

T.C.
İSTANBUL AREL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM
DALI



HAZAR DENİZİNİN AZERBAYCAN KISMINDAKİ RÜZGAR
ENERJİSİ POTANSİYELİNİN ARAŞTIRILMASI VE SİMULE
EDİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NASİB İSMAYİLOV

İSTANBUL, 2023

T.C.
İSTANBUL AREL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM
DALI



HAZAR DENİZİNİN AZERBAIJAN KISMINDAKİ RÜZGAR
ENERJİSİ POTANSİYELİNİN ARAŞTIRILMASI VE SİMULE
EDİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NASİB İSMAYİLOV

İSTANBUL, 2023

KABUL VE ONAY

NASİB İSMAYİLOV tarafından hazırlanan “**HAZER DENİZİNİN AZERBAIJAN KISMINDAKİ RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYELİNİN ARAŞTIRILMASI VE SİMULE EDİLMESİ**” adlı tez çalışmasının savunma tarihi 10.08.2023 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği /oy çokluğu ile İstanbul Arel Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Üye

Dr. Öğr. Üyesi ÖMER IŞIK

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi SERDAR KARGIN

İstanbul Arel Üniversitesi

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Havva Aysun SEZGİN

KÖKSAL

İstanbul Beykent Üniversitesi

.....

İstanbul Arel Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....

Prof. Dr. Ali AKDEMİR

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

YEMİN METNİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “**HAZER DENİZİNİN AZERBAYCAN KISMINDAKİ RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYELİNİN ARAŞTIRILMASI VE SİMULE EDİLMESİ**” başlıklı bu çalışmanın, bilimsel ahlak ve geleneklere uygun şekilde tarafımdan yazıldığını, yararlandığım eserlerin tamamının kaynaklarda gösterildiğini ve çalışmanın içinde kullanıldıkları her yerde bunlara atıf yapıldığını belirtir ve bunu onurumla doğrularım.

10.08.2023

NASİB İSMAYİLOV

ÖZET

HAZER DENİZİNİN AZERBAYCAN KISMINDAKİ RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYELİNİN ARAŞTIRILMASI VE SİMÜLE EDİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NASİB İSMAYİLOV

İSTANBUL AREL ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(DANIŞMAN: DR. ÖĞR. ÜYESİ ÖMER IŞIK)

İSTANBUL, 2023

Bu çalışma, dünya genelinde ve özellikle Azerbaycan'da önem kazanan rüzgar enerjisinin potansiyelini araştırmayı amaçlamaktadır. Bu amaç doğrultusunda, Hazer Denizi'nin Azerbaycan kıyısındaki Abşeron yarımadasının kuzey bölgesindeki rüzgar enerjisi potansiyeli simüle edilmiş ve incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara dayanarak gerekli bilgiler sunulmuştur. WindPRO programı kullanılarak yapılan simülasyon sonucunda, ortalama rüzgar hızının 8,79 m/s, ortalama güç yoğunluğunun ise 854 W/m² olarak hesaplandığı ortaya çıkmıştır. Hâkim rüzgar yönünün %23 frekansla batı istikametinde olduğu belirlenmiştir. Büyük hız aralığına sahip olan (5-15 m/s) enerji üretim potansiyeline sahip frekansların önemli bir kısmının hâkim rüzgar yönünde olduğu tespit edilmiştir (%20'den fazla). Ortalama enerji yoğunluğunun sektöre göre değişmesi çoğunlukla üstün rüzgar istikametinde olduğu gözlemlenmiştir. Tahmini olarak, rüzgar türbini için yıllık 30.482,2 MWh/y enerji üretimi ve enerji santralinin kapasite faktörü değeri %48,3 olarak hesaplanmıştır. Bu tez çalışması, gelecekte Azerbaycan'da kurulacak rüzgar santrallerine yatırımcılara ve ilgili kurumlara yol gösterici olmayı hedeflemektedir.

Anahtar Kelimeler: Yenilenebilir enerji kaynakları, Rüzgar enerjisi, Azerbaycan, WindPRO

ABSTRACT

RESEARCH AND SIMULATE OF WIND ENERGY POTENTIAL IN THE AZERBAIJAN SECTION OF THE CASPIAN SEA

MSC THESIS

NASİB İSMAYİLOV

**GRADUATE SCHOOL, ISTANBUL AREL UNIVERSITY
ELECTRICAL ELECTRONICS ENGINEERING**

(SUPERVISOR: ASSIT PROF. DR. ÖMER IŞIK)

İSTANBUL, 2023

This study aims to investigate the potential of wind energy, which has gained importance in the world and especially in Azerbaijan. For this purpose, the wind energy potential in the northern region of the Absheron peninsula on the Azerbaijan coast of the Caspian Sea has been simulated and studied. Necessary information is presented based on the results obtained. As a result of the simulation made using the WindPRO program, it was revealed that the average wind speed was calculated as 8.79 m/s and the average power density was calculated as 854 W/m². It has been determined that the dominant wind direction is west with a frequency of 23%. It has been determined that a significant part of the frequencies with a large speed range (5-15 m/s) with energy generation potential are in the prevailing wind direction (more than 20%). It has been observed that the average energy density varies according to the sector, mostly in the direction of the superior wind. As an estimate, the annual energy production of 30,482.2 MWh/y for the wind turbine and the capacity factor value of the power plant is calculated as 48.3%. This thesis aims to guide the investors and related institutions for the wind power plants to be established in Azerbaijan in the future.

Key Words: Renewable energy sources, Wind energy, Azerbaijan, WindPRO

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
TABLO LİSTESİ	v
KISALTMA VE SEMBOL LİSTESİ.....	vi
ÖNSÖZ.....	vii
1 GİRİŞ	1
2 YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI	3
2.1 Dünyanın Yenilenebilir Enerji Kaynakları Potansiyeli.....	3
2.2 Azerbaycanın Yenilenebilir Enerji Kaynakları Potansiyeli	7
2.2.1 Güneş Enerjisi	8
3 RÜZGAR ENERJİSİ.....	11
3.1 Rüzgarın Oluşumu	11
3.1.1 Rüzgar Çeşitleri.....	13
3.1.1.1 Sürekli Rüzgarlar	14
3.1.1.2 Mevsimlik Devirli Rüzgarlar (Musonlar)	15
3.1.2 Rüzgarın Hızını Etkileyen Faktörler	19
3.1.2.1 Yüzey Pürüzlülük Faktörü	20
3.1.2.2 Rüzgar Hızı Üyükseklikle Değişimi	23
3.2 Rüzgar Enerjisi Kullanımının Tarihsel Gelişimi.....	24
3.3 Azerbaycan'daki Rüzgar Enerjisi Durumu	25
3.4 Rüzgar Türbinleri, Çeşitleri Ve Sınıflandırılması.....	26
4 RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYELİ HESAPLAMA YÖNTEMLERİ... 30	30
4.1 Temel Denklemler.....	30
4.1.1 Rüzgar Hızının Yüksekliğe Göre Değişimi	33
4.2 Rüzgar Potansiyeli Hesaplama Yöntemleri	34
4.3 Weibull Dağılımı.....	34
4.3.1 Grafik Yöntem	36
4.3.2 Moment Yönetimi	36
4.3.3 En yüksek Muhtemellik Yöntemi	39
4.4 Hata Analizi	41
4.5 Güç Yoğunluğunun Hesaplanması.....	41
4.6 En Mümkün Hızın Değeri.....	42
4.7 En Çok Enerjinin Taşındığı Hız	43
4.8 Türbinin Üreteceği Enerjinin Hesaplanması	43
4.9 Rüzgar Türbinlerinin Güç Eğrileri	44
4.10 Kapasite Faktörünün Hesaplanması	44
5 WINDPRO PROGRAMI İLE RÜZGAR ÇİFTLİĞİ SİMULASYONU.... 46	46
5.1 WindPRO Yazılımı	46
5.2 WindPRO Programını Kullanarak Rüzgar Çiftliğinin Oluşturulması.....	51
5.3 WindPRO Programı Kullanarak Elde Edilen Sonuçlar	53
6 SONUÇ VE ÖNERİLER.....	60
7 KAYNAKLAR	63
8 ÖZGEÇMİŞ.....	64

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 Seçilmiş ülkeler için toplam enerji tüketiminde yenilenebilir enerjinin payı	16
Şekil 2.2 Azerbaycan'ın fotovoltaik güç potansiyeli.....	8
Şekil 2.3 Azerbaycanın doğrudan normal ışınlama haritası.....	9
Şekil 2.4 Azerbaycanın küresel yatay ışınlama haritası.....	9
Şekil 3.1 Pürüzlülük Derecesi : a) 0 olduğu bölge, b) 1 olduğu bölge, c) 2 olduğu bölge,d) 3 olduğu bölge.....	21
Şekil 3.2 Arazinin yapısına göre rüzgar hızı değişimi	22
Şekil 3.3 Rüzgâr türbini sınıflandırılması	26
Şekil 3.4 Kanat sayılarına göre rüzgâr türbinleri	27
Şekil 3.5 Rüzgar etkisine göre (a)Önden rüzgar alan, (b)Arkadan rüzgar alan	28
Şekil 4.1 Rüzgarın türbine girdiği anda genişlemesi.....	31
Şekil 4.2 Betz limit değişimi.....	33
Şekil 5.1 WindPRO yazılımının ara yüzü	51
Şekil 5.2 WindPRO yeni proje başlatma ekranı.....	51
Şekil 5.3 Simulasyonun yapılacağı bölge	52
Şekil 5.4 Bölgeye rüzgar türbinlerinin eklenmesi.....	52
Şekil 5.5 Merkeze yakın rüzgar verisinin seçilmesi.....	53
Şekil 5.6 Simulasyonun haritadaki son durumu.....	53
Şekil 5.7 ATLAS modülü	53
Şekil 5.8 Rüzgâr hızı verilerinin sektörel değişimi.....	54
Şekil 5.9 Rüzgâr hızı frekans dağılımı.....	54
Şekil 5.10 Sektörel frekans değişimi.....	55
Şekil 5.11 Rüzgar türbini güç eğrisi.....	56
Şekil 5.12 Enerji üretiminin sektörel dağılımı	57
Şekil 5.13 Rüzgar enerjisinin hıza göre dağılımı	58
Şekil 5.14 Sektörel pürüzlülük verileri	59

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1 Azerbaycan Enerji Bakanlığı tarafından sunulan güneş enerjisi santrali projeleri.	10
Tablo 3.1 Enlemlere göre hakim rüzgar yönleri.	12
Tablo 3.2 Rüzgarların sınıflandırılması	13
Tablo 3.3 Beaufort rüzgar ölçeği.	20
Tablo 3.4 Dış yapılarına göre pürüzlülük sınıfları ve uzunlukları	23
Tablo 3.5 Azerbaycan'da yenilenebilir kaynak potansiyeli (IRENA).....	26
Tablo 3.6 Rüzgar alışı yönüne göre türbinlerin karşılaştırılması	28
Tablo 3.7 Onshore Ve Offshore rüzgar santrallerinin karşılaştırılması	29
Tablo 5.1 WindPRO programı kullanılarak alınan sektörel ortalama rüzgâr hızı, Weibull parametresi ve frekans değişimi (Yükseklik: 119 m).....	55
Tablo 5.2 Rüzgâr türbinin özellikleri	56
Tablo 5.3 WindPRO programı sonucuna göre sektörel enerji üretimi, ortalama frekans ve rüzgar hızı değerleri.....	57
Tablo 5.4 WindPRO programına göre belirli rüzgar aralıklarında üretilen enerji değerleri	58

KISALTMA VE SEMBOL LİSTESİ

E_k	: Kinetik enerji (Joule)
ρ	: Yoğunluk (kg/m ³)
A	: Alan (m ²)
$P_t(V)$	: Türbin Güç eğrisi
V	: Rüzgar hızı (m/s)
C_p	: En fazla elde edilebilecek Güç oranı
P_R	: Türbin Gücü
V_1	: Rüzgar türbinine giren rüzgarın hızı
V_2	: Rüzgar türbinin içinde rüzgarın hızı
V_3	: Rüzgar türbininden çıkan rüzgarın hızı
d	: Gün
a	: Rüzgar hız oranı
v_1	: Türbinin üretime başladığı hız
h_1, h_2	: Yükseklik (m)
P	: Güç (W)
P_1	: h_1 yüksekliğindeki hız
P_1	: h_2 yüksekliğindeki hız
c	: Ölçek parametresi
k	: Weibull parametresi
Γ	: Gama fonksiyonu
c_f	: Kapasite faktörü
a_1	: Türbin denkleminin katsayısı
a_2	: Türbin denkleminin katsayısı
a_3	: Türbin denkleminin katsayısı
a_4	: Türbin denkleminin katsayısı
m	: Metre
s	: Saniye
W	: Watt
kW	: Kilowatt
MW	: Megawatt
GW	: Gigawatt
RMS	: Ortalama karekök sapması
AB	: Avrupa Birliği
$\dot{I}REN$	: International Renewable Energy Agency (Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı)
$WAsP$	: Wind Atlas Analysis and Application Program
RES	: Rüzgar enerji santrali

ÖNSÖZ

Bu çalışmam süresince tecrübelerini ve zamanını esirgemeyen, tez danışmanım Dr.Öğr üyesi Ömer Işık'a, analizlerde kullandığımız WindPRO yazılımı konusunda yardımcı olan TÜRKSÖY E.M.D. Ltd. Sti.başkanı Dr.Ferdi Türksoy ve aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

17.07.2023

NASİB İSMAYİLOV

1 GİRİŞ

Enerji, ekonomik ve sosyal kalkınmanın stratejik bir gücü olarak kabul edilmektedir. Sanayi sektörünün büyümesi, artan nüfus ve teknolojik gelişmelerle birlikte enerji talebi hızla artmaktadır. Bu talebin güvenli şekilde karşılanması, ülkelerin ekonomik kalkınması için hayati önem taşımaktadır. Enerji talebi, kişi başına düşen enerji tüketim miktarı ve enerji kaynaklarına olan erişim, ülkelerin kalkınma düzeyleri hakkında bilgi vermektedir. Özellikle kalkınmakta olan ülkelerde kişi başına düşen enerji tüketiminde hızlı bir artış gözlemlenmektedir. Bu ülkeler, yerli kaynakları yeterli olmayan ülkeler arasında yer almaktadır ve fosil enerji kaynaklarına olan bağımlılıkları artmaktadır. Fosil enerji kaynakları, özellikle ucuz olması nedeniyle enerji talebinin karşılanmasında sıklıkla tercih edilmektedir. Ancak, bu kaynaklar sınırlı ve zararlıdır. Ülkeler arasında enerji bağımlılığına yol açarak arz güvenliği gibi birçok riski tetiklemektedir. Bu nedenle, enerji kaynaklarına olan dışa bağımlılığı en aza indirmek ve sürdürülebilir bir enerji üretmek için yerli kaynak ve teknolojilerini kullanmaya öncelik verilmelidir. Ayrıca, yenilenebilir enerji kaynaklarına yatırımın artırılması ve bölgesel enerji işbirliği projelerinde aktif rol alınması, enerji bağımlılığı ve doğuracağı riskleri azaltacaktır. Sonuç olarak, enerji sektöründe yapılan yatırımlar, ülkelerin sosyal ve ekonomik kalkınmalarını etkileyen bir faktördür ve enerji politikaları, planlı bir şekilde tasarlanarak en uygun stratejileri belirlemek büyük önem taşımaktadır.

Azerbaycan, zengin yerli kaynaklara sahip ve gelişmiş bir hidrokarbon endüstrisine sahip bir ülkedir. Özellikle 1991 yılında yeniden kazanılan bağımsızlıktan sonra petrol ve gaz üretimi ülkenin ekonomik canlanmasında önemli bir rol oynamıştır. Ancak, dünya genelinde artan çevresel endişeler ve sıfır karbon hedefleri, ülkeleri yeni bir enerji dönüşümüne yönlendiriyor. Azerbaycan da bu dönüşümden nasibini alarak sıfır karbon enerji üretimine geçiş yapmak için adımlar atıyor. 1990'ların başında uygulamaya konan yasal düzenlemeler, ülkenin yenilenebilir enerjiye geçişine yasal bir temel oluşturmuştur. Ancak, üretim ve tüketimde hedeflenen yenilenebilir enerji payına sahip bir eylem planı henüz hazırlanamamıştır. Ülke yönetimi değişen dünya koşullarına ayak uydurabilmek ve daha sürdürülebilir bir gelecek için iddialı bir plan hazırlamıştır. Ancak, planın uygulama safhasında karşılaşılabilecek olan zorluklar belirli

bir eylem planı hazırlanması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle, ÷lkede yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı için daha fazla çalışma yapılması gerekmektedir.



2 YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI

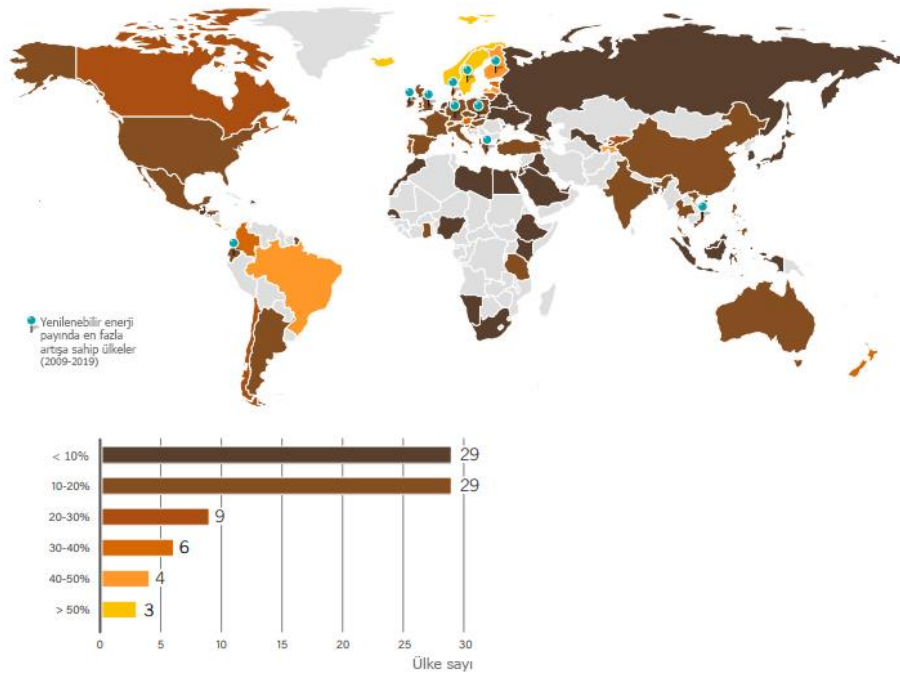
2.1 Dünyanın Yenilenebilir Enerji Kaynakları Potansiyeli

Enerji talebi gün geçtikçe artarken, geleneksel enerji kaynakları giderek daha az mevcut hale gelmektedir. Yüksek nüfus oranı ve devam eden sanayileşme, enerji üretimi ve tüketimi arasındaki açığı köprülemek için artan ihtiyacı karşılamaktadır. Küresel enerji talebi yıllar içinde arttıkça, bugün tüketilen enerjinin 2035 yılına kadar iki katına, 2055 yılında ise üç katına çıkacağı tahmin edilmektedir. Ancak, enerji arzı geleneksel yakıtlara bağımlı kaldığı sürece, dünyanın karşılaştığı ciddi çevresel problemler devam edecektir. Fosil yakıtlardan kaynaklanan emisyonlar atmosferdeki zararlı gazların miktarını arttırarak, küresel ısınmaya ve iklim değişikliğine neden olur. Küresel ısınmanın devam etmesi durumunda, deniz seviyeleri yükselmekte ve kıyı kentleri için ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Günümüzde, yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji üretmek giderek daha önem kazanmaktadır. Güneş, rüzgar, hidrolik, biokütle ve jeotermal gibi yenilenebilir enerji kaynakları, sınırsız bir şekilde bulunmaktadır ve sürdürülebilir bir enerji arzı için önemli bir role sahiptirler. Ancak, yenilenebilir enerji kaynakları için uygun yatırım ve altyapının sağlanması gerekmektedir. Bu sorunların yenilenebilir enerji yatırımları ile çözüleceği umulmaktadır. Daha temiz ve sürdürülebilir enerji üretimi için, dünya liderleri değişim yönünde adımlar atmaya başlamıştır. Öte yandan, Geleneksel enerji kaynakları olan petrol, doğalgaz, kömür ve nükleer enerji, çevre kirliliği ve insan sağlığı açısından büyük bir tehdit oluşturuyor. Geleneksel enerji kaynaklarının geniş kitleler tarafından kullanılması, özellikle ulaşım, konut ve sanayi sektörlerinde, enerji açığının giderek artmasına sebep olmaktadır. Özellikle ulaştırma sektöründe, 95% oranında petrolden sağlanan enerji kaynaklarının kullanımı, dünya genelindeki enerji tüketiminde büyük bir paya sahiptir. Beklentilere göre, önümüzdeki beş yıl içinde, gelişmiş ülkelerde ulaştırma sektöründe kullanılan petrole olan bağımlılığın yıllık %1.5 artması, gelişmekte olan ülkelerde ise %3.6 artması öngörülmektedir. Ormanların azalması ve fosil yakıtların yanması sonucu atmosferdeki karbondioksit (CO₂) miktarının artması, güneş ışınlarının atmosferdeki diğer gazlarla birleşerek yansımaları engellemekte. Bu durum, sera etkisi ve dolayısıyla iklim değişikliklerine yol açmaktadır. 2040 yılına kadar küresel ısınmanın artması söz konusu olduğunda, deniz seviyesinin yükseleceği ve en büyük dünya kentlerinin suların altında kalabileceği yönünde endişeler dile

