

T.C.
GİRESUN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

WEIBULL DAĞILIMI TEMELLİ RÜZGÂR
ENERJİSİ POTANSİYELİ ANALİZİ VE
İTERAKTİF EĞİTİM PLATFORMU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Öğrencinin Adı SOYADI : Mehmet ÇAKIR

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih :

Enstitü Anabilim Dalı : Elektrik-Elektronik Mühendisliği

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hüseyin ÇALIK

Haziran 2025
GİRESUN

**T.C.
GİRESUN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**WEIBULL DAĞILIMI TEMELLİ RÜZGÂR
ENERJİSİ POTANSİYELİ ANALİZİ VE
İTERAKTİF EĞİTİM PLATFORMU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet ÇAKIR

Enstitü Anabilim Dalı : Elektrik-Elektronik Mühendisliği

Bu tez .././20.. tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

**Prof. Dr.
Hüseyin ÇALIK
Jüri Başkanı**

**Prof. Dr.
Onur Özdal MENGİ
Üye**

**Prof. Dr.
Ercüment KARAKAŞ
Üye**

**Prof. Dr.
Bahadır KOZ
Enstitü Müdürü**

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

MEHMET ÇAKIR

10/07/2025

TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans tezinin hazırlanma sürecinde, bilgi, birikim ve deneyimleriyle her zaman yanımda olan; araştırma sürecimin her aşamasında bilimsel rehberliğini esirgemeyen, değerli katkıları ve yol göstericiliği ile çalışmama yön veren kıymetli danışman hocam Prof. Dr. Hüseyin Çalık’a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Kendisinin akademik disiplini ve yönlendirmeleri, yalnızca bu çalışmanın ilerlemesine değil, aynı zamanda araştırmacı kimliğimin gelişimine de büyük katkı sağlamıştır. Ayrıca, tez sürecinde desteklerini esirgemeyen diğer hocalarıma, birlikte çalışmaktan onur duyduğum araştırma arkadaşlarıma ve katkı sağlayan tüm paydaşlara teşekkür ederim.

Bu süreçte her zaman yanımda olan, anlayışları, sabırları ve manevi destekleriyle beni güçlü tutan sevgili eşime ve değerli aileme sonsuz teşekkür ederim. Bu çalışmanın, ülkemizin yenilenebilir enerji alanındaki gelişimine ve bilimsel literatüre katkı sunmasını temenni ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	I
İÇİNDEKİLER.....	II
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ	VIII
TABLolar LİSTESİ	XI
ÖZET	XII
SUMMARY	XIII
BÖLÜM 1. GİRİŞ.....	1
1.1. Türkiye ’deki Yenilenebilir Enerji Potansiyeli	2
1.2. Dünya Genelindeki Yenilenebilir Enerji Trendleri	7
BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	10
2.1. Önceki Çalışmalar.....	10
2.2. Değerlendirme.....	19
2.3. Rüzgâr Enerjisi Sistemleri	20
2.3.1. Rüzgâr Türbinleri ve Bileşenleri.....	21
2.3.1.1. Rotor	22
2.3.1.2. Dişli kutusu.....	25
2.3.1.3. Jeneratör.....	27
2.3.1.4. Kontrol sistemleri.....	28
2.3.1.5. Frenleme sistemi.....	32
2.3.1.6. Güç elektronîği düzeni.....	33
2.3.1.7. SCADA sistemi.....	35
2.3.1.8. Kule.....	36

2.3.1.9. Rüzgâr türbinlerinde kullanılan güç dönüştürücüleri ve dağıtım.....	37
sistemleri	
2.3.2. Türbin Türleri.....	39
2.3.2.1. Yatay eksenli türbinler.....	39
2.3.2.2. Dikey eksenli türbinler.....	40
2.3.3. Rüzgâr Aerodinamiği.....	41
2.3.3.1. Kanatlara etki eden aerodinamik kuvvetler ve kanat yapıları.....	41
2.3.3.2. Kanat profil tasarımı ve performansa etkileri.....	43
2.3.4. Genel İstatistik Kavramları.....	48
2.3.4.1. Ortalama ve ağırlıklı ortalama.....	48
2.3.4.2. Standart sapma ve varyans.....	50
2.3.4.3. Normal dağılım ve veri analizi	51
BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	53
3.1. Materyal.....	53
3.1.1. Rüzgâr Ölçümü.....	53
3.1.1.1. Cup anemometre.....	53
3.1.1.2. Pervaneli anemometre.....	54
3.1.1.3. Basınç tüpü anemometresi.....	55
3.1.1.4. Termal anemometre.....	56
3.1.1.5. Ultrasonik anemometre.....	57
3.2. Yöntem.....	58
3.2.1. Rüzgâr hızı analizi.....	58
3.2.2. Ortalama rüzgâr hızı.....	60
3.2.3. Rüzgâr hızının dağılımı.....	61
3.2.4. Yüksekliğin rüzgâr hızına etkisi.....	64
3.2.5. Sıcaklığın hava yoğunluğuna etkisi.....	66
3.3. Weibull Analizi	67
3.3.1. Weibull dağılımının tanıtımı ve temel kavramlar.....	67
3.3.2. K ve C parametrelerinin hesaplanması.....	72
3.3.2.1. Standart sapma metodu ile hesaplama.....	72
3.3.2.2. Moment metodu ile hesaplama.....	74

3.3.2.3. Grafik metodu ile hesaplama.....	75
3.3.2.4. Enerji patern faktörü metodu ile hesaplama.....	78
3.3.2.5. Maksimum olasılık metodu ile hesaplama.....	79
3.3.3. Weibull modeli ile enerji üretim tahmini.....	81
3.3.4. IEC 64100 standardına göre türbin seçimi.....	85
3.3.4.1. Wake etkisinin hesaplanması.....	87
3.3.4.2. Yorulma yükleri ve aşırı yük durumlarına karşı alınan önlemler.....	90
3.3.4.3. Sismik yüklere karşı alınan önlemler.....	92
3.3.4.4. Şebeke bağlantı gereklilikleri.....	93
3.4. Ekonomik Analiz.....	95
3.4.1. Rüzgâr enerjisi ekonomisini etkileyen faktörler.....	96
3.4.2. Bugünkü değer yaklaşımı.....	99
3.4.3. Rüzgâr enerjisi yatırımlarında ekonomik etkinliğin değerlendirme.....	103
kriterleri	
3.4.3.1. Net bugünkü değer.....	104
3.4.3.2. Fayda/maliyet oranı.....	106
3.4.3.3. Geri ödeme süresi.....	107
3.4.3.4. İç verim oranı.....	109
 BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	 115
4.1. Geliştirilen İnteraktif Eğitim Platformu Tanıtımı ve Fonksiyonları	115
4.1.1. Veri girişi ve kullanıcı dostu arayüz tasarımı.....	116
4.1.2. Rüzgâr verilerinin analizi ve sonuçların sunumu.....	119
4.1.2.1. Analiz paneli.....	119
4.1.2.2. Ölçek ve şekil parametreleri hesaplama metodu.....	121
4.2. Rüzgâr Türbinleri Seçimi ve Enerji Etüdü.....	122
4.2.1. Farklı türbin tiplerinin analizleri.....	123
4.2.2. Kapasite faktörünün hesaplanması.....	124
4.2.3. Grafiklerin yorumlanması.....	125
4.3. Ekonomik Etüd.....	126
4.4. Geliştirilen Uygulama İle İlgili Test Geliştirilmesi.....	128

BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE SONUÇ	134
KAYNAKLAR	136
ÖZGEÇMİŞ	



SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

BD	: Bugünkü Değer
CDF	: Cumulative Distribution Function
CF	: Capacity Factor
DFIG	: Doubly Fed Induction Generator
DFIG	: Doubly Fed Induction Generator
DVR	: Dinamik Voltaj Regülatörü
FMO	: Fayda/Maliyet Oranı
HAWT	: Horizontal Axis Wind Turbine
IEA	: International Energy Agency
IVO	: İç Verim Oranı
IY	: İlk Yatırım
LIDAR	: Light Detection and Ranging
LVRT	: Low Voltage Ride Through
MPPT	: Maximum Power Point Tracking
MW	: Mega watt
NACA	: National Advisory Committee for Aeronautics
NREL	: National Renewable Energy Laboratory
NACA	: National Advisory Committee for Aeronautics
NÇ	: Nakit Çıkışlar
NBD	: Net Bugünkü Değer
NG	: Nakit Girişler
PDF	: Probability Density Function
PMSG	: Permanent Magnet Synchronous Generator
SCADA	: Supervisory Control and Data Acquisition
SCIG	: Squirrel Cage Induction Generator
SODAR	: Sonic Detection and Ranging

STATCOM : Static VAR Compensator
SVC : Static VAR Compensator
VAWT : Vertical Axis Wind Turbine
WSET : WindStat Education Tool



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Türkiye ‘de yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam kurulu güç..... değişim grafiği	4
Şekil 1.2. Türkiye ‘de yenilenebilir enerji kaynakları bazlı kurulu güç değişim... grafiği	5
Şekil 1.3. Türkiye ‘deki enerji üretim kaynaklarının payı.....	6
Şekil 1.4. Dünya ‘da yenilenebilir enerji kaynakları bazlı kurulu güç değişim... grafiği	9
Şekil 1.5. Dünya ‘daki yenilenebilir enerji kaynaklarının payı.....	9
Şekil 2.1. Bir rüzgâr türbini genel görünümü	24
Şekil 2.2. Rüzgâr türbininin hub kısmı	25
Şekil 2.3. İki kanatlı mini rüzgâr türbini genel görünümü.....	26
Şekil 2.4. Pitch kontrol mekanizması görünümü.....	29
Şekil 2.5. YAW kontrol genel görünümü.....	31
Şekil 2.6. Disk tipi fren görünümü.....	33
Şekil 2.7. Rüzgâr türbini ve jeneratörün çalışma noktaları a. Şebekeye..... doğrudan bağlı çalışma b. Akü şarj cihazı olarak bağımsız çalışma	34
Şekil 2.8. Rüzgâr türbininin şebekeye bağlantısı (a) Asenkron jeneratör (ASG).. veya senkron jeneratörün (SG) şebekeye doğrudan bağlantısı (b) Ara bir DC devresi ile frekans dönüştürücü üzerinden şebekeye enerji aktaran senkron jeneratör	35
Şekil 2.9. a. Rüzgâr türbini iletişim modeli b. Rüzgâr türbini bilgi modeli.....	36
Şekil 2.10. HAWT türbin görünümü.....	40
Şekil 2.11. VAWT türbin görünümü.....	41
Şekil 2.12. (a) Yatay pozisyon—tüm aerodinamik kuvvet kaldırmadır (lift) (b) Pozitif hücum açısı—aerodinamik kuvvet kaldırma (lift) ve sürüklenme (drag) içerir; (c) Negatif hücum açısı—kaldırma (lift)	43

ters yöndedir; (d) Artan pozitif hücum açısı—aerodinamik kuvvet tamamen sürüklemeye (drag) dönüşene kadar.

Şekil 2.13. Düşük hızlı bir rüzgâr tüneli.....	44
Şekil 2.14. Türbin kanadına etki eden kuvvetlerin gösterimi.....	46
Şekil 2.15. Rüzgâr verilerinin olasılık yoğunluk fonksiyonu ve histogramı.....	52
Şekil 3.1. Cup tipi anemometre.....	53
Şekil 3.2. Pervaneli tip anemometre	54
Şekil 3.3. Basınç tüpü anemometresinin prensibi.....	56
Şekil 3.4. Termal anemometre görünümü.....	56
Şekil 3.5. Termal anemometre çalışma prensibi.....	56
Şekil 3.6. Ultrasonic anemometre görünümü.....	58
Şekil 3.7. İki farklı sahadaki rüzgâr dağılımının karşılaştırılması.....	62
Şekil 3.8. a. Aylık rüzgâr hızı olasılık dağılımı b. Rüzgâr hızı için kümülatif.... dağılım.	64
Şekil 3.9. a. Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu b. Weibull kümülatif..... dağılım fonksiyonu.	70
Şekil 3.10. a. Farklı k şekil parametrelerine göre Weibull olasılık yoğunluk..... fonksiyonu b. Farklı k şekil parametrelerine göre Weibull kümülatif dağılım fonksiyonu	71
Şekil 3.11. Farklı metotlar ile oluşturulmuş kümülatif dağılım.....	73
Şekil 3.12. Weibull k ve c parametrelerini tahmin etmek için grafiksel yöntem...	76
Şekil 3.13. Enerji tahmininin grafiksel gösterimi	81
Şekil 3.14. Rüzgâr türbini güç eğrisi ve EIR / ERO alanları.....	82
Şekil 3.15. Larsen tarafından önerilen wake modeli	90
Şekil 3.16. Rüzgâr hızının rüzgâr enerjisi üretim maliyetine etkisini gösteren.... grafik	96
Şekil 3.17. Proje ömrünün rüzgâr jeneratörü ekonomisine etkisi.....	..98
Şekil 3.18. Yıllık sabit nakit akış diyagramı	101
Şekil 3.19. Maliyet ve faydaların birikimli net bugünkü değeri ile geri ödeme.... süresini belirtildiği grafik	109
Şekil 3.20. Farklı faiz oranlarında birikimli net bugünkü değerler.....	111
Şekil 4.1. Arayüz giriş sayfası	116

Şekil 4.2. Veri oku ve düzenle sayfası	118
Şekil 4.3. Veri analiz sayfası	119
Şekil 4.4. Enerji etüdü sayfası	123
Şekil 4.5. Ekonomik etüd sayfası.....	128
Şekil 4.6. İçerik uygunluğu değerlendirmesi.....	131
Şekil 4.7. Pedagojik yapı değerlendirmesi.....	131
Şekil 4.8. Dil değerlendirmesi.....	132
Şekil 4.9. Görsel tasarım değerlendirmesi.....	132
Şekil 4.10. Genel değerlendirme.....	133



TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Rüzgâr türbinlerinde kullanılan kule tipleri	37
Tablo 3.1. 10 dakikalık aralıklarla ölçülmüş rüzgâr hızı tablosu.....	60
Tablo 3.2. Aylık rüzgâr hızı frekans dağılımı	63
Tablo 3.3. Hellmann katsayısına göre arazi türleri	65
Tablo 3.4. Weibull parametrelerinin hesaplamasında kullanılan yöntemler.....	80
tablosu	

WEIBULL DAĞILIMI TEMELLİ RÜZGÂR ENERJİSİ POTANSİYELİ ANALİZİ VE İNTERAKTİF EĞİTİM PLATFORMU

ÖZET

Bu bitirme çalışmasında, yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli bir yere sahip olan rüzgâr enerjisinin, Weibull dağılımına dayalı istatistiksel analiz yöntemleri kullanılarak değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Rüzgâr hızının zaman ve mekâna bağlı değişkenliği nedeniyle enerji üretim potansiyelinin doğru tahmini, özellikle türbin seçimi ve yatırım fizibilitesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu doğrultuda, rüzgâr verileri farklı istatistiksel yöntemlerle analiz edilerek Weibull dağılımının şekil (k) ve ölçek (c) parametreleri elde edilmiş; ardından bu parametreler kullanılarak yıllık enerji üretimi hesaplanmış ve kapasite faktörü değerlendirilmiştir.

Ayrıca, IEC 61400 standardı doğrultusunda uygun türbin seçimi yapılmış ve wake etkileri de dâhil olmak üzere çeşitli teknik kriterler göz önünde bulundurulmuştur. Tez kapsamında geliştirilen interaktif eğitim arayüzü, kullanıcıların rüzgâr enerjisi analizine dair temel kavramları hem teorik hem uygulamalı olarak öğrenmelerini hedeflemektedir. Bu yazılım platformu üzerinden kullanıcılar; veri girişinden, Weibull analizi sonuçlarına, enerji üretim tahminlerinden türbin seçim sürecine kadar tüm adımları görsel grafikler ve hesaplama modülleriyle takip edebilmektedir. Böylelikle, mühendislik eğitimi alan lisansüstü öğrenciler başta olmak üzere enerji alanında çalışan araştırmacıların, sahaya özgü rüzgâr enerjisi potansiyelini kolaylıkla değerlendirmeleri mümkün hâle gelmiştir. Platform, farklı türbin modellerinin karşılaştırılmasını ve ekonomik analizlerin yapılmasını da desteklemektedir.

Anahtar kelimeler: Rüzgâr, Analiz, Weibull, Parametre, Enerji, Türbin, MATLAB

WIND ENERGY POTENTIAL ANALYSIS BASED ON WEIBULL DISTRIBUTION AND INTERACTIVE EDUCATIONAL PLATFORM

SUMMARY

In this undergraduate thesis, it is aimed to evaluate wind energy—one of the most significant renewable energy sources—through statistical analysis methods based on the Weibull distribution. Due to the temporal and spatial variability of wind speed, accurately estimating the energy production potential is critically important, particularly for turbine selection and investment feasibility. Accordingly, wind data were analyzed using various statistical techniques to determine the shape (k) and scale (c) parameters of the Weibull distribution; subsequently, these parameters were used to estimate annual energy production and assess the capacity factor. In addition, turbine selection was performed in accordance with the IEC 61400 standard, taking into account various technical criteria including wake effects.

An interactive educational interface developed within the scope of the thesis is intended to enable users to learn the fundamental concepts of wind energy analysis both theoretically and practically. Through this software platform, users can follow all steps—from data input to Weibull analysis results, from energy production estimation to turbine selection—via graphical outputs and computational modules. Thus, it becomes possible for graduate engineering students, as well as researchers working in the field of energy, to easily evaluate site-specific wind energy potential. The platform also supports the comparison of different turbine models and the execution of economic analyses.

Keywords: Wind, Analysis, Weibull, Parameter, Energy, Turbine, MATLAB

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Yenilenebilir enerji kaynakları, doğal süreçlerle sürekli olarak yenilenen ve tükenme riski taşımayan enerji kaynaklarıdır. Güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, hidroelektrik enerji, jeotermal enerji ve biyokütle enerjisi gibi kaynaklar bu kategoride değerlendirilir. Bu kaynaklar, çevresel zararları minimal seviyede tutarken enerji güvenliği ve sürdürülebilirlik açısından büyük bir potansiyele sahiptir.

Yenilenebilir enerji, iklim değişikliğiyle mücadelede kritik bir araç olarak görülmektedir. Bu enerji türü, karbon emisyonlarını azaltarak sera gazı etkisini minimuma indirir ve fosil yakıtların neden olduğu çevresel tahribatın önüne geçer.

Karbon salınımı, fosil yakıtların yanması sonucu atmosfere salınan karbondioksit (CO₂) ve diğer sera gazlarını ifade eder. Karbon salınımını azaltmak, küresel ısınmayı yavaşlatmak ve iklim değişikliğiyle mücadele etmek için hayati öneme sahiptir.

Karbon salınımını azaltmanın başlıca faydaları şu şekildedir:

1. **İklim Değişikliği ile Mücadele:** Artan karbon salınımı, sıcaklıkların yükselmesine ve doğal ekosistemlerin bozulmasına neden olur.
2. **Halk Sağlığı:** Karbon salınımının neden olduğu hava kirliliği, astım gibi solunum yolu hastalıklarını artırır.
3. **Ekonomik İstikrar:** Karbon salınımını azaltmak, doğal afetlerin ekonomik etkilerini sınırlayarak uzun vadede maliyet avantajı sağlar.
4. **Enerji Güvenliği:** Yenilenebilir enerji kaynakları, fosil yakıt ithalatına bağımlılığı azaltır ve yerel enerji kaynaklarının etkin kullanımını teşvik eder.

Yenilenebilir enerji kaynakları, enerji üretiminde çeşitlilik ve sürdürülebilirlik sağlamak amacıyla aşağıdaki şekilde sınıflandırılır:

- **Güneş Enerjisi:** Güneş ışınlarından elektrik üretimi, fotovoltaik ve termal teknolojilerle gerçekleştirilir.

- **Rüzgâr Enerjisi:** Rüzgâr türbinleri aracılığıyla kinetik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesidir.
- **Hidroelektrik Enerji:** Su akışının potansiyel enerjiden elektrik enerjisine dönüştürülmesidir.
- **Jeotermal Enerji:** Yer altındaki sıcak su ve buharın enerji üretimi için kullanılmasıdır.
- **Biyokütle Enerjisi:** Tarımsal atıkların ve organik materyallerin yakılması veya dönüştürülmesiyle enerji üretilir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının önemini şu faktörler açıklar:

1. **Çevresel Faydalar:** Karbon emisyonlarını azaltarak ekosistemin korunmasına yardımcı olur.
2. **Ekonomik Kazanımlar:** Yenilikçi teknolojilerle düşük maliyetli ve sürdürülebilir enerji üretimini mümkün kılar.
3. **Enerji Güvenliği:** Enerji arzında çeşitlilik sağlayarak fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltır.
4. **Uzun Vadeli Sürdürülebilirlik:** Yerel kaynakların kullanımıyla bölgesel kalkınmayı destekler.

Bu düzenlemeler ışığında, yenilenebilir enerji kaynakları sadece çevresel sürdürülebilirlik için değil, aynı zamanda ekonomik ve sosyal kalkınma için de vazgeçilmez bir role sahiptir. Hem mevcut hem de gelecek nesillerin enerji ihtiyaçlarını karşılamak için bu kaynakların etkin bir şekilde kullanılması büyük önem taşımaktadır.

1.1. Türkiye ‘deki Yenilenebilir Enerji Potansiyeli

Türkiye, doğal kaynaklarının çeşitliliği ve coğrafi konumunun sağladığı avantajlar sayesinde, yenilenebilir enerji kaynakları açısından dikkat çeken bir potansiyele sahiptir. Bu kaynakların etkin ve sürdürülebilir bir biçimde değerlendirilmesi, yalnızca enerji arz güvenliğini artırmakla kalmamakta, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik hedefleri ve ekonomik kalkınma için stratejik bir fırsat sunmaktadır. Ülkenin 2023 yılı

itibarıyla yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam kurulu güç içerisindeki payındaki artış, bu potansiyelin somut bir göstergesidir.

Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli, yüksek yıllık güneşlenme süresi ve güneş radyasyon değerleri ile dünya genelinde dikkat çeken bir seviyededir. 2023 yılı itibarıyla güneş enerjisinden sağlanan toplam kurulu güç 15.613,4 MW seviyesine ulaşmış ve bu değer, ülkenin toplam kurulu gücünün %14,08'ini oluşturmuştur. Bu büyümeye, özellikle 2013 yılından itibaren uygulanan devlet teşvikleri ve özel sektör yatırımları öncülük etmiştir. Ancak, güneş enerjisinin verimliliğini artırmak ve depolama kapasitesini genişletmek için ileri teknoloji çözümlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Türkiye, rüzgâr enerjisi potansiyeli bakımından Avrupa'nın önde gelen ülkeleri arasında yer almakta olup, bu alanda önemli yatırımlar gerçekleştirmiştir. 2023 itibarıyla rüzgâr enerjisinden elde edilen kurulu güç 11.806,1 MW' a ulaşmış ve bu oran toplam kurulu güç içinde %10,64'ünü oluşturmuştur.

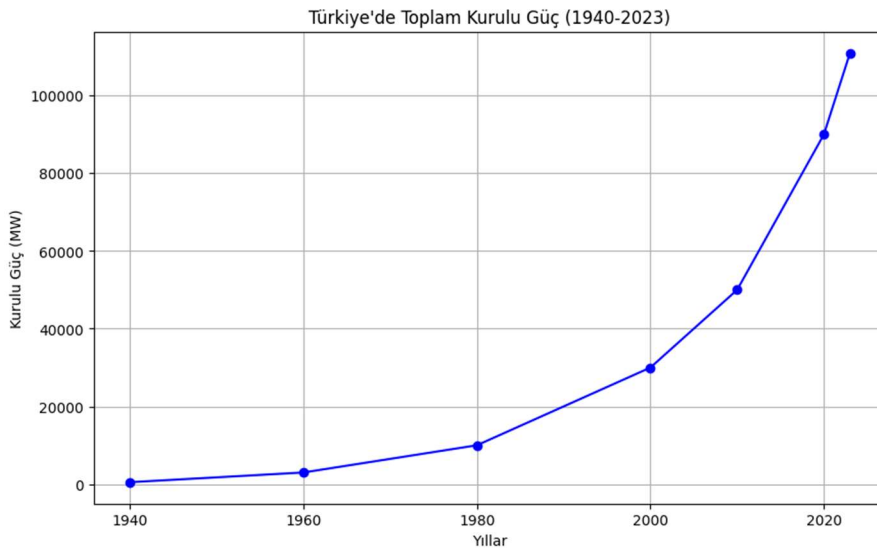
Marmara, Ege ve Akdeniz bölgelerinde yoğunlaşan rüzgâr enerjisi santralleri, Türkiye'nin fosil yakıt bağımlılığını azaltma hedeflerini destekleyen stratejik projelerdir. Hidrolik enerji, Türkiye'nin yenilenebilir enerji portföyündeki en köklü kaynaklardan biri olarak öne çıkmaktadır. Barajlı hidroelektrik santrallerin yanı sıra nehir tipi santraller, hidrolik enerji üretiminde önemli bir yer tutmaktadır. 2023 itibarıyla toplam hidrolik enerji kurulu güç 31.962,4 MW olarak kaydedilmiş ve toplam kapasitenin %28,82'sini oluşturmuştur.[1] Ancak, iklim değişikliğinin etkileri ve su kaynaklarının azalması, bu kaynağın sürdürülebilir kullanımı açısından önemli zorluklar doğurmaktadır.

Türkiye, jeotermal enerji kaynaklarının değerlendirilmesi açısından Avrupa ve dünya genelinde ön sıralarda yer almaktadır. 2023 itibarıyla toplam jeotermal enerji kurulu güç 1.691,3 MW seviyesine ulaşmış olup, bu değer toplam kurulu gücün %1,52'sine karşılık gelmektedir. [2] Jeotermal enerji, elektrik üretimi ve ısıtma alanlarında yoğun şekilde kullanılmakta ve karbon emisyonlarını azaltmaya yönelik önemli bir katkı sağlamaktadır.

Biyokütle enerji kaynakları, Türkiye'nin enerji üretimi ve atık yönetimi politikalarında giderek daha fazla öneme sahip bir alan haline gelmiştir. 2023 yılı itibariyle biyokütle enerjisinin kurulu güç kapasitesi 2.087,4 MW olup, toplam kurulu gücün %1,88'ini oluşturmaktadır. [3] Atık yönetimi ve enerji entegrasyonu konusundaki yeni teknolojiler, biyokütle enerji üretiminde verimliliği artırmaya yönelik önemli fırsatlar sunmaktadır.

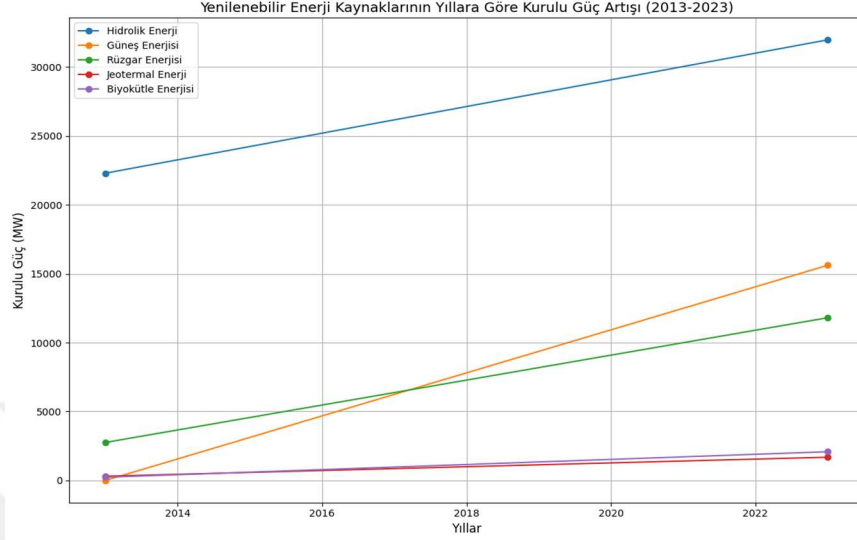
Deniz ve dalga enerjisi, Türkiye'nin yenilenebilir enerji potansiyeli içinde henüz yeterince değerlendirilememiş kaynaklardan biridir. Özellikle Karadeniz ve Ege kıyılarında bu kaynakların kullanımına yönelik pilot projeler gerçekleştirilmekle birlikte, teknolojik altyapı ve maliyetler bu alandaki ilerlemenin önündeki temel engellerdir.

Türkiye'nin yerli kaynaklardan sağladığı enerji üretimi, enerji arz güvenliği açısından kritik bir öneme sahiptir. 2023 itibariyle toplam kurulu gücün %64'ü yerli, %36'sı ise ithal kaynaklardan sağlanmaktadır. [4] Bu dağılım, yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesi ile ithal fosil yakıt bağımlılığının azaltılmasında önemli bir ilerleme kaydedildiğini göstermektedir. Şekil 1.1'de, 1940'tan 2023'e kadar Türkiye'nin yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam kurulu gücündeki düzenli artış vurgulanmaktadır. Söz konusu veriler, ülkenin enerji altyapısındaki dönüşümü ve bu süreçteki kapasite artışını net bir şekilde ortaya koymaktadır.



Şekil 1.1. Türkiye 'de yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam kurulu güç değişim grafiği [2]

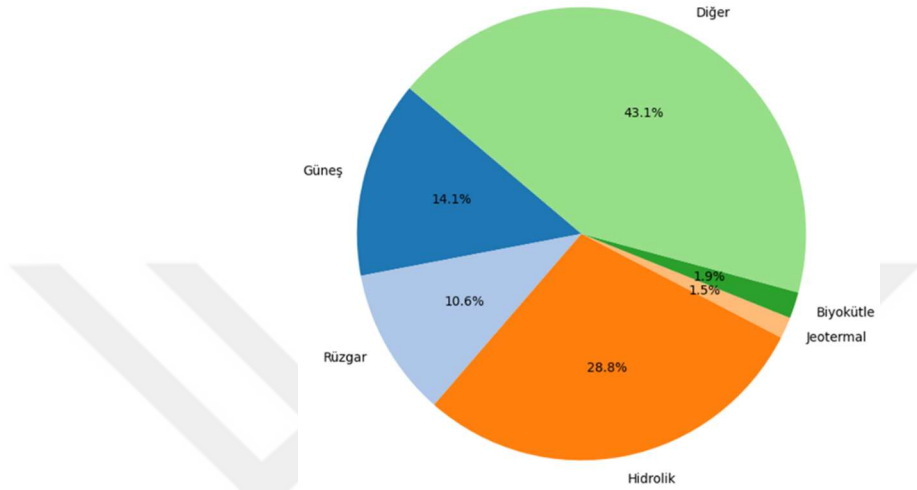
Şekil 1.1 ‘de Türkiye ‘deki yenilenebilir enerji kaynaklarının kurulu gücündeki yıllara göre değişim gösterilmektedir.



Şekil 1.2. Türkiye ‘de yenilenebilir enerji kaynakları bazı kurulu güç değişim grafiği [2]

Şekil 1.2’de 2013-2023 yılları arasında Türkiye’nin yenilenebilir enerji kaynaklarının kurulu güç değişimi gösterilmektedir. Hidrolik enerji, diğer kaynaklara göre en yüksek kurulu güce sahip olup istikrarlı bir artış trendi sergilemektedir. Bu durum, hidrolik enerjinin Türkiye’nin enerji üretiminde önemli bir paya sahip olduğunu ve düzenli olarak değerlendirildiğini göstermektedir. Güneş enerjisi ise hızlı bir büyüme trendi ile dikkat çekmektedir. Son yıllarda güneş enerjisi potansiyelinin etkin bir şekilde değerlendirilmesi, bu alandaki yatırımların arttığını ortaya koymaktadır. Rüzgâr enerjisi de düzenli bir artış göstermekte ancak güneş enerjisi kadar hızlı büyümektedir. Bu durum, rüzgâr potansiyelinin önemli ölçüde değerlendirildiğini ancak büyüme oranının daha yavaş bir seyir izlediğini göstermektedir. Jeotermal enerji, daha düşük bir kurulu güce sahip olmasına rağmen, sabit ve düzenli bir artış trendi sergilemektedir. Bu da jeotermal enerji potansiyelinin istikrarlı bir şekilde geliştirilmekte olduğunu işaret etmektedir. Biyokütle enerjisi ise diğer kaynaklara göre daha düşük seviyede kalmakla birlikte artış göstermektedir. Bu durum, biyokütle enerjisinin enerji arzında daha küçük bir rol oynadığını ancak büyüme potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Genel olarak, grafik Türkiye’nin yenilenebilir enerji kaynaklarının kurulu gücünü sürekli artırdığını ve enerji çeşitliliğini

genişlettiğini göstermektedir. Özellikle güneş ve rüzgâr enerjisi, hızlı büyüme oranlarıyla ne çıkarken, hidrolik enerji lider konumunu korumaktadır. Bu eğilimler, Türkiye’nin fosil yakıt bağımlılığını azaltma ve sürdürülebilir enerjiye geçiş hedeflerine yönelik önemli adımlar attığını yansıtmaktadır.



şekil 1.3. Türkiye ‘deki enerji üretim kaynaklarının payı [2] [3]

şekil 1.3 ‘te, 2023 yılı itibarıyla Türkiye’nin yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam enerji portföyündeki oranlarını detaylandırılmaktadır. Grafikten, hidrolik enerjinin yüzde 28,8 ile en büyük paya sahip olduğu, bunu yüzde 14,1 ile güneş enerjisi ve yüzde 10,6 ile rüzgâr enerjisinin takip ettiği görülmektedir. Jeotermal ve biyoktle enerjisi ise sırasıyla yüzde 1,5 ve yüzde 1,9 ile toplam portfyde daha küçük ancak anlamlı bir katkı sağlamaktadır. "Diğer" kategorisi, yüzde 43,1 gibi yüksek bir oran ile enerji çeşitliliğini temsil etmekte ve yenilenebilir enerji kaynaklarının geniş kapsamını göstermektedir.

Bu dağılım, Türkiye’nin enerji portfyynn yenilenebilir kaynaklar açısından çeşitlendiğini ve stratejik bir dönüşüm sürecinde olduğunu ortaya koymaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesi, yalnızca enerji arz güvenliğini artırmakla kalmayıp, aynı zamanda karbon emisyonlarının azaltılması ve fosil yakıt bağımlılığının düşürülmesi için kritik bir araç sunmaktadır. Bu doğrultuda, güneş ve rüzgâr enerjisine yönelik artan yatırımlar, portföyün genişletilmesine katkıda

bulunurken, enerji depolama teknolojilerindeki ilerlemeler ve şebeke altyapısının modernizasyonu bu büyümenin sürdürülebilirliğini sağlamaktadır.

Ayrıca, yerli üretim kapasitesinin artırılması ve yenilikçi teknolojilerin geliştirilmesine yönelik Ar-Ge yatırımlarının teşvik edilmesi, Türkiye'nin yenilenebilir enerji sektöründe uluslararası düzeyde rekabet gücünü artırma potansiyelini desteklemektedir. Bu analiz, yenilenebilir enerji sektöründeki politikaların ve uygulamaların hem çevresel hem de ekonomik boyutlarda uzun vadeli bir etkisi olduğunu vurgulamaktadır.

1.2. Dünya Genelindeki Yenilenebilir Enerji Trendleri

2021 yılı itibarıyla dünya genelinde yenilenebilir enerji kurulu gücü yaklaşık 837 GW seviyesine ulaşmıştır ve bu kapasite, 2022 yılında %10'un üzerinde bir artış göstererek kayda değer bir büyüme sergilemiştir. Bu genişleme, Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA) da belirttiği üzere, yenilenebilir enerjiye yönelik politikaların güçlendirilmesi ve yatırım eğilimlerinin ivme kazanmasıyla doğrudan ilişkilidir.

Yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde güneş ve rüzgâr enerjisi, küresel elektrik üretiminde başat rol oynamaya devam etmektedir. Özellikle Çin, Amerika Birleşik Devletleri ve Avrupa Birliği ülkeleri; teknolojik ilerleme, üretim kapasitesi artışı ve Ar-Ge yatırımlarıyla bu alanda lider konumdadır.

2023 yılı itibarıyla küresel yenilenebilir enerji yatırımları yıllık bazda yaklaşık 500 milyar ABD dolarına ulaşmıştır. Bu büyüme, özellikle güneş enerjisi teknolojilerinde maliyetlerin düşmesi ve sistem verimliliğinde yaşanan artışlarla hız kazanmıştır. Güneş fotovoltaik panellerinin üretim maliyetlerindeki düşüş, yatırımın geri dönüş sürelerini azaltarak yatırımcılar açısından cazip hale gelmiştir.

IEA'nın 2030 yılına ilişkin projeksiyonlarına göre, küresel yenilenebilir enerji üretiminin üç katına çıkarılması hedeflenmektedir. Bu doğrultuda, devlet destekleri, finansal teşvik mekanizmaları ve karbon emisyonlarının fiyatlandırılması gibi politika

araçları ön plana çıkmaktadır. Bu tür desteklerin devamlılığı, özel sektör yatırımlarının sürekliliği açısından kritik önem arz etmektedir.

Yenilenebilir kaynakların süreksizliği, enerji depolama teknolojilerini gündeme taşımıştır. Bu kapsamda, lityum-iyon bataryaların yanı sıra hidrojen temelli depolama sistemleri de yaygınlaşmaya başlamıştır. Hidrojenin yeşil üretimi ve endüstriyel entegrasyonu, enerji güvenliği ve arz sürekliliği bakımından stratejik bir çözüm olarak değerlendirilmektedir.

Yenilenebilir enerji üretimindeki değişkenlik, klasik enerji şebekelerinde yeni kontrol sistemlerinin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Bu bağlamda, akıllı şebekeler; veri temelli talep yönetimi, anlık üretim-tüketim dengelemesi ve yük yönetimi gibi özellikleriyle yenilenebilir enerji kaynaklarının sistem entegrasyonunda kritik bir rol oynamaktadır.

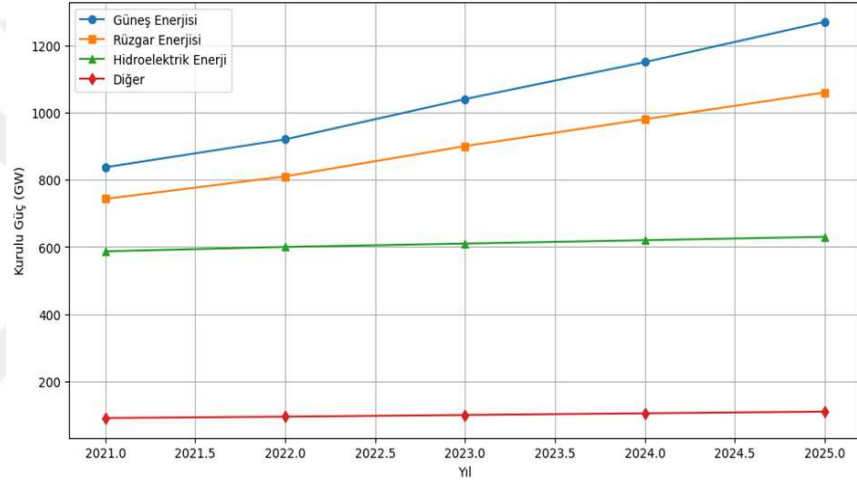
Bölgesel olarak değerlendirildiğinde, Çin hem güneş hem de rüzgâr enerjisi kurulu gücü bakımından liderliğini sürdürmekte ve yatırımlarını hızla artırmaktadır. Çin'in imalat kapasitesi, küresel fiyatları düşürmekte ve erişilebilirliği artırmaktadır [5]. Avrupa Birliği ise karbon nötr hedefleri doğrultusunda deniz üstü (offshore) rüzgâr enerjisi projelerine öncelik vermekte; bu alanda kapsamlı planlar ve yatırım destek mekanizmaları geliştirmektedir. ABD ise rüzgâr türbini kapasitesi açısından küresel ölçekte öncü ülkelerden biri olmaya devam etmektedir. Federal ve eyalet düzeyindeki teşvikler, özellikle iç kesimlerdeki kara rüzgârı projelerini teşvik etmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynakları, küresel karbon emisyonlarının azaltılmasında temel araçlardan biridir. Fosil yakıt kullanımının azaltılması ve düşük karbon ekonomisine geçiş sürecinde yenilenebilir teknolojilerin yaygınlaştırılması kritik öneme sahiptir.

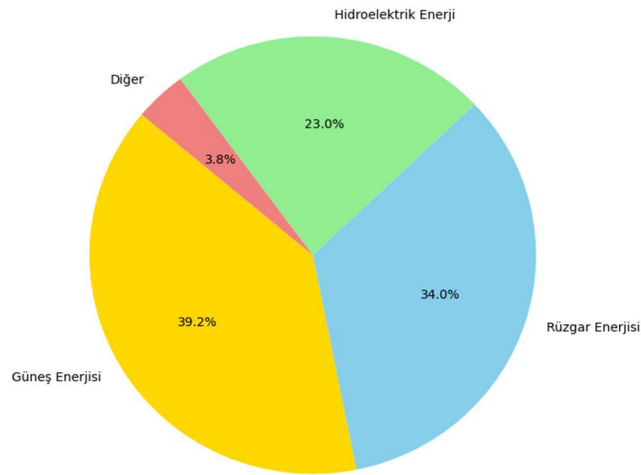
Yenilenebilir enerji sektörü, yalnızca çevresel faydalar sunmakla kalmamakta, aynı zamanda istihdam olanaklarını artırarak ekonomik büyümeye de katkı sağlamaktadır. Güneş paneli üretiminden rüzgâr türbini bakımına kadar uzanan değer zinciri, milyonlarca kişiye iş imkânı sunmaktadır.

Yenilenebilir enerji, küresel enerji dönüşümünün merkezinde yer almaktadır. Uluslararası iş birlikleri ve yatırımlar, sürdürülebilir bir enerji geleceği inşa etme yönünde artarak devam etmektedir. Bununla birlikte, enerji depolama teknolojilerinin yaygınlaştırılması, şebeke altyapısının modernizasyonu ve çevresel etkilerin yönetimi gibi alanlarda hâlen gelişmeye açık önemli başlıklar bulunmaktadır [5].

Şekil 1.4 ve Şekil 1.5'te ise dünya genelinde yenilenebilir enerji kaynaklarının yıllara göre kurulu güç artışı ve bu kaynakların enerji üretimi içindeki oranları görselleştirilmektedir.



Şekil 1.4. Dünya 'da yenilenebilir enerji kaynakları bazlı kurulu güç değişim grafiği [5]



Şekil 1.5. Dünya 'daki yenilenebilir enerji kaynaklarının payı [5]

BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Önceki Çalışmalar

Kihel ve ark. [6] Weibull dağılım fonksiyonunun rüzgâr enerjisi potansiyelinin değerlendirilmesindeki etkinliği üzerine bir çalışma yapmıştır. Taza ili özelinde beş farklı bölgeyi inceleyerek özgün bir bölgesel analiz sunmuşlardır. Sonuç olarak, maksimum yıllık enerji üretimi (9.18 GWh) ve %30,84 kapasite faktörü ile Zone 3 bölgesi en uygun alan olarak belirlemiş ve GoldWind GW 140/3,4 türbin modeli önerilerek uygulamaya dönük sonuçlar üretilmiştir. Weibull parametrelerinin beş farklı algoritmayla belirlenmiş olup (MLM, Jestus, Lysen, Fas Yöntemi, Grafiksel), bu sonuç metodolojik olarak çalışmaya yenilikçi bir boyut kazandırmıştır. Elde edilen bulgular, yalnızca Taza ili için değil, benzer coğrafi yapılara sahip bölgeler için de uyarlanabilir olması açısından literatürde önemli bir boşluğu doldurmuştur.

Sim ve ark. [7] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Kuzey Denizi'nde 20 ay boyunca bir saniyelik zaman çözünürlüğüyle toplanan deniz üstü rüzgâr verileri kullanılarak yatay rüzgâr hızlarının istatistiksel özellikleri detaylı biçimde incelenmiştir. Rüzgâr hızlarının olasılık dağılımları, yaygın biçimde uygulanan Weibull dağılımı ile modellenmiş ve elde edilen sonuçlar, bu dağılımın rüzgâr enerjisi analizleri açısından güvenilirliğini bir kez daha teyit etmiştir. Weibull dağılımının şekil ve ölçek parametrelerinin yükseklikle olan değişimi zayıf bulunmuş; bu da atmosferik sınır tabakadaki dikey rüzgâr yapısının istatistiksel olarak tutarlı olduğunu göstermektedir. Çalışmada, farklı yüksekliklerde elde edilen dağılımların benzerlikleri, parametrik ayrışım ölçütleriyle sayısal olarak değerlendirilmiş ve türbülans yoğunluğunun yükseklikten bağımsız sabit bir değerde seyrettiği ortaya konmuştur. Weibull analizinin, özellikle enerji potansiyeli değerlendirmelerinde ve türbin performans modellemelerinde kritik rol oynadığı vurgulanmış; ancak uç değerlerde gözlemlenen

sapmalar nedeniyle bu modelin yüksek hızlı rejimlerde dikkatle kullanılması gerektiği belirtilmiştir.

Z. R. Shu ve Mike Jesson [8], tarafından 2021 yılında gerçekleştirilen çalışmada Birleşik Krallık genelinde 38 istasyondan 1981–2018 dönemine ait verilerle Weibull dağılım parametrelerinin mekânsal ve zamansal değişimini incelenmiştir. Weibull dağılımının şekil (k) ve ölçek (c) parametreleri dört farklı yöntemle hesaplanmış olup bunlar arasında Maksimum Olabilirlik Yöntemi (Maximum Likelihood Method, MLM) istatistiksel temelliliği nedeniyle detaylı biçimde ele alınmıştır. MLM yöntemi, parametre tahminlerini gözlem verilerinin olasılık yoğunluk fonksiyonuna en iyi uyumu sağlayacak biçimde optimize ettiği gözlenmiş olup özellikle büyük veri kümeleri için güvenilir sonuçlar üretmiştir. Çalışmada, Güç Yoğunluğu Yöntemi (PDM) genellikle daha yüksek korelasyon katsayısı sunsa da MLM'nin teorik doğruluğu vurgulanmıştır. Elde edilen parametrelerle türbin kapasite faktörleri, çalışma olasılıkları ve bölgesel enerji yoğunlukları analiz edilerek, Weibull dağılımının rüzgâr enerjisi değerlendirmelerinde etkin bir istatistiksel araç olduğu sonucuna varılmıştır.

