



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

**TÜRKİYE SAMSUN-VEZİRKÖPRÜ KENTSEL RÜZGAR ENERJİSİ
POTANSİYELİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ŞÜKRÜ ÇELENKLİ

HAZİRAN

**TÜRKİYE SAMSUN-VEZİRKÖPRÜ KENTSEL RÜZGAR ENERJİSİ
POTANSİYELİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

Şükrü ÇELENKLİ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
YENİLENEBİLİR ENERJİ VE UYGULAMALARI ANABİLİM DALI**

**Danışman
Dr. Öğretim Üyesi Berkan ZÖHRA**

**AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2025

Yüksek Lisans Tezi Kabul ve Onay Sayfası

Şükrü ÇELENKLİ tarafından hazırlanan Türkiye Samsun-Vezirköprü Kentsel Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Değerlendirilmesi adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ/OY ÇOKLUĞU ile Amasya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yenilenebilir Enerji ve Uygulamaları Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Berkan ZÖHRA

Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Amasya Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Başkan: Prof. Dr. Ünal KURT

Yenilenebilir Enerji ve Uygulamaları Anabilim Dalı, Amasya Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Üye: Doç. Dr. Mustafa EKER

Elektrik Makineleri Anabilim Dalı, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Tez Savunma Tarihi: 18/ 06/ 2025

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Doç. Dr. Ümit YILDIRIM

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Amasya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Şükrü ÇELENKLİ

18.06.2025

TÜRKİYE SAMSUN-VEZİRKÖPRÜ KENTSEL RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYELİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Şükrü ÇELENKLİ

AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2025

ÖZET

Küresel nüfus artışı ve teknolojik ilerlemeler, enerji talebini artırmıştır. Bu talebin büyük ölçüde fosil yakıtlarla karşılanması çevresel sorunları ve kaynak tükenmesi riskini barındırmaktadır. Bu nedenle, çevre dostu ve sürdürülebilir yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim artmaktadır. Bu kaynaklardan biri olan rüzgar enerjisi, Türkiye ve dünyada önemli ilerlemeler kaydetmiştir. Ancak, rüzgar santrallerinin genellikle yerleşim alanlarından uzakta kurulması, enerji iletiminde kayıplara ve teknik zorluklara yol açmaktadır. Öte yandan, kentlerde yoğunlaşan nüfus, enerji ihtiyacını da bu alanlara kaydırmakta ve sürdürülebilir kentsel enerji çözümlerine olan gereksinimi artırmaktadır. Bu bağlamda, kentsel rüzgar enerjisi sistemleri, çevresel sürdürülebilirlik ve toplumsal sorumluluk açısından önemli bir alternatif sunmaktadır.

Bu çalışma, Samsun ili Vezirköprü ilçesinin kentsel rüzgar potansiyelinin değerlendirilmesini amaçlamaktadır. Bu kapsamda, ilçe merkezinden ve ormanlık alandan elde edilen iki farklı noktaya ait beş yıllık günlük ortalama rüzgar hızı verileri kullanılmıştır. Rüzgar hızı verileri doğrultusunda, iki farklı kentsel rüzgar türbininin bölge koşullarına uygunluğu incelenmiştir.

Analiz sürecinde, Weibull dağılımının şekil ve ölçek parametreleri belirlenmiş ve elde edilen bu parametreler doğrultusunda Monte Carlo simülasyonu kullanılarak bir yıllık sentetik günlük ortalama rüzgar hızı verisi oluşturulmuştur. Devamında, Guo ve vd. (2016) tarafından önerilen yöntem kullanılarak söz konusu veriler saatlik rüzgar hızlarına dönüştürülmüştür. Elde edilen saatlik veriler kullanılarak, türbinlerin kurulacağı yüksekliğe göre rüzgar hızları hesaplanmış ve seçilen türbin modellerinin enerji üretim kapasiteleri ile yıllık tüketilen enerjiyi karşılama oranları analiz edilmiştir.

Elde edilen veriler doğrultusunda, Greef 500W model rüzgar türbininin, düşük kesme hızı ve geniş çalışma aralığı sayesinde Archimedes 1000W türbinine göre daha yüksek bir enerji üretim potansiyeline sahip olduğu tespit edilmiştir. Vezirköprü özelinde yapılan incelemelerde, şehir içi kullanıma yönelik düşük güçlü Greef 500W gibi türbin uygulamaları, konutların enerji ihtiyacına anlamlı bir katkı sağladığı görülmüştür. Bu doğrultuda, bölgesel ölçekte yenilenebilir enerji kullanımının teşvik edilmesinin mümkün olduğu ve böylece karbon salınımının azaltılmasına da katkı sunulabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Sayfa Adedi : 119

Anahtar Kelimeler : Samsun, Vezirköprü, Kentsel Rüzgar Enerjisi, Şehir İçi Uygulamalar

Danışman : Dr. Öğretim Görevlisi Berkan ZÖHRA

URBAN WIND ENERGY POTENTIAL ASSESSMENT OF SAMSUN-VEZİRKÖPRÜ TÜRKİYE

(M. Sc. Thesis)

Şükrü ÇELENKLİ

AMASYA UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

(June 2025)

ABSTRACT

Global population growth and technological advancements have increased energy demand. Meeting this demand predominantly through fossil fuels brings environmental problems and the risk of resource depletion. Therefore, there is a growing tendency toward environmentally friendly and sustainable renewable energy sources. Among these sources, wind energy has made significant progress both in Turkey and worldwide. However, the fact that wind farms are generally installed far from residential areas leads to energy transmission losses and technical challenges. On the other hand, the concentration of population in urban areas shifts energy demand to these regions, increasing the need for sustainable urban energy solutions. In this context, urban wind energy systems offer an important alternative in terms of environmental sustainability and social responsibility.

This study aims to evaluate the urban wind potential of Vezirköprü district, located in Samsun Province. For this purpose, five-year daily average wind speed data from two different locations—one from the town center and the other from a forested area—were utilized. Based on these wind speed datasets, the suitability of two different urban wind turbines for the region's conditions was examined.

During the analysis process, the shape and scale parameters of the Weibull distribution were determined. Using these parameters, a one-year synthetic daily average wind speed dataset was generated through Monte Carlo simulation. Subsequently, the method proposed by Guo et al. (2016) was employed to convert these datasets into hourly wind speeds. Using the obtained hourly data, wind speeds at the proposed turbine installation heights were calculated, and the energy production capacities of the selected turbine models, along with their annual energy consumption coverage rates, were analyzed.

According to the findings, the Greef 500W wind turbine was determined to have a higher energy production potential compared to the Archimedes 1000W turbine, thanks to its low cut-in speed and wide operating range. The evaluations conducted specifically for Vezirköprü revealed that low-capacity turbines such as the Greef 500W, designed for urban use, can make a meaningful contribution to household energy needs. In this regard, it is concluded that promoting the use of renewable energy at the regional scale is feasible, which could also contribute to reducing carbon emissions.

Number of pages : 119

Keywords : Samsun, Vezirköprü, Urban Wind Energy, Urban Applications

Supervisor : Asst. Prof. Dr. Berkan ZÖHRA

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Kentlerimizin yalnızca birer yaşam alanı olmaktan öteye geçerek kendi kendine yetebilen, sürdürülebilir merkezlere dönüşmesi gerekliliği, çalışmamızın temel motivasyonunu oluşturmaktadır. Bu dönüşümde enerji, anahtar bir role sahiptir. Özellikle kentsel rüzgar enerjisinin şehirlerimize sağlayabileceği potansiyel katkının tam olarak kullanılması, geleceğe yönelik önemli bir umut vaat etmektedir. Şehirlerimizin enerji tüketen devasa yapılar olmak yerine, kendi enerjilerini üretebilen sürdürülebilir ekosistemlere evrilmesi, günümüzde ulaşılabilir bir hedef haline gelmiştir.

Bu tez çalışmasının tamamlanmasında değerli katkılarıyla beni yönlendiren danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Berkan ZÖHRA'ya sağladığı destek ve rehberlik için şükranlarımı sunarım. Ayrıca tez değerlendirme sürecindeki yapıcı görüş ve önerileriyle çalışmama katkı sağlayan Prof. Dr. Ünal KURT ve Doç. Dr. Mustafa EKER'e de teşekkür ederim.

Tez yazım sürecinde manevi desteklerini esirgemeyen annem, babam ve kardeşim Adem ÇELENKLİ'ye, ayrıca akademik destek sağlayan abim Semih ÇELENKLİ'ye içten teşekkürlerimi iletirim.

Tez çalışmam boyunca gösterdiği sonsuz anlayış, her an yanımda oluşu ve zor zamanlarımda verdiği destek için eşim Aslı ÇELENKLİ'ye sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	vi
ABSTRACT.....	vii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
RESİMLER DİZİNİ.....	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1. Elektrik Üretiminde Kullanılan Enerji Kaynakları	2
1.2. Rüzgar Enerjisi.....	6
1.3. Kentsel Rüzgar Enerjisi ve Önemi	7
1.4. Türkiye’de Rüzgar Enerjisi Potansiyeli	8
1.5. Çalışmanın Önemi, Amacı ve Alt Problemleri.....	10
2. LİTERATÜR ÖZETİ	12
2.1. Rüzgar Türbinleri ve Özellikleri	12
1.1.1. Yatay eksenli rüzgar türbinleri	12
2.1.1. Dikey eksenli rüzgar türbinleri	13
2.1.2. Rüzgar türbinlerinde yeni yaklaşımlar ve tasarımlar	14
2.1.3. Rüzgar türbinlerinde güç sınıflandırılması	21
2.2. Kentsel Rüzgar Kaynağı	21
2.3. Kentsel Rüzgar Enerjisi Sistemleri	26

Sayfa

2.3.1. Kentsel türbin uygulamaları.....	26
2.3.1.1. Yapı yakınında müstakil rüzgar türbini kurulumu	27
2.3.1.2. Mevcut yapılara rüzgar türbini kurulumu	28
2.3.1.3. Yapı ile bütünleşik rüzgar türbinleri	30
2.3.2. Türbin seçiminin önemi	33
2.3.3. Rüzgar ölçüm yöntemleri ve cihazları	33
2.4. Rüzgar enerjisi potansiyelinin hesaplanması	36
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	51
3.1. Vezirköprü İlçesi Karakteristik Özellikleri	52
3.1.1. Vezirköprü ilçesinin coğrafi ve iklimsel özellikleri	52
3.1.2. Meteorolojik veriler	56
3.1.3. Türbin seçimi	64
3.2. Çalışma Metodolojisi	69
3.2.1. Weibull dağılımı.....	70
3.2.2. Monte Carlo simülasyonu	72
3.2.3. Günlük verilerden saatlik rüzgar hızı tahmini.....	72
3.2.4. Rüzgar hızının istenilen yükseklik için hesaplanması	73
3.2.5. Rüzgar türbini güç üretimi	74
3.2.6. Kapasite faktörü	75
3.2.7. Tüketimi karşılama oranı	76
4. BULGULAR.....	80
4.1. Orman Sahası Bulguları	80
4.2. Şehir İçi Bulguları.....	83
4.3. Bulguların Genel Değerlendirmesi	88

Sayfa

5. SONUÇ VE ÖNERİLER	90
KAYNAKLAR.....	93
ÖZGEÇMİŞ	101



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Hava yoğunluğunun rakım ile değişimi.....	39
Çizelge 2.2. Hava yoğunluğunun sıcaklık ile değişimi.....	40
Çizelge 2.3. Farklı arazi tipleri için pürüzlülük uzunlukları 1	46
Çizelge 2.4. Farklı arazi tipleri için pürüzlülük uzunlukları 2	46
Çizelge 2.5. Farklı arazi tipleri için pürüzlülük uzunlukları 3	47
Çizelge 3.1. Akış diyagramı.....	51
Çizelge 3.2. Vezirköprü merkez ölçüm istasyonu 2018 günlük ortalama rüzgar hızları	57
Çizelge 3.3. Vezirköprü orman sahası ölçüm istasyonu 2018 günlük ortalama rüzgar hızları	57
Çizelge 3.4 Türbin karşılaştırması	66
Çizelge 3.5. Seçilen iki türbin karşılaştırması	67

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Dünya geneli kaynağına göre elektrik üretim miktarı	3
Şekil 1.2. Dünya geneli kaynağına göre elektrik üretiminin yüzdelik payı.....	3
Şekil 1.3. Türkiye geneli kaynağına göre enerji üretim miktarı	5
Şekil 1.4. Türkiye geneli kaynağına göre elektrik üretimin yüzdelik payı	5
Şekil 1.5. Sıcak ve soğuk dönemde Türkiye’yi etkileyen basınç merkezlerinin şematik gösterimi	8
Şekil 1.6. Bölgesel rüzgarlar	9
Şekil 1.7. Meltem rüzgarları	9
Şekil 1.8. Türkiye’nin yıllık ortalama rüzgar hızı dağılımı 100 metre	10
Şekil 2.1. Kanat sayılarına göre YERT’leri	13
Şekil 2.2. Rotor yapılarına göre DERT’leri	14
Şekil 2.3. Arşimet spirali rüzgar türbini	15
Şekil 2.4. Karayel 6411 ve güç eğrisi	15
Şekil 2.5. Darrieus ve Savonius bütünleşik tasarımı.....	17
Şekil 2.6. Çatı sırtı rüzgar türbini ve rüzgar hareketi.....	17
Şekil 2.7. Aeromine rüzgar türbini ve çalışma prensibi.....	18
Şekil 2.8. Loopwing rüzgar türbinlerinin görünümü	19
Şekil 2.9. Piezoelektrik prensibine göre çalışan rüzgar tarlası	20
Şekil 2.10. Kanal kanatlı rüzgar türbini	20
Şekil 2.11. Kentsel sınır katmanı ve kentsel gölgelik katmanından oluşan kentsel rüzgar profili	22
Şekil 2.12. Birbirlerine göre farklı açılara sahip binaların üstten görünüşü	23
Şekil 2.13. (a) Uygulama alanı ve (b) rüzgar türbini konumlandırma şeması.....	24
Şekil 2.14. En iyi sonucu elde edildiği bina dizilimi	24

Şekil	Sayfa
Şekil 2.15. Eğimli, flanş benzeri segmentler	25
Şekil 2.16. Kentsel bireysel binaların etrafındaki üç tür hava akışı özelliği.....	25
Şekil 2.17. Korniş modüler rüzgar kolektörü.....	26
Şekil 2.18. Kentsel alanlarda rüzgar enerjisinden yararlanma sistemleri	27
Şekil 2.19. Engel türbülans ilişkisi diyagramı	28
Şekil 2.20. Çatı kenarında ortaya çıkan ve bir ayrılma kabarcığına neden olan girdap gösterimi.....	29
Şekil 2.21. Bina çatısındaki kontrol noktaları.....	29
Şekil 2.22. Çoklu DERT kullanımındaki türbin aralıkları	30
Şekil 2.23. Bina mesnetli rüzgar türbinlerinin yapılarda kullanılan farklı tipleri.....	31
Şekil 2.24. (a) Bahreyn Dünya Ticaret Merkezi (BWTC), (b) Strata (SE1) ve (c) Pearl River Kulesi	32
Şekil 2.25. Binaya entegre eolic sistem	32
Şekil 2.26. Aynı kurulu güçteki türbinlerin ürettikleri enerji miktarları	33
Şekil 2.27. Anemometre çeşitleri	34
Şekil 2.28. Doppler rüzgar LIDAR'ı çalışma prensibi	35
Şekil 2.29. Rüzgar ölçüm istasyonu tematik gösterimi.....	36
Şekil 2.30. Rüzgar hız profilinin yükseklikle değişimi.....	44
Şekil 2.31. Rüzgar hızının farklı yüzeylerde yükseklik ve hız değişimi	45
Şekil 3.1. Vezirköprü lokasyon haritası	52
Şekil 3.2. Vezirköprü Fiziki Haritası.....	53
Şekil 3.3. Vezirköprü bakı haritası	54
Şekil 3.4. Vezirköprü yükseklik haritası	55
Şekil 3.5. Vezirköprü eğim haritası.....	55
Şekil 3.6. Vezirköprü ölçüm istasyonları	56