getirilmiştir. Sanayileşmiş birçok ülke tarafından 1970'li yıllarda alınmaya başlanan atmosferin kirlenmesinin önlenmesine yönelik tedbirler, kirleticilerin hava hadiseleri ile birlikte taşınması ve sınırötesi etkilerin yaratılması engellenememiştir. Kirleticilerin uzun mesafelerden taşınması sonucunda, insan sağlığına zarar vermenin yanı sıra toprak ve su kaynaklarında asit oranının arttığı görülmüştür. Bu durum, bazı canlı türlerinin yok olmasına neden olmuş ve ayrıca metal yüzeyleri ve binaları olumsuz etkilemiştir. Uzun mesafelere yayılan kirleticiler, canlı türlerinin yok olması, topraktaki asit oranının artması ve yapıların hasar görmesi gibi olumsuz sonuçlara yol açmıştır. Nükleer enerji ise Çernobil Nükleer Kazası sonrası insanların güvenini kaybetmiş ve azalmaya başlamıştır, ancak hala dünya elektrik enerjisinin %17'sini üretmektedir. Nükleer reaktörlerin ticari, askeri ve araştırma alanlarında kullanımı hala devam etmektedir. Ancak, yeni tesislerin açılması toplumda yoğun tartışmaları beraberinde getirmektedir. Buna ek olarak, yakın zamanda yapılan tahminlere göre, petrolün yaklaşık 50 yıl, doğal gazın ise 200 yıl içinde tükenebileceği riski ortaya çıkmıştır. Bu nedenle, doğa dostu, temiz ve ekonomik enerji kaynaklarına olan ilgi hızla artmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları, enerji talebini karşılamada sürdürülebilir bir seçenek olarak değerlendirilmektedir. Bu kaynaklar, çevreye daha az zarar verirken enerji güvenliğini ve gelecekteki enerji ihtiyaçlarını karşılamada büyük önem taşımaktadır. Bu sebeple, yenilenebilir enerji kaynakları, sürdürülebilirliği kolay sağlayabilen ve dünya genelinde her bölgede bulunabilen enerji kaynakları olarak ön plana çıkmaktadır. Bu kaynakların kullanımına yönelik adımlar her geçen gün artmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları, doğanın sürekli evrimi içerisinde kendini yenileyen enerji kaynaklarıdır. Bu kaynakların en önemli özellikleri, çevrenin korunması için karbondioksit emisyonlarını azaltmaları, yerli kaynaklar olmaları sayesinde enerjideki dışa bağımlılığı azaltmaları ve istihdamın artmasına katkı sağlamalarıdır. Ayrıca, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik kamuoyunda yaygın bir destek bulunmaktadır. Bu kaynakların ayrıca, ulaşılabilir ve mevcut olmaları ile kabul edilebilir olmaları gibi çeşitli özellikleri de bulunmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları, rüzgar, hidroelektrik, jeotermal, biyokütle, güneş ve deniz dalgaları gibi farklı form ve biçimlerde de varlıklarını sürdürmektedirler. Başka deyişle yenilenebilir enerji kaynakları, ulaşılabilir, mevcut ve kabul edilebilir enerji kaynaklarıdır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında hidroelektrik, jeotermal, güneş, rüzgar, biyokütle, odun, bitki artıkları, gel-git ve deniz dalgaları gibi farklı tipler yer almaktadır. Hidro-enerji ve barajlar, işletim maliyetlerinin azlığı, atmosfere zararlı gaz

veya paracak salımı olmaması ve tarım sektöründe kullanımları nedeniyle yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli bir yere sahiptir. Ancak, mevcut hidro-enerji potansiyelinin yalnızca üçte biri kullanılmaktadır, ki bu da dünyada elektrik üretiminin %17'sine beraberdır. Hidro-enerji üretimi için büyük barajların çevrelere verdiği zararlar nedeniyle, küçük barajların tercih edilmesi yönündeki tartışmalar devam etmektedir. Ancak, Dünya Bankası gibi kuruluşların politikalarında değışikliğe gitmesiyle birlikte büyük barajların da yenilenebilir enerji kaynakları arasında yerini alması söz konusu olabilir. Gelişmekte olan ülkelerdeki hızlı nüfus artışı, dünya ortalamasının altında olan enerji tüketimleri nedeniyle daha fazla elektrik enerjisine ihtiyaç duyulması, kalkınmış ülkelerde olduğu gibi güçlü enerji kaynaklarının kısa sürelerde devreye girmesini gerektirmektedir. Büyük ölçekli baraj projelerinin hayata geçirilmesi, yıllık %8-10 civarında binlerce MW'lık enerji ihtiyacının karşılanabilmesini mümkün kılar. Jeotermal enerjiden elektrik üretimi ilk kez İtalya'da başlamış olup günümüzde 22 ülkede, özellikle Amerika, Filipinler ve Yeni Zelanda'da toplam 8274 MW kapasiteyle elektrik üretimi gerçekleştirilmiştir. Odun, yenilenebilir bir enerji kaynağı olmasına rağmen, hızla tüketilmesi nedeniyle "yenilenebilme" özelliğini yitirmiş durumdadır. Her dakika 50 dönüm ormanın yok edilmesi, bu konudaki endişeleri artırmaktadır. Güneş enerjisi teknolojileri giderek ilerlemekte olup, ışıktan ısı elde etmek için kullanılmaktadır. İsveç gibi güneşin nadir olduğu bir ülkede bile düşük sıcaklıkta suyun güneş enerjisi sayesinde ısınması mümkün olabilmektedir. Rüzgar türbinlerinin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır, ancak gürültü kirliliğı ve kuşlara zarar verme gibi konularda tartışmalar devam etmektedir. Amerika, İngiltere, Almanya ve Danimarka gibi ülkelerde yaygın olarak kullanılan rüzgar türbinleri, 5 MW'a kadar çıkabilen kapasiteleriyle önemli miktarda enerji üretmektedir ve bu türbinlerin toplam kapasitesi 150 GW'a ulaşması beklenmektedir. Biyokütle ve deniz enerjisi, en temiz enerji kaynakları arasında yer almaktadır, ancak küresel ölçekte enerji üretimine olan katkıları sınırlıdır ve genel enerji üretiminde sadece %1'lik bir paya sahiptirler. Uluslararası Enerji Ajansı'nın 2002 raporuna göre, dünya enerji üretiminin %13.8'i yenilenebilir enerji kaynakları tarafından karşılanmaktadır. Bu oranın düşük olması, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım alanının sınırlı olduğunu göstermektedir; ancak gelecekte bu durumun değışebileceğı öngörülmektedir. Shell Uluslararası Petrol 2025 yılına kadar, şirket yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam enerji üretiminde fosil yakıtların üçte ikisi kadar önemli bir rol oynayacağını beyan etmiştir. Ancak, "Hükümetlerarası İklim Değışikliği Paneli"nin

1995 yılı değerlendirmesine göre, bu oranın beşte ikisi mertebesinde olabileceği tahmin edilmektedir. Bazı kaynaklara göre, dünya elektrik üretiminin yarısından fazlası 2020 yılında yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanabilir. Gelişmiş ülkeler, özellikle de Avrupa Birliği (AB), yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını artırmak için çabalarını sürdürmektedir. AB, 2010 yılında yenilenebilir enerji stratejisi belirlerken 1 milyon fotovoltaik çatı (güneş enerjisi) kurulumu, 10,000 MW ek rüzgar enerjisi kapasitesi ve 10,000 MWth ek biyokütle enerjisi kapasitesi oluşturma hedeflerini belirlemiştir. Belirlenmiş hedeflerin gerçekleştirilmesi halinde yıllık 402 milyon ton karbondioksit emisyonunda bir düşüş olacağı tahmin edilmektedir. AB, mücadele ettiği iklim değişikliği çalışmalarına önem vererek, sera gazı emisyonlarının azaltılması konusunda öncü bir rol üstlenmiştir. 2002 yılında Güney Afrika Cumhuriyeti'nin Johannesburg kentinde gerçekleştirilen "Dünya Sürdürülebilir Kalkınma Zirvesi", yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırılması hedefine odaklanmıştır. Johannesburg Zirvesi Bildirisi, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına teşvik edilmesi ve bu alanda teknolojik gelişmelerin desteklenmesi gerektiğini vurgulamıştır. Bu çerçevede, AB, kendi belirlediği hedeflere ulaşmak için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını teşvik eden eylemler ve tedbirler almaktadır. Ancak bu hedeflere ulaşmak için, üye devletlerin özellikle siyasi iradelerini ortaya koymaları gerekmektedir(Özkaya, 2004).



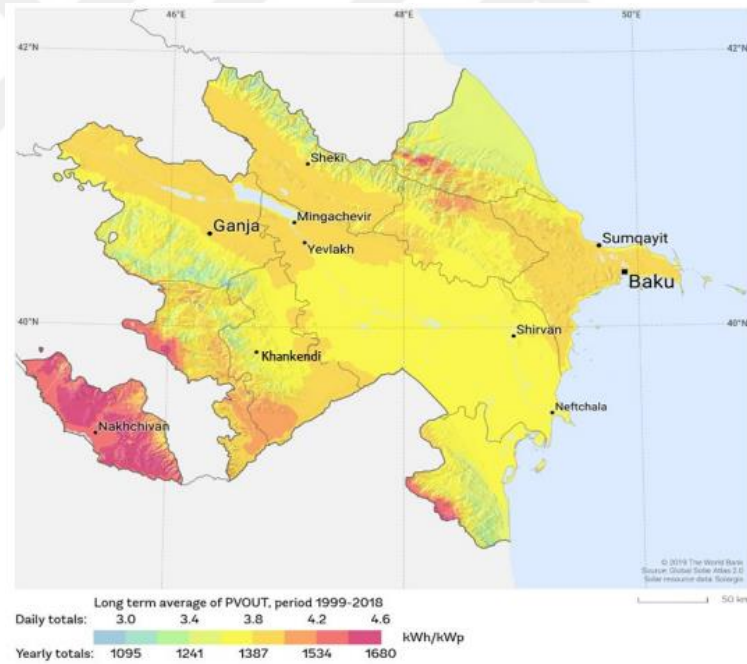
Şekil 2.1 Seçilmiş ülkeler için toplam enerji tüketiminde yenilenebilir enerjinin payı

2.2 Azerbaycanın Yenilenebilir Enerji Kaynakları Potansiyeli

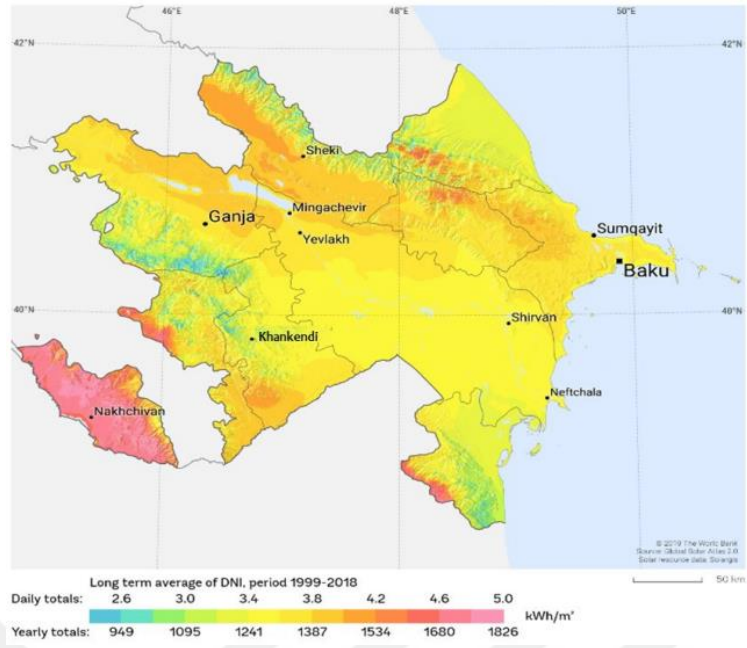
Azerbaycan, yenilenebilir enerji kaynakları açısından oldukça zengin bir ülkedir. Güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, hidroelektrik, biyokütle ve jeotermal kaynaklarının varlığı, ülkede önemli bir kullanılmayan potansiyel sunmaktadır. Hükümet, bu potansiyelin harekete geçirilmesi amacıyla yenilenebilir enerji kullanımını desteklemek üzere yapısını oluşturmaya çalışmaktadır. Yenilenebilir enerji kanunu tasarısı, yenilenebilir enerji projelerine ihalelerin ve destek mekanizmalarının getirilmesini öngörmektedir. Bu adımlar, ülkenin enerji sektörüne önemli bir ivme kazandırmayı hedeflemekte ve Azerbaycan'ın enerji bağımsızlığına katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Azerbaycan, güneş enerjisi açısından oldukça önemli bir potansiyele sahiptir. Enerji Bakanlığı'nın verilerine göre, ülkede teknik potansiyel 23.000 MW civarındadır. Ayrıca, yıllık 2400 ila 3200 güneş saati ve 1500 kWh/m² ila 2000 kWh/m² arasında değişen güneş yoğunluğu düzeyleri, Azerbaycan'ın uluslararası alanda güneş enerjisi açısından iyi bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Ülkenin en iyi kaynakları ise orta nehirlerle ve kuzey ile kuzeybatı kesimlere denk gelmektedir. Bu değerler, güneş enerjisi projeleri açısından Azerbaycan'ın gelecekte enerji üretiminde önemli bir aktör olabileceğini göstermektedir. Azerbaycan, Hazar Denizi kıyısı boyunca oldukça rüzgarlıdır ve bu nedenle rüzgar enerjisi potansiyeli yüksektir. Ülkenin enerji bakanlığına göre, Azerbaycan yaklaşık 3.000 MW teknik ve yaklaşık 800 MW ekonomik rüzgar enerjisi potansiyeline sahiptir. Ekonomik potansiyel, 2,4 TWh üretim kapasitesine ve yaklaşık 1 Mt konvansiyonel yakıt tasarrufuna eşdeğerdir. Bu da, önemli karbondioksit emisyonlarından kaçınılmasına yardımcı olur. Ayrıca, Azerbaycan Enerji Mühendisliği Bilimsel Araştırma ve Tasarım Enstitüsü, Abşeron'da yıllık ortalama rüzgar hızının saniyede 7,9 metre (m/sn) ile 8,1 m/sn arasında olduğunu belirlediği bir çalışma gerçekleştirdi. Rüzgarın 6 m/sn'lik ortalama hızı ise, ülkenin rüzgar enerjisi açısından teknik ve ekonomik potansiyelini daha da doğrulamaktadır. Hidroelektrik, yenilenebilir enerji kaynakları arasında en yaygın ve en büyük olanıdır. Ancak, potansiyeli henüz tam olarak kullanılmamıştır. Azerbaycan Enerji Bakanlığı'na göre, ülkenin küçük hidroelektrik potansiyeli 520 MW'dır ve bu kapasite yılda 3,2 TWh enerji üretebilir. Hidroelektrik potansiyelinin kullanımı, ülkenin enerji sektörüne önemli bir katkı sağlayabilir ve Azerbaycan'ın enerji bağımsızlığına katkıda bulunabilir (Mustafayev. 2022. 2-4).

2.2.1 Güneş Enerjisi

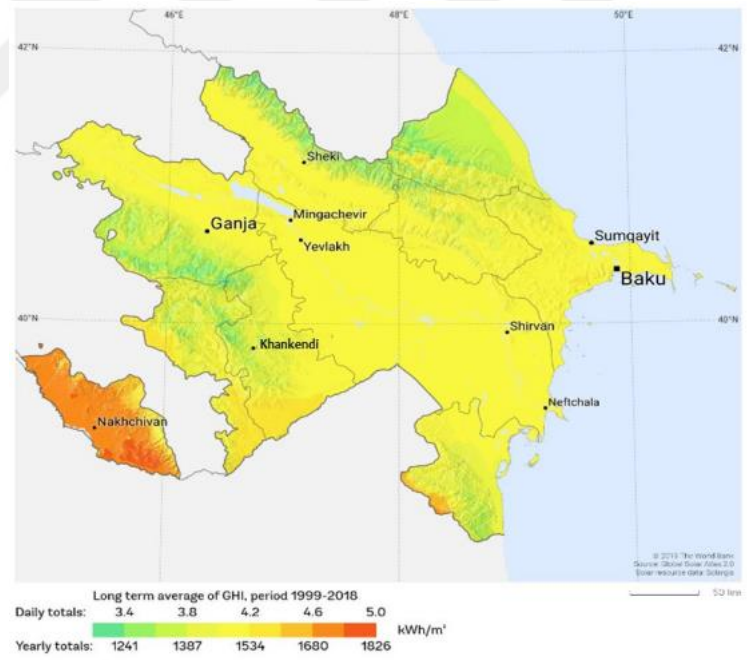
Azerbaycan, güneş enerjisi üretimi için yeterli güneş ışığı hacmine sahip bir ülkedir. Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (IRENA), Azerbaycan'ın güneş enerjisi potansiyelini 23.000 MW olarak ortaya koydu. Devlet kayıtlarına göre, metrekare başına güneş enerjisi miktarı 1,5-2,0 MWh civarındadır. Dünya Bankası'nın Küresel Güneş Atlası ise, Azerbaycan'ın spesifik fotovoltaik güç çıkışının 3,21-4,48 kWh/kWp arasında değiştiğini belirlemiştir. Spesifik fotovoltaik güç çıkışı, bir modül kapasitesinin her bir kWp'sinin bir yıl boyunca ne kadar elektrik üretebileceğini gösterir. Ayrıca, doğrudan normal ışınlam (DNI) ve küresel yatay ışınlam (GHI) göstergeleri de sırasıyla günde 2,71-4,84 kWh/m² ve 3,44-4,80 kWh/m² aralığındadır. Şekil 1-3'deki haritalar ise, güneş enerjisi santralleri için yeterli güneş ışığına sahip bölgeleri göstermektedir. Güneş enerjisi Azerbaycan'da gelecekte önemli bir enerji kaynağı olabilir(Mustafayev. 2022. 10-12).



Şekil 2.2 Azerbaycan'ın fotovoltaik güç potansiyeli.



Şekil 2.3 Azerbaycanın doğrudan normal ışınlama haritası.



Şekil 2.4 Azerbaycanın küresel yatay ışınlama haritası.

Bu nedenle, hükümet halihazırda toplam 2825 MW kurulu kapasiteye sahip üç büyük ölçekli potansiyel güneş enerjisi çiftliği projesi sunmuştur. (Tablo 2.1)

Tablo 2.1 Azerbaycan Enerji Bakanlığı tarafından sunulan güneş enerjisi santrali projeleri.

Proje Adı ve Yeri	Planlanan Çıktı Kapasitesi	Tahmini Üretim
Proje 1. Hacıgabal bölgesinde 2200 hektar	1100 MW (4.4 milyon panel × 250 W)	1.46 milyon MWh/yıl
Proje 2. Abşeron Yarımadası'nda 850 hektar	425 MW (1.7 milyon panel × 250 W)	579,000 MWh/yıl
Proje 3. Alat yerleşiminin yanında 2600 hektar	1300 MW (5.4 milyon panel × 250 W)	1.725 milyon MWh/yıl

Endüstriyel büyüklükteki güneş enerjisi santralleri, çoğu zaman büyük yatırımlar gerektirir ve teknik ve idari açılardan yüksek riskler taşır. Ancak, fotovoltaik panellerin teknolojik gelişmeleri, özel ya da küçük ölçekli güneş enerjisi üretim tesisleri için fırsatlar sunar. Çatı üstü kurulumlar, geniş alanlar kullanılmadan yüksek verimlilik sağlayabilirler. Azerbaycan'da, günlük ortalama güneşli saatler 7-8 saat arasında değişmektedir. Bu sayılar, 1,6 m² 250 W monokristal fotovoltaik panellerin 20% verimlilik oranı ile monte edildiğinde, tek bir panele 0,375 kWh/gün veya 11,25 kWh/ay enerji üretme potansiyeli olduğunu göstermektedir. Tabii ki, eğim derecesi, hava sıcaklığı, gölge ve yağmur gibi faktörler hesaplamaları etkileyebilir. Ancak, bu durum özel kullanım potansiyeli açısından önemli bir perspektif sunar(Mustafayev. 2022. 10-12).

Azerbaycan, güneş enerjisi üretimi için ideal koşullara sahip bölgelerde dikkate değer bir potansiyele sahiptir. Bu nedenle, güneş enerjisi Azerbaycan'daki yenilenebilir enerji gelişiminin ilk doğal adımıdır(Mustafayev. 2022. 10-12).

3 RÜZGAR ENERJİSİ

3.1 Rüzgarın Oluşumu

Rüzgar, atmosferin hareket eden havasının sonucudur. Güneş ışınları, kara ve su parçalarını ısıtırken, ısınan hava genişleyerek yükselir ve soğuk hava yerini doldurarak yüzeyde hareketlenme oluşur. Bu hareketlenme, rüzgarları meydana getirir. Isınan hava, atmosferin dışına çıkamayan dikey bir yolculuğa çıkar. Burada havanın ısınması, kütlesiyle birlikte yer değiştirip basınç oluşumuna neden olur. Ancak bu basınç, yerçekimi, sıcaklık ve yüksekliğe bağlı olarak dünyanın her yerinde farklıdır. Atmosferdeki yüksek ve alçak basınç merkezleri, bu farklılıklardan kaynaklanır. Hava, yerçekimi etkisiyle yüksek basınç bölgelerinden alçak basınç bölgelerine doğru akış gösterir. Bu hareket, basınç yüksek alanlarının tepelere benzetilebileceği ve alçak basınç alanlarının çukurlara benzetilebileceği bir şekilde gerçekleşir. Bu hareket, sanki yamaçtan akan suyun hareketi gibi akıcıdır. Hava, alçak basınç alanlarına doğru akarak rüzgarların oluşmasına neden olur. Özetle, rüzgarın oluşumu, ısınan havanın dikey hareketi, atmosferin basınç farkları ve hava akıcılığı gibi faktörler etrafında döner. Bu doğal olay, dünyanın birçok noktasında enerji üretmek için kullanılır ve yenilenebilir enerji kaynakları listesinde önemli bir yer tutar.