Himangshu Ranjan Ghosh [9] tarafından 2021 yılında kaleme alınmış olan çalışmada, Weibull dağılımının rüzgâr hızı verilerini modellemedeki başarısı vurgulanarak, Bangladeş'in Chandpur bölgesine ait 2014–2017 yıllarındaki rüzgâr verileri altı farklı parametrik yöntemle analiz edilmiştir. Yöntemler arasında Justus yöntemi, en düşük RMSE (0.0082) ve en yüksek R^2 (0.9650) değeriyle Weibull parametrelerinin en iyi tahminini sunmuştur. 100 m hub yüksekliği için elde edilen ortalama rüzgâr hızı (4,88 m/s) ve güç yoğunluğu (108,8 W/m²), bölgenin küresel standartlara göre 1. sınıf düşük potansiyelli alan olduğunu ortaya koymuştur. Kullanılabilir ticari türbinlerin düşük kapasiteli performansı (<%25 kapasite faktörü) nedeniyle, bölgenin yakın gelecekte rüzgâr enerjisi üretimi açısından uygun olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

Sadih M.A. Aljeddani ve M.A. Mohammed [10], çalışmada Weibull dağılım parametrelerinin tahmininde Maksimum Olabilirlik (ML), Momentler Yöntemi (MOM) ve Enerji Desen Faktörü (EPF) teknikleri karşılaştırmalı olarak

değerlendirilmiş olup sonuçlar Monte Carlo simülasyonları ile doğrulanmıştır. Özellikle ML yönteminin yüksek örneklem büyüklüklerinde daha az sapma ve hata ile en tutarlı tahminleri verdiği gösterilmiştir. Çalışmada, Weibull dağılımının düşük ve orta rüzgâr hızlarını başarıyla temsil ettiğini, ancak bazı istasyonlarda bu modelin yetersiz kaldığını ve daha yüksek kuyruk olasılıklarına sahip alternatif modellere ihtiyaç duyulduğunu belirtilmiştir. Sonuçlar olarak, rüzgâr hızı modellemesinde Weibull temelli yaklaşımların hâlâ geçerli ve etkili olduğu, ancak bölgesel varyasyonların mutlaka dikkate alınması gerektiğini ortaya koymuştur.

Camilo Carrillo ve ark. [11] tarafından yapılan çalışmada, rüzgâr enerjisi potansiyelinin belirlenmesinde Weibull dağılım parametrelerinin farklı tahmin yöntemleriyle değerlendirilmesini konu alınmıştır. Araştırma, İspanya'nın kuzeybatısındaki Galicia bölgesinde bulunan 29 meteoroloji istasyonundan elde edilen verilerle yürütülmüştür. Çalışmada geleneksel yöntemlere ek olarak, rüzgâr türbini güç eğrilerini doğrudan dikkate alan "Part Density Energy Method (PDEM)" adlı yeni bir yöntem önerilmiş ve bu yöntemin enerji üretimindeki belirsizlikleri minimize etmede daha isabetli sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Maksimum olabilirlik (MLE), moment yöntemi (MM), en küçük kareler (LSQM) gibi geleneksel yöntemlerle kıyaslandığında, PDEM yöntemi hem enerji yoğunluğu hem de rüzgâr hız dağılımının uygunluğu açısından daha yüksek R^2 değerleri ve daha düşük hata oranları sergilediği ortaya koyulmuştur.

Huanyu Shi ve ark. [12] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, özellikle iki parametrelili Weibull dağılımının sade yapısı, esnekliği ve hesaplama kolaylığı nedeniyle geniş ölçekte kullanıldığı vurgulanmıştır; ancak düşük rüzgâr hızlarını yeterince temsil edemediği durumlar için üç parametrelili versiyonunun daha uygun olabileceği belirtilmiştir. Weibull dağılımı için kullanılan başlıca parametre tahmin yöntemleri arasında maksimum olabilirlik, moment yöntemi, en küçük kareler ve enerji yoğunluğu temelli yöntem (PDM) sayılmış olup her birinin avantaj ve kısıtları detaylı şekilde tartışılmıştır. Ayrıca, Weibull dağılımının farklı coğrafi bölgelerdeki performansı karşılaştırılmış ve modelin uyum başarımının, bölgesel rüzgâr karakteristiklerine bağlı olarak değiştiği sonucuna varılmıştır.

Sven-Erik Gryning ve ark. [13] tarafından hazırlanan bu çalışmada, kara, kıyı ve deniz bölgelerinde uzun dönemli rüzgâr profillerini analiz etmek amacıyla Doppler Lidar ve yüksek meteoroloji direği verileri birlikte kullanılarak Weibull dağılım parametreleri elde edilmiştir. Özellikle Weibull şekil parametresinin dikey profili ve bu profilin maksimuma ulaştığı yükseklik olan "reversal height" kavramı üzerinde durulmuştur. Taşınan sinyalin gürültüye oranı (Carrier-to-Noise Ratio- CNR) eşliğinin ölçümler üzerindeki etkisi ayrıntılı olarak incelenmiş ve yüksek CNR eşiklerinin rüzgâr hızlarını %7 ila %12 oranında fazla tahmin ettiğini ortaya koyulmuştur. Geliştirilen parametrik modellerle şekil parametresinin profili ve reversal height değerleri yüzey pürüzlülüğü gibi yüzey özellikleriyle ilişkilendirilmiş, kara ve deniz koşullarında farklı davranışlar sergilediği gösterilmiştir. Sonuç olarak çalışmada, rüzgâr enerjisi potansiyeli değerlendirmelerinde Weibull analizinin güvenilirliğini artırmak için ölçüm kalitesi ve atmosferik koşulların dikkatle ele alınması gerektiğini vurgulamaktadır.

Ahmed Badawi ve ark. [14] bu çalışmada, Weibull olasılık dağılımının dokuz farklı nümerik yöntem kullanılarak Askalan şehrindeki dört yıllık rüzgâr hızı verileri üzerinden analizlerini sunmuşlardır. Araştırmada kullanılan yöntemler arasında Momentler Yöntemi, Maksimum Olabilirlik Yöntemi, Grafiksel Yöntem ve Enerji Desen Faktörü gibi teknikler yer almıştır. Ve sonuçlar MATLAB yazılımı ile elde edilmiştir. Her yöntemin doğruluk performansı istatistiksel testler (RMSE, RRMSE, X^2 , IA, MAPE) kullanılarak değerlendirilmiş ve özellikle LMS, GM ve SMMLM yöntemleri en düşük hata oranları ile öne çıkmıştır. Weibull parametreleri olan şekil faktörü k (1.76–2.20 arası) ve ölçek faktörü c (4,13–4,64 m/s arası) küçük ölçekli rüzgâr türbinlerinin kullanımına uygun enerji potansiyelini ortaya koymuştur.

D. K. Kidmo ve ark. [15] bu çalışmada, Kamerun'un Garoua bölgesinde 2007–2012 yılları arasında saatlik ölçülen rüzgâr hızı verileri kullanarak altı farklı Weibull parametre tahmin yönteminin (EM, EPF, GM, MLM, MM, MMLM) performansını karşılaştırmalı olarak analiz etmişlerdir. Çalışmada kullanılan istatistiksel değerlendirme ölçütleri arasında ki-kare testi (χ^2), korelasyon katsayısı (R^2), ortalama kare hatası (RMSE) ve Kolmogorov-Smirnov testi (KOL) yer almakta olup, en yüksek doğruluğu EPF ve MM yöntemleri göstermiştir. Grafiksel yöntem (GM) ise tüm

testlerde başarısız bulunarak güvenilir bir yaklaşım olarak değerlendirilmemiştir. Bulgulara göre, Garoua bölgesi elektrik üretimi için yetersiz rüzgâr potansiyeline sahip olup, küçük ölçekli mekanik uygulamalar (örneğin tarımsal sulama, hayvan sulama ve topluluk su temini) için daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Bu bağlamda, Weibull dağılımı kullanılarak yapılan bu istatistiksel analiz, rüzgâr enerjisi değerlendirmelerinde parametre tahmin yöntemlerinin önemini ortaya koyarak yerel ölçekte optimum uygulama seçiminin altını çizmektedir.

Seguro ve Lambert [16] tarafından kaleme alınan bu çalışmada, rüzgâr enerjisi analizinde yaygın olarak kullanılan Weibull dağılımının parametrelerini tahmin etmek amacıyla üç farklı yöntem karşılaştırılmıştır: maksimum olabilirlik yöntemi, modifiye edilmiş maksimum olabilirlik yöntemi ve grafiksel yöntem. Çalışmada, örnek zaman serisi ve frekans dağılımı verileri üzerinde bu yöntemlerin uygulanabilirliği ve doğruluğu detaylı biçimde incelenmiştir. Bulgular, zaman serisi veriler için maksimum olabilirlik yönteminin en doğru ve güvenilir yöntem olduğunu; frekans dağılımlı veriler için ise modifiye edilmiş versiyonunun tercih edilmesi gerektiğini göstermiştir. Grafiksel yöntemin doğruluk açısından yetersiz olduğu ve bin boyutuna duyarlı olduğu vurgulanmıştır. Bu çalışma, özellikle bilgisayar destekli analizlerde, geleneksel grafiksel yaklaşımlar yerine istatistiksel olarak daha sağlam olan maksimum olabilirlik yöntemlerinin tercih edilmesi gerektiğini bilimsel olarak ortaya koymuştur.

Talha Arslan ve ark. [17] bu çalışmada, Weibull dağılımının iki parametresinin (şekil k ve ölçek c) tahmininde kullanılan Moment (MoM), Maksimum Olabilirlik (ML) ve L-Moment (L-MoM) yöntemleri karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Literatürde az bilinen ancak küçük örneklerde daha etkin sonuçlar verdiği gözlemlenen L-MoM yöntemi, Monte Carlo simülasyonları ve Türkiye’den alınan gerçek rüzgâr verileriyle test edilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre, örneklem büyüklüğü küçük olduğunda L-MoM, büyük olduğunda ise ML yöntemi daha doğru sonuçlar ürettiği gözlenmiştir. Farklı tahmin yöntemleriyle elde edilen parametrelerin rüzgâr enerjisi yoğunluğu hesaplamalarını önemli ölçüde etkilediği gösterilmiş ve bu nedenle tahmin yönteminin seçiminin yatırım kararlarında kritik etken olduğu vurgulanmıştır.

B. Yanıktepe ve ark. [18] bu çalışmada, Osmaniye ilinin rüzgâr enerjisi potansiyelini değerlendirmek amacıyla 10 metre yükseklikten 44 ay boyunca elde edilen saatlik rüzgâr verilerini Weibull ve Rayleigh dağılımlarıyla analiz etmişlerdir. Grafikselleştirilerek elde edilen Weibull parametrelerine göre, şekil parametresi (k) 1,00–1,04 arasında, ölçek parametresi (c) ise 1,59–1,66 m/s aralığında bulunmuş; bu da bölgenin düşük rüzgâr potansiyeline işaret etmiştir. Ortalama rüzgâr hızı 2,23 m/s ve ortalama güç yoğunluğu 24,587 W/m² olarak hesaplanmış olup bu değerler elektrik üretimi için yetersiz bulunmuştur. Bununla birlikte, yaz ve kış mevsimlerinde diğer mevsimlere göre daha yüksek güç yoğunlukları elde edilmiş, bu da mevsimsel bazda değerlendirme yapılması gerektiğini göstermektedir.

D. Villanueva ve A. Feijóo [19] bu çalışmada, belirli bir lokasyonda rüzgâr türbini (RT) kurulumu açısından uygunluğun değerlendirilebilmesi amacıyla, rüzgâr hızı dağılım fonksiyonlarından türetilen rüzgâr gücü dağılımlarını analitik olarak incelemişlerdir. Ortalama rüzgâr hızına bağlı olarak, rüzgâr gücü yoğunluğunu hesaplamaya yönelik dört farklı yaklaşım sunulmuş; sırasıyla rüzgârın taşıdığı güç, Betz yasasına göre teorik maksimum güç, daha gerçekçi sınırlarla elde edilebilecek güç ve RT 'ye özgü parametreler (cut-in, cut-out, rated hız/güç) dikkate alınarak hesaplanan yaklaşık maksimum güç analiz edilmiştir. Her bir yaklaşım için, ortalama rüzgâr gücü yoğunluğu ile ortalama rüzgâr hızı arasındaki ilişkileri tanımlayan basit ve uygulanabilir denklemler elde edilmiştir. Bu denklemler, türbin yer seçimi süreçlerinde düşük potansiyelli alanların elenmesinde oldukça faydalı birer araç sunmaktadır. Elde edilen ifadeler, yalnızca ortalama rüzgâr hızı bilindiğinde bile, türbin özellikleri gözönüne alınarak maksimum elde edilebilir güç tahmini yapılmasına olanak sağlamaktadır.

Andrés Feijóo ve Daniel Villanueva [20] bu çalışmada, farklı lokasyonlardaki rüzgâr hızı serilerinin simülasyonu için geliştirilen yöntemleri inceleyerek, son yıllarda bu alanda literatürde önerilen yaklaşımları derlemeyi ve tartışmayı amaçlamışlardır. Çalışma, rüzgâr hızının değişken doğası ve bu hızın rüzgâr enerji dönüştürücüsü (WEC) tarafından üretilen güçle olan güçlü ilişkisi, istatistiksel modellemeye dayalı doğru simülasyon tekniklerinin gerekliliğini ortaya koymuştur. Çalışmada, sürekli

olasılık dağılımlarının rüzgâr hızını tanımlamadaki etkinliği, korelasyon ve otokorelasyonun modellenmesi ile Markov süreçleri gibi konular detaylı şekilde ele alınmıştır. Elektrik güç sistemlerine (EPS) entegrasyon sürecinde, birden fazla rüzgâr santralinin eş zamanlı davranışlarının belirlenmesinde bu modellerin önemli katkı sağladığı vurgulanmıştır.

M.A. Baseer ve ark. [21] bu çalışmada, Suudi Arabistan'ın en büyük sanayi bölgesi olan Jubail Endüstri Şehri'nde, 2008–2012 yılları arasında 10, 50 ve 90 m yüksekliklerde ölçülen saatlik ortalama rüzgâr hızı verilerine dayanarak detaylı bir rüzgâr kaynağı değerlendirmesi sunmuşlardır. Elde edilen verilere göre, 50 ve 90 m yüksekliklerde %75'in üzerinde süreyle 3,5 m/s'nin üzerinde rüzgâr hızlarına ulaşılmış ve bölgenin rüzgâr yönünün ağırlıklı olarak kuzeybatı olduğu tespit edilmiştir. Yerel rüzgâr kayması katsayısı 0.217 olarak belirlenmiş ve ortalama güç yoğunlukları sırasıyla 50,92 W/m², 116,03 W/m² ve 168,46 W/m² olarak hesaplanmıştır. Beş ticari türbinin enerji üretim performanslarının karşılaştırıldığı analizde, 3.0 MW gücündeki türbinin yıllık 6285 MWh enerji üretimiyle en verimli seçenek olduğu ortaya konmuştur. Bu sonuçlar, bölgenin rüzgâr enerjisi potansiyelinin değerlendirilmesine ve gelecekteki yatırım planlamalarına önemli katkı sağlamaktadır.

Muhammad Shoaib ve ark. [22] bu çalışmada, Pakistan'ın Baburband bölgesinde 2008–2011 yılları arasında beş farklı yükseklikte (81,5 m, 80 m, 60 m, 30 m ve 10 m) 10 dakikalık aralıklarla ölçülen rüzgâr hızı verileri kullanılarak rüzgâr enerjisi potansiyelini istatistiksel yöntemlerle değerlendirmişlerdir. Weibull dağılım fonksiyonu temel alınarak şekil (k) ve ölçek (c) parametreleri; Maksimum Olabilirlik Yöntemi (MLM), Moment Yöntemi (MoM), Enerji Desen Faktörü Yöntemi (EPFM) ve Güç Yoğunluğu Yöntemi (PDM) ile tahmin edilmiştir. Elde edilen Weibull ortalama hızları 6,78–4,89 m/s, güç yoğunlukları ise 309,10–138,45 W/m² arasında değişmiş; özellikle MoM ve PDM yöntemlerinin yüksek doğrulukla sonuç verdiği tespit edilmiştir. Yaklaşık 278 W/m² rüzgâr gücü potansiyeli ile Baburband bölgesinin rüzgâr çiftliği yatırımları için uygun olduğu ortaya konmuştur.

Hanifa Teimourian ve ark. [23] bu çalışmada, İran'daki 30 farklı bölgeye ait rüzgâr hızı verilerini kullanarak, sekiz farklı Weibull parametre tahmin yönteminin (EM, MOM, EPF, PDM, MLM, MMLM, MIM ve EMM) performansını karşılaştırmalı olarak değerlendirmişlerdir. Her yöntemin doğruluğu, RMSE, MAE, R^2 ve Ki-kare hata gibi istatistiksel göstergelerle test edilmiş ve en başarılı yöntemin genellikle Empirical Method (EM) olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, Weibull parametrelerinden türetilen rüzgâr gücü yoğunluğu (WPD) sonuçları, sahada ölçülen verilerle karşılaştırılmış ve PDM yönteminin WPD açısından tutarlı sonuçlar verdiği ancak hata analizlerinde daha zayıf performans sergilediği görülmüştür. Çalışmanın sonuçları, Weibull parametre tahmini için uygun yöntemin seçiminin, rüzgâr enerjisi potansiyelinin doğru değerlendirilmesinde kritik rol oynadığını ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, EM, MOM ve EPF yöntemleri önerilmektedir.

M.R. Islam ve ark. [24] bu çalışmada, 2006–2008 yılları arasında Malezya'nın Kudat ve Labuan bölgelerinde elde edilen rüzgâr hızı verileri kullanılarak, iki parametrelili Weibull dağılımı aracılığıyla rüzgâr enerjisi potansiyelinin değerlendirilmesini amaçlamamışlardır. Analizlerde, rüzgâr yönü ve hızının belirlenmesinde WRPLOT yazılımı kullanılmış ve en yüksek yıllık ortalama rüzgâr hızları sırasıyla Kudat 'ta 4,76 m/s, Labuan 'da 3,39 m/s olarak kaydedilmiştir. Weibull dağılımına göre en yüksek şekil (k) ve ölçek (c) parametreleri sırasıyla 1,86 ve 3,81 m/s olarak belirlenmiş, en yüksek rüzgâr gücü yoğunluğu ise Kudat 'ta 67,40 W/m²'ye ulaşmıştır. Çalışmada gözlemlenen ve Weibull frekans dağılımları arasında 2 m/s üzerindeki hızlar için maksimum %5 sapma tespit edilmiştir. Sonuçlar, büyük ölçekli rüzgâr enerjisi üretimi için yeterli potansiyel bulunmadığını, ancak 100 m türbin yüksekliğinde küçük ölçekli uygulamaların mümkün olduğunu göstermiştir.

Muhammad Shoaib ve ark. [25] bu çalışmada, Pakistan'ın Jhampir bölgesine ait üç yıllık (2007–2010) 10 dakikalık ortalama rüzgâr hızı verileri kullanılarak, Weibull dağılım fonksiyonu yardımıyla rüzgâr enerjisi potansiyelini değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Weibull parametreleri (şekil ve ölçek) üç farklı yöntemle Maksimum Olabilirlik Yöntemi (MLM), Modifiye Maksimum Olabilirlik Yöntemi (MMLM) ve Enerji Desen Faktörü Yöntemi (EPFM) tahmin edilmiştir. Parametrelerin uygunluğu,

RMSE, R^2 ve χ^2 gibi istatistiksel testlerle değerlendirilmiş ve özellikle MLM ile MMLM yöntemlerinin diğerine göre daha doğru sonuçlar verdiği görülmüştür.

Mohammed Wadi ve Wisam Elmasry [26] bu çalışmada, rüzgâr enerjisi potansiyelinin tahmini amacıyla iki parametrelili Weibull dağılım fonksiyonunun doğruluğunu altı farklı parametre tahmin yöntemi (grafiksel yöntem, moment yöntemi, enerji desen faktörü, ortalama-standart sapma, güç yoğunluğu yöntemi ve genetik algoritma) üzerinden değerlendirmişlerdir. Tahmin yöntemlerinin uyum başarımı; ortalama mutlak hata (MAE), kök ortalama kare hata (RMSE), normalize edilmiş MAE, ki-kare hatası ve regresyon katsayısı gibi istatistiksel testlerle analiz edilmiştir. Ayrıca, yöntemlerin genel uygunluğunu daha belirgin şekilde karşılaştırmak amacıyla Net Uygunluk (Net Fitness) testi kullanılmıştır. Çalışma, Türkiye'nin İstanbul iline bağlı Marmara bölgesindeki Çatalca istasyonundan elde edilen ölçüm verileri ile gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, genetik algoritmanın en iyi uyum performansını sunduğunu, buna karşın enerji desen faktörü yönteminin en zayıf tahmin doğruluğuna sahip olduğunu ortaya koymuştur.

A.K. Azad ve ark. [27] bu çalışmada, Bangladeş'in Hatiya Adası'ndaki rüzgâr enerjisi dönüşüm özelliklerini belirlemek amacıyla, rüzgâr hızı verilerinin Weibull dağılımı kullanılarak istatistiksel analizini sunmuşlardır. Weibull şekil (k) ve ölçek (c) parametreleri dört farklı yöntemle hesaplanmış ve gözlenen veriler ile teorik dağılım arasındaki uyumu belirlemek için çeşitli istatistiksel kıyaslamalar yapılmıştır. Bazı dönemlerde k parametresi yaklaşık 2 olarak bulunmuş ve bu durum, rüzgâr dalga yapısının düzenli ve tekdüze olduğunu göstermektedir. Çalışmada yılın %58'inden fazlasında rüzgâr hızının 6,0 m/s üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Bu da küçük ölçekli rüzgâr türbinleriyle elektrik üretimi için yeterli potansiyelin var olduğunu göstermiştir. Önerilen yöntem, farklı rüzgâr alanlarında potansiyel değerlendirmesi için etkin bir araç olarak kullanılabilir.

Stanton E. Tuller ve Arthur C. Brett [28] bu çalışmada, rüzgâr hızı verilerinin Weibull dağılımı ile modellenebilmesi için gerekli istatistiksel koşulları teorik bir çerçevede ortaya koymuşlardır. Özellikle, yatay rüzgâr bileşenlerinin normal dağılması,

ortalamalarının sıfır olması, varyanslarının eşitliği ve birbirlerinden bağımsızlığı durumunda, elde edilen dönüşümlü dağılımın Weibull fonksiyonuna uygunluk gösterdiği vurgulanmıştır. Gerçek atmosferik koşullarda bu ideal durumlar nadiren sağlansa da çalışma Weibull dağılımının dairesel normalliğe en yakın rüzgâr desenlerinde yüksek doğrulukla kullanılabileceğini göstermiştir. Böylelikle, Weibull modellemesinin uygulanabilirliğini önceden öngörebilmek adına istatistiksel bir ön değerlendirme aracı sunulmuştur.

Can Ozay ve Melih Soner Çeliktaş [29] bu çalışmada, İzmir'in Çeşme ilçesine bağlı Alaçatı bölgesinde rüzgâr enerjisi potansiyelinin değerlendirilmesi amacıyla iki parametrelili Weibull istatistiksel dağılım yöntemini kullanarak rüzgâr hızı verilerini analiz etmiştir. Beş buçuk yıl boyunca 10 dakikalık aralıklarla ve üç farklı yükseklikten (70 m, 50 m, 30 m) toplanan ölçümler doğrultusunda bölgenin ortalama rüzgâr hızı 8,11 m/s, Weibull şekil (k) ve ölçek (c) parametreleri ise sırasıyla 2,05 ve 9,16 olarak belirlenmiştir. Ayrıca rüzgâr yönü analizi yapılmış ve 340–360° sektörlerinde yüksek hızların, 10–29° sektörlerinde ise düşük hızların baskın olduğu tespit edilmiştir. Bu bulgular, bölgenin rüzgâr enerjisi potansiyeline dair literatüre katkı sunmakta ve yatırımcılar ile akademisyenler için temel bir kaynak niteliği taşımaktadır.

2.2. Değerlendirme

Literatürde Weibull dağılımı kullanılarak rüzgâr enerjisi potansiyelinin istatistiksel analizi yaygın şekilde ele alınmış olsa da, bu analizlerin çoğu statik ve bölgesel ölçeklidir; kullanıcı etkileşimine ve gerçek zamanlı senaryo testlerine imkân tanıyan uygulamalar ise sınırlıdır. Bu bağlamda geliştirilen interaktif arayüz tasarımı, farklı Weibull parametre tahmin yöntemlerinin (örneğin MLE, MOM, EPF, LSM vb.) görsel ve hesaplamalı olarak karşılaştırılmasına olanak tanıyarak kullanıcıya senaryo bazlı analiz imkânı sunmaktadır. Böyle bir yapı, hem eğitim amaçlı kullanılabilecek bir platform sağlamak hem de yatırım kararlarını destekleyecek şekilde hızlı ve dinamik bir analiz ortamı sunmaktadır. Bu yönüyle çalışma, hem teorik bilgilerin uygulamaya

aktarılabirliğini artırmakta hem de literatürde eksik kalan etkileşimli ve çok yönlü analiz araçları ihtiyacına yenilikçi bir çözüm sunmaktadır.

Çalışma, kullanıcıların farklı analiz senaryoları oluşturmaya olanak tanıyan dinamik hesaplama modülleriyle, hem teorik öğrenimi hem de pratik değerlendirmeyi bir araya getirmektedir. Bu yaklaşım, özellikle lisansüstü öğrenciler ve enerji sektörü profesyonelleri için gerçek zamanlı veri analizi ve türbin seçimi süreçlerinde karar destek aracı işlevi görmektedir. Ayrıca ekonomik analiz entegrasyonu ile enerji yatırımlarının fizibilitesine dair önemli bilgiler sağlayarak literatürde nadiren rastlanan çok yönlü bir çerçeve sunmaktadır. Sonuç olarak çalışma, klasik Weibull analizlerini dijital eğitim teknolojileriyle entegre ederek, hem akademik literatüre hem de uygulamalı mühendislik çalışmalarına yenilikçi bir katkı sağlamaktadır

2.3. Rüzgâr Enerjisi Sistemleri

Rüzgâr enerjisi, küresel ölçekte yenilenebilir enerji kaynaklarının stratejik bir bileşeni olarak enerji dönüşümünde öncü bir rol üstlenmektedir. Bu enerji türü, atmosferde bulunan kinetik enerjinin önce mekanik enerjiye, ardından da elektrik enerjisine dönüştürülmesi esasına dayanmaktadır. Rüzgâr türbinleri aracılığıyla gerçekleştirilen bu dönüşüm süreci, çevresel etkileri minimum düzeyde tutarak temiz ve sürdürülebilir bir enerji üretimi sağlamaktadır. Aynı zamanda fosil yakıtların yol açtığı karbon emisyonlarının azaltılmasında etkili bir çözüm olarak öne çıkmaktadır [30]. Ancak, rüzgâr enerjisinin üretim kapasitesi, doğrudan rüzgâr hızının zaman ve mekâna göre değişkenliği ile sınırlıdır; bu durum enerji arzında bazı teknik zorlukların ortaya çıkmasına neden olmaktadır [31].

Rüzgâr enerjisi potansiyeli, dünya genelinde bölgesel iklim ve coğrafi koşullara bağlı olarak önemli ölçüde farklılık göstermektedir [30]. Örneğin, Avrupa'nın kuzey kesimleri ile ABD'nin Orta-batı bölgesi gibi yüksek rüzgâr hızlarının gözlemlendiği alanlar, bu kaynağın yoğun şekilde değerlendirildiği coğrafyalardır [34]. Türkiye ise coğrafi konumu itibarıyla rüzgâr enerjisi açısından avantajlı bir profile sahiptir. Özellikle Marmara, Ege ve Akdeniz bölgeleri, yüksek rüzgâr potansiyeli sayesinde bu

alandaki yatırımlar için büyük fırsatlar sunmaktadır [38]. 2023 yılı itibarıyla Türkiye'nin rüzgâr enerjisine dayalı kurulu gücü 11.806 MW seviyesine ulaşmış olup, bu miktar toplam enerji üretim kapasitesinin %10,64'ünü temsil etmektedir [39].

Rüzgâr enerjisinin yaygınlaştırılmasında karşılaşılan temel zorluklardan biri, enerji üretiminde sürekliliği ve istikrarı sağlamaktır. Rüzgâr hızlarında meydana gelen kısa süreli dalgalanmalar genellikle türbin tasarımları ve gelişmiş kontrol sistemleri aracılığıyla tolere edilebilmekteyken, mevsimsel değişiklikler ve ani meteorolojik olaylar daha ciddi üretim kayıplarına neden olabilmektedir [31]. Örneğin, aşırı rüzgâr durumlarında türbinlerin korunması amacıyla devre dışı bırakılması gerekebilir; bu da enerji arzında geçici kesintilere yol açabilir [30]. Bu tür dalgalanmaların sistem üzerindeki etkilerini azaltmak amacıyla enerji depolama teknolojilerinin entegrasyonu ile birlikte şebeke altyapısının modernize edilmesi kritik önemdedir [41].

Türkiye'nin mevcut rüzgâr enerjisi potansiyelinden daha etkin biçimde faydalanması, enerji ithalatına olan bağımlılığın azaltılması ve sürdürülebilir bir enerji sisteminin inşası açısından büyük bir stratejik fırsat sunmaktadır [40]. Bu hedef doğrultusunda, yüksek verimli teknolojilerin ülke genelinde yaygınlaştırılması, yerli rüzgâr türbini üretim kapasitelerinin artırılması ve enerji depolama çözümlerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu yaklaşımlar, yalnızca enerji arz güvenliğini güçlendirmekle kalmayacak, aynı zamanda Türkiye'nin uluslararası enerji pazarında rekabet avantajı elde etmesine de katkı sağlayacaktır [38,41].

2.3.1. Rüzgâr türbinleri ve bileşenleri

Rüzgâr türbinleri, atmosferik rüzgârın taşıdığı kinetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmek üzere geliştirilmiş ileri düzey mühendislik sistemleridir. Bu sistemin her bir bileşeni, türbinin yüksek verimlilikle, güvenli ve sürdürülebilir bir biçimde çalışmasını sağlamak üzere belirli teknik işlevleri yerine getirir. Türbinin bileşenleri arasındaki entegrasyon, enerji dönüşüm sürecinin etkinliğini artırmakla kalmayıp aynı zamanda sistemin uzun ömürlü performansını da garanti altına alır [30,33]. Aşağıda,

rüzgâr türbininin temel yapısal ve fonksiyonel bileşenleri ayrıntılı biçimde açıklanmıştır.

Rüzgâr türbinleri temel olarak birkaç ana bileşenden oluşmaktadır. Bunlardan biri olan kule, rotorun yerden belirli bir yüksekliğe yerleştirilmesini sağlayarak, rüzgârın daha güçlü ve daha az türbülanslı olduğu yüksekliklerde çalışmasına olanak tanır [31]. Türbinin döner kısmı olan rotor ise, kanatlar ve göbek (hub) bileşenlerinden oluşur ve rüzgârın kinetik enerjisini doğrudan mekanik enerjiye dönüştürme görevini üstlenir [35]. Rotor tarafından elde edilen mekanik enerji, şanzıman sistemini oluşturan dişli kutusu ve tahrik mili aracılığıyla jeneratöre aktarılır. Jeneratör ise bu enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürerek türbinin temel enerji üretim işlevini gerçekleştirir [39].

Kontrol sistemleri, türbinin dinamik rüzgâr koşulları altında kararlı ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlayan önemli bir alt sistemdir. Pitch kontrol sistemi, türbin kanatlarının eğim açısını ayarlayarak rüzgâr hızındaki değişimlere göre enerji üretimini optimize ederken; yaw kontrol sistemi, rotorun rüzgâr yönüne hizalanmasını sağlayarak maksimum enerji toplama kapasitesini hedefler [37]. Güç elektroniği bileşenleri ise, jeneratör tarafından üretilen alternatif akımı şebeke gerekliliklerine uygun hâle getirerek, enerji iletiminde uyum sağlar [40]. Bunlara ek olarak, dişli kutusunun ısınmasını engelleyen soğutma sistemleri ile yıldırım düşmesi gibi dış tehditlere karşı koruma sağlayan yıldırım koruma sistemleri gibi yardımcı birimler de türbinin güvenli ve uzun süreli çalışmasını destekler [38].

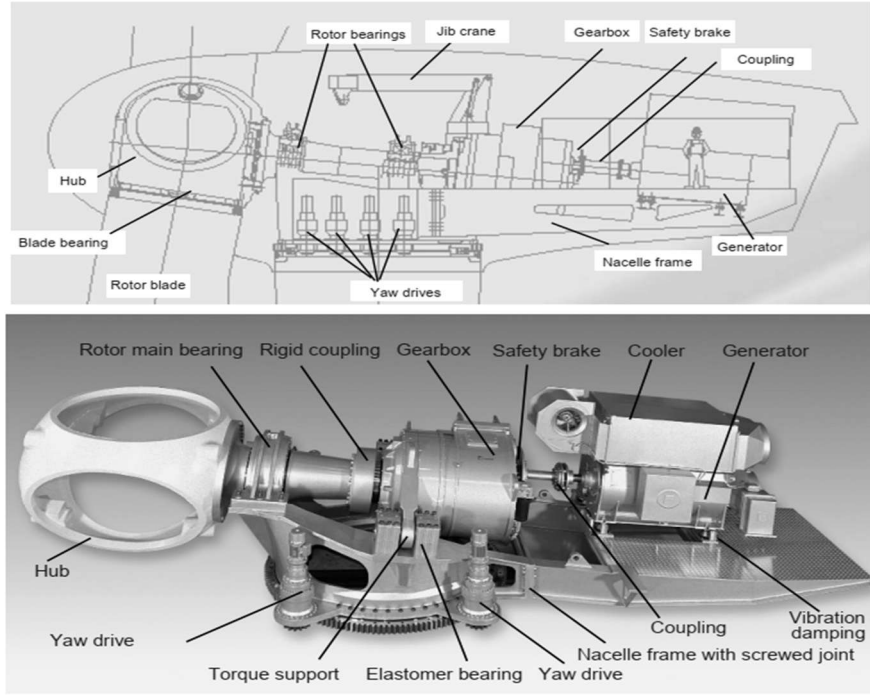
Rüzgâr türbininde üretilen elektrik enerjisi, transformatör ve şebeke bağlantısı gibi elektriksel dönüşüm ve dağıtım sistemleri aracılığıyla kamu elektrik şebekesine aktarılır. Transformatör, elde edilen elektriğin voltaj seviyesini artırarak şebeke standardına uygun hâle getirir ve bu sayede elektrik enerjisinin iletim sistemleri aracılığıyla güvenli bir şekilde taşınmasını mümkün kılar [35,39]. Bu bileşenlerin tümü, sistemin genel verimliliğini ve sürdürülebilirliğini destekleyen bütüncül bir yapı içerisinde çalışmaktadır. Böylece rüzgâr türbinleri, yenilenebilir enerji üretiminde hem çevresel hem de ekonomik açıdan önemli katkılar sunmaktadır.

2.3.1.1. Rotor

Rotor, rüzgâr türbininin atmosferik rüzgâr enerjisini yakalayarak dönme hareketine dönüştüren temel işlevsel bileşenidir. Bu bileşen iki ana parçadan oluşur: kanatlar ve merkez gövde olan hub. Rotorun dönme hareketi, enerji dönüşüm sürecinin ilk aşamasını oluşturarak mekanik enerjinin jeneratöre iletilmesine zemin hazırlar.

Kanatlar, rüzgârın kinetik enerjisini dönme momentine çeviren, türbin performansını doğrudan etkileyen aerodinamik elemanlardır. Bu bileşenler, kaldırma kuvveti (lift) üretimini maksimize edecek biçimde özel olarak şekillendirilmiş aerodinamik profillere sahiptir. Rüzgâr akışını etkili biçimde yönlendirerek dönme hareketini başlatan kanatlar, aynı zamanda enerji dönüşüm sürecinin verimliliğini belirleyici ölçüde etkiler. Genellikle cam elyafı veya karbon fiber gibi yüksek dayanımlı ve hafif kompozit malzemelerden üretilen kanatlar hem yapısal dayanıklılığı hem de performans etkinliğini sağlamak amacıyla dikkatle optimize edilmiştir [31].

Kanat uzunluğu, bir türbinin enerji üretim kapasitesi üzerinde doğrudan etkili olan önemli bir tasarım parametresidir. Daha uzun kanatlar, daha geniş bir süpürme alanı oluşturarak daha fazla rüzgâr enerjisi yakalanmasını sağlar. Özellikle düşük rüzgâr hızlarının baskın olduğu bölgelerde uzun kanatlar, türbinin daha uzun süre çalışma aralığında kalmasına katkı sağlamakta; böylece yıllık enerji üretimi ve kapasite faktörü artmaktadır. Ayrıca, uzun kanatlar sayesinde uç noktalarda meydana gelen enerji kayıpları (tip losses) azaltılarak aerodinamik verimlilik artırılmaktadır. Bununla birlikte, kanat uzunluğunun artması; rotor miline, yatak sistemlerine ve kuleye binen yapısal yüklerin de artmasına neden olmaktadır. Bu durum, türbinin mekanik tasarımında daha karmaşık mühendislik çözümleri gerektirirken, aynı zamanda kule ve temel yapılarının maliyetini de yükseltebilmektedir [33].



Şekil 2.1. Bir rüzgâr türbini genel görünümü

Şekil 2.1’de bir rüzgâr türbinine ait temel yapısal bileşenler şematik olarak sunulmaktadır. Bu bileşenlerden biri olan hub (merkez birim), rüzgâr türbininin rotor kanatlarını rotor miline mekanik olarak bağlayan ve dönel hareketin aktarımında işlev gören yapısal ve işlevsel açıdan kritik bir elemandır. Hub, kanatlar tarafından üretilen mekanik dönme momentini rotor miline ileterek, türbinin enerji dönüşüm zincirinin ilk halkasını oluşturmaktadır. Şekil 2.2’de bu bileşenin ayrıntılı teknik görünümü gösterilmektedir.

Günümüzün ileri düzey rüzgâr türbini teknolojilerinde, hub bileşeni yalnızca mekanik bir bağlantı görevi üstlenmekle kalmamakta, aynı zamanda sistemin aerodinamik performansını optimize eden kontrol sistemlerini de bünyesinde barındırmaktadır. Özellikle hub içerisine entegre edilen pitch kontrol mekanizması, rotor kanatlarının eğim açısını rüzgâr hız ve yönüne göre dinamik biçimde ayarlamakta ve bu sayede enerji üretim verimliliği maksimize edilmektedir. Bu adaptif kontrol mekanizması, yalnızca enerji üretimini optimize etmekle kalmayıp, aynı zamanda ani rüzgâr yüklenmelerine karşı türbinin yapısal bütünlüğünü de korumaktadır.

Buna ek olarak, hub bileşeni, rotor kanatlarına etki eden aerodinamik kuvvetlerin ve momentlerin rotor miline iletimini düzenleyerek, türbin yapısına etki eden zorlanmaları dengelemektedir. Böylece, türbinin operasyonel güvenliği sağlanmakta ve uzun vadeli yapısal dayanıklılığı artırılmaktadır. Bu bağlamda, hub 'un işlevi sadece enerji aktarımı ile sınırlı kalmayıp, aynı zamanda sistemin genel mekanik kararlılığı ve güvenli işletimi açısından da hayati önem arz etmektedir [30].



Şekil 2.2. Rüzgâr türbininin hub kısmı [42]

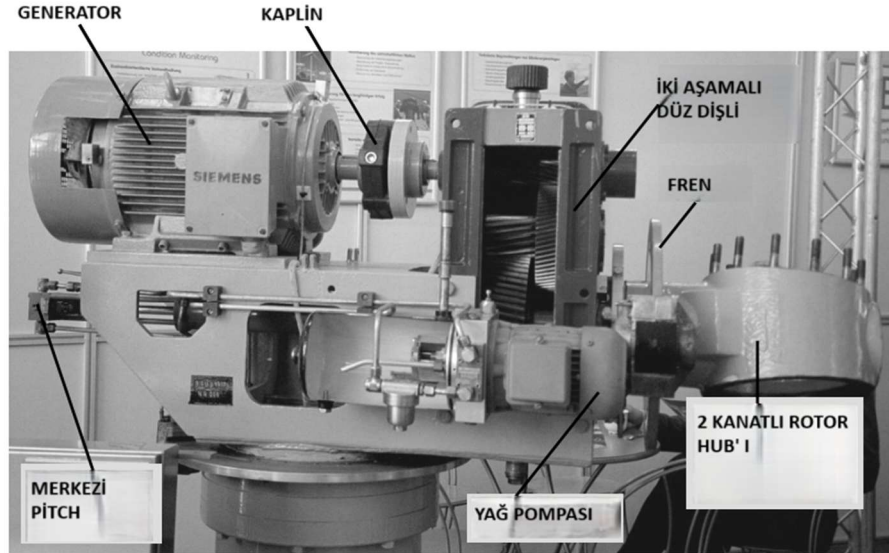
2.3.1.2. Dişli kutusu

Rüzgâr türbinlerinde şanzıman sistemi, rotor ile jeneratör arasında yer alan ve bu iki bileşen arasındaki hız farkını dengeleyerek enerji dönüşümünün yüksek verimlilikle gerçekleşmesini sağlayan temel bir mekanik aktarma bileşenidir. Rotor, genellikle 10 ila 60 devir/dakika (rpm) aralığında çalışmakta iken, elektrik jeneratörleri optimum verimlilikle çalışabilmek için 1000 ila 1500 rpm gibi çok daha yüksek dönüş hızlarına ihtiyaç duyar. Şanzıman sistemi, bu hız farkını etkin biçimde köprüleyerek jeneratörün istikrarlı ve verimli çalışmasına olanak tanır ve böylece türbinin genel performansına doğrudan katkı sağlar [30].

Şanzıman sisteminin en kritik bileşenlerinden biri olan dişli kutusu, rotor milinden gelen düşük hızlı mekanik enerjiyi, jeneratörün çalışabileceği seviyede yüksek hıza dönüştürmekle sorumludur. Yüksek verimlilik hedefiyle tasarlanan bu kutular,

özellikle planet dişli sistemlerinin kullanıldığı konfigürasyonlarda hem kompakt yapı avantajı sunmakta hem de enerji kayıplarını minimum düzeye indirerek türbinin ekonomik performansını artırmaktadır. Dişli kutusu, aynı zamanda rotor ve jeneratör arasındaki moment aktarımını dengeleyerek sistemin mekanik yüklerini optimize eder; bu da bileşenlerin yorulma ömrünü uzatır ve bakım maliyetlerini azaltır [31].

Rüzgâr türbini şanzıman sistemleri, farklı tasarım gereksinimlerine yanıt verebilecek çeşitli dişli konfigürasyonlarıyla yapılandırılabilir. Bu sistemler arasında planet dişli şanzımanlar (planetary gearbox), helisel dişliler (helical gearbox), paralel şaftlı dişliler (parallel shaft gearbox), eğimli konik dişliler (bevel gearbox), konik helisel dişliler (bevel helical gearbox) ve bu türlerin kombinasyonlarını içeren hibrit dişli sistemleri (hybrid gear systems) yer almaktadır. Her bir dişli tipi, enerji aktarımını en yüksek verimlilikle gerçekleştirmek ve mekanik dayanıklılığı maksimize etmek üzere mühendislik kriterlerine göre optimize edilmektedir. Bu sistemler, rüzgâr türbinlerinin uzun ömürlü, güvenilir ve yüksek performanslı çalışmasını sağlamak bakımından hayati öneme sahiptir [52]. Şekil 2.3'te, bir mini rüzgâr türbinine ait dişli sistemi gösterilmekte olup, şanzıman sisteminin yapısal ve işlevsel bütünlüğü görsel olarak desteklenmektedir.



Şekil 2.3. İki kanatlı mini rüzgâr türbini genel görünümü.[43]

2.3.1.3. Jeneratör

Rüzgâr türbinlerinde jeneratörler, rüzgârın kinetik enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesini sağlayan temel bileşenlerdir. Kullanılan jeneratör tipi; türbinin yapısal tasarımı, kapasitesi ve işletme koşullarına bağlı olarak farklılık göstermektedir. Jeneratörler genel olarak asenkron ve senkron olmak üzere iki ana gruba ayrılmakta olup, rotor sargılı indüksiyon jeneratörleri gibi özel tipler belirli uygulamalarda tercih edilmektedir.

Sincap Kafesli Asenkron Jeneratörler (SCIG), dayanıklı yapıları ve düşük bakım gereksinimleri ile küçük ölçekli rüzgâr türbinlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Statordaki döner manyetik alanın, rotor üzerindeki sincap kafesi ile etkileşime girmesiyle elektrik enerjisi üretilir. Düşük maliyetli ve basit yapılı olmaları SCIG jeneratörleri ticari uygulamalar için uygun kılmaktadır. Ancak reaktif güç tüketimleri ve değişken rüzgâr hızlarına sınırlı adaptasyon kabiliyetleri nedeniyle, şebeke bağlantısının zorunlu olduğu sistemlerde kullanılmaları daha yaygındır [30]. Bu özellikleri nedeniyle, genellikle sabit rüzgâr hızlarının hâkim olduğu bölgelerde ve kırsal uygulamalarda tercih edilirler [35].

Rotor Sargılı Asenkron Jeneratörler (WRIG), rotor sargılarına harici bir enerji kaynağı uygulanmasıyla çalışan, reaktif güç kontrolü sağlayabilen bir jeneratör türüdür. SCIG sistemlerine kıyasla daha esnek bir kontrol imkânı sunmaları, değişken rüzgâr hızlarında daha kararlı enerji üretimi sağlamalarına olanak tanımaktadır [30]. Reaktif güç üretimi ve şebeke kararlılığı açısından avantajlı olmalarına karşın, karmaşık yapıları ve ek donanım gereksinimleri nedeniyle tasarım ve işletme maliyetleri daha yüksektir [31]. Bu nedenle genellikle büyük ölçekli türbinlerde ve hassas enerji yönetimi gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır [37].

Çift Beslemeli Asenkron Jeneratörler (DFIG), hem stator hem de rotor sargılarına enerji uygulanarak çalışan ve güç elektroniği aracılığıyla rotor hızının kontrolünü mümkün kılan jeneratörlerdir. Değişken rüzgâr hızlarına uyum yetenekleri ve aktif-reaktif güç kontrolü sayesinde, modern rüzgâr türbinlerinde yaygın olarak kullanılmaktadırlar [30]. Düşük kayıplarla çalışmaları ve şebeke ile uyumlu

performansları önemli avantajlar sunarken, karmaşık kontrol sistemleri ve yüksek maliyetli güç elektroniği bileşenleri nedeniyle tasarım ve bakım süreçleri daha sofistikedir [37]. Bu jeneratörler, özellikle büyük ölçekli ve şebeke bağlantılı türbinlerde tercih edilmektedir [35].