Şekil	Sayfa
Şekil 3.7. 2018-2022 yılları Vezirköprü şehir içi ve orman sahası istasyonu rüzgar hızı ortalama grafiği	58
Şekil 3.8. Vezirköprü şehir içi rüzgar hızı histogramı	59
Şekil 3.9. Vezirköprü orman sahası rüzgar hızı histogramı	59
Şekil 3.10. Vezirköprü merkez istasyonu rüzgar frekans grafiği	60
Şekil 3.11. Vezirköprü orman sahası istasyonu rüzgar frekans grafiği	60
Şekil 3.12. Vezirköprü ilçesi 10 m ortalama rüzgar hızı ve bina dağılım haritası	61
Şekil 3.13. Vezirköprü ilçesi 50 m ortalama rüzgar hızı ve bina dağılım haritası	62
Şekil 3.14. Vezirköprü ilçesi 100, 150 ve 200 m ortalama rüzgar hızı haritası	63
Şekil 3.15. Güç Eğrilerinin Karşılaştırması	69
Şekil 3.16. Vezirköprü merkez(solda) ve orman sahası(sağda) Weibull dağılımı	71
Şekil 3.17. Samsun kapasite faktörü dağılımı haritası	76
Şekil 4.1. Orman Sahası Günlük Ortalama Rüzgar Hızları (15 m)	81
Şekil 4.2. Orman sahası aylık enerji hasadı karşılaştırması (3 Adet).....	81
Şekil 4.3. Orman sahası yıllık enerji hasadı karşılaştırması (3 adet)	82
Şekil 4.4. Orman sahası ortalama kapasite faktörü.....	83
Şekil 4.5. Şehir içi günlük ortalama rüzgar hızları (15 m).....	84
Şekil 4.6. Şehir içi aylık enerji hasadı karşılaştırması (3 adet).....	84
Şekil 4.7. Şehir içi yıllık enerji hasadı karşılaştırması (3 adet)	85
Şekil 4.8. Şehir içi ortalama kapasite faktörü	86
Şekil 4.9. Tek bir ortalama hane için tüketim karşılama analizi	87
Şekil 4.10. Tek bir tarımsal işletme için tüketim karşılama analizi	87
Şekil 4.11. Vezirköprü ilçesi genel tüketim karşılama analizi	88

RESİMLER DİZİNİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Farklı kanat sayısına sahip birbirine temas eden dişli yapıllı türbin tasarımı	16
Resim 2.2. Alacros rüzgar türbini	19



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, yanda açıklamaları verilmek üzere aşağıda listelenmiştir.

Simgeler	Açıklama
E	Rüzgardaki kinetik enerji (j)
m	Havanın kütle (kg)
v	Rüzgar hızı (m/s)
V	Havanın hacmi (m ³)
ρ	Hava yoğunluğu (kg/m ³)
A	Rüzgarın esme yönündeki dik alan (m ²)
L	Rüzgarın esme yönündeki uzunluk (m)
t	Zaman (sn)
P_r	Rüzgarın anlık gücü (W)
P	Mutlak basınç (Pa)
M	Havanın molar kütlesi (kg/kmol)
T	Evrensel gaz sabiti (8,314 J/mol.K)
C_p	Rüzgar türbininin güç katsayısı
$f_{(v)}$	Weibull olasılık dağılım fonksiyonu
$F_{(v)}$	Weibull birikimli olasılık dağılım fonksiyonu
$f_R(v)$	Rayleight olasılık dağılım fonksiyonu
$F_R(v)$	Rayleight birikimli olasılık dağılım fonksiyonu
c	Rüzgar hızı için bağıl birikmiş frekans değişkeni (Ölçek parametresi)
k	Rüzgar hızı dağılım şeklini gösteren değişken (Şekil parametresi)

a	Konum değişkeni
n_T	Türbinin verimi
E_T	Belirlenen zaman aralığındaki enerji miktarı
v_{min}	Rüzgar türbinin elektrik üretmeye başladığı rüzgar hızı
v_{max}	Rüzgar türbininin elektrik enerjisi üretimini emniyet içi sonlandırdığı rüzgar hızı
P_T	Türbinden üretilecek güç
z_0	Yüzey pürüzlülük uzunluğu
h	Pürüzlülüğe neden olan eleman yüksekliği
S	Pürüzlülüğe neden olan elemanların rüzgara karşı dikey kesit alanı
A_H	Pürüzlülüğe neden olan elemanların arazi üzerine dağılmış yatay kesit alanı
H_0	Rüzgar hızının ölçüldüğü yükseklik (m)
H_1	Rüzgar hızının hesaplanması istenen yükseklik (m)
v_{H_0}	H_0 Yüksekliğinde ölçülen rüzgar hızı (m/s)
v_{H_1}	H_1 Yüksekliği için hesaplanacak rüzgar hızı (m/s)
d	Sıfır düzlemi yer değiştirme yüksekliği (m)
α	Hellmann katsayısı
W_n	n. saatteki tahmini rüzgar hızı (m/s)
W_{ave}	Hesaplanması yapılan günün ortalama rüzgar hızı (m/s)
W_{max}	Gün içinde rüzgar hızının maksimuma ulaştığı hız (m/s)
n	Gün içi saatleri temsil eder
H_{max}	Gün içerisinde rüzgar hızının maksimuma ulaştığı saat

Kısaltmalar	Açıklama
IRENA	International Renewable Energy Agency
REPA	Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Atlası
EİE	Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü
YERT	Yatay Eksenli Rüzgar Türbin
DERT	Dikey Eksenli Rüzgar Türbin
ASRT	Arşimet Spirali Rüzgar Türbin
IEC	International Electrotechnical Commission
MGM	Meteoroloji Genel Müdürlüğü
GWA	Global Wind Atlas
CFD	Computational Fluid Dynamics
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
ASF	Alaska Satellite Facility
KUZKA	Kuzey Anadolu Kalkınma Ajansı

1. GİRİŞ

Dünya nüfusu 1950 yılında tahmini 2,5 milyar iken 2025 yılı Mart ayında 8,2 milyara ulaşmıştır (Worldometer, 2025). Dünya nüfusunun sürekli artışı, insan ihtiyaçlarının da orantılı olarak artmasına neden olmaktadır (Ertan, 2022). Nüfus artışıyla sanayi ve teknolojinin gelişmesi, enerjiye duyulan ihtiyacın geçmişe kıyasla artmasına neden olmuştur (Oral, Ekmekçi ve Ayhan, 2011). Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (IRENA) verilerine göre, dünyada tüketilen enerjinin yüzde 65'ten fazlası şehirler tarafından kullanılmaktadır (Faisal ve diğerleri, 2025).

Geçmişte kullanılan enerji kaynaklarına bakıldığında, 1950'lerden önce kömür yaygın olarak kullanılan enerji kaynağı iken, sonrasında zengin petrol kaynaklarının keşfedilmesi ile petrol kullanımı ön plana çıkmıştır. Petrolün her bölgeye eşit dağılmaması, ülkelerin enerjiye erişiminde sürekliliğini zorlaştırmaktadır. Fosil kaynaklarının tükenebilir olması ve çevreye verdiği olumsuz etkileri nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim artmıştır (Bektaş, 2013).

İnsanlık için enerji arzının sürekliliği büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, çevre dostu ve tükenmeyen yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim artmıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları, küresel enerji ihtiyacını karşılayabilecek potansiyeldedir. Atmosferde bulunan rüzgar enerjisinin yüzde biri, yeryüzündeki enerji ihtiyacını karşılamak için yeterli seviyededir (Ertan, 2022). Rüzgar enerjisinin potansiyeli göz önüne alındığında, yenilenebilir enerji kaynakları arasında rüzgar enerjisi önemli bir paya sahiptir (Rezaeiha, Montazeri and Blocken, 2020).

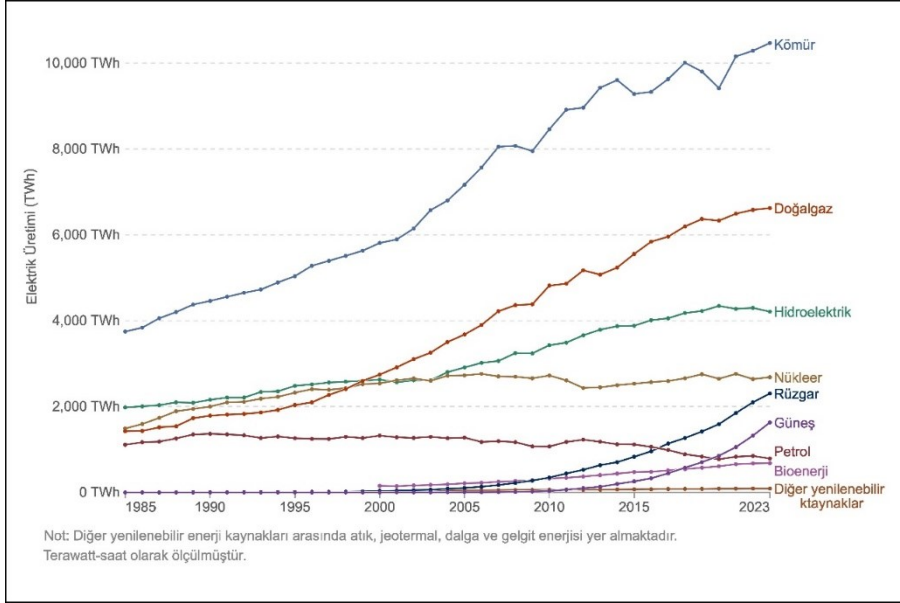
Rüzgar potansiyelinden verimli bir şekilde yararlanmak için gerekli ölçüm ve hesaplamaların yapılması, ardından buna uygun türbin seçimi oldukça önemlidir. Belirli bir bölgeye ya da yerleşim alanındaki bir yapıya kurulacak rüzgar türbinlerinin büyüklüğü yapılan hesaplamalar sonucunda belirlenir. Rüzgar türbinleri genel olarak büyük ve küçük olmak üzere ikiye ayrılır. 50 kW'a kadar olan türbinler, küçük güçlü ve yaklaşık 200 m² süpürme alanına sahiptir. 50 kW değerinden büyük türbinler ise büyük güçlü türbinler grubuna girmektedir (Mamur ve diğerleri, 2017; Mamur ve Karayel, 2018; Oral ve diğerleri, 2011).

Bu tez çalışmasında, Samsun ilinin Vezirköprü ilçesine ait kentsel rüzgar potansiyeli incelenmiştir. 1. Bölümde, elektrik üretiminde kullanılan enerji kaynakları, rüzgar enerjisi, kentsel rüzgar enerjisi ve önemi, Türkiye’de rüzgar enerjisi potansiyeli, çalışmanın önemi ve amacı, çalışmada izlenecek yol başlıkları altında içerik sunulmaktadır. 2. Bölümde, rüzgar türbinleri ve özellikleri, kentsel rüzgar kaynağı, kentsel rüzgar enerjisi sistemleri, rüzgar enerjisi potansiyelinin hesaplamaları başlıkları altında içerik sunulmaktadır. 3. Bölümde, Vezirköprü ilçesinin karakteristik özellikleri ve çalışmanın metodolojisi başlıkları altında içerik sunulmaktadır. 4. Bölümde, bulgular yer almaktadır. 5. Bölümde ise çalışmanın sonuçları ve öneriler sunulmaktadır.

1.1. Elektrik Üretiminde Kullanılan Enerji Kaynakları

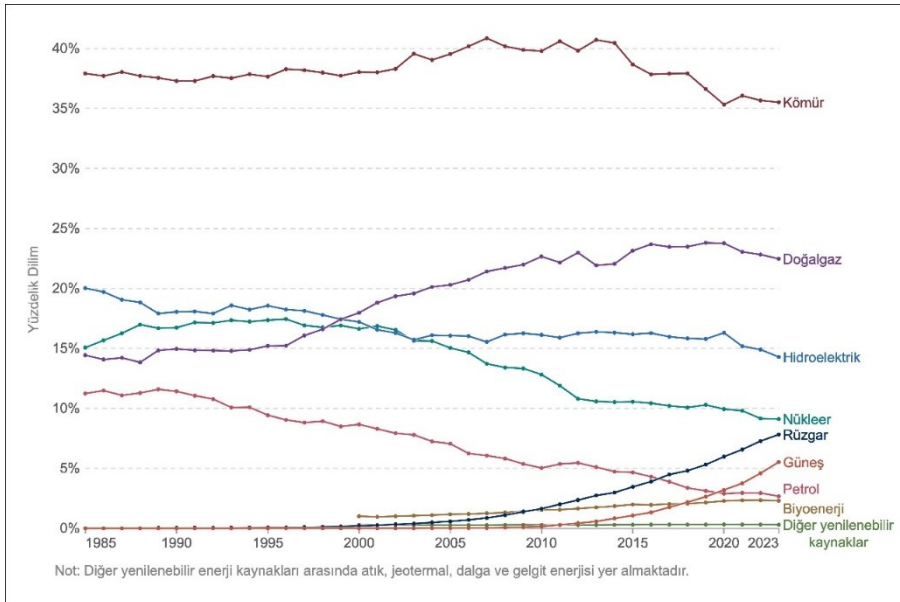
Enerji kaynakları, kullanım şekillerine göre yenilenemez (tükenen) ve yenilenebilir (tükenmeyen) olmak üzere iki gruba ayrılır. Yenilenemez enerji kaynakları, kullanıldıklarında tükenen ve yeniden kullanılamayan enerji türleridir. Bu kaynaklar, fosil ve nükleer (çekirdek) kaynaklı olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Fosil kaynaklı yenilenemez enerji türleri; doğal gaz, kömür ve petroldür. Nükleer kaynaklı yenilenemez enerji türleri ise uranyum ve toryumdur. Doğayı kirletmeyen, çevre dostu ve tükenmeyen enerji kaynakları, yenilenebilir enerji kaynakları olarak tanımlanır. Rüzgar, güneş, hidrolik, jeotermal, biyokütle, hidrojen ve gelgit-dalga enerjisi yenilenebilir enerji kaynakları olarak sıralanabilir (Koç ve Kaya, 2015; Özbektaş, Şenel ve Sungur, 2023).

1985 ile 2023 yılları arasında dünya genelinde elektrik üretiminde kullanılan enerji kaynaklarının miktarı ve üretimdeki payları önemli değişimler göstermiştir. Şekil 1.1’de görüldüğü üzere kömür, doğalgaz ve nükleer enerji kaynaklarından üretilen elektrik miktarları yıllar içinde önemli ölçüde artarken, petrolden elde edilen üretimde düşüş yaşanmıştır.