Meltemler, denizler ve karalar arasındaki basınç ve ısınma farkından kaynaklanan kısa süreli rüzgarlardır. Sıcak mevsimlerde meltemler, hava sıcaklığı yükseldiğinde karaların fazla ısınması nedeniyle basınç alçalması sonucu oluşur. Böylece yüksek basınçlı denizden alçak basınçlı karaya doğru esen rüzgar, havanın serinlemesini sağlar. Bu mekanizma gece ise tersine döner, çünkü hava zaten serindir. Fön adı verilen rüzgarlar ise geldikleri yere göre daha sıcak olan rüzgarlar grubundadır. Bu rüzgarlar, yükselen bir hava kütesinin bir dağı aşp, diğer yamaçta alçalması sonucu oluşur. Bu alçalma sırasında ise her 100 metrede havanın sıcaklığı yaklaşık olarak 1 derece artar. Dünyanın serin bölgelerinde ise, örneğin İsviçre Alpleri'nin kuzey yamaçları gibi dağlık alanlarda benzer rüzgarlar gözlemlenebilir. Bu rüzgar, sert ve soğuk iklim koşullarını yumuşatarak bölge halkının yaşam koşullarını olumlu yönde etkiler.

Rüzgarlar, atmosferdeki hava akımlarıdır ve bir ısı makinesi gibi çalışırlar. Güneşten aldıkları enerji ile ısı potansiyel farklar taşıyan hava kütleleri, soğuk ve

yüksek basınç alanlarından sıcak ve alçak basınç alanlarına doğru hareket ederler. Bu hareket, ısı enerjisinin kinetik enerjiye dönüştüğü doğa olayıdır. Rüzgarların oluşumunda, yer yüzündeki güneş ısı dağılımının sebep olduğu basınç ve sıcaklık farkları etkilidir. Dünya'nın bazı bölgelerinde kara ve deniz ısınmakten, diğer yüzeylerinde soğuma görülür. Bu mevsimlere ve güneşe bağlı olarak devam eden bir döngü oluşturur. Bu döngü, dünyanın günlük dönüş hareketiyle periyodik bir şekilde gerçekleşir. Mevsimlerin değişmesi ve güneşe bağlı eksen eğimi gibi faktörler, ısı enerjisinin günlük dağılımının değişmesine neden olur. Bu nedenle, rüzgarların şiddeti ve yönü de mevsimden mevsime farklılık gösterir. Atmosferin enerjisi, basınç kuvvetlerinin etkisiyle potansiyel enerjinin kinetik enerjiye dönüşümü olarak ortaya çıkar. Bu enerji iki türdür: kinetik ve potansiyel enerji. Hadley Sirkülasyonu, ekvator civarındaki nemli ve sıcak hava kütesinin konveksiyonla yükselmesi ve belirli bir seviyeye geldikten sonra daha soğuk olan kuzey enlemlere doğru hareket etmesidir. Hava 30° Kuzey enlemlerine yaklaştığında ise yeryüzüne doğru alçalmaya başlar. Bu hareketin sonucunda, nispeten daha soğuk ve kuru hava ekvatora doğru hareket eder. Dünya'nın dönüşüyle oluşan Coriolis Kuvveti nedeniyle havanın hareketi sağa doğru saptırılır. Bu nedenle, 0°-30° enlemleri arasında yer yüzeyinde yaranan rüzgarlar temel olarak KuzeyDoğu karakterlidir. Rossby Sirkülasyonu adı verilen benzer bir yapının, 30°-90° enlemleri arasında dalgalar şeklinde gerçekleştiği görülür. Bu sirkülasyon sonucunda, 30°-60° enlemleri arasında GüneyBatılı rüzgarlar ve 60°-90° enlemleri arasında ise KuzeyDoğulu rüzgarlar oluşmakta. Aşağıdaki çizelge, Kuzey ve Güney yarım küre için atmosferik güney sirkülasyonuna bağlı olarak rüzgar yönlerini göstermektedir.

Tablo 3.1 Enlemlere göre hakim rüzgar yönleri.

ENLEM	90-60° K	60-30° K	30-0° K	0-30° G	30-60° G	60-90° G
YÖN	KD	GB	KD	GD	KB	GD

Rüzgarlar iki grupta incelenebilir: sürekli rüzgarlar ve süreksiz rüzgarlar. Sürekli rüzgarlar bütün bir yıl boyunca eserken, süreksiz rüzgarlar belirli zamanlarda ortaya çıkarlar. Ölçüm cihazları olmadığı durumlarda, rüzgar hızı, yönü ve hamlesi kestirilerek incelenebilir (Tablo 5.2). Rüzgar hızı 0,3-1,5 m/s olduğunda, dumanın küçük bir esintiyle yükseldiği ve rüzgar yönünün belirsiz olduğu görülür. Rüzgarın

hızı 1,6 ile 3,3 m/s olduğunda, insanların yüzünde hissedilen hafif esintinin yanı sıra yaprakların ve ince dalların hareket ettiği gözlemlenir. Rüzgar hızı 3,4-5,4 m/s olduğunda, kağıt ve tozların yükseldiği, ince dalların hareket ettiği ve ağaçların hafifçe sallandığı izlenir. Orta rüzgar hızı olarak adlandırılan 5,5-7,9 m/s esintilerinde, ince dal hareketleri ve açık iletkenlerin sallandığı görülür. Rüzgar hızı 8-10,7 m/s olduğunda ise ağaçların daha fazla sallandığı ve şemsiyelerin kontrolünün zorlaştığı tespit edilir. Rüzgar hızı 13,9-17,1 m/s olduğunda, yürümenin çok zorlaştığı ve ağaçlarda ince dalların kırıldığı gözlenir. Rüzgar hızı arttıkça da olumsuz etkiler görülür. Örneğin, 24,5-28,4 m/s'de çatı kiremitlerinin uçtuğu, 28,5-32,6 m/s'de geniş ölçekli hasarların meydana geldiği ve 32,7 m/s ve üzerinde ise aşırı derecede hasarlar olduğu verilerinden yararlanarak, binaların yapısal dayanıklılığına yönelik tasarımlar yapmak gerekmektedir.

Rüzgarlar çeşitli şekillerde meydana gelir. Alizeler, yılın her mevsiminde kuzey ve güney yarım küredeki yüksek basınçlı kuşaktan ekvator üzerindeki alçak basınç kuşağı istikametinde eserler. Kontralize rüzgarları, atmosferin yüksekliklerinde Alize rüzgarlarının ters yönünde eser ve ekvator bölgesinde oluşan hava kütlelerinin hareketiyle açıklanır. Meltem rüzgarları, karaların denizden ve dağların vadiden daha hızlı ısınıp soğuması sonucu ortaya çıkarlar. Deniz meltemleri, gündüzleri denizlerden ve kara meltemleri, geceleri çabuk soğuyan karalardan eser. Bu rüzgarlar genellikle sahil şeridinin 40 km içinde etkilidir. Aynı şekilde, vadilerden çabuk ısınan dağlara doğru vadi meltemleri ve çabuk soğuyan dağlardan vadilere doğru dağ meltemleri meydana gelir. Hava kütlelerinin yüksek dağa çarpması ve her 100 metrede 0,5°C soğuması, daha sonra da dağın diğer yamacında her 100 metrede 1°C ısınarak inmesiyle oluşan harekete "Föhn" rüzgarları denir(Özkaya, 2004).

Tablo 3.2 Rüzgarların sınıflandırılması

Sürekli Rüzgarlar					Süreksiz Rüzgarlar	
Alize R.	Kontr- Alize R.	Muson R.	Meltem R.		Föhn R.	Siklon R.
			Kara ve Deniz M.	Dağ ve Vadi M.		
						Antisiklon R.

3.1.1 Rüzgar Çeşitleri

Rüzgarlar genellikle üç sınıfa ayrılır:

a. Sürekli rüzgarlar

b. Mevsimlik rüzgarlar

c. Yerel rüzgarlar

3.1.1.1 Sürekli Rüzgarlar

Sürekli rüzgarlar, daimi yüksek basınç alanlarından daimi alçak basınç alanlarına doğru yıl boyunca benzer bir yönde esen rüzgarlardır. Sürekli rüzgarların özellikleri:

- Rüzgarlar sürekli ve tutarlı bir yönde eserler.

- Sürekli rüzgarlar, kuzey yarımkürede hareketlerinin yönü dünya günlük hareketinden dolayı sağa, güney yarımkürede ise sol tarafa sapar.

- Estikleri bölgelerin iklimine tesir ederler.

Alizeler

Alizeler, dünya üzerindeki dinamik yüksek basınç bölgelerinden ekvatordaki alçak basınç bölgesine doğru yıl boyunca sürekli olarak esen rüzgarlardır. Alizeler, 30° kuzey ve 30° güney paralelleri çevresinde en belirgin şekilde hissedilir. Kuzey yarımkürede alizeler genellikle kuzeydoğudan, güney yarımkürede ise güneydoğudan eserler. Bu rüzgarlar, dünya günlük hareketine bağlı olarak yön değiştirmezler ve istikrarlı bir şekilde devam ederler. Aynı zamanda, alizeler tropikal kuşakta bulunan karaların doğu kıyılarına yağış taşırlar ve sıcak iklim kuşağındaki okyanus akıntılarının oluşumuna ve yönlerine etki ederler.

Batı Rüzgarları

Kuzey ve güney yarımkürelerde, 30° enlemlerindeki dinamik alçak basınç kuşaklarından 60° enlemlerindeki dinamik alçak basınç kuşaklarına yönelen rüzgarlar, kuzey yarımkürede güneybatıdan, güney yarımkürede ise kuzeybatıdan eserler. Rüzgar yönleri, dünya eksenini etrafındaki hareketinden kaynaklanan faktörlerden dolayı sürekli olarak değişir. Özellikle orta kuşak karalarının batı kıyılarında, bu değişkenlik daha da belirgin hale gelir. Bu bölgelere esen rüzgarlar, denizden gelen

nemli hava kütleleriyle etkileşime girer ve bol miktarda yağış bırakabilir. Ancak, 60° enlemlerinde kutup rüzgarlarıyla karşılaştıklarında, cephe yağışlarına neden olabilirler. Ayrıca, ortak kuşakta bulunan okyanus akıntılarının yönünde ve hızında da etkileri gözlemlenebilir.

Kutup Rüzgarları

Kutup bölgelerinde termik yüksek basınç alanlarından başlayarak, 60° enlemlerinde dinamik alçak basınç bölgelerine doğru esen soğuk rüzgarlar, atmosferdeki sıcaklık değişimlerine katkıda bulunarak iklimin ana belirleyicilerinden biridir. Bu rüzgarların yol açtığı soğuk hava etkisi, farklı hava koşullarının oluşmasını sağlar(Kaya. 2021).

3.1.1.2 Mevsimlik Devirli Rüzgarlar (Musonlar)

Yıl içerisindeki farklı sıcaklık koşulları, dünya üzerindeki havanın hareketi için belirleyici bir rol oynar. Özellikle komşu olan büyük kara parçaları ve okyanuslar arasındaki sıcaklık farkı, bu hareketlilikte önemli bir yer tutar. Bu farklılıklara bağlı olarak, bölgedeki hava basınçları değişir ve rüzgarlar bu basınç farkından kaynaklanarak eserler.

Yaz Musonu

Yaz mevsiminde farklı sıcaklık koşulları, özellikle Asya iç kesimlerinde alçak basınç alanlarının oluşmasına neden olurken, Hint Okyanusu'nun geç ısınması ise yüksek basınç alanlarına işaret eder. Bu sebeple, yaz musonları bu bölgede denizden kara istikametinde eserler ve Mayıs Ekim ayları arasında etkilidirler. Deniz ve okyanus kaynaklı olmaları nedeniyle nem yüksek olan bu rüzgarlar, etkili oldukları yerlere bol miktarda yağmur getirirler.

Kış Musonu

Kış mevsiminde, Asya'nın iç bölgelerinde oldukça soğuk hale gelir ve bu da güçlü bir yüksek basınç alanının oluşmasına yol açar. Hint ve Büyük Okyanus'un geç soğuması nedeniyle bu alanların her ikisi de alçak basınç alanına dönüşür. Bu basınç farkı, kış mevsimlerinde Asyanın içlerinden okyanuslara doğru esen, kış musonları adı

verilen rüzgarların oluşumuna yol açar. Kış musonları, karadan geldikleri sebebi ile soğuk ve kurudurlar ve genellikle hiç yağış getirmezler. Fakat, okyanusları geçtiklerinde nem alırlar ve Asya güneydoğusundaki adalarda yağış yağdırmazlar.

Görüldüğü Yerler:

- Güney Asya ile Hint Okyanusu
- Kuzey Amerika ile Meksika Körfezi
- Batı Afrika ile Gine Körfezi
- Doğu Afrika ile Hint okyanusu
- Doğu Asya ile Büyük Okyanus'a bağlı denizler arasında olur.

Yerel Rüzgarlar

Bazı rüzgarlar, genel hava dolaşımının yerel olarak bazı değişikliklerine bağlı olarak ortaya çıkarlar. Ancak, bazı rüzgarlar ise bölgesel basınç farkları nedeniyle meydana gelir.

Meltemler (Günlük Devirli Rüzgarlar)

Farklı özelliklere sahip olan iki bölge, günlük sıcaklık değişimlerinden etkilenerek rüzgar oluşumuna katkı sağlarlar. Rüzgarların yönü günün farklı saatlerinde değişim gösterir ve zaman zaman gece ve gündüz arasında da farklılık gösterir.

Kara ve Deniz Meltemleri

Karalar ve denizler başta olmak üzere farklı alanlar, günlük ısınma ve soğuma süreçleri ile birlikte rüzgar oluşumuna katkı sağlarlar. Bu nedenle, gündüz karalar çok fazladan ısınarak alçak basınç bölgesi oluştururken, denizler de daha serin olduğundan yüksek basınç alanı oluşur. Bu durum deniz melteminin ortaya çıkmasına neden olur. Deniz meltemi, yağış getirmeyen bir serin rüzgardır ve Ege kıyılarında İmbat adıyla bilinir. Gece ise, karalar yavaşça soğumaya başlar ve yüksek basınç bölgesi

oluştururken, denizler daha da sıcak olduğundan basınç azalmış olur. Bu durumda da kara meltemi adı verilen rüzgar oluşur ve denizden kara doğru eser.

Dağ ve Vadi Meltemleri

Alçak düzlükler ve bağlar yan yana bulunduklarından dolayı günlük ısınma ve soğuma süreçleri farklı etkiler gösterir. Gündüzleri dağ yamaçları, vadilerden daha fazla ısındığından dolayı basınç azalır ve rüzgar vadinin yamaç yukarısına doğru eser. Bu rüzgarlara da vadi meltemi denir. Geceleri ise yamaçlar vadiye göre daha hızlı soğuduğundan dolayı, rüzgar dağdan vadi istikametinde eser. Buna da dağ veya yamaç meltemi denir.

Sıcak Yerel Rüzgarlar

Bu rüzgarlar geldikleri bölgelere göre sıcak olan rüzgarlardır.

Fön Rüzgarı

Fön rüzgarı, bir dağın dağın bir yamacında yükselen hava kütlelerinin diğer yamaçta alçalmaya başlamasıyla oluşur. Her 100 metrede $0,5^{\circ}\text{C}$ soğuyan yükselen hava, diğer yamaçta alçalmaya başlayınca 100 metrede 1°C ısınır. Bu durum, kuru havanın alçalırken sürtünmenin etkisiyle daha da fazla ısınmasıyla gerçekleşir. Fön rüzgarı İsviçrede Alplerin kuzey yamaçlarında en yoğun olarak hissedilir.

Etkili olduğu bölgelerde

- Sıcak ve buharlaşmayı artırır.
- Bitkilerin büyüme ve hasat süresini azaltır.
- Havadaki nem açığını yükseltir.
- Yağış yağmasını engeller.
- Kar erimelerine sebep olur.
- Bağıl nemi düşürür.

- Havada nem taşınma kapasitesini yükseltir.

Sirokko

Akdeniz'e doğru sıcak ve kuru bir şekilde esen bir rüzgardır. Büyük Sahra'nın üzerinde yer alan Cezayir ve Tunus bölgelerinden kaynaklanır. Bu rüzgar, nem alarak Akdeniz'i geçer ve İspanya, Fransa ve İtalya'nın güney kıyılarında yoğun yağışlara neden olur.

Hamsin

Kuzey Afrika'nın iç kesimlerinden doğuya doğru eser ve Libya ile Mısır'ın kıyıya yakın bölgelerine ulaşır. Bu rüzgar, sıcak, kurak ve rahatsız edici bir etkiye sahiptir.

Samyeli (Keşişleme)

Güney bölgesinde meydana gelen sıcak rüzgar olan Lodos, özellikle yaz aylarında etkisini gösterir. Bu rüzgar sıcak, kuru ve boğucudur. Bölgedeki yüksek buharlaşma oranı kuraklık sorununa yol açmaktadır. Soğuk yerel rüzgarlar aşağıda verilmiştir.

Bora:

Dalmaçya kıyılarında, Dinar Alpleri'nden Adriyatik Denizi'ne doğru hızlı ve kuru bir şekilde esen bir rüzgardır. Bu rüzgarın hızı oldukça yüksektir.

Mistral:

Soğuk ve kuru bir rüzgar olan bu rüzgar, Fransa'nın Rhone vadisini izleyerek Akdeniz'e doğru eser.

Krivetz :

Karadeniz'e doğru Romanya'da aşağı Tuna ovasından esen Krivetz adı verilen soğuk ve kuru bir rüzgar mevcuttur.

Tropikal Rüzgar

Tropikal kuşaklarda meydana gelen hızı saatte 100-150 km'ye kadar çıkan rüzgarlar, ani basınç farklılıklarından kaynaklanır. Bu rüzgarlar özellikle okyanuslar üzerinde ortaya çıkar ve sarmal bir şekilde hareket ederler. Bu nedenle, genellikle hortumlarla birlikte görülürler. Tayfun, Meksika Körfezinin kıyılarında Hurricane, Bazı Afrika bölgeleri ve Latin Amerikası kıyılarındaki Tornado gibi isimlerle anılırlar. Ancak, Türkiye gibi karaların ve denizlerin bulunduğu bölgelerde büyük basınç farkı olmadığı için bu rüzgarlar etkili değildir(Kaya. 2021).

3.1.2 Rüzgarın Hızını Etkileyen Faktörler

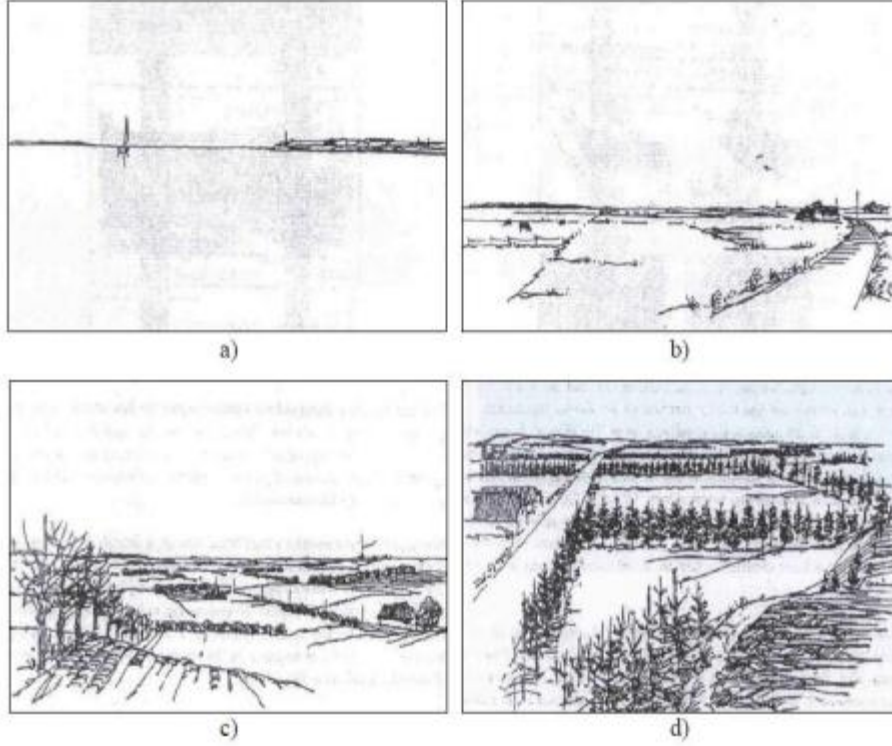
Rüzgar hızı, sürekli olarak değişiklik gösterir ve bu değişim, yerel yüzey koşulları, engeller ve hava şartlarıyla birlikte ortaya çıkar. Rüzgar türbinlerindeki rotorun ataleti, hızlı değişiklikleri dengeleyebilir ama yine de rüzgar değişimleri, türbinlerden elde edilen enerji miktarını etkiler. Özellikle fırtınalar sırasında, aniden değişen rüzgar hızları ve yönleriyle karşılaşabiliriz. Engellerin arkasındaki bölgeler, arazi yapısı pürüzlü olan alanlar ve binalar gibi yapılardan dolayı hava akımlarında türbülanslar oluşur. Bu türbülanslar, hortumlar veya anaförler şeklinde düzensiz rüzgar akımları olarak adlandırılır ve rüzgar türbini verimliliği için olumsuz bir etken oluşturur. Ayrıca rüzgar türbinine zarar verebilirler. Rüzgar türbinlerinin kuleleri, rüzgar türbülanslarından kaçınmak için yüksek bir konuma inşa edilir. Rüzgarın ölçümü için hız ve yön olmak üzere iki değişken dikkate alınır. Rüzgar hızında meydana gelen ani dalgalanmalar, "hamle" olarak adlandırılır ve rüzgarın hızı, yönü ve hamlesi en iyi şekilde anemometre veya yön kontrol cihazları gibi hassas ölçüm araçlarıyla ölçülür. Ölçüm araçları kullanmanın mümkün olmadığı durumlarda tahmini ölçümler yapılır ve bu durumlarda Beaufort ölçeği kullanılır. Rüzgar engelleri, konut, ağaçlar gibi, rüzgar hızını düşürerek türbülanslara neden olabilirler. Meydana çıkan çalkantılı bölge engeli, kendi yüksekliğinin 3 katı kadar genişleyebilir. Bu sebeple, rüzgar türbinlerinin uygun bir yerde konuşlandırılması gerekir(Kaya. 2021).

Tablo 3.3 Beaufort rüzgar ölçeği.