Kalıcı Mıknatıslı Senkron Jeneratörler (PMSG), rotorlarında kalıcı mıknatıslar kullanılarak sabit manyetik alan üreten ve genellikle doğrudan tahrikli sistemlerde kullanılan yüksek verimli jeneratörlerdir. Şanzıman sistemine olan ihtiyacı ortadan kaldırmaları, mekanik kayıpları ve bakım gereksinimlerini azaltarak offshore uygulamalarda önemli avantajlar sağlar [30]. Bununla birlikte, kalıcı mıknatısların maliyetinin yüksek olması ve nadir toprak elementlerine dayalı üretim süreçleri, sistemin toplam maliyetini artırmaktadır [31]. PMSG jeneratörler, düşük arıza oranı, uzun servis ömrü ve yüksek şebeke uyumu nedeniyle, özellikle büyük ölçekli ve deniz üstü rüzgâr enerjisi projelerinde tercih edilmektedir [38,39].

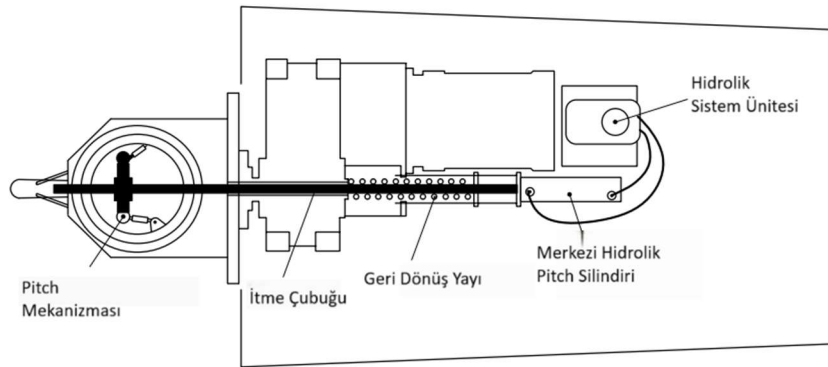
2.3.1.4. Kontrol sistemleri

Kontrol sistemleri, modern rüzgâr türbinlerinin hem verimli enerji üretimi hem de emniyetli işletimi açısından vazgeçilmez bileşenlerdir. Bu sistemler, türbinin dönüş hızı, torku ve çıkış gücü gibi parametrelerini düzenlemek amacıyla yaygın olarak Oransal–İntegral–Türev (PID) denetleyicilerini kullanmaktadır. PID algoritmaları, belirlenen referans değerler ile gerçek sistem çıktısı arasındaki farkı minimize ederek türbinin istikrarlı çalışmasını sağlar. Günümüzde kontrol sistemleri çoğunlukla dijital tabanlı yapılar üzerine kurgulanmakta; bu sayede gerçek zamanlı veri işleme ve uyarlanabilir kontrol mekanizmalarının uygulanması mümkün hâle gelmektedir. Bu dijital sistemlerin ayrılmaz bir parçası olan SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) altyapısı ise, rüzgâr türbinlerinin uzaktan izlenmesi ve denetlenmesi görevini üstlenerek, operasyonel güvenliği ve performans yönetimini optimize etmektedir [30,31].

Rüzgâr türbini kontrol sistemleri; rotor hız regülasyonu, tork dengelemesi ve enerji üretiminin optimizasyonu gibi çeşitli fonksiyonları yerine getirir. Örneğin, rotor torkunun kontrolü, hem mekanik aşırı yüklenmenin önlenmesini sağlar hem de enerji

çıkışında kararlılığı artırır. Ayrıca, türbin verimliliğini yükseltmek ve yapısal yükleri azaltmak amacıyla kullanılan pitch (kanat eğim açısı) kontrol sistemleri ile yaw (rüzgâr yönü takibi) kontrol sistemleri, enerji dönüşüm sürecinin etkinliğini belirleyen kritik alt sistemlerdendir. Tüm bu kontrol stratejileri, türbinin çalışma güvenliğini sağlamanın yanı sıra, enerji üretim kapasitesini de maksimum düzeye çıkarmayı hedefler [44]. Nacelle (gondol), türbinin üst kısmında yer alan ve rotor, jeneratör, dişli kutusu gibi ana bileşenleri barındıran kapalı yapıdır.

Pitch kontrol sistemleri, rüzgâr türbinlerinin kanatlarının rüzgâr ile yaptığı eğim açısını ayarlayarak hem verimliliği artırmak hem de aşırı rüzgâr koşullarında yapısal bütünlüğü korumak amacıyla kullanılır. Düşük rüzgâr hızlarında kanatlar, maksimum enerji üretimini sağlayacak şekilde konumlandırılırken; yüksek hızlarda, rotor üzerindeki yüklerin sınırlandırılması amacıyla kanat açısı değiştirilir. Pitch kontrolü, genellikle elektrikli ya da hidrolik tahrik sistemleriyle gerçekleştirilmekte ve PID temelli denetim algoritmalarıyla desteklenmektedir [31,46]. Bu sistemler, rotor hızının sınırlandırılmasında ve enerji dönüşümünün dinamik koşullara uyarlanmasında temel işlev görür. Aynı zamanda, kanatların doğru açılarda çalışması, yapısal gerilmelerin azaltılmasına ve dolayısıyla türbinin servis ömrünün uzamasına katkı sağlar. Günümüzün gelişmiş pitch kontrol sistemleri, gerçek zamanlı izleme kabiliyeti ve adaptif kontrol algoritmalarıyla donatılmış olup, enerji üretim verimliliğini artırırken bakım maliyetlerini azaltma potansiyeline sahiptir [30,46].



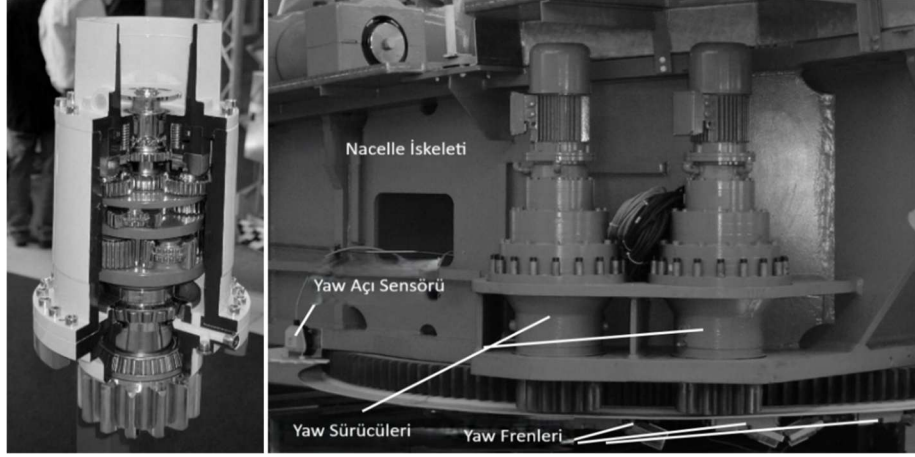
Şekil 2.4. Pitch kontrol mekanizması görünümü [45]

Şekil 2.4’te, rüzgâr türbinlerinde kullanılan bir pitch kontrol mekanizmasının yapısı şematik olarak gösterilmektedir. Bu sistemde yer alan merkezi hidrolik pitch silindiri,

hidrolik güç ünitesinden temin edilen basınçlı sıvıyı kullanarak itme çubuğu aracılığıyla kanatlara doğrusal bir kuvvet uygular. Bu kuvvet, kanatların eğim (pitch) açısının değiştirilmesini sağlar. Geri dönüş yayı, itme çubuğuna karşı mekanik direnç oluşturarak sistemin enerji kaybı, acil durma veya arıza gibi senaryolarda kanatları otomatik olarak güvenli bir konuma getirmesine imkân tanır. Bu mekanik yapı, türbinin değişken rüzgâr koşullarında aerodinamik verimliliğini koruyacak şekilde kanat açılarının hassas biçimde ayarlanmasını mümkün kılar. Hidrolik sistem ünitesi, tüm mekanizmaya gerekli akışkan basıncını sağlar ve merkezi konumlandırılması sayesinde hareketlerin eş zamanlı ve doğru biçimde gerçekleştirilmesine olanak tanır.

Yaw kontrol sistemi, türbinin nacelle bileşenini rüzgâr yönüne göre konumlandırmak amacıyla kullanılan bir yönlendirme mekanizmasıdır. Rüzgâr yönündeki değişimleri algılayan sensörler aracılığıyla sistem, yaw motorlarına sinyal göndererek nacelle'in dönmesini sağlar ve rotorun hâkim rüzgâr yönüne hizalanmasını mümkün kılar. Bu sistem genellikle kapalı çevrimli bir kontrol mimarisi üzerine kuruludur; sensörlerden elde edilen veriler, kontrol biriminde işlenerek motorlara uygun komutlar iletilir. Bu yönlendirme, rotorun maksimum aerodinamik verimle çalışmasını sağlayarak enerji üretim potansiyelini artırırken, türbinin maruz kaldığı yapısal yükleri de dengelemeye yardımcı olur [31,46].

Yaw kontrol sistemleri, özellikle yüksek rüzgâr hızlarında meydana gelebilecek aşırı yük koşullarının önlenmesi açısından kritik önemdedir. Rüzgâr yönüne doğru hizalanmayan bir türbinde rotor kanatları ve diğer yapısal bileşenler dengesiz yüklemelere maruz kalabilir; bu da uzun vadede sistemin ömrünü kısaltabilir. Yaw sisteminin adaptif ve dinamik çalışma prensibi hem enerji üretiminin sürekliliğini sağlar hem de yapısal güvenliği artırır. Günümüzde modern türbinlerde kullanılan yaw kontrol sistemleri, otonom biçimde çalışan dijital algoritmalarla desteklenmekte ve SCADA altyapılarına entegre edilerek sürekli izleme ve kontrol kabiliyetine sahip hale getirilmektedir [30,46].



Şekil-2.5. YAW kontrol genel görünümü [46]

Şekil 2.5’te, bir rüzgâr türbinine ait Yaw kontrol sisteminin genel yapısı şematik olarak sunulmaktadır. Bu sistemin temel bileşenlerinden biri olan yaw sürücüleri, elektrik motorları aracılığıyla nacelle’i yatay düzlemde döndürmek için gerekli torku üretir. Bu sayede türbinin rotor düzlemi, hâkim rüzgâr yönüne hizalanarak aerodinamik verimlilik artırılır. Yaw fren mekanizmaları ise dönme işlemi tamamlandıktan sonra nacelle’i sabit bir pozisyonda tutarak rüzgâr kaynaklı yüklerin oluşturabileceği titreşimleri ve olası yapısal deformasyonları engellemeye yönelik görev üstlenir [30].

Sistemin yön kontrol doğruluğunu sağlayan yaw açısı sensörleri, mevcut rüzgâr yönünü hassas biçimde ölçerek kontrol ünitesine veri aktarır. Bu sensörlerden elde edilen bilgiler doğrultusunda nacelle, rüzgâr yönüne optimize bir şekilde yönlendirilir. Böylece hem enerji üretimi maksimize edilir hem de türbinin yapısal bütünlüğü korunmuş olur.

Tüm bu bileşenler, nacelle iskeleti üzerinde yapılandırılmıştır. Nacelle iskeleti, yalnızca bileşenleri taşıyan bir platform değil, aynı zamanda sistemin maruz kaldığı dinamik ve statik yüklerin güvenli biçimde aktarılmasını sağlayan güçlü bir yapısal destek görevi görür. Bu iskelet sistemi, yaw kontrolünün güvenilir ve dengeli bir şekilde çalışması için gerekli olan mekanik stabiliteyi temin eder.

2.3.1.5. Frenleme sistemi

Rüzgâr türbinlerinde frenleme sistemi hem acil durumlarda hem de aşırı rüzgâr koşulları ya da planlı bakım işlemleri sırasında türbinin güvenli bir şekilde durdurulmasını sağlamak açısından hayati öneme sahiptir. Bu sistem, rotorun dönme hareketini kontrol altına alarak türbinin mekanik bileşenlerini korumakta ve enerji üretiminin güvenli biçimde yönetilmesine katkı sunmaktadır. Mekanik frenleme, rotor miline entegre edilen disk fren mekanizmalarıyla gerçekleştirilir ve rotorun hızlı şekilde durdurulması gereken senaryolarda etkin bir çözüm sunar. Bu yöntem, rotorun kinetik enerjisini fiziksel temas yoluyla sönmüleyerek kısa sürede durmasını sağlar. Aerodinamik frenleme ise kanatların rüzgâr doğrultusuna paralel konuma getirilmesiyle rüzgâr etkisinin minimize edilmesine dayanır ve rotorun kontrollü biçimde yavaşlatılmasını mümkün kılar [31].

Elektriksel frenleme yöntemi, jeneratörün elektromanyetik alanından faydalanılarak rotorun hızının kademeli biçimde azaltılmasını sağlar. Bu teknik, mekanik sürtünme veya aşınmaya neden olmadan, enerji üretim süreci sırasında rotor hareketinin kontrollü bir şekilde durdurulmasını mümkün kılar. Uygulamada, çoğu modern rüzgâr türbini bu üç frenleme yaklaşımının bir kombinasyonunu kullanarak çok katmanlı bir güvenlik yapısı oluşturur. Bu kombinasyon, yalnızca güvenli duruş senaryoları için değil, aynı zamanda aşırı mekanik yüklerin ve ani hız düşüşlerinin türbin bileşenleri üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak için de kritik bir rol oynar. Bu çoklu frenleme stratejisi, türbinin yapısal ömrünün uzatılmasına, bileşenlerin korunmasına ve bakım gereksinimlerinin azaltılmasına doğrudan katkıda bulunur. Modern türbin tasarımlarında fren sistemleri, uluslararası güvenlik standartlarına uygun olarak geliştirilmekte olup hem operasyonel emniyetin sağlanması hem de enerji üretiminin kesintisiz devamlılığı açısından temel işlevlerden birini yerine getirir [30,39]. Şekil 2.6'da disk tipi bir mekanik fren sisteminin yapısı şematik olarak gösterilmektedir.



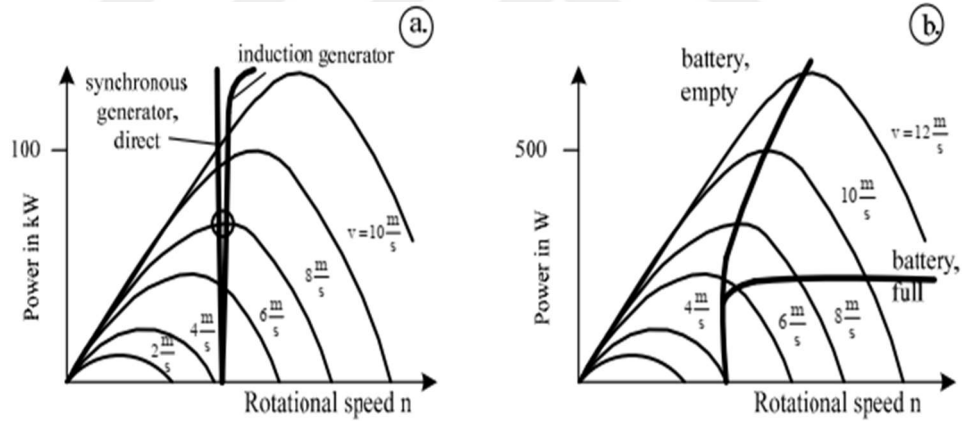
Şekil-2.6. Disk tipi fren görünümü [47]

2.3.1.6. Güç elektroniği düzeni

Rüzgâr türbinlerinde kullanılan güç elektroniği kontrol sistemleri, jeneratörden elde edilen elektrik enerjisinin, ulusal ya da bölgesel şebeke standartlarına uygun şekilde düzenlenmesini sağlayarak enerji üretiminin sürekliliği ve kalitesi açısından kritik bir rol oynamaktadır. Bu sistemler temel olarak redresör (doğrultucu) ve evirici (inverter) bileşenlerinden oluşur. Redresörler, jeneratörden elde edilen alternatif akımı (AC) doğru akıma (DC) çevirerek enerji iletimini daha kararlı bir hale getirir ve evirici devresinin çalışabilmesi için gerekli altyapıyı sağlar. Bu dönüşüm süreci, rüzgâr hızındaki değişkenliklerden kaynaklanan jeneratör çıkışındaki ani dalgalanmaların filtrelenmesine olanak tanır ve enerji akışının kararlı hâle gelmesini mümkün kılar. Redresörler, bu dalgalanmaları sönmüleyerek evirici devresinin istikrarlı çalışmasına katkı sunar ve böylece enerji kayıplarını minimize eder. Redresör devresinden sonra devreye giren evirici, doğru akımı tekrar alternatif akıma dönüştürür; ancak bu dönüşüm, şebekenin ihtiyaç duyduğu frekans ve gerilim parametrelerine uygun olacak şekilde gerçekleştirilir. Bu sayede türbinin ürettiği enerji, şebekeye entegre edilebilir hâle getirilmiş olur. Güç elektroniği kontrol sistemi, bu iki aşamalı dönüşüm yoluyla rüzgâr enerjisi üretimi ile şebeke gereksinimleri arasındaki uyumu sağlar ve potansiyel

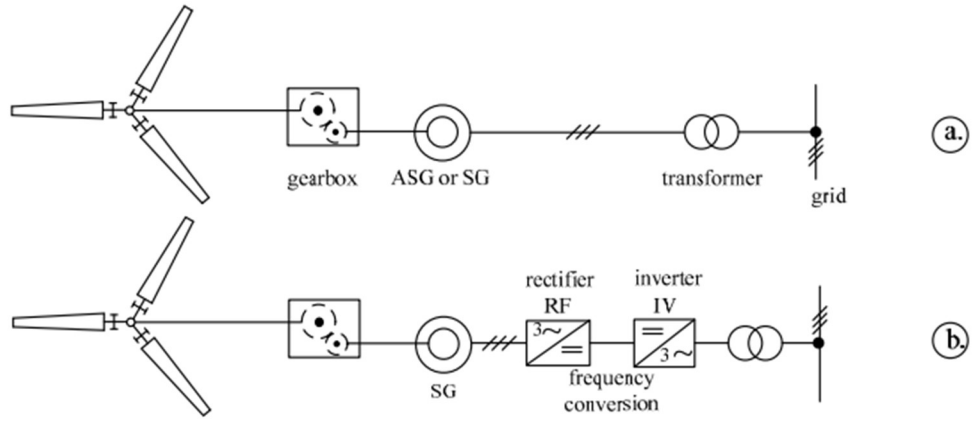
enerji iletim problemlerinin önüne geçer [31,38]. Şekil 2.7 ve Şekil 2.8’de bir rüzgâr türbinine ait ara DC dönüştürücü devresi ile şebeke bağlantısı şematik olarak gösterilmekte, doğrudan bağlantıya kıyasla bu devrenin sistem üzerindeki etkisi karşılaştırmalı biçimde sunulmaktadır.

Modern rüzgâr türbinlerinde bu sistemi destekleyen önemli bir işlevsel yapı da Maksimum Güç Noktası Takibi (MPPT) algoritmasıdır. MPPT, rüzgâr hızındaki ani değişimlere dinamik şekilde yanıt vererek jeneratörün çalışmasını en verimli noktada tutar ve böylece türbinin enerji üretim kapasitesini maksimize eder. Bu algoritma, jeneratörün voltaj ve akım değerlerini sürekli olarak izleyerek, güç üretiminin en uygun noktada gerçekleşmesini sağlar. MPPT, yalnızca enerji verimliliğini artırmakla kalmaz, aynı zamanda şebeke stabilitesine katkı sunarak enerji iletimini kesintisiz ve güvenilir bir hâle getirir. Bu bağlamda, güç elektroniği yapısı, rüzgâr türbinlerinin hem enerji üretim süreçlerinin optimizasyonu hem de şebeke ile uyumlu çalışması bakımından temel öneme sahiptir [39,50].



Şekil 2.7 Rüzgâr türbini ve jeneratörün çalışma noktaları a. Şebekeye doğrudan bağlı çalışma

b. Akü şarj cihazı olarak bağımsız çalışma [48]

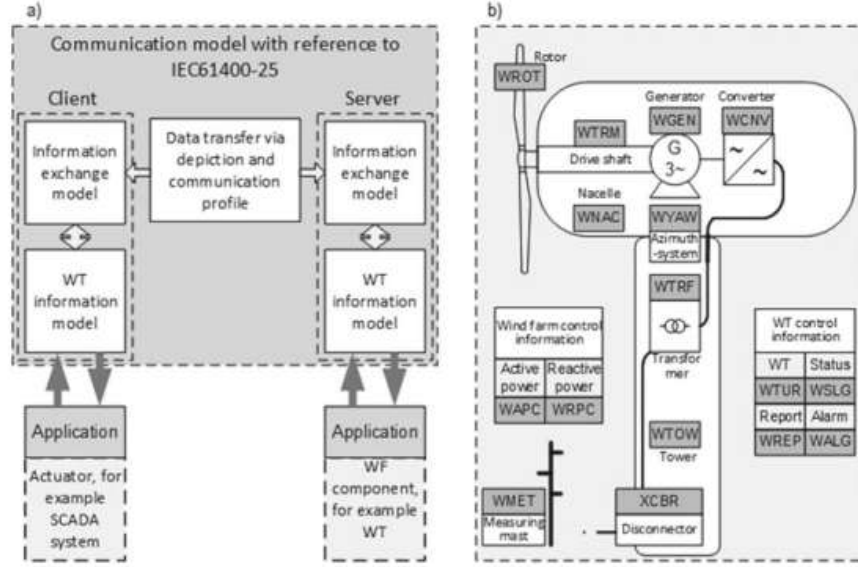


Şekil 2.8. Rüzgâr türbininin şebekeye bağlantısı (a) Asenkron jeneratör (ASG) veya senkron jeneratörün (SG) şebekeye doğrudan bağlantısı (b) Ara bir DC devresi ile frekans dönüştürücü üzerinden şebekeye enerji aktaran senkron jeneratör [48]

2.3.1.7. SCADA sistemi

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) sistemi, rüzgâr türbinlerinin uzaktan izlenmesi ve kontrol edilmesi amacıyla geliştirilen, çağdaş rüzgâr enerjisi santrallerinin temel bileşenlerinden biridir. Bu sistem, türbinlerin operasyonel durumlarını, enerji üretim performanslarını ve çevresel koşulları sürekli olarak takip ederek, toplanan verileri analiz eder ve sistemin yüksek verimlilikle çalışabilmesi için gerekli kontrol işlemlerini koordine eder. SCADA altyapısı; rüzgâr hızı, rotor devri, güç çıkışı, sistem voltajı ve bileşen sıcaklıkları gibi çok sayıda operasyonel parametreyi kayıt altına alır ve bu verileri analiz edilebilir biçimde saklar. Elde edilen bilgiler, enerji üretiminin optimize edilmesi ve olası arızaların erken tespit edilerek önleyici bakım stratejilerinin uygulanması açısından büyük önem taşır. Aynı zamanda SCADA sistemi, türbin güvenliği ve bakım süreçlerinin yönetimi bakımından da merkezi bir rol üstlenmektedir. Sistem, olağandışı durumları algılayarak otomatik olarak alarm üretir, gerekli acil müdahaleleri başlatır ve ilgili servis personeline bilgi aktarır. SCADA yazılımı, manuel ve otomatik kontrol modları arasında geçiş yapabilme yeteneği sayesinde, türbinin farklı operasyonel senaryolara dinamik olarak uyum sağlamasına imkân tanır. Kullanıcı dostu arayüzü sayesinde operatörlere kolay ve etkili bir kontrol olanağı sunar; bu durum yalnızca enerji üretim verimliliğini artırmakla kalmaz, aynı zamanda bakım ve işletme maliyetlerinin düşürülmesine de katkı sağlar. Bununla birlikte SCADA sistemi, türbinlerin enerji iletim sistemleri ile

uyumlu çalışmasını sağlamak amacıyla, elde edilen operasyonel verileri analiz ederek enerji aktarımını düzenler ve şebeke standartlarına uygunluğu denetler. Böylece hem sistem kararlılığı korunur hem de enerji kalitesi sürdürülebilir kılınır. Şekil 3.9’da bir rüzgâr türbini sistemine ait haberleşme altyapısı ile SCADA sisteminde toplanan verilerin elde edildiği bileşenler şematik olarak gösterilmektedir [38].



Şekil 2.9. a. Rüzgâr türbini iletişim modeli b. Rüzgâr türbini bilgi modeli [38]

2.3.1.8. Kule

Rüzgâr türbini kuleleri, yalnızca rotor ve jeneratör gibi temel bileşenlerin fiziksel olarak taşındığı yapılar değil; aynı zamanda türbinin aerodinamik ve mekanik performansını doğrudan etkileyen, mühendislik açısından kritik taşıyıcılardır. Bu kuleler, rotorun daha yüksek irtifalarda rüzgâra maruz kalmasını sağlayarak, enerji üretim potansiyelini önemli ölçüde artırır. Günümüz rüzgâr enerjisi teknolojilerinde, kuleler genellikle çelik, beton ya da bu ikisinin birleşiminden oluşan hibrit yapı teknolojileriyle inşa edilmektedir.

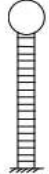
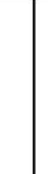
Çelik kuleler; üretim kolaylığı, taşıma ve sahada montaj avantajları sayesinde sektörde en yaygın kullanılan çözümler arasında yer alır. Öte yandan, beton kuleler özellikle yüksek yapılar için tercih edilir; sundukları dayanıklılık ve uzun ömür, onları zorlu çevresel koşullarda daha avantajlı hale getirir. Her iki malzemenin özelliklerini

birleştiren hibrit kuleler ise, daha yüksek enerji verimliliği hedeflenen projelerde etkin bir seçenek sunmaktadır.

Alternatif olarak geliştirilen kafes tipi kuleler, daha az malzeme kullanımıyla maliyet avantajı sunsa da görsel etkileri, montaj zorlukları ve rüzgârla etkileşim açısından oluşturdıkları dezavantajlar nedeniyle modern uygulamalarda sınırlı düzeyde kullanılmaktadır. Kule tasarımında yalnızca yük taşıma kapasitesi değil, aynı zamanda titreşim davranışları da belirleyici faktörlerdendir. Yapının doğal frekansının rotorun çalıştığı frekans aralığıyla çakışmaması adına, mühendislik hesaplamalarında rezonans riskine karşı özel analizler yapılmakta; malzeme, kesit ve bağlantı seçimleri bu kriterlere göre şekillendirilmektedir [30].

Tablo 2.1’de farklı kule türleri, temel yapısal özellikleri, uygulama avantajları ve sınırlılıkları bakımından karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.

Tablo 2.1. Rüzgâr Türbinlerinde Kullanılan Kule Tipleri [49]

Material:	Steel				Concrete		
Wind turbine: WKA-60-II Rotor: 3 blades, $\varnothing$ 60 m Rotor speed: $n = 23 \text{ rpm} = 0.3833 \text{ Hz}$ Blade frequency: $3 \times n = 1.15 \text{ Hz}$ Head mass: 207 t hub height: 50 m							
	Cylindrical tower	Conical bottom	Lattice tower	Guyed lattice tower	Pre-fabricated segments	on-site concrete	on-site concrete, conical
1 st tower natural bending frequency $f_{0,1}$ [Hz]	0.55	0.56	0.55	0.55	0.65	0.96	0.96
Frequency ratio $f_{0,1} / n$ [p]	1.44	1.46	1.44	1.44	1.70	2.50	2.50
$\varnothing$ top [m]	3.50	3.20	3.10	2.70	3.50	3.30	3.50
$\varnothing$ bottom [m]	3.50	7.50	4.30	2.70	3.50	5.40	8.10
Wall thickness [mm]	stepped 35–20	20	20	20	stepped 520/250	300	300
Tower mass [t]	114	90	87	63 + guy wires	430	455	540
Relative costs for supporting structure [%]	230	185	175	200	100	Not pre-stressed: 115 Prestressed: 160	Not pre-stressed: 135 prestressed: 185

2.3.1.9. Rüzgâr türbinlerinde kullanılan güç dönüştürücüleri ve dağıtım sistemleri

Rüzgâr türbinlerinde üretilen elektrik enerjisinin şebeke ile uyumlu hâle getirilmesi, enerji sistemlerinin kararlılığı ve sürdürülebilir işletimi açısından son derece kritiktir. Bu bağlamda, elektriksel dönüşüm ve dağıtım altyapıları önemli bir işlev üstlenir.

Jeneratörden elde edilen düşük voltajlı elektrik, transformatörler aracılığıyla daha yüksek voltaj seviyelerine çıkarılarak iletim hattına aktarılır. Bu yükseltme işlemi, iletim hattındaki kayıpları azaltmak ve enerji transfer verimliliğini artırmak amacıyla gerçekleştirilir. Transformatörlerin bu temel işlevi, rüzgâr türbinlerinden sağlanan enerjinin merkezi şebekeye etkin ve kayıpsız şekilde entegre edilmesine olanak tanır [30].

Güç elektroniği bileşenleri, bu süreçte elektrik enerjisinin voltaj ve frekans değerlerini şebeke standartlarına uyarlamak için kullanılır. Redresör ve invertör gibi cihazlar, enerji dönüşümünü kontrol altında tutarak sabit ve kaliteli bir çıkış sağlar. Bu bileşenler yalnızca enerjiyi düzenlemekle kalmaz, aynı zamanda sistem performansını da artırır. Maksimum Güç Noktası Takibi (MPPT) algoritmaları ise, rüzgâr hızlarındaki değişkenliğe rağmen jeneratörün her zaman en yüksek verim noktasında çalışmasını sağlayarak enerji üretimini optimize eder [31]. Böylece rüzgâr türbinlerinin değişken kaynak yapısına rağmen sistem içindeki etkinliği artırılır.

Enerji dönüşüm sistemlerinin sağladığı katkılar yalnızca verimlilikle sınırlı değildir; bu sistemler aynı zamanda şebeke stabilitesine de önemli ölçüde destek olur. Güç elektroniği bileşenlerinin sunduğu reaktif güç desteği, şebeke voltaj seviyelerinin dengede tutulmasını sağlar. Bu destek, özellikle büyük ölçekli enerji entegrasyonlarında sistem güvenliği ve kararlılığı açısından belirleyici bir rol oynar. Aynı zamanda, enerji akışını dengelerken türbin bileşenleri üzerindeki elektriksel ve mekanik gerilimlerin kontrol altında tutulmasına katkıda bulunarak sistem ömrünü uzatır [35].

Rüzgâr türbinlerinin başarısı, tüm bileşenlerin birbiriyle uyumlu ve sistematik bir şekilde çalışmasına bağlıdır. Rotorun kinetik enerjiyi etkin biçimde yakalaması, jeneratörün bu enerjiyi elektrik formuna dönüştürmesi ve ardından gelen elektriksel dönüşüm ve iletim sistemlerinin enerjiyi şebekeye güvenli biçimde aktarması, türbin performansının temel yapı taşlarıdır. Dolayısıyla, türbinin verimliliği, güvenliği ve dayanıklılığı, her bir bileşenin mühendislik açısından doğru şekilde tasarlanmış ve entegre edilmiş olmasına doğrudan bağlıdır [37].

2.3.2. Türbin türleri

2.3.2.1 Yatay eksenli türbinler (HAWT)

Yatay eksenli rüzgâr türbinleri (Horizontal Axis Wind Turbines- HAWT), rotor ekseninin yere paralel ve rüzgâr yönüne hizalanmış şekilde tasarlandığı en yaygın türbin türlerinden biridir. Bu türbinler, genellikle üç kanatlı bir rotor ve yüksek aerodinamik verimlilik sağlayacak şekilde optimize edilmiş kanat profilleri ile tasarlanır. HAWT'ler, rüzgâr enerjisini maksimum düzeyde yakalamak için genellikle kulelerin üzerine yerleştirilir ve rüzgâr yönüne dönmek için bir yaw kontrol mekanizması kullanır [31]. Yüksek enerji verimliliği, bu türbinlerin modern enerji üretiminde yaygın olarak kullanılmasının en önemli nedenlerinden biridir.

HAWT 'lerin başlıca avantajlarından biri, yüksek güç katsayısına sahip olmalarıdır. Kanat tasarımı ve aerodinamik yapısı, düşük rüzgâr hızlarında bile enerji üretimini mümkün kılar. Bunun yanı sıra, rüzgâr hızlarındaki değişimlere hızlı bir şekilde uyum sağlayabilen tasarımı, enerji üretim süreçlerini optimize eder [30]. Ancak, bu türbinler genellikle daha büyük bir yerleşim alanına ihtiyaç duyar ve türbinlerin yüksek kulelere monte edilmesi, tasarım ve kurulum süreçlerini karmaşık hale getirir.

HAWT'lerin bir diğer önemli özelliği, geniş bir enerji üretim kapasitesine sahip olmalarıdır. Büyük ölçekli projelerde ve açık alanlarda kullanımı yaygındır. Örneğin, açık deniz (offshore) rüzgâr çiftliklerinde, yatay eksenli türbinler geniş bir alanı kapsayarak yüksek enerji üretimi sağlar [33]. Bununla birlikte, türbinin tüm bileşenlerinin kule üzerine monte edilmesi, özellikle bakım ve onarım süreçlerinde zorluklara neden olabilir.

Bu türbinler, genellikle yüksek kapasiteli enerji üretimi gerektiren projelerde tercih edilir. Aerodinamik tasarımı sayesinde enerji verimliliği optimize edilirken, modern kontrol mekanizmaları türbinin rüzgâr yönüne sürekli olarak dönmelerini sağlar. Ancak, bu mekanizmalar maliyetleri artırmakta ve türbinin genel tasarımını daha karmaşık hale getirmektedir [38]. Şekil 2.10 'da HAWT türbin örneği gösterilmektedir.



Şekil 2.10. HAWT türbin görünümü [50]

2.3.2.2. Dikey eksenli türbinler (VAWT)

Dikey eksenli rüzgâr türbinleri (Vertical Axis Wind Turbines- VAWT), rotor ekseninin yere dik olarak konumlandığı türbinlerdir. Bu türbinlerin en büyük avantajı, rüzgâr yönünden bağımsız olarak çalışabilmeleridir. VAWT'ler, özellikle rüzgâr yönünün sürekli değiştiği bölgelerde tercih edilir. Rüzgârın her yönden türbine ulaşabilmesi, bu tasarımın pratik bir çözüm sunmasını sağlar [31]. Ayrıca, bu türbinler yer seviyesinde daha kolay monte edilebilir ve bu da bakım maliyetlerini azaltır.

VAWT'lerin iki ana tasarımı bulunmaktadır: Savonius ve Darrieus türbinleri. Savonius türbinler, düşük hızlarda yüksek tork sağlamak için tasarlanmış olup daha çok küçük ölçekli enerji üretim uygulamalarında kullanılır. Darrieus türbinler ise aerodinamik olarak daha verimli olup, daha yüksek enerji üretim kapasitesine sahiptir [33]. Ancak, her iki tasarımda da güç katsayısı genellikle HAWT'lere kıyasla daha düşüktür, bu da enerji üretiminde bir dezavantaj oluşturabilir.

VAWT'lerin bir diğer avantajı, jeneratör ve diğer mekanik bileşenlerin zemine yakın bir konumda bulunmasıdır. Bu özellik, bakım ve onarım süreçlerini kolaylaştırırken aynı zamanda türbinin kurulum maliyetlerini düşürür. Ancak, bu türbinlerin düşük verimlilikleri ve yapısal zayıflıkları, özellikle büyük ölçekli projelerde sınırlamalar

yaratabilir [30]. Rüzgâr türbinlerinin bu tasarımı, genellikle küçük ölçekli, bağımsız enerji üretim uygulamalarında tercih edilmektedir.

Sonuç olarak, VAWT'ler rüzgâr yönünden bağımsız çalışma avantajı ve kolay bakım özellikleriyle öne çıkarken, düşük verimlilik ve sınırlı güç kapasitesi gibi dezavantajları bulunmaktadır. Bu türbinler, özellikle kentsel alanlarda veya değişken rüzgâr koşullarına sahip bölgelerde daha etkili bir çözüm sunmaktadır [38]. Şekil 2.11 'de VAWT türbin örneği gösterilmektedir.



Şekil 2.11. VAWT türbin görünümü [51]

2.3.3. Rüzgâr aerodinamiği

2.3.3.1. Kanatlara etki eden aerodinamik kuvvetler ve kanat yapıları

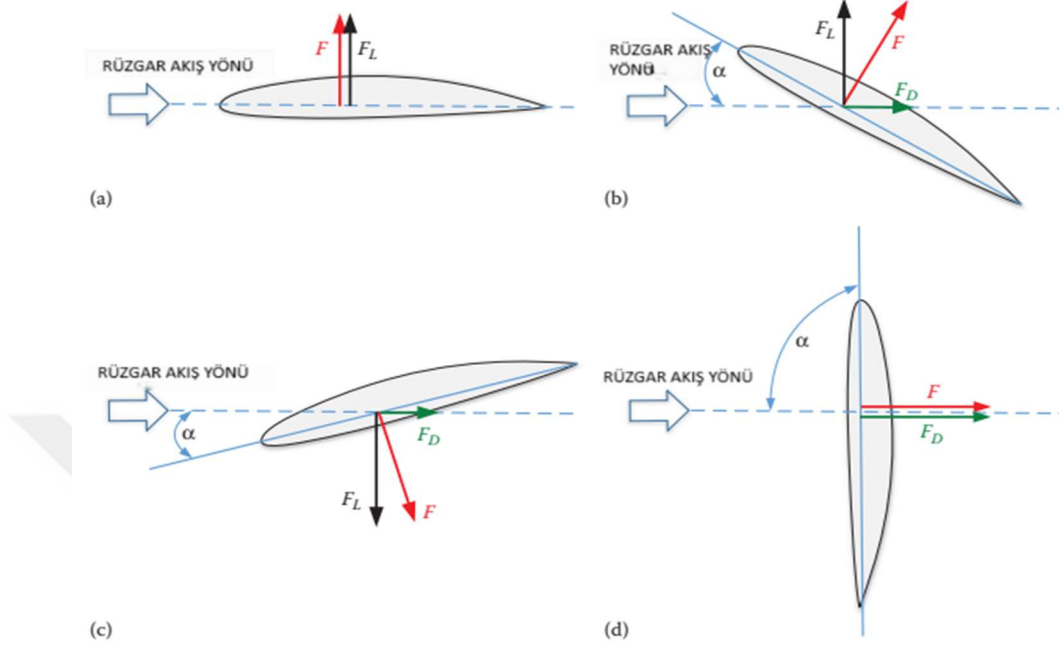
Rüzgâr aerodinamiği ve kanat yapıları üzerine yapılan çalışmalarda, aerodinamik kuvvetlerin kanatlar üzerindeki dağılımı ve etkisi detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Kanatlar üzerindeki aerodinamik kuvvetler, temel olarak kaldırma kuvveti (lift) ve sürüklenme kuvvetinden (drag) oluşur. Kaldırma kuvveti, hava akımının kanadın eğimli yüzeyine uyguladığı kuvvet sonucu oluşurken, sürüklenme kuvveti ise hava akışına

karşı meydana gelen dirençtir. Bu kuvvetlerin hesaplanmasında, kanat profilinin geometrik parametreleri (örneğin, kanat kalınlığı, giriş hattı ve hücum açısı) belirleyici rol oynar. Kanat profilleri genellikle NACA serisi gibi standartlara göre tasarlanır ve bu tasarımlar optimum aerodinamik performansı hedefler [31]. NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) serisi, farklı aerodinamik özelliklere sahip kanat profillerini ifade eder. Bu profiller, belirli kaldırma ve sürüklenme karakteristiklerini sağlamak üzere matematiksel olarak tanımlanmış geometrik şekillerdir. Örneğin, NACA 0012, simetrik bir kanat profilini ifade eder ve "00" rakamları giriş hattında eğrilik olmadığını, "12" ise kanat kalınlığının giriş hattına göre %12 oranında olduğunu gösterir.

Kanat yapılarının aerodinamik tasarımında, indüklenmiş sürüklenme gibi kayıpları azaltmak amacıyla yüksek aspekt oranına sahip ince ve uzun kanatlar tercih edilir. **Aspekt oranı (aspect ratio), kanat uzunluğunun kanat genişliğine oranıdır ve aerodinamik verim üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Yüksek aspekt oranına sahip kanatlar, daha düşük indüklenmiş sürüklenme ile yüksek kaldırma kuvveti üretirken, düşük aspekt oranına sahip kanatlar daha dayanıklı ve kompakt bir yapıya sahiptir. İndüklenmiş sürüklenme, kanat uçlarında meydana gelen serbest uç girdapları nedeniyle oluşur ve bu girdaplar kanadın alt ve üst yüzeyindeki basınç farkından kaynaklanır. Ayrıca, kanatlar üzerindeki yük dağılımı, kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin kanat uzunluğu boyunca entegrasyonu ile hesaplanır. Bu hesaplama, kanat eleman teorisi (blade element theory) gibi yöntemler kullanılarak gerçekleştirilir ve bu yöntemler rotor torkunu ve kanat üzerindeki aerodinamik yükleri tahmin etmek için kullanılır [52]. Şekil 2.12 'de bir türbin kanadına etki eden kuvvetler ve etkileri gösterilmiştir.

Son olarak, aerodinamik yükler kanatların yapısal tasarımı üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Kanatlar, sadece operasyonel yükler (örneğin, nominal rüzgâr hızındaki yükler) değil, aynı zamanda ani yük değişiklikleri ve türbülans kaynaklı yükler gibi dinamik koşulları da tolere edebilecek şekilde tasarlanır. Bu durum, kanat malzemelerinin seçimini ve iç yapısal bileşenlerin (örneğin, destekleyici kirişler ve kesit elemanları) boyutlandırılmasını etkiler. Modern rüzgâr türbini kanatları,

genellikle kompozit malzemelerden üretilir ve bu malzemeler yüksek mukavemet-ağırlık oranı sağlar [38].



Şekil 2.12 (a) Yatay pozisyon—tüm aerodinamik kuvvet kaldırma (lift); (b) Pozitif hücum açısı— aerodinamik kuvvet kaldırma (lift) ve sürüklenme (drag) içerir; (c) Negatif hücum açısı— kaldırma (lift) ters yöndedir; (d) Artan pozitif hücum açısı—aerodinamik kuvvet tamamen sürüklemeye (drag) dönüşene kadar. [53]

2.3.3.2. Kanat profil tasarımı ve performansa etkileri

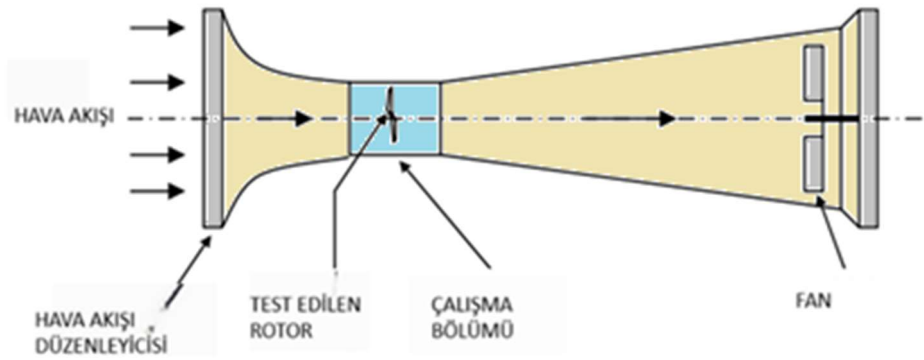
Kanat profilleri, rüzgâr türbinlerinin aerodinamik verimliliğini ve enerji üretimini doğrudan etkiler. Kanat profilleri, kaldırma kuvveti (lift) ve sürüklenme kuvveti (drag) oranını optimize etmek için tasarlanır. NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) serisi profiller, kanat geometrisinin kaldırma ve sürüklenme özelliklerini tanımlayan çok kullanılan bir sınıflandırmadır. Bu profiller, genellikle dört ve beş basamaklı kodlarla belirtilir. Örneğin, NACA 2415 kanat profili, maksimum kamburluğun giriş uzunluğunun %2'si olduğunu ve bu noktadan 0.4 giriş uzunluğu uzaklıkta maksimum kalınlığın %15 olduğunu ifade eder [33,55].

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

$$D = \frac{1}{2} \rho V^2 C_D A \quad (2.2)$$

Denklem 2.1 'de L : Kaldırma kuvveti (N), C_L : Kaldırma katsayısı, Denklem 3.2 'de D : Sürüklenme kuvveti (N), C_D : Sürüklenme katsayısı, Her iki denklemde ortak değişkenler, ρ : Hava yoğunluğu (kg/m^3), V : Rüzgâr hızının göreceli değeri (m/s), A : Kanat yüzey alanı (m^2) 'dir.

Kanat profilinin tasarımında kullanılan bu katsayılar (C_L), genellikle rüzgâr tünellerinde yapılan deneysel çalışmalarla veya sayısal modelleme yöntemleriyle elde edilir. Profilin eğimi (kamburluk) ve kalınlık oranı gibi geometrik özellikleri, hücum açısı (α) ile birlikte bu katsayıları doğrudan etkiler. Örneğin, polar eğriler olarak bilinen C_L ve C_D grafiklerinde, hücum açısının artmasıyla kaldırma kuvveti başlangıçta artarken, belirli bir kritik açıdan sonra stall etkisi nedeniyle hızla azalır. Bu tür analizler, enerji üretiminin optimize edilmesi ve türbinin çalışma aralığının belirlenmesi için hayati önem taşır. Şekil 2.13 'te bu analizlerin yapıldığı temsili bir rüzgâr tüneli gösterilmektedir.



Şekil 2.13. Düşük hızlı bir rüzgâr tüneli [55]

Rüzgâr türbinlerinde kullanılan modern kanat profilleri, özellikle rüzgâr türbinlerine özgü koşullarda çalışabilmeleri için optimize edilmiştir. Geleneksel NACA profilleri genellikle havacılık uygulamaları için geliştirilmiştir, ancak rüzgâr türbinlerinde stall davranışı ve düşük Reynolds sayılarında performans kaybı gibi dezavantajlar gösterir. Bu nedenle, Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) gibi araştırma kurumları, rüzgâr türbinleri için optimize edilmiş yeni profiller geliştirmiştir. Bu

profiller, düşük yüzey pürüzlülüğüne hassasiyet ve yüksek enerji üretimi gibi özelliklere sahiptir [39,54].