Şekil 1.1. Dünya geneli kaynağına göre elektrik üretim miktarı (Our World in Data, 2024)

Benzer şekilde, Şekil 1.2’de üretim oranlarına bakıldığında kömür, nükleer enerji ve petrol kaynaklarının toplam üretimdeki payı azalmış; yalnızca doğalgazın payında yükseliş gözlemlenmiştir. Ancak doğalgazdaki bu artış eğilimi, 2019 yılı itibariyle tersine dönmeye başlamıştır.



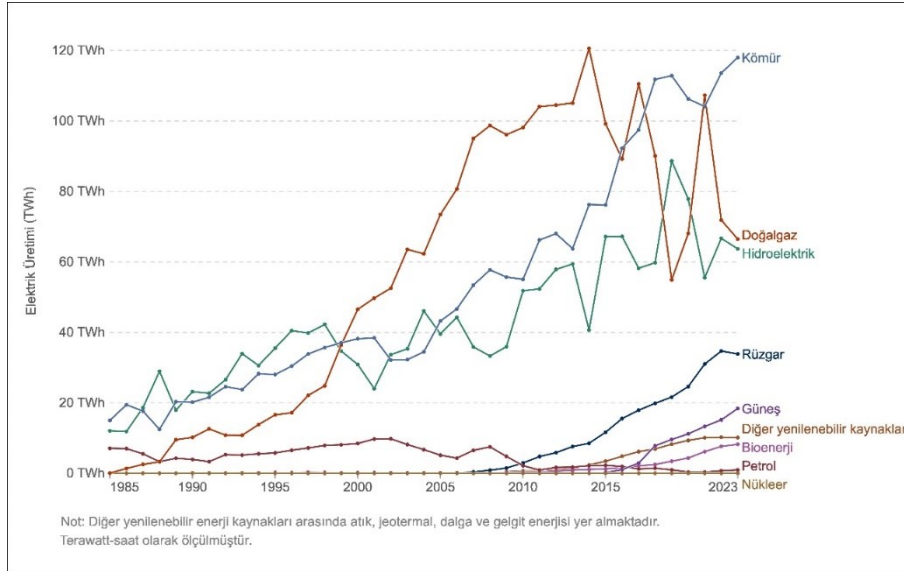
Şekil 1.2. Dünya geneli kaynağına göre elektrik üretiminin yüzdelik payı (Our World in Data, 2024)

Özellikle kömür üretiminde artış hızının zamanla yavaşladığı dikkat çekmektedir. 2002–2007 arası beş yılda 2000 TWh üretim artışı sağlanmışken, aynı artışın 2007–2021 arasında 14 yılda gerçekleşmesi bu durumu açıkça ortaya koymaktadır. Benzer eğilim, üretimi artan diğer fosil kaynaklar için de geçerlidir.

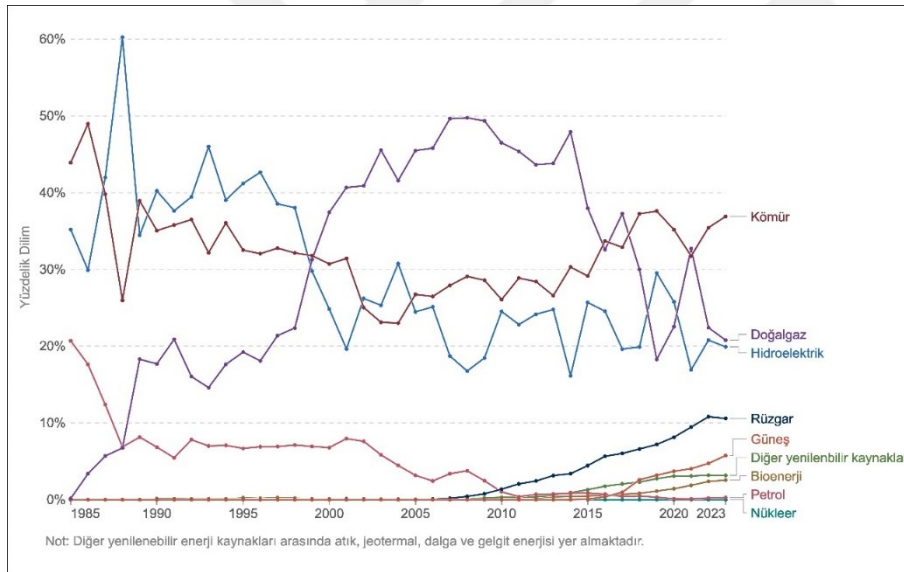
Yenilenebilir enerji kaynaklarına bakıldığında, 1985 yılında oldukça sınırlı olan üretim miktarları, 2023 yılına gelindiğinde dikkat çekici düzeyde artmıştır. Özellikle rüzgar enerjisi, bu dönemde en hızlı gelişen kaynak olmuştur. 1985 yılında yalnızca 0,06 TWh olan rüzgar enerjisi üretimi, 2023 yılı itibarıyla 2304,44 TWh seviyesine ulaşarak yaklaşık 38.000 katlık bir artış göstermiştir. Aynı dönemde rüzgar enerjisinin elektrik üretimindeki payı da %0,01'den %7,82'ye yükselmiştir. Bu artış oranı, tüm enerji kaynakları arasında en hızlı büyümenin rüzgar enerjisinde gerçekleştiğini ortaya koymaktadır.

Özetle, son 38 yılda fosil kaynakların üretimindeki artış hızı düşerken, yenilenebilir enerji kaynaklarında hem üretim miktarı hem de üretim payı artmaya devam etmiştir. Bu dönüşüm, gelecekte sürdürülebilir enerji sistemlerine geçişin güçlü bir göstergesi olarak değerlendirilebilir.

Şekil 1.3 ve Şekil 1.4 grafikleri, Türkiye'de kaynaklarına göre üretilen enerji miktarı ve yüzdelik dilimleri yer almaktadır. 1985 yılında elektrik üretimi büyük ölçüde kömür ve petrole dayalıyken, doğalgazın henüz üretimde belirgin bir yeri bulunmamaktadır. 2000'li yıllarla birlikte doğalgaz üretiminde hızlı bir artış yaşanmış, ancak bu yükseliş eğilimi 2010'lu yılların ortalarından itibaren tersine dönmüş ve doğalgazın üretim payında azalma gözlenmiştir. Kömür ise üretim miktarını artırması devam etse de, toplam üretimdeki oranı düşüş göstermiştir. Petrol kaynaklı üretim ise yıllar içerisinde önemini büyük ölçüde yitirmiştir. Nükleer enerji üretimi ise bu dönemde Türkiye'de gerçekleştirilmemiştir.



Şekil 1.3. Türkiye geneli kaynağına göre enerji üretim miktarı (Our World in Data, 2024)



Şekil 1.4. Türkiye geneli kaynağına göre elektrik üretimin yüzdelik payı (Our World in Data, 2024)

Yenilenebilir enerji kaynakları açısından değerlendirildiğinde, özellikle son yirmi yıllık dönemde belirgin bir artış gözlemlenmektedir. Hidrolik enerji, uzun süredir sistemin bir parçası olsa da 2019 yılından itibaren hem üretim miktarında hem de üretim payında düşüş eğilimine girmiştir. Bu düşüşün yerini ise büyük oranda rüzgar enerjisi almıştır.

Rüzgar enerjisi, Türkiye'nin enerji dönüşüm sürecinde en dikkat çekici gelişimi gösteren kaynak olmuştur. 2005 yılı sonrasında hızla artan üretim kapasitesiyle rüzgar enerjisi, yalnızca üretim miktarı açısından değil, aynı zamanda elektrik üretim sistemindeki payı bakımından da stratejik bir konuma ulaşmıştır. 2005–2023 yılları arasında kaydedilen gelişmeler neticesinde, rüzgar enerjisi %10,55'lik üretim payı ve 33,82 TWh'lik üretim miktarıyla, hidroelektrik enerjiden sonra en fazla elektrik üretilen yenilenebilir enerji kaynağı haline gelmiştir. Bu yönüyle rüzgar enerjisi, yalnızca mevcut üretim kapasitesiyle değil, gelecek projeksiyonlarında da Türkiye'nin sürdürülebilir enerji hedeflerinde kilit bir rol oynamaktadır. Benzer şekilde, güneş enerjisi ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarında da artış gözlemlenmektedir; ancak bu kaynaklardaki gelişim, rüzgar enerjisindeki kadar hızlı ve oransal olarak güçlü bir seyir izlememektedir.

Sonuç olarak, Türkiye'de elektrik üretiminde kaynak çeşitliliği artarken, fosil yakıtların sistemdeki ağırlığı azalmaktadır. Bu dönüşümde rüzgar enerjisi hem hızlı büyüme potansiyeli hem de artan üretim kapasitesiyle öne çıkan bir enerji kaynağı olarak dikkat çekmektedir.

1.2. Rüzgar Enerjisi

Dünya'ya ulaşan güneş ışınları, yeryüzü şekilleri ve yüzey özellikleri nedeniyle dünyayı eşit oranda ısıtmamaktadır. Bu durum, dünya üzerinde sıcaklık farklarını oluşturur. Farklı bölgeler arasındaki sıcaklık farklarının dengelenme isteği hava hareketini oluşturur. Bu hava hareketini rüzgar olarak nitelendirilmektedir (Karipoğlu, 2021). Rüzgarın temel kaynağı Güneş'tir ve Güneş'ten Dünya'ya birim zamanda büyük miktarda enerji ulaşır; bu enerjinin yaklaşık %1-2'lik bölümü rüzgara dönüşmektedir. Rüzgar, bir hacme ve hıza sahip olduğundan bünyesinde kinetik enerji barındırır. Kinetik enerji, türbinler sayesinde mekanik enerjiye, jeneratörler sayesinde de elektrik enerjisine dönüşür (Bektaş, 2013).

Rüzgar enerjisi M.Ö. 5000'li yıllardan günümüze kadar kullanılan bir enerji türüdür. Geçmişten bugüne gemileri hareket ettirmekte, su pompalamakta, hızar için güç sağlamakta, tahıl öğütmekte ve elektrik üretmekte kullanılmıştır. Sanayi devrimiyle birlikte, rüzgar enerjisine olan ilgi azalmıştır. Azalan etkiye rağmen Amerika'da General Electric şirketi tarafından 1890 yılında elektrik üreten ilk rüzgar türbini üretilmiştir. II. Dünya Savaşı'ndan sonra da rüzgar enerjisine yönelik gelişmeler sonucunda 2 ve 3 kanatlı rüzgar türbinleri

geliştirilmiştir. 1960 yılından sonra fosil yakıtlarının yaygınlaşması ve ucuzlamasından dolayı rüzgar türbinlerinin gelişimi zayıflamış fakat 1973 dünya petrol krizinin yaşanması, rüzgar türbinlerine yeniden önem verilmeye başlanmıştır (Bektaş, 2013).

Teknolojinin gelişmesiyle günümüzde kullanılan rüzgar türbinleri üretilmiş ve üzerine pek çok araştırmacı akademik çalışmalar yapmıştır. Artan enerji ihtiyacını karşılamak ve bu bağlamda rüzgar enerjisinden elektrik üretmek için kent ortamındaki rüzgardan yararlanma çalışmaları da dahil alandaki her türlü potansiyel değerlendirilmeye çalışılmıştır (Bektaş, 2013).

1.3. Kentsel Rüzgar Enerjisi ve Önemi

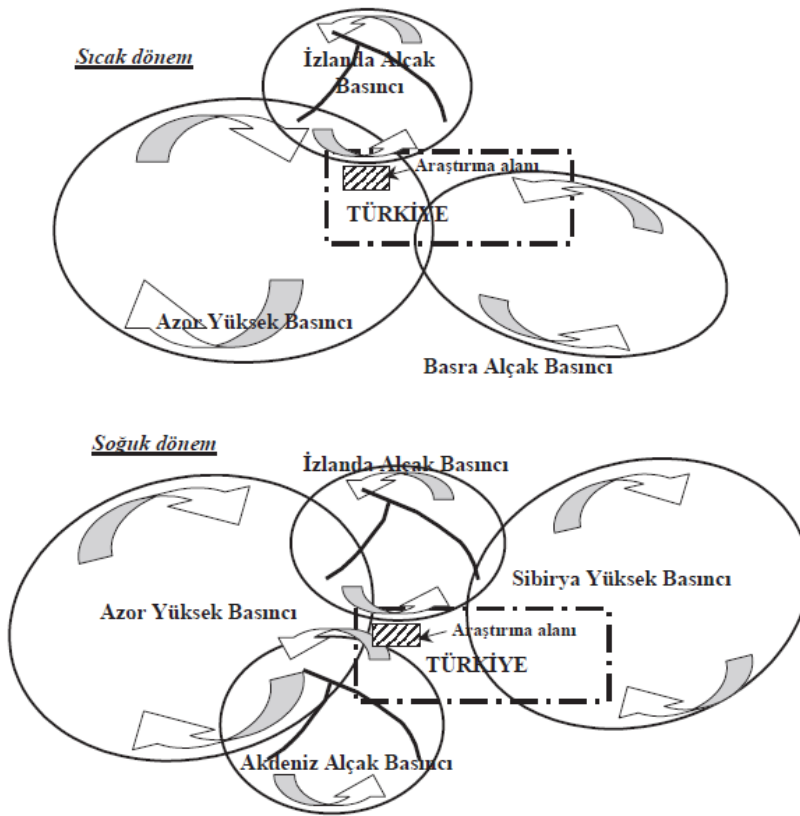
Günümüzde rüzgar türbinlerinden elde edilen enerjinin büyük bir kısmı rüzgar çiftliklerinde üretilmektedir. Ancak bu çiftlikler, genellikle şehir merkezlerinden ve dolayısıyla enerji talebinin yoğun olduğu bölgelerden uzakta konumlanmıştır. Bu durum, üretilen enerjinin ihtiyaç duyulan merkezlere taşınmasını zorunlu hale getirmektedir. Enerjinin iletimi sırasında yaşanan kayıplar ve yüksek iletim maliyetleri, uzak mesafelerden enerji transferini hem teknik hem de ekonomik açıdan zorlaştırmaktadır (Kwok and Hu, 2023).

Kentsel alanlarda yaşayan insan nüfusu her geçen gün artmakta ve bu artışla birlikte enerji talebi de hızla yükselmektedir. 1950'de dünya nüfusunun %30'u kentlerde yaşarken, bu oran 2016'da %55'e çıkmıştır. 2050'de ise dünya nüfusunun %70'inin kentlerde yaşayacağı öngörülmektedir. Nüfusun belirli bölgelerde yoğunlaşması ve teknolojinin hızla gelişmesi, enerji ihtiyacını katlayarak artırmaktadır. Bu durum, şehirlerin daha yaşanabilir ve sürdürülebilir hale getirilmesi gerekliliğini gündeme getirmektedir (Dar, Armengol Barcos and Porté-Agel, 2022; Kwok and Hu, 2023).

Şehirlerin daha yaşanabilir hale gelmesi, sürdürülebilirlik ilkesine bağlıdır. Bu doğrultuda, kentler için çeşitli sürdürülebilirlik göstergeleri belirlenmiştir. Bu göstergeler arasında, iklim verilerini verimli kullanılarak, ısıtma ve aydınlatma ihtiyaçlarını yenilenebilir enerji kaynaklarıyla karşılanmasının önemi vurgulanmaktadır (Yıldız, 2020). Enerjinin en fazla tüketildiği yer olan kent merkezlerinde, rüzgar enerjisinin kullanılması belirli bir noktada yoğunlaşan enerji talebini hafifletecektir (Micallef and Van Bussel, 2018).