Beaufort No	Rüzgar Hızı		Tanım	Açıklama
	(km/saat)	(m/s)		
0	<1	0.0 - 0.2	Sakin	Duman dikey olarak yükselir
1	1 - 5	0.3 - 1.5	Esinti	Duman hafif esinti ile yükselir. Rüzgar yönü belirsizdir.
2	6 - 11	1.6 - 3.2	Hafif Rüzgar	Yapraklar kıpırdar. Esinti insan yüzünde hissedilir. Rüzgar yönü yoktur.
3	12 - 19	3.3 - 5.4	Tatlı Rüzgar	Yapraklar ve ince dallar hareket eder.
4	20 - 28	5.5 - 7.9	Orta Rüzgar	İnce dallar hareket eder. Kağıt ve tozlar yükselir.
5	29 - 38	8.0 - 10.7	Sert Rüzgar	Ağaçlar sallanmaya başlar.
6	39 - 49	10.8 - 13.6	Şiddetli Rüzgar	Büyük ağaç dalları hareket eder. Şemsiyenin kontrolü zorlaşır.
7	50 - 61	13.9 - 17.0	Çok Şiddetli Rüzgar	Büyük ağaçlar sallanır. Yürüme zorluğu farkedilir.
8	62 - 74	17.2 - 20.6	Fırtına	Ağaçlardaki ince dallar kırılır, yürümek iyice zorlaşır.
9	75 - 88	20.8 - 24.4	Şiddetli Fırtına	Binalarda hafif hasar oluşur. Çatı kiremitleri sökülmeğe başlar.
10	89 - 102	24.5 - 28.4	Tam Fırtına	Binalarda hasarlar oluşur. Büyük ağaçlar kökünden sökülür.
11	103 - 117	28.6 - 32.5	Çok Şiddetli Fırtına	Geniş ölçekli hasarlar oluşur
12	>118	>32.5	Tayfun	Aşırı derecede hasarlar meydana gelir.

3.1.2.1 Yüzey Pürüzlülük Faktörü

Yüzey pürüzlülüğü, bir bölgenin üzerindeki nesnelerin boyutları ve dağılımına bağlı olarak değişir. Özellikle kara bölgelerinde tipik pürüzlülük elemanları, bitki örtüsü ve doğal arazideki yapılarıdır. Bu nesneler, yüzey pürüzlülüğündeki değişimlerin oluşmasına neden olur ve yeni "dahili sınır tabakası" meydana getirir. Rüzgarın profili, bu yeni koşullara denklik sağlamak için değişir. Yüzey pürüzlülüğü dereceleri, kabaca dört ana sınıfta toplanabilir. Şekil 3.1'deki haritada, bu sınıfların her biri için belirli bölgeler verilebilir.

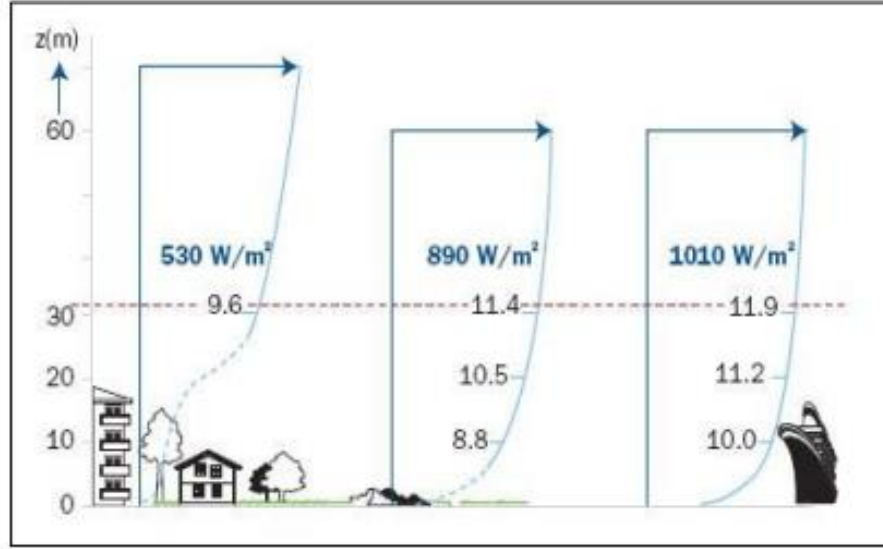


Şekil 3.1 Pürüzlülük Derecesi : a) 0 olduğu bölge, b) 1 olduğu bölge, c) 2 olduğu bölge, d) 3 olduğu bölge

Şekil 3.1'de gösterildiği gibi, yüzey pürüzlülüğü dereceleri dört ana sınıfta toplanmaktadır. Derece 0, su yüzeyleri ve pürüzsüz kum alanları gibi bölgeleri içerir. Bu bölgelerde, pürüzlülük çok düşük olduğundan rüzgar türbinlerinin üretim değerini fazla etkilemez. Derece 1, seyrekte olsa binalar ve ağaçlar gibi yapılar içeren çiftlik arazisi ve havaalanlarını kapsar. Derece 2, kapalı görünümlü çiftlik arazisi ve seyrek ağaçlık bölgeler gibi daha fazla pürüzlülüğe sahip alanları içerir. Son olarak, derece 3, büyük şehirler, ormanlar, siper kuşakları, küçük kentler ve yoğun ağaç ve çalılar gibi yapılar içeren, en yüksek pürüzlülüğe sahip bölgeleri kapsar. Bu pürüzlülük dereceleri, rüzgar türbinleri için uygun lokasyonların tespitinde önemlidir. Rüzgar türbinleri, düşük pürüzlülüğe sahip açık alanlarda daha iyi performans gösterirken, yüksek pürüzlülüğe sahip bölgelerde daha az verimli olabilir ve daha fazla hasar görebilir.

Rüzgar enerjisi hesaplamalarında pürüzlülük faktörü, enerji çıktısını doğrudan etkileyen bir faktördür. Şekil 3.2'den de görülebileceği gibi, belirli bir yükseklikte, pürüzsüz yüzeyler ve açık denizler gibi alanlarda en güçlü rüzgar hızlarına varmak olasıdır. Buna göre, pürüzlülük faktörünün değerinin doğru bir şekilde bulunması, rüzgar enerjisinin hesaplamaları için oldukça önemli aşamadır. Pürüzlülük faktörü, yüzey

pürüzlülüğünün yanı sıra, yüksekliğe, konumun coğrafi özelliklerine ve diğer faktörlere bağlı olarak hesaplanır. Bu faktör, rüzgar türbinlerinin yerleştirileceği konumun belirlenmesinde de önemlidir, çünkü pürüzlülük faktörü değeri, türbinlerin verimliliğini ve üretim kapasitesini belirler.



Şekil 3.2 Arazinin yapısına göre rüzgar hızı değişimi

Pürüzlülük uzunluğu, genellikle z_0 ile ifade edilir ve bir arazinin pürüzlülüğünü belirlemek için kullanılır. Yüzey pürüzlülük sınıfları ile karşılaştırılabilir ve bu sınıflara karşılık gelen yüzey pürüzlülük uzunlukları Tablo 3.3'te verilir. Pürüzlülük uzunluğu, arazinin yüzeyindeki nesne sayısı, boyutu ve dağılımı gibi faktörlere bağlı olarak değişebilir. Daha fazla ve daha büyük nesneler, daha yüksek bir pürüzlülük uzunluğu değerine neden olabilir ve bu da rüzgar türbinlerinin performansını etkileyebilir. Ayrıca, havadaki akışkan tabakanın kalınlığı ve dalgalanmaları da pürüzlülük uzunluğunu değiştirebilir. Bu nedenle, doğru bir pürüzlülük uzunluğu hesaplaması, rüzgar enerjisi potansiyelini tahmin etmek ve uygun rüzgar türbinleri seçmek için önemlidir.

Pürüzlülük elemanı yüksekliği h , rüzgara karşı gelen dikey kesi alanı A ve arazi üzerine dağılmış ortalama yatay kesit alanı A_H ile ifade edilir. Pürüzlülük uzunluğu, 3.1 denklemi kullanılarak hesaplanır. A_H değeri, A 'dan önemli ölçüde büyük olduğunda, hesaplanan z_0 değeri daha gerçekçi sonuçlar sunar (Kaya. 2021).

Tablo 3.4 Dış yapılarına göre pürüzlülük sınıfları ve uzunlukları

z_0 (m)	Yüzey Yapısı Karakteristikleri	Pürüzlülük Sınıfı
1.00		3
0.50	Büyük şehirlerin varoşları, taşra kentler	
0.30	Siper kuşakları, orman, küçük binalı şehir	
0.20	Birçok ağaç ve/veya çalılar, tek yada iki katlı seyrek binalar	2
0.10	Kapalı görünümlü çiftlik arazisi, seyrek ağaçlık	
0.05	Açık görünümlü çiftlik arazisi, seyrek ağaçlık	
0.03	Çok seyrek bina ve ağaçlı çiftlik arazisi	1
0.02	Havaalanları (binaları ve ağaçları ile birlikte)	
0.01	Havaalanı pistleri	
	Biçilmiş çim	0
0.005	Pürüzsüz çıplak toprak	
0.001	Pürüzsüz kar yüzeyleri	
0.0003	Pürüzsüz kum yüzeyleri	0
0.0001	Su yüzeyleri (göller, fiyortlar, denizler)	

$$z_0 = 0.5 \frac{hA}{A_H} \quad (3.1)$$

3.1.2.2 Rüzgar Hızı Yükseklikle Değişimi

Rüzgarın hızı, farklı yüksekliklerde değişkenlikler gösterebilir ve bu nedenle belirli bir yükseklik için bilinen bir rüzgar hızı kullanılarak, diğer yüksekliklerdeki rüzgar hızı tahmin edilebilir. (3.2) denklemi ile, yükseklikle birlikte rüzgar hızındaki değişim ifade edilebilir. Bu denklem, rüzgar enerjisi potansiyelinin ve uygun rüzgar türbinleri seçiminin belirlenmesinde önemlidir (Kaya. 2021).

$$\frac{V(z)}{V(z_r)} = \frac{\ln(z/z_0)}{\ln(z_r/z_0)} \quad (3.2)$$

3.2 Rüzgar Enerjisi Kullanımının Tarihsel Gelişimi

Binlerce yıldır, rüzgar gücü insanlık tarafından kullanılmaktadır ve kayıtlı tarihin başlarından itibaren gemilerin hareketi, tahıl öğütme ve su pompalama gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. M.Ö. 2000 yıllarının başında Eski Babil uygarlığı tarafından inşa edilen ilk gerçek yel değirmeni, pervane ve mil arasındaki bağlantı sayesinde dairesel hareket oluşturan bir mekanizmayı içermekteydi. İran ve Afganistan'da M.S. 10. yüzyıla kadar tahıl öğütmek amacıyla kullanılan yel değirmenleri, tahminen 5 metre uzunluğunda ve 10 metre yüksekliğindeydi. Yel değirmenlerinin çalışma prensiplerine dair en eski yazılı kaynaklar, 12. yüzyıla kadar uzanırken, bu dönemde yel değirmenleri hala tahıl işleme amacıyla kullanılmaktaydı. Yel değirmenleri, su pompalama amacıyla da kullanılmaya başlanarak birkaç yüzyıl sonra ortaya çıkmıştır. İngiltere'de 1150 yılında, Fransa'da 1180'de, Floransa'da 1190'da, Almanya'da 1222'de ve Danimarka'da 1259'da, ilk yatay eksenli yel değirmenleri fark edilmiştir. Avrupa'nın birçok bölgesine İran'dan yel değirmenleri hakkında bilgi taşınması, Haçlı Seferleri sırasında gerçekleşmiş olabilir. Yel değirmenleri, Hollandalıların temel dizaynı üzerinde geliştirmeler yaparak pervaneli tip kanatlar ve yönü değiştirme gibi yöntemlerle daha verimli hale getirilmiştir. Bu geliştirmeler sayesinde Hollanda, 17. yüzyılda dünyanın çok büyümüş ülkelerinden biri haline gelmiştir. Rüzgar hızından elektrik üretimi, Danimarkalı mühendislerin çalışmalarıyla geliştirilmiş ve rüzgar teknolojisi, I. ve II. Dünya Savaşı sırasında enerji darboğazının üstesinden gelmek için kullanılmıştır. Yel değirmenlerinin performansı, 12.-19. yüzyıllar arasında hızla artarak Avrupa'da yaygınlaşmıştır. 1800'lü yıllarda, Hollanda endüstrisi % 90 oranında rüzgar enerjisine dayalıydı ve Fransa'da 20000 küçük ölçülü yel değirmeni kullanılıyordu. Almanya'da ise 1904 yılında % 11'lik bir enerji payı sağlanmış ve ülke genelinde 19000'den fazla yel değirmeni yapılmıştır. Amerikalılar da 1920'lerin sonunda küçük yel değirmenlerini elektrik üretimi için kullanmışlar ve 1930'larda güç hatlarının kırsal arazilere elektrik ulaştırmaya başlamasıyla da bazı büyük çiftliklerde hala kullanılmaktadır. İkinci Dünya Harbi sonrasında petrol ücretlerinin düşmesi, rüzgar türbinlerine ilginin azalmasına neden olsa da, 1970'lerde petrol fiyatlarında yaşanan aşırı yükselişle birlikte dünya çapında

rüzgar türbinlerine yeniden ilgi artmıştır. 1970'lerden bu yana rüzgar teknolojisi adım adım geliştirilerek, 1990'ların sonunda yenilenebilir enerji kaynakları arasında en önemlilerinden birisi haline gelmiştir(Rüzgar Enerjisi, 2001: 59).

3.3 Azerbaycan'daki Rüzgar Enerjisi Durumu

Azerbaycan, rüzgar potansiyeli yönünden güneş potansiyeline kıyasla daha düşük bir seviyede olsa da, ülkede rüzgar enerjisi üretimi için önemli çalışmalar yürütülmektedir. Rüzgar enerjisi çiftçiliğindeki düşen fiyatlar, sektöre ilgiyi arttıran önemli faktörlerden biridir. Forbes'un raporuna göre, rüzgar enerjisi üretim maliyetleri 2018 yılında konvansiyonel üretimden daha düşük seviyelerde gerçekleşti. Ancak Azerbaycan'daki yenilenebilir enerji kaynakları üretim kapasitesi sadece 66 MW düzeyinde olduğundan, ülkedeki rüzgar potansiyeli tam olarak değerlendirilememektedir. IRENA'nın rüzgar potansiyeli değerlendirmesi, yıllık ortalama rüzgar hızı ve rüzgarlı gün sayısı için farklı bölgeler ve aylara göre veri içermemektedir. Abşeron yarımadası ve çevresinde ortalama yıllık rüzgar hızı 6-8 m/san ve yılda 145 rüzgarlı gün sayısı ile yüksek rüzgar enerjisi üretim potansiyeline sahiptir. Endüstriyel rüzgar türbinleri, minimum 3-5 m/s rüzgar hızlarında çalışmaktadırlar. Dünya Bankası'nın Küresel Rüzgar Atlası verilerine göre, Abşeron yarımadası ve etekleri, 50 metre yükseklikte ortalama 8 m/s rüzgar hızı ve 810 W/m² güç yoğunluğu göstermektedir. 100 metre yükseklikte, rüzgar hızı 9.1 m/s'ye ve güç yoğunluğu 1026 W/m²'ye ulaşmaktadır.Şekil 3.3 ve 3.4' de gösterildiği gibi Kuzey Sumgayıt ve Khizi ilçeleri, Kelbecer-Laçın ve Gence-Kazak bölgeleri, rüzgar çiftliği yapmak için uygun alanlardır. Özellikle Khizi bölgesi, 9 m/sn'den fazla ortalama rüzgar hızı ve 1000 W/m²'ye kadar güç yoğunluğu sağlamaktadır. Kelbecer-Laçın bölgesi ise rüzgar çiftliği kurulumunu zorlaştıran dağlık bir alan olarak öne çıkmaktadır. İsviçre'nin başarılı deneyimi ve teknolojik gelişmeler geniş topluluklar için rüzgar enerjisi üretim tesislerinin oluşturulmasına yardımcı olmaktadır. Gence-Kazak ekonomik bölgesi ise ortalama rüzgar hızının 5.45 m/s olduğu ve orta ölçekli türbinlerin kullanımının uygun olduğu bir alan olarak öne çıkmaktadır(Mustafayev. 2022. 12-15).

Tablo 3.5 Azerbaycan'da yenilenebilir kaynak potansiyeli (IRENA)

Yenilenebilir	Teknik Kapasite MW
Güneş	23.040
Rüzgar	3000
Bio	380
Küçük hidroelektrik	520
Toplam	26.940

3.4 Rüzgar Türbinleri, Çeşitleri Ve Sınıflandırılması

Rüzgardaki kinetik enerjini öncesinde mekanik enerjiye sonrasında elektrik enerjisine dönüştüren sistemler rüzgar türbinleridir. Rüzgar türbinleri kule, jeneratör, dişli kutuları, elektrik/elektronik elemanları ve pervanelerden oluşmaktadır. Rotor kısmında rüzgarın kinetik enerjisi mekanik enerjiye dönüşür. Hızlanan rotor milinin hareketi gövde kısmındaki jeneratöre aktarılır. Bu jeneratörden alınan elektrik enerjisi alıcılara aktarılır ya da depolanır.

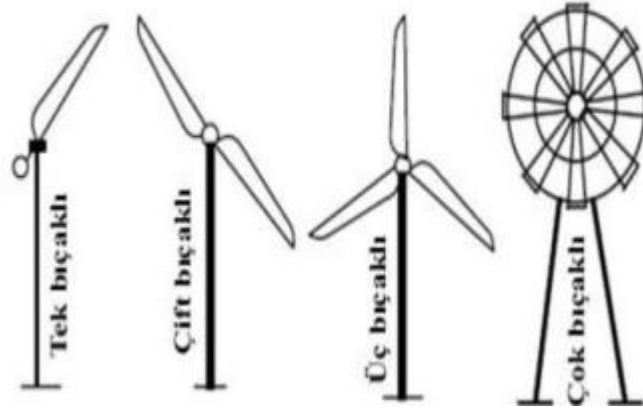


Şekil 3.3 Rüzgâr türbini sınıflandırılması

Rüzgar türbinleri, dönme eksenlerine, devir sayılarına, güç kapasitelerine, kanat sayılarına, rüzgâr etkisine, dişli özelliklerine ve kurulum konumlarına bağlı olarak farklı kategorilere ayrılırlar. Rüzgar türbinleri, dönme eksenlerine bağlı olarak üç farklı kategoriye ayrılırlar: yatay eksenli rüzgar türbinleri, dikey eksenli rüzgar türbinleri ve eğik eksenli rüzgar türbinleri. Yatay eksenli rüzgar türbinleri dönme çizgisi rüzgar yönüne paralel, kanatlar ise rüzgar yönüne göre diktir. Bu tür türbinlerde rotor kanat sayıları azaldıkça rotor kısmı daha hızlı döner. Verimleri %45 civarındadır. Bu tip rüzgar türbinleri çevrede engeller varsa onlardan 10m yükseklikte

yoksa genel olarak 20-30m yükseklikte konumlandırılır. Düşey eksenli rüzgâr türbinleri yatay türbinlere kıyasla pervane görüntüsünde değillerdir. Genellikle deneyler için kullanılmaktadır. Yatay eksenlilerden farklı olan yere yerleştirilmediğinden kule ihtiyacı yoktur. Bu türbin tiplerinin verimleri düşüktür. Eğik eksenli rüzgâr türbinlerinin dönme eksenleri, rüzgar yönüne göre eğimli bir açı oluşturur. Bu tür türbinlerin kanatları ile dönme eksenleri arasında belirgin bir açı bulunmaktadır.

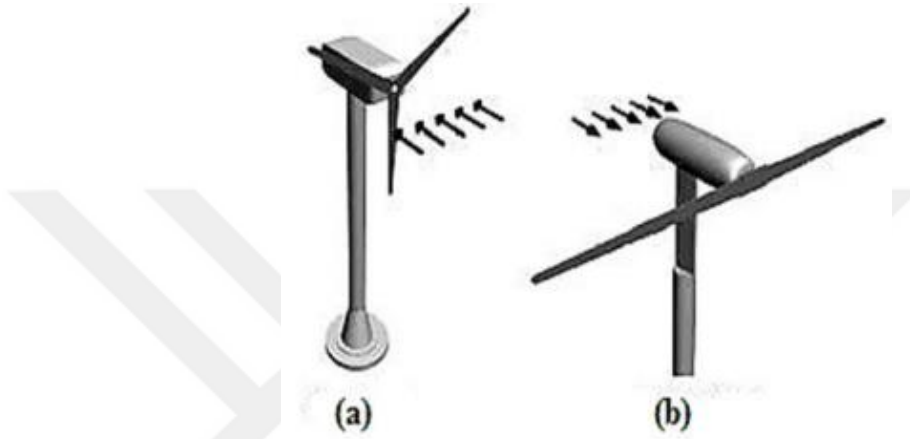
Kanat sayılarına göre rüzgâr türbinleri 4 çeşide ayrılır. Tek kanatlı, iki kanatlı, üç kanatlı ve çok kanatlı. Tek kanatlı rüzgâr türbinleri, esas olarak pervanelerin maruz kaldığı yüksek dönme hızını azaltmak amacıyla kullanılır. Üç kanatlı rüzgar türbinleri kıyasla iki kanatlı rüzgar türbinleri daha az maliyetli gözükebilir. Fakat iki kanatlı rüzgar türbinleri dinamik etkilerinden dolayı bazı ilave ekipmanlar gerektirdiğinden üç kanatlı rüzgar türbinleriyle aynı maliyetdedirler. Üç kanatlı rüzgar türbinleri günümüzde en çok kullanılan modern rüzgar türbinleridir. Bunun başlıca sebebi tüm rüzgar hızlarında değişmez atalet momentine sahip olmasıdır. Bu avantaj 3 ve daha fazla kanata sahip türbinlerde görülmektedir. Rüzgar türbinlerinin ilk örnekleri çok kanatlı rüzgar türbinleridir. Bu rüzgar türbinleri düşük hızlarda çalışırlar.