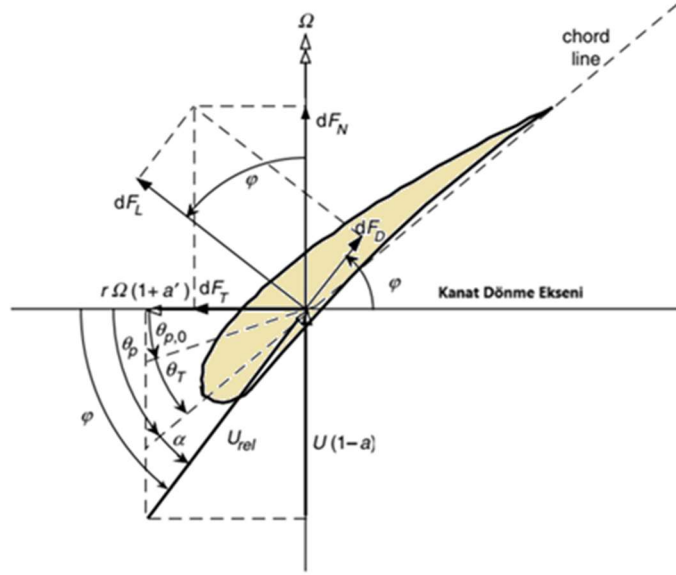
Kanat profillerinin tasarımı aynı zamanda kanat uçlarında oluşan girdapları ve indüklenmiş sürüklemeyi azaltmayı hedefler. Kanat uzunluğu ve giriş genişliği arasındaki oran, yani "aspect ratio", bu tür kayıpları etkiler. Yüksek aspect ratio değerine sahip ince ve uzun kanatlar, düşük sürüklenme ve yüksek kaldırma kuvveti sağlar. Ayrıca, kanat profillerinin aerodinamik özellikleri rüzgâr tünellerinde test edilerek belirlenir ve sonuçlar polar eğriler (kaldırma ve sürüklenme katsayılarının hücum açısına göre değişimi) şeklinde analiz edilir [31,55].

Rüzgâr türbini kanat tasarımı, aerodinamik ilkeler doğrultusunda enerji üretim verimliliğini en üst düzeye çıkarmak için geliştirilir. Kanat teorisi, momentum teorisi, kanat eleman teorisi (Blade Element Theory- BET) ve kanat eleman moment teorisi (Blade Element Momentum Theory- BEMT) gibi yaklaşımlarla analiz edilir. Bu teoriler, rüzgârın türbin rotorundan nasıl geçtiğini ve enerji transferinin nasıl gerçekleştiğini anlamak için kullanılır.

Kanat Eleman Teorisi (Blade Element Theory- BET), rüzgâr türbini kanatlarının aerodinamik analizini yapmak için kullanılan bir yöntemdir. Bu teori, her bir kanat kesitini bağımsız bir aerodinamik eleman olarak ele alır ve her elemanın kaldırma (L) ve sürüklenme (D) kuvvetlerine maruz kaldığını varsayar. BET, momentum teorisi ile birlikte kullanıldığında kanat eleman moment teorisi (Blade Element Momentum Theory- BEMT) ortaya çıkar.

Kanat Eleman Teorisi, rüzgâr türbini kanatlarının aerodinamik analizini yaparken belirli varsayımlar üzerine kuruludur. Öncelikle, her kanat elemanının bağımsız olduğu kabul edilir, yani yan yana bulunan kesitler birbirinden etkilenmez ve her biri kendi aerodinamik yüklerine göre hareket eder. Bu teori kapsamında, kanat üzerindeki kuvvetlerin yalnızca kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinden oluştuğu varsayılır. Ayrıca, akışın tamamen iki boyutlu olduğu kabul edilir; bu, akışın yalnızca kanat eksenine boyunca değiştiği anlamına gelir. Son olarak, akışın aerodinamik dengeye sahip olduğu varsayılır, yani herhangi bir türbülans veya kararsızlık bulunmaz. Bu

varsayımlar doğrultusunda, Kanat Eleman Teorisi'nin temel denklemleri ve ispatı detaylı olarak ele alınmaktadır [63].



Şekil 2.14. Türbin kanadına etki eden kuvvetlerin gösterimi [62]

Şekil 2.14 'da $U(1-a)$ kanatlarda rüzgâr hızı, U_{rel} göreceli rüzgâr hızı, θ_p kesit hücum açısı, α hücum açısı, $\varphi = \theta_p + \alpha$ göreceli rüzgâr açısı, $\theta_{p,0}$ kanat eğim açısı, θ_T kesit burulma açısıdır.

Bir rüzgâr türbini kanadı üzerindeki aerodinamik kuvvetler kaldırma (L) ve sürüklenme (D) kuvvetleri olarak tanımlanır.

Kaldırma Kuvveti (L):

$$dL = \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 C_L c dr \quad (2.4)$$

Sürüklenme Kuvveti (D):

$$dD = \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 C_D c dr \quad (2.5)$$

2.4 ve 2.5 'teki denklemlerde, ρ Hava yoğunluğu, U_{rel} Kanat elemanı üzerindeki göreceli rüzgâr hızı, C_L Kaldırma katsayısı, C_D Sürüklenme katsayısı, c Kanat kordon uzunluğu, dr Diferansiyel uzunluğu temsil eder.

Kanat elemanları üzerindeki kuvvetler dönme düzlemine paralel (dF_T) ve dik (dF_N) olmak üzere iki bileşene ayrılır:

Dik Kuvvet (Trust Kuvveti), rüzgâr türbininin eksenini boyunca itme (trust) kuvveti sağlar.

$$dF_N = dL \cos \phi + dD \sin \phi \quad (2.6)$$

Tork Kuvveti (Dönme Kuvveti), türbinin dönmesini sağlar.

$$dF_T = dL \sin \phi - dD \cos \phi \quad (2.7)$$

Diferansiyel tork denklemi ise şöyledir;

$$dQ = r dF_T \quad (2.8)$$

$$dQ = \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 (C_L \sin \phi - C_D \cos \phi) c r dr \quad (2.9)$$

Diferansiyel tork, rotorun küçük bir kesitinde oluşan ve bu kesitin dönme hareketine katkıda bulunan momenti ifade eder. Rotor kanadı boyunca düşünülen çok ince bir halka şeklindeki bu kesitteki tork, dQ ile gösterilir. Bu diferansiyel tork, ilgili kesitin dönme eksenine olan uzaklığı r ile, aynı kesitteki tangensiyel kuvvet dF_T 'nin çarpımıyla elde edilir.

$$U_{rel} = \frac{U_{\infty}(1 - \alpha)}{\sin(\phi)} \quad (2.10)$$

Doluluk oranı, bir rüzgâr türbininin rotorunda bulunan kanatların toplam alanının rotor alanına oranını ifade eden önemli bir aerodinamik parametredir. Denklem şu şekildedir:

$$\sigma = \frac{Bc}{2\pi r} \quad (2.11)$$

$$dQ = \sigma \pi \rho \frac{U_{\infty}^2 (1 - \alpha)^2}{\sin^2(\varphi)} (C_L \sin \varphi - C_D \cos \varphi) r^2 dr \quad (2.12)$$

Eksenel kuvvet, rüzgârın kanat üzerindeki etkisiyle ortaya çıkan aerodinamik kuvvetlerin, rotor eksenine doğrultusundaki bileşenini ifade eder. Bu kuvvet, türbinin hava akışıyla etkileşimini ve üretilen itme kuvvetini belirlemede kritik bir rol oynar.

$$dL_x = dL \cos \phi \quad (2.13)$$

$$dD_x = dD \sin \phi \quad (2.14)$$

$$dT = dL_x + dD_x \quad (2.15)$$

$$dT = \left(\frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 C_L c dr\right) \cos \phi + \left(\frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 C_D c dr\right) \sin \phi \quad (2.16)$$

$$dT = \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi) c dr \quad (2.17)$$

Türbinde B adet kanat varsa bu durumda Tork denklem 2.18 ile ifade edilir.

$$dT = B \sigma \pi \rho \frac{U_{\infty}^2 (1 - \alpha)^2}{\sin^2(\varphi)} (C_L \sin \varphi - C_D \cos \varphi) r dr \quad (2.18)$$

Denklem 2.18 ‘de dT, Diferansiyel eksenel kuvvet (kanadın bir kesitinde oluşan küçük eksenel kuvvet) ‘tir.

2.3.4. Genel İstatistik Kavramları

2.3.4.1. Ortalama ve ağırlıklı ortalama

Rüzgâr enerjisi analizlerinde kullanılan ortalama hız hesaplamaları, rüzgâr türbinlerinin enerji üretim potansiyelini doğru bir şekilde değerlendirmek açısından

kritik öneme sahiptir. Bu hesaplamalar, rüzgâr hızlarının istatistiksel dağılımı ve enerji üretimine etkileri göz önüne alınarak gerçekleştirilir. Standart ortalama hız, belirli bir zaman diliminde ölçülen rüzgâr hızlarının aritmetik ortalaması olup, rüzgâr koşullarının genel eğilimini belirlemek için kullanılır [31]. Matematiksel olarak şu şekilde ifade edilir:

$$V_{avg} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i \quad (2.19)$$

Burada 2.19 ‘daki denklemde V_{avg} = Standart ortalama hız (m/s), V_i = Ölçülen rüzgâr hızları (m/s), n = Toplam ölçüm sayısıdır.

Bu yöntem, rüzgâr hızlarının genel dağılımını gösterse de yüksek hızlardaki enerji üretim potansiyelini tam olarak yansıtmaz. Çünkü düşük rüzgâr hızları enerji üretimi açısından daha az etkili olduğundan, bu hızları standart ortalama ile değerlendirmek enerji verimini yanlış tahmin edebilir [52].

Bu sorunu gidermek için ağırlıklı ortalama hız ($V_{weighted}$) kullanılır. Bu yöntem, her hızın enerji üretimine katkısını vurgulayarak hesaplamayı daha doğru hale getirir. Ağırlıklı ortalama hız enerji üretim potansiyelini daha doğru bir şekilde temsil etmek amacıyla, rüzgâr hızlarının küplerinin ortalamasının küp kökünün alınmasıyla hesaplanır. Çünkü rüzgâr türbinlerinin üretebileceği enerji, rüzgâr hızının üçüncü kuvveti ile orantılıdır [31].

Rüzgâr türbinleri tarafından üretilen güç, Betz Limiti ve aerodinamik özelliklerden dolayı rüzgâr hızının küpüyle (V^3) orantılı olduğundan, enerji üretimini tahmin etmek için standart aritmetik ortalama hız yerine ağırlıklı ortalama hız tercih edilir.

Bu yöntem şu şekilde ifade edilir:

$$V_{weighted} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n f_i V_i^3}{\sum_{i=1}^n f_i} \right)^{1/3} \quad (2.20)$$

Burada 2.20 ‘teki denklemde V_{weighted} , Ağırlıklı ortalama hız(m/s), V_i , Belirli rüzgâr hızları (m/s), f_i , Belirli hız aralıklarında gözlenen frekans veya ağırlık, n , Ölçüm sayısıdır.

Bu hesaplama yöntemi, düşük rüzgâr hızlarının enerji üretimi üzerindeki etkisini minimize ederken, yüksek rüzgâr hızlarının etkisini artırır. Böylece, rüzgâr türbinlerinin üretebileceği enerjiye daha uygun bir ortalama hız belirlenmiş olur [52].

2.3.4.2. Standart sapma ve varyans

İstatistiksel analizlerde standart sapma ve varyans, rüzgâr hızları gibi değişkenlerin dağılımını ve değişkenliğini ölçmek için kullanılan iki temel istatistiksel kavramdır. Varyans (σ^2), belirli bir veri kümesindeki her bir değerin ortalamadan ne kadar saptığını gösteren bir ölçümdür ve şu denklemle hesaplanır;

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (V_i - V_{\text{avg}})^2 \quad (2.21)$$

Burada 2.21 ‘deki denklemde σ^2 , Varyans, n , Veri kümesindeki gözlem sayısı, V_i , Bireysel rüzgâr hızları, V_{avg} , Rüzgâr hızlarının aritmetik ortalamasıdır.

Standart sapma (σ), varyansın karekökü alınarak elde edilir ve şu şekilde hesaplanır:

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} \quad (2.22)$$

Bu ölçüm, rüzgâr hızlarının ortalama etrafında nasıl dağıldığını gösterir. Küçük bir standart sapma, hızların ortalamaya yakın değerler aldığını; büyük bir standart sapma ise hızların geniş bir aralıkta değiştiğini gösterir [56].

Rüzgâr enerjisi üretiminde, standart sapma ve varyans, enerji üretim tahminlerinin doğruluğunu belirlemek açısından büyük önem taşır. Rüzgâr türbinlerinin verimliliği, rüzgâr hızlarının ne kadar değişken olduğuna bağlıdır. Düşük standart sapmaya sahip

rüzgâr hızları, enerji üretiminin daha stabil olduğunu gösterirken, yüksek standart sapma, enerji üretiminde büyük dalgalanmalar anlamına gelir. Örneğin, belirli bir bölgede rüzgâr hızlarının 7 m/s civarında yoğunlaşması, enerji üretiminin öngörülebilir olduğu anlamına gelir. Ancak, hızların 3 ila 12 m/s arasında değişmesi, türbin performansında büyük dalgalanmalar yaratabilir ve türbin tasarımında daha esnek çözümler gerektirir [31].

Rüzgâr enerji sistemlerinde varyans ve standart sapma analizleri, türbinlerin optimal yerleşimi ve güç üretim tahminlerinin doğruluğu açısından kullanılır. Yüksek varyansa sahip bölgeler, enerji üretiminde düzensizlikler yaratabilirken, düşük varyanslı bölgeler daha istikrarlı üretim sağlar. Özellikle rüzgâr türbini yatırım analizlerinde bu veriler, kapasite faktörünü ve ekonomik sürdürülebilirliği değerlendirmek için kritik bir rol oynar. Bu nedenle, enerji mühendisleri ve yatırımcılar, standart sapma ve varyans analizlerini kullanarak rüzgâr türbinlerinin en verimli şekilde konumlandırılmasını ve şebekeye entegrasyonunun daha stabil hale getirilmesini sağlar [52].

2.3.4.3. Normal dağılım ve veri analizi

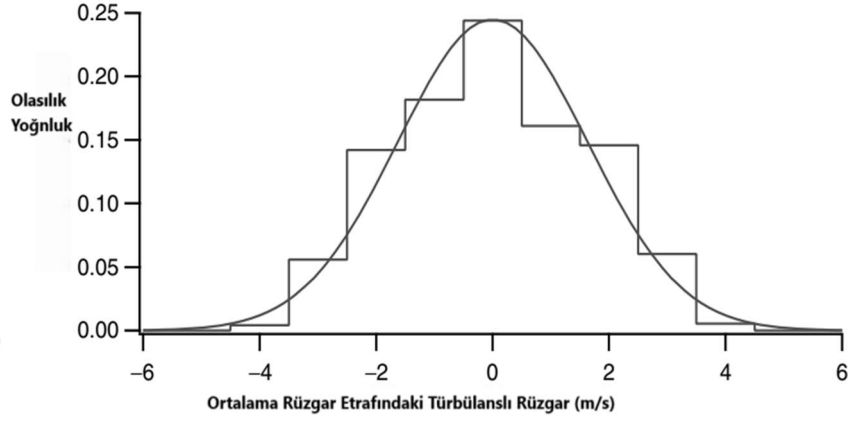
Rüzgâr hızı analizlerinde normal dağılım, uzun vadeli ölçümlerin istatistiksel olarak modellenmesinde önemli bir rol oynar. Normal dağılım fonksiyonu, rüzgâr hızlarının ortalama etrafında nasıl dağıldığını belirlemek için kullanılır ve şu şekilde tanımlanır:

$$f(u) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(u-u^-)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.23)$$

Burada 2.23 'deki denklemde $f(u)$, Rüzgâr hızlarının olasılık yoğunluk fonksiyonu, u^- , Ortalama rüzgâr hızı, σ , Standart sapma, u , Rüzgâr hızı değişkenidir.

Bu dağılım, rüzgâr hızlarının uzun dönemli ölçümlerle belirli bir ortalama etrafında nasıl toplandığını ve hız değişimlerinin istatistiksel olarak nasıl dağıldığını gösterir. Rüzgâr hızlarının normal dağılıma uygunluğu, enerji üretim tahminlerinde belirsizliklerin azaltılmasına ve türbin tasarımında daha güvenilir veriler elde

edilmesine olanak tanır [56]. Şekil 2.15 ‘de türbülanslı rüzgâr hızlarının ortalama etrafında normal dağılım gösterdiğini ve bu dağılımın genellikle ortalama hıza yakın yoğunlaştığını ifade eder.



Şekil 2.15. Rüzgâr verilerinin olasılık yoğunluk fonksiyonu ve histogramı [57]

Normal dağılımın önemli bir uygulaması, rüzgâr enerji santrallerinin kurulum bölgelerinde rüzgâr değişkenliğinin analiz edilmesidir. Eğer rüzgâr hızı verileri normal dağılım gösteriyorsa, belirli bir hız aralığında rüzgârın oluşma olasılığı hesaplanabilir. Örneğin, ortalama 8 m/s ve standart sapması 2 m/s olan bir bölgede, rüzgâr hızının 6 ila 10 m/s arasında olma olasılığı yaklaşık %68’dir. Bu tür istatistiksel hesaplamalar, rüzgâr türbini tasarımı, enerji üretimi optimizasyonu ve şebeke entegrasyonu için kritik öneme sahiptir. Ayrıca, olası aşırı rüzgâr olaylarının tahmin edilmesi, türbin kanatlarının ve diğer bileşenlerin dayanıklılığının belirlenmesine yardımcı olur [31].

BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Rüzgâr ölçümü

Rüzgâr ölçümü, rüzgâr enerjisi sistemlerinin tasarımında ve performans analizinde kritik bir öneme sahiptir. Rüzgâr hızının doğru ölçülmesi, türbinlerin verimli çalışmasını sağlamak ve rüzgâr potansiyeli analizlerini gerçekleştirmek için gereklidir. Rüzgâr ölçümü için en yaygın kullanılan cihazlar anemometreler olup, bu cihazlar farklı prensiplere dayalı olarak çalışmaktadır. Anemometreler, rotasyonel (mekanik), basınç temelli, termal ve ultrasonik ölçüm tekniklerine dayalı olarak sınıflandırılabilir [33].

3.1.1.1. Cup anemometre

Kap anemometresi, rüzgâr hızını ölçmek için en yaygın kullanılan mekanik anemometre türüdür. Üç veya dört yarım küresel kap, merkezi bir dikey eksene bağlıdır ve rüzgârın etkisiyle döner. Kapların dönüş hızı, rüzgâr hızına orantılıdır ve genellikle manyetik veya optik sensörler yardımıyla rüzgâr hızı hesaplanır [52].



Şekil 3.1. Cup Tipi Anemometre [59]

Şekil 3.1 'de Cup tipi bir anemometre gösterilmiştir. Kap anemometreleri, yüksek hassasiyete sahiptir ve düşük bakım gerektirir. Ancak, rüzgâr hızındaki ani değişimlere (türbülanslara) karşı tepkisi gecikmeli olabilir ve hareketli parçalar zamanla aşınabilir. Bu nedenle, düzenli kalibrasyon gereklidir [31].

3.1.1.2. Pervaneli anemometre

Pervane anemometresi, rüzgârın doğrudan bir pervaneyi döndürmesi prensibiyle çalışır. Pervanenin dönüş hızı, rüzgârın hızına bağlıdır ve manyetik veya optik sensörler yardımıyla rüzgâr hızı hesaplanır. Bu anemometreler kap anemometrelerine kıyasla daha hızlı tepki verir ve özellikle yüksek türbülanslı bölgelerde daha doğru ölçümler sağlar [33].



Şekil 3.2. Pervaneli tip anemometre [61]

Şekil 3.2 'de Pervaneli bir anemometre gösterilmiştir. Pervane anemometreleri, genellikle düşük ve orta rüzgâr hızlarında en iyi performansı gösterir. Ancak, yüksek hızlarda doğruluğu azalabilir ve türbinlerin rüzgâr yönüne göre hizalanması gereklidir [38].

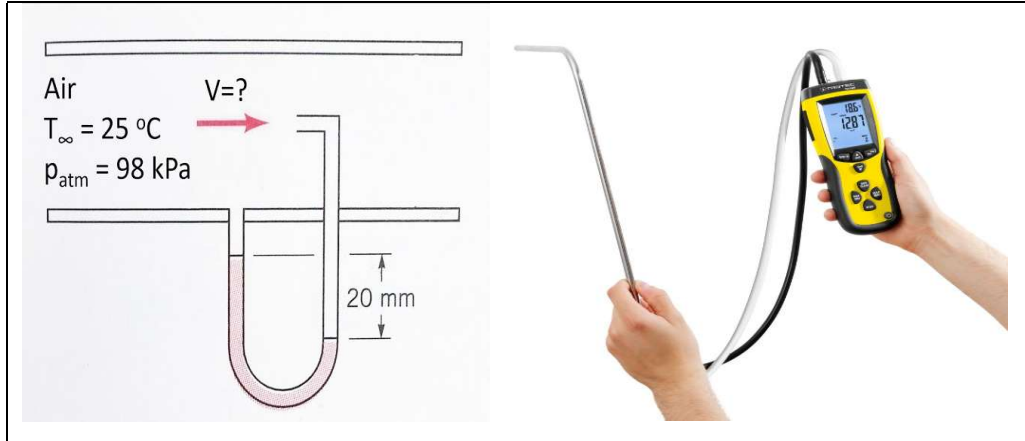
3.1.1.3. Basınç tüpü anemometresi

Bu tip anemometre, rüzgârın tüpler arasındaki basınç farkını kullanarak hızını hesaplar. Paralel ve dik açılarda yerleştirilmiş iki tüp arasındaki basınç farkı, rüzgâr hızının hesaplanmasına olanak tanır. Bu prensip Bernoulli denklemlerine dayanır ve şu şekilde ifade edilir [33]:

$$V = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}} \quad (3.1)$$

Burada 4.1 'deki denklemde V , Rüzgâr hızı, P_1 , P_2 , Tüpler arasındaki basınç farkı, ρ , Hava yoğunluğu 'dur.

Bu anemometrelerin en büyük avantajı, hareketli parça içermemeleri nedeniyle daha az bakım gerektirmeleridir. Ancak, toz, nem ve kir gibi dış etkenler ölçüm hassasiyetini etkileyebilir [52]. Şekil 3.3 'te basınç tüpü anemometrenin çalışma prensibi gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Basınç tüpü anemometresinin prensibi

3.1.1.4. Termal anemometre

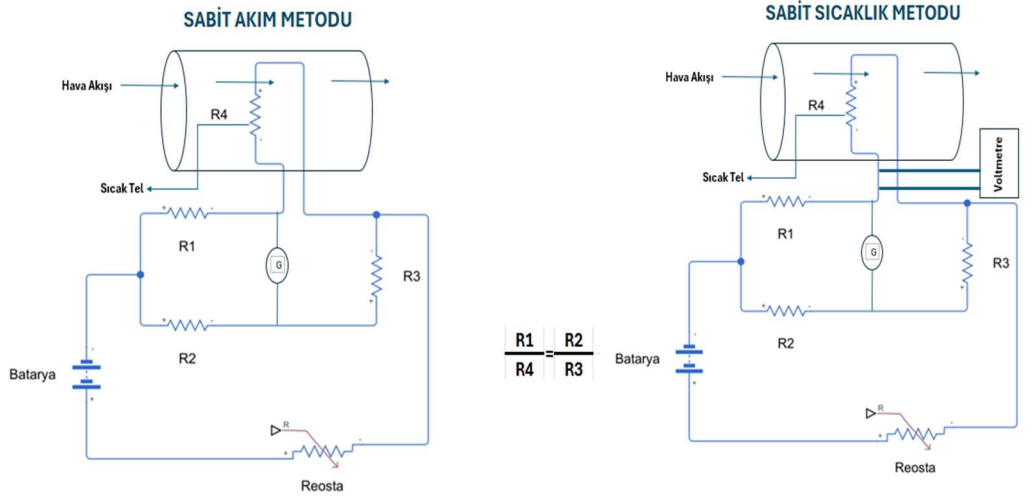
Termal anemometreler, rüzgârın sıcak bir telin üzerinden geçerken soğutucu etkisini kullanarak hızını belirler. Telin soğuma miktarı, rüzgâr hızına bağlıdır ve elektriksel direnç değişimi üzerinden rüzgâr hızı hesaplanır [31].

Bu anemometre türü, düşük rüzgâr hızlarını yüksek hassasiyetle ölçebilir ancak sıcaklık değişimlerinden etkilenebilir. Ayrıca, sıcak teli sürekli ısıtmak için enerji gerektirdiğinden, güç tüketimi diğer anemometrelere göre daha fazladır [38].



Şekil 3.4 Termal anemometre görünümü

Anemometre Şekil 3.4’te gösterilmiştir. Ayrıca anemometrenin temel çalışma prensibi Şekil 3.5 ‘te açıklanmıştır;



Şekil 3.5. Termal anemometre çalışma prensibi

Bu cihazın çalışmasını sağlayan iki temel yöntem bulunmaktadır: Sabit Akım Yöntemi ve Sabit Sıcaklık Yöntemi.

Sabit akım yönteminde, sıcak tel belirli bir sabit akımla beslenir ve hava akışı arttıkça tel soğuyarak direnci değiştirir. Bu direnç değişimi, Wheatstone köprüsü adı verilen bir devre kullanılarak ölçülür. Direnç dengesi matematiksel olarak;

$$\frac{R1}{R4} = \frac{R2}{R3} \quad (3.2)$$

denklemleriyle ifade edilir. Sabit akım yöntemi nispeten daha basit bir yapıya sahip olmakla birlikte, hassasiyet açısından sınırlı bir ölçüm doğruluğuna sahiptir.

Sabit sıcaklık yönteminde ise telin sıcaklığı sabit tutulur ve telin soğumasına bağlı olarak akım artırılır. Bu yöntemde telin sıcaklığı sabit tutulduğundan, akım değişimi doğrudan akış hızına karşılık gelir. Akış hızını belirlemek için akım değişimi voltmetre aracılığıyla ölçülür. Bu yöntem, daha hızlı tepki süresi ve yüksek hassasiyet sağlaması nedeniyle genellikle mühendislik ve bilimsel araştırmalarda tercih edilir.

İki yöntem karşılaştırıldığında, sabit sıcaklık yönteminin daha hassas ölçümler sunduğu ve daha hızlı yanıt verdiği görülmektedir. Sabit akım yöntemi daha basit bir devre tasarımına sahipken, sabit sıcaklık yöntemi özellikle aerodinamik testler, HVAC sistemleri, gaz akışı ölçümleri ve biyomedikal uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

3.1.1.5. Ultrasonik anemometre

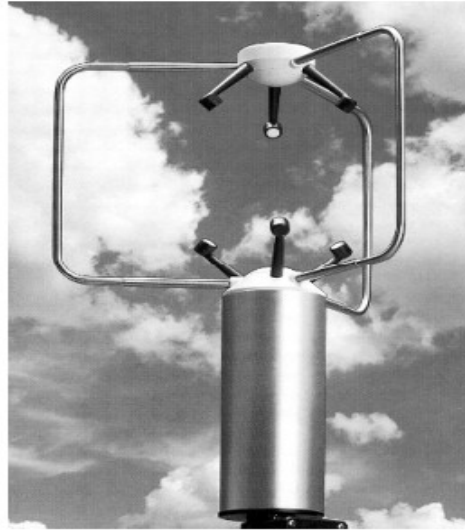
Ultrasonik anemometreler, rüzgâr hızını ve yönünü belirlemek için ses dalgalarını kullanır. Hareketli parça içermediği için bakım gerektirmez ve yüksek hassasiyetle ölçüm yapılabilir.

Bu anemometreler, ses dalgalarının rüzgâr tarafından nasıl etkilendiğini analiz ederek rüzgâr hızını hesaplar. Ölçüm prensibi şu şekilde ifade edilir:

$$V = \frac{d}{2} \left(\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} \right) \quad (3.3)$$

Burada 3.3 'teki denklemde V, Rüzgâr hızı, d, Sensörler arasındaki mesafe, t1, t2, Ses dalgalarının farklı yönlerdeki ölçüm süreleridir.

Ultrasonik anemometrelerin en büyük avantajı, yüksek hassasiyetle anlık ölçümler yapabilmesi ve hareketli parçalar içermemesi nedeniyle uzun ömürlü olmasıdır. Ancak, yüksek maliyetli olmaları ve buzlanma gibi çevresel faktörlerden etkilenmeleri dezavantajları arasındadır [38]. Anemometre Şekil 3.6 'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6 Ultrasonik anemometre görünümü [58]

3.2. Yöntem

3.2.1. Rüzgâr hızı analizi

Rüzgâr hızı analizi, rüzgâr enerjisi üretim potansiyelini değerlendirmek için kritik bir süreçtir. Rüzgâr hızının belirli zaman aralıklarında ölçülmesi ve analiz edilmesi, rüzgâr enerjisi santrallerinin verimliliğini artırmada önemli bir rol oynar. Rüzgâr ölçüm istasyonlarında kullanılan anemometreler ve diğer meteorolojik sensörler aracılığıyla elde edilen veriler, rüzgâr rejiminin belirlenmesine yardımcı olur. Ölçülen veriler, enerji üretim tahminleri, türbin yerleşim planlaması ve yatırım kararları açısından

büyük önem taşır. Bu analizler, rüzgâr hızı dağılım fonksiyonlarının belirlenmesini ve uzun vadeli rüzgâr özelliklerinin modellenmesini içerir [31].

Rüzgâr hızının analizinde kullanılan üç temel görselleştirme yöntemi "Energy Rose", "Velocity Rose" ve "Frequency Rose" grafikleridir. Energy Rose (Enerji Gülü), belirli yönlerden esen rüzgârın enerji potansiyelini gösteren bir grafik türüdür. Bu analiz, farklı yönlerden esen rüzgârın enerji taşıma kapasitesini belirlemek için kullanılır. Velocity Rose (Hız Gülü), rüzgâr hızlarının belirli yönler göre nasıl dağıldığını gösterir ve rüzgâr türbini tasarımı için önemlidir. Frequency Rose (Frekans Gülü) ise belirli yönlerden esen rüzgârın sıklığını analiz eder ve rüzgârın yön dağılımını belirlemek için kullanılır [32].

Rüzgâr ölçümleri genellikle anemometreler, LIDAR (Light Detection and Ranging) ve SODAR (Sonic Detection and Ranging) sistemleri kullanılarak gerçekleştirilir. Mast tabanlı anemometreler, rüzgâr hızını ve yönünü ölçmek için en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Ancak, bu yöntem yükseklik sınırlamaları nedeniyle bazı durumlarda yetersiz kalabilir. LIDAR ve SODAR sistemleri, lazer veya ses dalgaları kullanarak rüzgârın dikey profilini ölçmek için kullanılan uzaktan algılama teknolojileridir. Bu sistemler, yüksek doğrulukları ve geniş ölçüm aralıkları nedeniyle modern rüzgâr ölçüm kampanyalarında sıklıkla tercih edilmektedir. Ayrıca, rüzgâr türbinleri için türbülans analizi, rüzgârın zaman içindeki değişkenliğini inceleyerek türbin bileşenlerinin ömrünü ve performansını optimize etmek için uygulanır [52].

Rüzgâr hızı analizi ayrıca Weibull ve Rayleigh dağılım fonksiyonları kullanılarak rüzgâr hızı verilerinin istatistiksel olarak modellenmesini içerir. Weibull dağılımı, rüzgâr hızının olasılık yoğunluk fonksiyonunu tanımlamak için yaygın olarak kullanılır ve iki parametrelili bir modeldir: Şekil (k) ve ölçek (c) parametreleri. Bu parametreler, belirli bir bölgede rüzgâr enerjisi potansiyelinin doğru tahmini için kritik önem taşır. Rayleigh dağılımı ise, çoğu zaman Weibull 'un özel bir durumu olarak kabul edilir ve tek bir parametre ile tanımlanır. Bu dağılımlar, rüzgâr enerjisi santrallerinin verimlilik tahminlerinde ve türbin performansının optimize edilmesinde yaygın olarak kullanılır [56].

3.2.2. Ortalama rüzgâr hızı

Rüzgâr spektrumu analizlerinde önemli bir parametre olan ortalama rüzgâr hızı (V_m), rüzgâr enerjisi potansiyelinin doğru şekilde hesaplanabilmesi için kritik bir değişken olarak kabul edilir. Basitçe ortalama rüzgâr hızı, belirli bir zaman dilimi boyunca ölçülen rüzgâr hızlarının aritmetik ortalaması olarak ifade edilir ve aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$V_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i \quad (4.4)$$

Burada V_i , belirli zaman aralıklarında ölçülen rüzgâr hızlarını, n , toplam ölçüm sayısını temsil etmektedir. Ancak, rüzgâr enerjisi üretiminde bu doğrudan ortalama kullanıldığında yanlışlar ortaya çıkabilir. Bunun nedeni, rüzgâr enerjisinin hızın küpü ile orantılı olmasıdır. Eğer her bir rüzgâr hızına karşılık gelen gücün ortalaması hesaplanırsa, klasik aritmetik ortalamanın eksik hesaplama yaptığı görülür.

Aşağıda, belirli bir saat boyunca 10 dakikalık aralıklarla ölçülen rüzgâr hızları ve bunlara karşılık gelen güç yoğunlukları gösterilmektedir:

Tablo 3.1. 10 dakikalık aralıklarla ölçülmüş rüzgâr hızı tablosu

No	V (m/s)	V^3	P (W/m ²)
1	3,10	29,79	18,4704
2	3,60	46,66	28,9267
3	6,60	287,50	178,248
4	5,80	195,11	120,969
5	7,50	421,88	261,563
6	8,80	681,47	422,513

Tablo 3.1 'e göre, geleneksel ortalama rüzgâr hızı 5,9 m/s olarak hesaplanmaktadır. Ve geleneksel ortalama rüzgâr hız ile elde edilen güç yoğunluğu 127,3 W/m² olarak elde edilir. Ancak, rüzgâr hızının küpü ile hesaplanan enerji ortalaması

kullanıldığında, ortalama rüzgâr hızı 6,52 m/s ve ortalama güç yoğunluğu 171,8 W/m² olarak elde edilmiştir. Bu, geleneksel ortalama hesaplamasının rüzgâr enerjisinin yaklaşık %25' ini hesaba katmadığını göstermektedir.

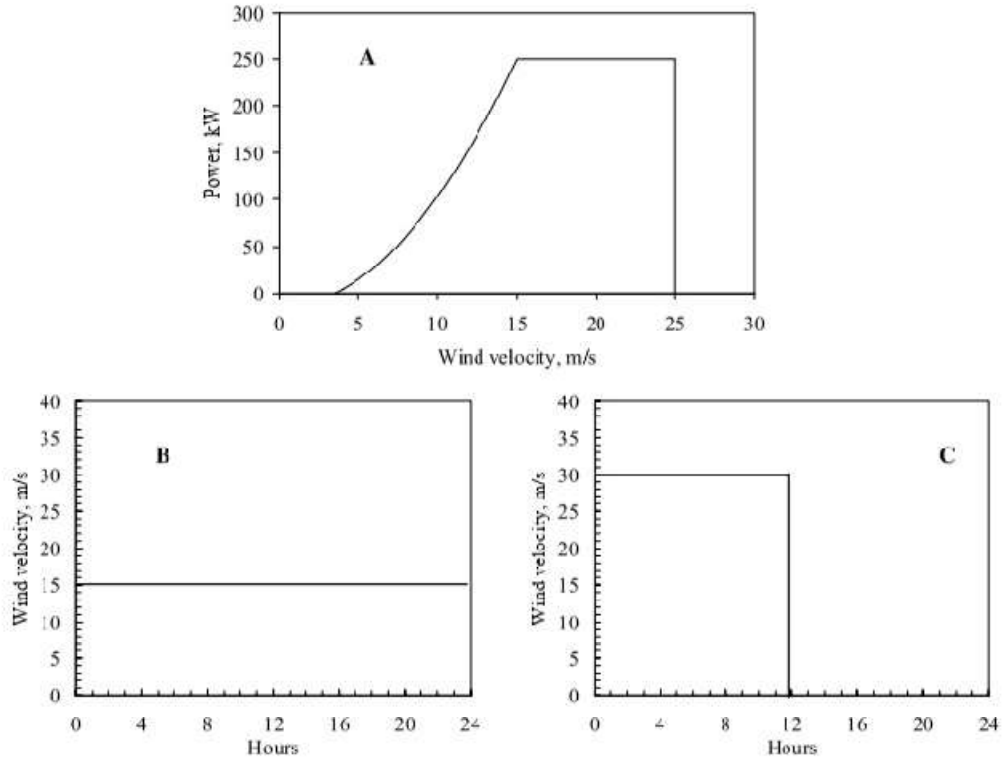
Bu nedenle, rüzgâr enerjisi hesaplamalarında enerji ağırlıklı ortalama rüzgâr hızı dikkate alınmalıdır. Ağırlıklı ortalama hız, rüzgâr hızının küpü ile ağırlıklandırılarak hesaplanır ve şu formül ile gösterilir:

$$V_{\text{enerji}} = \left(\frac{\sum_{i=1}^N V_i^3}{N} \right)^{1/3} \quad (3.5)$$

Bu yöntemin kullanımı, rüzgâr türbinlerinin gerçek enerji üretimini daha doğru bir şekilde tahmin etmek için gereklidir. Aynı zamanda rüzgâr santrali tasarımında ve yatırım kararlarında daha doğru değerlendirmeler yapılmasını sağlar [30].

3.2.3. Rüzgâr hızının dağılımı

Rüzgârın ortalama gücü dışında, rüzgâr hızının dağılımı da rüzgâr enerjisinden faydalanmada önemli bir faktördür. Aynı ortalama rüzgâr hızına sahip iki farklı saha, rüzgâr hızının dağılımından kaynaklı olarak farklı enerji üretim verimliliklerine sahip olabilir. Örneğin, Şekil 3.7 'deki günlük rüzgâr modeli iki farklı arazi için incelendiğinde, bir sahada yani B ile gösterilen grafikte rüzgâr hızı gün boyunca 15 m/s iken, diğer sahada yani C ile gösterilen şekilde ilk 12 saatte 30 m/s, kalan 12 saatte ise 0 m/s olabilir. Her iki durumda da günlük ortalama rüzgâr hızı 15 m/s olarak hesaplanırken, türbin performansları tamamen farklı olacaktır. Bunun nedeni, türbinlerin 4 m/s rüzgâr hızında çalışmaya başlaması ve 25 m/s üzerinde durmasıdır. İlk sahada türbinler tam kapasitede 6000 kWh/gün enerji üretirken, ikinci sahada türbinler durduğu için enerji üretimi gerçekleşmez.



Şekil 3.7. İki farklı sahadaki rüzgâr dağılımının karşılaştırılması [60]

Şekil 3.7 ‘den de anlaşılacağı üzere, rüzgâr hızının sadece ortalama değerinin değil, hız dağılımının da enerji üretimi analizinde kritik bir faktör olduğunu göstermektedir. Rüzgâr hızlarının dağılımını belirlemek için standart sapma (σ) kullanılır. Standart sapma, rüzgâr hızlarının ortalamadan ne kadar saptığını gösterir ve şu formül ile hesaplanır:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_i - V_{ort})^2} \quad (3.6)$$

Burada, V_i , ölçülen rüzgâr hızları, V_{ort} , ortalama rüzgâr hızıdır. Daha yüksek standart sapma, rüzgâr hızlarının büyük değişkenlik gösterdiğini, düşük standart sapma ise rüzgâr hızlarının daha sabit olduğunu gösterir. Bu analiz, türbin yerleşimi ve enerji üretim tahminlerinde kritik bir rol oynar [33].

Tablo 3.2. Aylık rüzgâr hızı frekans dağılımı

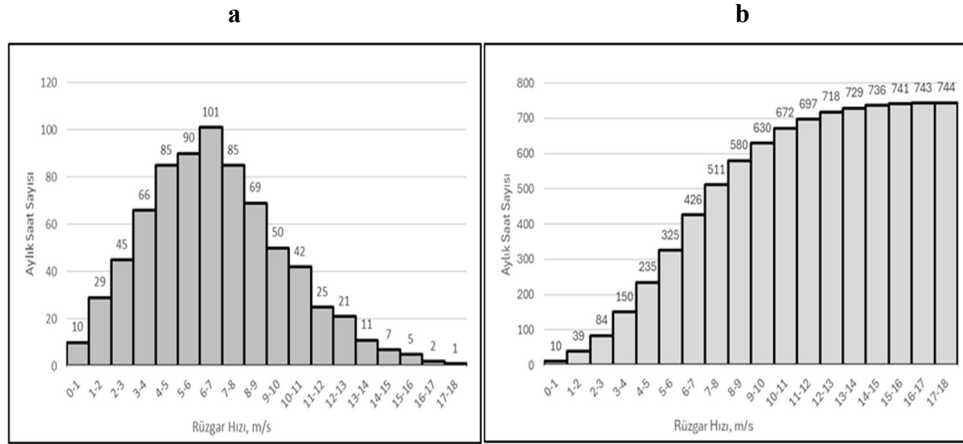
Hız (m/s)	Aylık Saat Sayısı	Toplam Saat Sayısı
0-1	10	10
1-2	29	39
2-3	45	84
3-4	66	150
4-5	85	235
5-6	90	325
6-7	101	426
7-8	85	511
8-9	69	580
9-10	50	630
10-11	42	672
11-12	25	697
12-13	21	718
13-14	11	729
14-15	7	736
15-16	5	741
16-17	2	743
17-18	1	744

Tablo 3.2, belirli zaman aralıklarında ölçülen rüzgâr hızlarının aylık frekans dağılımını göstermektedir. Belirli bir hız aralığında rüzgârın kaç saat estiğini özetleyerek, rüzgâr enerjisi potansiyelinin istatistiksel analizinde kritik bir veri seti sağlar. Aynı zamanda, rüzgâr türbini kurulum bölgelerinin uygunluğunu değerlendirmek için önemli bir referans noktasıdır. Frekans dağılımını oluşturmak için, rüzgâr hızı belirli eşit aralıklara bölünür. (Örneğin 0-1 m/s, 1-2 m/s, 2-3 m/s vb.) Ardından rüzgâr hızının bu aralıklara kaç kez düştüğü hesaplanır. Aylık rüzgâr hızı frekans dağılımına bir örnek Tablo 3.2’de verilmiştir. Eğer rüzgâr hızı frekans dağılımı şeklinde sunulursa, ortalama rüzgâr hızı (V_m) ve standart sapma (σ) aşağıdaki formüllerle hesaplanır:

$$V_{\text{weighted}} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n f_i V_i^3}{\sum_{i=1}^n f_i} \right)^{1/3} \quad (3.7)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_i - V_{\text{ort}})^2} \quad (3.8)$$

Burada f_i , frekans ve V , ilgili aralığın orta değeridir.



Şekil 3.8. a. Aylık rüzgâr hızı olasılık dağılımı b. Rüzgâr hızı için kümülatif dağılım

Tablo 3.2 'de sunulan rüzgâr verilerinin ortalama ve standart sapması sırasıyla 8,02 m/s ve 3,41 m/s'dir. Yukarıdaki verilere dayalı frekans histogramı Şekil 3.8 a. 'da gösterilmiştir. Genel olarak, ortalama rüzgâr hızı en sık görülen rüzgâr hızından daha yüksektir.

Kümülatif dağılım eğrisi, rüzgâr hızının ilgili rüzgâr sınıfı aralığının üst sınırının altında olduğu toplam süreyi göstererek oluşturulur. Yukarıdaki verilerin kümülatif dağılımı Şekil 3.8 b. 'de gösterilmektedir.

3.2.4. Yüksekliğin rüzgâr hızına etkisi

Hellmann Güç Kanunu, rüzgâr hızının yükseklikle nasıl değiştiğini tahmin etmek için kullanılan ampirik bir modeldir. Atmosferik kararlılık, yüzey pürüzlülüğü ve arazi tipi gibi faktörlere bağlı olarak rüzgâr hızının belirli bir yükseklikteki değişimi hesaplanabilir. Bu model, özellikle 10 metre gibi bir referans yükseklikte ölçülen rüzgâr hızının, türbin göbeği yüksekliği gibi farklı bir seviyeye taşınmasını sağlamak için kullanılır. Rüzgâr hızının yüksekliğe bağlı değişimi, Hellmann Güç Kanunu denklemi ile modellenir. Bu denklem, bir referans noktadaki rüzgâr hızına dayanarak belirli bir yükseklikteki rüzgâr hızını tahmin eder. Denklem şu şekildedir:

$$\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{z_1}{z_2}\right)^\alpha \quad (3.9)$$

Burada V_1 , bilinen yükseklikteki rüzgâr hızını, V_2 , tahmin edilmek istenen yükseklikteki rüzgâr hızını, z_1 , ve z_2 , sırasıyla bilinen ve tahmin edilen yükseklikleri ve α rüzgâr kayma katsayısını ifade eder. Bu katsayı, arazi türüne bağlı olarak değişiklik gösterir ve genellikle 0,14 ile 0,3 arasında değişir [56].

Hellmann katsayısı (α), yüzey pürüzlülüğüne bağlı olarak farklı arazi türleri için değişkenlik gösterir. Açık deniz gibi pürüzsüz yüzeylerde 0,10-0,12 arasında düşük değerler alırken, tarım arazileri ve çayırılık alanlarda 0,12-0,16 arasında değişir. Ağaçların seyrek olduğu kırsal bölgelerde bu katsayı 0,16-0,20 arasında iken, ormanlık alanlarda ve tepelerde 0,20-0,25 aralığında bulunur. Şehir merkezleri gibi yüksek binaların bulunduğu bölgelerde ise katsayı 0,30-0,40 seviyelerine kadar çıkabilir. Bu farklar, rüzgârın belirli bir yükseklikte nasıl değiştiğini anlamak açısından büyük önem taşır. Örneğin, deniz yüzeyinde rüzgâr daha homojen hareket ederken, şehir merkezlerinde binaların oluşturduğu engeller nedeniyle rüzgâr akışı daha düzensiz hale gelir. Bu nedenle, türbinlerin yerleştirileceği bölgenin yüzey özellikleri dikkate alınarak hesaplamalar yapılmalıdır [30]. Tablo 3.3 'te gösterilmiştir.