1.4. Türkiye’de Rüzgar Enerjisi Potansiyeli

Türkiye 36°-42° kuzey paralelleri ile 26°-45° doğu meridyenlerinde yer alması, ortalama yükseltinin fazla olması, birçok basınç merkezinin etkisinde kalması, çok sayıda dağ ve vadiye sahip olması, dört mevsimi yaşayan bir konumda olması, üç tarafı denizlerle çevrili olması yıl boyunca günlük rüzgarların ve ayrıca bölgesel rüzgarların oluşmasını sağlamaktadır. Bu durumlar bize Türkiye’nin rüzgar potansiyelinin yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Türkiye İzlanda Alçak Basınç Merkezi, Sibirya Yüksek Basınç Merkezi, Azot Yüksek Basınç Merkezi ve Basra Yüksek Basınç Merkezlerinin etkisinde kalarak yıl boyunca rüzgar almaktadır (Ermiş, 2019).



Şekil 1.5. Sıcak ve soğuk dönemde Türkiye’yi etkileyen basınç merkezlerinin şematik gösterimi (Koç, 2008)

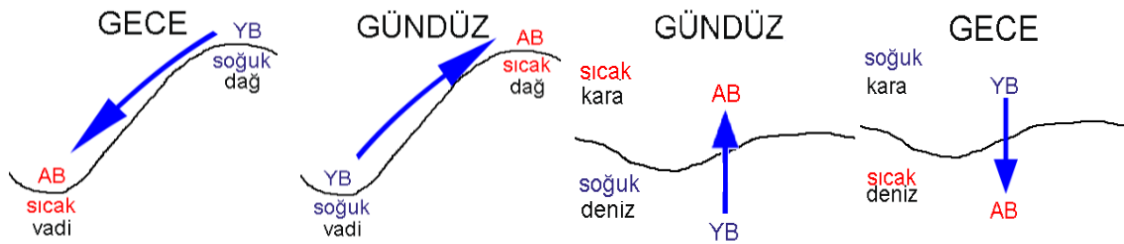
Türkiye üzerinde meydana gelen bilindik bölgesel rüzgarlar; karayel, yıldız, poyraz, krivetz, bora, mistral, kesişleme, kıble, sirocco, hamsin, lodos ve fön rüzgarlarıdır. Bu rüzgarlar

farklı basınç merkezlerinin etkisiyle meydana gelen sürekli veya belirli mevsimlerde etkisini gösteren yüksek potansiyelleri rüzgarlardır ve Şekil 1.6’da şematize edilmiştir.



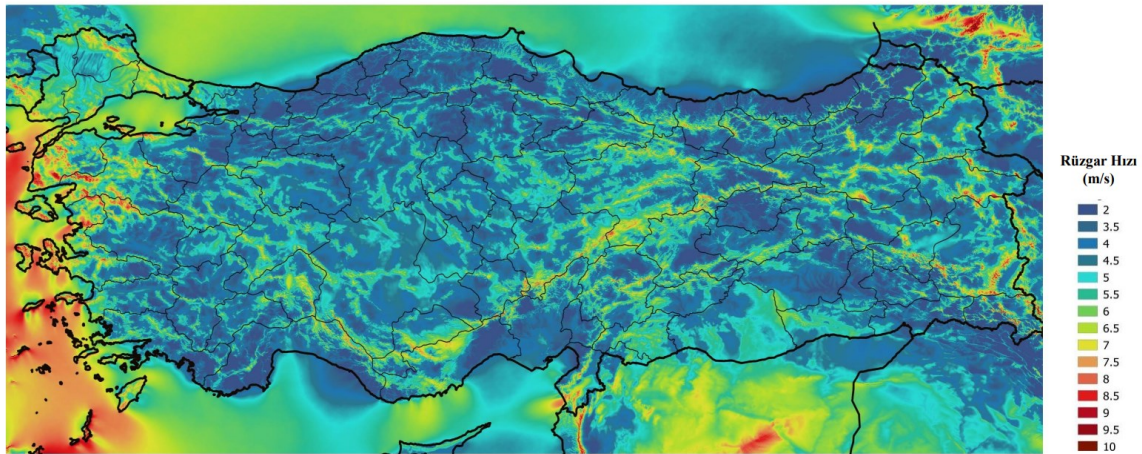
Şekil 1.6. Bölgesel rüzgarlar (Soner, 2024)

Türkiye’nin üç tarafı denizlerle çevrili olması ve yükseltisinin fazla olması bunun yanında çokça vadi ve dağlara sahip olması günlük rüzgarların oluşmasına neden olmaktadır. Meltem rüzgarları günlük rüzgarlardır ve yaklaşık 30-40 km’lik bir alanda 3-4 saat etkili olmaktadır. En bilindik meltem rüzgarları kara-deniz meltemi ve dağ-vadi meltemleri Şekil1.7’de verilmiştir. Karaların denizlere göre erken ısınması ve soğumasından dolayı gündüzleri denizden karaya doğru, geceleri de karadan denize doğru rüzgar oluşur. Dağ ve vadi melteminde gündüzleri dağ tepelerinde hava daha hızlı ısınacağından vadiden dağa doğru, geceleri dağ tepeler daha hızlı soğuyacağından tepeden vadiye doğru meltem rüzgarı oluşmaktadır (Ermiş, 2019).



Şekil 1.7. Meltem rüzgarları

Türkiye'nin matematik konumu, farklı basınç merkezlerinin etkisi ve fiziki yapısı rüzgar potansiyelinin varlığını ortaya koymaktadır. Ülkemizde rüzgar varlığını ortaya koyan ve sayısal olarak ifade edilen çalışmalar mevcuttur. 1984, 2002 ve 2006 yıllarında Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Atlası (REPA) çalışması yapılmıştır. 2002 yılı öncesi yapılan çalışmalarda veri eksikliği ve teknoloji eksiliğinden dolayı 2006 yılında Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü (EİE) tarafından Türkiye'nin REPA çalışması yeniden yapılmıştır. Günümüzde, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'na bağlı Enerji İşleri Genel Müdürlüğü tarafından Türkiye'nin, bölgelerin ve illerin yıllık ortalama rüzgar hızı dağılım haritaları halka açık şekilde sunulmaktadır. Türkiye'nin REPA haritası Şekil 1.8'de verilmiştir (Ermiş, 2019; Karakaya, 2009; REPA, 2006).



Şekil 1.8. Türkiye'nin yıllık ortalama rüzgar hızı dağılımı 100 metre

1.5. Çalışmanın Önemi, Amacı ve Alt Problemleri

Enerji üretiminin, tüketimin gerçekleştiği noktalarda yapılması, artan enerji ihtiyacını karşılama konusunda yardımcı olmakta ve sürdürülebilir şehirlerin oluşturulmasına katkı sağlamaktadır.

Çalışmaya konu olan yerleşim yeri, konum itibarıyla ana ulaşım yolları üzerinde bulunmaması, bölgenin gelişimini sınırlamıştır. Bölgenin nüfusu yaklaşık 90 000 olmakla birlikte dağınık yerleşim yapısı nedeniyle %70'i köylerde yaşamaktadır. Bölge ağırlıklı olarak tarım ve hayvancılık üzerine kurulan bir ekonomiye sahiptir. Bölgede sulu tarım

yapılması ve köy sayısının fazla olması, elektrik dağıtım noktasında zorluk yaşanma potansiyelini artırmaktadır. Bölgedeki tarımsal sulama ve kırsal yerleşimlerin elektrik ihtiyacının karşılanmasında rüzgar enerjisi önemli bir çözüm potansiyeli sunmaktadır.

Çalışmanın amacı; Samsun'un Vezirköprü ilçesinin kentsel rüzgar enerji potansiyelinin değerlendirilmesidir.

Bu kapsamda, çalışmada ele alınan alt problemler;

1. Vezirköprü ilçesinin genel kentsel rüzgar potansiyelinin belirlenmesi,
2. Rüzgar potansiyeline ve topografik özelliklerine göre türbin seçiminin yapılması,
3. Belirlenen türbinin enerji üretim miktarının hesaplanması,
4. Bölgenin kapasite faktörü ve üretilen enerjinin tüketilen enerjiyi karşılama oranının belirlenmesi.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Bu bölümde, araştırmanın temelini ortaya koyan kapsamlı bir literatür taraması yapılmıştır. Öncelikle rüzgar türbinlerine ilişkin genel bilgiler, türbin çeşitleri ve yeni tasarım yaklaşımları incelenmiş; böylece konuya kapsamlı bir giriş yapılması amaçlanmıştır. Ardından, kentsel rüzgar kaynağına ve kentsel rüzgar enerjisi sistemlerine yönelik mevcut uygulamalar, türbin seçimi ve ölçüm yöntemleri detaylandırılmıştır. Son bölümde ise, rüzgar enerjisi potansiyelinin hesaplanmasına ilişkin yöntemler ortaya konmuştur.

2.1. Rüzgar Türbinleri ve Özellikleri

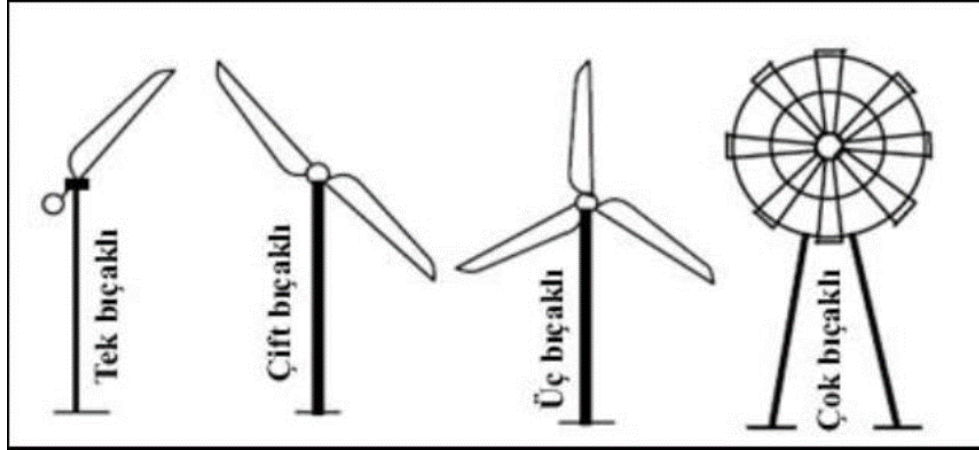
Rüzgarın insanlık yararına kullanılabileceğinin anlaşılmasıyla birlikte, bu alanda pek çok tasarımlar yapılmıştır. Tasarımlar temelde dönme eksenini olarak yatay ve dikey olarak şekillenmiştir. Bu bölümde, klasik Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri (YERT), Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri (DERT), yeni türbin tasarımlarını ve üretim potansiyelini artırmaya yönelik yapılan çalışmalar ele alınacaktır.

Rüzgar türbinleri kullanım amacına yönelik güç değerleri değişiklik göstermektedir. Bunun yanı sıra, güç değerlerine göre sınıflandırma yapılmaktadır (Mamur ve Karayel, 2018). Bu ayırım sonucunda rüzgar türbinleri, büyük ve küçük güçlü türbinler olarak sınıflandırılmaktadır. Bu bölümde, büyük ve küçük güçlü rüzgar türbinleri ve birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları yer verilecektir.

1.1.1. Yatay eksenli rüzgar türbinleri

YERT'lerin rotor mili yere paralel olarak dönmekte ve rüzgarı akışını doğrudan karşıdan almaktadır. YERT'ler kanat sayısına göre bir, iki, üç ve çok kanatlı olmakta ve kanat yapılarına göre farklı özelliklere sahiptir (Şekil 2.1). Tek kanatlı rüzgar türbini, kanat sayısı az olduğu için makine kütlesi az ve dönme hızı yüksektir. Bu nedenle momenti düşüktür. Hareket kontrolü zor ve gürültü çalışmaktadır. İki kanatlı rüzgar türbinleri tek kanatlı türbine göre daha düzgün ve stabil çalışabilmesi için ilave teknik düzenlemelere ihtiyaç duymaktadır. Bu düzenlemeler iki kanatlı türbin maliyetini artırmaktadır. Gürültü seviyesi yüksek ve düşük rüzgar hızlarında çalışma zorlukları barındırmaktadır. Üç kanatlı rüzgar

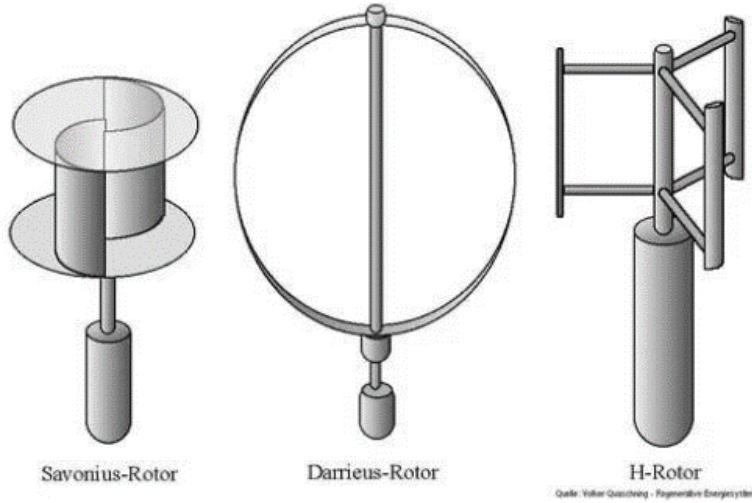
türbinleri günümüz modern türbinleri olarak bilinir ve dünya genelinde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Çalışması bir ve iki kanatlı türbinlere göre daha stabil, titreşimi az ve gürültü seviyesi düşüktür. Çok kanatlı rüzgar türbinleri ise yüksek moment elde etmek için kullanılmıştır (Altınsoy, 2013).



Şekil 2.1. Kanat sayılarına göre YERT'leri (Elibüyük ve Üçgül, 2014)

2.1.1. Dikey eksenli rüzgar türbinleri

DERT'ler, rotor mili yere dik konumlandırılan ve her yönden rüzgar alabilen türbin çeşitleridir. Bu türbinler arasında en yaygın bilinen modeller; Savonius, Darrieus ve H-Darrieus türbinleri Şekil 2.2'de yer almaktadır. Savonius rüzgar türbinleri, birbirinin zıttı yönüne kaydırılmış iki yarım silindirin birleştirilmesiyle oluşturulmaktadır. Rüzgar etkisiyle türbinin iç kısmında pozitif, dış kısmında ise negatif basınç farkı oluşur. Bu basınç farkı sayesinde dönme hareketi gerçekleşir. Her yönden rüzgar alabilme özelliğine sahip olan Savonius türbinleri, düşük rüzgar hızlarında dahi çalışmaya başlayabilmekte ve ilk hareket için harici bir tahrik motoruna ihtiyaç duymamaktadır. Darrieus türbinleri ise iki veya üç kanatlı olarak üretilebilmektedir. Ancak ilk hareket için tahrik motoru gerektirmektedir. Darrieus türbinlerinin kanat yapısı aerodinamik olarak tasarlandığı için, verim açısından Savonius türbinlerine göre daha üstündür. H-Darrieus türbinleri ise Darrieus türbinlerine benzemekle birlikte, daha düzgün bir aerodinamik yapıya sahiptir ve bu türbinlerin çalışmasında pitch kontrol sistemine ihtiyaç duyulmaktadır (Altınsoy, 2013).