Şekil 3.4 Kanat sayılarına göre rüzgâr türbinleri

Rüzgârın geliş yönüne göre ikiye ayrılmaktadır. Rüzgârı önden alan ve rüzgârı arkadan alan türbinler. Rüzgârı önden alan türbinler rotor yüzü rüzgara yönelmiş olduğu türbinlerdir. Külenin yapacağı gölgeleme etkisine maruz kalmaları en büyük üstünlükleridir. Günümüzde bu tip rüzgar türbinleri sık kullanılmaktadır. Bu tip türbinlerde yaw mekanizması kullanılmaktadır. Bu mekanizma sayesinde rotor

rüzgara karşı döndürülmek için kullanılır. Arkadan rüzgârlı türbinlerin rotorları kulenin arkasında konumlandırılır. Bu tip rüzgar türbinlerinde yaw mekanizmasına gerek olmaz. Kanatların esnek özelliğe sahip olması önemli üstünlüktür. Bu da makinenin güç dinamiği açısından ve ağırlık açısından önemli üstünlük sağlamaktadır. Kule kanat kısmından geçerken oluşa bilen güç dalgalanmaları çok daha zarar verebilir. Güç Bakımından Rüzgâr Türbinleri küçük güçlü (<30 kW), orta güçlü (30-100 kW), büyük güçlü (100 kW-1000 kW), çok büyük güçlü (>1MW).



Şekil 3.5 Rüzgar etkisine göre (a)Önden rüzgar alan, (b)Arkadan rüzgar alan

Dişli Özelliklerine Göre Rüzgâr Türbinleri dişli kutusu kullanılan ve dişli kutusu kullanılmayan türbin jeneratör sistemleri olarak iki sınıfa ayrılabilir. Dişli kutusu kullanılan rüzgâr türbinlerinin jeneratörleri yüksek devirli ve az kutuplu olmaktadır. Jeneratör devir sayısı ile pervanenin devir sayısını uygunlaştırmak için 1/50, 1/70 gibi oranda dişli kullanılır. Bunlar sabit hızlı- sincap kafesli indüksiyon jeneratörü, değişken hızlı- çift beslemeli indüksiyon jeneratörüdür. Dişli kutusuz kullanılan rüzgâr türbinlerinin jeneratörleri düşük devirli, çok kutuplu olduğu için bu sisteme gerek yoktur. Bunlar direkt sürümlü- elektriksel uyartımlı senkron jeneratör, direkt sürümlü – sürekli mıknatıslı senkron jeneratör(Elibüyük, Üçgül, 2014: 2-7)

Tablo 3.6 Rüzgar alış yönüne göre türbinlerin karşılaştırılması

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

Tablo 3.7 Onshore Ve Offshore rüzgar santrallerinin karşılaştırılması

	Kurulum Maliyeti	Çalışma Hızı	Enerji Üretimi	İşletme Maliyeti	Yaygın Kullanımı
Onshore (Kara üstü)	Düşük	Düşük	Düşük	Düşük	Yüksek
Offshore (Deniz üstü)	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Düşük

4 RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYELİ HESAPLAMA YÖNTEMLERİ

4.1 Temel Denklemler

Kinetik enerji hareket eden cismin taşıdığı enerjidir. Bu enerjinin bir formülü olup, denklem 4.1 ile ifade edilebilir.

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (4.1)$$

Denklem 4.1, cisimlerin taşıdığı kinetik enerjinin kütle ve hız faktörleri ile ilişkisini açıklar. Ancak rüzgar gibi hareket eden hava akımları için birinci dereceden bir kinetik enerji formülü yetersizdir. Bunun nedeni, hareket eden hava akımlarının kütlelerinin sürekli olarak değişmesi ve değişen hızlarından dolayı çeşitli enerji düzeyleri taşımasıdır. Bu nedenle, rüzgarın taşıdığı enerjinin hesaplanması için kütle yerine birim zamandaki kütleli debi kullanılmalıdır. Kütleli debi, denklem 4.2 ile gösterilir ve birim zamanda belirli bir alandan geçen kütlenin ölçüsüdür. Bu sayede, rüzgarın taşıdığı enerji doğru bir şekilde hesaplanabilir.

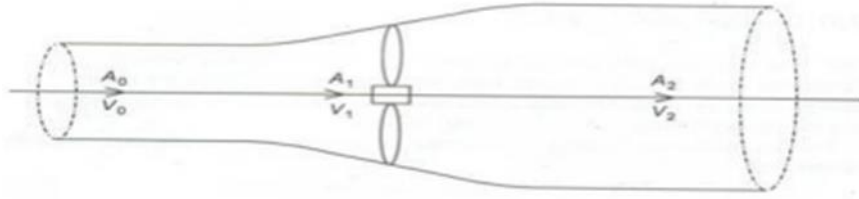
$$m = \rho Av \quad (4.2)$$

4.2 denkleminde p , taşınan materyalin spesifik ağırlığını ifade eder. 4.2 denkleminin 4.1 denkleminin yerine yazılması sonucunda, rüzgar enerjisinin taşıdığı enerji bulunabilir ve 4.3 denklemi ile aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$E_k = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (4.3)$$

Evet, rüzgarın taşıdığı kinetik enerji hızın küpüyle orantılıdır ve havanın yoğunluğu da kinetik enerjiyi etkileyen bir diğer faktördür. Rüzgar enerjisi, Betz kriteri ile belirlenmiş maksimum verim oranı ile kullanılabilir. Havanın rüzgar türbinine ulaşmadan önce genişlemez ve bu nedenle hızı düşer. Türbine girdiği zaman enerjisinin bir kısmını türbine verir ve çıkış hızı olarak V_2 hızına sahip olur. V_2 hızı ile

giriş hızı olan V_0 hızı arasındaki oranlara bağlı olarak enerji üretilebilir. Şekil 4.1, rüzgar türbinine girmeden önceki hava akımının genişlemesini göstermektedir.



Şekil 4.1 Rüzgarın türbine girdiği anda genişlemesi

Rüzgar türbinine girmeden önce rüzgarın enerjisi ile türbinden çıktığı andan sonra kalan rüzgarın enerjisi arasındaki fark, rüzgar türbini tarafından çekilen enerjiyi temsil eder. Bu enerji farkı denklem 4.4 ile ifade edilebilir.

$$P = \left(\frac{1}{2}\right) m (V_0^2 - V_2^2) \quad (4.4)$$

Akışkanın türbine girişindeki hız ve türbinden çıkışındaki hız arasındaki ortalama değer, rotor üzerindeki akışkan hızını temsil eder.

$$V_1 = \frac{(V_0 + V_2)}{2} \quad (4.5)$$

Akışkanın kütlesi, denklem 4.6 kullanılarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$m = \rho A \left(\frac{V_0 + V_2}{2}\right) \quad (4.6)$$

Denklem 4.7, rotorun rüzgardan elde ettiği gücün ifadesi olarak kullanılır.

$$P_t = \left(\frac{1}{2}\right) m (V_0^2 - V_2^2) \quad (4.7)$$

Denklem 4.6'nın denklem 4.7'de kullanılmasıyla, denklem 4.8 elde edilir.

$$P_t = \left(\frac{1}{4}\right) \rho A (V_0^2 - V_2^2) (V_0 + V_2) \quad (4.8)$$

Denklem 4.9'un kullanılmasıyla, rüzgardaki gücün rotor tarafından çekilen güce oranı aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$C_p = \frac{P_t}{P_r} = \frac{\left(\frac{1}{4}\right)\rho A(V_0^2 - V_2^2)(V_0 + V_2)}{\frac{1}{2}\rho AV_1^3} \quad (4.9)$$

Denklem 4.10'a göre, türbine giren ve çıkan hızların oranı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\frac{V_2}{V_0} = a \quad (4.10)$$

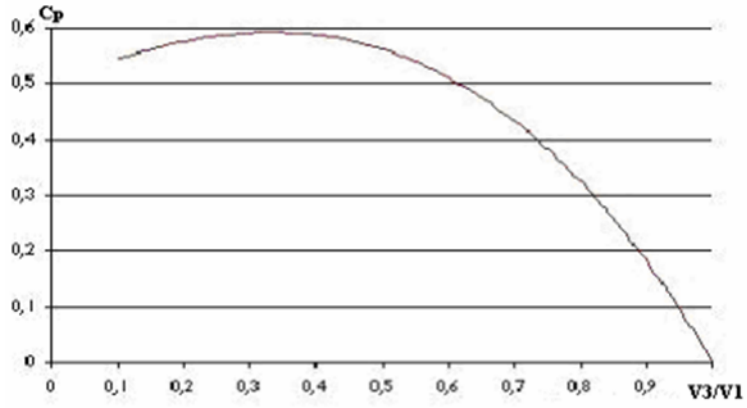
Denklem 4.9 ve denklem 4.10'un birlikte kullanılmasıyla denklem 4.11 elde edilir.

$$\frac{dc_p}{da} = \left(\frac{1}{2}\right)(3a - 1)(a + 1) \quad (4.11)$$

Denklem 4.11'in çözümü, aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$a = \frac{1}{3} \quad (4.12)$$

Denklem 4.12, P_r değerini rüzgar türbini tarafından mekanik enerjiye dönüştürülen enerjiyi, C_p değerini ise rüzgar türbini tarafından çekilen enerjinin rüzgardaki enerjiye oranını ifade etmektedir. Bu denklemde a , rüzgar türbinden çıkan rüzgarın başlangıç hızının rüzgar türbine gelen rüzgarın başlangıç hızına oranını temsil etmektedir. Denklem 4.12'den elde edilen değer, denklem 4.10'da yerine konulduğunda C_p değerinin en büyük değeri olan yaklaşık 0.59 elde edilir. Şekil 4.2, C_p katsayısının türbine giren ve çıkan akışkanın hızlarının oranına bağlı olarak nasıl değiştiğini göstermektedir(Akdağ, 2008: 40).



Şekil 4.2 Betz limit değişimi

4.1.1 Rüzgar Hızının Yüksekliğe Göre Değişimi

Genellikle rüzgar ölçümleri 10-30 metre arasında yapılmaktadır. Ancak günümüzdeki güçlü ve büyük rüzgar türbinleri göbek yükseklikleri, bu değerleri aşmaktadır. Bu yüzden, belirli yükseklikte ölçülen rüzgar verileri, istenen yükseklikteki değerleri bulmak için rüzgar gücü profili kanunu kullanılır. Farklı yüksekliklerdeki rüzgar hızları aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanabilir.

$$\left(\frac{v_2}{v_1}\right) = \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^\alpha \quad (4.13)$$

4.13 denkleminde, v_1 ölçülen rüzgar hızını, v_2 ise belirlenmekte olan rüzgarın hızını gösterir. v_1 hızı, h_1 yüksekliğinde ölçülmüştür. v_2 hızı ise h_1 yüksekliğinde belirlenmek istemektedir. α , Helman katsayısıdır ve rüzgar hızı ölçüm yerinin özelliklerine bağlıdır.

$$\left(\frac{P_2}{P_1}\right) = \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^{3\alpha} \quad (4.14)$$

4.14 denkleminde h_1 yükseklikte hesaplanmış güç yoğunluğu P_1 , P_2 ise hesaplanmak istenen h_2 yükseklikte güç yoğunluğunu gösterir (Akdağ, 2008: 38-41).

4.2 Rüzgar Potansiyeli Hesaplama Yöntemleri

Herhangi bir bölgede rüzgar enerjisinin potansiyeli hesaplanması ve rüzgar enerjisi dönüşüm sistemi için doğru yer seçimi için, rüzgar şiddeti ölçümlerinin en az bir yıl yapılması önemlidir. Uzun vadeli ölçümler, yatırımda fizibilite çalışmalarının daha doğru sonuçlar vermesine yardımcı olabilir. Rüzgar enerjisinin potansiyelini etkileyen en mühim faktörlerden biri şiddetidir ve bu faktör karanın topografik yapısından da etkilenir. Rüzgar enerjisi, rüzgar hızının küpü ve havanın yoğunluğu ile doğru orantılı olarak artar. Bu yüzden, %1'lik ölçüm hatası enerji çıkışına %3 yansiyabilir. Rüzgar santrallerinin kurulmasından önce bölgenin rüzgar enerjisi potansiyeli hesaplanması önemlidir. Rüzgar enerjisi tahmininde farklı yöntemler kullanılabilir, örneğin atmosferik sınır tabakanın davranışlarını açıklayan nümerik analiz veya bir rüzgar tüneliyle hava akımının modellenmesi gibi. Diğer bir model ise amprik modellerdir, rüzgar rejiminin ve özelliklerinin belirlenmesi için ekonomik bir yöntemdir. Bugün, rüzgar enerjisi potansiyeli WASP, Wind Pro, Alvin, RetScreen gibi yazılımlar veya uydu verileri ve istatistiksel yöntemler kullanılarak hesaplanabilir. İstatistiksel analizler, rüzgar şiddetinin Weibull dağılımına uyduğunu göstermektedir, ancak her bölgenin rüzgar davranışının hangi dağılıma uyduğunun incelenmesi mühimdir. Popüler yazılımlar (WASP, Wind Pro, Alwin) Weibull dağılımı kullanarak hesaplamalarını yapmaktadır(Akdağ, 2008: 41-42).

4.3 Weibull Dağılımı

Weibull dağılımı, boyutsuz şekil (k) ve rüzgar hızıyla aynı birime sahip ölçek (c) parametreleri ile tanımlanan iki parametrelili bir olasılık dağılımıdır. İki parametrelili Weibull dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonu aşağıdaki gibidir

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (4.15)$$

Weibull dağılımı, rüzgar hızı (m/s), boyutsuz şekil (k) ve ölçek (c) parametreleri ile tanımlanır ve birikimli (kümülatif) olasılık yoğunluk fonksiyonu aşağıdaki 4.16 denklemi ile ifade edilir. Burada v rüzgar hızı (m/s), k boyutsuz şekil ve c ise ölçek (m/s) parametresidir.

$$F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (4.16)$$

Yapılan çalışmalar, rüzgar verilerinin dağılımını göstermek için Weibull dağılımının uygun olduğunu göstermiştir. Rüzgar enerjisi potansiyelinin hesaplanmasında da Weibull dağılımı yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Genellikle, rüzgar verilerinin Weibull dağılımına uyduğu bilinmektedir; ancak bazı bölgelerde rüzgar verileri iki parametrelili Weibull dağılımına uymamaktadır.

Weibull dağılım parametrelerinin hesaplanması için literatürde birçok yöntem geliştirilmiştir. Yapılan çalışmalar, Grafik Yöntem, En Yüksek Olabilirlik Yöntemi ve Moment Yönteminin şekil ve ölçek parametrelerini hesaplamada daha iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir. Ancak bu yöntemler farklı sonuçlar verebilmektedir. Bu nedenle, Weibull dağılım parametrelerinin hesaplanması için kullanılan yöntemlerin gerçek verilerle hata analizi yapılması önemlidir. Bu yöntemlerin hangisinin daha iyi sonuçlar verdiğinin belirlenmesinde bu analizler yardımcı olabilir.

Weibull dağılımı rüzgar verilerine uygulandığında, şekil parametresi ekvator yakınlarında yaklaşık 1, ılıman enlemlerde ise yaklaşık 2 ve sürekli rüzgar alanlarında ise yaklaşık 3 olarak bilinmektedir.

Weibull dağılımında, ölçek parametresinin 1 veya 2'ye eşit olması durumları özel durumlardır. Ölçek parametresinin 1'e eşit olması, dağılımın Gaussian dağılıma benzediği anlamına gelir. Ölçek parametresinin 2'ye eşit olması ise Rayleigh dağılımına dönüşme durumunu ifade eder. Rayleigh dağılımı tek parametrelili bir dağılımdır ve Weibull dağılımının özel bir halidir.

Weibull dağılımının, 0-1 m/s gibi küçük hız verilerini yeterince temsil edememesi kullanımında belirli bir sakınca doğurabilir. Ancak günümüz türbinlerinin enerji üretimine başlama hızları genellikle 3-4 m/s arasındadır ve bu nedenle Weibull dağılımının kullanımı sonucundaki hata yok denecek kadar az olabilir. Yani, türbinlerin işletim hızları Weibull dağılımı tarafından iyi bir şekilde temsil edilir ve doğru enerji üretim tahminleri yapılabilir. Ancak, İstatistiksel olarak doğru sonuçlar almak için, Weibull dağılımının temel varsayımlarının da uygun bir şekilde sağlanması gerekmektedir.

Weibull dağılımının, 0-1 m/s gibi küçük hız verilerini yeterince temsil edememesi kullanımında belirli bir sakınca doğurabilir. Ancak günümüz türbinlerinin enerji üretimine başlama hızları genellikle 3-4 m/s arasındadır ve bu nedenle Weibull dağılımının kullanımı sonucundaki hata yok denecek kadar az olabilir. Yani, türbinlerin işletim hızları Weibull dağılımı tarafından iyi bir şekilde temsil edilir ve doğru enerji üretim tahminleri yapılabilir. Ancak, İstatistiksel olarak doğru sonuçlar almak için, Weibull dağılımının temel varsayımlarının da uygun bir şekilde sağlanması gerekmektedir(Akdağ, 2008: 42-43).

4.3.1 Grafik Yöntem

Grafik yöntemi, Weibull dağılımının şekil ve ölçek parametrelerinin tahmin edilmesinde kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem Weibull birikimli olasılık yoğunluk fonksiyonunun (4.16) iki tarafının iki defa doğal logaritması alınarak denklem 4.17'nin elde edilmesiyle gerçekleştirilir. Bu yöntem, verilerin görselleştirilmesi yoluyla Weibull dağılımının uygunluğunun kontrol edilmesine ve şekil ve ölçek parametrelerinin tahmin edilmesine olanak tanır. Grafik yöntemi, istatistiksel analiz ile birlikte mühendislik, endüstri ve bilimsel uygulamalar da dahil olmak üzere çeşitli alanlarda kullanılmaktadır.

$$\ln[-\ln[1 - F(v)]] = k \ln v - k \ln c \quad (4.17)$$

$\ln [-\ln [1 - F (v)]]$ 'nin $\ln v$ 'ye göre grafiği uzayda doğruyu gösterir ve k parametresi bu doğrunun eğimidir. Bu doğrunun ordinat değerlerinin ($\ln[-\ln[1-F(v)]]$) hesaplanması için önce frekans dağılımının hesaplanması sonrada birikimli frekans dağılımının hesaplanması gereklidir. Hesaplanan bu değerler ile oluşan en küçük kareler problemi çözülerek k ve c parametreleri bulunur(Akdağ, 2008: 43-44).

4.3.2 Moment Yönetimi

Denklem 4.18'de dağılımın ikinci momenti gösterilmiştir.

$$m_2 = \int_0^{\infty} v^2 f(v) dv \quad (4.18)$$

Weibull dağılımının ikinci momenti, hesaplamak için denklem 4.15'in denklem 4.18'e yerine yazılması gerekmektedir. Bu hesaplama aşamasında, denklem 4.19'da belirtilen değişken dönüşümü de uygulanmalıdır. Böylece, denklem 4.20 kullanılarak Weibull dağılımının ikinci momenti hesaplanabilir.

$$\xi = \left(\frac{v}{c}\right)^k, v = c\xi^{\frac{1}{k}}, dv = \frac{c}{k}\xi^{\frac{1-k}{k}}d\xi \quad (4.19)$$

Denklem 4.20 de ikinci momentin açık hali gösterilmiştir.

$$m_2 = c^2 \int_0^\infty \xi^{\frac{2}{k}} e^{-\xi} d\xi \quad (4.20)$$

Denklem 4.21 deki formül Gamma fonksiyonunu göstermektedir.

$$\int_0^\infty \xi^x e^{-\xi} d\xi = \Gamma(1+x) \quad (4.21)$$

Weibull dağılımının ikinci momentini hesaplanması Gamma fonksiyonunun denklem 4.20'de yerine yazılması sonucunda mümkündür. Sonuç denklem, 4.22'de gösterilir.

$$m_2 = c^2 = \Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) \quad (4.22)$$

Dağılımın ortalaması denklem 4.23 ile aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$v_{ort} = \int_{-\infty}^\infty v f(v) \quad (4.23)$$

Denklem 4.23'te belirtilen integral, iki kısma ayrılarak denklem 4.24'te olduğu gibi ifade edilebilir.

$$v_{ort} = \int_{-\infty}^0 v \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} dv + \int_0^\infty v \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} dv \quad (4.24)$$

Denklem 4.24 ifadesindeki ilk $0 -\infty$ integrali 0 olur ve denklem 4.25'deki gibi yazılabilir.

$$v_{ort} = \int_0^{\infty} v \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} dv \quad (4.25)$$

Denklem 4.26, denklem 4.19'deki değişken dönüşümlerinin kullanılmasında denklem 4.25'e eşitlenir.

$$v_{ort} = c \int_0^{\infty} \xi^{\frac{1}{2}} e^{-\xi} d\xi \quad (4.26)$$

Weibull dağılımının ölçek parametresi, denklem 4.21'deki Gamma fonksiyonunu kullanarak denklem 4.27'ile ifade edilebilir.

$$C = \frac{v_{ort}}{\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right)} \quad (4.27)$$

Denklem 4.28, bir olasılık dağılımının standart sapmasını hesaplamak için kullanılan bir denklemdir. Rüzgar dağılımının standart sapması, rüzgar rejimi hakkında önemli bir bilgi verir.

$$\sigma = (m_2 - v_{ort}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (4.28)$$

Standart sapmanın karesini, denklem 4.22 ve denklem 4.27'nin kullanılmasıyla aşağıdaki gibi gösterilir.

$$\sigma^2 = c^2 \Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \left[c \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)\right]^2 \quad (4.29)$$

Denklem 4.30'da denklem 4.29'un her iki taraftan $c^2 \Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right)$ ile bölünmesi gösterilmiştir.

$$\left(\frac{\sigma}{c \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)}\right)^2 = \left(\frac{\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right)}{[\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)]^2}\right) - 1 \quad (4.30)$$

Denklem 4.27’de ölçek parametresi, ortalama hız cinsinden ifade edilmişti. Denklem 4.30’daki ifadede, ölçek parametresinin yerine bu ortalama hızın yazılması sonucunda aşağıdaki denklem elde edilebilir.