Tablo 3.3. Hellmann katsayısına göre arazi türleri

Arazi Türü	Hellmann Katsayısı (α)
Açık deniz (Deniz yüzeyi)	0,10- 0,12
Düz açık arazi (Çayır, tarla)	0,12- 0,16
Kırsal alan, az ağaçlı	0,16- 0,20
Ağaçlık alanlar, tepeler	0,20- 0,25
Ormanlık alan	0,25- 0,30
Şehir merkezi (Yüksek binalar)	0,30- 0,40

Örnek bir hesaplama yapmak gerekirse, 15 metre yükseklikte 6,5 m/s olarak ölçülen bir rüzgâr hızının, 75 metre yükseklikte ne olacağını Hellmann Güç Kanunu ile hesaplayabiliriz. Kırsal alan için $\alpha=0,18$ olarak alınırsa, hesaplamalar sonucunda 75

metre yükseklikte rüzgâr hızının yaklaşık 8,68 m/s olacağı tahmin edilir. Bu hesaplama, yüksekliğin rüzgâr hızına etkisini gösterir ve rüzgâr türbinleri için kritik öneme sahiptir. Türbin kuleleri genellikle 80-150 metre arasında tasarlanır, çünkü yükseklik arttıkça rüzgâr hızları daha tutarlı hale gelir ve enerji üretimi artar. Rüzgâr türbinlerinin ürettiği güç, rüzgâr hızının küpü ile orantılı olduğundan, rüzgâr hızındaki küçük bir artış bile türbinin enerji üretim kapasitesini büyük ölçüde artırır [33]. Meteoroloji istasyonları genellikle rüzgâr hızlarını 10 metre yükseklikte ölçtüğünden, Hellmann Güç Kanunu, bu verileri türbin yüksekliğine taşımak için önemli bir araçtır. Bu nedenle, rüzgâr türbinlerinin yerleştirileceği alanlarda rüzgâr ölçümleri yapılırken, arazi koşullarına göre Hellmann Güç Kanunu kullanılarak daha yüksek doğrulukta tahminler elde edilebilir.

3.2.5. Sıcaklığın hava yoğunluğuna etkisi

Hava yoğunluğu, sıcaklık değişimlerinden büyük ölçüde etkilenir ve bu etki, rüzgâr enerjisi üretiminde önemli bir rol oynar. Havanın yoğunluğu, basınç, sıcaklık ve bağıl nem gibi atmosferik faktörlere bağlı olarak değişir. Hava yoğunluğu ideal gaz yasası kullanılarak hesaplanabilir. Bu yasa, sıcaklık arttıkça hava yoğunluğunun azalacağını göstermektedir. Hava yoğunluğu şu denklemle ifade edilir:

$$\delta = \frac{P}{RT} \quad (3.10)$$

Burada ρ , hava yoğunluğu (kg/m^3), P , hava basıncı (Pa), R , spesifik gaz sabiti ($\text{J/kg}\cdot\text{K}$) ve T , hava sıcaklığı (Kelvin) olarak tanımlanır.

Sıcaklığın artması, gaz moleküllerinin kinetik enerjisini artırarak genleşmeye neden olur ve sonuç olarak hava yoğunluğu azalır. Bu durum, rüzgâr türbinlerinin performansını doğrudan etkiler çünkü türbinlerin ürettiği güç hava yoğunluğu ile doğru orantılıdır. Hava yoğunluğu hava basıncı, sıcaklık, nem, yükseklik ve yerçekimi ivmesi gibi faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Ayrıca, hava yoğunluğunu hesaplamak için kullanılan denklem şu şekilde verilmiştir:

$$\delta = \frac{P_r}{\mu T} e^{(-gh/RT)} \quad (3.11)$$

P_r , deniz seviyesindeki standart atmosferik basınç (101,325 Pascal veya Newton/m²)'tır. T , hava sıcaklığıdır ve Kelvin cinsinden ifade edilir (Kelvin = 273,15 + Santigrat derece). μ , spesifik gaz sabitidir ve hava için $\mu=287$ Ws/(kg·Kelvin) olarak alınır. g , yerçekimi ivmesidir (9,8 m/s²). h , deniz seviyesine göre yüksekliktir (m). δ , hava yoğunluğudur ve kg/m³ cinsinden ifade edilir.

Bu değerler denklem 3.11'e yerine konulduğunda hava yoğunluğu (δ) şu şekilde elde edilir:

$$\delta = \frac{353}{T} e^{\left[\frac{-h}{29.3(T+273)}\right]} \quad (3.12)$$

Hava yoğunluğu (δ) kg/m³ cinsinden ifade edilir. Hava sıcaklığı (T) Kelvin cinsinden belirtilir. Deniz seviyesine göre yükseklik (h) metre olarak alınır. Euler sabiti (e) yaklaşık 2,718 değerine sahiptir. 29,3 değeri ise gaz sabitlerinden türetilmiş bir katsayıdır [30].

3.3. Weibull Analizi

3.3.1. Weibull dağılımının tanıtımı ve temel kavramlar

Weibull dağılımında, rüzgâr hızının çeşitli varyasyonları iki fonksiyonla birlikte karakterize edilir; (1) Olasılık yoğunluk fonksiyonu ve (2) Kümülatif dağılım fonksiyonu. Olasılık yoğunluk fonksiyonu ($f(V)$) rüzgârın belirli bir zaman aralığında belirtilen V hızında olma olasılığını gösterir. Bu olasılık fonksiyonu aşağıdaki eşitlikte gösterilmiştir.

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-(v/c)^k}, \quad (k>0, v>0, c>1) \quad (3.13)$$

Bu eşitlikte, k, Weibull şekil faktörü ve c, ölçeklendirme faktörüdür.

Kümülatif dağılım fonksiyonu bize belirli bir zaman aralığında (veya o zaman aralığındaki olasılık) rüzgâr hızının V hızına eşit veya daha düşük olma olasılığını verir. Nitekim kümülatif dağılım F(V), olasılık yoğunluk fonksiyonunun denklem 3.14 'teki gibi integralidir.

$$F(V) = \int_0^a f(V)dV = 1 - e^{-(v/c)^k} \quad (3.14)$$

Bir rejimde yer alan ortalama rüzgâr hızı ise Weibull dağılımına göre ise aşağıda şu şekilde ifade edilmektedir;

$$V_m = \int_0^{\infty} Vf(V)dV \quad (3.15)$$

F(V) 'yi formülde yerine koyduğumuzda ise aşağıdaki eşitliği elde etmiş oluruz;

$$V_m = \int_0^{\infty} V \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} e^{-(v/c)^k} dV \quad (3.16)$$

Yine bu eşitlikten şunu yazabiliriz;

$$V_m = k \int_0^{\infty} \left(\frac{V}{c}\right)^k e^{-(v/c)^k} dV \quad (3.17)$$

Bu formülde x ve dV 'yi aşağıdaki gibi çekersek;

$$x = \left(\frac{V}{c}\right)^k, dV = \frac{c}{k} x^{\left(\frac{1}{k}-1\right)} dx \quad (3.18)$$

Burada dV 3.17 'de verilen eşitlikte yerine konulursa;

$$V_m = c \int_0^{\infty} e^{-x} x^{\frac{1}{k}} dx \quad (3.19)$$

Bu şekilde eşitlik standart bir gama fonksiyonu halini almış olup aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$\Gamma_n = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{n-1} dx \quad (3.20)$$

Buradan, 3.19 'daki eşitliğe göre ortalama rüzgâr hızı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir;

$$V_m = c \Gamma(1 + \frac{1}{k}) \quad (3.21)$$

Rüzgâr hızının standart sapması ise aşağıdaki Weibull dağılımında verilmiştir.

$$\sigma_V = (\mu'_2 - V_m^2)^{\frac{1}{2}} \quad (3.22)$$

Burada μ'_2 ile ifade edilen mevcut kitlenin ikinci ham hali olup aşağıdaki eşitlikte şöyle ifade edilmiştir.

$$\mu'_2 = \int_0^{\infty} V^2 f(V) dV \quad (3.23)$$

3.23'teki eşitlikte $f(V)$ 'yi bu formülde yerine koyarsak aşağıdaki eşitliği elde etmiş oluruz;

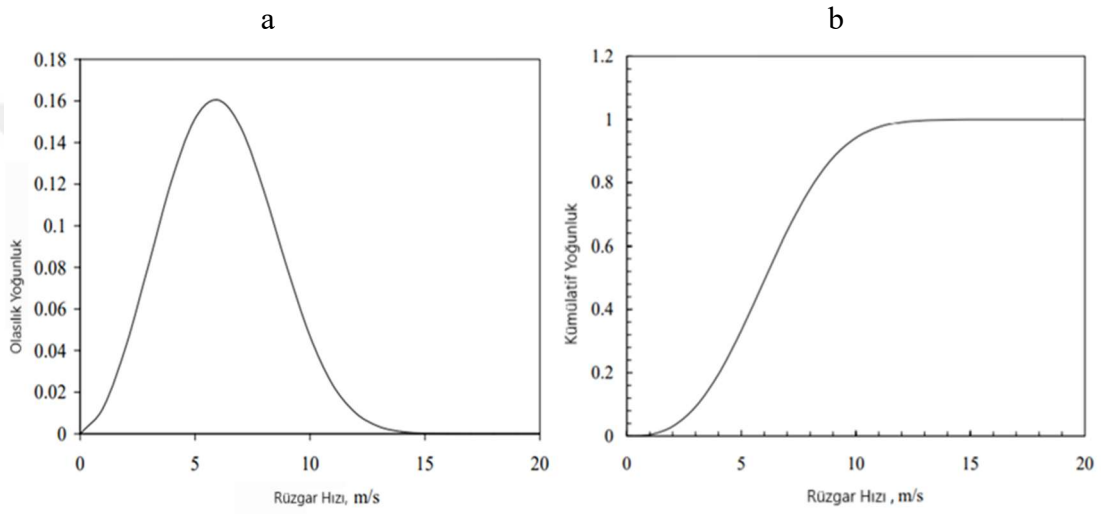
$$\mu'_2 = c^2 \int_0^{\infty} e^{-x} x^{\frac{2}{k}} dx \quad (3.24)$$

Ki bu da gamma integral formu şeklinde denklem 3.25 'teki gibi ifade edilebilir.

$$\mu'_2 = c^2 \Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) \quad (3.25)$$

Daha önce bulduğumuz μ_2 ve V_m 'i 3.22'deki eşitlikte yerine koyarsak aşağıdaki formülü elde etmiş oluruz.

$$\sigma_V = c \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.26)$$



Şekil 3.9. a. Weibull Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu b. Weibull Kümülatif Dağılım Fonksiyonu

Herhangi bir rüzgâr rejimi için olasılık yoğunluk fonksiyonu ve kümülatif dağılım fonksiyonu Şekil 3.9 a ve Şekil 3.9 b 'de verilmiştir. Burada verilen arazi için k ve c değerleri sırasıyla 2,8 ve 6,9 m/s'dir. Bu rejime göre olasılık yoğunluk eğrisinin tepe noktasında en sık rastlanan rüzgâr hızı 6 m/s'dir.

Kümülatif dağılım fonksiyonu ise hangi rüzgârın hangi zaman aralığında kararlı halde olduğunu belirlemek için kullanabiliriz. V_1 ve V_2 rüzgâr hızı olasılığı ise bu hızlara karşılık gelen hızların kümülatif dağılımının farkı şeklindedir. Yani,

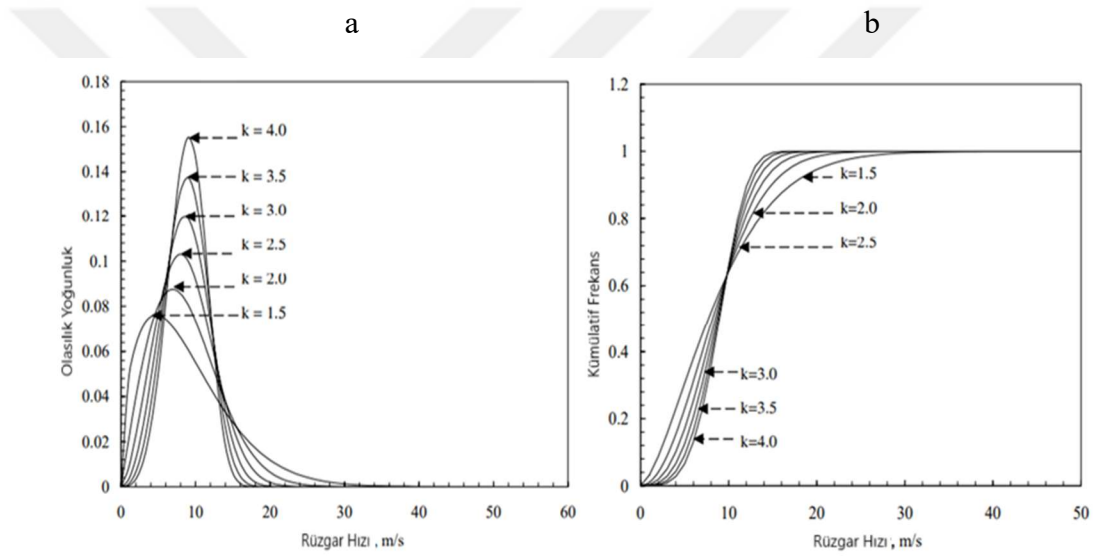
$$P(V_1 < V < V_2) = F(V_2) - F(V_1) \quad (3.27)$$

eşitliğinde olduğu gibi ifade edebiliriz. Bu eşitliği açarsak 3.28 'deki bir diğer eşitliği elde etmiş oluruz.

$$P(V_1 < V < V_2) = e^{-(\frac{V_1}{c})^k} - e^{-(\frac{V_2}{c})^k} \quad (3.28)$$

Rüzgâr gülü kurmak için araştırma yaptığımız yerdeki ekstrem rüzgâr hızlarını bilmemiz gerekebilir, buna göre sistem tasarımını bu olası ekstrem yükler için yapabiliriz. Aşırı rüzgâr hızı olasılığı V_X hesaplamak için ise aşağıdaki eşitlik kullanılır.

$$P(V > V_X) = 1 - \left(1 - e^{-(\frac{V_X}{c})^k}\right) = e^{-(\frac{V_X}{c})^k} \quad (3.29)$$



Şekil 3.10. a. Farklı k şekil parametrelerine göre Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu b. Farklı k şekil parametrelerine göre Weibull kümülatif dağılım fonksiyonu

Weibull dağılımı altında, rüzgârın homojen formunu belirleyen majör faktör k şekil faktörüdür. Şekil 3.10 a. ve 3.10 b.'de rüzgârdaki olasılık yoğunluk fonksiyonu ve kümülatif dağılım fonksiyonu üzerinde k etkisi gösterilmiştir. Burada ölçeklendirme faktörü 9,8 m/s olarak alınmıştır. Arazide rüzgârın homojen yapısı k ile doğru orantılı artmıştır. Örneğin, k=1,5 iken rüzgâr hızı %95 oranında 0-20 m/s arasındadır. Oysa, k=4 olduğunda rüzgâr hızı daha düşük bir aralıkta 0-13 m/s arasında %95 oranında dağılmaktadır. İlk durumda, en sık rastlanılan rüzgâr hızı 5 m/s olup, tüm zaman aralığında %7,6 oranında gerçekleşmesi beklenmektedir. İkinci durumda 9 m/s en sık rastlanan rüzgâr hızı olup gerçekleşme olasılığı %15,5'tir [33].

Weibull dağılımına göre bir rüzgâr rejiminin analizi için k ve c Weibull parametrelerini öngörmeliyiz. k ve c parametrelerini belirlemek için en sık kullanılan metotlar, Grafik metodu, Standart sapma metodu, Moment metodu, Maksimum olasılık (olabilirlik) metodu, Enerji Pattern faktörü metodudur.

3.3.2. K ve C parametrelerinin hesaplanması

Weibull analizinde kullanılan parametre tahmin yöntemleri; Maximum Likelihood (MLE), En Küçük Kareler (Least Squares), Grafik Yöntemi, Moment Yöntemi, Satman Yöntemi, Standart Yöntem (OLS), Bayesci Yöntem, Regression Rank Order şeklinde tanımlanmaktadır. Bu yöntemler alt başlıklar halinde açıklanmıştır.

3.3.2.1. Standart sapma metodu ile hesaplama

Weibull dağılımında standart sapma yöntemi, rüzgâr hızlarının varyansını kullanarak şekil parametresi k ve ölçek parametresi c değerlerini tahmin etmek için kullanılır. Yöntemin temel dayanağı, Weibull dağılımının ortalama rüzgâr hızı V_m ve standart sapması σ_v arasındaki ilişkinin gamma fonksiyonları ile tanımlanabilmesidir. Şekil parametresi için kullanılan temel denklem,

$$\left(\frac{\sigma_v}{V_m}\right)^2 = \frac{\Gamma(1 + \frac{2}{k})}{\Gamma^2(1 + \frac{1}{k})} - 1 \quad (3.30)$$

şeklinde ifade edilir. Bu denklem, Weibull dağılımının istatistiksel özelliklerine dayanarak türetilmiştir. Gamma fonksiyonu, belirli bir k değeri için özel değerler kullanılarak hesaplanabilir. Gama fonksiyonu şu şekilde hesaplanır;

$$\Gamma(n) = (n - 1)! \quad (3.31)$$

Bu gamma değerleri denklemde yerine konularak k değeri iteratif bir yöntemle çözülür. Alternatif olarak, nümerik yaklaşımlar ile yaklaşık bir formül türetilmiştir;

$$k = \left(\frac{\sigma_v}{V_m}\right)^{-1.086} \quad (3.32)$$

Bu yaklaşık formül, özellikle rüzgâr enerjisi analizlerinde hızlı ve güvenilir sonuçlar elde etmek amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır.

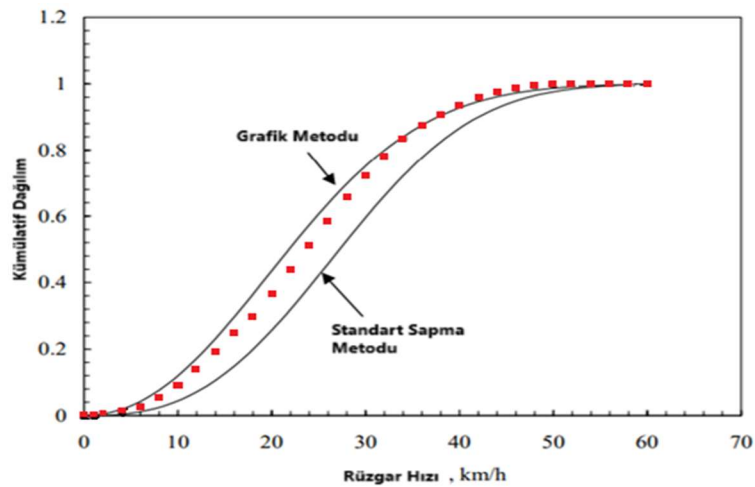
Ölçek parametresi c ise şekil parametresi hesaplandıktan sonra ortalama rüzgâr hızı V_m ile gamma fonksiyonları arasındaki ilişkiye bağlı olarak şu şekilde belirlenir;

$$c = \frac{V_m}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (3.33)$$

Bu formül, Weibull dağılımındaki ölçek parametresinin doğrudan ortalama rüzgâr hızı ile şekil parametresi arasındaki bağlantısını gösterir. Daha kesin bir tahmin yapmak için alternatif olarak;

$$c = \frac{V_m k^{2.6674}}{0.184 + 0.816 k^{2.73855}} \quad (3.34)$$

şeklinde bir regresyon modeli de kullanılabilir. Standart sapma yöntemi, Weibull dağılımını modellemek için hesaplaması nispeten daha basit olan bir yöntemdir, ancak nümerik çözüm gerektirmesi nedeniyle iteratif yaklaşımlar gerektirir. Bu nedenle, büyük veri setlerinde daha kesin yöntemler ile desteklenmesi önerilir [56].



Şekil 3.11. Farklı Metotlar ile Oluşturulmuş Kümülatif Dağılım

Şekil 3.11 'de, Grafik ve standart sapma yöntemleri kullanılarak tahmin edilen k ve c parametreleri arasında belirli farklılıklar gözlemlenebilir. Bu farklılıklar, her yöntemin temel varsayımlarına ve hesaplama süreçlerine bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Sahada gerçekleştirilen ölçümlerle karşılaştırıldığında, kümülatif dağılımlar her iki yöntem kullanılarak elde edilmekte ve şekil 3.11 'da sunulan grafik aracılığıyla analiz edilmektedir. Grafik yöntemi ile elde edilen sonuçların, saha ölçümleriyle daha yüksek doğruluk gösterdiği belirlenmiştir. Bununla birlikte, standart sapma yöntemi de rüzgâr hızının dağılımını belirleme açısından kabul edilebilir seviyede tahmini hesaplamalar sağlamaktadır. Ancak, kesinlik gerektiren durumlarda grafik yöntemi ile desteklenmesi önerilmektedir.

3.3.2.2. Moment metodu ile hesaplama

Weibull dağılımının şekil parametresi (k) ve ölçek parametresi (c), farklı yöntemler kullanılarak tahmin edilebilir. Bunlardan biri olan moment yöntemi, rüzgâr hızının istatistiksel momentlerine dayalı olarak parametre tahmini yapar. Bu yöntem, özellikle ilk moment (M_1) ve ikinci moment (M_2) hesaplanarak uygulanır. Moment yöntemi, ortalama ve varyans değerlerinden yola çıkarak parametrik tahminler yapması nedeniyle, rüzgâr hızlarının dağılımını modellemede sıkça tercih edilir.

$$M_n = c^n \Gamma\left(1 + \frac{n}{k}\right) \quad (3.35)$$

Burada $\Gamma(x)$ gamma fonksiyonunu ifade eder. İlk moment M_1 , ortalama rüzgâr hızına karşılık gelirken, ikinci moment M_2 , rüzgâr hızlarının karelerinin ortalamasıyla ilişkilidir. Moment yöntemi kullanılarak ölçek parametresi c, şu şekilde ifade edilir:

$$c = \frac{M_1}{\Gamma(1 + 1/k)} \quad (3.36)$$

Ayrıca, şekil parametresi (k) için şu ifade türetilmiştir:

$$\left(\frac{M_2}{M_1^2}\right) = \frac{\Gamma(1 + 2/k)}{\Gamma^2(1 + 1/k)} \quad (3.37)$$

Bu bağıntı, k parametresinin tahmin edilmesini sağlayan iteratif bir denklemdir. Gamma fonksiyonunun nümerik yaklaşımları kullanılarak, k değeri belirli bir hata payıyla hesaplanabilir. Alternatif olarak, yaklaşık bir tahmin için aşağıdaki ifade kullanılabilir;

$$k \approx \left(\frac{M_2}{M_1^2} - 1\right)^{-1.086} \quad (3.38)$$

Bu yöntem, büyük veri setlerinde istatistiksel kesinliği artırmak için kullanışlıdır. Ancak, nümerik çözüm gerektirdiğinden dolayı doğrudan analitik çözümler yerine iteratif çözümler gerektirir [56].

3.3.2.3. Grafik metodu ile hesaplama

Grafik metodu, Weibull dağılımının şekil (k) ve ölçek (c) parametrelerini tahmin etmek için kullanılan bir yaklaşımdır. Bu yöntem, kümülatif dağılım fonksiyonunun logaritmik dönüşümünü kullanarak veriyi doğrusal bir forma getirmeyi ve ardından regresyon analizi ile parametreleri belirlemeyi esas alır. Weibull kümülatif dağılım fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$1 - F(v) = e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (3.39)$$

Bu denklemin her iki tarafının doğal logaritması alınarak,

$$\ln(1 - F(v)) = -\left(\frac{v}{c}\right)^k \quad (3.40)$$

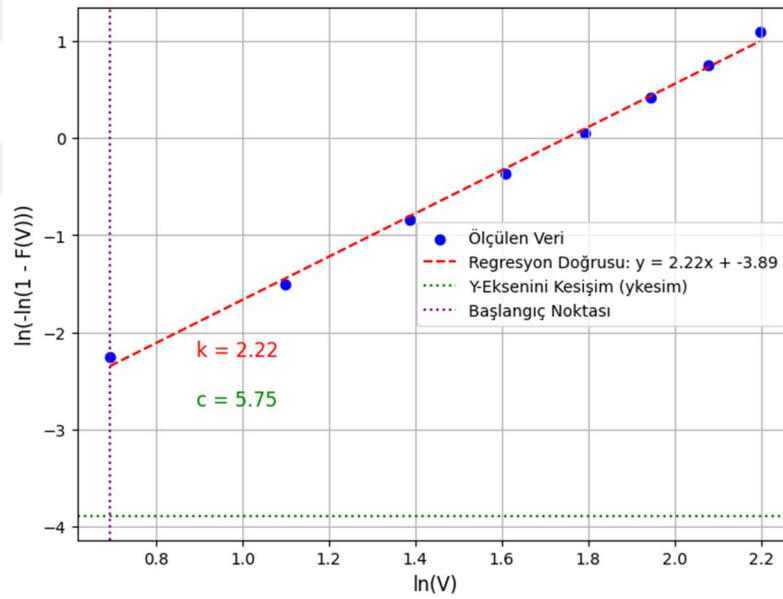
elde edilir. Bu fonksiyonun tekrar logaritmik dönüşümüne tabi tutulması ile,

$$\ln(-\ln(1 - F(V))) = k \ln(V) - k \ln(c) \quad (3.41)$$

Grafikte x-ekseni $\ln(V)$, y-ekseni ise $\ln(-\ln(1-F(v)))$ olarak seçilir. Doğru eğrisinin eğimi (k) şekil parametresini, y-eksenini kestiği nokta ise $(-k*\ln(c))$ ölçek parametresini belirler. Eğim şu şekilde hesaplanır;

$$k = \frac{\ln(V)}{\ln(-\ln(1 - F(V)))} \quad (3.42)$$

şeklinde doğrusal bir ifade elde edilir. Bu dönüşüm sayesinde, $x=\ln(V)$ ve $y=\ln(-\ln(1-F(V)))$ olarak ifade edilen değerler doğrusal bir grafik oluşturur. Elde edilen doğrunun eğimi k 'yı, y-eksenini kestiği nokta ise $-k\ln c$ değerini verir.



Şekil 3.12. Weibull k ve c parametrelerini tahmin etmek için grafiksel yöntem.

Şekil 3.12 'de, Weibull dağılımının grafik yöntemi kullanılarak şekil parametresi (k) ve ölçek parametresi (c) hesaplanmıştır. X eksenini rüzgâr hızlarının doğal logaritmasını $\ln(V)$ gösterirken, Y eksenini Weibull dönüşümünün logaritmik formu olan $\ln(-\ln(1-F(V)))$ değerlerini içermektedir. Bu yöntem, Weibull dağılımını doğrusal hale getirerek regresyon analizi ile k ve c parametrelerinin tahmin edilmesini sağlar. Grafikteki örneğe göre rüzgâr hızları (V) şu değerlerden oluşmaktadır: 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 m/s. Bu hızlara karşılık gelen deneysel $F(V)$ değerleri ise 0.10, 0.20, 0.35, 0.50,

0.65, 0.78, 0.88, 0.95 olarak belirlenmiştir. Mavi noktalar, bu hızlara karşılık gelen ölçülen $F(V)$ değerlerinin logaritmik dönüşümü ile elde edilen verileri göstermektedir. Kırmızı kesikli çizgi ise, regresyon analizi sonucu elde edilen doğrusal uyumu ifade eder. Regresyon denklemi $y = kx + b$ denkleminden $y = 2,22x - 3,89$ olarak belirlenmiş ve doğrunun eğimi olarak $k = 2.22$ hesaplanmıştır.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_i \quad (3.43)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum y_i \quad (3.44)$$

$x = \ln(V)$ ve $y = \ln(-\ln(1 - F(V)))$ olduğuna göre denklem 3.43 ve 3.44 kullanılarak $x = 1,65$ $y = -0,462$ olarak bulunur. Bulunan bu değerler denklem 3.45 te yerine koyularak şekil parametresi $k = 2,22$ olarak elde edilir.

$$k = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.45)$$

$y = kx + b$ denkleminde y , k ve x değişkenleri elde edildiğinden buradan $b = -3,89$ olarak bulunur.

Ölçek parametresi c , y -eksenini kesim noktası b (y_{kesim}) kullanılarak şu formülle hesaplanır:

$$c = e^{\frac{-y_{kesim}}{k}} \quad (3.46)$$

Burada $y_{kesim} = -3,89$ ve $k = 2,22$ olduğundan,

$$c = e^{-(-3,89)/2,22} = e^{1,75} = 5,75 \text{ m/s} \quad (3.47)$$

Bu hesaplamalar sonucunda, Weibull parametreleri $k = 2,22$ ve $c = 5,75$ m/s olarak bulunmuştur. Grafik üzerindeki yeşil kesikli çizgi, y -eksenini kesişim noktası olan y_{kesim} (b) değerini göstermektedir. Mor kesikli çizgi ise referans başlangıç noktasını ifade etmektedir. Bu yöntem, deneysel $F(V)$ değerlerini kullanarak rüzgâr hızı

dağılımının Weibull parametrelerini tahmin etmek için oldukça güvenilir bir yöntemdir [33].

3.3.2.4. Enerji patern faktörü metodu ile hesaplama

Enerji Patern Faktörü (Energy Pattern Factor, E_{PF}) yöntemi, rüzgâr hızlarının kübik ortalaması ile aritmetik ortalaması arasındaki oranı kullanarak Weibull dağılım parametrelerini tahmin etmeye dayalı bir yaklaşımdır. Bu yöntem, özellikle rüzgâr enerjisi potansiyelinin değerlendirilmesinde kullanılan yöntemlerden biri olup, Weibull şekil parametresi k ve ölçek parametresi c değerlerini belirlemek için kullanılır. Enerji Patern Faktörü, aşağıdaki formül ile hesaplanır;

$$E_{PF} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i^3}{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i\right)^3} \quad (3.48)$$

Bu denklemde V_i rüzgâr hızlarını, n ise toplam veri noktası sayısını ifade eder. EPF değeri elde edildikten sonra Weibull şekil parametresi k , ampirik olarak şu denklem ile bulunur;

$$k = 3.957 E_{PF}^{-0.898} \quad (3.49)$$

Bu denklem, Weibull dağılımının doğrudan enerjiye bağlı olarak hesaplanmasını sağlar. Elde edilen k değeri kullanılarak ölçek parametresi c şu şekilde hesaplanabilir;

$$c = \frac{V_m}{\Gamma(1 + 1/k)} \quad (3.50)$$

Burada V_m , ortalama rüzgâr hızını, Γ ise Gamma fonksiyonunu ifade etmektedir. Gamma fonksiyonu, istatistiksel dağılımların ortalama ve standart sapma ile ilişkilendirilmesini sağlayan özel bir fonksiyondur. Bu bağıntılar kullanılarak bir bölgeye ait rüzgâr enerji potansiyelinin belirlenmesi ve rüzgâr türbini seçimi için uygun Weibull parametreleri belirlenebilir [33].

3.3.2.5. Maksimum olasılık metodu ile hesaplama

Maksimum olasılık metodu (Maximum Likelihood Estimation, MLE), Weibull dağılımının şekil parametresi k ve ölçek parametresi c değerlerini tahmin etmek için kullanılan en güvenilir yöntemlerden biridir. Bu yöntem, rüzgâr hızı verilerine en iyi uyan Weibull dağılım parametrelerini elde etmek amacıyla olasılık fonksiyonunu maksimize etmeye dayanır. Weibull dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonu (PDF) 3.13 ‘teki denklemde gösterilmiştir.

$$k = \left[\frac{\sum_{i=1}^n V_i^k \ln(V_i)}{\sum_{i=1}^n V_i^k} - \frac{\sum_{i=1}^n \ln(V_i)}{n} \right] \quad (3.51)$$

Bu denklemde, her bir ölçülen rüzgâr hızı değeri V_i , toplam n veri noktası ve logaritmik ağırlıklandırma kullanılarak k tahmin edilmektedir.

Ölçek parametresi c ise, k parametresi hesaplandıktan sonra şu şekilde elde edilir;

$$c = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i^k \right]^{\frac{1}{k}} \quad (3.51)$$

Bu yöntem, rüzgâr hızlarının istatistiksel dağılımına dayanarak en iyi olasılık tahmini sağlar. Büyük veri kümelerinde oldukça güvenilir ve doğru sonuçlar verir. Ancak, hesaplama karmaşıklığı yüksek olduğundan, iteratif yöntemler veya yazılım tabanlı optimizasyon teknikleri kullanılarak çözülmesi gerekmektedir. Maksimum olasılık metodu, rüzgâr enerjisi alanında özellikle türbin yerleşim analizlerinde ve enerji üretim tahminlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [33].

Parametre tahmininde kullanılan yöntemler temel yaklaşımlar, güçlü ve zayıf yönleri ve kullanım alanları Tablo 3.4 ‘te özet olarak verilmiştir.

Tablo 3.4. Weibull parametrelerinin hesaplamasında kullanılan yöntemler tablosu

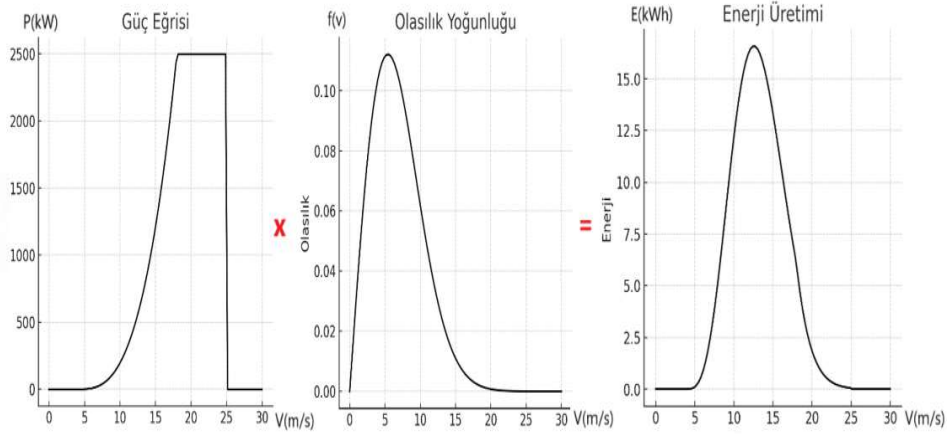
Yöntem	Temel Yaklaşım	Avantajlar	Dezavantajlar	Kullanım Alanı
Maximum Likelihood (MLE)	Parametreler, likelihood fonksiyonunu maksimize ederek bulunur.	-Büyük veri setlerinde yüksek doğruluk sağlar. -Asimptotik olarak en verimli yöntemdir. -Matematiksel sağlamlığı yüksektir.	-Küçük veri setlerinde sapma yapabilir. -Hesaplama karmaşıklığı yüksektir.	İstatistiksel analiz, güvenilirlik mühendisliği, rüzgâr enerjisi tahminleri.
En Küçük Kareler (Least Squares)	Logaritmik dönüşümle doğrusal regresyon uygulanarak hata terimleri minimize edilir.	-Küçük veri setleri için uygundur. -Daha hızlı ve basit bir uygulamaya sahiptir.	-Likelihood kadar hassas değildir. -Gürültülü veri setlerinde performansı düşer.	Eğitim ve hızlı tahmin gerektiren durumlar.
Grafik Yöntemi	Veriler log-log grafiğe çizilerek $y=\ln(-\ln(-F(x)))$ ve $x=\ln(x)$ arasında doğru oluşturulur.	-Basit ve hızlı bir yöntemdir. -Görsel olarak veri uygunluğu kontrol edilebilir	-Subjektif bir yöntemdir (manuel doğruluk gerektirir). -Küçük veri setlerinde güvenilirlik düşüktür.	Eğitim amaçlı, hızlı analiz ve temel uygulamalar.
Moment Yöntemi	Verinin ilk ve ikinci momentleri kullanılarak parametreler tahmin edilir.	-Teorik olarak sağlam bir yöntemdir. -İstatistiksel parametrelerle doğrudan ilişkilidir.	-Küçük veri setlerinde performansı düşer. -Momentlerin hesaplanması karmaşık olabilir.	Teorik analiz, istatistiksel araştırmalar.
Satman Yöntemi	Weibull parametreleri, düzenlenmiş verilere doğrusal regresyon uygulanarak hesaplanır.	-Basit bir uygulanabilirliği vardır. -Regresyon yöntemlerinin avantajlarından yararlanır.	-Diğer yöntemlere göre daha az hassastır. -Genellikle veri boyutuna duyarlıdır.	Hızlı tahmin ve pratik analizler.
Standart Yöntem (OLS)	Regresyon analiziyle hata karelerini minimize eden standart bir yöntem uygulanır.	-Basit bir uygulama sağlar. -Küçük veri kümeleri için kullanılabilir.	-Veri setindeki uç değerlerden etkilenebilir.	Eğitim amaçlı ve temel veri analizi.
Bayesci Yöntem	Parametreler, veriyle öncül bilgi birleştirilerek tahmin edilir.	-Ön bilgilerin kullanımına izin verir. -Küçük veri setlerinde anlamlı tahmin yapabilir.	-Ön dağılım seçimi hassasiyet yaratır. -Karmaşık hesaplama gerektirir.	Bilimsel araştırma, mühendislik uygulamaları ve veri zenginleştirme.
Regression Rank Order	Veriler sıralanır ve kümülatif dağılımın doğrusal regresyonu yapılır.	-Kolay uygulanabilir bir yöntemdir.	-Büyük veri kümelerinde doğruluk düşebilir. -Parametre hassasiyeti diğer yöntemlere göre düşüktür.	Basit analizler ve veri uygunluk kontrolleri.

3.3.3. Weibull modeli ile enerji üretimi tahmini

Bir rüzgâr enerjisi dönüşüm sisteminin (WECS) belirli bir konumdaki belirli bir zaman dilimi boyunca üreteceği enerjiyi etkileyen faktörler şunlardır: Türbinin farklı rüzgâr hızlarına verdiği güç tepkisi, Bölgedeki hâkim rüzgâr rejiminin gücü, Rüzgâr rejimi içindeki rüzgâr hızı dağılımı.

Belirli bir V rüzgâr hızına karşılık gelen enerji, türbinin V hızında ürettiği güç ile bu hızın bölgedeki süresi boyunca geçerli olduğu zamanın çarpımıdır. Türbinin belirli bir dönem boyunca ürettiği toplam enerji, sistemin çalıştığı rüzgâr rejimindeki tüm olası rüzgâr hızlarına karşılık gelen enerjilerin toplamı alınarak hesaplanır [53].

Bu nedenle, türbinin güç karakteristiğiyle birlikte farklı rüzgâr hızlarına karşılık gelen olasılık yoğunlukları da enerji hesaplamalarında dikkate alınmalıdır.



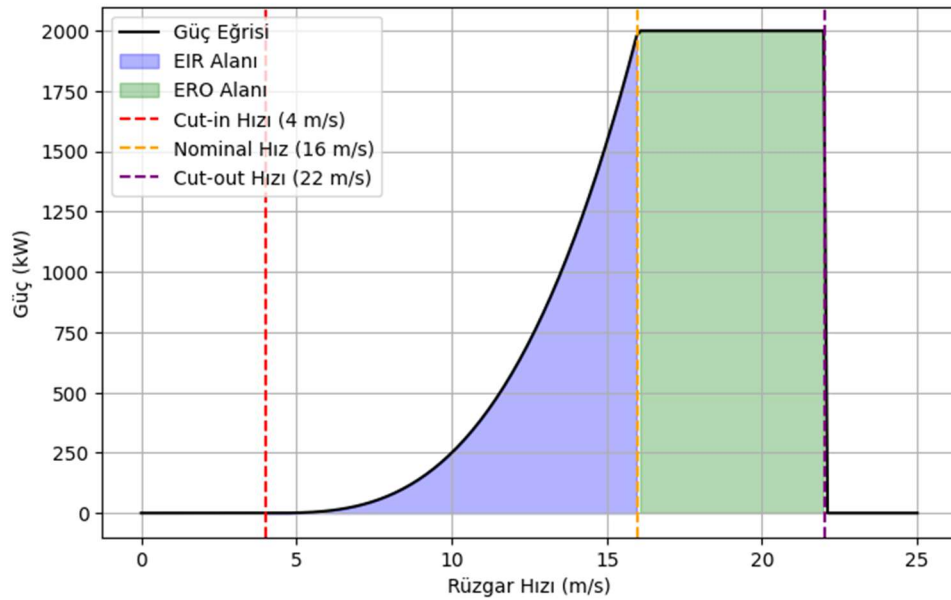
Şekil 3.13. Enerji Tahmininin Grafiksel Gösterimi

Şekil 3.13 'te , ilk grafik olan Güç Eğrisi, ticari bir 2.5 MW türbinin rüzgâr hızına bağlı olarak üretebileceği gücü temsil etmektedir. Bu türbinin kesme altı hızı (cut-in) 4 m/s, nominal hızı 18 m/s ve kesme üstü hızı (cut-out) 25 m/s olarak belirlenmiştir. Türbin, kesme altı hızlarında çalışmazken, nominal hıza kadar rüzgâr hızına bağlı olarak artan bir güç üretir ve nominal hızdan sonra sabit güç çıkışı sağlar.

İkinci grafik olan Olasılık Yoğunluğu Eğrisi, ortalama rüzgâr hızı 8,5 m/s olan bir sahada elde edilmiştir. Bu eğri, belirli rüzgâr hızlarının bölgede hangi olasılıkla gerçekleştiğini gösterir.

Üçüncü grafik olan Enerji Üretim Eğrisi, farklı rüzgâr hızlarına karşılık gelen enerji miktarlarını göstermektedir. Örneğin, 10 m/s rüzgâr hızının enerji üretimine katkısını hesaplamak için, bu hıza karşılık gelen güç değeri (Güç Eğrisi) ve olasılık yoğunluk değeri (Olasılık Yoğunluğu Eğrisi) belirlenir. 10 m/s rüzgâr hızı için üretilen enerji, bu iki değer çarpımıyla hesaplanır ve bu değer Enerji Üretim Eğrisi üzerinde gösterilir.

Belirlenen zaman dilimi boyunca türbinin sağlayabileceği toplam enerji miktarı, Enerji Üretim Eğrisi 'nin cut-in ve cut-out hızları arasındaki alanının integrali alınıp ve çıkan sonucun zaman faktörüyle çarpılmasıyla hesaplanır. Bu yöntem, sahadaki rüzgâr hızlarının dağılımını ve türbinin güç eğrisini dikkate alarak en doğru enerji tahminini yapmaya olanak tanır.



Şekil 3.14. Rüzgâr Türbini Güç Eğrisi ve EIR / ERO Alanları

Şekil 3.14 'te E_{IR} alanı (grafikte mavi bölge), rüzgâr türbininin Cut-in hızı olan 4 m/s ile nominal hızı olan 16 m/s arasındaki güç üretim bölgesidir. Bu bölgede türbinin güç

üretimi rüzgâr hızına bağlı olarak artar. Türbin, 4 m/s altındaki hızlarda çalışamaz, çünkü bu hızlarda yeterli enerji bulunmaz. Ancak rüzgâr hızı arttıkça, üretilen güç de hızla yükselir ve nominal hız olan 16 m/s'ye ulaştığında maksimum seviyeye çıkar. Bu bölge, rüzgâr hızının sıkça görüldüğü sahalarda toplam enerji üretimine büyük katkı sağlar ve türbinin en verimli çalıştığı hız aralığını ifade eder.

E_{RO} alanı (grafikte yeşil bölge), türbinin nominal hızı olan 16 m/s ile Cut-out hızı olan 22 m/s arasındaki güç üretim bölgesidir. Bu bölgede rüzgâr hızının artmasına rağmen türbin sabit bir maksimum güç üretir. Örneğin, nominal güç kapasitesi 2000 kW olan bir türbin, 16 m/s hızında bu maksimum güce ulaşır ve 22 m/s'ye kadar aynı seviyede çalışmaya devam eder. Ancak, rüzgâr hızı 22 m/s'yi aştığında türbin otomatik olarak kapanır, çünkü aşırı rüzgâr yükleri türbin bileşenlerine zarar verebilir. Bu alan, yüksek rüzgâr hızlarında türbinin maksimum verimde enerji üretmeye devam ettiği kritik bir bölgeyi temsil eder.

$$P_V = P_R \left(\frac{V^n - V_1^n}{V_R^n - V_1^n} \right) \quad (3.52)$$

Rüzgâr türbini güç denklemi ve Weibull PDF denkleminde (3.13) yola çıkarak E_{IR} toplam enerji üretimi, belirli bir T zaman dilimi içinde türbinin ürettiği güç ile o hızın gerçekleşme olasılığının çarpımının integrali alınarak bulunur:

$$E_{IR} = T \int_{V_{ci}}^{V_r} P(V) f(V) dV \quad (3.53)$$

Denklem 3.52 ve 3.53 yerine yazılarak aşağıdaki denklem elde edilir;

$$E_{IR} = TP_R \int_{V_{ci}}^{V_r} \left(\frac{V^n - V_1^n}{V_R^n - V_1^n} \right) \left(\frac{k}{c} \left(\frac{V}{c} \right)^{k-1} e^{-(V/c)^k} \right) dV \quad (3.54)$$

$$E_{IR} = \frac{TP_R}{V_R^n - V_1^n} \int_{V_{ci}}^{V_r} (V^n - V_1^n) \left(\frac{k}{c} \left(\frac{V}{c} \right)^{k-1} e^{-(V/c)^k} \right) dV \quad (3.55)$$

İntegral çözüldüğünde E_{IR} enerji denklemi şöyle olur;

$$E_{IR} = \frac{TP_R c^n}{V_R^n - V_1^n} \Gamma\left(1 + \frac{n}{k}\right) - \frac{TP_R V_1^n}{V_R^n - V_1^n} (e^{-(\frac{V_1}{c})^k} - e^{-(\frac{V_R}{c})^k}) \quad (3.56)$$

Belirli bir site için seçilen rüzgâr türbininin Cut-in ve Rated hızları arasında üretebileceği tahmini enerji üretimi 3.56 daki denklem ile elde edilir.

Rated ve Cut-out hızları arasında türbinin gücü sabit olduğundan E_{RO} alanı için enerji denklemi şu şekilde elde edilir;

$$E_{RO} = TP_R \int_{V_R}^{V_{co}} \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} e^{-(V/c)^k} dV \quad (3.57)$$

İntegral çözülürse E_{RO} alanı için Enerji denklemi şu şekilde elde edilir;

$$E_{RO} = P_R T (e^{-(\frac{V_R}{c})^k} - e^{-(\frac{V_{co}}{c})^k}) \quad (3.58)$$

E_{RO} , nominal hız (V_R) ile Cut-out hız (V_{co}) arasındaki enerji üretimini ifade eder. Bu denklemde P_R , türbinin nominal gücünü, T , belirli bir zaman dilimini (genellikle bir yıl olarak alınır), V_R , nominal hızı, V_{co} , ise Cut-out hızı temsil eder. c , Weibull dağılımının ölçek parametresi olup, k , Weibull şekil parametresini, E_{IR} , Cut-in hız (V_{ci}) ile nominal hız (V_R) arasındaki enerji üretimini ifade eder, n , türbinin güç üretim karakteristiğini belirleyen katsayıdır. Genellikle 3 olarak alınır, çünkü rüzgâr enerjisi hızın küpü ile orantılıdır.

