ana ve yardımcı kaynaklar birlikte yazılır.
- (2) numaralı boşluğa üretim tesisinin MW_m cinsinden kurulu gücü yazılacaktır. Birden çok kaynaklı elektrik üretim tesislerinde ana ve yardımcı kaynakların mekanik güçlerinin (MW_m) toplamı yazılacaktır.
- (3) Depolama ünitesi olması halinde söz konusu depolama üntesinin toplam kapasitesine (MWh) de yer verilir.

RÜZGAR ENERJİSİNE DAYALI ÜRETİM TESİSİNE İLİŞKİN BİLGİ FORMU*

Başvuru sahibi tüzel kişi					
Başvuru sahibi tüzel kişinin iletişim bilgileri					
Üretim tesisi / Proje adı** RES				
Üretim tesisinin yeri	İli				
	İlçesi				
	Ada / Parsel No				
	1/25.000 ölçekli harita pafta adı/adları				
Ünite sayısı adet				
Ünite kurulu güçleri MW _m MW _e				
Üretim tesisinin toplam kurulu gücü ² MW _m MW _e				
Mevcut kurulu gücü ile üretebileceği yıllık azami üretim miktarı ³ kWh/yıl				
Öngörülen sisteme bağlantı noktası veya bağlantı bölgesi ⁴					
Üretim tesisinin mevcut fiziki durumu ⁵					
Öngörülen proje kapasite faktörü ⁷	%...				

TÜRBİN BİLGİLERİ

Türbin Numarası	Ünite koordinatları (UTM 6 derece- ED 50 Datum)		Ünite Gücü (MW _m)	Ünite Gücü (MW _e)	Kule Yüksekliği (m)	Türbin rotor kanat çapı (m)	Rakım (m)	Türbin Yerinin Dilim Orta Boylam (6 derece-ED50)
	Doğu (sağa değer)	Kuzey (yukarı değer)						
T1	XX XX XX ,XXX	YY YY YYY ,YYY						

T2	XX XX XX ,XXX	YY YY YYY,YYY				
...	XX XX XX ,XXX	YY YY YYY,YYY				
Tn	XX XX XX ,XXX	YY YY YYY,YYY				

SANTRAL SAHASI BİLGİLERİ

Santral Sahası Köşe Numarası	Santral sahasına ait köşe koordinatları (UTM 6 derece - ED 50 Datum)		Köşenin Dilim Orta Boylamı (6 derece - ED50)
	Doğu (sağa değer)	Kuzey (yukarı değer)	
K1	XX XX XX ,XXX	YY YY YYY ,YYY	
K2	XX XX XX ,XXX	YY YY YYY ,YYY	
...	XX XX XX ,XXX	YY YY YYY ,YYY	
Kn	XX XX XX ,XXX	YY YY YYY ,YYY	

RÜZGAR ÖLÇÜM İSTASYONU BİLGİLERİ

RÖİ Numarası	Rüzgar Ölçüm İstasyonu Koordinatı (UTM 6 derece - ED 50 Datum)		Maksimum Ölçüm Yüksekliği (m)	Rakım (m)	RÖİ Yerinin Dilim Orta Boylamı (6 derece - ED50)
	Doğu (sağa değer)	Kuzey (yukarı değer)			
RÖİ-1	XX XX XX ,XXX	YY YY YYY ,YYY			
RÖİ-2	XX XX XX ,XXX	YY YY YYY ,YYY			
RÖİ-n	XX XX XX ,XXX	YY YY YYY ,YYY			

ŞALT MERKEZİ BİLGİLERİ

Şalt Merkezi Koordinatları	Şalt merkezi koordinatları (UTM 6 derece - ED 50 Datum)		Şalt Merkezinin Dilim Orta Boylamı (6 derece - ED50)
	Doğu (saşa değer)	Kuzey (yukarı değer)	
ŞM	XX XX XX ,XXX	YY YY YYY ,YYY	

Tüzel Kişiyyi Temsil ve İlzama Yetkili
Kişi veya Kişilerin Adı-Soyadı

İmza
Kaşe
Tarih

¹ Virgülten sonra en fazla dört basamaklı olarak belirtilecektir.

² Yıllık azami elektrik enerjisi üretim miktarı; İlgili Kurul Kararına göre belirlenecektir.

³ Önlisans başvurularında bağlantı bölgesi, tadil başvurularında ise bağlantı noktası belirtilecektir.

⁴ Başvuru tarihi itibarıyle üretim tesisinin durumu belirtilecektir (*proje - inşa - kurulu - işletilmeye hazır v.s. gibi*)

⁵ İlgili Kurul Kararı kapsamında belirlenecektir.

*3 üçü maddenin ikinci fikrası çerçevesinde başvurunun yazılı olarak yapılması halinde sunulur.

** Daha önce Kuruma yapılmış olan başvurular kapsamında kullanılmış olan “Üretim tesisi / Proje adı” aynı kaynak türünde yapılmış yeni bir önlisans veya tesis adı tadil başvurusunda kullanılamaz.