Şekil 2.2. Rotor yapılarına göre DERT'leri (Keleş Çetin, Genç ve Daldaban, 2019)

2.1.2. Rüzgar türbinlerinde yeni yaklaşımlar ve tasarımlar

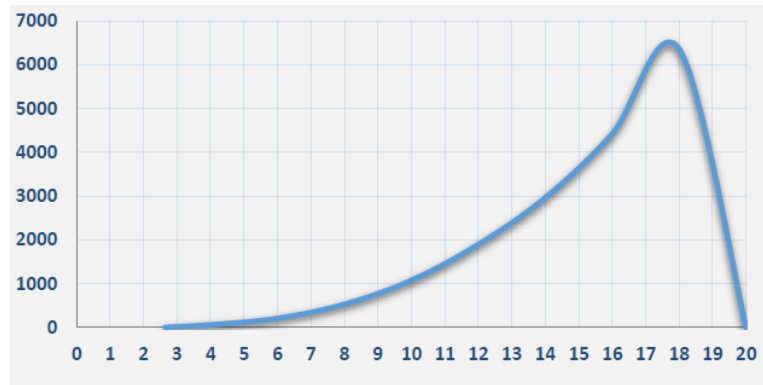
Rüzgar türbinlerinin verimliliği artırmaya ve farklı yaklaşımlar sergilemeye yönelik birçok araştırmacı ve işletme çalışma yapmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda yeni rüzgar türbinleri ve rüzgar türbinlerinin verimini artıran metotlar geliştirilmiştir. Geliştirilen bu yöntemlerin bazıları kullanıcılar tarafından karşılık görürken bazıları görmemiştir. Bu bölümde, bilindik rüzgar türbinlerin dışında farklı yapıda olan tasarımlara yer verilmiştir.

Arşimet Spirali Rüzgar Türbini (ASRT), Fibonacci spiralinden esinlenerek tasarlanmıştır. Bu türbinin görünümü Şekil 2.3'te sunulmaktadır. ASRT'leri yatay eksenli rüzgar türbinleri kategorisine girmektedir. ASRT'leri benzersiz kanat yapısı ile hem kaldırma hem de sürüklenme kuvveti kullanarak dönüş sağlamaktadır. Tasarımı ve çalışma mantığı açısından klasik türbinlerden ayrılmaktadır (Anuraj, Hameed, Rajakaruna, Ktdys and Madhuwantha 2022; Faisal ve diğerleri, 2025).



Şekil 2.3. Arşimet spirali rüzgar türbini (Konuk, Özdamar ve Şentürk, 2018)

Momentum Araştırma Geliştirme ve Peyzaj Ltd. Şti. şirketinin tasarladığı Karayel 6411 Watt'lık isimli türbinin görmeye alışkın olduğumuz türbin tasarımlarının dışına çıkmaktadır. Şekil 2.4'de sunulan Karayel 6411, şehir içi uygulamaları için alternatif bir türbin yaklaşımı sağlamıştır. Türbin özelliklerine bakıldığında geniş bir çalışma aralığı (2,65-18 m/s) sunması göze çarpmaktadır (Yıldız, 2020).



Şekil 2.4. Karayel 6411 ve güç eğrisi (Momentum ARGE, 2019)

Resim 2.1'de kentsel ortamda rüzgar türbini kullanımına yönelik esneklik kazandırmak için çarklı sistemler kullanılarak yeni bir yaklaşım sergilenmiştir. Tasarlanan çalışmada, üç, dört, beş ve altı kanatlı olmak üzere farklı kanat sayılarına sahip, bireysel veya çarklı sistemle çalışabilen, ikili ya da üçlü şekilde kurulabilmektedir. Oluşturulan tasarım ile daha fazla

rüzgar yakalayabilmekte ve mekanik güç artırımı sağlanmaktadır. Bunun yanında kurulum yapılmak istenen bölgenin rüzgar hızına göre kanatların ve çarkın sayıları değiştirilerek en ideal güç üretimi sağlanmaktadır. Birlikte kurulum yapılan her bir rotordan elde edilen mekanik güç bir noktada birleştirilerek enerji üretimi sağlanmaktadır (Kekezoğlu, 2013).



Resim 2.1. Farklı kanat sayısına sahip birbirine temas eden dişli yapıları türbin tasarımı (Kekezoğlu, 2013)

Darrieus ve Savonius, DERT'leri birbirlerine göre avantaj ve dezavantaja sahiptir. DERT'lerin içerisinde Darrieus rotora sahip türbin verimi en yüksek türbin tipi olmasına karşın başlangıç için ilk harekete ihtiyaç duyması en belirgin dezavantajıdır. Diğer taraftan Savonius tipi türbin, düşük rüzgarlarda harekete başlamasına karşın verimi DERT'leri içerisinde en düşük türbin türüdür. Şekil 2.5'te Darrieus rüzgar türbininin ilk başlangıçtaki zorluğu gidermek için Savonius tipi rüzgar türbininin düşük hızlarda başlama özelliği ile desteklemek amacıyla Savonius ve Darrieus bütünleşik tasarımı oluşturulmuştur. Böylece Darrieus türbininin ilk hareket problemi ortadan kaldırılırken, aynı zamanda her bir türbinin bireysel olarak sağladığı verimin üzerinde bir toplam verim elde edilerek yeni bir tasarım ortaya konulmuştur (Keleş Çetin ve diğerleri, 2019).



Şekil 2.5. Darrieus ve Savonius bütünüleşik tasarımı

Şekil 2.6’da eğimli çatılarda kullanılabilen çatı sırtı rüzgar türbini, çatı sırtına yatay eksenle konumlandırılmış şekilde monte edilebilen ve çatıyla bütünüleşik şekilde görünüme sahip kentsel kullanım alanında yeni bir yaklaşım sunmuştur. Çatının eğimi sayesinde rüzgar hızının artmasına ve normal düz çatılara göre yüksek enerji çıktısı sağlamaktadır. Eğimi 30° olan çatılarda rüzgar hızını 1,5 katı, 45° ’lik çatılarda 1,5-2,2 kat artırmaktadır. 1,5 m çapında ve 6 m uzunluğa ve $1,8 \text{ m}^2$ ’lik süpürme alanına sahip çatı sırtı rüzgar türbini, $4,5 \text{ m/s}$ ’lik rüzgar hızında düz çatıda 100 W’lık enerji üretirken 45° eğimli çatıya monte edildiğinde 1500 W’a kadar çıkabilmektedir. Türbülanslı ortamda enerji üretme kapasitesi yüksek olması ve ayarlanabilir kanatlar sayesinde fırtınalı havalarda çalışabilmesi çatı sırtı rüzgar türbininin öne çıkan özellikleridir (Budea, 2023).



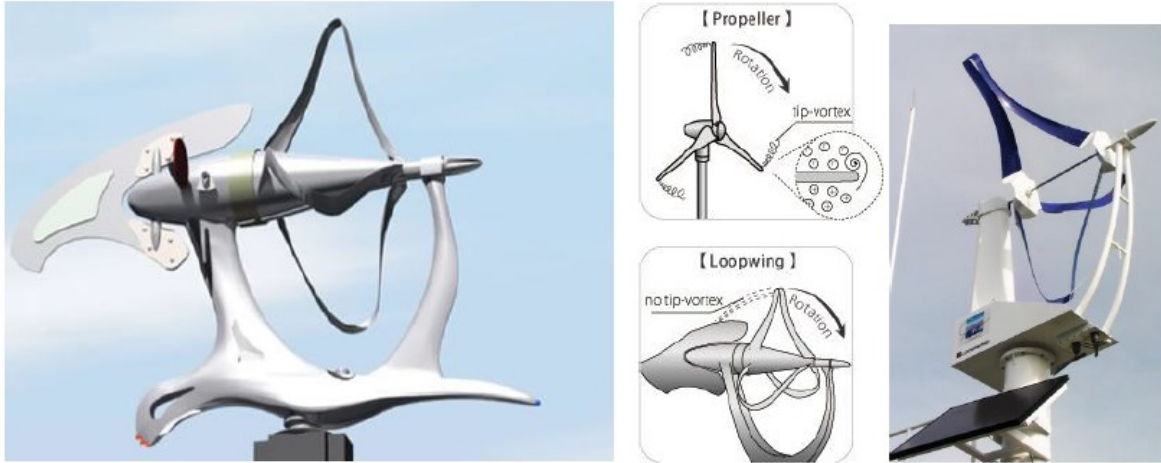
Şekil 2.6. Çatı sırtı rüzgar türbini ve rüzgar hareketi

Çalışma mantığı olarak yeni diyebileceğimiz ve alçak basınç oluşturarak havanın yüksek basınçtan alçak basınca doğru hareketi sağlanarak enerji üretimi gerçekleştirmektedir. Görünürde dönen bir rotor yapısı olmaması birçok türbin tasarımından görüntü olarak ayrılmaktadır. Şekil 2.7’de görüldüğü üzere sağda ve solda kanatların yer aldığı, ortada ise silindirin yer aldığı bir yapıdadır. Kanatlara çarpan hava, kanatların iç tarafında alçak basınç oluşturmaktadır. Alçak basınç içerisinde kalan silindirin üzerindeki deliklerden havayı çekmesine ve silindirin altında yer alan pervanenin dönmesini sağlamaktadır. 2,5 m/s’lik rüzgar hızında kanatları arasındaki oluşan emiş gücü ile silindirin içindeki rüzgar hızı yaklaşık 3,6 katına ulaşabilmektedir. Sessiz, titreşimi az ve görünen bir rotor olmayışı ön plana çıkan özellikleri arasındadır (Budea, 2023).



Şekil 2.7. Aeromine rüzgar türbini ve çalışma prensibi

Kentsel rüzgar türbinleri, genellikle insanların yaşam alanlarına yakın noktalara kurulduğu için, kanat uçlarında oluşan girdap kaynaklı sesler istenmeyen bir durum olarak öne çıkmaktadır. Bu sorunun önüne geçebilmek adına, sivri kanat uçları bulunmayan Loopwing rüzgar türbinleri tasarlanmıştır (Şekil 2.8). Böylece, oval uçlu kanat yapısı sayesinde türbin kaynaklı ses, dikkat edilmesi gereken başlıca problemler arasında olmaktan çıkarılmıştır (Yazar, 2013).



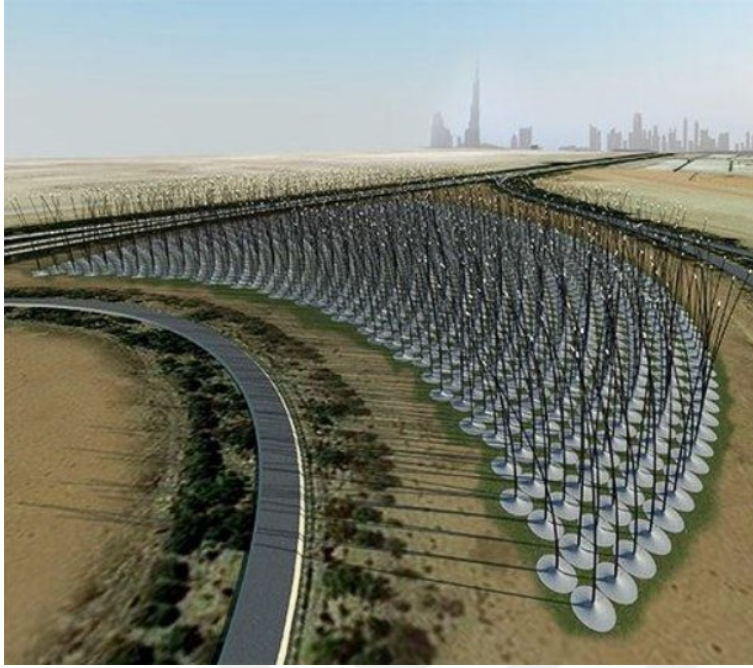
Şekil 2.8. Loopwing rüzgar türbinlerinin görünümü

Rüzgar türbinleri, rüzgarın türbülanslı olmayan, düzgün akış sergilediği yüksekliklerde kurulması istenir. Türbin konumlandırılmasında istenilen yükseklik her zaman sağlanamayabilir. Resim 2.2’de, bu probleme yönelik yapılan Alaeros rüzgar türbini, helyum gazı ile doldurularak istenilen yüksekliklerde kurulum yapılmasına imkan sağlamaktır. Kısa sürede kurulabilen yapısı sayesinde, rüzgarın istenilen akış özelliğine sahip olduğu yüksekliklerde kolayca konumlandırılabilir (Yazar, 2013).



Resim 2.2. Alaeros rüzgar türbini

Rüzgarın, ince ve uzun çubuklar üzerine etki etmesiyle birlikte çubuklarda salınım hareketi oluşmaktadır. Dikey yapıların oluşturduğu titreşim sayesinde, piezoelektrik prensibi kullanılarak elektrik üretimi gerçekleştirilmektedir. Şekil 2.9’da bu yöntemle oluşturulan rüzgar çiftliği, klasik rüzgar tarlalarından farklı bir tasarıma sahiptir (Yazar, 2013).



Şekil 2.9. Piezoelektrik prensibine göre çalışan rüzgar tarlası

Şekil 2.10’da Halbes Enerji şirketinin üretimi olan kanallı kanat yapısına sahip yatay eksenli rüzgar türbini alışı gelmiş türbinlerden ayrılmaktadır. En belirgin farkı ve en önemli özelliği kanatlarıdır. Rüzgar, kanat kanallarından geçerken hız kazanmasına neden olmakta ve düşük rüzgar hızlarında verimli çalışabilmektedir (Defensehere, 2022).



Şekil 2.10. Kanal kanatlı rüzgar türbini (Halbes, 2025)

2.1.3. Rüzgar türbinlerinde güç sınıflandırılması

Rüzgar türbinleri farklı boyut ve güçlerde üretilmektedir. Uluslararası Elektroteknik Komisyonunun IEC 61400-2 standardına göre, rüzgar türbinleri 2 sınıfa ayrılır; rotor süpürme alanı 200 m^2 ve az olan türbinler küçük güçlü, 200 m^2 'den büyük olan türbinler ise büyük güçlü sınıfına girmektedir (Mamur ve Karayel, 2018).

Rüzgar türbinlerinin verimlilikleri şartlara ve özelliklerine göre değişiklik göstermektedir. Büyük rüzgar türbinlerinin elde edeceği maksimum verim Betz kriteri göre belirlenmekte ve bu değer en yüksek %59'dur. Araştırmalar, büyük rüzgar türbinlerinin verimi %30'un ve 6 m/s'nin altındaki rüzgar hızlarında ekonomik olmadığını ortaya koymuştur. Rüzgar hızı, 6 m/s'nin altında kalan yerlerde küçük ölçekli rüzgar türbinleri tercih edilmektedir (Mamur ve Karayel, 2018).

Büyük güçlü rüzgar türbinlerinin ilk kurulumu, bakımı ve iletim maliyetlerinin yüksek olması, bunun yanında acil müdahale gerektiren durumlarda yaşanan zorluklar ve dağıtımdaki kayıplar, bu türbinlerin kullanımını bazı durumlarda dezavantajlı hale getirmektedir. Küçük güçlü türbinlerin, yatırım maliyeti düşük olması, enerji tüketim merkezlerine yakın olması, bakım maliyetinin çok düşük olması ve düşük rüzgar hızlarında dahi elektrik üretebilmesinden dolayı tercih edilmektedir (Keleş Çetin ve diğerleri, 2019; Öztürk, 2018).