$$\left(\frac{\sigma}{v_{ort}}\right)^2 - \left(\frac{\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right)}{[\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)]^2}\right) + 1 = 0 \quad (4.31)$$

Weibull parametresi (k), genellikle rüzgar verilerinin analizinde 5'ten küçük ve 1'den büyük değerler alır. Ancak, denklem 4.31 ile ifade edilen denklemin nümerik yöntemlerle çözümü, en büyük sınırların kullanılması ve k değerinin 1 ile 10 arasında olması durumunda aşağıdaki gibi gerçekleştirilir (Akdağ, 2008: 44-46).

$$k = \left(\frac{\sigma}{v_{ort}}\right)^{-1.086} \quad (4.32)$$

4.3.3 En yüksek Muhtemellik Yöntemi

Weibull dağılımı özellikle doğal yaşam sürecinde ortaya çıkan ve birçok alanda kullanılan bir olasılık dağılımıdır. Bu dağılımda k ve c parametreleri önemli olduğundan, bu parametrelerin hesaplanmasında doğru bir yöntem kullanmak oldukça önemlidir. Bu yöntemler arasında en yüksek olabilirlik yöntemi bulunmaktadır. Bu yöntem sayesinde elde edilen k ve c değerleri, Weibull dağılımına veri sağlayacak olan alanda doğru bir şekilde kullanılabilecektir. Bu usul istifade edilir rüzgar bilgileri $v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$ halinde n elemanlı bir küme yaratmaktadır. Bir gözletmede $V = v_1$ olma ihtimali, $f(v_j; k, c)$ ile oranlıdır. Aynı şekilde $V = v_1 \dots V = v_n$ hadiselerinin olma olasılığı da gösterilebilir. Bu olaylar birbirinden bağımsız olmaları nedeni ile alınan ölçümler sonucunda $L = \prod_{i=1}^n f(v_i; k, c)$ olaylarının olma olasılığı olabilirlik fonksiyonu 4.33 denklemi ile gösterilebilir.

$$L = \prod_{i=1}^n f(v_i; k, c) \quad (4.33)$$

4.33 denkleminde gösterilen çarpım ifadesi neticesinde 4.34 denklemi gösterilir.

$$L = \frac{k^n}{c^{nk}} \prod_{i=1}^n (v_i)^{k-1} e^{-\frac{1}{c^k} \sum_{i=1}^n (v_i)^k} \quad (4.34)$$

Denklem 4.33'te yer alan çarpım ifadesinden kurtulmak için denklemin her iki tarafına $\ln$ ifadesi uygulanarak çarpım ifadesi toplama ifadesine dönüştürülebilir. Bu şekilde, aşağıdaki denklem 4.35 ile gösterilebilir.

$$\ln L = n \ln k - nk \ln c + (k-1) \ln \left(\prod_{i=1}^n (v_i) \right) - \frac{1}{c^k} \sum_{i=1}^n (v_i)^k \quad (4.35)$$

4.35 denkleminin'in c ve k 'ye göre türevleri alınarak sıfıra eşitlendiğinde, denklemin maksimum değerini alan noktaların belirlenmesi mümkündür.

$$\frac{\partial \ln L(k, c)}{\partial c} = -\frac{nk}{c} + kc^{-(k+1)} \sum_{i=1}^n (v_i)^k = 0 \quad (4.36)$$

Ölçek parametresi, denklem 4.36'nın kullanılmasıyla hesaplanabilir ve aşağıdaki gibi gösterilir.

$$C = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (v_i)^k}{n} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (4.37)$$

k için aynı işlem görsel parametresini bulmak için yapılır ve aşağıdaki sonuç alınır.

$$\frac{\partial \ln L(k, c)}{\partial c} = \frac{n}{k} + \sum_{i=1}^n (v_i)^k - n \frac{\sum_{i=1}^n (v_i)^k \ln(v_i)}{\sum_{i=1}^n (v_i)^k} = 0 \quad (4.37)$$

4.38 denkleminde 4.37'den alınmış görsel parametresi ile çekilebilir.

$$k = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (v_i)^k \ln(v_i)}{\sum_{i=1}^n (v_i)^k} - \frac{\sum_{i=1}^n \ln(v_i)}{n} \right)^{-1} \quad (4.38)$$

Weibull dağılımında görsel ve ölçü parametreleri olarak bilinen c ve k değerleri, en yüksek olasılığı sağlamak için olabilirlik fonksiyonu kullanılarak bulunur. Ancak $V = 0$ durumunda 4.38 denklemi çözülemediğinden, bu değerlerin veri setinden çıkarılması ile çözüm gerçekleştirilir. Bu noktada, bilgisayarların 50000 verilik bir data setlerinin görsel ve ölçü parametrelerini bulunması çok az zaman almaktadır. Bununlada, doğru bir şekilde analiz edilen veri setleri ile Weibull dağılımı kullanılarak gelecekteki potansiyel olayların kestirimi yapılabilmektedir(Akdağ, 2008: 46-48).

4.4 Hata Analizi

Hata analizi için, kullanılan moment, en yüksek olabilirlik ve grafik yöntemleriyle alınan görsel ve ölçü parametreleri, doğru verilerin hangisinin doğru olduğunu belirlemek adına incelenmelidir. Bu çalışmada, r^2 analizi ve Ortalama Kare Hata (MSE) analizi olarak iki farklı hata hesaplama yöntemi kullanılmıştır. R_2 analizi, denklem 4.39 ile ifade edilen formül yardımıyla modelin gerçek verilere ne kadar yakın olduğunu ölçmek için kullanılır.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4.39)$$

Denklem 4.40 ile ifade edilen RMSE formülü, ikinci hata hesaplama yöntemi olarak kullanılmıştır.

$$\text{RMSE} = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2 \right]^{0.5} \quad (4.40)$$

Weibull dağılım fonksiyonu, R^2 değeri büyük ve/veya RMSE değeri küçük olan durumlarda gerçek veriler için en iyi dağılım fonksiyonu olarak kabul edilir. Burada gözlem sayısını n , gerçek değerleri y , Weibull dağılımı ise x ile hesaplanan değerleri ve ortalama değeri ifade eder (Akdağ, 2008: 48).

4.5 Güç Yoğunluğunun Hesaplanması

Güç yoğunluğu weibull dağılımına göre denklem 4.41 ile ifade edilir. Denklem 4.3'de rüzgarın kinetik enerjisi gösterilmiştir.

$$P_w = \int_0^\infty P(v) f(v) dv \quad (4.41)$$

Weibull dağılımına göre gücün yoğunluğu, 4.41 denkleminde 4.3 ve 4.15 denklemlerinin kullanılmasıyla ifade edilebilir. Bu formül, denklem 4.42'de belirtilmiştir.

$$P_w = \frac{1}{2} \rho \int_0^\infty v^3 \frac{k}{v} \left(\frac{v}{c} \right)^k e^{-\left(\frac{v}{c} \right)^k} dv = \frac{1}{2} \rho \int_0^\infty v^2 k \left(\frac{v}{c} \right)^k e^{-\left(\frac{v}{c} \right)^k} dv \quad (4.42)$$

Denklem 4.43, yapılan sadeleştirmeler ve Gamma fonksiyonunun kullanılması sonucu elde edilmiştir(Akdağ, 2008: 48-49).

$$P_w = \frac{1}{2} \rho v^3 \Gamma(1 + \frac{3}{k}) \quad (4.43)$$

4.6 En Mümkün Hızın Değeri

Weibull dağılımı, en olası hızın bulunması için bu fonksiyonun tepe noktası belirlenir. Bu tepe noktası, en fazla esen rüzgar hızını gösterir. Weibull dağılımının türevi, $\frac{f(v)}{dv} = 0$ durumunda en olası hız değerini bulmak için sıfıra eşitlenir ve bu durum denklemle ifade edilir.

$$\frac{f(v)}{dv} = 0 \quad (4.44)$$

Denklem 4.15'te verilen olasılık yoğunluğu fonksiyonu, yerine konulduğu 4.44 denklemi hareketle, 4.45 denklemini verir.

$$\left(\frac{\frac{k}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c} \right)^k}}{dv} \right) = 0 \quad (4.45)$$

Denklem 4.45'in türevinin alınması sonucunda alınan denklem 4.46 aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\frac{f(v)}{dv} = \frac{k}{c} (k-1) \frac{v^{k-2}}{c^{k-1}} e^{-\left(\frac{v}{c} \right)^k} - \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} (k) c^{-k} (v)^{k-2} e^{-\left(\frac{v}{c} \right)^k} = 0 \quad (4.46)$$

Denklem 4.47, denklem 4.46'da yapılan sadeleştirme işlemleri sonucu elde edilir.

$$(k-1) - (k) \left(\frac{v}{c} \right)^k = 0 \quad (4.47)$$

Denklem 4.48, en olası hızı ifade etmek için denklem 4.47'de bulunan v değerinin kullanıldığı bir denklem olarak ifade edilebilir(Akdağ, 2008: 49-50).

$$v_{enolasi} = c \left(\frac{k-1}{k} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (4.48)$$

4.7 En Çok Enerjinin Taşıdığı Hız

Zamanın ve gücün çarpılması enerjini verir. Birim alanda ve birim zamanda hesaplanan enerji, 4.49'daki şekilde gösterilebilir.

$$E = Pf(v) \quad (4.49)$$

Denklem 4.3 ve 4.15 kullanılarak aşağıdaki sonuç alınmıştır.

$$E = \frac{1}{2} p v^3 \frac{k}{v} \left(\frac{v}{c} \right)^k e^{-\left(\frac{v}{c} \right)^k} \quad (4.50)$$

Türevi sıfır olan 4.50 denkleminin, enerji akışına büyük katkıyı sağlayan hızın değeri belirlenir ve elde edilen sonuç, 4.51'deki denklem gibi ifade edilir (Akdağ, 2008: 50).

$$V_{\max E} = c \left(\frac{k+2}{k} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (4.51)$$

4.8 Türbinin Üreteceği Enerjinin Hesaplanması

Rüzgar türbinin ürettiği enerjinin seçilmiş bir an dilimindeki miktarını hesaplanmasında Weibull fonksiyonunun olasılık yoğunluğu fonksiyonu türbinin güç eğrisine çarpılarak hesaplanan bir integral kullanılır. Bu integral, rüzgar türbininin üretimine başladığı ve sona erdiği noktalar olarak belirlenen sınırlar arasında gerçekleştirilir bu formül 4.52 gibi olur.

$$E_{turbine} = T \int_{v_1}^{v_0} P_T(v) f(v) dv \quad (4.52)$$

Türbin eğrisi fonksiyonu (x), parçalı bir fonksiyon olduğundan integral ifadesi, iki parçaya ayrılabilir (Akdağ, 2008: 50-51).

$$E_{turbine} = T \left[P_R \int_{v_1}^{v_R} (a_1 v^3 + a_2 v^2 + a_3 v + a_4) \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c} \right)^k} dv + P_R \int_{v_R}^{v_0} \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c} \right)^k} dv \right] \quad (4.53)$$

4.9 Rüzgar Türbinlerinin Güç Eğrileri

Literatürde genellikle türbinlerin güç eğrilerinin modellenmesi 3 üsulla yapılır. Yöntemler arasında, rüzgar türbininin faaliyete başladığı ve kapasitesinin tam olduğu hızları kullanarak modellenme sistemi ve 2. dereceden denklemin modellenen yöntemi bulunmaktadır. Rüzgar türbinini 3. dereceden bir formül olarak modelleyen yöntem ise aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$P_T(V) = \begin{cases} 0 & , v < v_1 \\ (a_1 v^3 + a_2 v^2 + a_3 v + a_4) P_R & , v_1 \leq v < v_R \\ P_R & , v_R \leq v < v_0 \\ 0 & , v \geq v_0 \end{cases} \quad (4.54)$$

Denklem 4.55 ile ifade edilen 2. dereceden bir denklemle modelleme ise aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$P_T(V) = \begin{cases} 0 & , v < v_1 \\ (a_1 v^2 + a_2 v + a_3) P_R & , v_1 \leq v < v_R \\ P_R & , v_R \leq v < v_0 \\ 0 & , v \geq v_0 \end{cases} \quad (4.55)$$

Denklem 4.56 ile ifade edilen rüzgar türbinin çalıştığı anda ve kapasitesinin tam olduğu hızlarda modelleme bu şekilde ifade edilebilir (Akdağ, 2008: 51-52).

$$P_T(V) = \begin{cases} 0 & , v < v_1 \\ P_R \left(\frac{v^2 - v_1^2}{v_R^2 - v_1^2} \right) & , v_1 \leq v < v_R \\ P_R & , v_R \leq v < v_0 \\ 0 & , v > v_0 \end{cases} \quad (4.56)$$

4.10 Kapasite Faktörünün Hesaplanması

Denklem 4.53, belirli bir zaman aralığı boyunca rüzgar türbininin üretebileceği toplam enerji miktarını ifade eder. Diğer yandan, kapasite faktörü denklemleri (4.57 ve 4.58), rüzgar türbininin ürettiği enerjinin toplam olası üretime oranını gösterir.

$$C_f = \frac{TP_R \left(\int_{v_1}^{v_R} (a_1 v^3 + a_2 v^2 + a_3 v + a_4) \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c} \right)^k} dv + P_R \int_{v_R}^{v_0} \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c} \right)^k} dv \right)}{TP_R} \quad (4.57)$$

Denklem 4.58, son hali olarak ifade edilerek kapasite faktörünün hesaplanmasında kullanılabilecek durumdadır(Akdağ, 2008: 52).

$$C_f = \int_{v_1}^{v_R} (a_1 v^3 + a_2 v^2 + a_3 v + a_4) \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} dv + P_R \int_{v_R}^{v_0} \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} dv \quad (4.58)$$

5 WINDPRO PROGRAMI İLE RÜZGAR ÇİFTLİĞİ SİMULASYONU

5.1 WindPRO Yazılımı

WAsP ve WindPRO yazılımları, rüzgar enerjisi analizleri için en yaygın kullanılan programlar arasında yer almaktadır. WAsP, Risø Ulusal Laboratuvarı'na bağlı Danimarka Teknik Üniversitesi tarafından geliştirilmiş bir rüzgar analiz ve uygulama programıdır. Hala birçok rüzgar enerjisi analizi çalışmasında geniş çapta kullanılmaktadır. Öte yandan, WindPRO, Danimarka merkezli EMD firması tarafından geliştirilen ve gelişmiş rüzgar enerji santrali (RES) analizleri için kullanılan bir programdır. Ayrıca, WindPRO, WAsP yazılımını alt program olarak da kullanma imkanına sahiptir. WindPRO yazılımı rüzgar veri analizlerini gerçekleştirmek için ölçülmüş rüzgar hızları değerlerinin parametresi 2 olan Weibull dağılımına göre olduğunu varsaymaktadır.

Bu modüler yazılım, kullanım amacına ve ihtiyaçlara göre esnek bir şekilde paket oluşturabilme imkanı sunar. Çeşitli modüller birbirleriyle bağımlı olarak çalışır ve WindPRO'nun farklı amaçlar için kullanılan birçok modülü bulunur. Örneğin, BASIS, METEO, STATGEN (MCP), MODEL, PARK, OPTIMIZE, LOSS & UNCERTAINTY, DECIBEL, SHADOW, ZVI, IMPACT, PHOTOMONTAGE, ANIMATION, 3D-ANIMATOR, eGRID ve WINDBANK gibi modüller WindPRO yazılımında yer almaktadır.

BASIS modülü WindPRO'da temel modüldür ve başka modüllerin kullanımında gereklidir. Bu modül, proje yönetimi, rüzgar türbini kataloğu, harita yönetim sistemi, veri girişi, özel araçlar gibi temel bilgileri içermektedir. Harita yönetim sistemi, internet veya sayısal ortamlardaki haritaları programla bağlantılı hale getirerek, projelerin bu haritalar üzerinde çalışmasını ve veri girişini sağlamaktadır. Rüzgar türbini kataloğu, sürekli güncellenen birçok türbine ait verileri içermekte olup, kullanıcılar tarafından özelleştirilebilir ve türbin özellikleri eklenerek geliştirilebilir. Bu modüldeki özel araçlar sayesinde katmanlar halinde veri girişi yapmak mümkündür. Ayrıca, harita üzerindeki eş yükselti eğrileri renk tanıma özelliğiyle sayısallaştırılabilir ve arazi yapısı analizi için pürüzlülük ve perdeleyici engel nesneleri

eklenebilir. Topografi ve profiller ise rüzgar türbini ve ölçüm istasyonlarıyla birlikte sunulabilir.

WindPRO yazılımı rüzgar veri analizlerini gerçekleştirmek için ölçülmüş rüzgar hızları değerlerinin parametresi 2 olan Weibull dağılımına göre olduğunu varsaymaktadır. Modüler bu yapıya sahip olan bu program, kullanım amacına ve ihtiyaçlara göre esnek bir şekilde paketler oluşturabilmektedir. WindPRO, birçok farklı modülden oluşur ve her bir modül farklı amaçlar için kullanılır. Örneğin, BASIS, STATGEN (MCP), METEO, MODEL, OPTIMIZE, PARK, LOSS & UNCERTAINTY, DECIBEL, ZVI, SHADOW, IMPACT, PHOTOMONTAGE, ANIMATION, 3D-ANIMATOR, eGRID ve WINDBANK modülleri WindPRO'da yer alır.

BASIS modülü, WindPRO yazılımında en temel bir parçasıdır ve diğer tüm modüllerin kullanımı için gereklidir. Sayesinde, kullanıcılar projelerini daha iyi planlayabilir, coğrafi verileri haritalar üzerinde görselleştirebilir ve etkili kararlar alabilir. Bu modül, projelerin daha verimli bir şekilde yönetilmesini ve tasarlanmasını sağlamaktadır. Aynı zamanda rüzgar türbini kataloğu da sürekli olarak güncellenen verileri içermekte olup, kullanıcılar tarafından türbin özelliklerinin özelleştirilmesine ve geliştirilmesine imkan tanır. BASIS modülündeki özel araçlar sayesinde katmanlar halinde veri girişi yapılabilen, harita üzerindeki eş yükselti eğrileri renk tanıma özelliğiyle sayısallaştırılabilmekte ve arazi yapısı analizi için pürüzlülük ve perdeleyici engel nesneleri gibi unsurlar eklenerek topografi ve profiller rüzgar türbini ve ölçüm istasyonlarıyla birlikte sunulabilmektedir.

METEO modülü ise WindPRO yazılımının bir parçası olarak, arazide ölçülen rüzgar verilerinin program içine yüklenmesini ve analizinin yapılmasını sağlamaktadır. Bu modül kullanılarak, Weibull dağılımı parametresi, rüzgar hızları ve yön değerinin frekans dağılımları, sektöre göre ortalama rüzgar hızları ve yönü, yükseklik bazında ortalama rüzgar hızları değişim gibi çeşitli sonuçlar alınabilir. Ayrıca rüzgar verileri görsel olarak kontrol edilebilir ve noktalı, yönsel dağılım ve günlük aylık grafikler oluşturulabilir. Hatalı verilerin elemine edilmesi için filtreleme yöntemleri de kullanılabilir. METEO modülü aynı zamanda seçilen bir rüzgar türbini için üretim sahasında ölçülen rüzgar verilerine dayanarak enerji üretim miktarını tahmini olarak hesaplayabilir. Ortalama enerji yoğunluğu, sektörel enerji yoğunluğu

değişimi ve belirlenen rüzgar türbininden elde edilecek enerji miktarının tahminlenmesi gibi sonuçlar da METEO modülüyle elde edilebilir. Tüm bu sonuçlar, kullanıcılara anlaşılır bir şekilde tablolar ve grafikler şeklinde sunulmaktadır.

MODEL modülü WAsP, ATLAS ve başka hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) modelleri için arayüz olarak kullanılabilmektedir. Bu modül, programın arka planında yer alan sayısal haritalar üzerinde, arazlerin yapısının pürüzlülüğü, eş yükseklikler eğrileri ve perdeleyici engel nesneleri gibi değerlerin girilmesini sağlar. WAsP modeli ile hesaplama yapabilmek için bu arazi yapısı değerleri, METEO modülünden girilen rüzgar değerleriyle birleştirilerek istenen sayıda farklı türbinlerin tipleri için enerji üretim miktarı gözlemlenebilir. Bu modül, kullanıcılara farklı türbin tipleri için enerji üretim potansiyelini değerlendirmek için bir araç sunar. Girilen arazi yapısı değerleri ve rüzgar verileri, modelin hesaplamalarını temel alarak enerji üretim miktarını tahmin etmek için kullanılır. Böylece, kullanıcılar belirli bir konumda farklı türbin tiplerinin enerji üretim performansını karşılaştırabilir ve analiz edebilir.

PARK modülü, kayıpların dikkate alındığı bir yada birden fazla rüzgar enerjisi santralinin (RES) yıllık enerji üretim miktarlarını hesaplamak için kullanılır. Bu modülde farklı tipte ve hub yüksekliği özelliklerinde türbinleri kullanılabilmektedir. WindPRO'nun tabakalı gösteri özelliği, farklı konumlarda RES'lerden elde edilen sonuçları karşılaştırılabilir hale getirir. Bununlada uygun olan RES kurula biliceği konum seçilebilir. PARK modülü aynı zamanda rüzgar türbinlerinin güç ve verim grafiklerini sunarak RES analizi sonuçlarını görselleştirir. Bu modül, METEO ve MODEL modüllerinin kullanımı gerektirebilir. METEO rüzgar verilerini sağlayarak enerji üretim hesaplamaları için gerekli bilgileri temin ederken, MODEL modülü ise farklı hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) modelleriyle entegrasyonu sağlayarak daha detaylı analiz imkanı sunar. PARK modülü, kullanıcılara farklı RES'lerin enerji üretim potansiyelini değerlendirme ve karşılaştırma imkanı sunar. Bu sayede uygun bölgelerin belirlenmesi ve RES'lerin güç ve verim performanslarının analizi mümkün olur.

OPTIMIZE modülü, rüzgar enerjisi santrali (RES) projelerinde rüzgar türbini yerleşimini en uygun konuma getirmek için kullanılan bir modüldür. Bu modül, belirli bir RES yerleşiminin sınırlı bir alanda maksimum enerji üretimi temelinde optimizasyon yaparak uygun yerleşimi belirleyebilir.