DUYARLI YÖRELER BEYANI *

Konusu	VAR (**)	YOK
Milli Parklar Kanunu'nun 2 nci maddesinde tanımlanan ve bu Kanunun 3 üncü maddesi uyarınca belirlenen "Milli Parklar", "Tabiat Parkları", "Tabiat Anıtları" ve "Tabiat Koruma Alanları"		
Kara Avcılığı Kanunu uyarınca belirlenen "Yaban Hayatı Koruma Sahaları, Yaban Hayatı Geliştirme Sahaları ve Yaban Hayvanı Yerleştirme Alanları"		
Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Kanunu'nun 3 üncü maddesinin birinci fıkrasının "Tanımlar" başlıklı (a) bendinin 1inci, 2 nci, 3 üncü ve 5 inci alt bentlerinde "Kültür Varlıklarları", "Tabiat Varlıklarları", "Sit" ve "Koruma Alanı" olarak tanımlanan ve aynı Kanun ile 17/6/1987 tarihli ve 3386 sayılı Kanunun (2863 sayılı Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Kanunu'nun Bazı Maddelerinin Değiştirilmesi ve Bu Kanuna Bazı Maddelerin Eklenmesi Hakkında Kanun) ilgili maddeleri uyarınca tespiti ve tescili yapılan alanlar		
Su Ürünleri Kanunu kapsamında olan Su Ürünleri İstihsal ve Üreme Sahaları		
Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği'nin 17 nci, 18 inci, 19 uncu ve 20 nci maddelerinde tanımlanan alanlar		
Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği'nde tanımlanan alanlar		
Çevre Kanunu'nun 9 uncu maddesi uyarınca Bakanlar Kurulu tarafından "Özel Çevre Koruma Bölgeleri" olarak tespit ve ilan edilen alanlar		
Boğaziçi Kanunu'na göre koruma altına alınan alanlar		
Orman Kanunu uyarınca orman alanı sayılan yerler		
Kıyı Kanunu gereğince yapı yasağı getirilen alanlar		
Zeytinciliğin İslahı ve Yabanilerinin Aşılattırılması Hakkında Kanunda belirtilen alanlar		
Mera Kanununda belirtilen alanlar		
Sulak Alanların Korunması Yönetmeliği'nde belirtilen alanlar		
"Avrupa'nın Yaban Hayatı ve Yaşama Ortamlarını Koruma Sözleşmesi" (BERN Sözleşmesi) uyarınca koruma altına alınmış alanlardan "Önemli Deniz Kaplumbağası Üreme Alanları"nda belirtilen I. ve II. Koruma Bölgeleri, "Akdeniz Foku Yaşama ve Üreme Alanları"		
"Akdeniz'in Kirlenmeye Karşı Korunması Sözleşmesi" (Barcelona Sözleşmesi) uyarınca korumaya alınan alanlar		
"Akdeniz'de Özel Koruma Alanlarının Korunmasına Ait Protokol" gereği ülkemizde "Özel Koruma Alanı" olarak belirlenmiş alanlar		
Cenova Bildirgesi gereği seçilmiş Birleşmiş Milletler Çevre Programı tarafından yayımlanmış olan "Akdeniz'de Ortak Öneme Sahip 100 Kıyısal Tarihi Sit" listesinde yer alan alanlar		

Cenova Deklerasyonu'nun 17 nci maddesinde yer alan "Akdeniz'e Has Nesli Tehlikede Olan Deniz Türlerinin" yaşama ve beslenme ortamı olan kıyısal alanlar		
Cenova Deklerasyonu'nun 17 nci maddesinde yer alan "Akdeniz'e Has Nesli Tehlikede Olan Deniz Türlerinin" yaşama ve beslenme ortamı olan kıyısal alanlar		
"Dünya Kültür ve Tabiat Mirasının Korunması Sözleşmesi"nin 1inci ve 2 nci maddeleri gereğince Kültür Bakanlığı tarafından koruma altına alınan "Kültürel Miras" ve "Doğal Miras" statüsü verilen kültürel, tarihi ve doğal alanlar		
"Özellikle Su Kuşları Yaşama Ortamı Olarak Uluslararası Öneme Sahip Sulak Alanların Korunması Sözleşmesi" (RAMSAR Sözleşmesi) uyarınca koruma altına alınmış alanlar		
Avrupa Peyzaj Sözleşmesi		
Onaylı Çevre Düzeni Planlarında, mevcut özellikleri korunacak alan olarak tespit edilen ve yapılaşma yasağı getirilen alanlar (Tabii karakteri korunacak alan, biogenetik rezerv alanları, jeotermal alanlar ve benzeri)		
Tarım Alanları: Tarımsal kalkınma alanları, sulanan, sulanması mümkün ve arazi kullanma kabiliyet sınıfları I, II, III ve IV olan alanlar, yağışa bağlı tarımda kullanılan I. ve II. sınıf ile, özel mahsul plantasyon alanlarının tamamı		
Sulak Alanlar: Doğal veya yapay, devamlı veya geçici, suların durgun veya akıntılı, tatlı, acı veya tuzlu, denizlerin gel-git hareketinin çekilme devresinde 6 metreyi geçmeyen derinlikleri kapsayan, başta su kuşları olmak üzere canlıların yaşama ortamı olarak önem taşıyan bütün sular, bataklık sazlık ve turbiyeler ile bu alanların kıyı kenar çizgisinden itibaren kara tarafına doğru ekolojik açıdan sulak alan kalan yerler		
Göller, akarsular, yeraltı suyu işletme sahaları		
Bilimsel araştırmalar için önem arden ve/veya nesli tehlikeye düşmüş veya düşebilir türler ve ülkemiz için endemik olan türlerin yaşama ortamı olan alanlar, biyosfer rezervi, biyotoplar, biyogenetik rezerv alanları, benzersiz özelliklerdeki jeolojik ve jeomorfolojik oluşumların bulunduğu alanlar		