2050 yılı itibarıyla dünya nüfusunun yaklaşık %70'inin şehirlerde ikamet edeceği tahmin edilmektedir. Bu demografik değişim, kentlerdeki enerji talebinin kayda değer biçimde artmasına yol açacak ve mevcut enerji şebekeleri üzerinde yoğun baskılar oluşturacaktır (Kwok and Hu, 2023). Öz tüketimi karşılayacak sistemlere ihtiyacın artması, kentsel rüzgar enerjisinin kullanımına ihtiyaç duymaktadır. Bu durum, küçük güçlü rüzgar türbinlerinin kent içindeki önemini artırmaktadır.

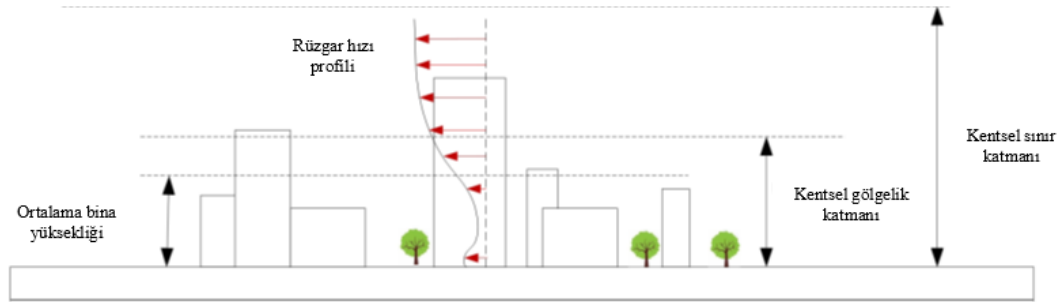
2.2. Kentsel Rüzgar Kaynağı

Kent ortamında, rüzgar hızı 2 ila 8 m/s arasında seyretmektedir (Faisal ve diğerleri, 2025). Kent ortamında rüzgar değişimlerine hızlı tepki verebilen, düşük rüzgar hızlarında

çalışabilen küçük ölçekli türbinlerin tercih edilmesi, şehir içindeki rüzgar kalitesindeki en küçük değişimlerin dahi dikkate alınması gerektiğini göstermektedir (Micallef and Van Bussel, 2018).

Kent ortamındaki bina tasarımlarının görsel kaygılarla tasarlanması, geleneksel bina tasarımlarına yer verilmesi, binaların birbirine yakın olması, bina yükseklik farklarının fazla olması, çatı tasarımlarının uygun olmaması ve binaların birbirine göre yapılış açılarının uygun olmayışı gibi birçok unsur kentsel rüzgar potansiyelini etkilemektedir.

Kentlerde yer alan binaların çatıya kadar olan kısmı ile çatıdan sonraki kısım ayrı ele alınmalıdır. Çünkü çatıya yerleştirilecek türbin için dikkat edilmesi gereken durumlar ile binanın yan yüzeyine, yakınına veya cadde ve sokaklara yerleştirilecek türbinler için dikkat edilmesi gereken durumlar farklıdır. Şekil 2.11.'de belirtilen kentsel gölgelik katmanı yerden çatı yüksekliğine kadar olan kısmı temsil ederken, kentsel sınır katmanı çatı ve üstü katmanı temsil etmektedir. Bina yüksekliklerinin birbirine yakın olması, yüzey pürüzlülüğünü azaltarak çatı üstünde oluşacak rüzgar profilinin çatıya daha yakın bir seviyede ve daha düzgün bir yapıda oluşmasına katkı sağlamaktadır (Micallef and Van Bussel, 2018).

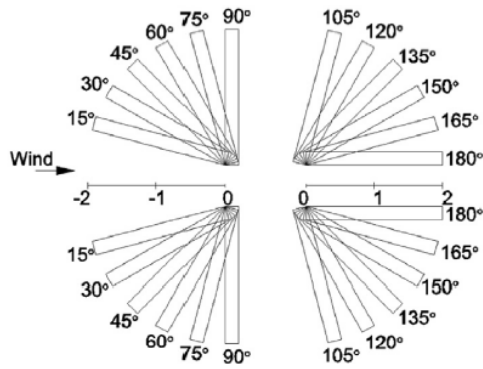


Şekil 2.11. Kentsel sınır katmanı ve kentsel gölgelik katmanından oluşan kentsel rüzgar profili

Kentsel ortamda rüzgar hızını iyileştirmeye yönelik birçok akademik çalışma yapılmıştır.

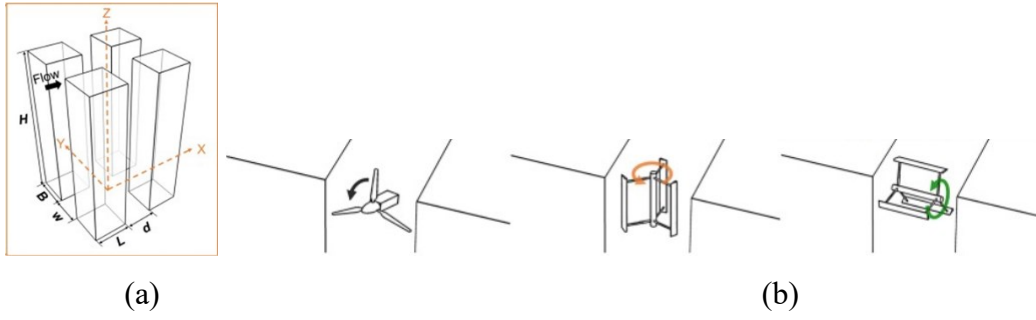
(Li, Luo, Sandberg and Liu, 2015) çalışmasında, binaların birbirine göre yerleşim açıları dikkate alınarak bu açıların binalar arasındaki rüzgar hızına etkisi araştırılmıştır. Çalışmada özdeş iki bina kullanılarak, binalar arasındaki açı 15° 'lik artışlarla, Şekil 2.12'de gösterildiği şekilde, 15° ile 180° arasında değiştirilmiş ve her açı için rüzgar hızındaki değişim

ölçülmüştür. Araştırma sonucunda, hakim rüzgar yönüne göre bina açılarının 90° 'den büyük olduğu ıraksak geçitlerde rüzgar hızının, 90° 'nin altında olduğu yakınsak geçitlere göre önemli ölçüde daha yüksek olduğu ortaya konmuştur. Ayrıca ıraksak geçitler içinde en yüksek rüzgar hızının sağlandığı açılar 105° , 135° ve 150° olarak belirlenmiştir. Bu açı değerleri arasında rüzgar hızını en fazla artıran yerleşim açısının ise 150° olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 2.12. Birbirlerine göre farklı açılara sahip binaların üstten görünüşü

(Juan ve diğerleri, 2022) çalışmasında, 2×2 kübik şeklinde Şekil 2.13 (a)'deki gibi yerleştirilen dört binanın birbirine olan uzaklıklarını değiştirerek rüzgar hızındaki değişimi gözlemlenmiştir. Ayrıca, rüzgarın 0° , $22,5^\circ$ ve 45° açılarından estiği durumlarda binalar arasındaki rüzgar hızı ve yoğunluk değişimi gözlemlenmiş ve bu durumun türbin yerleşimine etkisi ele alınmıştır. Şekil 2.13 (b)'de görüldüğü gibi, üç kanatlı yatay eksenli ve dikey eksenli Darrieus tipi türbinler kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, Darrieus tipi türbinin yatay olarak, bina yüksekliğine yakın noktalara yerleştirilmesi en verimli seçenek olarak öne çıkmıştır. Bunun yanında, binalar arası mesafe ayarlamalarında %65, bina yükseklik düzenlemelerinde ise %364 oranında güç yoğunluğu artışı sağlandığı görülmüştür.



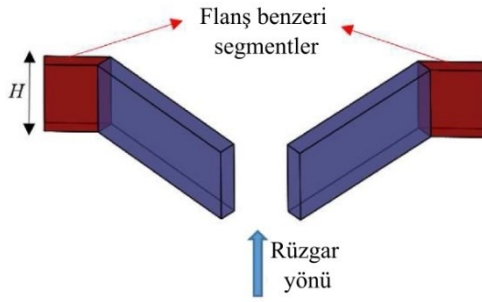
Şekil 2.13. (a) Uygulama alanı ve (b) rüzgar türbini konumlandırma şeması

Kentsel rüzgar kalitesini artırmaya yönelik yapılan bir diğer çalışmada; Şekil 2.14'te, 6x6 şeklinde düzenlenen yerleşim yerinin ortasında 2x2'lik kübik yapıdaki binaların birbirine uzaklığı ve köşe formlarını değiştirilerek türbülans ve rüzgar gücü yoğunluğu sonuçları incelenmiştir. Çalışmada seyrek yapılı ve köşeleri yuvarlatılmış binaların olduğu düzenekte; bina yanında %201 ve bina çatısında %150'ye kadar güç yoğunluğu artışı tespit edilmiştir (Juan, Wen, Li and Yang, 2021). Bina aralarındaki ve bina köşe formlarının etkisini ortaya koyan bu çalışmaya dayanarak kentsel ortamda rüzgar enerjisinden daha fazla yararlanmanın bir yolu da mimari tasarım olduğu ortaya çıkmaktadır.



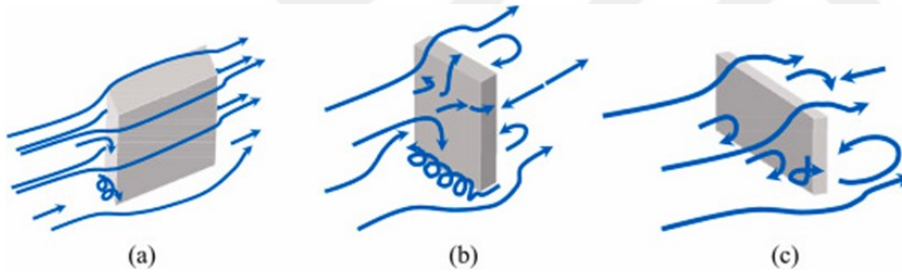
Şekil 2.14. En iyi sonucu elde edildiği bina dizilimi

(Anbarsooz and Amiri, 2022) çalışmasında, ıraksak geçitlere flanş benzeri segmentler ekleyerek iki bina arasında geçen rüzgar hızı potansiyeli incelenmiştir. Şekil 2.15'teki gibi segmentlerin eklenmesiyle normal ıraksak yapıya göre rüzgar verilerinde iyileşme gözlemlenmiştir.



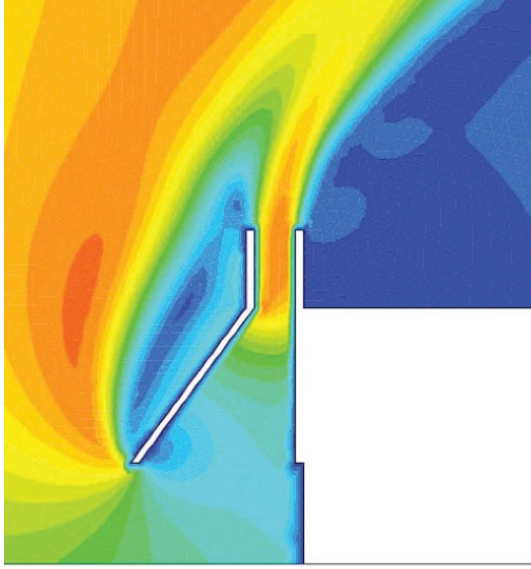
Şekil 2.15. Eğimli, flanş benzeri segmentler

(Liu ve diğerleri, 2025) çalışmasında, kentsel yerleşim alanlarında, binaların geometrik şekilleri rüzgarı aldığı yöne göre oluşan türbülans yapısını incelenmiştir. Şekil 2.16 (a)'da rüzgar, binaya paralel bir şekilde akarken b ve c de ise rüzgar geniş bir yüzeyden göğüslediği için daha fazla türbülans oluşmaktadır. Bu çalışma türbin kurulumu için önemli bir analiz sunmaktadır.



Şekil 2.16. Kentsel bireysel binaların etrafındaki üç tür hava akışı özelliği

(Sáenz-Díez Muro, Blanco Barrero, Jiménez Macías, Blanco Fernández and Pérez de la Parte, 2011) yapmış olduğu çalışmada, 'korniş modüler rüzgar kolektörü' olarak adlandırdığı sistemle (Şekil 2.17'de), kentsel ortamdaki küçük ölçekli rüzgar türbinlerinin verimini artırdığını ve maliyeti düşürdüğünü CDF analizi sonuçlarıyla ortaya koymuştur. Kentsel ortamda rüzgar, bina yüzeyinde birikir ve yukarı doğru hareket eder. Korniş modüler rüzgar kolektörü, yükselen rüzgarın korniş sınır tabakasından ayrılırken oluşan bozuk rüzgarı düzenlemektedir. Korniş modüler rüzgar kolektörü, dikey ekseninde hareket eden rüzgarı bir araya toplaması ve rüzgar hızının artmasını sağlar.



Şekil 2.17. Korniş modüler rüzgar kolektörü

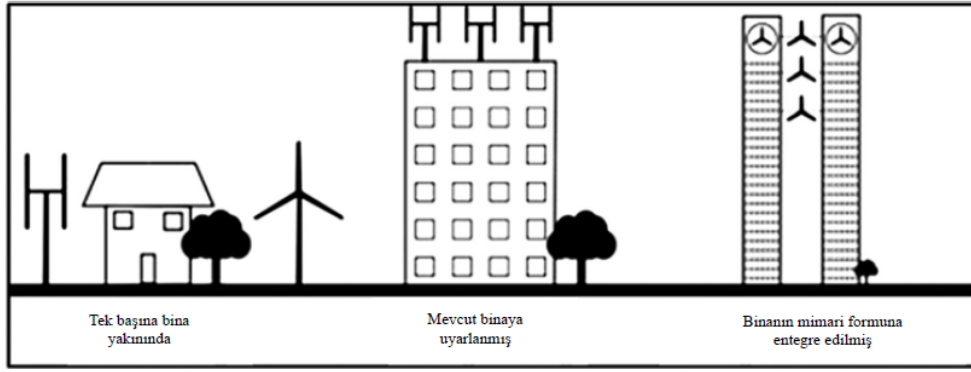
İncelenen akademik çalışmalarda, kent ortamında rüzgar varlığını belirginleştirmek ve daha faydalı hale getirmek için düzenlemelere ihtiyaç duyulmaktadır.

2.3. Kentsel Rüzgar Enerjisi Sistemleri

Rüzgar enerjisinin kentsel alanlardaki uygulanabilirliği son yıllarda önemli bir konu haline gelmiştir. Bu bölümde de, kent içinde kullanılan rüzgar türbinleri, türbin seçimi ve rüzgar ölçüm yöntemlerine ilişkin araştırma sonuçları aktarılmıştır.

2.3.1. Kentsel türbin uygulamaları

Kentsel ortamlarda türbinler, binadan ayrı zemine, mevcut binaların çatılarına ve mimari yapılara bütünleşik olarak yerleştirilmektedir (Rezaeiha ve diğerleri, 2020).