MCP (Met Mast Correlation Processor) modülü ise mevcut ölçüm alınmış rüzgar verilerini diğer bir ölçüm istasyonunun sonuçları veya uzun dönemde verilerle korelasyon yapmak amacıyla kullanılmaktadır. Bu modül, farklı veri kaynaklarının korelasyonunu analiz ederek, veri güvenilirliğini artırmaya ve daha doğru sonuçlar elde etmeye yardımcı olur. MCP modülü, rüzgar verilerinin kalibrasyonunu ve uyarılmanın yapılmasını sağlar, böylece analizler ve hesaplamalar daha güvenilir hale gelir.

DECIBEL modülü, rüzgar türbinlerinin gürültü seviyelerinin hesaplanmasını kolaylaştırır. Bu modül, elde edilen eş gürültü eğrileri kullanılarak, rüzgar türbini yerleşim tasarımının gürültü sınırını aşmadığı şekilde yapılmasını sağlar. Böylece, gürültü düzeylerini kontrol etmek ve uygun konumlandırmayı sağlamak için kullanılır.

SHADOW modülü özel yada belirlenmiş algı noktası için bir veya birden fazla rüzgar türbinlerinin sebep olacağı gölge etkisinin yıllık saatlerini hesaplamak için kullanılmaktadır. Bu modül, gölge etkisinin kontrol edilmesi ve minimize edilmesi için rüzgar türbini yerleşimiyle ilgili analizler yapmayı sağlar.

ZVI modülü uzak mesafedeki görsel etkilerinin analizlerinde ve bir bölgedeki rüzgar türbinlerinin görsel etkisini değerlendirmekte kullanılır. Bu modül, görsel etkilerin dikkate alınması gereken durumlarda tasarım ve planlama süreçlerinde yardımcı olur.

IMPACT modülü planlanmamış rüzgar santralinin yakınındaki diğer rüzgar santrallerine çevresel etkilerin belirlenmesinde kullanılır. Bu modül, çevresel etkilerin analizini yaparak, komşu rüzgar santrallerine olan etkileri değerlendirmeyi sağlar.

PHOTOMONTAGE modülü rüzgar enerjisi santrallerinin inşa edilmeden önce gerçek görsel animasyonlarını oluşturmak için kullanılmaktadır. Bu modül, proje tasarımını gerçek dünyada nasıl görüneceğini görselleştirmek için kullanılır.

ANIMATION modülü ise tasarım aşamasındaki bir rüzgar enerjisi santralinin bilgisayar ekranında türbin kanatlarının gerçek hızda dönmesini izlemek için kullanılır. Bu modül, rüzgar santrali tasarımının hareketli ve canlı bir görsel sunumunu sağlar.

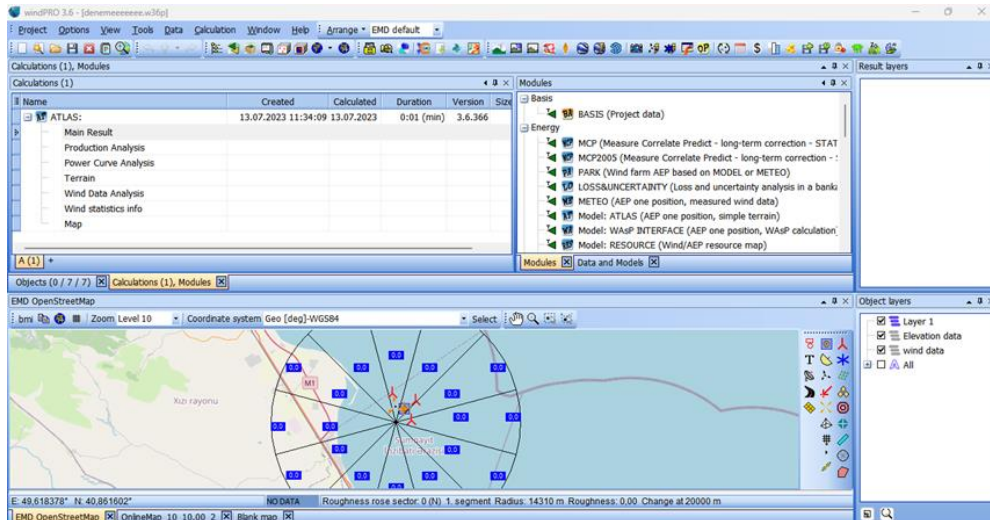
eGRID modülü rüzgar türbinlerinin şebekeye bütünleme tasarım ve hesaplamalarında kullanılmaktadır. Bu modül, şebekeye entegrasyon sürecinde gerekli hesaplamaları ve tasarımları kolaylaştırır.

WindBANK modülü ise örnek rüzgar enerjisi santrali yatırımının mali ve ekonomik hesaplamaları kolaylaştırır. Bu modül, maliyetler, enerji üretimi, getiri analizleri gibi faktörleri değerlendirerek yatırımın ekonomik verimliliğini değerlendirmeye yardımcı olur.

WindPRO programı, rüzgar enerjisi projelerinin tasarımı için kullanılan temel verilere dayanmaktadır. Bu veriler, rüzgar hızı, hızların yönü bilgileri, bölgenin haritası, bölgenin pürüzlülük sonuçları ve yakın çevredeki engellerin bilgilerini içerir.

Programın kullanımı başladığında, projenin adı, coğrafi koordinatları, bölgesel saat dilimi gibi bilgiler girilmelidir. Bu bilgilerin girilmesiyle birlikte, bölgenin topoğrafik haritası sayısallaştırılarak programa yüklenir. Sonraki adımda, programın içerisinde bulunan meteorolojik veri aracı kullanılarak rüzgar verileri programa aktarılır ve istatistiksel analizleri gerçekleştirilir. Daha sonra, alan obje ve site veri araçları kullanılarak bölgenin pürüzlülük ve yakın çevredeki engellerle ilgili bilgiler programa aktarılır.

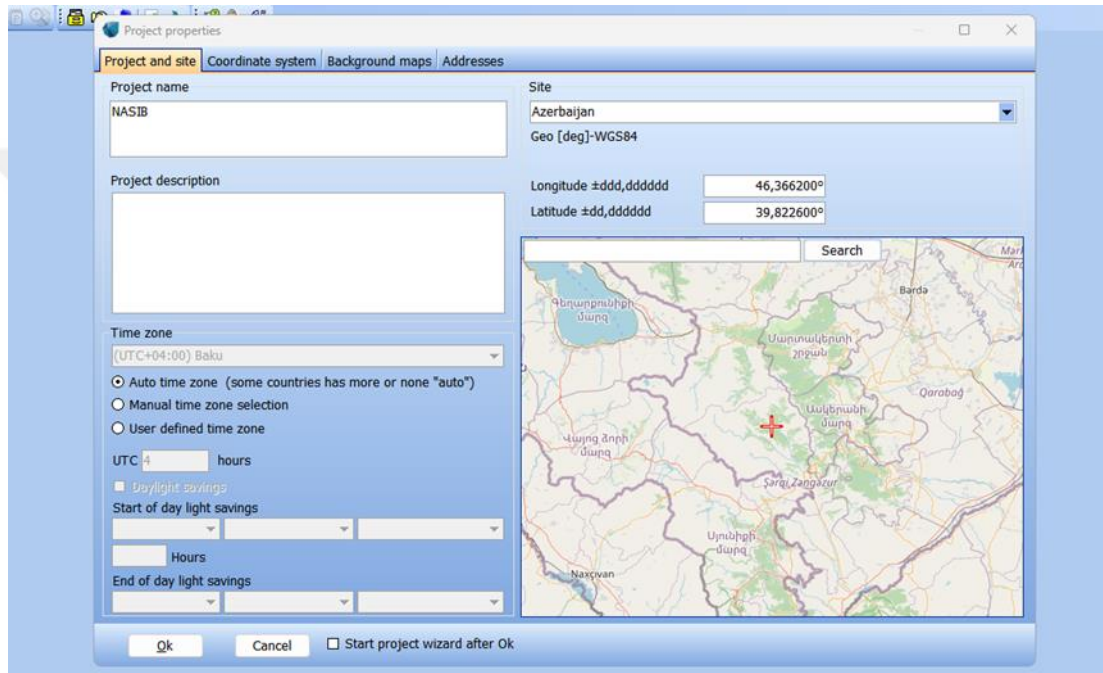
Bu temel bilgilerin girilmesiyle birlikte, RES analizini gerçekleştirmek için gereken tüm şartlar sağlanmış olur. Program, analizler ve tasarımlar için bu temel verileri kullanarak rüzgar enerjisi projelerinin değerlendirilmesini sağlar(Oral,Behçet,Gönel. 2019: 364-366).



Şekil 5.1 WindPRO yazılımının ara yüzü

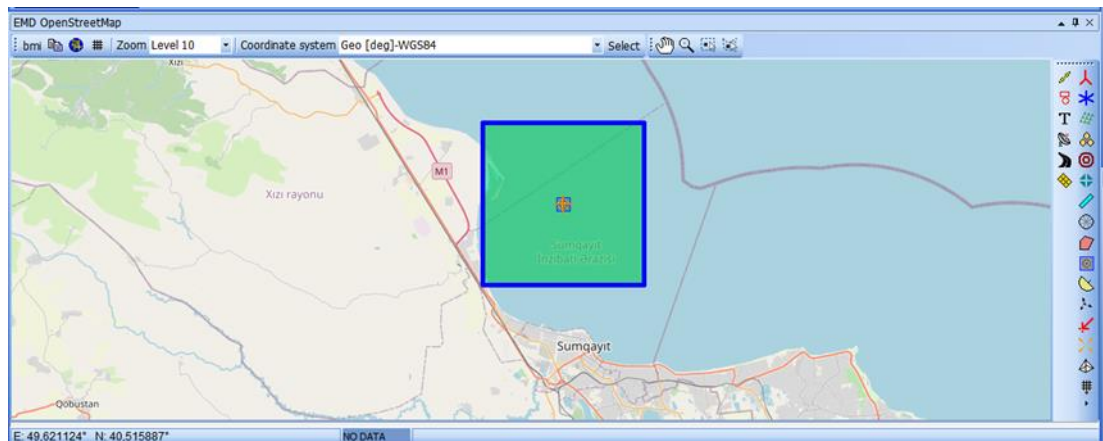
5.2 WindPRO Programını Kullanarak Rüzgar Çiftliğinin Oluşturulması

Yeni proje oluşturarak rüzgar çiftliğini konumlandırmak istediğimiz koordinatları giriyoruz. Bu çalışmada kullandığım koordinatlar (lat- 40,754019 lon- 49,638977) Hazar denizinin Azerbaycan kısmındaki Abşeron yarımadasına yakın bir nokta. Bu koordinatlar WGS84 sistemine uymaktadır.



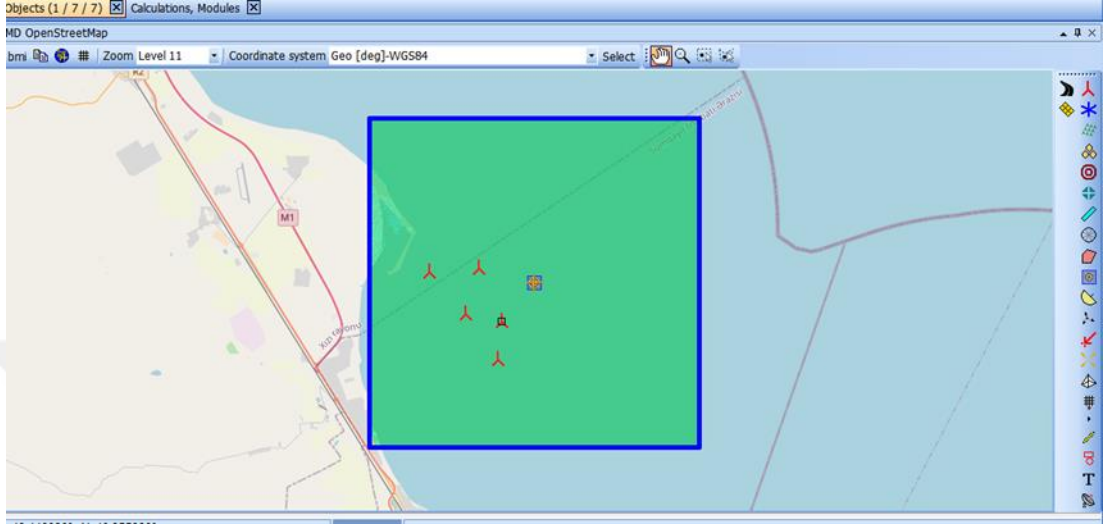
Şekil 5.2 WindPRO yeni proje başlatma ekranı

Simulasyonun yapılacağı koordinatları (lat-40,754019;lon-49,638977) girdikten sonra rüzgar türbinlerini ekliyoruz.



Şekil 5.3 Simulasyonun yapılacağı bölge

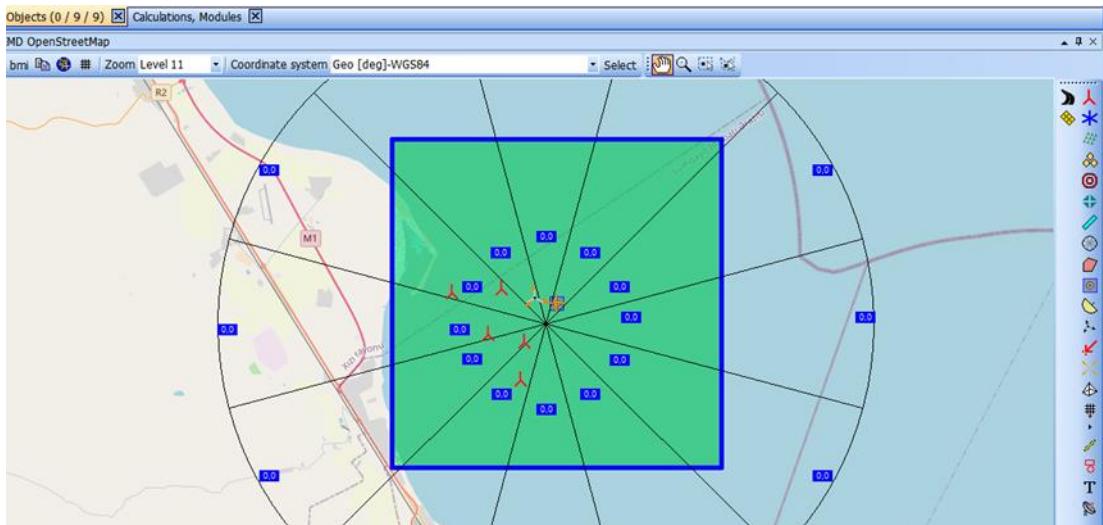
Sol taraftaki araçlar kısmından bölgeye rüzgar türbinleri ekliyoruz. Bu çalışmada 5 adet Vestas V162 7.2 rüzgar türbinleri kullanılmıştır. Rüzgar türbinünün özellikleri programda verilmiştir.



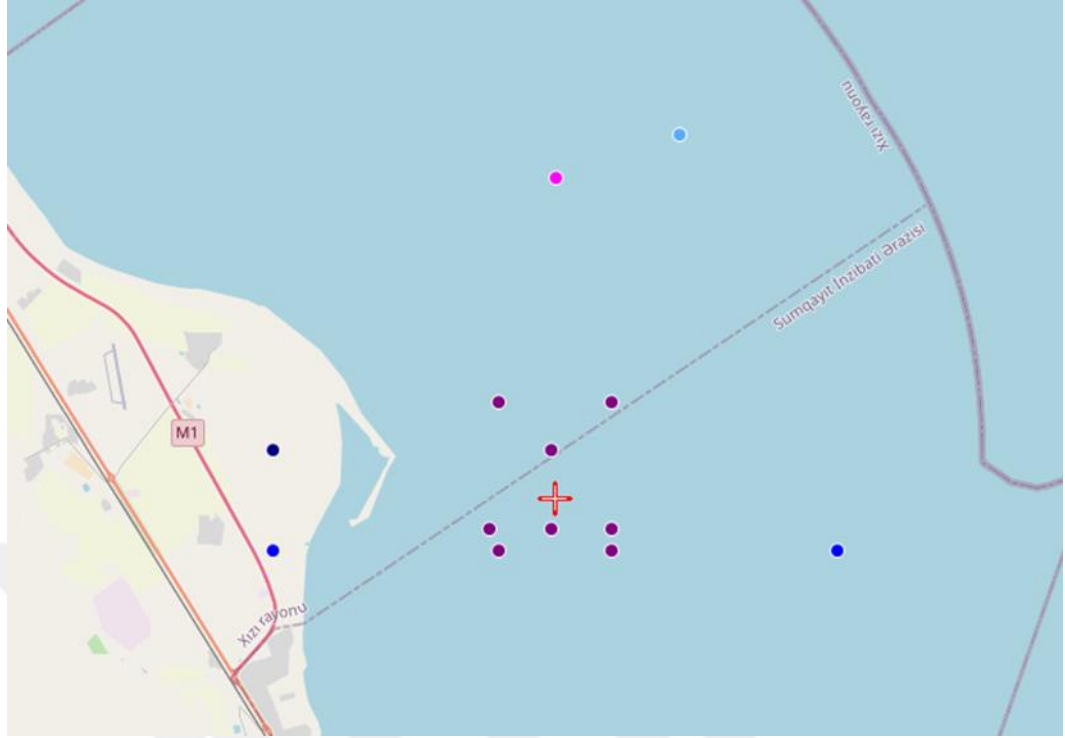
Şekil 5.4 Bölgeye rüzgar türbinlerinin eklenmesi

Gerekli araçlardan biride rüzgar verileridir. Bunu eklemek için araçlar kısmından “Meteo Object”-i seçiyoruz ve haritada merkez kısma yakın noktaya ekliyoruz.

Rüzgar verisini girdikten sonra enerji hesaplaması için “Site Data” aracını seçiyoruz ve haritada merkeze yakın kısma ekliyoruz. Bu ekledikten sonra tüm araçlarımız girilmiş olacaktır.



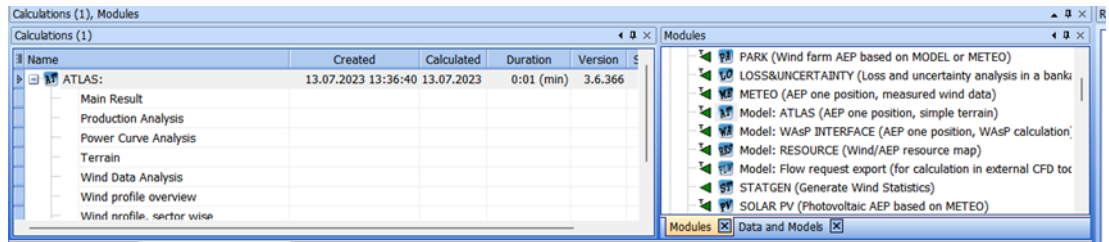
Şekil 5.5 Merkeze yakın rüzgar verisinin seçilmesi



Şekil 5.6 Simulasyonun haritadaki son durumu

Hesaplama yapmak içinse Modül kısmından ATLAS modülünü seçiyoruz. Simulasyon yaptığımız alan deniz üstü olduğundan alan pürüzsüz alandır. Pürüzsüz alanlarda hesaplama için ATLAS modülü kullanılır.

Atlas Modülü seçildikten sonra program otomatik olarak verileri hazırlar. Hesaplamalar kısmından bu verilere ulaşabiliriz.

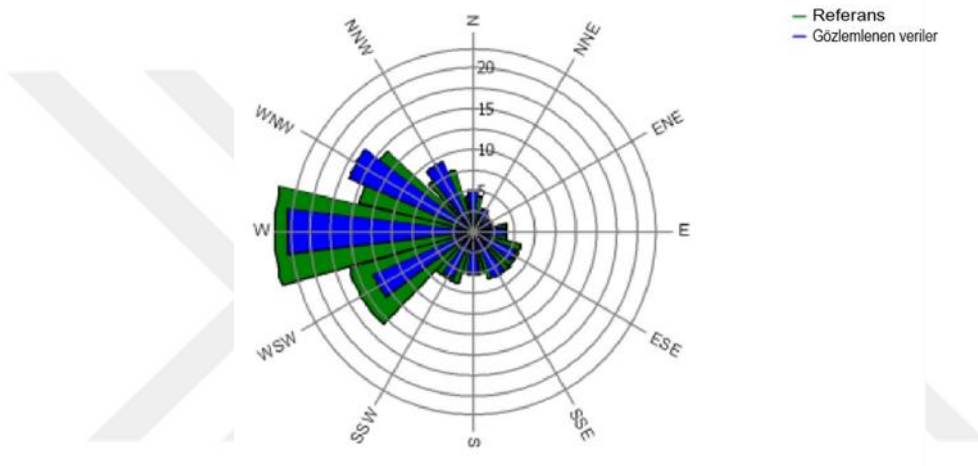


Şekil 5.7 ATLAS modülü

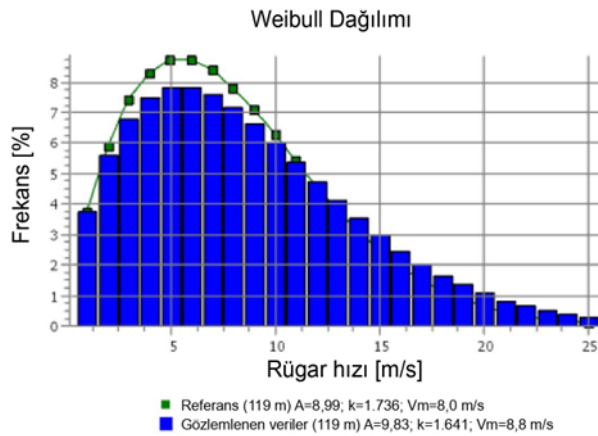
5.3 WindPRO Programı Kullanarak Elde Edilen Sonuçlar

Şekil 5.8’de 119 metre yüksekliğine göre rüzgâr hızı frekans dağılımı gösterilmiştir. Bu dağılıma göre en fazla frekans değerinin yüzde 8 e yakın olarak

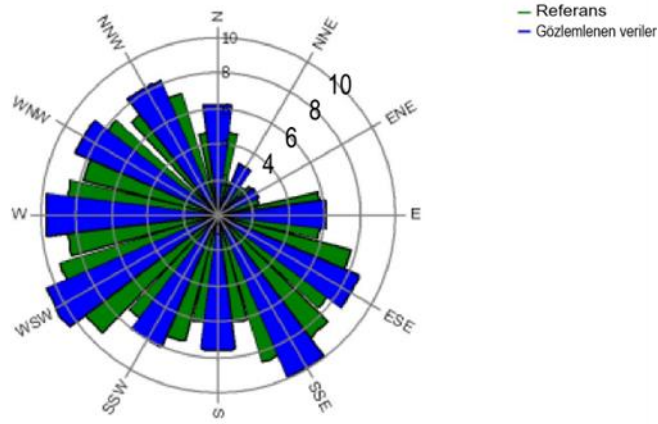
görülmektedir ve bu değerin rüzgar hızının 5 m/s ile 7 m/s arasında olduğu noktalarda gözlenilmiştir. 119 m yükseklik için rüzgâr hızının sektörel dağılımı Şekil 5.9’de verilmiştir. Buradan görüldüğü gibi 119 m yüksekliğinde en büyük rüzgâr hızı hâkim istikamet yani Batı- Güneybatı yönünde gerçekleştiği bulunmuştur. Yine Batı istikametindeki rüzgâr hızının ikinci büyüklükte olduğu görülmektedir. Bunlardan başka Güney-Güneydoğu yönünde de önemsenecek hızlar görülmüştür. Şekil 5.10’da 119 m yükseklik için rüzgar frekansının sektörel değişimi verilmiştir. Batı yönündeki rüzgâr hızlarının en büyük frekans değerinin, hâkim rüzgâr yönü istikametinde olduğu bulunmuştur.