Kapasite faktörü, bir rüzgâr türbininin belli bir zaman diliminde üretebileceği maksimum enerjiye kıyasla fiilen ürettiği enerji miktarını ifade eden önemli bir performans göstergesidir. IEC 61400 standartlarına göre kapasite faktörü, rüzgâr türbininin enerji üretim verimliliğini belirleyen temel bir kriterdir ve genellikle yıllık bazda hesaplanır. Kapasite faktörü şu formülle hesaplanır;

$$C_F = \frac{E_A}{P_N \times T} \quad (3.59)$$

Burada, C_F , Kapasite faktörü. E_A , Yıllık enerji üretimi (MWh). P_N , Türbinin nominal gücü (MW). T , Yıllık toplam saat (8760 saat). Genel olarak kapasite faktörü %25- 40 aralığında değişebilir. %40 ve üzeri bir kapasite faktörü, türbinin rüzgâr rejimi ile optimum şekilde çalıştığını gösterirken, %25 ve altındaki değerler yatırımın ekonomik açıdan daha az avantajlı olabileceğini işaret edebilir. Bu nedenle, bir rüzgâr santrali projesinin değerlendirilmesi sırasında kapasite faktörü önemli bir kriter olarak ele alınmalıdır [33].

3.3.4. IEC 64100 standardına göre türbin seçimi

Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC) tarafından geliştirilen IEC 61400 standardı, rüzgâr türbinlerinin tasarımı, sertifikasyonu ve işletme güvenliğini sağlamak amacıyla oluşturulmuş bir dizi gereklilik ve yönerge içermektedir. Özellikle IEC 61400-1 bölümü, rüzgâr türbini seçimi için temel kriterleri belirlemekte ve bu kriterler rüzgâr sahasının özellikleriyle türbinin teknik gereksinimlerinin uyumlu olmasını sağlamaktadır [30]. Rüzgâr türbinlerinin seçiminde dikkate alınması gereken en önemli faktörlerden biri, türbinin çalışacağı rüzgâr sınıfıdır. IEC 61400-1 standardına göre, rüzgâr türbinleri dört farklı sınıfta değerlendirilir: Sınıf I, II, III ve IV, her biri belirli rüzgâr hızı aralıklarına göre sınıflandırılmıştır. Örneğin, Sınıf I türbinler 50 m/s'ye kadar çıkan yüksek rüzgâr hızları için tasarlanırken, Sınıf III türbinler daha düşük rüzgâr hızlarında verimli çalışmak üzere geliştirilmiştir [31].

Rüzgâr türbini seçimi yapılırken türbinin dayanıklılığı ve yükleme koşulları da göz önünde bulundurulmalıdır. IEC 61400-1 standardı, türbinin ömrü boyunca maruz kalacağı yüklerin belirlenmesini sağlamak için tasarım yük durumlarını tanımlar. Bu yük durumları aerodinamik yükler, yerçekimi yükleri, atalet yükleri (santrifüj ve jiroskopik etkiler dâhil) gibi çeşitli kuvvetleri kapsar [53]. Ayrıca, türbinin rüzgâr rejimine nasıl tepki vereceği ve türbinde oluşacak türbülans yoğunluğu gibi parametreler de IEC 61400 kapsamında tanımlanmıştır. Türbinlerin tasarımında yük analizleri büyük bir öneme sahiptir ve bu yük analizlerinin doğru şekilde

hesaplanması, türbinin uzun ömürlü ve güvenli çalışmasını sağlamak açısından kritiktir [56].

Rüzgâr türbinlerinin seçiminde kontrol ve koruma sistemleri de büyük bir rol oynamaktadır. IEC 61400 standardı, rüzgâr türbinlerinin aşırı yüklenmelere, fırtınalara ve ani rüzgâr değişimlerine karşı nasıl korunması gerektiğine dair detaylı yönergeler içermektedir [64]. Örneğin, kesme üstü hız (cut-out speed) seviyesine ulaşıldığında türbinin otomatik olarak durması, mekanik bileşenlerin korunması açısından kritik bir gerekliliktir. Bunun yanı sıra, elektrik sistemlerinin güvenli bir şekilde çalışmasını sağlamak amacıyla IEC 61400-21 standardı da güç kalitesi ölçümlerine yönelik gereklilikleri tanımlamaktadır [65]. Türbinlerin bu standartlara uygun olarak tasarlanması ve test edilmesi, uzun vadeli performansın ve güvenilirliğin korunmasını sağlar [66].

Rüzgâr türbini seçerken kurulum ve bakım gereksinimleri de göz önüne alınmalıdır. IEC 61400 standardı, türbinlerin kurulacağı sahaların değerlendirilmesi, türbinin nasıl monte edilmesi gerektiği ve uzun vadede nasıl bakım yapılacağına dair yönergeler sunmaktadır [67]. Deniz üstü (offshore) ve kara üzeri (onshore) türbinler için farklı standartlar mevcuttur. Özellikle IEC 61400-3, deniz üstü türbinlerin dalga, akıntı ve korozyon gibi ek yük koşullarına dayanıklı olması gerektiğini belirtmektedir [68]. IEC standartlarına uygun olarak seçilen ve kurulan rüzgâr türbinleri, hem enerji üretim verimliliğini maksimize etmekte hem de operasyonel riskleri en aza indirmektedir [69].

Bir rüzgâr türbininin belirli bir bölgeye uygun olup olmadığını belirlemek için, rüzgâr rejimi analizi ve arazi özellikleri dikkate alınmalıdır. Ekstrem rüzgâr hızları, 50 yıllık bir süre içinde ortaya çıkabilecek en yüksek rüzgâr hızları olarak hesaplanır ve türbinin bu değerlere dayanıklı olması gerekmektedir. Türbülans yoğunluğu, rüzgâr akışının ne kadar kararsız olduğunu gösterir ve türbinin uzun vadede mekanik aşınma ve yorulmaya karşı dayanıklı olmasını sağlamak için kritik bir faktördür. Topografik koşullar, rüzgâr akışını etkileyen yükseklik değişiklikleri, yüzey pürüzlülüğü ve doğal engeller gibi faktörleri içerir. Bu faktörlerin her biri, rüzgâr türbininin tasarım

gerekliliklerini belirlerken dikkate alınmalıdır. Ayrıca, wake (gölgeleme) etkisi, rüzgâr çiftliklerinde türbinler arasındaki hava akışının nasıl etkilendiğini analiz ederek, türbinler arasındaki optimal mesafenin belirlenmesine yardımcı olur.

Rüzgâr türbinlerinin seçiminde yük analizleri kritik bir rol oynar. IEC 61400-1, rüzgâr türbinlerinin maruz kalabileceği aşırı yük durumlarını (ULS- Ultimate Limit States) ve yorulma yüklerini (FLS- Fatigue Load States) tanımlar. Aşırı yük durumları, fırtına gibi olağanüstü hava koşullarında türbinin mekanik ve yapısal bütünlüğünü korumasını sağlamak için gereklidir. Yorulma yükleri, türbinin uzun yıllar boyunca sürekli rüzgâr değişimlerine maruz kalmasının yaratacağı malzeme yıpranmasını değerlendirerek, türbin bileşenlerinin dayanıklılığını artırmaya yönelik tasarım önlemlerini içerir. Sismik yükler (deprem etkileri), türbinin deprem riskinin yüksek olduğu bölgelerde kurulumunun nasıl yapılması gerektiğine dair ek tasarım gereklilikleri sunar. Bu yük analizleri, türbinin yapısal bütünlüğünün korunmasını sağlamak ve bakım gereksinimlerini en aza indirmek için gereklidir.

Rüzgâr türbini seçimi yapılırken şebeke bağlantı gereklilikleri de dikkate alınmalıdır. IEC 61400-1, türbinlerin elektrik şebekesine entegre edilmesi sırasında dikkat edilmesi gereken gerilim seviyesi, frekans aralığı, reaktif güç kontrolü ve harmonik bozulmalar gibi faktörleri tanımlar. Türbinin ürettiği elektriğin şebekeye sorunsuz entegre olması, stabil bir enerji arzı sağlamak açısından büyük önem taşır. Özellikle IEC 61400-21 standardı, rüzgâr türbinlerinin şebeke bağlantısı sırasında güç kalitesinin nasıl sağlanacağını detaylı bir şekilde açıklar. Türbinlerin bu standartlara uygun olarak tasarlanması, şebekeye zarar vermeden verimli çalışmasını ve elektrik üretiminin sürekli olmasını sağlar [70].

3.3.4.1. Wake etkisinin hesaplanması

Larsen modeli, rüzgâr türbinlerinden kaynaklanan wake (iz) etkisini daha doğru tahmin etmek amacıyla geliştirilmiş bir modeldir. Rüzgâr türbinleri döndüğünde, rotor kanatları hava akımının momentumunu emer ve arkasında düşük hızlı, türbülanslı bir wake bölgesi oluşturur. Bu wake bölgesi, arkadaki türbinlerin verimini düşürür ve

enerji kayıplarına neden olur. Bu kayıpları modellemek için geliştirilmiş en önemli analitik yaklaşımlardan biri Larsen modelidir.

Başlangıçta wake etkisini tahmin etmek için Jensen (Park) modeli kullanılıyordu. Ancak Jensen modeli, wake genişlemesini basit bir doğrusal genişleme ile ifade ettiği için bazı önemli aerodinamik etkileri göz ardı ediyordu. Larsen modeli, wake genişlemesi ve hız düşüşünü daha doğru modellemek için Navier-Stokes denklemlerine ve türbülans prensiplerine dayalı olarak geliştirilmiştir.

Larsen modeli, wake genişlemesi ve hız düşüşünü tahmin etmek için kullanılan gelişmiş analitik modellerden biridir. Jensen (Park) modeline kıyasla daha gerçekçi tahminler sağlar çünkü wake genişlemesini ve türbülans gelişimini daha detaylı ele alır. Bu model, Navier-Stokes denklemleri temel alınarak wake etkisinin zamana bağlı gelişimini ve türbülans kaynaklı momentum transferini dikkate alır.

Wake genişlemesi, wake 'in türbin arkasında nasıl büyüdüğünü gösterir. Wake genişliği $r_w(x)$ şu şekilde tanımlanır:

$$r_w(x) = R + k_w x \quad (3.59)$$

Burada, $r_w(x)$, Wake genişliği, yani wake bölgesinin yarıçapı (m). R , Türbin rotor yarıçapı (m). k_w , Wake genişleme katsayısı. x , Türbinin arkasındaki mesafe (m).

Wake genişliği, türbinin arkasında mesafe arttıkça büyür. Wake genişleme katsayısı k_w , türbülans seviyesi ve atmosferik karışım oranına bağlıdır. Daha türbülanslı ortamda wake daha hızlı genişler.

Wake içinde hız düşüşü, wake genişlemesiyle birlikte belirlenir. Larsen modeline göre wake içindeki hız şu şekilde hesaplanır:

$$V(x) = V_\infty \left(1 - C_w \left(\frac{R}{r_w(x)} \right)^2 \right) \quad (3.60)$$

Burada, $V_w(x)$, Wake bölgesindeki rüzgâr hızı (m/s). V_∞ , Serbest akış rüzgâr hızı (m/s). C_w , Wake hız kaybı katsayısı. $r_w(x)$, Wake genişliği (m). R , Türbin rotor yarıçapı (m).

Wake içindeki rüzgâr hızı, serbest akış rüzgâr hızından daha düşüktür. Wake genişliği arttıkça, wake içinde hız kaybı azalır, çünkü rüzgâr akımı wake bölgesine enerji eklemeye başlar.

Wake hız kaybı katsayısı C_w şu şekilde hesaplanır:

$$C_w = 1 - \sqrt{1 - C_T} \quad (3.61)$$

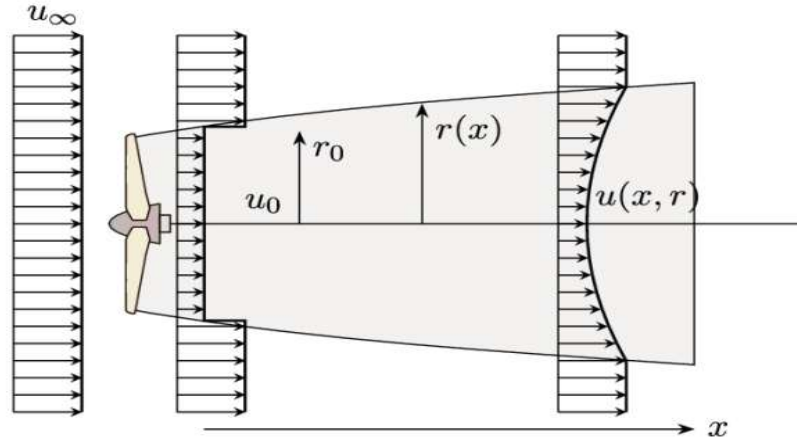
Burada C_T , türbinin thrust coefficient (itme katsayısı) olup, rotorun rüzgâr akımından ne kadar momentum çektiğini gösterir. C_T büyüdükçe, wake içindeki hız düşüşü daha büyük olur.

Larsen modeli, wake bölgesinde hızın merkezde en düşük, wake sınırında ise daha yüksek olduğunu gösterir. Bu hız dağılımı şu şekilde ifade edilir;

$$\Delta u(x, r) = u_{wake,center} \left(1 - \frac{r}{r_w(x)} \right)^2 \quad (3.62)$$

Burada $\Delta u(x, r)$, Wake bölgesindeki hız azalması. $u_{wake,center}$, Wake merkezindeki hız kaybı. r , Wake içinde merkezden itibaren radyal uzaklık (m). $r_w(x)$, Wake genişliği (m).

(3.62) 'deki denklem, wake bölgesinde merkeze doğru hızın en düşük seviyede olduğunu ve wake sınırına doğru arttığını gösterir. Bu nedenle wake içindeki türbinler, wake merkezine ne kadar yakınsa o kadar düşük rüzgâr hızına maruz kalır [71].



Şekil 3.15. Larsen tarafından önerilen wake modeli [72]

Şekil 3.15 ‘de u_{∞} , Türbinin önündeki serbest akış rüzgâr hızı. u_0 , Türbinin rotor düzlemindeki rüzgâr hızı. r_0 , Türbin rotorunun yarıçapı. $r(x)$, Türbinin arkasında wake genişliği (wake bölgesinin yarıçapı). $u(x, r)$, Türbinin arkasındaki wake bölgesindeki hız dağılımını ifade eder.

3.3.4.2. Yorulma yükleri ve aşırı yük durumlarına karşı alınan önlemler

Rüzgâr türbinleri, uzun süreli operasyonları boyunca sürekli olarak değişen rüzgâr hızları, yönleri ve atmosferik koşullar nedeniyle yorulma yüklerine ve aşırı yük durumlarına maruz kalır. IEC 61400-1 standardına göre, yorulma yükleri, türbinin 20-25 yıllık tasarım ömrü boyunca tekrarlayan yüklerin neden olduğu malzeme bozulmasını ve yapısal yorulmayı ifade eder [64].

Yorulma yükleri, rüzgâr türbinlerinin kanatları, gövdesi, kule yapısı ve bağlantı elemanları üzerinde zamanla mikro çatlaklar, malzeme deformasyonu ve mekanik aşınma gibi sorunlara yol açabilir. Bu etkileri en aza indirmek ve türbinin uzun ömürlü olmasını sağlamak için adaptif pitch kontrolü, aktif yaw kontrolü ve malzeme optimizasyonu gibi çeşitli mühendislik stratejileri uygulanmaktadır. Bu stratejilerden biri adaptif pitch kontrolüdür. Rüzgâr türbinleri, rüzgâr hızına bağlı olarak rotor kanatlarının eğim açısını değiştiren bir kontrol sistemine sahiptir. Adaptif pitch kontrolü, rotor kanatlarının açılarını rüzgâr hızına ve türbinden gelen geri bildirimlere göre sürekli ayarlayarak aerodinamik yükleri optimize eder [73]. Düşük rüzgâr

hızlarında, türbinin maksimum güç üretmesi için kanatlar rüzgâr yönüne daha dik bir açıyla ayarlanırken, yüksek rüzgâr hızlarında, aerodinamik yükleri azaltmak ve yapısal yorulmayı engellemek için kanatlar rüzgârı daha az tutacak şekilde konumlandırılır. Aşırı rüzgâr durumlarında, kanatlar feathering moduna geçerek tamamen kapatılır ve türbinin güvenli şekilde kapanması sağlanır.

Bir diğer önemli kontrol mekanizması aktif yaw kontrolüdür. Yaw kontrolü, türbinin rüzgâr yönüne en uygun şekilde döndürülmesini sağlayan bir mekanizmadır. Aktif yaw kontrolü ile, rüzgâr yönündeki değişikliklere bağlı olarak türbin en verimli açıda konumlandırılır, böylece düzensiz yükler önlenir. Wake etkisi azaltılarak, arkasında bulunan türbinler üzerindeki olumsuz yük dağılımı engellenir ve türbin bileşenleri üzerindeki asimetrik yükler minimize edilir. Bu süreç, rotor ve kule üzerindeki yapısal stresin azaltılmasına yardımcı olur.

Malzeme optimizasyonu ve yapısal güçlendirme de yorulma yüklerini azaltmada kritik rol oynar. Rüzgâr türbinlerinin kanatları ve kule yapıları yüksek dayanımlı kompozit malzemelerden üretilerek yorulma yüklerine karşı daha dirençli hale getirilir [30]. Rotor kanatları için karbon fiber ve cam elyaf takviyeli kompozitler kullanılır, çünkü bu malzemeler yüksek mukavemet/ağırlık oranına sahiptir. Kule yapılarında çelik ve hibrit malzemeler kullanılarak rüzgâr yüklerine karşı daha sağlam ve uzun ömürlü bir yapı elde edilir. Aerodinamik tasarım optimizasyonlarıyla, kanatların hava akışı içindeki titreşimleri ve düzensiz yükleri en aza indirilir, böylece malzeme yorulması geciktirilir [53].

Aşırı yük durumları, fırtınalar, ani rüzgâr değişimleri, rüzgâr keskinlikleri ve acil durdurma senaryolarında meydana gelen maksimum yükleri ifade eder. Türbinin aşırı rüzgâr koşullarına dayanıklı olmasını sağlamak için çeşitli önlemler alınmaktadır [64]. Acil durum frenleme sistemleri, türbinin aşırı rüzgâr hızları veya arıza durumlarında güvenli bir şekilde durmasını sağlamak için kullanılan mekanizmalardır. Hidrolik veya elektromanyetik disk frenleri kullanılarak rotorun yavaşlatılması sağlanır, bu da türbin bileşenlerinin zarar görmesini engeller. Yüksek rüzgâr hızlarında rotor kilitleme mekanizmaları kullanılarak rotorun tamamen durması sağlanır. Bu mekanizma,

özellikle bakım sırasında veya aşırı hava koşullarında türbini güvenli hale getirmek için kritik bir öneme sahiptir [66].

Kanatların aşırı rüzgâr durumlarında aerodinamik olarak feathering durumuna gelmesi de aşırı yüklerden korunmak için en önemli mekanizmalardan biridir. Feathering sırasında rotor kanatları rüzgâr akışına paralel hale getirilir. Böylece aerodinamik yük sıfıra yakın seviyeye iner. Kanatların hava direnci azalır ve türbinin hızlanması engellenir. Feathering, otomatik sistemler tarafından tespit edilen aşırı yük durumlarında devreye girerek türbinin güvenli şekilde kapanmasını sağlar [65].

Rüzgâr türbinleri, yorulma yükleri ve aşırı yük durumları nedeniyle zamanla mekanik ve aerodinamik streslere maruz kalır. IEC 61400-1 standardına uygun olarak, bu yükleri azaltmak için adaptif pitch kontrolü, aktif yaw kontrolü, malzeme optimizasyonu, acil frenleme sistemleri, rotor kilitleme mekanizmaları ve aerodinamik Feathering sistemleri gibi çeşitli mühendislik çözümleri uygulanmaktadır [53].

Bu sistemler sayesinde türbinlerin uzun ömürlü olması, bakım maliyetlerinin düşürülmesi ve enerji üretim verimliliğinin artırılması sağlanmaktadır.

3.3.4.3. Sismik yüklere karşı alınan önlemler

Deprem riski taşıyan bölgelerde kurulan rüzgâr türbinleri, sismik yükler nedeniyle özel tasarım gerektirir. IEC 61400-1 standardına göre, türbinlerin deprem dayanıklılığı belirlenirken modal analiz, zaman alanı analizi ve spektral tepki analizleri uygulanmalıdır [64]. Sismik yükler, türbinin temelinde ve kulesinde önemli dinamik kuvvetler oluşturarak yapısal bütünlüğünü tehdit edebilir. Bu etkileri azaltmak için mühendislik çözümleri geliştirilmiştir.

İlk olarak, kule ve temel tasarımının güçlendirilmesi gerekmektedir. Rüzgâr türbinleri yüksek yapılar olduğundan, yer hareketlerine karşı dayanıklılığını artırmak için betonarme veya çelik güçlendirilmiş yapılar kullanılır. Temel sistemleri de sismik

yüklere dayanıklı olacak şekilde optimize edilmelidir. Deprem sırasında türbinin aşırı salınım yapmasını engellemek için geniş çaplı ve derin temeller inşa edilir [66].

Sismik yükleri azaltmak için titreşim sönümleyici sistemler (Tuned Mass Dampers-TMD) kullanılır. Kule titreşimlerini ve rezonans etkilerini azaltmak için, rüzgâr türbininin içine veya dışına yerleştirilen kütle sönümleyiciler, kule hareketlerini pasif veya aktif olarak dengeleyerek titreşimi düşürür [52]. Özellikle yüksek rüzgâr türbinlerinde, bu sistemler deprem dalgalarının neden olduğu yanal salınımları azaltır ve kule stabilitesini artırır.

Ayrıca, türbinin kurulacağı zemin ve temel yapısının incelenmesi büyük önem taşır. Yerel deprem yönetmeliklerine uygun olarak, jeoteknik mühendislik analizleri yapılmalı ve gerekli güçlendirme önlemleri alınmalıdır. Zayıf veya gevşek zeminlerde, mikropilotlar, derin kazık temeller veya kaya ankrajları kullanılarak türbinin zemin sıvılaşması ve kaymalara karşı korunması sağlanır [73].

3.3.4.4. Şebeke bağlantı gereklilikleri

IEC 61400 standardı, rüzgâr türbinlerinin elektrik şebekesine entegrasyonu için gereken teknik gereksinimleri belirleyen evrensel bir standarttır. Bu standart, rüzgâr enerjisinin şebekeye güvenli ve verimli bir şekilde entegre edilmesini sağlamak için gerilim regülasyonu, reaktif güç yönetimi, düşük voltaj sürdürme (LVRT) ve harmonik bozulma kontrolü gibi kriterleri içerir.

Gerilim seviyesi ve frekans değişimlerinin şebekeye zarar vermeden kontrol edilmesi için dinamik voltaj regülatörleri (DVR) ve STATCOM sistemleri kullanılır. Gerilim dalgalanmalarını kontrol eden DVR sistemleri, ani voltaj değişimlerini stabilize ederek türbinin şebekeye zarar vermesini engeller. Ayrıca, STATCOM cihazları, şebeke voltajı düşük olduğunda reaktif güç desteği sağlayarak voltaj seviyesini artırır ve aşırı gerilim durumlarında fazla reaktif gücü absorbe ederek voltajı dengeler.

Reaktif güç dengesizliği yaşanırsa, türbinler STATCOM veya SVC (Static VAR Compensator) gibi cihazlarla desteklenerek reaktif gücün uygun seviyelerde tutulması sağlanır.

Rüzgâr türbinlerinin şebeke ile uyumlu çalışabilmesi için nominal gerilim seviyesi ve frekans değerleri belirlenmiştir. IEC 61400-21 standardına göre, rüzgâr türbinlerinin nominal şebeke frekansına uygun şekilde çalışması gerekmektedir. Çoğu ülke için 50 Hz veya 60 Hz frekans kullanılır ve türbinlerin bu aralıklarda kararlı bir şekilde çalışması beklenir.

IEC 61400-21 standardına göre, rüzgâr türbinlerinin şebekeye bağlanabilmesi için 0.95 indüktif ile 0.95 kapasitif güç faktörü arasında çalışabilmesi gerekmektedir. Güç faktörü uyumu, şebekede gerilim dalgalanmalarını önlemek ve sistem stabilitesini sağlamak için kritik bir parametredir.

Şebekedeki kısa devreler ve voltaj çökmesi gibi ani durumlarda, rüzgâr türbinlerinin şebekeden aniden kopmasını önlemek için LVRT (Low Voltage Ride-Through) sistemleri gereklidir. IEC 61400 standardına göre, rüzgâr türbinleri belirli bir süre boyunca düşük voltaj seviyelerinde çalışmaya devam etmelidir.

$$V_{LVRT} = V_{min} + (V_r - V_{min}) \cdot e^{-t/\tau} \quad (3.63)$$

Burada, V_{LVRT} , Düşük voltaj sürdürme eşiği. V_{min} , Arıza sırasında minimum voltaj seviyesi. V_r , Arıza sonrası gerilim seviyesi. τ , Sistem zaman sabiti. t , Zaman.

Bu formül, arıza süresi boyunca türbinlerin şebekeye bağlı kalmasını ve ani kesintilerin önüne geçilmesini sağlar. Türbinlerin LVRT profiline uygun çalışabilmesi için inverter bazlı kontrol sistemleri ve enerji depolama sistemleri kullanılır [70].

Rüzgâr türbinleri güç elektroniği tabanlı inverterler kullanarak şebekeye bağlandığında, harmonik bozulmalar meydana gelebilir. Bu harmonik bozulmalar, şebekenin dengesizleşmesine ve enerji kayıplarına neden olabilir [65]. Harmonik

bozulmanın azaltılması için aktif ve pasif filtreleme teknikleri kullanılarak toplam harmonik distorsiyon (THD) kontrol altına alınmalıdır. IEC 61400-21 standardına göre, rüzgâr türbinlerinin ürettiği harmoniklerin belirli sınır değerlerin altında kalması gerekmektedir. Harmonik distorsiyon şu denklemle hesaplanır:

$$THD = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{V_n}{V_1}\right)^2} \quad (3.64)$$

Burada, THD, Toplam harmonik distorsiyon (%). V_n , n frekans bileşenindeki voltaj. V_1 , Temel frekans bileşenindeki voltaj. Harmonik bozulmaların önlenmesi için aktif güç filtresi (APF) ve pasif filtreleme sistemleri kullanılır. Rüzgâr çiftlikleri şebekeye aniden bağlandığında, ani güç dalgalanmaları meydana gelebilir. Bunu önlemek için türbinlerin şebekeye sıralı olarak bağlanması gereklidir. Eğer tüm türbinler aynı anda şebekeye bağlanırsa, şebekede aşırı yüklenme veya frekans dalgalanmaları meydana gelebilir [70]. Bu süreci düzenlemek için kontrollü bağlantı stratejileri uygulanır. Örneğin, türbinlerin şebekeye aşamalı olarak bağlanması, şebekenin dengeyi korumasına yardımcı olur. Bu süreç, enerji depolama sistemleri (bataryalar veya süperkapasitörler) ile desteklenerek optimize edilir [65].

3.4 Ekonomik Analiz

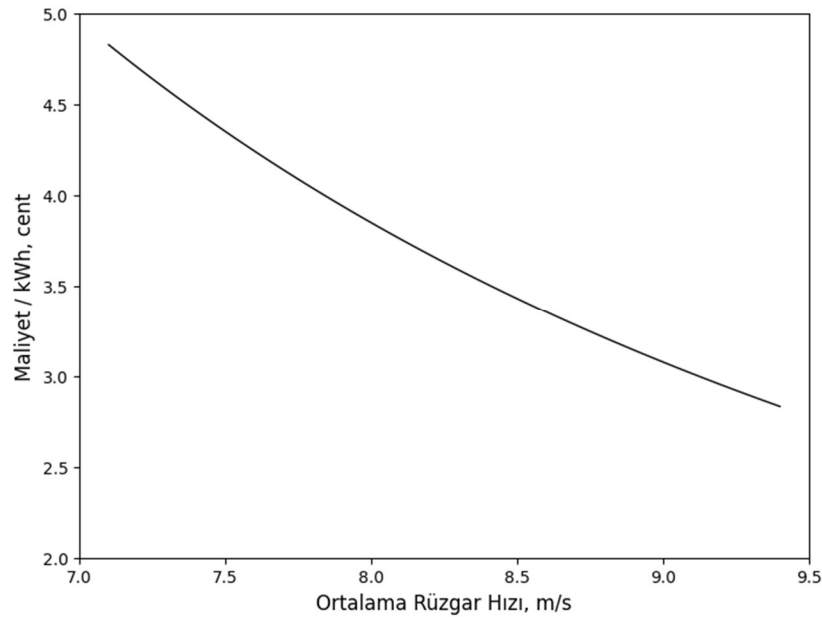
Rüzgâr enerjisi projelerinin ekonomik uygulanabilirliği, yalnızca teknik faktörlere değil, aynı zamanda üretim maliyetlerine de bağlıdır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaşmasını engelleyen en büyük faktörlerden biri yüksek maliyetler olsa da rüzgâr enerjisi son yıllarda önemli ölçüde ucuzlamış ve geleneksel enerji kaynaklarıyla rekabet edebilir hale gelmiştir. Yakıt maliyeti olmamasına rağmen, yüksek ilk yatırım gereksinimi nedeniyle, toplam proje maliyeti; türbin, arazi, iletim hatları ve güç düzenleme sistemleri gibi bileşenleri kapsar. Bu nedenle, bir yatırımın getireceği net finansal getiri detaylı olarak değerlendirilmelidir. Rüzgâr enerjisi ekonomisini anlamak için maliyet hesaplamaları yapılmalı ve üretilen elektriğin değeri, yerel enerji piyasasındaki faktörler göz önünde bulundurularak analiz edilmelidir [33].

3.4.1. Rüzgâr enerjisi ekonomisini etkileyen faktörler

Rüzgâr enerjisi projelerinin ekonomik uygulanabilirliği, birçok farklı faktörden etkilenir. Bu faktörler genel olarak bölgeye özgü koşullar, makine ve sistem parametreleri, enerji piyasası koşulları ve politika düzenlemeleri olmak üzere dört gruba ayrılabilir.

Rüzgâr enerjisi projelerinin ekonomik verimliliği, proje sahasının fiziksel ve çevresel özelliklerinden büyük ölçüde etkilenir. Bu faktörler arasında rüzgâr hızı, arazi ve altyapı maliyetleri, şebeke bağlantısı, kule yüksekliği ve iklim koşulları önemli bir rol oynar.

Şekil 3.16 'daki grafikten anlaşılabacağı üzere ortalama rüzgâr hızı arttıkça maliyet azalmaktadır. Dikkat çekici olan kısım ise şu; hız 2 katına çıkmadığı halde maliyet yaklaşık yarı yarıya azalmıştır. Rüzgâr hızı rüzgârın küpü ile orantılı olduğu için rüzgâr hızındaki küçük artışlar maliyetleri bu küçük artışa göre daha fazla düşürmektedir. Arazi ve altyapı maliyetleri, rüzgâr enerjisi projelerinde toplam yatırım maliyetinin yaklaşık %20-30'unu oluşturur ve bölgeden bölgeye değişiklik gösterebilir.

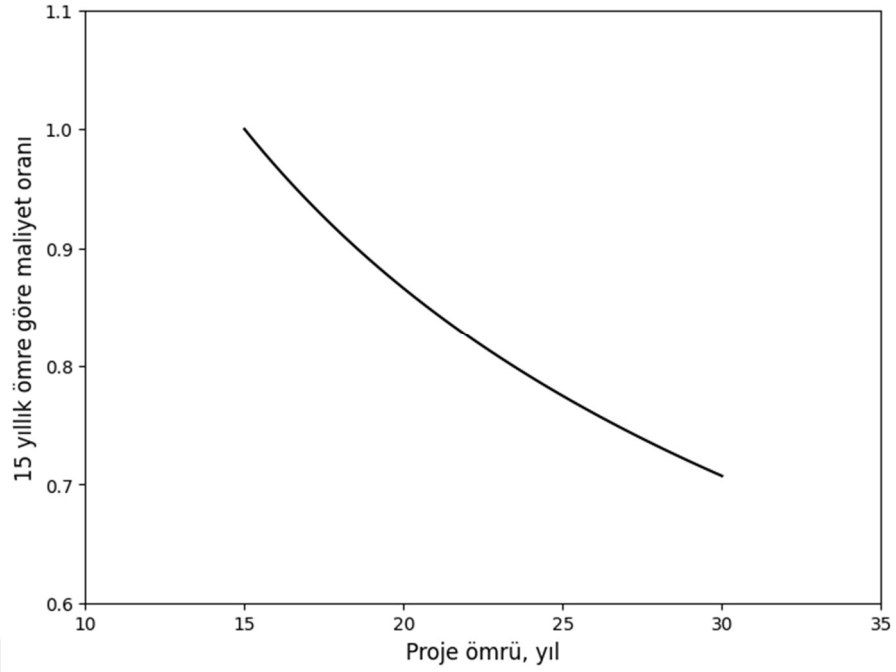


Şekil 3.16. Rüzgâr hızının rüzgâr enerjisi üretim maliyetine etkisini gösteren grafik [36]

Türbinlerin şebekeye uzaklığı, ek iletim hatları gerektirdiğinde maliyetleri %9 oranında artırabilir. Ulaşım yollarının ve bakım altyapısının geliştirilmesi ise toplam yatırım maliyetinin %7'sini oluşturur. Ayrıca, temel yapısı maliyetlerin %11'ini kapsar ve zemin koşullarına bağlı olarak değişir; sağlam zeminlerde temel maliyetleri daha düşükken, zayıf zeminlerde güçlendirme çalışmaları ek maliyet getirebilir. Genel olarak, yatırım maliyetinin %69'u türbinlere, %11'i inşaat işlerine, %9'u elektrik altyapısına, %7'si şebeke entegrasyonuna ve %4'ü kurulum ve diğer maliyetlere ayrılmaktadır.

Daha yüksek kuleler genellikle daha fazla enerji üretir, ancak aynı zamanda yatırım maliyetlerini de artırır. Minimum kule yüksekliği, yerel yüzey pürüzlülüğüne bağlı olarak belirlenir. İklim koşulları da ekonomik analizde önemli bir rol oynar; yüksek türbülans rotor bileşenlerinin aşınmasını hızlandırabilir ve atmosferdeki korozyif maddeler türbin ömrünü kısaltabilir. Bu durum, bakım sıklığını ve sistemin toplam işletme maliyetlerini artırarak rüzgâr enerjisi projelerinin maliyet etkinliğini olumsuz yönde etkileyebilir.

Rüzgâr türbinlerinin maliyet etkinliğini artırmada en önemli etkenlerden biri, türbin kapasitesinin ölçeklendirilmesidir. Örneğin, 1.5 MW kapasiteli bir türbinin birim maliyeti, 10 kW'lık bir türbine göre oldukça düşüktür. Geçmiş on yıl içerisinde, rüzgâr türbinlerinin birim maliyeti 2500 \$/kW seviyesinden 750 \$/kW düzeyine gerilemiştir. Bu düşüşün temel nedeni, türbin boyutunun büyümesine rağmen, birçok bileşenin maliyetinin sabit kalmasıdır. Özellikle güvenlik sistemleri ve elektronik kontrol üniteleri gibi bileşenler, küçük ve büyük türbinlerde benzer maliyetle temin edilebilmekte, ayrıca türbin geliştirme sürecinde ihtiyaç duyulan iş gücü de kapasiteye orantılı olarak artmamaktadır.



Şekil 3.17. Proje ömrünün rüzgâr jeneratörü ekonomisine etkisi [33]

Şekil 3.17 ‘da bir rüzgâr enerjisi yatırımının toplam proje süresi arttıkça, yıllık bazda maliyetini düştüğü görülmektedir. 15 yıl işletmekle 30 yıl işletmek arasında ciddi bir maliyet farkı vardır.

Bununla birlikte, üretim miktarındaki artış da birim maliyetlerin düşmesini sağlayan kritik bir faktördür. İlk birkaç türbinin üretiminde Ar-Ge ve altyapı maliyetleri yüksek olurken, seri üretimle birlikte bu maliyetler türbin başına azalır. Bu ilişki endüstride “öğrenme eğrileri” ile tanımlanır. Ayrıca, değişken hızlı sistemler gibi tasarım iyileştirmeleri ile hem şanzıman elemanlarının yükü dengelenir hem de rotor verimliliği artırılır. Türbinin ömrü uzadıkça, yıllık maliyetler de düşer; örneğin, proje ömrü 10 yıldan 25 yıla çıkarıldığında, yıllık işletme maliyetinde yaklaşık %30’luk bir azalma elde edilir. Ancak bu tür hesaplamalarda, ömür beklentisinin teknik gerçeklikle uyumlu olması büyük önem taşır.

Rüzgâr enerjisinden sağlanan ekonomik kazanç, büyük ölçüde enerji piyasasındaki fiyatlandırma yapısına bağlıdır. Türbinden üretilen elektrik tamamen türbin sahibi tarafından tüketiliyorsa, yatırımın avantajı yerel elektrik tarifiyle belirlenir. Ancak üretim, tüketimden fazla ise, fazla enerji yerel dağıtım şirketine satılabilir. Bu durumda

satış fiyatı, genellikle perakende elektrik fiyatından daha düşüktür; çünkü perakende fiyata işletme giderleri ve kâr payı dâhildir. Ayrıca, enerji şirketleri, rüzgâr enerjisini gün içindeki yüksek talep saatlerinde alırlarsa daha yüksek fiyat ödeyebilir, çünkü bu durum onların pahalı kapasite artırımı yatırımlarını önleyebilir.

Bireysel üreticilerin fazla enerjiyi değerlendirebilmesi için çeşitli sistemler uygulanır. Net faturalama bu sistemlerden biridir ve üreticinin fazla enerjiyi şebekeye verip ihtiyaç duyduğunda geri almasına olanak tanır. Eğer toplam üretim, tüketimi aşarsa, dağıtım şirketi bu fark için önceden belirlenen fiyatla ödeme yapar. Tüm elektrik akışı ölçülür ve buna göre hesaplama yapılır. Bu mekanizmalar, bireysel üreticilere ekonomik fayda sağlarken, yenilenebilir enerji kullanımını da teşvik eder [33].

3.4.2. Bugünkü değer yaklaşımı

Kapitalist ekonomilerde yatırımın temel hedefi, zaman içerisinde sermayeyi artırarak kâr elde etmektir. Ancak, paranın zaman içerisindeki değeri sabit kalmaz; bugün elimizde bulunan bir miktar para, gelecekte daha fazla değere ulaşabilir. Örneğin, bugün 1000 TL'niz varsa ve bunu yıllık %10 faizle bir bankaya yatırırsanız, bir yıl sonunda bu miktar 1100 TL olur. Bu da bugünkü 1000 TL'nin, bir yıl sonraki 1100 TL'ye eşdeğer olduğunu gösterir. Diğer bir ifadeyle, gelecekte elde edilecek 1100 TL'nin bugünkü değeri 1000 TL'dir.

Rüzgâr enerjisi projeleri, genellikle 20 ila 30 yıl gibi uzun vadeli bir zaman dilimini kapsar. Bu süreçte projeden hem gelir (fayda) hem de gider (maliyet) şeklinde düzenli nakit akışları oluşur. Bu nedenle, projenin ekonomik açıdan ne derece değerli olduğunu anlayabilmek için, bu uzun zaman dilimi içerisindeki tüm nakit hareketlerinin dikkate alınması gerekir.

Projenin mali analizinde farklı yıllara ait nakit akışları, bugünkü değere indirgenerek ortak bir referans zamanında toplanır. Genellikle bu referans yılı, projenin başladığı yıl olarak kabul edilir. Tüm nakit akışlarının bugünkü değerlerinin toplamı bize, projenin toplam ekonomik değerini verir [33].

Bugün yapılan C TL tutarındaki bir yatırımın, gelecekteki değeri aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanabilir:

$$A_1 = C(1 + i), A_2 = C(1 + i)^2, A_3 = C(1 + i)^3, \dots \dots \dots, A_n = C(1 + i)^n \quad (3.65)$$

$A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ sırasıyla 1., 2., 3., ... ve n. yıldaki değerleri ifade etmektedir. Burada i , faiz oranını ya da daha yaygın kullanılan ifadesiyle iskonto oranını temsil eder. Başka bir deyişle, n yıl sonra elde edilecek A_n tutarındaki bir ödemenin bugünkü değeri aşağıdaki şekilde verilir;

$$BD(A) = \frac{A_n}{(1 + i)^n} \quad (3.66)$$

Şimdi, n , yıl süresince sabit yıllık nakit akışı olduğunu varsayalım. Bu durumda, farklı yıllarda yapılacak A tutarındaki ödemelerin bugünkü değerleri şu şekilde olur;

$$BD(A)_1 = \frac{A}{(1 + i)}, BD(A)_2 = \frac{A}{(1 + i)^2}, BD(A)_3 = \frac{A}{(1 + i)^3}, \dots \dots \dots, \quad (3.67)$$

$$BD(A)_n = \frac{A}{(1 + i)^n}$$

Buna göre, tüm ödemelerin birikimli bugünkü değeri;

$$BD(A)_{1-n} = \frac{A}{(1 + i)} \left(1 + \frac{1}{(1 + i)} + \frac{1}{(1 + i)^2} + \dots + \frac{1}{(1 + i)^{n-1}} \right) \quad (3.68)$$

Bu ifadeyi sadeleştirirsek şu eşitlik elde edilir;

$$BD(A)_{1-n} = \frac{A}{(1 + i)} \left(\frac{1 - \left(\frac{1}{(1 + i)} \right)^n}{1 - \left(\frac{1}{(1 + i)} \right)} \right) \quad (3.69)$$

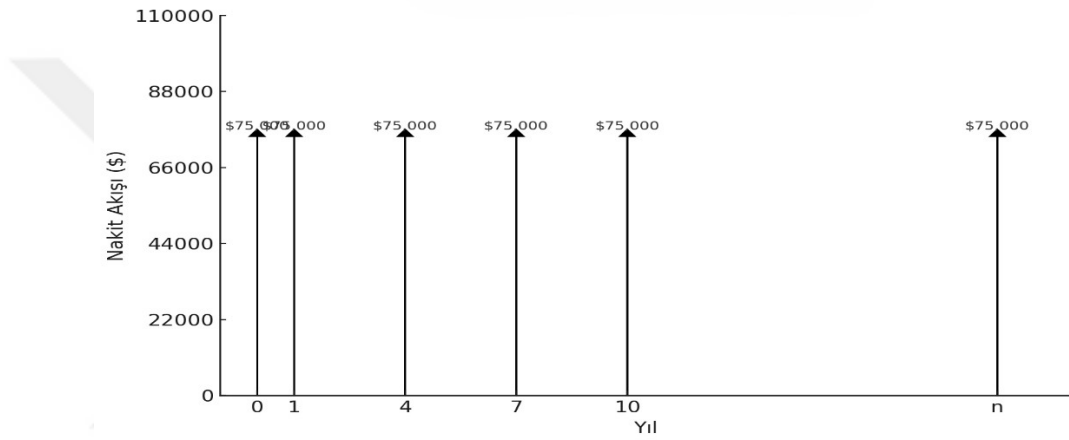
$$BD(A)_{1-n} = A \left(\frac{(1 + i)^n - 1}{i(1 + i)^n} \right) \quad (3.70)$$

Son olarak bugünkü değer olarak 4.70 ‘teki denklem elde edilir.

Örnek 1: Bir rüzgâr türbini yılda 1.250.000 kWh elektrik üretmektedir. Bu elektrik, 0,06 \$/kWh birim fiyatla satılmaktadır. Faiz oranı %6 ve proje süresi 25 yıl olduğuna göre, bu türbinin 25 yılda sağlayacağı gelirin bugünkü değeri nedir?

Yıllık gelir: $1.250.000 \times 0.06 = 75.000$ USD/Yıl (Yıllık sabit gelir)

3.70 ‘teki denklemde $i=0.06$, $n=25$, $A=75.000$ değerlerini yerine koyularak bugünkü değer hesaplanır. Şekil 3.18 ‘de nakit akış diyagramı görülmektedir.



Şekil 3.18. Yıllık sabit nakit akış diyagramı

Buna göre BD değeri 3.70 ‘teki denklemde yola çıkarak bugünkü değer 958.725 USD olarak hesaplanır.

Örnek 2: 12.000 \$ tutarında bir kredi, %6 faiz oranı ile alınarak bir projeye yatırım yapılmıştır. Bu borcun, 8 yıl boyunca eşit yıllık ödemeler ile geri ödenmesi gerekmektedir. Yıllık ödenecek taksit miktarını hesaplayınız.

Denklem (3.70) kullanılarak, yıllık ödeme miktarı şu formülle hesaplanır;

$$A = BD(A)_{1-n} \left(\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right)$$

denkleminde yerine koyularak yıllık taksit miktarı $A=1.932$ USD/yıl olarak elde edilir.

Yukarıda sunulan örneklerde, yatırımın bugünkü değerini hesaplarırken nominal faiz oranı ya da diğer adıyla nominal iskonto oranı esas alınmıştır. Ancak finansal analizlerde göz önünde bulundurulması gereken bir diğer önemli unsur da enflasyon olgusudur. Enflasyon, ekonomik sistem içerisinde mal ve hizmet fiyatlarının zamanla sürekli artış göstermesi şeklinde tanımlanabilir. Bu fiyat artışları, paranın satın alma gücünü azaltarak, aynı miktardaki paranın gelecekte daha az değer taşımasına neden olur. Bu bağlamda, enflasyon paranın reel değerini düşüren bir etkidir. Enflasyonun büyüklüğü ve değişim hızı, çoğunlukla ekonomik göstergelerden biri olan Tüketici Fiyat Endeksi (TÜFE) aracılığıyla ölçülmekte ve izlenmektedir. Bu endeks, enflasyonun ekonomik hesaplamalarda dikkate alınması gereken temel bileşenlerinden biridir.

Enflasyonun finansal hesaplamalara dâhil edilmesinde iki farklı yöntem kullanılabilir. İlk yaklaşımda, enflasyon oranı ile faiz oranı ayrı ayrı ele alınır; ikinci yöntemde ise, enflasyon oranı faiz oranı ile birleştirilerek hesaplamalarda enflasyona göre düzeltilmiş iskonto oranı kullanılır [33].

Enflasyon etkisiyle düzeltilmiş bu iskonto oranı, literatürde gerçek iskonto oranı (veya gerçek faiz oranı) olarak tanımlanır. Bu çalışmada, hesaplamalarda gerçek iskonto oranı esas alınacaktır. Kabaca bir yaklaşımla, gerçek faiz oranı I , nominal faiz oranı ile enflasyon oranı arasındaki fark olarak değerlendirilebilir. Ancak, daha doğru bir tanımlama ile gerçek faiz oranı aşağıdaki formül kullanılarak elde edilir:

$$1 + I = \frac{1 + i}{1 + r} \quad (3.71)$$

Burada r , enflasyon oranını temsil etmektedir.