Bu beyan kapsamında sunmuş olduğumuz bilgi ve/veya belgelerin doğru, eksiksiz ve tam olduğunu, Kurumunuzca yapılacak inceleme ve değerlendirme neticesinde bu beyan kapsamında sunulan bilgi ve/veya belgelerin yanlış, eksik veya yaniltıcı olarak verildiğinin saptanması halinde, elektrik piyasasına ilişkin ilgili mevzuat hükümleri çerçevesinde tarafımıza uygulanacak idari yaptırımları kabul ve taahhüt ederiz.

Tüzel Kişiye Temsil ve İlzama Yetkili Kişi veya Kişilerin Adı-Soyadı
İmza
Kaşe
Tarih

*:3 üncü maddenin ikinci fıkrası çerçevesinde başvurunun yazılı olarak yapılması halinde sunulur.

EK-8**İMAR DURUM BEYANI***

İmar tadilatının gereklmesi halinde tadilatın yapılmasıının önünde;

	VAR**	YOK	Varsa engelin nasıl aşılacağına ilişkin açıklama
Mekânsal strateji planı bakımından engel durumu,			
Çevre düzeni planı bakımından engel durumu,			
Nazım imar planları bakımından engel durumu,			
Uygulama imar planları bakımından engel durumu,			

olduğunu beyan ederiz. Bu beyan kapsamında sunmuş olduğumuz bilgi ve/veya belgelerin doğru, eksiksiz ve tam olduğunu, Kurumunuzca yapılacak inceleme ve değerlendirme neticesinde bu beyan kapsamında sunulan bilgi ve/veya belgelerin yanlış, eksik veya yaniltıcı olarak verildiğinin saptanması halinde, elektrik piyasasına ilişkin ilgili mevzuat hükümleri çerçevesinde tarafımıza uygulanacak idari yaptırımları kabul ve taahhüt ederiz.

Tüzel Kişiyi Temsil ve İlzama Yetkili Kişi veya Kişilerin Adı-Soyadı
İmza
Kaşe
Tarih

*3 üncü maddenin ikinci fıkrası çerçevesinde başvurunun yazılı olarak yapılması halinde sunulur.

**: İmar durumu bakımından herhangi bir engelin olduğunu beyan edilmesi durumunda beyan edilen her plan için söz konusu planın tarihinin ve üretim tesisi kurulmasına neden engel olmadığını ya da engelin nasıl aşılacağını açıklaması gerekmektedir.

EK-9

YASAKLI OLMAMA BEYANI *

Önlisans başvurusunda bulunan şirketimiz ile şirketimizde yer alan;

a) Doğrudan veya dolaylı paya sahip olan gerçek veya tüzel kişi veya kişilerin,

b) Yönetim kurulu başkanı:

..... (T.C.K. Numarası:.....)

Yönetim kurulu üyelerimiz:**

..... (T.C.K. Numarası:.....) ***

olan gerçek ve/veya tüzel kişilerin 6446 sayılı Elektrik Piyasası Kanununun 5inci maddesinin sekizinci fıkrası kapsamında yasaklı olmadığını beyan ederiz.

Bu beyan kapsamında sunmuş olduğumuz bilgi ve/veya belgelerin doğru, eksiksiz ve tam olduğunu, Kurumunuzca yapılacak inceleme ve değerlendirme neticesinde bu beyan kapsamında sunulan bilgi ve/veya belgelerin yanlış, eksik veya yaniltıcı olarak verildiğinin saptanması halinde, elektrik piyasasına ilişkin ilgili mevzuat hükümleri çerçevesinde tarafımıza uygulanacak idari yaptırımları kabul ve taahhüt ederiz.

Tüzel Kişiyi Temsil ve İlzama Yetkili Kişi veya Kişilerin Adı-Soyadı
İmza
Kaşe
Tarih

* 3 üncü maddenin ikinci fıkrası çerçevesinde başvurunun yazılı olarak yapılması halinde sunulur.