Şekil 5.8 Rüzgâr hızı verilerinin sektörel değişimi



Şekil 5.9 Rüzgâr hızı frekans dağılımı

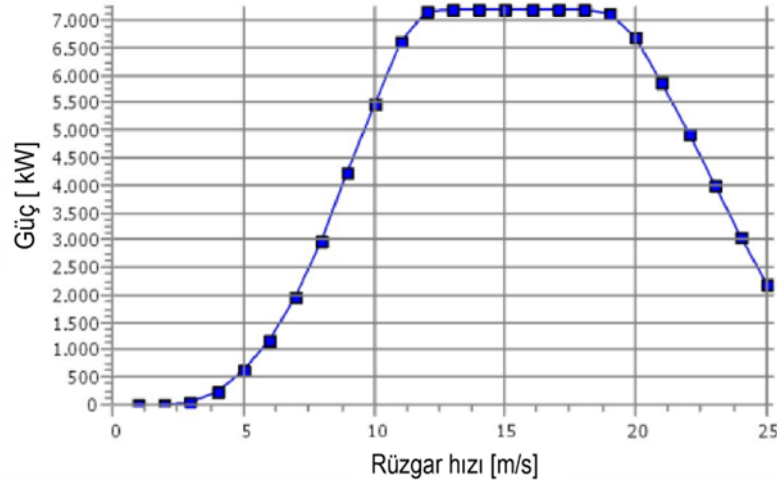


Şekil 5.10 Sektörel frekans değişimi

Tablo 5.1 WindPRO programı kullanılarak alınan sektörel ortalama rüzgâr hızı, Weibull parametresi ve frekans değişimi (Yükseklik: 119 m)

Sektör	A (m/s)	v_m (m/s)	k	Frekans(%)
0-N	7,02	6,41	1,382	5,1
1-NNE	2,97	3,19	0,867	3,0
2-ENE	2,45	2,54	0,921	2,4
3-E	6,70	6,23	1,260	3,7
4-ESE	9,46	8,80	1,255	5,7
5-SSE	10,43	10,06	1,100	6,1
6-S	7,98	7,73	1,087	5,3
7-SSW	9,17	8,24	1,565	6,2
8-WSW	12,15	10,77	2,327	13,4
9-W	11,20	9,97	2,762	23,0
10-WNW	10,18	9,02	2,270	16,7
11-NNW	9,57	8,49	1,922	9,4
Ortalama	9,83	8,79	1,641	100,0

İkinci aşama olarak rüzgâr türbinin analizi yapılarak güç eğrisi hesaplanmıştır. Analizde, örnek teşkil etmesi amacıyla, enerji üretimi için tasarlanmış bir adet VESTAS V162 tipi rüzgâr türbini kullanılmıştır. Bu türbinin nominal gücü 7200 kW, hub yüksekliği 119 m ve rotor çapı ise 162 m değerindedir. Söz konusu rüzgâr türbininin rüzgâr hızına göre güç eğrisi Şekil 5.11’de verilmiştir. Örnek rüzgâr türbini özellikleri Tablo 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5.11 Rüzgar türbini güç eğrisi

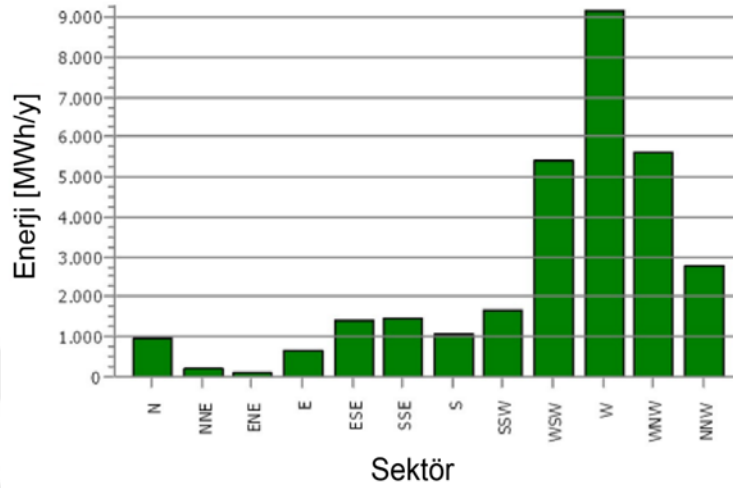
Tablo 5.2 Rüzgâr türbinin özellikleri

Türbinin üretici firması	VESTAS
Türbinin tipi	V162
Hub yükseklik (m)	119
Rotorun çapı (m)	162
Türbinin gücü (kW)	7.200
Devreye girdiği rüzgâr hızı (m/s)	3
Devreden çıktığı rüzgâr hızı (m/s)	25
Kapasite faktörü (%)	48,3

Şekil 5.11’de görüldüğü gibi rüzgar türbinin en fazla güç ürettiği rüzgar hızı aralığı 10 m/s-20 m/s’dir. 5 m/s ve 10 m/s aralığında ise daha düşük güç üretir. Rüzgar türbinin çalışmaya başladığı rüzgar hızı 3 m/s’dir. Rüzgar hızı 25 m/s geçtikte ise bu hızların verimsiz olacağından rüzgar türbini çalışmayı durdurur.

Üçüncü aşama olarak rüzgar türbinin ürettiği enerji miktarları hesaplanmıştır. Şekil 5.12’de üretilen enerjinin sektörlere göre dağılımı gösterilmiştir. En fazla rüzgar enerjisinin üretildiği sektör 9 numaralı sektör olmuştur. Ardından ise en fazla enerji üretiminin olduğu sektörler 10 ve 8’dir. Sektörlere göre ve toplam üretilen enerji miktarları Tablo 5.3’de verilmiştir. Şekil 5.13’de ise belirli rüzgar hızı aralıklarında ve ortalama rüzgar hızlarında üretilen rüzgar enerjisi verileri gösterilmiştir. Bu verilere göre en fazla enerji üretiminin olduğu rüzgar hızı 10,50 m/s -11,50 m/s aralığı, yani

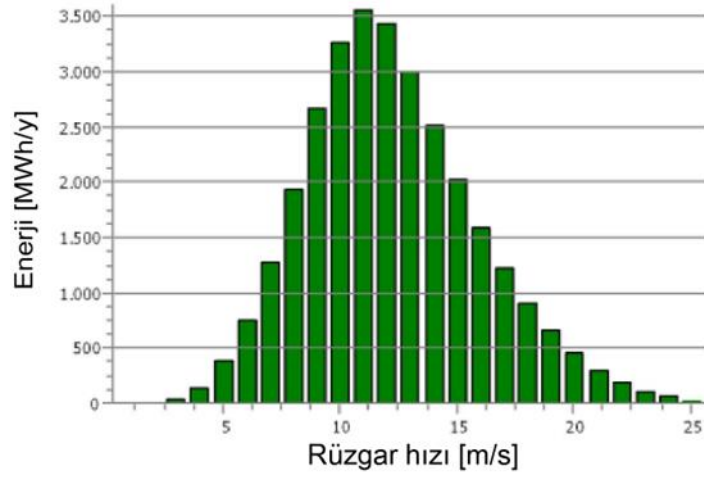
ortalama olarak 11 m/s hız olarak görünmektedir. Rüzgar türbinin en düşük enerji ürettiği hız ise 25 m/s dir. Çünkü bu hız verimli enerji üretimi için uygun değildir. 25 m/s hızdan fazla hızlarda ise veri yoktur. Bunun sebebi rüzgar türbinin bu hızlarda kendisini kapatmasıdır.



Şekil 5.12 Enerji üretiminin sektörel dağılımı

Tablo 5.3 WindPRO programı sonucuna göre sektörel enerji üretimi, ortalama frekans ve rüzgar hızı değerleri

Sektör	Enerji [MWh]	Rüzgar hızı [m/s]	Frekans [%]	Güç yoğunluğu [W/m ²]
0 N	964,3	6,4	5,1	
1 NNE	191,1	3,2	3,0	
2 ENE	93,4	2,5	2,4	
3 E	658,8	6,2	3,7	
4 ESE	1.409,4	8,8	5,7	
5 SSE	1.450,8	10,1	6,1	
6 S	1.083,3	7,7	5,3	
7 SSW	1.654,7	8,2	6,2	
8 WSW	5.405,1	10,8	13,4	
9 W	9.155,9	10,0	23,0	
10 WNW	5.615,8	9,0	16,7	
11 NNW	2.799,6	8,5	9,4	
Toplam	30.482,2	8,8	100,0	854



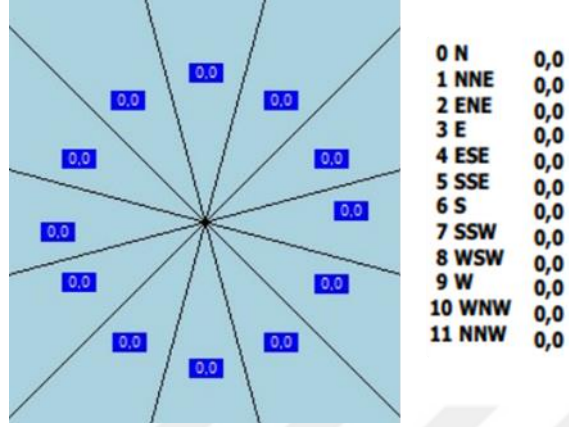
Şekil 5.13 Rüzgar enerjisinin hıza göre dağılımı

Tablo 5.4 WindPRO programına göre belirli rüzgar aralıklarında üretilen enerji değerleri

Rüzgar hızı aralığı [m/s]	Enerji [MWh]	Toplam Enerji [MWh]
0,50- 1,50	0,0	0,0
1,50- 2,50	0,0	0,0
2,50- 3,50	28,8	28,8
3,50- 4,50	148,2	177,0
4,50- 5,50	385,4	562,4
5,50- 6,50	755,3	1.317,7
6,50- 7,50	1.278,5	2.596,2
7,50- 8,50	1.941,1	4.537,3
8,50- 9,50	2.660,7	7.198,0
9,50-10,50	3.253,2	10.451,2
10,50-11,50	3.556,9	14.008,1
11,50-12,50	3.440,7	17.448,8
12,50-13,50	3.005,2	20.454,0
13,50-14,50	2.503,3	22.957,3
14,50-15,50	2.020,0	24.977,3
15,50-16,50	1.584,2	26.561,5
16,50-17,50	1.211,8	27.773,3
17,50-18,50	908,0	28.681,3
18,50-19,50	661,2	29.342,6
19,50-20,50	456,9	29.799,5
20,50-21,50	296,9	30.096,3
21,50-22,50	184,9	30.281,2
22,50-23,50	112,0	30.393,3
23,50-24,50	65,4	30.458,6
24,50-25,50	23,6	30.482,2

Günümüzde rüzgar santrelleri büyük oranla kara kısmına kurulmaktadır. Fakat yerleşkelerin eğim ve engebe gibi rüzgar hızını düşüren bazı faktörler vardır. Rüzgar türbininden en iyi verimi almak için pürüzsüz alan çok önemlidir. Bu durumda denizler

pürüzsüz yüzey olduklarından buradan alınacak verim çok yüksek olacaktır. Yaptığımız simülasyon da denizde olduğundan pürüzlülük sınıfı 12 sektörde’de 0-a eşittir.



Şekil 5.14 Sektörel pürüzlülük verileri

6 SONUÇ VE ÖNERİLER

Sanayi ve üretim için hayati bir öneme sahip olan enerji, günümüzde toplumsal hayatın temelini oluşturmaktadır. Hızla ilerleyen teknoloji ve insanların daha iyi yaşam standartlarına ulaşma arzusu, enerji ihtiyacını dünya genelinde en büyük zorluklardan biri durumuna getirmiştir.

Toplam enerji miktarlarının tüketildiği bir ülke, şu anda ülkenin gelişmişlik düzeyinin önemli bir göstergesi olarak kabul edilmektedir. Fosil yakıtlar, dünya genelinde enerji tüketiminin büyük çoğunluğunu (%90) oluşturmaktadır. Bu yakıtlar arasında petrol, petrol ve doğalgaz bulunmaktadır. Ancak, fosil yakıtların çevresel etkileri göz ardı edilemez boyutlara ulaşmıştır. Atmosfere salınan karbondioksit, kükürt, toz, azot oksit kurum gibi kirleticiler, fosil yakıtların yanmasıyla çevreyi kirletmektedir. Bu kirleticiler, sera gazlarının artışına ve küresel iklim değişikliğine neden olmaktadır. Bundan başka, insan sağlığına da tehdit eden bir etkiye de sahiptirler.

Bu dezavantajlar ve bağımsız, kolay erişilebilir yeni enerji kaynaklarının insanların güvenliği açısından katkı sağladığı gerçekleri göz önüne alındığında, yenilenebilir enerji kaynakları ve onların kullanımının önemi birazda ön plana çıkmaktadır. 2020 yılına kadar toplam elektrik enerjisinin %20'sinin, ilerleyen yıllarda ise 2050'ye kadar %50'sinin yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanması, dünya genelinde yenilenebilir enerji kullanımına geçiş sürecinde hedeflenmektedir. Bu vizyon, yukarıda belirtilen nedenlerin bir sonucudur ve sürdürülebilir enerji kullanımına yönelik küresel bir taahhüttür.

Yenilenebilir enerji kaynakları doğası gereği güneş, rüzgar, jeotermal, hidrolik gibi kaynaklardan elde edilen enerjiyi ifade eder. Ayrıca biyokütle gibi geri dönüştürülebilir kaynakları da içerir. Yenilenebilir enerji kaynakları, petrol, kömür, gaz, uranyum ve başka sınırlı ve tükenen kaynakların dışında kaynaklardır.

Yenilenebilir enerji kaynakları, dağıtık bir şekilde uygulanabilir olmaları nedeniyle avantajlıdır. Kurulum ve işletme aşamalarında iş gücü kullanımını artırarak yeni iş alanları oluşturabilirler. Bu kaynaklar çevre dostudur ve sürdürülebilir enerji üretimi için önemli bir potansiyele sahiptirler. Yenilenebilir enerji, enerji güvenliği

sağlama, sera gazı emisyonlarını azaltma ve iklim değişikliğiyle mücadele gibi konularda da önemli bir role sahiptir. Rüzgar enerjisi, yenilenebilir enerji kaynakları arasında dünya genelinde güvenilirliği kanıtlanmış ve günümüzde büyük bir öneme sahip olan bir enerji türüdür. Rüzgar enerjisinin kullanımı, farklı alanlarda çeşitli şekillerde gerçekleşmektedir; ancak en yaygın kullanım şekli rüzgar enerji santralleridir. Rüzgar enerji santralleri, rüzgarın potansiyel enerjisini elektrik enerjisine dönüştürerek enerji üretimine katkıda bulunur. Bu nedenle, rüzgar enerji santralleri, sürdürülebilir enerji üretimi ve çevresel koruma açısından büyük bir öneme sahiptir.

Bu çalışmada, WindPRO yazılımının rüzgar enerji santrali analizlerinde sıkça kullanılan bir araç olduğu ve Hazar denizinin Azerbaycan kısmı Abşeron yarımadası kıyısına yakın bölgede rüzgar hızı ve enerjisi simülasyonu ve analizi için örnek bir uygulama yapıldığı anlatılmıştır. WindPRO programıyla gerçekleştirilen analizler sonucunda, ortalama rüzgar hızının 8,79 m/s, ortalama güç yoğunluğununsa 854 W/m² hesaplandığı ortaya çıkmıştır. Hâkim rüzgar yönünün %23 frekansla batı istikametinde olduğu tespit edilmiştir. Büyük hız aralığına sahip olan (5-15 m/s) enerji üretim potansiyeline sahip frekansların önemli bir kısmının hâkim rüzgar yönünde olduğu belirlenmiştir (%20'den fazla). Ortalama enerji yoğunluğunun sektörlere göre değişiminin çoğunlukla hâkim rüzgar istikametinde olduğu gözlenmiştir. Rüzgar türbini için tahmini enerji üretim miktarı yıllık 30.482,2 MWh/y olarak hesaplanmış ve enerji santralinin kapasite faktörü değeri %48,3 olarak bulunmuştur. Bu veriler 1 rüzgar türbine göre hesaplanan verilerdir. Bu verileri 7,2MW kurulu güçte sahip Alaçatı rüzgar santrali ile karşılaştıra biliriz. 2003 verilerine göre kapasite faktörü 27,73% olan bu santralin yıllık enerji üretimi 17.491MWh/y olmuştur. Bu da aldığımız sonuçların gerçeğe yakın olduğunu gösteriyor.

Bu bölgede deniz üstü rüzgâr enerjisinin büyük önem taşıdığı açıkça anlaşılmıştır. Gelecekte, karasal alanlarda büyük ve güçlü rüzgâr enerji santrali inşa etmek için uygun alanların sayısı önemli ölçüde azalacak. Dolayısıyla, devletin ilgili kurumları desteğiyle deniz üstü santral kurulumuyla ilgili kapsamlı çalışmaların hemen başlatılması gerekmektedir. Özellikle Abşeron yarımadasının kuzey kısmı, deniz üstü rüzgâr santralleri için son derece elverişli bir bölgedir. Denizlerimizdeki kuşlar ve deniz canlılarının yaşam alanlarını korumak amacıyla çevresel etkilerin

haritalandırılması ve bu haritaların deniz üstü santral kurulumu için alan tespitinde kullanılması önemlidir. Bölgede gerekli kurumlar tarafından ölçüm istasyonları kurulmalı ve rüzgâr potansiyeli sürekli olarak izlenmelidir. Ayrıca, yüzer temellerin yapım teknikleri araştırılmalı ve daha derin deniz bölgelerine de rüzgâr santrallerinin kurulabilmesi için çalışmalar yapılmalıdır.



7 KAYNAKLAR

A.Karaaslan. M Gezen. (2017) Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Değerlendirilmesinin Türkiye Örneği.

Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyası. (2004) Azərbaycan Respublikasında Alternativ Enerji Mənbələrindən İstifadə İnkişafı Perspektivləri.

AWEA. (2012) The European offshore wind industry - key trends and statistics.

https://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/statistics/European_offshore_statistics_2012.pdf

E.Kaya. (2021) Rüzgar Çeşitleri <https://www.ruzgarenerjisi.com.tr/1-2-ru%CC%88zg-ar-cesitleri/>

F.Mustafayev. ENERGIES. (2022) 15, 401 Renewable Energy Status in Azerbaijan: Solar and Wind Potentials for Future Development. <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/2/401>

F.Oral. R.Bahçet. E.Gönel.(2019) WindPRO PROGRAMI İLE RÜZGÂR ANALİZİ VE ENERJİ ÜRETİM MİKTARININ BELİRLENMESİ. ÖHÜ Müh. Bilim. Derg. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/633168>

IRENA (2019) Renewables Readiness Assessment: Republic of Azerbaijan. <https://www.irena.org/Publications/2019/Dec/RAA-Republic-of-Azerbaijan>

REN21. (2022) Renewable Energy Data In Perspective. https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022_Key_Messages.pdf

REN21 (2022) Renewable Energy Status Report. https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/REN21_UNECE2022_FullReport.pdf

Rüzgar Enerjisi (2001) İstanbul Ticaret Odası. <https://eds.p.ebscohost.com/eds/ebookviewer/ebook?sid=59a7880e-4345-4d3e-8fa7-2d59646b1c39%40redis&vid=3&rid=1&format=EB>

S.A.Akdağ. (2008) Rüzgar enerjisi potansiyeli ve ekonomik analizinde Weibull dağılımının kullanımı. İstanbul Teknik Üniversitesi. Yüksek Lisans Tezi.

S.Y.Özkaya. (2004) Uluslararası Ekonomik Sorunlar Dergisi XIV. Yenilenebilir Enerji Kaynakları. <https://www.mfa.gov.tr/yenilenebilir-enerji-kaynaklari.tr.mfa>

U.Elibüyük. İ.Üçgül. YEKARUM. (2014) Rüzgâr Türbinleri, Çeşitleri Ve Rüzgâr Enerjisi Depolama Yöntemleri. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/204144>

windPRO 3.6.366 <https://www.emd-international.com/windpro/downloads/>

8 ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : NASİB İSMAYİLOV

ORCID Numarası : 0009-0001-1915-8663

Öğrenim Durumu

2016– 2020 Lisans: Ulusal Havacılık Akademisi Süreç
Otomasyonu Mühendisliği. Bakü/Azerbaycan