Bazı malların fiyatları, genel enflasyon oranının üzerinde artış gösterebilir. Elektrik enerjisi bu duruma verilebilecek anlamlı bir örnektir. Bu tür fiyat artışları; yakıt kıtlığı, uluslararası piyasalardaki dalgalanmalar, ya da politik ve mevzuata ilişkin değişiklikler gibi çeşitli faktörlerden kaynaklanabilir. Bir malın fiyatındaki bu tür

genel enflasyon oranını aşan artışa literatürde fiyat artış oranı ya da eskalasyon (e) denir.

Fiyat artış oranı (e) ile enflasyon oranı (r) birlikte değerlendirildiğinde, bu birleşik oran görünür fiyat artış oranı (e_a) olarak tanımlanır ve aşağıdaki formül ile ifade edilir:

$$e_a = \{(1 + e)(1 + r)\} - 1 \quad (3.72)$$

Bu durumda hem enflasyon hem de fiyat artışı dikkate alınarak düzeltilmiş gerçek iskonto oranı (I) şu formül ile hesaplanır:

$$I = \frac{1 + i}{1 + e_a} - 1 \quad (3.73)$$

Örnek 2 ‘de enflasyon oranı %3 olarak alındığında, yıllık geri ödeme tutarını şöyle hesaplanır;

Faiz Oranı(i)= 0,06, Enflasyon Oranı(r)= 0,03 olarak alınıp 3.71 ‘de yerine koyulursa gerçek faiz oranı $I = \%0,95$ olarak elde edilir. 4.70 ‘teki denklemde yerine yazılırsa yıllık taksit miktarı $A = 1.485,6$ USD/yıl olarak hesaplanır.

Buna göre daha önce doğrudan faiz oranı dikkate alınarak yapılan hesaplama sonucunda yıllık ödeme miktarı $A = 1932$ USD/Yıl olarak hesaplanmasına rağmen enflasyon faktörü hesaba katılarak gerçek faizin hesaplanmasıyla yıllık ödeme miktarı $A = 1485,6$ USD/yıl ‘a düşmüştür.

3.4.3. Rüzgâr enerjisi yatırımlarında ekonomik etkinliğin değerlendirme kriterleri

Rüzgâr enerjisi projelerinin ekonomik değerlendirmesinde, yatırımın kârlılığı ve geri dönüş süresi gibi temel parametreler, nakit akışlarının sistematik biçimde analiz edilmesiyle belirlenir. Bu bağlamda, projeye ilişkin nakit akışları – yani, ilk yatırımın ardından yıllık bazda ortaya çıkan nakit girişleri ve çıkışları – proje ömrü boyunca

detaylı biçimde incelenir. Söz konusu değerlendirme, yatırımcının projenin ekonomik bütünlüğünü anlamasını sağlarken şu kritik sorulara da yanıt arar: Projenin bugünkü toplam ekonomik değeri nedir? Elde edilecek faydalar, yatırım ve işletme maliyetleri ile orantılı mıdır? Başlangıç yatırımı ne kadar sürede geri kazanılır? Projenin reel getiri oranı nedir veya bu proje için sermaye hangi faiz oranına kadar temin edilebilir.

Bu soruların çözümünde kullanılan ekonomik göstergeler, yatırım projelerinin niceliksel analizine imkân tanır. Başlıca dört ekonomik ölçüt, rüzgâr enerjisi projelerinin değerlendirilmesinde yaygın biçimde kullanılır: Net Bugünkü Değer (NBD), projeye ilişkin tüm nakit giriş ve çıkışlarının bugüne indirgenmiş net değerini verir ve projenin mutlak kârlılığını ifade eder. Fayda/Maliyet Oranı (BCR), sağlanan faydaların maliyetlere oranını belirleyerek yatırımın görece verimliliğini ölçer. Geri Ödeme Süresi, başlangıç sermayesinin proje tarafından hangi sürede geri kazandırılacağını ortaya koyar. Son olarak, İç Verim Oranı (IRR), projeden elde edilebilecek maksimum reel getiri oranını gösterir ve yatırım kararlarında finansal çekiciliğin değerlendirilmesinde kritik bir göstergedir. Bu ölçütler, özellikle risk analizleri ve yatırım karşılaştırmalarında nesnel karar alma süreçlerini destekler [33].

3.4.3.1. Net bugünkü değer

Net Bugünkü Değer (NBD), bir yatırım projesinin ekonomik etkinliğini belirlemede kullanılan temel bir göstergedir ve projenin ömrü boyunca oluşacak tüm gelir ve giderlerin, belirli bir iskonto oranı üzerinden bugünkü değere indirgenerek karşılaştırılması esasına dayanır. Bu yöntem, özellikle sermaye yoğun ve uzun vadeli enerji projelerinde, yatırımın zaman içerisindeki getirisini ölçerek, karar alma süreçlerinde nesnel bir değerlendirme sağlar.

Matematiksel olarak, net bugünkü değer; projenin süresi boyunca beklenen toplam gelirlerin bugünkü değerinden, ilk yatırım maliyeti ile yıllık işletme ve bakım giderlerinin bugünkü değerinin toplamının çıkarılmasıyla hesaplanır. Bu ilişki aşağıdaki denklemle ifade edilir;

$$NBD = NBD(NG)_{1-n} - (IY + NBD(NÇ)_{1-n}) \quad (3.74)$$

Bu denklemde, projenin her yıl elde edeceği net gelirler (NPD(NG)), belirli bir faiz oranı kullanılarak bugünkü değere indirgenir. Aynı şekilde, yıllık işletme ve bakım giderleri((NBD(NÇ)) de yine aynı faiz oranı ile bugünkü değere dönüştürülür. Bu iki değer arasındaki farktan, başlangıçta yapılan sermaye harcaması çıkarılarak yatırımın net getirisi bulunur.

Bu genel ifadenin, sabit yıllık gelir ve gider varsayımı altında açılımı ise şu şekildedir:

$$NBD = NG \left(\frac{(1 + I)^n - 1}{I(1 + I)^n} \right) - IY \left(1 + m \left(\frac{I(1 + I)^n - 1}{I(1 + I)^n} \right) \right) \quad (3.75)$$

Buradaki NG ifadesi, proje süresi boyunca her yıl elde edilecek net geliri; I değeri, sermayenin yıllık faiz oranını, yani paranın zaman değerini temsil eder. Denklemden n terimi, projenin ekonomik ömrünü yani kaç yıl süresince faaliyet göstereceğini belirtirken; m oranı ise her yıl yapılacak işletme ve bakım harcamalarının, ilk yatırım maliyetine oranını ifade eder. İlk yatırım tutarı ise IY ile gösterilmektedir.

Bu hesaplama sonucunda net bugünkü değer sıfırdan büyük ise, yatırım kârlı kabul edilir; çünkü bu durumda projenin sağlayacağı getiriler, yatırım ve işletme maliyetlerini karşılamadan ötesinde, yatırımcıya net kazanç sunar. Ayrıca, farklı projeler arasında seçim yapılacağı zaman, en yüksek net bugünkü değere sahip olan projenin tercih edilmesi, ekonomik açıdan en rasyonel yaklaşım olacaktır. Net bugünkü değer analizi, özellikle kaynak tahsisi, risk yönetimi ve uzun vadeli yatırım planlamasında bilimsel temellere dayalı, güvenilir ve etkili bir karar destek aracı olarak öne çıkar [33].

3.4.3.2. Fayda/maliyet oranı

Yatırım projelerinin ekonomik değerlendirilmesinde en sık başvurulacak ölçütlerden biri Net Bugünkü Değer (NBD) olsa da projelerin başlangıç sermayesi açısından farklılık

gösterdiği durumlarda yalnızca NBD 'ye dayalı karar almak yatırımcının algısını yanıltabilir. Özellikle büyük ölçekli yatırımlar, sağladıkları yüksek nakit girişleri nedeniyle daha küçük projelere göre daha etkileyici bir NBD değeri sunma eğilimindedir. Ancak bu durum, her zaman daha yüksek kârlılık veya verimlilik anlamına gelmez. Bu nedenle, projelerin sermaye verimliliğini ve ekonomik uygulanabilirliğini daha dengeli bir biçimde karşılaştırmak için kullanılan Fayda / Maliyet Oranı (FMO), daha güvenilir ve anlamlı bir değerlendirme ölçütü olarak öne çıkar.

Fayda / Maliyet Oranı, yatırım süreci boyunca elde edilecek toplam faydaların bugünkü değerinin; ilk yatırım maliyeti ile yıllık işletme ve bakım giderleri de dâhil olmak üzere toplam maliyetlerin bugünkü değerine oranlanması yoluyla hesaplanır. Bu oran, bir projenin yatırımına karşılık sağladığı finansal getirinin görece büyüklüğünü ortaya koyar ve özellikle farklı yatırım büyüklüklerine sahip projelerin aynı ölçekte değerlendirilmesine olanak tanır.

Bu oranın genel formülü aşağıda verilmiştir:

$$FMO = \frac{NBD(NG)_{1-n}}{IY + NBD(NÇ)_{1-n}} \quad (3.76)$$

Bu ifadede, yıllık net gelirlerin (NG) (faydaların) bugünkü değer toplamı, ilk yatırım tutarı IY ve işletme-giderlerinin (NÇ) bugünkü değer toplamına oranlanır. Ancak daha detaylı bir analiz amacıyla sabit nakit akışı ve yıllık gider varsayımları altında bu oran aşağıdaki gibi açılır:

$$FMO = \frac{NG \left[\frac{(1+I)^n - 1}{I(1+I)^n} \right]}{IY \left[1 + m \left(\frac{(1+I)^n - 1}{I(1+I)^n} \right) \right]} \quad (3.77)$$

Burada NG, her yıl elde edilmesi öngörülen sabit net geliri. I, sermaye için belirlenen faiz oranını. n, projenin toplam süresini. m ise yıllık işletme ve bakım giderlerinin ilk yatırım maliyetine oranını ifade eder. Bu denklemde yer alan tüm değişkenler,

yatırımın zaman boyutundaki verimliliğini ve mali etkinliğini dikkate alarak yatırımcının rasyonel bir karar almasını destekleyecek şekilde yapılandırılmıştır.

Elde edilen FMO değeri, projeye yatırılan her birim maliyetin, ne kadar ekonomik fayda ile geri döneceğini gösterir. Bu bağlamda $BCR > 1$ koşulu sağlanıyorsa, projenin sağlayacağı toplam fayda, katlanılan toplam maliyeti aşmakta olup, yatırım ekonomik açıdan uygulanabilir niteliktedir. FMO değeri 1'e ne kadar uzaksa, yatırımın göreceli verimliliği de o ölçüde yüksektir. Bu oran, özellikle sınırlı kaynakların en verimli şekilde kullanılmasını sağlamak amacıyla projeler arasında önceliklendirme ve kaynak tahsisi kararlarının verilmesinde önemli bir karar destek mekanizması olarak işlev görmektedir [33].

Sonuç olarak, Fayda / Maliyet Oranı, yalnızca bir yatırımın kârlılığını değil, aynı zamanda sermaye kullanımının etkinliğini de ölçen çok boyutlu bir kriter olup, özellikle farklı ölçek ve maliyet düzeyine sahip projelerin karşılaştırılmasında yatırımcılara kapsamlı bir perspektif sunar.

3.4.3.3. Geri Ödeme Süresi

Yatırım projelerinin ekonomik fizibilitesinin değerlendirilmesinde önemli göstergelerden biri olan geri ödeme süresi (Pay Back Period – PBP), bir projenin başlangıcında yapılan sermaye harcamalarının, projenin yaratacağı nakit akışları yoluyla geri kazanılması için gereken asgari zaman periyodunu ifade eder. Bu süre, projenin sağlayacağı faydaların (nakit girişlerinin) net bugünkü değeri ile, sermaye maliyetini ve işletme giderlerini içeren tüm maliyetlerin (nakit çıkışlarının) net bugünkü değeri birbirine eşit olduğunda başlar. Bu eşitlik şu şekilde tanımlanır:

$$NBD(NG)_{1-n} = IY + NBD(NÇ)_{1-n} \quad (3.78)$$

Denklemden, $NBD(NG)_{1-n}$ ifadesi, projenin ilk yılından n. yıla kadar elde edeceği tüm gelirlerin bugünkü değerini, $NBD(NÇ)_{1-n}$ ise aynı dönemdeki giderlerin bugünkü

değerini temsil eder. Bu eşitlik açıldığında, yıllık sabit gelir NG, Faiz oranı I ve proje süresi n dikkate alınarak şu forma ulaşılır:

$$NG \left[\frac{(1+I)^n - 1}{I(1+I)^n} \right] = IY \left[1 + m \left(\frac{(1+I)^n - 1}{I(1+I)^n} \right) \right] \quad (3.79)$$

Bu eşitlik, geri ödeme süresinin n yıllık değeri üzerinden çözülmesini mümkün kılar. Denklem sadeleştirildiğinde:

$$\frac{IY}{NG - m(IY)} = \left(\frac{(1+I)^n - 1}{I(1+I)^n} \right) \quad (3.80)$$

Bu ifadeden hareketle geri ödeme süresini doğrudan belirleyen genel formül türetilir. Denklem şu şekilde yeniden düzenlenir:

$$(1+I)^n = \left(1 - \frac{I(IY)}{NG - m(IY)} \right)^{-1} \quad (3.81)$$

Her iki tarafın doğal logaritması alınarak şu sonuca ulaşılır;

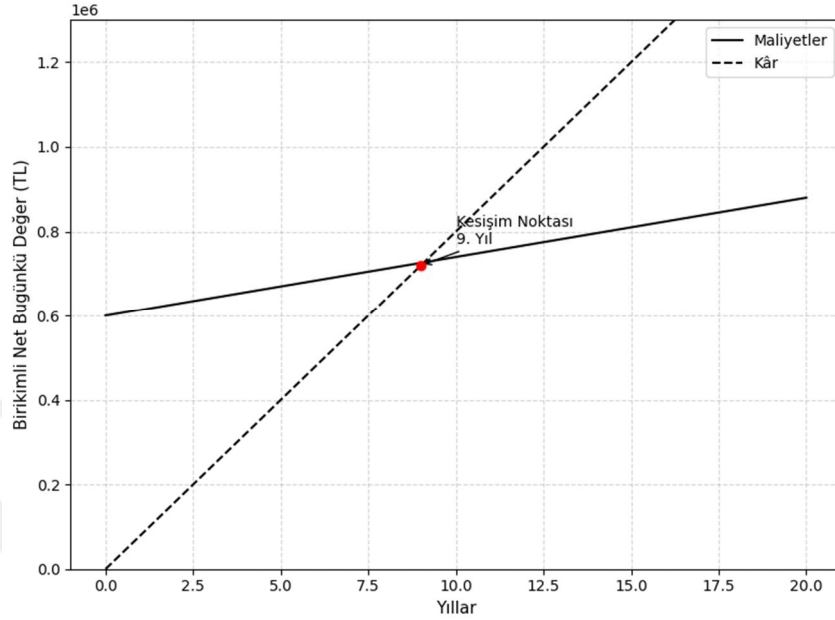
$$n \ln(1+I) = -\ln \left(1 - \frac{I(IY)}{NG - m(IY)} \right) \quad (3.82)$$

Böylece geri ödeme süresi şu genel formülle hesaplanabilir;

$$n = - \frac{\ln \left(1 - \frac{I(IY)}{NG - m(IY)} \right)}{\ln(1+I)} \quad (3.83)$$

Bu denklemde, yıllık sabit net gelir NG, sermaye için uygulanan faiz oranı I, başlangıç sermaye(ilk) yatırımı IY ve işletme ile bakım giderlerinin sermaye maliyetine oranı m parametreleri kullanılarak geri ödeme süresi doğrudan hesaplanabilmektedir. Bu analiz, yatırımın finansal geri kazanım sürecini zamana bağlı olarak sayısal biçimde

ortaya koyar ve yatırımcıların risk algısını ve stratejik planlamalarını yönlendirmede kritik rol oynar.



Şekil 3.19. Maliyet ve faydaların birikimli net bugünkü değeri ile geri ödeme süresini belirtildiği grafik

Söz konusu hesaplamaya ilişkin grafiksel bir örnek, tipik bir rüzgâr enerjisi projesi için Şekil 3.19 'da sunulmuştur. Bu grafikte, maliyetlerin ve faydaların birikimli net bugünkü değerleri zamana bağlı olarak gösterilmiş, maliyet eğrisi ile fayda eğrisi belirli bir noktada kesişmiştir. Bu kesişim noktası, yatırımın geri kazanıldığı yılı, yani geri ödeme süresini ifade etmektedir. Grafik incelendiğinde, projenin yatırım maliyetini 9. yılda geri kazandığı görülmektedir. Bu nedenle, yatırım geri dönüş süresinin kısa olması, yatırımın riskini azaltmakta ve getirilerin daha erken elde edilmesine olanak sağladığı için, geri ödeme süresi daha kısa olan projeler ekonomik açıdan daha avantajlı ve tercih edilebilir niteliktedir. Bu bağlamda, geri ödeme süresi, yatırım kararlarında sadece kârlılığı değil, aynı zamanda sermayenin likiditesini ve çevrim hızını da değerlendirmede önemli bir göstergedir [33].

3.4.3.4. İç verim oranı

Yatırım projelerinin ekonomik analizinde kullanılan en önemli performans göstergelerinden biri, iç verim oranıdır (IVO). İç verim oranı, bir yatırım projesine

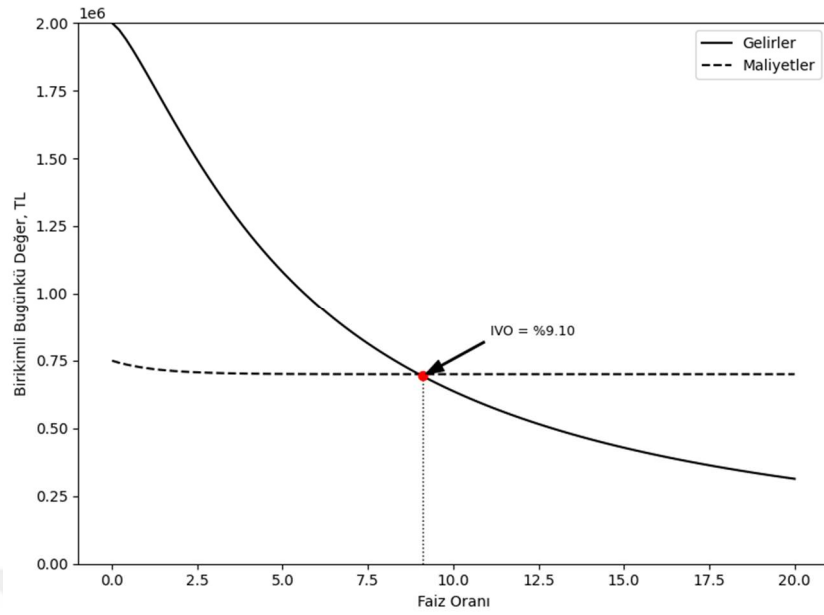
ilişkin gelecekteki tüm maliyetlerin birikimli net bugünkü değeri ile tüm faydaların birikimli net bugünkü değeri birbirine eşit olacak şekilde bulunan iskonto oranı olarak tanımlanır. Bu özel iskonto oranında, projenin net bugünkü değeri (NBD) sıfır olur. Başka bir ifadeyle, IVO, projenin ne kazanç ne de kayıp yarattığı, başa baş noktasını temsil eden getiri oranıdır.

Ekonomik açıdan bakıldığında IVO, söz konusu yatırımın sağlayabileceği maksimum reel kazanç oranını ifade eder. Pratik anlamda ise, yatırımcı açısından sermaye temin edebilmek için katlanılabilecek azami faiz oranıdır. Yatırımcı, projeye ilişkin finansmanı IVO 'ye eşit ya da daha düşük faiz oranları ile sağladığında, yatırım ekonomik olarak uygulanabilir niteliktedir. Ancak IVO 'nin üzerindeki faiz oranları, yatırımın zarar etmesine neden olur.

Bir projenin net bugünkü değeri IVO oranı ile iskonto edildiğinde sıfır olacağından, bu noktada yatırımın geri ödeme süresi (PBP) doğrudan projenin ekonomik ömrüne eşit hale gelir. Bu bağlamda, IVO kullanılarak net bugünkü değer aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir;

$$NBD(\text{Faydalar(NG)})_{1-n} = IY + NBD(\text{Maliyetler(NÇ)})_{1-n} \quad (3.84)$$

Bu matematiksel ifade, IVO 'nin tanımını somutlaştırır. Denklem, yatırımın sağladığı tüm yıllık faydaların bugünkü değerinin, ilk yatırım maliyeti ve yıllık işletme-bakım giderlerinin bugünkü değeri toplamına eşit olduğu özel iskonto oranını, yani IVO 'yi tanımlar. Bu eşitlik üzerinden IVO değeri sayısal yöntemlerle hesaplanarak, yatırımın faiz hassasiyeti, geri dönüş potansiyeli ve finansal sürdürülebilirliği hakkında kritik veriler elde edilir.



Şekil 3.20. Farklı Faiz Oranlarında Birikimli Net Bugünkü Değerler

$$NG \left[\frac{(1 + IVO)^n - 1}{IVO(1 + IVO)^n} \right] = IY \left[1 + m \left(\frac{(1 + IVO)^n - 1}{IVO(1 + IVO)^n} \right) \right] \quad (3.85)$$

Şekil 4.20 ‘deki grafik, bir yatırım projesinin farklı faiz oranlarında gelir ve maliyetlerinin birikimli bugünkü değerini karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Grafik üzerinde gelir eğrisi ile maliyet eğrisinin kesiştiği nokta, projenin İç Verim Oranı (İVO) olarak adlandırılır ve bu örnekte %9,10 seviyesinde gerçekleşmektedir. Bu kesişim, yatırımın net bugünkü değerinin (NBD) sıfır olduğu, yani projenin başa baş noktasını gösterir. Bu faiz oranında, elde edilecek gelirlerin bugünkü değeri, maliyetlerin bugünkü değerine tam olarak eşittir ve yatırım ne kâr ne zarar sağlar. Grafikte kesişim noktasının altındaki faiz oranları, projenin getirilerinin maliyetlerden daha yüksek olduğunu, yani yatırımın kârlı olduğunu ifade eder. Buna karşın, kesişim noktasının üstündeki faiz oranları ise, iskonto etkisinin artması nedeniyle gelirlerin bugünkü değerinin maliyetlerin altına düştüğünü ve yatırımın zarar ettirdiğini gösterir. Bu bağlamda, iç verim oranı, yatırımcının projeye maksimum hangi faiz oranıyla sermaye sağlayabileceğini gösteren kritik bir sınır değer olup, yatırımın ekonomik kabul edilebilirliğini belirlemede temel göstergedir [33].

Örnek 1: Kurulu gücü 3,3 MW olan bir rüzgâr enerjisi projesi için 3.000.000 \$ tutarında sermaye yatırımı gerekmektedir. Proje sahasının kapasite faktörü 0,34 olarak belirlenmiştir. Yıllık işletme ve bakım maliyetleri, ilk yatırımın %3'ü düzeyindedir. Gerçek Faiz oranı %5 olarak verildiğinde, aşağıdaki ekonomik analizlerin yapılması istenmektedir:

1. Net Bugünkü Değer (NBD)
2. Fayda / Maliyet Oranı (FMO)
3. Geri Ödeme Süresi (GÖS)
4. İç Verim Oranı (IVO)

Projenin ekonomik ömrü 25 yıl olarak kabul edilmiştir ve yerel elektrik satış fiyatı 0,05 \$/kWh 'dir.

Projeden beklenen yıllık elektrik üretimini hesaplayınız ve ardından yukarıdaki dört ekonomik göstereyi bulunuz.

$$\text{Yıllık Üretim (kWh)} = P \times CF \times 8760 = 3300 \times 0.34 \times 8760 = 9.822.480 \text{ kWh/yıl}$$

Yıllık Nakit Girişi miktarı şöyle elde edilir;

$$NG = 9.822.480 \times 0.05 = 491.124 \text{ \$/yıl}$$

Nakit Girişlerin NBD (Net Bugünkü Değer) için şu adımlar izlenecektir;

$$NBD_{\text{Gelir}} = 491.124 \times \left(\frac{(1 + 0.05)^{25} - 1}{0.05(1 + 0.05)^{25}} \right) = 9.922.742 \$$$

Yıllık İşletme ve Bakım maliyetleri (Yıllık Nakit Çıkışı);

$$NÇ = 3.000.000 \times 0.03 = 90.000 \text{ \$/yıl}$$

Nakit Çıkışlarının NBD (Net Bugünkü Değer) için şu adımlar izlenecektir;

$$NBD_{Gider} = 90.000 \times \left(\frac{(1 + 0.05)^{25} - 1}{0.05(1 + 0.05)^{25}} \right) = 4.268.451\$$$

Net Bugünkü Değer (NBD) için;

$$NBD = NBD_{Gelir} - NBD_{Gider} = 6.922.742 - 4.268.451 = 2.654.291\$$$

Bu değer pozitif olduğu için proje ekonomik olarak uygulanabilir ve kârlıdır.

Fayda-Maliyet Oranı için;

$$FMO = \frac{NBD_{Gelir}}{NBD_{Maliyet}} = \frac{6.922.742}{4.268.451} = 1.622$$

Bu değer 1'den büyük olduğu için proje ekonomik olarak verimlidir ve yatırım, maliyetine kıyasla %62 daha fazla ekonomik fayda sağlamaktadır.

Yatırımın Geri Ödeme Süresi için,

$$n = - \frac{\ln \left(1 - \frac{0.05 \times 3000000}{491.124 - 0.03 \times 3000000} \right)}{\ln(1 + 0.05)} = 9.6 \text{ Yıl}$$

Bu, yatırımın faiz koşulları dikkate alındığında yaklaşık 9 yıl 7 ayda kendini amorti ettiğini gösterir.

İç Verim Oranı için elimizde şu eşitlik var;

$$491.124 \left[\frac{(1 + IVO)^{25} - 1}{IVO(1 + IVO)^{25}} \right] = 3.000.000 \left[1 + 0.03 \left(\frac{(1 + IVO)^{25} - 1}{IVO(1 + IVO)^{25}} \right) \right]$$

Newton-Raphson metoduyla çözüldüğünde 4. İterasyon sonucunda $IVO = \%12,7$ olarak elde edilmiştir. $IVO = \%12,70$ demek, projeye en fazla $\%12,70$ faiz oranı ile sermaye sağlanabileceği anlamına gelir.



BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Geliştirilen İnteraktif Eğitim Platformu Tanıtımı ve Fonksiyonları

Geliştirilen WindStat Education Tool (WSET) arayüzü Şekil 4.1 'de de görüldüğü üzere, rüzgâr enerjisi alanında eğitim ve araştırma amaçlı tasarlanmış bir platformdur. Platformun geliştirilmesi sürecinde Eğitim Bilimleri, Bilgisayar Teknolojileri ve Enerji Sistemleri Mühendisliği öğretim üyesinden görüş alınarak gerekli düzenlemeler yapılmıştır. Program, kullanıcı dostu bir yapı sunarak, Weibull istatistiksel analizi ve enerji üretim tahmini gibi kritik işlevleri kolayca gerçekleştirebilmektedir. Giriş sayfasında yer alan "Tez Tanıtım", "Veri Oku ve Düzenle", "Veri Analizi", "Enerji Etüdü", "Ekonomik Etüd" ve "Rapor Al/Print Out" gibi tablolar, sistemin temel işlevselliğini organize eden bölümleri temsil etmektedir. Bu yapı, kullanıcılara belirli bir düzen içerisinde çalışmayı ve her modülün farklı fonksiyonlarını ayrı ayrı deneyimlemeyi mümkün kılar.

Programın giriş sayfasında, arayüzün temel amacı görsellerle zenginleştirilmiş bir şekilde tanıtılmaktadır. Sol tarafta yer alan grafiksel temsil, rüzgâr türbinlerinin performans analizini vurgularken, sağ tarafta bir kullanıcı bilgisayar üzerinden sistemin analiz araçlarını kullanmaktadır. Bu görsel düzen hem eğitici bir yaklaşımı hem de modern bir tasarım anlayışını yansıtarak kullanıcının programa hızlı bir şekilde adapte olmasını sağlar. Aynı zamanda, sistemin görsel tasarımı, akademik ve profesyonel kullanıcılar için sade ve işlevsel bir deneyim sunmaktadır.

Arayüzde kullanılan tablolar, kullanıcıların veri girişinden analiz ve raporlama süreçlerine kadar tüm adımları sistematik bir şekilde tamamlamasına olanak tanır. "Veri Oku ve Düzenle" sekmesi, kullanıcıların rüzgâr verilerini yüklemesini ve gerekli düzenlemeleri yapmasını sağlar. Bu sekmede kullanıcı, 10 dakikalık aralıklarla ölçülen rüzgâr hızları gibi verileri sisteme entegre ederek Weibull istatistiksel analizi için

uygun formatta hazır hale getirebilir. "Veri Analizi" sekmesi ise, bu verilerin istatistiksel yöntemlerle analiz edilmesini sağlayarak, rüzgâr enerji potansiyelinin detaylı bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanır.

Son olarak, programın "Ekonomik Etüd" ve "Enerji Etüdü" sekmeleri, rüzgâr enerji sistemlerinin ekonomik ve teknik değerlendirmelerini yapar. Bu modüller, yatırım maliyetlerinden yıllık enerji üretim tahminlerine kadar detaylı hesaplamalar sunar. Ayrıca, "Rapor Al/Print Out" sekmesi ile kullanıcılar elde ettikleri sonuçları profesyonel rapor formatında dışa aktarabilirler. Bu özellik, özellikle akademik çalışmalar ve saha uygulamaları için oldukça değerlidir. Geliştirilen bu arayüz, kullanıcıların hem teorik bilgilerini pratik uygulamalarla pekiştirmelerine hem de rüzgâr enerjisi projelerinde detaylı analizler yapmalarına olanak sağlar.



Şekil 4.1. Arayüz giriş sayfası

4.1.1. Veri girişi ve kullanıcı dostu arayüz tasarımı

Bu arayüz Şekil 4.2 'de de görüldüğü üzere, çevrim içi platformlardan veya meteoroloji istasyonlarından elde edilen rüzgâr hızı, yön ve sıcaklık verilerini analiz ederek; türbin seviyesine taşımak, hava yoğunluğu hesaplamak ve enerji üretim analizleri için gerekli ön işlemleri gerçekleştirmek amacıyla yapılandırılmıştır.

Kullanıcı, bu sekme altındaki modüller aracılığıyla verileri yükleyip analiz öncesi hazırlıkları sistematik olarak tamamlayabilmektedir.

İlk işlev olan “Veri Yükle” bölümü, kullanıcıya dış kaynaklı ölçüm verilerini sisteme aktarma imkânı sunar. Bu bölümde kullanıcı, bir Excel dosyasını seçerek içindeki tarih, saat ve farklı yüksekliklerde (örneğin WS1, WS2, WS3) ölçülmüş rüzgâr hızı verilerini uygulamaya yükler. Bu veriler, ekranın orta kısmında tablo biçiminde görüntülenir ve daha sonraki analizlerde kullanılmak üzere arayüzdeki diğer bileşenlerle entegre çalışır.

İkinci bölüm, “Türbin Yüksekliğine Rüzgâr Hızı ve Yüzey Pürüzlülük Katsayısı (α) Hesabı” başlığını taşır. Bu başlık altında üç temel işlev yerine getirilir. Öncelikle farklı yüksekliklerde ölçülmüş rüzgâr hızları kullanılarak, yüzey pürüzlülük katsayısı hesaplanır. Bu katsayı, atmosferin alt tabakasındaki rüzgâr profilini tanımlar ve güç kanunu temel alınarak belirlenir. Hesaplama, iki farklı yükseklikteki rüzgâr hızlarının ve ilgili yüksekliklerin oranı kullanılarak gerçekleştirilir. İkinci olarak, belirli bir pürüzlülük katsayısı yardımıyla ölçülen rüzgâr hızı, türbinin rotor merkezine karşılık gelen yükseklik seviyesine taşınır. Bu işlem, rüzgâr hızı profili denklemi kullanılarak gerçekleştirilir ve elde edilen yeni hız değerleri, sağ taraftaki tabloda “Güncellenmiş Hız Verisi” olarak görüntülenir. Üçüncü olarak, yön ve sıcaklık verileri de benzer şekilde güncellenerek analiz için uyumlu hale getirilir.

Üçüncü modül olan “Ölçüm Verileri İçin Hava Yoğunluğu Hesabı”, enerji hesaplamalarında kritik öneme sahip hava yoğunluğunun tahmini amacıyla tasarlanmıştır. Kullanıcıdan istasyonun yerden yüksekliği (m) ve ortalama sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$) gibi temel atmosferik parametreler talep edilir. Bu parametreler, ideal gaz yasasına dayalı yaklaşık bir formülle değerlendirilerek hava yoğunluğu hesaplanır. Hesaplanan değer, özellikle rüzgâr gücü ve enerji üretimi tahminlerinde doğrudan kullanılmaktadır.

Dördüncü ve son işlev olan “Analiz için Veri Seçimi” bölümü, kullanıcının analizde hangi veri setini ve hangi kolonları kullanacağını belirtmesine olanak tanır. Kullanıcı,

analizde ölçüm verilerini mi yoksa türbin yüksekliğine taşınmış verileri mi kullanacağını seçer. Ayrıca analizde kullanılacak rüzgâr hızı ve yönü veri başlıkları belirlenir. Bu seçim, Weibull dağılımı parametrelerinin tahmini, enerji üretimi hesapları ve diğer istatistiksel analizler için başlangıç noktası olarak işlev görür.

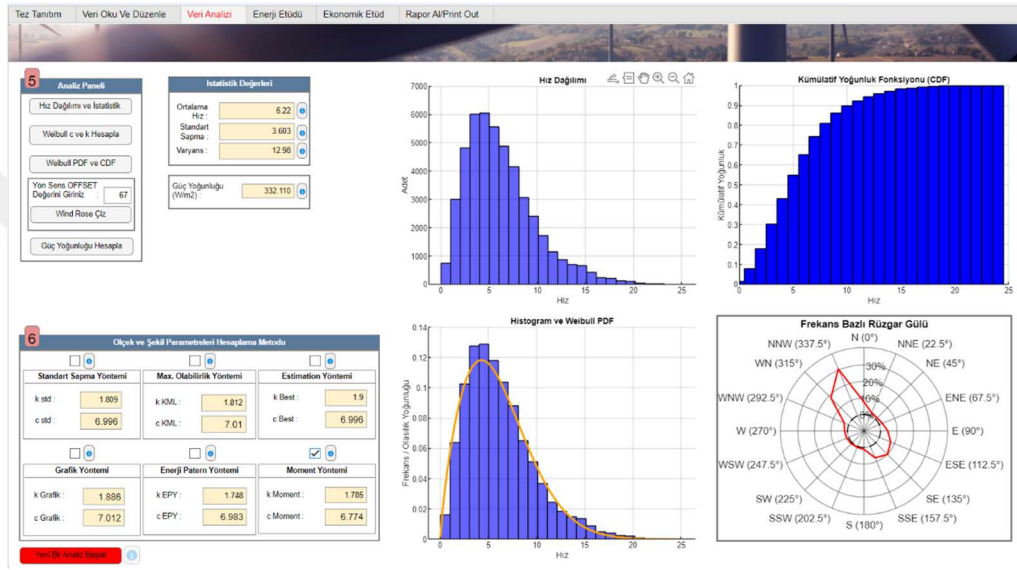
Orta panelde, yüklenen Excel dosyasından elde edilen ham ölçüm verileri (Tarih, Saat, WS1, WS2, WS3) tablo halinde kullanıcıya sunulmaktadır. Bu veriler, analizlerin temeli olup, kullanıcı müdahalesine göre dönüştürülmekte ve türbin seviyesine taşınabilmektedir. Sağ panelde ise türbin yüksekliğine taşınmış rüzgâr hızı, yön ve sıcaklık verileri yer alır. Bu güncellenmiş veriler, türbin performansı ve enerji tahmin modelleri için doğrudan kullanılabilir biçimdedir.

Sonuç olarak, bu arayüz; yüzey pürüzlülüğünün belirlenmesi, rüzgâr hızının yükseklikle taşınması, hava yoğunluğu hesaplaması ve analiz verisinin yapılandırılması gibi rüzgâr enerjisi potansiyel değerlendirmesinde kritik rol oynayan işlemleri entegre bir biçimde kullanıcıya sunmaktadır. Akademik düzeyde bakıldığında, bu işlevler hem mühendislik hem de meteorolojik analiz süreçleri için temel teşkil etmekte; saha verilerinin enerji üretim modellerine entegrasyonunu sağlamaktadır.

Şekil 4.2. Veri oku ve düzenle sayfası

4.1.2. Rüzgâr verilerinin analizi ve sonuçların sunumu

Şekil 4.3 ‘teki görsel incelendiğinde anlaşılabacaktır ki bu arayüz , rüzgâr hızlarının istatistiksel dağılımlarının incelenmesi, Weibull parametrelerinin hesaplanması ve rüzgâr enerji analizinde önemli sonuçların görselleştirilmesi amacıyla tasarlanmıştır. Tüm işlevler, öğrencilerin rüzgâr enerji sistemleri ile ilgili detaylı analizler yapmasını sağlayacak araçlar sunar. Aşağıda her bir işlev detaylı olarak açıklanmıştır:



Şekil 4.3. Veri analiz sayfası

4.1.2.1. Analiz paneli

Bu panel, rüzgâr verilerine dayalı olarak temel istatistiksel analizlerin gerçekleştirilmesini ve rüzgârın yönsel ve olasılıksal özelliklerinin detaylı biçimde incelenmesini sağlayan bir modüldür. Panel, öğrencilerin ve araştırmacıların veri setinden anlamlı fiziksel sonuçlar elde edebilmeleri için çok sayıda aracı bünyesinde barındırmaktadır.

İlk işlev olan “Hız Dağılımı ve İstatistik” düğmesi ile, incelenen zaman aralığı boyunca ölçülmüş rüzgâr hızlarının temel istatistiksel karakteristikleri hesaplanmaktadır. Bu özellikler arasında ortalama hız, standart sapma ve varyans gibi metrikler yer alır. Ortalama hız, tüm zaman serisi boyunca ölçülen hızların aritmetik

ortalamasıdır ve bölgenin rüzgâr enerjisi potansiyeli hakkında ilk göstergedir. Standart sapma, hızların ortalamadan ne kadar saptığını göstererek verinin değişkenliğini ve kararsızlığını ölçer. Varyans ise bu sapmaların karesinin ortalamasıdır ve istatistiksel dağılımın genişliğini ifade eder. Bu değerler, rüzgâr hızının güvenilirliği ve enerji üretimindeki süreklilik hakkında önemli bilgiler sunar. Tüm bu parametreler üst sağ köşede yer alan histogram grafiğiyle de görsel olarak desteklenmektedir.

İkinci olarak, “Weibull PDF ve CDF” işlevi kullanılarak, rüzgâr hızlarının istatistiksel modellenmesi yapılır. Rüzgâr verileri genellikle Weibull dağılımı ile iyi bir şekilde temsil edilebildiği için, bu fonksiyon yardımıyla hızların olasılık yoğunluğu fonksiyonu (Probability Density Function- PDF) ve kümülatif dağılım fonksiyonu (Cumulative Distribution Function- CDF) elde edilir. PDF grafiği, belirli hız aralıklarında rüzgârın ne sıklıkla görüldüğünü gösterirken; CDF, belirli bir rüzgâr hızına kadar olan hızların birikimli olasılığını sunar. Bu grafikler, sırasıyla alt orta ve üst sağ grafiklerde görselleştirilmiştir. Özellikle enerji üretim simülasyonlarında Weibull dağılımının sağladığı parametreler (şekil ve ölçek parametreleri) kritik rol oynamaktadır.

Üçüncü olarak yer alan “Yön Sensör OFFSET Değeri Girişi” bölümü, rüzgâr yön verilerinde cihaz kalibrasyonu veya kurulum hatalarından kaynaklı sapmaları düzeltmek için kullanılmaktadır. Kullanıcı, bilinen sapma değerini derece cinsinden girerek, yönetime ait verileri gerçek yön değerlerine uyumlu hale getirebilir. Bu düzeltmenin ardından “Wind Rose Çiz” butonuna tıklandığında, rüzgârın yönsel frekansları grafiksel olarak rüzgâr gülü (wind rose) biçiminde gösterilir. Bu gösterim, bölgedeki baskın rüzgâr yönlerinin belirlenmesi açısından son derece önemlidir. Türbin yerleşimi, kanat yönlenme stratejileri (yaw control) ve rüzgâr verimliliği analizi gibi birçok mühendislik uygulaması için temel teşkil eder.

Son olarak “Güç Yoğunluğu Hesapla” işlevi, birim alan başına düşen ortalama rüzgâr gücünü hesaplar. Güç yoğunluğu hesaplaması, şu formüle dayanır:

$$P = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad (4.1)$$

Burada ρ hava yoğunluğu (kg/m^3), v^3 ise rüzgâr hızının kübik ortalamasıdır. Rüzgâr hızının üçüncü kuvveti ile ilişkilendirilmesi, düşük hızlardaki küçük artışların bile enerji potansiyelinde büyük farklar yaratabileceğini göstermektedir. Bu nedenle, bu değer saha seçiminde ve türbinlerin güç eğrisiyle örtüşen çalışma aralıklarının belirlenmesinde büyük önem taşır.

4.1.2.2. Ölçek ve şekil parametreleri hesaplama metodu

Bu bölümde, rüzgâr hızlarının Weibull dağılımına uygun şekilde modellenmesi için gerekli olan iki temel parametre olan ölçek (c) ve şekil (k) katsayılarının çeşitli yöntemlerle hesaplanmasına olanak tanınmaktadır. Weibull dağılımı, rüzgâr enerjisi modellemelerinde yaygın olarak kullanılan ve iki parametreyle rüzgâr hızlarının davranışını oldukça başarılı şekilde temsil eden bir olasılık dağılımıdır.

İlk olarak Standart Sapma Yöntemi, temel istatistiksel değerler olan ortalama ve standart sapmayı kullanarak yaklaşık Weibull parametrelerini üretir. Bu yöntemde, gamma fonksiyonu üzerinden tanımlanan bir katsayılar ilişkisi ile şekil parametresi belirlenir ve ardından ölçek parametresi hesaplanır. Bu yöntem hızlı ve sade bir çözüm sunsa da özellikle veri seti küçükse veya uç değerler fazlaysa hataya açık olabilir.

İkinci yöntem olan Maksimum Olasılık (Maximum Likelihood) yöntemi, istatistiksel modellemelerde en güvenilir sonuçları sağlayan yöntemlerden biridir. Bu yöntemde, veri setiyle en yüksek uyumu sağlayan k ve c parametreleri olasılık fonksiyonunun maksimum olduğu noktada bulunur. Bu yaklaşım özellikle büyük veri setlerinde yüksek doğruluk sağlar, fakat sayısal optimizasyon gerektirdiği için hesaplama süresi biraz daha fazladır.

Üçüncü yöntem olarak Estimation (Tahminleme) Yöntemi, çeşitli nümerik algoritmalarla farklı kombinasyonlar deneyerek veri setine en uygun Weibull parametrelerini bulmayı hedefler. Genellikle "Best" olarak etiketlenen sonuçlar, en

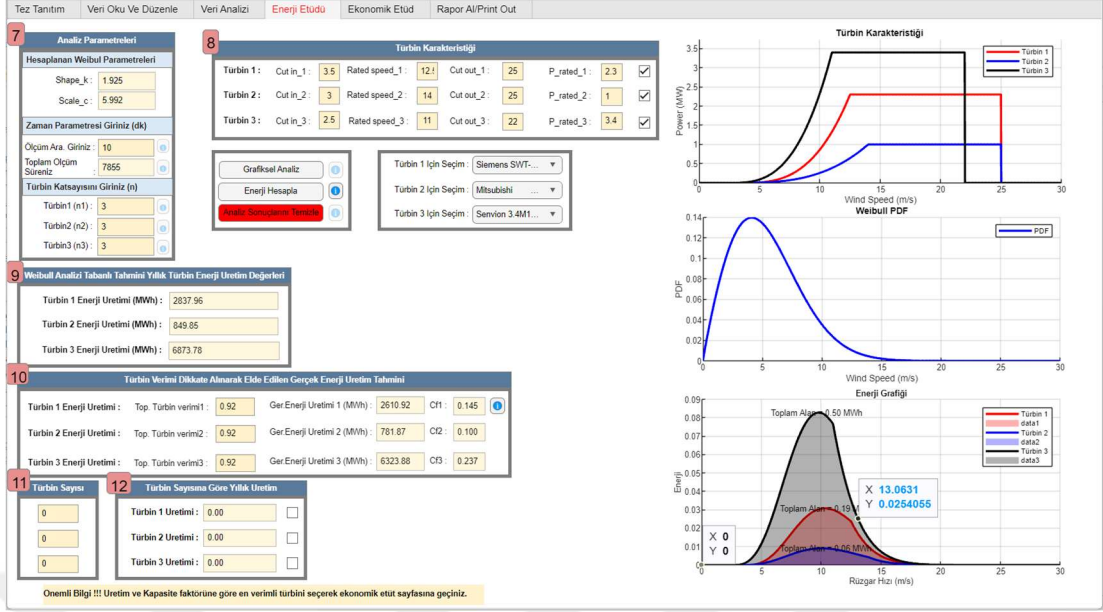
düşük hata fonksiyonuna sahip parametre kombinasyonlarıdır. Bu yöntem, diğer tekniklerle birlikte kullanılarak parametre doğruluğunu pekiştirmeye yarar.

Bunun dışında kullanıcıya grafiksel yöntem, moment yöntemi ve enerji patern yöntemi gibi alternatif hesaplama yöntemleri de sunulmaktadır. Grafik yöntemi, Weibull 'un logaritmik dönüşümüne dayalı doğrusal bir yaklaşım sunar. Moment yöntemi, verinin ortalaması ve varyansı gibi ilk istatistiksel momentlerini kullanarak parametre tahmini yapar. Enerji patern yöntemi ise, enerji üretim tahminlerini esas alarak Weibull parametrelerini optimize eder. Bu yöntem, enerji çıktısına en uygun teorik dağılımı elde etmeye yöneliktir.

Tüm bu yöntemlere ait k ve c değerleri tabloda karşılaştırmalı olarak gösterilmekte ve kullanıcıya hangi yöntemle en uygun uyumun sağlandığını değerlendirme olanağı sunulmaktadır. Kullanıcı aynı zamanda bu parametrelerin grafiklerdeki uyumunu PDF eğrisi üzerinden görsel olarak da inceleyebilir.