**Yönetim kurulu üyesinin tüzel kişi olması halinde T.C.K. Numarası yerine Ticaret Sicil Numarası yazılır. Yönetim kurulu üyesi tüzel kişi, kendi adına piyasa faaliyetinden yasaklanmış bir gerçek kişiyi yetkilendiremez.

*** Bu satır, yeter sayıda çoğaltılr.

YASAKLI OLMAMA BEYANI *

Önlisans başvurusunda bulunan şirketimiz ile şirketimizde yer alan;

- a) Doğrudan veya dolaylı paya sahip olan gerçek veya tüzel kişi veya kişilerin,
- b) Müdürlerimiz:**

.....(T.C.K. Numarası:.....) ***

olan gerçek ve/veya tüzel kişilerin 6446 sayılı Elektrik Piyasası Kanununun 5 inci maddesinin sekizinci fıkrası kapsamında yasaklı olmadığını beyan ederiz.

Bu beyan kapsamında sunmuş olduğumuz bilgi ve/veya belgelerin doğru, eksiksiz ve tam olduğunu, Kurumunuzca yapılacak inceleme ve değerlendirme neticesinde bu beyan kapsamında sunulan bilgi ve/veya belgelerin yanlış, eksik veya yaniltıcı olarak verildiğinin saptanması halinde, elektrik piyasasına ilişkin ilgili mevzuat hükümleri çerçevesinde tarafımıza uygulanacak idari yaptırımları kabul ve taahhüt ederiz.

Tüzel Kişiyi Temsil ve İlzama Yetkili Kişi veya Kişilerin Adı-Soyadı
İmza
Kaşe
Tarih

* 3 üncü maddenin ikinci fıkrası çerçevesinde başvurunun yazılı olarak yapılması halinde sunulur.

**Müdürin tüzel kişi olması halinde T.C.K. Numarası yerine Ticaret Sicil Numarası yazılır. Yönetim kurulu üyesi tüzel kişi, kendi adına piyasa faaliyetinden yasaklanmış bir gerçek kişiyi yetkilendiremez.

*** Bu satır, yeter sayıda çoğaltılr.

EK-11

YASAKLI ALANLAR BEYANI*

Önlisans başvurusuna konu santral sahasının tamamında ya da bir kısmında 5403 sayılı Toprak Koruma ve Arazi Kullanımı Kanunu kapsamında;

	VAR**	YOK	Varsa engelin nasıl aşılacağına ilişkin açıklama
<i>Mutlak tarım arazileri</i>			
<i>Özel ürün arazileri,</i>			
<i>Dikili tarım arazileri</i>			
<i>Sulu tarım arazileri</i>			
<i>Büyük ovalar</i>			
<i>Çevre arazilerde tarimsal kullanım bütünlüğünü bozan alanlar ile 3573 sayılı Zeytinçiliğin İslahı ve Yabanilerinin Aşılattırılması Hakkında Kanun kapsamında zeytinlik sayılan alanlar</i>			

olduğunu beyan ederiz. Bu beyan kapsamında sunmuş olduğumuz bilgi ve/veya belgelerin doğru, eksiksiz ve tam olduğunu, Kurumunuzca yapılacak inceleme ve değerlendirme neticesinde bu beyan kapsamında sunulan bilgi ve/veya belgelerin yanlış, eksik veya yanlıltıcı olarak verildiğinin saptanması halinde, elektrik piyasasına ilişkin ilgili mevzuat hükümleri çerçevesinde tarafımıza uygulanacak idari yaptırımları kabul ve taahhüt ederiz.

Tüzel Kişiyyi Temsil ve İlzama Yetkili Kişi veya Kişilerin Adı-Soyadı
İmza
Kaşe
Tarih

*: 3üncü maddenin ikinci fıkrası çerçevesinde başvurunun yazılı olarak yapılması halinde sunulur.

**: Yasaklı alan bulunduğuna ilişkin beyan edilen her durum için söz konusu Yasaklı Alanın üretim tesisi kurulmasına neden engel olmadığına ya da engelin nasıl aşılacağına, ayrı ayrı açıklanması gereklidir.

(Rüzgar enerjisine dayalı önlisans başvuruları bakımından tesis alanlarına (türbin, şalt sahası, kablo kanalları ve tesis içi yollar), diğer kaynaklara dayalı önlisans başvuruları bakımından santral sahasının tamamına isabet etmediğini açık biçimde (koordinat, ada/pafta vb. bilgilere yer vermek suretiyle) ifade edilmelidir.)