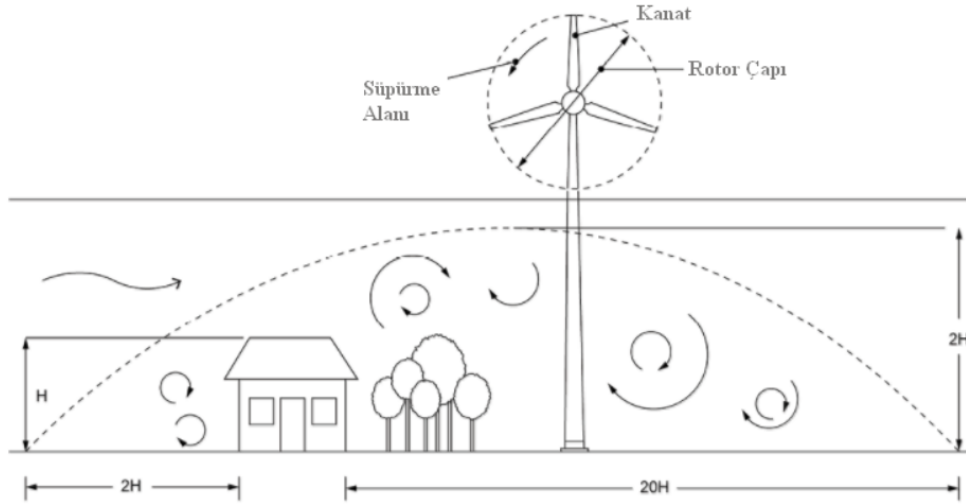
Şekil 2.18. Kentsel alanlarda rüzgar enerjisinden yararlanma sistemleri

Şekil 2.18’de yer alan, genel türbin konumlandırmaları dışında, rüzgar hızının elverişli olduğu her yere türbin yerleştirilmelidir. Bu yaklaşımla, parklar, duraklar, kalyon oluşturan geniş caddeler, akarsu kenarları ve akarsu üzerindeki köprüler, elektrik direkleri, bisiklet yolları, ana yol kenarları gibi birçok alan değerlendirilmelidir (Beller, 2009).

2.3.1.1. Yapı yakınında müstakil rüzgar türbini kurulumu

Bina yakınına türbin kurulumu, ancak yoğun kent merkezlerinin dışında, nüfusun az olduğu, yapılaşmanın seyrek ve yapı yüksekliklerinin düşük olduğu bölgelerde mümkün olmaktadır. Fakat böyle bölgelerde dahi rüzgar türbinini istediğimiz herhangi bir noktaya yerleştiremeyiz. Türbin direk üzerine kurulacağı için, yüzey pürüzlülüğünden ve çevredeki yapıların oluşturduğu türbülans etkisinden en az etkilenecek veya mümkünse hiç etkilenmeyecek şekilde konumlandırılması gerekmektedir.

Banliyö tarzı yerleşimlerde, türbin verimliliğini en üst seviyede kullanabilmek için, direk yüksekliği ve türbinin binaya olan mesafesi mutlaka dikkate alınmalıdır. Rüzgarın bir yapıya veya engelle karşılaşması durumunda oluşan rüzgar hareketi, türbin yerleşimi konusunda bize yol gösterici olacaktır. Çünkü rüzgar bir yapıya çarptığında, yapı yüksekliğinin yaklaşık iki katı kadar yükseklikte ve yatayda ise yirmi katı uzunluğunda bir alanda türbülans meydana gelmektedir. Şekil 2.19’da da görüldüğü gibi, türbinin rotor çapı, bu türbülanslı alanın üzerinde kalacak şekilde yerleştirilmelidir. Eğer bu mümkün değilse, türbin binadan uzaklaştırılarak daha kısa bir direk ile kurulum yapılabilir ve böylece türbülanslı bölgeden çıkılarak rüzgar kalitesi artırılabilir (Öztürk, 2018).



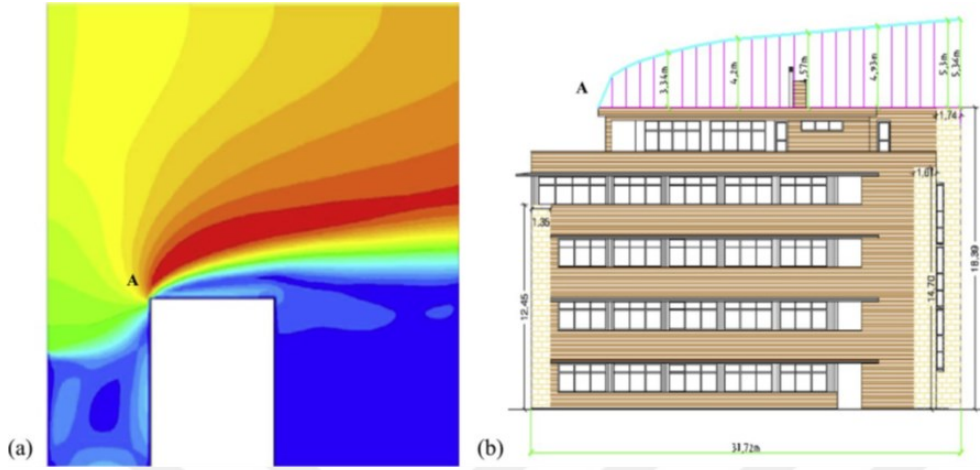
Şekil 2.19. Engel türbülans ilişkisi diyagramı

2.3.1.2. Mevcut yapılara rüzgar türbini kurulumu

Yüzey pürüzlülüğü rüzgar hızını etkileyen önemli bir etkidir. Kentsel ortamlarda yüzey pürüzlülüğün fazla olması rüzgar rejiminin bozuk olmasına neden olur. Kentsel ortamlarda çatı seviyesinin üstündeki katman olarak ifade edilen kentsel sınır katmanını çatı üstü rüzgar verimliliği için dikkate alınması önemlidir. Bu kapsamda, bina üstüne kurulacak rüzgar türbinlerinin verimliliğini; kentlerde geçmişten gelen geleneksel mimariler, binalar arası mesafeler, kent ortamındaki bina yükseklikleri, bina çatılarının olması veya olmaması, çatı şekillerinin rüzgara olan etkileri, bina geometrileri ve türbin kurulacak yerin konumu gibi birçok durum etkilemektedir (Vadhyar, Sridhar, Reshma and Radhakrishnan, 2024).

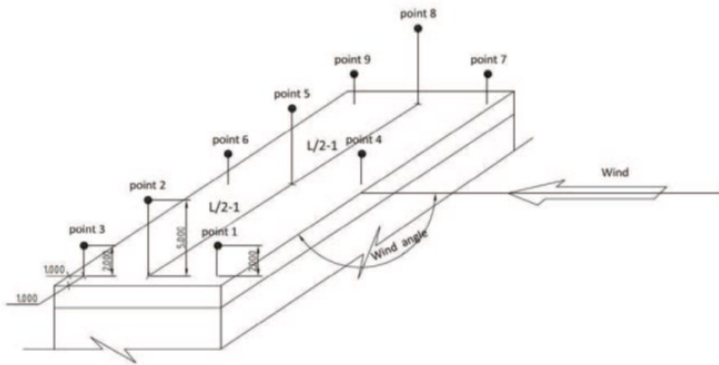
Şekil 2.20’de görüldüğü üzere, bina duvarlarına çarpan rüzgar çatı kenarında ayrılma kabarcığı oluşturmaktadır. Bu durumu özetleyecek olursak, görselde kırmızı renk ile gösterilen bölgenin altında kalan kısımda rüzgar bozuk ve verimsizdir. Kırmızı bölge ise rüzgarın daha düzenli ve verimli olduğu alanı temsil etmektedir. Şekil 2.20’deki görsel, (a)’da gösterilen rüzgar hareketinin ölçeklendirilmiş hali yer almaktadır. Bu sayede, rüzgarın bozuk olduğu yükseklikler net şekilde belirlenmiştir. Çalışma kapsamında, ayrılma kabarcığının üst kısmında yapılan ölçümlerde, rüzgar hızının normal koşullara göre %20 daha yüksek olduğu görülmüştür. Özellikle dikdörtgen formundaki binalarda türbin kurulumu yapılırken, rotor yüksekliğinin rüzgarın verimli olduğu bölgede yer alması oldukça önemlidir. Düz yapı çatılarda ise rotor yüksekliği, imkanlar dahilinde, mümkün olan en yüksek noktaya yerleştirilirse türbin verimi artacaktır. Ancak unutulmamalıdır ki bu

sonuçlar, farklı bina yüksekliklerinde, köşe formlarında ve rüzgar yönlerinde değişiklik gösterebilir (Longo ve diğerleri, 2020).



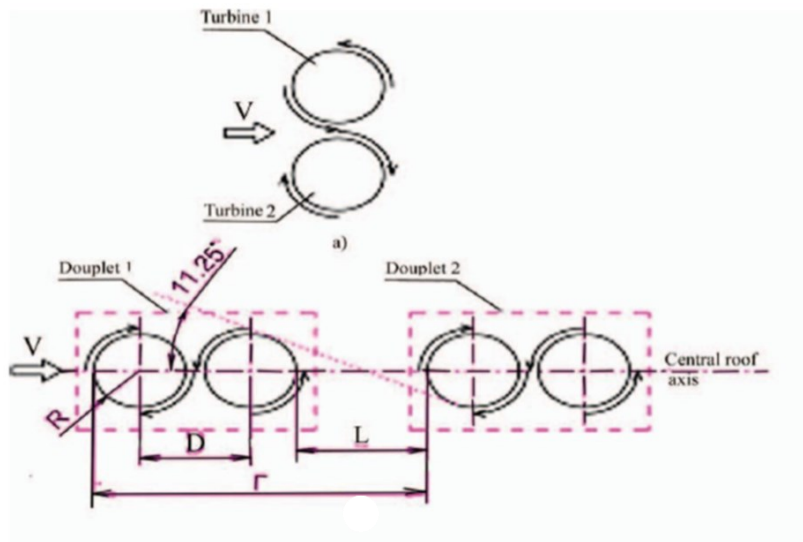
Şekil 2.20. Çatı kenarında ortaya çıkan ve bir ayrılma kabarcığına neden olan girdap gösterimi

(Ashanin, Elinov and Birjukova, 2022) çalışmasında, dikdörtgen şeklindeki düz çatı üzerinde belirli noktalar ve farklı yükseklikler belirlenerek bu noktalarındaki çatı üstü rüzgar hızları değerlendirilmiştir. Şekil 2.21’teki çalışmada, çatı üzerine toplam dokuz nokta seçilmiş, uzun kenarlardaki noktalarda 2 m, orta kısımdaki noktalarda 5 m yükseklikte ölçüm cihazı yerleştirilmiştir. Çalışmada, 1, 3, 5, 7, 9 ve 12 m/s hızlarında rüzgar gönderilerek, belirlenen noktalarda rüzgar hızları ölçülmüştür. Ölçüm sonuçlarına göre, 2. ve 8. noktalarda her seferinde, gönderilen rüzgar hızına kıyasla daha yüksek rüzgar hızları tespit edilmiştir. Bu çalışma, çatı üzerindeki rüzgar hareketinin ve hakim rüzgar yönünün dikkate alınmasının, türbin yüksekliği ve konumunun belirlenmesinde ne kadar önemli olduğunu göstermektedir.



Şekil 2.21. Bina çatısındaki kontrol noktaları

Çoklu türbin kurulumu yapılacağı zaman, türbinlerin birbirini nasıl etkilediğini ve aralarındaki boşlukların ne kadar olması gerektiğini bilmek, üretilen enerji miktarı açısından büyük önem taşır. Çoklu DERT kurulumu üzerine yapılan bir çalışmada, türbinlerin dönüş yönlerinin ve yerleşim şekillerinin enerji üretimi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Şekil 2.22’te de görüldüğü gibi, dikey eksenli türbinlerin birbirinin tersi yönde dönecek şekilde yerleştirilmesi durumunda, enerji üretim veriminde yaklaşık %10 oranında artış sağlandığı ortaya konmuştur (Ashanin ve diğerleri, 2022).



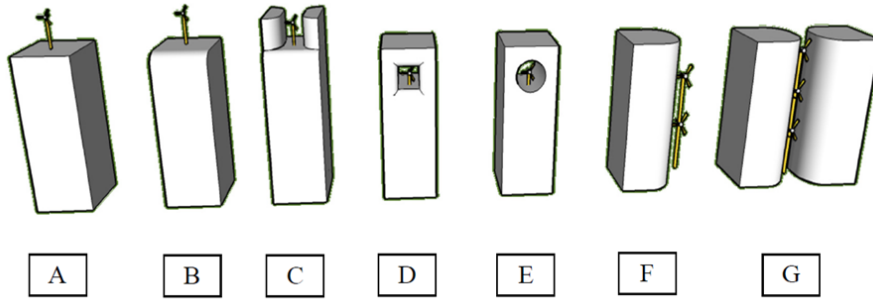
Şekil 2.22. Çoklu DERT kullanımındaki türbin aralıkları

Şehir içi rüzgar türbinlerinin kullanımdaki verimi artırmaya yönelik tasarım çalışmaları ve türbinlerin yerleşim şekillerinin düzenlenmesi ile verim artışı görülmektedir. Bu durum kentsel rüzgar türbinleri için gelecek sunmaktadır.

2.3.1.3. Yapı ile bütünleşik rüzgar türbinleri

Şekil 2.23’te, binayla bütünleşik farklı rüzgar türbini yerleşimleri görülmektedir. Yüksek ve köşeli yapılarda (A) rüzgar hızı artmakta ancak direk yüksekliği ihtiyacı doğmaktadır. Köşelerin ovalleştirilmesi (B) türbülansı azaltıp, rüzgar hızını %15 artırmakta ve direk boyunu kısaltmaktadır. Oval kenarlı koridor tasarımı (C) ile rüzgar hızı %20 artarken, tünel yapısında (D) bu oran %25-40’a çıkmaktadır. Dairesel tünel (E) en yüksek verimi sağlayarak rüzgar hızında %35-50 artış sağlamaktadır. Binanın yanında konumlanan türbinler (F) ve iki

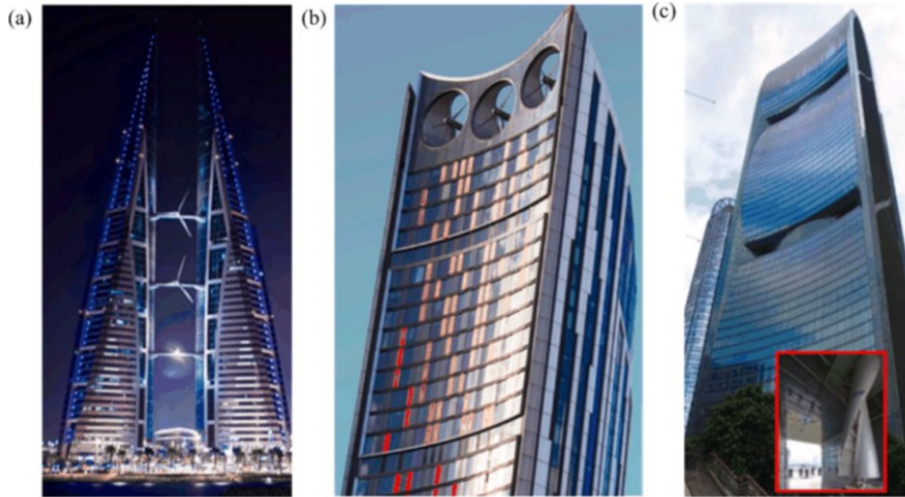
bina arasındaki türbinler (G) ise yüzey etkisinden dolayı daha düşük verim sunmaktadır (Bektaş, 2013).