4.2. Rüzgâr Türbinleri Seçimi ve Enerji Etüdü

Şekil 4.4 'te gösterilen Enerji Etüdü sayfası, yapılan analizler sonucunda elde edilen veriler ışığında rüzgâr türbinlerinin enerji üretim potansiyelinin detaylı bir şekilde analiz edilmesine yönelik araçlar sunmaktadır. Her bir modül, rüzgâr türbinlerinin performansını hesaplamak, grafiklerle görselleştirmek ve enerji üretimini tahmin etmek için tasarlanmıştır. Bu araçlar, öğrencilere teorik bilgilerini pratik analizler yoluyla pekiştirme fırsatı verir. Aşağıda, sayfanın her bir işlemi detaylı olarak açıklanmıştır.



Şekil 4.4. Enerji etüdü sayfası

Enerji Etüdü sayfasında, Veri Analizi kısmında hesaplanan Weibull parametrelerinin (k ve c) ve diğer analiz parametrelerinin otomatik olarak bu bölüme aktarılmasıyla, rüzgâr türbinlerinin enerji üretim performanslarının detaylı bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanır. Bu yapı, öğrencilerin veri işleme sürecinde odaklanmalarını kolaylaştırır ve enerji üretimi analizini daha sistematik bir hale getirir. Sayfa, türbin karakteristiklerinin enerji üretimi üzerindeki etkilerini anlamak ve kapasite faktörlerini hesaplayarak her bir türbinin verimliliğini değerlendirmek için tasarlanmıştır.

4.2.1. Farklı türbin tiplerinin analizleri

Arayüzdeki bu sayfa, türbinlerin teknik parametrelerini (cut-in hızı, rated speed, cut-out hızı ve nominal güç gibi) girerek, farklı türbin modellerinin rüzgâr hızlarına bağlı enerji üretim performanslarını analiz etmeye olanak tanır. Bu parametrelerin grafiksel olarak görselleştirilmesi, öğrencilerin farklı türbin modellerini karşılaştırmalarını ve hangi türbinin belirli bir bölgeye daha uygun olduğunu anlamalarını sağlar. Örneğin, düşük cut-in hızına sahip bir türbin, düşük rüzgâr hızlarının hâkim olduğu bölgelerde daha fazla enerji üretebilirken, yüksek cut-out hızına sahip bir türbin yüksek rüzgâr hızlarında daha verimli olabilir. Bu analizler, öğrencilerin türbin seçimi ve yerleşimi

konusundaki kararlarını teknik verilerle desteklemelerini sağlar. Kullanıcı ister sistemde kayıtlı türbinlerin verileri, isterse de kendi gireceği türbin verileri ile enerji analizi yapabilmektedir.

4.2.2. Kapasite faktörünün hesaplanması

Her bir türbin için kapasite faktörünün (CF) hesaplanması, türbinlerin yıllık enerji üretim potansiyelinin değerlendirilmesi açısından kritik bir adımdır. Kapasite faktörü, türbinin maksimum potansiyel gücüyle gerçekte ürettiği enerji arasındaki oranı ifade eder ve türbinin sahada ne kadar verimli çalıştığını gösterir. Bu hesaplama, öğrencilerin rüzgâr türbinlerinin verimliliklerini karşılaştırmalarına ve kapasite faktörünün enerji üretimindeki önemini anlamalarına yardımcı olur. Örneğin, $CF=0.45$ olan bir türbinin, yıllık maksimum kapasitesinin %45'ini üretebildiği anlamına gelir. Bu bilgi, özellikle saha yerleşimi ve türbin seçiminde hayati önem taşır.

Bu sayfa, öğrencilerin farklı türbin modellerinin enerji üretimine etkilerini analiz etmelerini ve kapasite faktörünü hesaplayarak bu etkileri daha kapsamlı bir şekilde değerlendirmelerini sağlar. Öğrenciler, türbin teknik parametreleri ile rüzgâr hızlarının Weibull dağılımı arasında bir bağ kurarak, teorik bilgilerini pratik analizlerle pekiştirir. Ayrıca, farklı türbinlerin performanslarının grafiksel olarak karşılaştırılması, türbin seçimi ve optimizasyon süreçlerine yönelik bir anlayış kazanmalarını sağlar.

Sonuç olarak, bu sayfa, öğrencilerin rüzgâr enerji projelerinde kullanılan analitik araçlarla çalışarak enerji üretimi ve türbin performansı arasındaki ilişkiyi kavramalarını sağlar. Bu süreç, öğrencilerin mühendislik ve veri analizi becerilerini geliştirmelerine olanak tanırken, enerji projelerinde daha bilinçli kararlar almalarını destekler. Kapasite faktörünün hesaplanması ve türbin parametrelerinin etkilerinin incelenmesi, öğrencilere rüzgâr enerjisi projelerinde etkili değerlendirmeler yapabilme yetkinliği kazandırır.

4.2.3. Grafiklerin yorumlanması

Türbin karakteristiği grafiği, türbinlerin rüzgâr hızına bağlı olarak güç üretimlerini görsel bir şekilde ifade etmektedir. Bu grafik, cut-in, rated ve cut-out hızlarını net bir şekilde gösterir. Cut-in hızı, türbinin enerji üretimine başladığı minimum rüzgâr hızını; rated speed, maksimum güç üretimini gerçekleştirdiği hızı; cut-out hızı ise güvenlik nedeniyle türbinin durduğu maksimum rüzgâr hızını temsil eder. Öğrenciler, bu grafik sayesinde türbinlerin farklı hız aralıklarındaki performanslarını karşılaştırabilir ve belirli bir bölgeye uygun türbin seçiminde etkili bir analiz gerçekleştirebilirler. Bu grafik, özellikle türbinlerin hangi hızlarda daha verimli çalıştığını görselleştirerek, türbin seçimi ve tasarımında önemli bir rehber niteliği taşır.

Weibull Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu, rüzgâr hızlarının olasılık dağılımını görselleştiren bir başka önemli grafikdir. Bu grafik, yapılan analiz sonucunda elde edilmiş olan c ve k parametrelerine bağlı olarak üretilmiştir. Öğrenciler, bu grafik aracılığıyla rüzgâr hızlarının enerji üretimi üzerindeki etkilerini anlayabilir ve baskın hız aralıklarının enerji üretimindeki önemini kavrayabilirler. Bu görselleştirme, teorik Weibull dağılımının pratik analizlerde nasıl kullanıldığını öğrenmeleri açısından büyük bir öneme sahiptir. Özellikle enerji üretim tahminlerinin doğruluğunu artıran Weibull PDF grafiği, öğrencilerin analitik düşünme becerilerini geliştirmelerine katkı sağlar.

Enerji Yoğunluğu Grafiği, her bir türbinin toplam enerji üretimine olan katkısını görselleştirir. Türbinlerin belirli rüzgâr hızlarında ürettiği enerji, Weibull dağılımı ile ağırlıklandırılmış bir şekilde ifade edilir. Bu grafik, türbinlerin enerji üretiminde ne kadar etkili olduğunu net bir şekilde görselleştirir. Öğrenciler, bu grafik aracılığıyla farklı türbinlerin enerji üretim potansiyellerini analiz ederek türbin sayısı ve özelliklerinin projedeki enerji üretimi üzerindeki etkilerini değerlendirebilirler. Bu analiz, öğrencilerin saha düzenlemeleri ve türbin yerleşimi konularında daha bilinçli kararlar almasına katkı sağlar.

Bu grafikler, öğrencilerin rüzgâr enerjisi projelerinde kullanılan türbin performans analizini ve enerji üretim tahminlerini görselleştirme yetkinliklerini artırır. Grafiklerin görsel doğası, teorik bilgilerin daha kolay anlaşılmasına olanak tanırken, öğrencilerin bu bilgileri gerçek hayattaki problemlere uygulamasını sağlar. Özellikle farklı türbin karakteristiklerinin enerji üretimine etkilerini analiz eden öğrenciler, mühendislik tasarımı ve veri analizi konularında yetkinliklerini artırır. Bu süreç, öğrencilerin akademik ve mesleki başarılarına önemli katkılar sunar ve rüzgâr enerjisi sistemleriyle ilgili derin bir kavrayış kazandırır.

4.3. Ekonomik Etüd

Şekil 4.5 'te gösterilen bu arayüz sayfası, yenilenebilir enerji projelerinin ekonomik fizibilitesini değerlendirmek amacıyla geliştirilmiş kullanıcı dostu bir analiz platformudur. MATLAB App Designer ortamında hazırlanan bu uygulama, enerji yatırımlarının finansal uygulanabilirliğini hem sayısal hem de görsel açıdan inceleyerek, yatırımcılara ve araştırmacılara karar verme süreçlerinde destek sunar. Arayüz; yatırım maliyetlerinin tanımlanması, gelir ve gider projeksiyonlarının oluşturulması, yıllık nakit akışının hesaplanması, borç geri ödeme sürecinin izlenmesi ve temel finansal göstergelerin yorumlanması gibi çok boyutlu ekonomik analizleri bütüncül biçimde sunmaktadır.

Uygulamanın sol tarafında yer alan giriş paneli, kullanıcıya projeye ilişkin sabit ve değişken maliyet girdilerini ayrıntılı şekilde tanımlama imkânı sunar. Türbin sayısı, birim maliyet, altyapı giderleri, lisans ücretleri, danışmanlık ve sigorta gibi kalemler kullanıcı tarafından girilir ve bu veriler toplam yatırım maliyetinin otomatik olarak hesaplanmasında kullanılır. Aynı şekilde, yıllık işletme giderleri, elektrik satış fiyatı, fiyat artış oranı, karbon sertifikası geliri ve teşvikler gibi değişkenler tanımlanarak projenin yıllık nakit akış yapısı oluşturulur.

Gelir ve gider verilerine dayalı olarak hazırlanan grafikler aracılığıyla, yatırımın zaman içinde nasıl bir ekonomik yapı sergilediği kolaylıkla analiz edilebilir. Yıllık gelir ve giderlerin gösterildiği grafik, zamanla artan bir gelir eğilimi sunarken, sabit

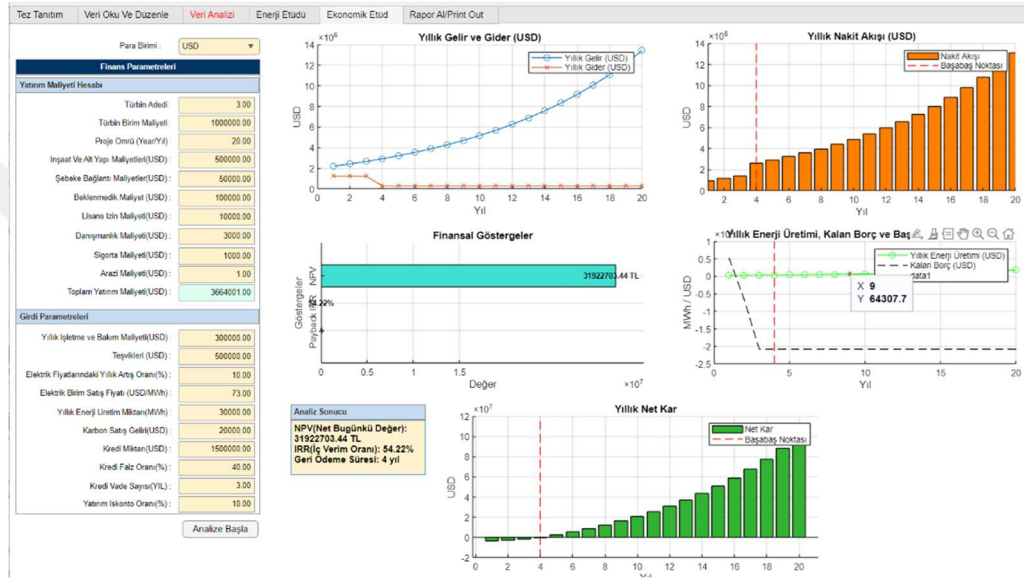
kalan giderler ile birlikte yatırımın artan kârlılık potansiyelini vurgular. Özellikle enerji fiyatlarının her yıl belirli oranda artması senaryosu, bu grafikteki gelir eğrisinin yukarı yönlü seyrini açıklar. Yatırımın yıllık bazda sağladığı net nakit akışı, ayrı bir grafik üzerinde sunulmakta ve yatırımın kendini kaçınıcı yılda amorti ettiğı "başı baş noktası" ile açıkça belirtilmektedir. Bu görsel veri, yatırımın geri dönüş süresi hakkında doğrudan fikir verir.

Merkezde yer alan finansal göstergeler panelinde üç temel ekonomik performans kriteri sunulmaktadır: net bugünkü değeri (NPV), iç verim oranı (IRR) ve geri ödeme süresi. Bu göstergeler, yatırımın ekonomik olarak ne ölçüde verimli ve sürdürülebilir olduğunu göstermekte, aynı zamanda yatırımcı açısından karar verme sürecine somut temel oluşturmaktadır. Net bugünkü değeri, yatırımın bugünkü ekonomik kazancını temsil ederken; iç verim oranı, yatırımın sağlayacağı yıllık ortalama getiriyi ifade eder. Geri ödeme süresi ise, başlangıç maliyetlerinin kaç yıl içerisinde karşılandığını göstererek yatırımın risk düzeyini yansıtır.

Arayüzde ayrıca yıllık enerji üretiminin sürekliliğini ve krediyle finanse edilen projelerde geri ödeme sürecini gösteren bir grafik bulunmaktadır. Burada üretimin sabit kalması, teknik sürekliliğı ve gelir öngörülebilirliğini ifade ederken, kalan borcun zaman içinde azalarak sıfırlanması, yatırımın finansal olarak sürdürülebilir olduğunu işaret eder. Bu grafik, özellikle dış finansman kullanılan projelerde kredi servis yükümlölüklerinin yönetilmesi açısından önem taşır. Yıllık net kârın yıllara göre artan bir eğilim gösterdiği bir diğeri grafik ise, projenin sadece borcunu kapatmakla kalmayıp sonraki yıllarda yüksek düzeyde ekonomik getiri sağladığını ortaya koyar. Kârlılığın başladığı yıl başa baş çizgisi ile belirlenmiş olup, bu bilgi yatırımın verimli hale geldiğı kritik noktayı gösterir.

Tüm bu analizlerin özet bilgisi, arayüzün altında yer alan analiz kutusunda kullanıcıya metinsel olarak sunulmaktadır. Bu kutu, net bugünkü değeri, iç verim oranı ve geri ödeme süresini sayısal olarak paylaşarak karar vericinin nihai değeriendirme yapmasını kolaylaştırır. Görsel ve sayısal verilerin entegre sunumu sayesinde, yatırım projeleri çok yönlü bir ekonomik analizden geçirilmiş olur.

Sonuç olarak, bu arayüz, enerji yatırımlarının ekonomik fizibilitesini değerlendirmek için etkili bir karar destek aracıdır. Zaman serisi analizleri, grafik destekli geri ödeme modelleri ve özet finansal göstergeler sayesinde, yatırımcılar projelerin kârlılık, sürdürülebilirlik ve risk düzeyi hakkında kapsamlı bilgi edinir. Bu yapı, sadece bir hesaplama aracı değil, aynı zamanda bir stratejik planlama ve ekonomik analiz platformu olarak da değerlendirilebilir.



Şekil 4.5. Ekonomik Etüd sayfası

4.4. Geliştirilen Uygulama İle İlgili Test Geliştirilmesi

Geliştirilen uygulama platformunun değerlendirilmesine yönelik olarak bir test formu oluşturulmuştur. Bu test, platformun farklı boyutlardaki yeterliliklerini çok yönlü olarak ölçmeyi amaçlamakta olup toplamda beş ana başlık altında yapılandırılmıştır: İçerik uygunluğu, pedagojik yapı, dil kullanımı, görsel tasarım, ve genel değerlendirme. Her bir başlık altında yer alan maddeler, katılımcıların uygulamanın bilimsel, eğitsel ve kullanıcı odaklı yönlerini ayrı ayrı değerlendirmelerine olanak tanıyacak şekilde tasarlanmıştır. Böylelikle, uygulamanın hem öğretimsel etkinliği hem de kullanıcı deneyimi açısından kapsamlı bir değerlendirme süreci gerçekleştirilmiştir.

Bu değerlendirme testi, Kocaeli Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Lisans Programı ile Gazi Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Lisans ve Yüksek Lisans Programlarında öğrenim görmekte olan öğrencilere uygulanmıştır. Teste toplam 25 öğrenci geri dönüş sağlamış ve uygulama hakkında değerlendirmelerini bildirmiştir. Öğrencilerden elde edilen yanıtların istatistiksel dağılımı, Şekil 4.6 ile Şekil 4.10 arasında sunulan grafikler aracılığıyla görselleştirilmiş ve her bir değerlendirme boyutu özelinde analiz gerçekleştirilmiştir.

Derecelendirme Ölçeği:

Testi aşağıdaki derecelendirme ölçeğine göre değerlendiriniz.

1 = Kesinlikle Katılmıyorum 2 = Katılmıyorum 3 = Kararsızım 4 = Katılıyorum
5 = Kesinlikle Katılıyorum

İçerik Uygunluğu

No	Madde	1	2	3	4	5
1	Uygulamada sunulan içerik bilimsel olarak doğrudur.					
2	Uygulamada sunulan içerik günceldir.					
3	Uygulamada enerji analiz sırası, öğrenme sürecine uygun şekilde yapılandırılmıştır.					
4	Geliştirilen uygulama hedef kitleye (öğrencilere) uygun bir derinliktedir.					
5	Uygulama içeriği, enerji analizi (Weibull) konusunda yeterli kapsam sunmaktadır.					
6	Geliştirilen uygulamada Weibull analizi, türbin seçimi ve yatırım hesaplamaları anlaşılır bir şekilde sunulmuştur.					

Pedagojik Yapı

No	Madde	1	2	3	4	5
1	Uygulamadaki içerik açık, net ve kolay anlaşılabilir.					
2	Uygulamadaki içerik sistematik olarak tasarlanmıştır.					
3	Öğrenci merkezli bir öğrenme yaklaşımı benimsenmiştir.					
4	Uygulama, kavramsal öğrenmeyi destekleyecek örnek içermektedir.					

5	Uygulama kullanılırken öğrencilerin öğrenme sürecini destekleyen aşamalı açıklamalar yapılmıştır.					
6	Konu geçişleri arasında anlamlı bir bağ kurulmuştur.					
7	Uygulamanın öğretimsel değeri yüksektir.					
8	Uygulamanın öğrenmeye fayda sağlayacağını düşünüyorum					

Dil

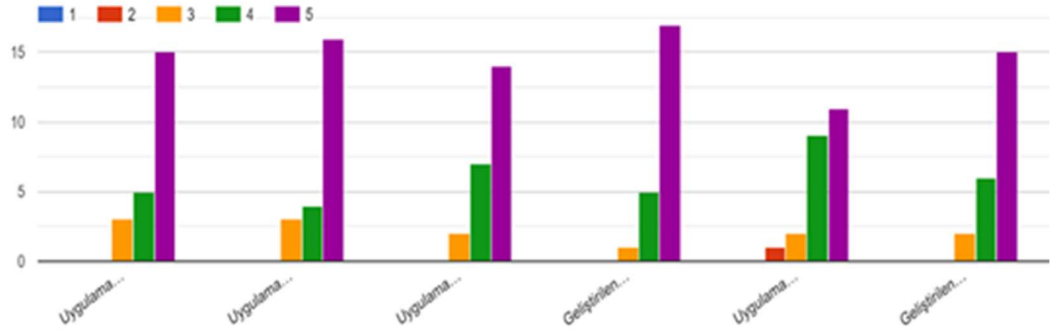
No	Madde	1	2	3	4	5
1	Uygulamada kullanılan dil sade, açık ve anlaşılırdır.					
2	Teknik terimler yerinde kullanılmış ve gerektiğinde açıklanmıştır.					
3	Yazım ve dilbilgisi açısından hatasız bir yapı sergilenmektedir.					
4	Hedef kitleye uygun dil düzeyi kullanılmıştır.					
5	Yabancı kökenli terimlerin Türkçe karşılıkları uygun biçimde belirtilmiştir.					

Görsel Tasarım

No	Madde	1	2	3	4	5
1	Görseller (grafikler, tablolar, diyagramlar) içerikle uyumludur.					
2	Görseller (grafikler, tablolar, diyagramlar) içeriği açıklayıcıdır.					
3	Grafikler ve tablolar doğru veriye dayalıdır					
4	Grafikler ve tablolar verileri yorumlamayı kolaylaştırmaktadır.					
5	Uygulamada kullanılan tipografi (Sayfa düzeni, başlıklandırma, yazı boyutu ve renk seçimi vb.) kullanıcı dostudur.					
6	Görsel unsurlar, içerikte kullanılan metni pekiştirici niteliktedir.					
7	Uygulama arayüzü kullanıcıyı yönlendirecek şekilde tasarlanmıştır.					

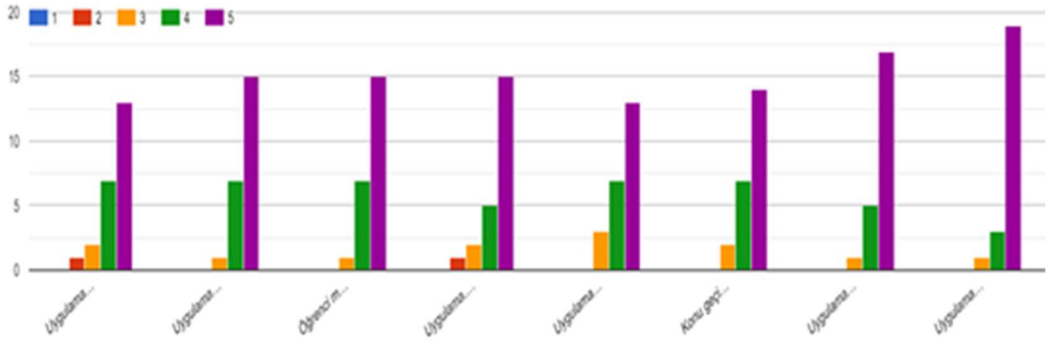
Genel Değerlendirme

No	Madde	1	2	3	4	5
2	Uygulama, Lisans/ Y Lisans eğitiminde kullanılmak üzere uygundur.					
3	Uygulama yenilikçi tasarıma sahiptir.					
4	Uygulama, özgün bir yapıya sahiptir.					
5	Uygulamayı benzer alanlarda kullanılmak üzere tavsiye ederim.					



Şekil 4.6 İçerik uygunluğu değerlendirme

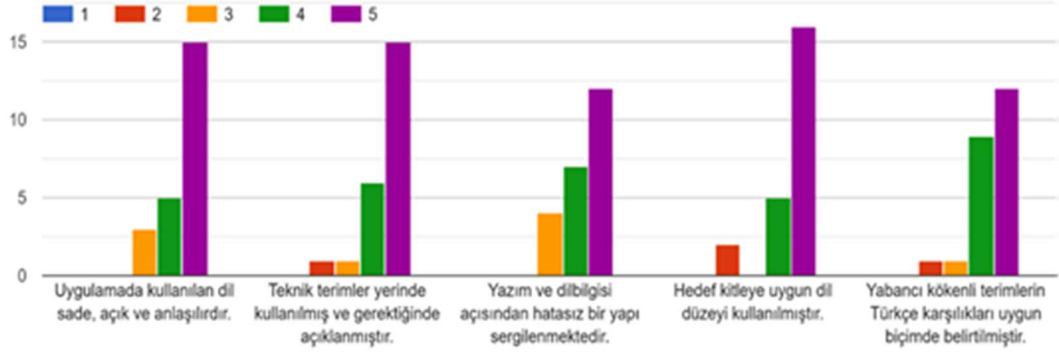
Test sonuçları incelendiğinde, katılımcı yanıtlarının ağırlıklı olarak 4 ve 5 puan düzeyinde yoğunlaştığı görülmektedir. Katılımcıların büyük çoğunluğu, uygulamada sunulan içeriğin bilimsel açıdan doğru, güncel bilgilerle uyumlu ve konu kapsamı bakımından yeterli olduğu görüşündedir. Özellikle Weibull analizi, rüzgâr türbini seçimi ve yatırım hesaplamaları gibi teknik bileşenlerin, öğrencilerin düzeyine uygun biçimde yapılandırıldığı ve anlaşılır bir yaklaşımla sunulduğu yönünde ortak bir kanaat oluşmuştur. Bu bulgular, uygulama içeriğinin hedef kitle ile uyumlu ve eğitsel amaçlara hizmet edecek şekilde etkili biçimde tasarlandığını ortaya koymaktadır.



Şekil 4.7. Pedagojik yapı değerlendirme

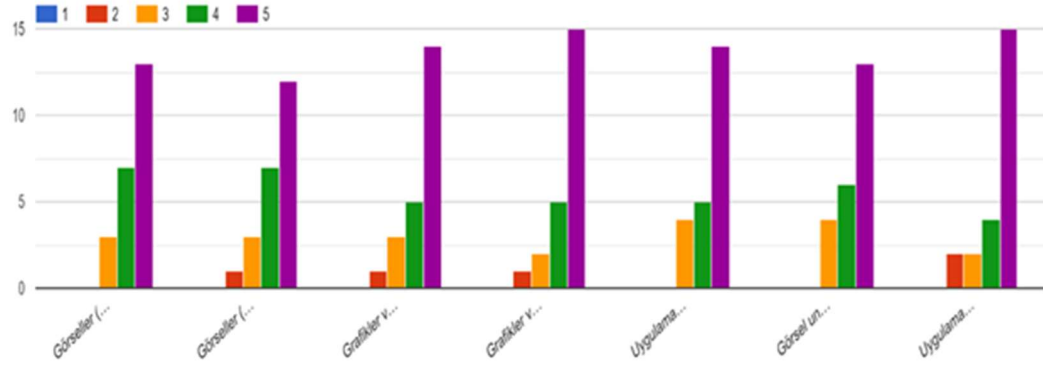
Test sonuçlarına göre, katılımcıların yanıtları ağırlıklı olarak 4 ve 5 puan aralığında yoğunlaşmıştır. Bu durum, geliştirilen uygulamanın öğrenmeyi destekleyici, öğrenci merkezli ve aşamalı açıklamalar üzerine yapılandırılmış bir öğretim yaklaşımı benimsediği yönünde güçlü bir kanaat oluştuğunu göstermektedir. Ayrıca, konular arasındaki geçişlerin anlamlı bir bütünlük içinde sunulduğu ve kavramsal öğrenmeyi destekleyici unsurların etkin biçimde entegre edildiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu

bulgular, uygulamanın öğretim tasarımı açısından yüksek düzeyde yeterlilik sergilediğini ve pedagojik açıdan güçlü bir yapıya sahip olduğunu ortaya koymaktadır.



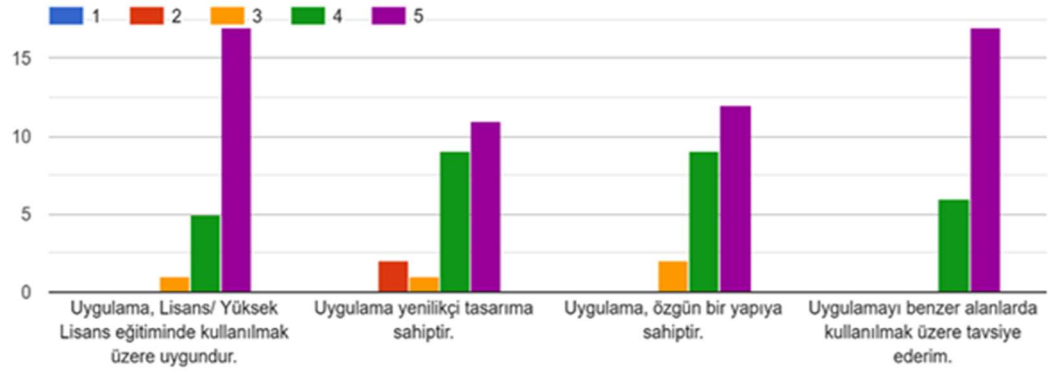
Şekil 4.8 Dil değerlendirmesi

Testteki cevaplar Puan 5 ve 4 ‘te yoğunlaşmıştır. Dil açısından uygulama oldukça anlaşılır, sade ve teknik olarak doğru bulunmuştur. Yazım ve dilbilgisi hataları tespit edilmediği görülmüştür. Teknik terimlerin yerinde kullanımı ve gerektiğinde açıklanması açısından da başarılı bulunmuştur.



Şekil 4.9 Görsel tasarım değerlendirmesi

Şekil 4.9 ‘da cevaplar Puan 5 ve 4 ‘te yoğunlaşmıştır. Uygulamanın arayüz tasarımı, grafiklerin veri ile uyumu, tipografi, ve kullanıcı dostu sayfa düzeni açısından olumlu bulunmuştur. Öğrenciler özellikle grafiklerin veriyle tutarlı ve yorumlamayı kolaylaştırıcı nitelikte olduğunu ifade etmiştir. Arayüz, kullanıcıyı yönlendirme açısından başarılı olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.10 Genel değerlendirme

Testteki cevaplar Puan 5 ve 4 ‘te yoğunlaşmıştır. Geliştirilen platform eğitimde kullanılmaya uygun bulunmuştur. Ayrıca katılımcıların çoğu uygulamayı benzer alanlardaki çalışmalar için tavsiye etmeye istekli olduğunu belirtmiştir. Bu, geliştirilen uygulamanın sektörde/akademide değer görebileceğine işaret etmektedir.

BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışma kapsamında, rüzgâr enerjisi sistemlerinin matematiksel modellemesi, istatistiksel analizi ve türbin seçim sürecine yönelik karar destek araçlarının geliştirilmesi hedeflenmiştir. Projenin temel amacı, rüzgâr verilerinin analizi yoluyla türbin enerji üretiminin doğru biçimde tahmin edilmesi ve buna bağlı olarak optimum türbin seçiminin yapılabilmesidir. Bu bağlamda, hem teorik altyapıya dayalı akademik literatür taraması hem de MATLAB App Designer kullanılarak geliştirilen etkileşimli bir arayüz ile kapsamlı bir uygulama gerçekleştirilmiştir.

Yapılan analizler sonucunda, Weibull dağılımı kullanılarak ölçülen rüzgâr verilerinin şekil (k) ve ölçek (c) parametreleri farklı yöntemlerle hesaplanmış ve her bir yöntemin avantajları karşılaştırılmıştır. Standart sapma, moment, maksimum olabilirlik ve grafik yöntemleri kullanılarak elde edilen parametreler, rüzgâr hızının olasılık dağılımını karakterize etmekte önemli rol oynamaktadır. Bu parametreler aracılığıyla yapılan enerji üretim tahminleri, sahaya kurulması planlanan türbinlerin rüzgâr karakteristiğine uygunluğunu ortaya koymuş ve enerji üretim kapasitesi yönünden karşılaştırmalı değerlendirmeler yapılmıştır.

Geliştirilen kullanıcı arayüzü sayesinde, kullanıcının doğrudan ölçüm verilerini sisteme yükleyerek, rüzgâr profili oluşturma, Weibull analizini gerçekleştirme ve grafiksel olarak rüzgâr yönü, frekans dağılımı ve güç yoğunluğu gibi temel verileri analiz etmesi mümkün hale gelmiştir. Ayrıca, üç farklı türbine ait teknik özellikler girilerek her bir türbinin rüzgâr koşullarına göre üretim performansı değerlendirilmiş, teorik üretim değerlerinin yanı sıra verim faktörü dikkate alınarak daha gerçekçi yıllık üretim tahminleri elde edilmiştir.

Çalışmada elde edilen bulgular göstermiştir ki, rüzgâr enerjisi analizinde kullanılan yöntemlerin doğruluğu ve detay seviyesi, türbin seçimini ve yatırımın geri dönüşünü

doğrudan etkilemektedir. Özellikle Weibull dağılımının parametrelerinin doğru belirlenmesi, enerji üretim potansiyelinin yüksek doğrulukla tahminine olanak sağlamaktadır. Geliştirilen arayüzün sunduğu kullanıcı dostu yapı, mühendislik öğrencilerinin ve saha mühendislerinin rüzgâr enerjisi sistemlerini simüle edebilmesini kolaylaştırmakta ve karar destek süreçlerini hızlandırmaktadır.

Sonuç olarak, bu tez çalışması; rüzgâr enerjisi projelerinde türbin seçiminin, saha verilerine dayalı bilimsel analizlerle desteklenmesi gerektiğini açık biçimde ortaya koymaktadır. Geliştirilen arayüz, teorik bilgilerin uygulamaya dönüştürülebileceği bir mühendislik aracıdır ve hem akademik çalışmalar hem de gerçek saha uygulamaları için referans niteliği taşımaktadır. İlerleyen dönemlerde, bu uygulamanın genişletilerek ekonomik etüt modülü, finansal analizler ve şebeke entegrasyonu gibi alt sistemleri de kapsayacak şekilde geliştirilmesi önerilmektedir. Böylece, rüzgâr enerjisi yatırımlarının sadece teknik değil, ekonomik açıdan da sürdürülebilirliği daha sağlıklı biçimde analiz edilebilecektir.

Bu çalışmada geliştirilen platformun sürdürülebilirliğini ve eğitimdeki etkinliğini artırmak amacıyla aşağıda belirtilen geliştirme önerileri sunulmaktadır:

- Platform, lisans ve yüksek lisans düzeyindeki öğrenciler tarafından eğitim ortamlarında kullanılarak geri bildirimler doğrultusunda kullanıcı ihtiyaçlarına uygun şekilde geliştirilebilir.
- Belirli bir sahaya yönelik rüzgâr türbini yerleşimi, Wake etkileri dikkate alınarak platforma entegre edilebilir.
- Kullanıcılar, rüzgâr türbinlerini çevrim içi olarak seçebilecekleri bir modül üzerinden türbin yapılandırmasını gerçekleştirebilir.
- Rüzgâr verileri, çevrim içi açık kaynak veri servislerinden otomatik olarak çekilerek platformun veri güncelliği ve analiz yetkinliği artırılabilir.

Bu geliştirmeler ışığında, söz konusu platformun kapalı kaynaklı ticari yazılımlara güçlü bir alternatif oluşturması mümkün görünmektedir. Öğrenciler, bu platform aracılığıyla rüzgâr enerjisi sektöründe yaygın olarak kullanılan enerji etüdü ve analiz yöntemlerini uygulama imkânı bulacak, böylece sektörel yeterliliklerini artıracaklardır.

KAYNAKLAR

- [1] Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ). (2023). *Türkiye kurulu gücünün birincil enerji kaynaklarına göre gelişimi (2013–2023)* [Grafik I, III]. TEİAŞ Raporu. Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ). (2023). *2023 kurulu gücünün birincil enerji kaynaklarına göre dağılımı (MW)* [Grafik I, IV]. TEİAŞ Raporu. Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ). (2023). *2013 ve 2023 yılları için birincil enerji kaynaklarına göre Türkiye kurulu gücü* [Grafik I, II]. TEİAŞ Raporu.
- [2] Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ). (2023). *Türkiye kurulu gücünün birincil enerji kaynaklarına göre gelişimi (2013–2023); 2013 ve 2023 yılları için birincil enerji kaynaklarına göre Türkiye kurulu gücü* [Grafik I, II, III]. TEİAŞ Teknik Belgesi.
- [3] Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ). (2023). *2023 kurulu gücünün birincil enerji kaynaklarına göre dağılımı (MW)* [Grafik I, IV]. TEİAŞ Teknik Belgesi.
- [4] Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ). (2023). *Yerli ve ithal kaynaklı kurulu gücün Türkiye kurulu gücü içindeki payı (2006–2023); 2013 ve 2023 yılları için birincil enerji kaynaklarına göre Türkiye kurulu gücü* [Grafik I, II, VII]. TEİAŞ Teknik Belgesi.
- [5] Uluslararası Enerji Ajansı (IEA). (2024). *Renewables 2024 Report*.
- [6] El Kihel, B., Elyamani, N. E. E. K., & Chillali, A. (2022). *Wind energy potential assessment using the Weibull distribution method for future energy self-sufficiency*. *Energies*, 15(15), 1–17. <https://doi.org/10.3390/en15155684>.
- [7] Sim, S.-K., Maass, P., & Roman, H. E. (2018). Distributions and correlation properties of offshore wind speeds and wind speed increments. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 506, 153–163.
- [8] Shu, Z. R., & Jesson, M. (2020). Estimation of Weibull parameters for wind energy analysis across the UK. *Energy*, 190, 116447.
- [9] Ghosh, H. R. (2014). Wind speed Weibull distribution and wind energy potential of Chandpur, Bangladesh. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 5(1), 1830–1835.
- [10] Aljeddani, S. M. A., & Mohammed, M. A. (2022). A novel approach to Weibull distribution for the assessment of wind energy speed. *Sustainable*

Energy Technologies and Assessments, 51, 101933.
<https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.101933>

- [11] Carrillo, C., Montaña, A. O., Cidrás, J., & Díaz-Dorado, E. (2010). An approach to determine the Weibull parameters for wind energy analysis: The case of Galicia (Spain). *Renewable Energy*, 35(11), 2133–2140. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.03.006>
- [12] Shi, H., Yang, M., & Liu, W. (2017). Wind speed distributions used in wind energy assessment: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 956–965. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.063>
- [13] Gryning, S. E., Batchvarova, E., & Brümmner, B. (2016). Weibull wind-speed distribution parameters derived from a combination of wind-lidar and tall-mast measurements over land, coastal and marine sites. *Boundary-Layer Meteorology*, 159(3), 493–511. <https://doi.org/10.1007/s10546-015-0104-3>
- [14] Badawi, A., Mostafa, M., & Younis, M. Z. (2018). Weibull probability distribution based on four years wind speed data using nine numerical methods. *Renewable Energy*, 127, 374–393. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.04.070>
- [15] Kidmo, D. K., Tchinda, P., & Djongyang, M. N. (2018). Statistical analysis of wind speed distribution based on six Weibull methods for wind power evaluation in Garoua, Cameroon. *Renewable Energy*, 115, 1266–1275. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.09.042>
- [16] Seguro, J. V., & Lambert, T. W. (2000). Modern estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy analysis. *Wind Engineering*, 17(2), 59–75. <https://doi.org/10.1260/0309524001495623>
- [17] Arslan, T., Bulut, Y. M., & Yavuz, A. A. (2014). Comparative study of numerical methods for determining Weibull parameters for wind energy potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 820–825. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.197>
- [18] Yaniktepe, B., Koroglu, T., & Savrun, M. M. (2013). Investigation of wind characteristics and wind energy potential in Osmaniye, Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 703–711. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.025>
- [19] Villanueva, D., & Feijóo, A. (2010). Wind power distributions: A review of their applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(5), 1490–1495. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.01.007>
- [20] Feijóo, A., & Villanueva, D. (2016). Assessing wind speed simulation methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 1445–1454. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.298>

- [21] Baseer, M. A., Meyer, J. P., Alam, M. M., & Rehman, S. (2015). Wind speed and power characteristics for Jubail industrial city, Saudi Arabia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 1193–1204. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.148>
- [22] Shoaib, M., Siddiqui, I., Amir, Y. M., & Rehman, S. U. (2017). Evaluation of wind power potential in Baburband (Pakistan) using Weibull distribution function. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 1195–1207. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.030>
- [23] Teimourian, H., Abubakar, M., Yildiz, M., & Teimourian, A. (2022). A comparative study on wind energy assessment distribution models: A case study on Weibull distribution. *Energies*, 15(7), 2519. <https://doi.org/10.3390/en15072519>
- [24] Islam, M. R., Saidur, R., & Rahim, N. A. (2011). Assessment of wind energy potentiality at Kudat and Labuan, Malaysia using Weibull distribution function. *Energy*, 36(2), 985–992. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.12.011>
- [25] Shoaib, M., Siddiqui, I., Rehman, S., Khan, S., & Alhems, L. M. (2019). Assessment of wind energy potential using wind energy conversion system. *Journal of Cleaner Production*, 216, 828–841. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.265>
- [26] Wadi, M., & Elmasry, W. (2021). Statistical analysis of wind energy potential using different estimation methods for Weibull parameters: A case study. *Electrical Engineering*, 103, 2573–2594. <https://doi.org/10.1007/s00202-021-01214-z>
- [27] Azad, A. K., Rasul, M. G., Alam, M. M., Uddin, S. M. A., & Mondal, S. K. (2014). Analysis of wind energy conversion system using Weibull distribution. *Procedia Engineering*, 90, 725–732. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.803>
- [28] Tuller, S. E., & Brett, A. C. (1984). The characteristics of wind velocity that favor the fitting of a Weibull distribution in wind speed analysis. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(1), 124–134.
- [29] Ozay, C., & Celiktas, M. S. (2016). Statistical analysis of wind speed using two-parameter Weibull distribution in Alaçatı region. *Energy Conversion and Management*, 121, 49–55. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.05.041>
- [30] Gasch, R., & Twele, J. (2012). *Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation* (2nd ed.). Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- [31] Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., & Bossanyi, E. (2001). *Wind Energy Handbook*. John Wiley & Sons.

- [32] Langreder, W. (2023). *Wind Power Technology: An Introduction*. Springer.
- [33] Mathew, S. (2006). *Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics*. Springer.
- [34] International Energy Agency (IEA). (2024). *Renewables 2024: Analysis and Forecast to 2030*. IEA.
- [35] Bianchi, F. D., Battista, H. D., & Mantz, R. J. (2007). *Wind Turbine Control Systems: Principles, Modelling and Gain Scheduling Design*. Springer-Verlag, London.
- [36] Mathew, S. (2006). *Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics*. Springer. Fig. 7.2.
- [37] El-Sharkawi, M. A. (2015). *Wind Energy: An Introduction*. CRC Press.
- [38] Schaffarczyk, A. P. (2023). *Wind Power Technology: An Introduction* (2nd ed.). Springer Nature.
- [39] International Energy Agency (IEA). (2023). *World Energy Statistics*. IEA.
- [40] Willis, H. L. (1985). *Wind Energy Systems*. Prentice Hall.
- [41] IEA Technology Collaboration Programme (IEA TCP). (2024). *Integration of Renewables into Energy Systems*. IEA Technology Collaboration Programme.
- [42] <https://img2.chinadaily.com.cn/images/202406/06/66616fd0a31082fc2b6f5e91.jpeg> Erişim Tarihi: 05.02.2025.
- [43] Gasch, R., & Tvele, J. (2012). *Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. Fig. 3–38.
- [44] Bianchi, F. D., Battista, H. D., & Mantz, R. J. (2007). *Wind Turbine Control Systems: Principles, Modelling, and Gain Scheduling Design*. Springer, London.
- [45] Gasch, R., & Tvele, J. (2012). *Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. Fig. 3–26.
- [46] Gasch, R., & Tvele, J. (2012). *Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. Fig. 3–45.
- [47] Gasch, R., & Tvele, J. (2012). *Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. Fig. 3–42.

- [48] Gasch, R., & Twele, J. (2012). *Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. Fig. 11–1, Fig. 11–2.
- [49] Gasch, R., & Twele, J. (2012). *Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. Fig. 3–52.
- [50] https://www.iwrpressedienst.de/bild/nordex/36d1c_N133-4800-2.jpg Erişim Tarihi: 10.02.2025.
- [51] <https://ars.els-cdn.com/content/image/3-s2.0-B9780123749918000039-f03-23-9780123749918.jpg> Erişim Tarihi: 10.02.2025.
- [52] Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. (2009). *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*. Wiley.
- [53] El-Sharkawi, M. A. (2015). *Wind Energy: An Introduction*. CRC Press. Fig. 2.8.
- [54] National Renewable Energy Laboratory (NREL). (2010). *Special airfoils for wind turbines*. NREL Publications.
- [55] Mathew, S. (2006). *Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics*. Springer. Fig. 2.21.
- [56] Johnson, G. L. (1985). *Wind Energy Systems*. Prentice Hall.
- [57] Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. (2009). *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*. Wiley. Fig. 2.15.
- [58] Gasch, R., & Twele, J. (2012). *Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation* (2nd ed.). Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. Fig. 4–41.
- [59] Mathew, S. (2006). *Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics*. Springer. Fig. 3.8.
- [60] Mathew, S. (2006). *Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics*. Springer. Fig. 3.15.
- [61] https://campbellsci-res.cloudinary.com/image/upload/c_limit,f_auto,w_500,h_500/7586.png Erişim Tarihi: 10.02.2025
- [62] Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. (2009). *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application* (2nd ed.). John Wiley & Sons, Chichester, UK. Fig. 3.24.

- [63] Saidur, R. (2011). *Fundamental and Advanced Topics in Wind Power*. IntechOpen.
- [64] International Electrotechnical Commission (IEC). (2019). *IEC 61400-1: Wind turbines – Part 1: Design requirements*. International Electrotechnical Commission.
- [65] International Electrotechnical Commission (IEC). (2020). *IEC 61400-21: Wind turbines – Part 21: Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines*. International Electrotechnical Commission.
- [66] International Electrotechnical Commission (IEC). (2018). *IEC 61400-22: Wind turbines – Part 22: Conformity testing and certification*. International Electrotechnical Commission.
- [67] International Electrotechnical Commission (IEC). (2019). *IEC 61400-3: Wind turbines – Part 3: Design requirements for offshore wind turbines*. International Electrotechnical Commission.
- [68] Power and Energy Society. (2021). *61400-12: Measurement of mechanical loads in wind turbines*.
- [69] International Electrotechnical Commission (IEC). (2022). *IEC 61400-13: Wind turbine generator systems – Measurement of mechanical loads*. International Electrotechnical Commission.
- [70] International Electrotechnical Commission (IEC). (2019). *IEC 61400-1: Wind turbines – Part 1: Design requirements*. International Electrotechnical Commission.
- [71] Torabi, F. (2022). *Fundamentals of Wind Farm Aerodynamic Layout Design* (1st ed.). Elsevier.
- [72] Torabi, F. (2022). *Fundamentals of Wind Farm Aerodynamic Layout Design* (1st ed.). Elsevier. Fig. 4.14.
- [73] Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., & Bossanyi, E. (2011). *Wind Energy Handbook* (2nd ed.). John Wiley & Sons.

ÖZGEÇMİŞ

Mehmet ÇAKIR İlk ve Orta eğitimini Namık Kemal İlköğretim Okulu 'nda , Lise eğitimini Hamdi Bozbağ Anadolu Lisesinde tamamladı. Hamdi Bozbağ Anadolu Lisesi 'nden 2007 yılında mezun oldu. 2008 yılında başladığı 19 Mayıs Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü 'nü 2012 yılında bitirdi. 2023 yılında Giresun Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı. 2015 yılında itibaren Yenilenebilir Enerji kaynakları üzerine faaliyette bulunan çeşitli şirketlerde görev almıştır. Halen aynı görevine devam etmektedir.