EK-12

KONTROL BEYANI *

Şirketimiz paylarının doğrudan ya da dolaylı çoğunluk payına sahip olmaktan kaynaklı kontrol durumu hariç olmak üzere;

- Şirketimiz üzerinde ortakların veya başka gerçek ya da tüzel kişilerin ayrı ayrı ya da birlikte, fiilen ya da hukuken belirleyici etki uygulama olanağını sağlayan haklar yoluyla KONTROLÜ OLDUĞUNU/OLMADIĞINI**
- Şirketimiz üzerinde sözleşmeler veya başka araçlarla ve Şirketimiz malvarlığının tamamı veya bir kısmı üzerinde mülkiyet veya işletilmeye müsait bir kullanma hakkı yoluyla KONTROLÜ OLDUĞUNU/OLMADIĞINI**
- Şirketimizin organlarının oluşumunda veya kararları üzerinde ortakların veya başka gerçek veya tüzel kişilerin belirleyici etki sağlayan hakları veya sözleşmelerle meydana getirilen hakları yoluyla KONTROLÜ OLDUĞUNU/OLMADIĞINI**

beyan ederiz.

Bu beyan kapsamında sunmuş olduğumuz bilgi ve/veya belgelerin doğru, eksiksiz ve tam olduğunu, Kurumunuzca yapılacak inceleme ve değerlendirme neticesinde bu beyan kapsamında sunulan bilgi ve/veya belgelerin yanlış, eksik veya yaniltıcı olarak verildiğinin saptanması halinde, elektrik piyasasına ilişkin ilgili mevzuat hükümleri çerçevesinde tarafımıza uygulanacak idari yaptırımları kabul ve taahhüt ederiz.

Tüzel Kişiyi Temsil ve İlzama Yetkili Kişi veya Kişilerin Adı-Soyadı
İmza
Kaşe
Tarih

* 3 üncü maddenin ikinci fıkrası çerçevesinde başvurunun yazılı olarak yapılması halinde sunulur.

** OLDUĞUNU/OLMADIĞINI kelimelerinden biri seçilir, OLDUĞUNU kelimesinin seçilmesi halinde belgesinin de ekte sunulması gereklidir.

KAYNAKLAR

- Ackermann, T., & Söder, L. (2002).** An overview of wind energy—Status 2002. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6(1–2), 67–127.
- Ahrens, C. D., & Henson, R. (2009).** Meteorology today: An introduction to weather, climate, and the environment (9th ed.). Cengage Learning.
- Ahrens, C. D., & Henson, R. (2016).** Meteorology today: An introduction to weather, climate, and the environment (11th ed.). Cengage Learning.
- Alavi, Z., Khalilpour, K., Florin, N., Hadigheh, A., & Hoadley, A. (2025).** End-of-life wind turbine blade management across energy transition: A life cycle analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 213, 108008. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.108008>
- Atilgan Turkmen, B., & Germirli Babuna, F. (2024).** Life cycle environmental impacts of wind turbines: A path to sustainability with challenges. *Sustainability*, 16(13), 5365. <https://doi.org/10.3390/su16135365>
- Badhiye, S. S. N., Chatur, B. V., & Wakode, P. (2011).** Data logger system: A survey. *International Journal of Computer Theory and Engineering*. https://www.researchgate.net/publication/271964052_Data_Logger_System_A_Survey
- Barry, R. G., & Chorley, R. J. (2010).** Atmosphere, weather and climate (9th ed.). Routledge.
- Bayat, S., & Allison, J. T. (2025).** Impact of control strategies on the control co-design of spar floating offshore wind turbines. *Ocean Engineering*, 336, 121763. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121763>
- Borhan. (2021).** Atmospheric Dynamics I [Ders notları].
- Brower, M. C. (2012).** Wind resource assessment. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118249864>
- Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D., & Bossanyi, E. (2011).** Wind energy handbook. John Wiley & Sons.
- Çevresel Etki Değerlendirmesi Yönetmeliği. (2022, 29 Temmuz).** T.C. Resmi Gazete (Sayı: 31907). <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=18907&MevzuatT ur=7&MevzuatTertip=5>
- Dao, C., Kazemtabrizi, B., & Crabtree, C. (2019).** Wind turbine reliability data review and impacts on levelised cost of energy. *Wind Energy*,

22(12). <https://doi.org/10.1002/we.2404>

Derrick, M. (1992). Measure-correlate-predict methodology for wind resource assessment. *Wind Energy.*

Dewan, A., Gautam, A., & Goyal, R. (2021). Savonius wind turbines: A review of recent advances in design and performance enhancements. *Materials Today: Proceedings.*

Dörenkämper, M., Olsen, B. T., Witha, B., Hahmann, A. N., Davis, N. N., Barcons, J., Ezber, Y., García-Bustamante, E., González-Rouco, J. F., Navarro, J., Sastre-Marugán, M., Sile, T., Trei, W., Žagar, M., Badger, J., Gottschall, J., Sanz Rodrigo, J., & Mann, J. (2020). The making of the New European Wind Atlas – Part 2: Production and evaluation. *Geoscientific Model Development,* 13(10), 5079–5102. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-5079-2020>

Durak, M., & Özer, S. (2008). Rüzgar enerjisi: Teori ve uygulama.

Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretim Yönetmeliği. (2019, 12 Mayıs). **T.C. Resmi Gazete (Sayı: 30772).**

Elektrik Piyasası Kanunu ve Bazı Kanunlarda Değişiklik Yapılmasına Dair Kanun (Kanun No. 5784). (2008, 26 Temmuz). **T.C. Resmi Gazete (Sayı: 26948).**

Elektrik Piyasası Kanunu (Kanun No. 4628). (2001, 3 Mart). **T.C. Resmi Gazete (Sayı: 24335 Mükerrer).**

Elektrik Piyasası Kanunu (Kanun No. 6446). (2013, 30 Mart). **T.C. Resmi Gazete (Sayı: 28603).**

Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. (t.y.). **Elektrik piyasası mevzuatı.** <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/23-2-3/elektrik-piyasasi>

Garratt, J. R. (1992). The atmospheric boundary layer. Cambridge University Press.

Hahmann, A. N., Sile, T., Witha, B., Davis, N. N., Dörenkämper, M., Ezber, Y., García-Bustamante, E., González-Rouco, J. F., Navarro, J., Olsen, B. T., & Söderberg, S. (2020). The making of the New European Wind Atlas – Part 1: Model sensitivity. *Geoscientific Model Development,* 13(10), 5053–5078. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-5053-2020>

Hocaoglu, F. O., & Kurban, M. (2007). Effect of missing wind speed data on wind power estimation. *Intelligent Data Engineering and Automated Learning – IDEAL 2007* (ss. 954-963). Springer.

<https://dl.ifip.org/db/conf/ideal/ideal2007/HocaogluK07.pdf>

Holton, J. R. (2004). An introduction to dynamic meteorology (4. baskı). Elsevier Academic Press.

Holton, J. R., & Hakim, G. J. (2012). An introduction to dynamic meteorology (5. baskı). Academic Press.

International Electrotechnical Commission (IEC). (t.y.). Wind energy generation systems – IEC 61400 series. <https://webstore.iec.ch/en/publication/26423>

Johari, M. K., Jalil, M., & Shariff, M. F. M. (2018). Comparison of horizontal axis wind turbine (HAWT) and vertical axis wind turbine (VAWT). Renewable and Sustainable Energy Reviews, 42, 521–532.

Jonietz Alvarez, M. G., Watson, W., & Gottschall, J. (2024). Understanding the impact of data gaps on long-term offshore wind resource estimates. Wind Energy Science, 9(11), 2217–2233. <https://doi.org/10.5194/wes-9-2217-2024>

Justus, C. G., Hargraves, W. R., Mikhail, A., & Graber, D. (1978). Methods for estimating wind speed frequency distributions. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 17(3), 350-353.

Kadioğlu, M. (2000). Türkiye'de iklim ve hava olayları. Alfa Yayıncılık.

Kaya, E. (2021). A'dan Z'ye rüzgar santrali.

Kosović, B., Basu, S., Berg, J., Berg, L. K., Haupt, S. E., Larsén, X. G., Peinke, J., Stevens, R. J. A. M., Veers, P., & Watson, S. (2025). Impact of atmospheric turbulence on performance and loads of wind turbines: Knowledge gaps and research challenges. Wind Energy Science. <https://doi.org/10.5194/wes-2025-42>

Kristensen, L. (1999). The perennial cup anemometer. Wind Energy, 2(1), 59-75.

Lin, P. P., Wächter, M., Reza, M., & Peinke, J. (2023). Discontinuous jump behavior of the energy conversion in wind energy systems. PRX Energy, 2(3). <https://doi.org/10.1103/prxenergy.2.033009>

Liu, L., & Stevens, R. J. A. M. (2021). Effects of atmospheric stability on the performance of a wind turbine located behind a three-dimensional hill. Renewable Energy, 175, 926–935. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.05.035>

Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. (2010). Wind energy

- explained: Theory, design and application (2. baskı). Wiley.
- Measnet. (t.y.).** Documents. <https://www.measnet.com/documents/>
- Mendecka, B., & Lombardi, L. (2019).** Life cycle environmental impacts of wind energy technologies: A review of simplified models and harmonization of the results. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 111, 462–480. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.019>
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM). (2023).** Türkiye'nin rüzgâr rejimi raporu. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Yayınları.
- Mortensen, N. G. (1994).** Wind measurements for wind energy applications: A review. 16th British Wind Energy Association Conference (ss. 353-360). Mechanical Engineering Publications Limited.
- Nappo, C. J. (1983).** The representativeness of meteorological observations.
- Öztürk, B. (2022).** Ambient turbulence intensity effects on wind turbine power performance [Yüksek lisans tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi]. ODTÜ OpenMETU. <https://open.metu.edu.tr/handle/11511/99412>
- Perera, S. M. H. D., Putrus, G., Conlon, M., Narayana, M., & Sunderland, K. (2022).** Wind energy harvesting and conversion systems: A technical review. *Energies*, 15(24), 9299. <https://doi.org/10.3390/en15249299>
- Porté-Agel, F., Bastankhah, M., & Shamsoddin, S. (2019).** Wind-turbine and wind-farm flows: A review. *Boundary-Layer Meteorology*, 174. <https://doi.org/10.1007/s10546-019-00473-0>
- Porté-Agel, F., Wu, Y.-T., & Chen, C.-H. (2013).** A numerical study of the effects of wind direction on turbine wakes and power losses in a large wind farm. *Energies*, 6(10), 5297–5313. <https://doi.org/10.3390/en6105297>
- Royal Meteorological Society. (2018).** Local winds.
- Rüzgar Enerjisine Dayalı Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanları ve Bağlantı Kapasitelerinin Tahsisine İlişkin Şartname (YEKA RES-2025 Şartnamesi). (2025).**
- Sánchez Gómez, M., & Lundquist, J. K. (2020).** The effects of wind veer during the morning and evening transitions on wind turbine performance (NREL Technical Report). <https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/77188.pdf>
- Sawalha, S. (2017).** Prospects of wind power generation in Jordan: The case

of street lighting. Renewable Energy and Power Quality Journal, 1(15), 922–925. <https://doi.org/10.24084/repqj15.520>

ScienceDirect. (t.y.). Yaw control - an overview.

Stehly, T., Duffy, P., & Mulas Hernando, D. (2024). Cost of wind energy review: 2024 edition. <https://doi.org/10.2172/2479271>

Stull, R. B. (1988). An introduction to boundary layer meteorology. Kluwer Academic Publishers.

Suomi, I., & Vihma, T. (2018). Wind gust measurement techniques—From traditional anemometry to new possibilities. Sensors, 18(4), 1300.

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2020, 19 Şubat). Elektrik üretim ve depolama tesisleri kabul yönetmeliği. Resmi Gazete. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2020/02/20200219-1.htm>

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2023). Yenilenebilir enerji üretim faaliyetleri: Lisanslı elektrik üretimi. <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilebilir-enerji-uretim-faaliyetleri-lisansli-elektrik-uretimi>

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (t.y.). Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Atlası (REPA). <https://repa.enerji.gov.tr/REPA/>

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (t.y.-a). Elektrik üretim tesisleri için lisans alma süreçleri ve genel esaslar. <https://enerji.gov.tr/>

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (t.y.-b). Lisanslı elektrik üretimi. <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-lisansli-elektrik-uretimi>

Tanvir, M. S., & Etminan, A. (2025). Comparative analysis of offshore and onshore wind turbines: Efficiency, design, and environmental impact. Wind Engineering. <https://doi.org/10.1177/0309524X251386646>

Tjiu, W., Marnoto, T., Mat, S., Ruslan, M. H., & Sopian, K. (2015). Darrieus vertical axis wind turbine for power generation I: Assessment of Darrieus VAWT configurations. Renewable Energy, 75, 50-67.

Troen, I., & Petersen, E. L. (1989). European wind atlas. Risø National Laboratory.

Tumse, S., Bilgili, M., Yildirim, A., & Sahin, B. (2024). Comparative analysis of global onshore and offshore wind energy characteristics and potentials. Sustainability, 16(15), 6614. <https://doi.org/10.3390/su16156614>

Türk Standardları Enstitüsü (TSE). (t.y.). <https://www.tse.org.tr/>

Türkeş, M. (1996). Spatial and temporal analysis of annual rainfall variations in Turkey. International Journal of Climatology, 16(9), 1057–1076.

U.S. Department of Energy. (2024). How do wind turbines work? Office of Energy Efficiency & Renewable Energy – Wind Exchange. <https://windexchange.energy.gov/small-wind-guidebook#intro>

Wallace, J. M., & Hobbs, P. V. (2006). Atmospheric science: An introductory survey (2. baskı). Academic Press.

Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun (YEKDEM Yönetmeliği). (2023). <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=18907&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5>

Zhang, S., & Kirumira, N. (2024). Techniques of recycling end-of-life wind turbine blades in the pavement industry: A literature review. Clean Technologies and Recycling, 4(1), 89–107. <https://doi.org/10.3934/ctr.2024005>

Zhang, W., Walker, E., & Markfort, C. D. (2025). Influence of surface complexity and atmospheric stability on wind shear and turbulence in a peri-urban wind energy site. Energies, 18(19), 5211. <https://doi.org/10.3390/en18195211>

Dhanola, A., & Garg, H. (2020). Tribological challenges and advancements in wind turbine bearings: A review. Engineering Failure Analysis, 118, 104885. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104885>

Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (2014). Rüzgar ve güneş ölçüm istasyonları ek dokümanları (Ek C, Ek D, Ek E). Ankara: MGM.

Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (2014, 17 Haziran). Rüzgar ve Güneş Enerjisine Dayalı Önlisans Başvuruları İçin Yapılacak Rüzgar ve Güneş Ölçümleri Uygulamalarına Dair Tebliğ. Resmî Gazete, 29033.

Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. (2013, 4 Aralık). Rüzgar ve Güneş Enerjisine Dayalı Lisans Başvurularına İlişkin Ölçüm Standardı Tebliğinin Yürürlükten Kaldırılmasına Dair Tebliğ. Resmî Gazete.

Stavridou, N., Koltsakis, E., & Baniotopoulos, C. C. (2020). Lattice and tubular steel wind turbine towers: Comparative structural investigation. Energies, 13(23), 6325. <https://doi.org/10.3390/en13236325>

IEA Wind Task 31: Design of a new comparisonmetrics simulation challenge for wind resourceassessment in complex terrain Stage 1

- Bañuelos-Ruedas, F., Angeles-Camacho, C., & Rios-Marcuello, S. (2010).** Analysis and validation of the methodology used in the extrapolation of wind speed data at different heights. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 14(8), 2383–2391. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.05.005>
- Genç, M. S., & Gökçek, M. (2009).** Evaluation of wind characteristics and energy potential in Kayseri, Turkey. *Journal of Energy Engineering*, 135(2), 33–43. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9402\(2009\)135:2\(33\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9402(2009)135:2(33))
- Külüm, E., Genç, M. S., & Karagöz, F. (2023).** Evaluation of wind measurement methods for determination of realistic wind shear: A case study in Aksaray, Turkey. *Flow Measurement and Instrumentation*, 93, 102408. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2023.102408>
- Madsen, P. H., & Risø, D. (2008).** Introduction to the IEC 61400 1 Standard. Risø National Laboratory, Technical University of Denmark.
- MEASNET. (2016).** Evaluation of Site Specific Wind Conditions (Version 2).
- Seifert, J. K., Grant, I., & Stull, R. (2012).** Wind speed and direction measurements in complex terrain. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 111, 48–59.
- Furevik, B., Ágústson, H., Borg, A., Zakari, M., Nyhammer, F., & Gausen, M. (2020).** Meteorological observations in tall masts for the mapping of atmospheric flow in Norwegian fjords. *Earth System Science Data*, 12(4), 3021–3035. <https://doi.org/10.5194/essd-2020-32>
- Hagemann, S., Klaas, T., Callies, D., Kühn, P., & Lange, B. (2012).** Wind profiles and turbulence intensity over complex forested terrain: First results of 200 m met mast measurements. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 107–108, 247–256. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2012.03.025>
- Jing, H., Liao, H., Tao, Q., & Jiang, J. (2020).** Field measurement study of wind characteristics at different measuring positions in a mountainous valley. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 112, 109991. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2019.109991>
- Midjiyawa, Z., Cheynet, E., Reuder, J., Ágústsson, H., & Kvamsdal, T. (2021).** Potential and challenges of wind measurements using met-masts in complex topography for bridge design: Part I – Integral flow characteristics. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 213, 104584. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2021.104584>

Zhang, J., Zhang, M., Li, Y., & Fang, C. (2020). Comparison of wind characteristics at different heights of deep-cut canyon based on field measurement. *Advances in Structural Engineering*, 23(2), 219–233. <https://doi.org/10.1177/1369433219868074>

Midjiyawa, Z., Furevik, B. R., Cheynet, E., & Jakobsen, J. B. (2021). Potential and challenges of wind measurements using met-masts in complex topography for bridge design. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 214, 104584. Fig. 6.

Tumse, S., Bilgili, M., Yildirim, A., & Şahin, B. (2024). Comparative Analysis of Global Onshore and Offshore Wind Energy Characteristics and Potentials. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su16156614>

Darwish, A., & Al-Dabbagh, R. (2020). Wind energy state of the art: present and future technology advancements. *Renewable Energy and Environmental Sustainability*. <https://doi.org/10.1051/rees/2020003>

Hoeser, T., & Kuenzer, C. (2022). Global dynamics of the offshore wind energy sector monitored with Sentinel-1: Turbine count, installed capacity and site specifications. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation*, 112, 102957. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102957>

Watson, S., Moro, A., Reis, V., Baniotopoulos, C., Barth, S., Bartoli, G., Bauer, F., Boelman, E., Bosse, D., Cherubini, A., Croce, A., Fagiano, L., Fontana, M., Gambier, A., Gkoumas, K., Golightly, C., Latour, M., Jamieson, P., Kaldellis, J., Macdonald, A., Murphy, J., Muskulus, M., Petrini, F., Pigolotti, L., Rasmussen, F., Schild, P., Schmehl, R., Stavridou, N., Tande, J., Taylor, N., Telsnig, T., & Wiser, R. (2019). Future emerging technologies in the wind power sector: A European perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2019.109270>

Timilsina, G., Kooten, G., & Narbel, P. (2013). Global wind power development: Economics and policies. *Energy Policy*, 61, 642-652. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2013.06.062>