Şekil 2.23. Bina mesnetli rüzgar türbinlerinin yapılarında kullanılan farklı tipleri

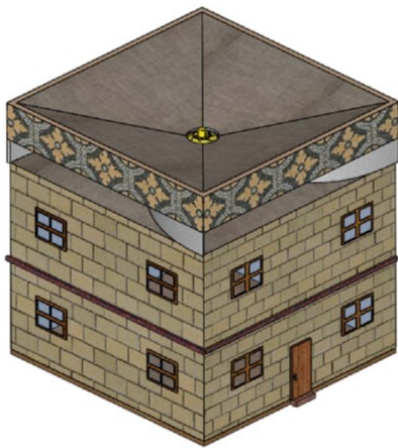
Rüzgar türbinleri binalara entegre edilirken sadece bina yüksekliğine güvenilerek hareket edilmemeli ve daha fazla rüzgardan yararlanma adına yapılması gereken birçok mimari düzenlemeleri bünyesinde barındırmaktadır. Binaya bütünleşik rüzgar türbinleri tasarlanırken sosyal kabul, bakım kolaylığı, ses, titreşim ve güvenlik konuları göz önüne alınarak yapılmalıdır.

Günümüzde faaliyette olan başarılı, binaya entegre konusunda öncü sayılabilecek çalışmalar Şekil 2.24'te gösterilmiştir. Şekil 2.24 (a)'da Bahreyn Dünya Ticaret Merkezi (BWTC) 250 kW gücüne sahip rüzgar türbinleri kurulmuş ve binanın elektrik ihtiyacının %11-15'ini karşılamaktadır. Şekil 2.24 (b)'de görüldüğü üzere üç açıklığa yerleştirilen dokuz metrelik çapına ve 19 kW gücündeki rüzgar türbini İngiltere'deki Strata'dır. Bu türbinler binanın enerji ihtiyacının %8'ini karşılamaktadır. Şekil 2.24 (c)'de dört açıklık, ilk iki açıklık 104 m'de ve ikinci ikisi 205.4 m'de olmak üzere iki farklı yükseklikte konumlandırılmıştır. Açıklıklar, rüzgar hızını artırmak ve çıkışı en üst düzeye çıkarmak için aerodinamik olarak şekillendirilmiştir (Kwok and Hu, 2023).



Şekil 2.24. (a) Bahreyn Dünya Ticaret Merkezi (BWTC), (b) Strata (SE1) ve (c) Pearl River Kulesi

Şekil 2.25’te farklı bir yaklaşım sunan eolic çatısı, yapısı gereği rüzgar dört bir tarafından oluşturulan kanallar sayesinde çatı merkezine yönlendirilerek, çatı merkezindeki dikey eksenli yedi kanatlı rüzgar türbini ile enerji üretimi sağlanmaktadır. Türbin çatı merkezinde kapalı bir alanda yer aldığı için açıkta bulunan türbinlere göre çok daha güvenli bir yapıdadır. Bunun yanında dikey eksenli türbin kullanıldığı için farklı yönden gelen rüzgarı yakalayabilmekte ve türbin yapısından dolayı daha düşük başlama hızı ve daha yüksek kesme sınırı ile normal türbinlere göre geniş bir çalışma aralığına sahiptir (Carcangiu and Montisci, 2012).

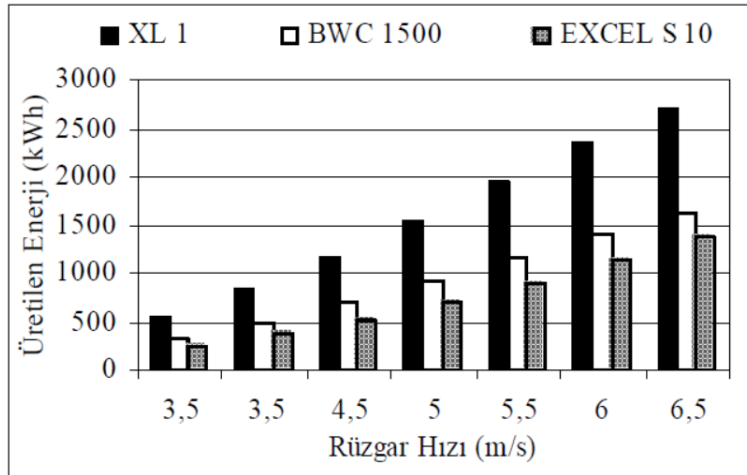


Şekil 2.25. Binaya entegre eolic sistem

2.3.2. Türbin seçiminin önemi

Kentsel ortamlarda, türbin kurulacak yapıların rüzgar potansiyelini en doğru şekilde tespit etme yöntemi, yerinde ölçüm yöntemidir. Rüzgar türbinlerinden en yüksek verimde enerji üretilmek istenmektedir. Bu kapsamda rüzgar potansiyeline göre türbin seçiminin önemi ortaya çıkmaktadır. Yüksek rüzgar potansiyeline sahip bir noktaya, rüzgar potansiyelinin çok altında küçük güçlü rüzgar türbini kurulması, rüzgar hızı fazla olduğu için türbin sürekli kendini korumaya alacak ve istenilen türbin gücünde enerji üretimi sağlanamayacaktır. Bu durumun tersi de geçerlidir. Bu kapsamda rüzgar hızına göre türbin seçimi önem kazanmaktadır.

(Aslan ve Yaşar, 2005) çalışmasında, aynı markaya ait 1 kW'lık, 1,5 kW'lık ve 10kW'lık güçlerindeki rüzgar türbinlerini 4,5 m/s'lik ortalama hıza sahip bir bölgede, aynı kurulu güçte eşitleyerek güç çıktısı test edilmiştir. Kurulu gücü, 10x1 kW, 7x1,5 kW ve 1x10kW sayılarında türbin kullanılarak eşitlenmiştir. Araştırma onucuna göre 1kW'lık 10 tane türbin grubu tek başına 10 kW'lık türbine göre daha fazla enerji üretmiştir. Bu durum, rüzgar hızına göre türbin seçiminin ne kadar önemli olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 2.26. Aynı kurulu güçteki türbinlerin ürettikleri enerji miktarları

2.3.3. Rüzgar ölçüm yöntemleri ve cihazları

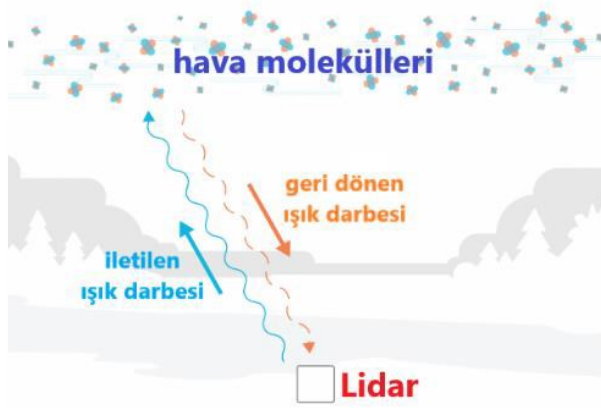
Rüzgar enerji potansiyelini doğru bir şekilde belirleyebilmek için rüzgar hızı doğru ölçülmesi büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle türbin kurulacak bölge özelliğine göre rüzgar hızı

ölçüm cihazları kullanılması gereklidir. Rüzgar ölçüm cihazlarını genel olarak anemometre olarak isimlendirilmektedir. Anemometreler mekanik, ultrasonik, sıcak tel, lazer ışık prensipleri yardımıyla oluşturulan elektrik sinyalleri ile rüzgar hızını belirleyen cihazlardır. Kupalı(kepçeli), ultrasonik, propeller, kızgın telli ve LIDAR bilinen anemometre türleridir. Şekil 2.27 (a)'daki kupalı anemometreler, kepçeli şekli ile yakaladığı rüzgardan dolayı oluşan dönmenin dakikadaki sayısının hesaplanması ile rüzgar hızını belirler. Şekil 2.27 (b)'deki ultrasonik anemometreler, farklı uçlara sahip olması ve bu uçlardan yayılan ses dalgalarının yakalanma zamanını hesaplayarak rüzgar hızı belirlenir. Şekil 2.27 (c)'deki propeller anemometreler, pervaneli anemometreler olarak bilinir ve çalışma sistemi kupalı anemometreler ile aynıdır. Farkı ise rüzgar yönü düzleminde (paralel) monte edildiğinde yatay, rüzgar yönüne dik yerleştirildiğinde dikeydeki rüzgar hızını ölçmektedir (Işıklı, Köse ve Sağbaş, 2023; Oral ve diğerleri, 2011; Türüdü, 2021).



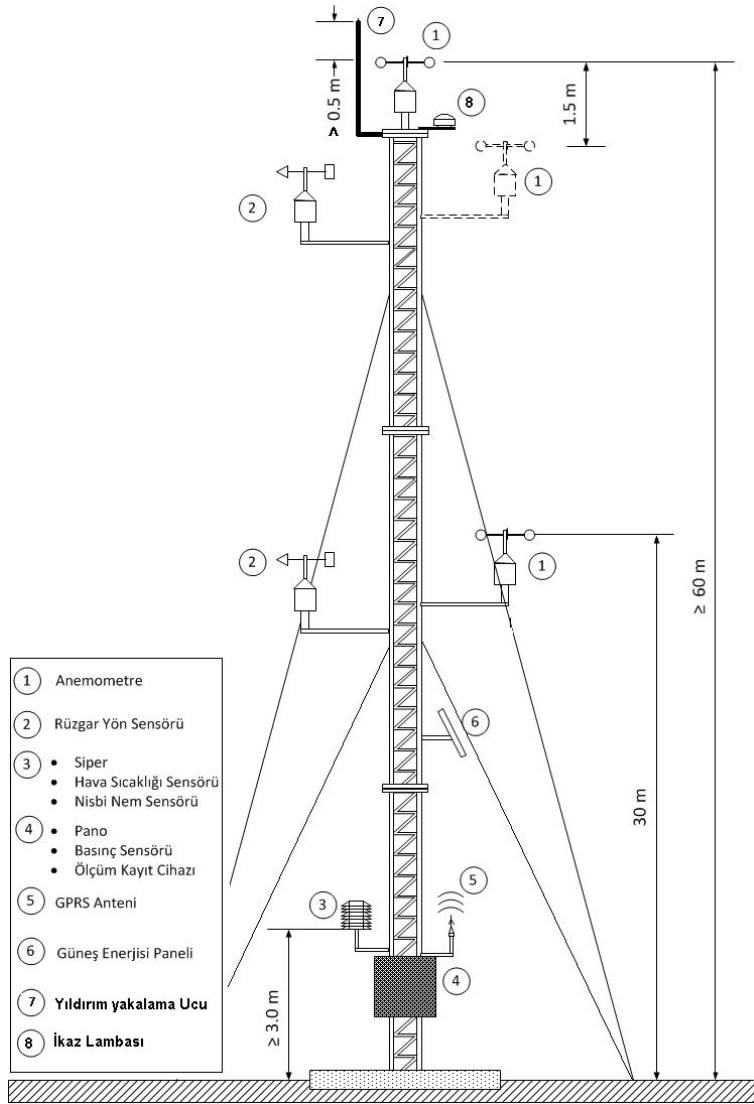
Şekil 2.27. Anemometre çeşitleri (Oral ve diğerleri, 2011)

Kızgın telli anemometreler, kullanılan malzemenin direnç katsayısına bağlı olarak ısınması ve ardında rüzgarla soğumasına göre ölçüm yapmaktadır. Şekil 2.28'de, LIDAR anemometreler, lazer ışığı ile uzaktan algılama mantığı ile çalışır. Gönderilen lazer ışığının havada bulunan partiküller sayesinde yansır ve bu yansıma oranına göre rüzgar hızını ölçmüş olur. (Işıklı ve diğerleri, 2023; Türüdü, 2021).



Şekil 2.28. Doppler rüzgar LIDAR'ı çalışma prensibi (Işıklı ve diğerleri, 2023)

Rüzgar türbinin kurulacağı yerin özelliğine göre bir veya daha fazla ölçüm noktası oluşturulabilir. Ölçüm direkleri, ölçüm yapılacak yerin özelliğine göre yükseklikleri değişebilir. Bu noktada farklı yükseklikler belirtilse de büyük güçteki rüzgar türbinin kurulacak alanda ölçüm yapılacaksa ölçüm cihazları en az türbin direklerinin 2/3 yüksekliğinde olmalıdır. Ölçüm direklerine birden fazla anemometre yerleştirilir. Bunun nedeni bozulan anemometreler olursa veri kaybı olmasın diye farklı noktalara yerleştirilir. Her zaman bir tane anemometre ölçüm direğinin en üstüne bir tane de buna yakın ama daha aşağı ve diğerleri de belirli aralıklarla yerleştirilir. Ölçüm direkleri boru ve kafes biçimde olmak üzere iki tipte yapılır ve ölçüm cihazlarını korumak için mutlaka paratoner kurulmalıdır. Şekil 2.29'da ölçüm direği üzerindeki veri sağlayıcıların temsili gösterimi yer almaktadır (Altınsoy, 2013).



Şekil 2.29. Rüzgar ölçüm istasyonu tematik gösterimi

2.4. Rüzgar enerjisi potansiyelinin hesaplanması

Rüzgar enerjisi potansiyelinin hesaplanabilmesi için öncelikle rüzgar hızı (m/s) ve hava yoğunluğu (kg/m^3) gibi temel parametrelerin bilinmesi gerekmektedir. Rüzgar, havanın yatay hareketiyle oluşur ve bu hareketin iki temel özelliği vardır; kütleye sahip olması ve bir hızının bulunması. Bu iki özellik sayesinde rüzgar, bünyesinde kinetik enerji barındırır. Dolayısıyla, rüzgar gücünü hesaplamak için kullanılan formülün temelini de kinetik enerji denklemi oluşturmaktadır.

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

E : Rüzgardaki kinetik enerji (j)

m : Havanın kütlesi (kg)

v : Rüzgar hızı (m/s)

Kinetik enerjide yer alan kütle Eşitlik-2’de belirtildiği gibi hacim ve yoğunluğun çarpımı ile elde ediliyor.

$$m = \rho V \quad (2)$$

V : Havanın hacmi (m^3)

ρ : Hava yoğunluğu (kg/m^3)

Kütle formülündeki hacim, alan ile dik yükseklik çarpımı ile elde edilmektedir. Bu durumda rüzgarın esme yönündeki dik alan ile rüzgarın esme yönündeki uzunluğun çarpımı bize Eşitlik-3’te hacmi verecektir.

$$V = AL \quad (3)$$

A : Rüzgarın esme yönündeki dik alan (m^2)

L : Rüzgarın esme yönündeki uzunluk (m)

Hacim formülünde yer alan uzunluk değişkenini yol (mesafe) eşitliği ile elde edilir. Rüzgarın sahip olduğu hız ve o yolu alırken geçen zamanın çarpımı ile elde edilir. Bağlantı Eşitlik-4’te verilmiştir.

$$L = vt \quad (4)$$

Buraya kadar, rüzgar gücünü elde etmek için kullanacağımız eşitliğin türetilmesinde kullanılan Eşitlikler verilmiştir. Eşitlik-4, Eşitlik-3’te yerine konulduğunda Eşitlik-5;

$$V = Avt \quad (5)$$

Eşitlik-5'i Eşitlik-2'de yerine koyduğumuzda Eşitlik-6;

$$m = \rho Avt \quad (6)$$

Eşitlik-6'yı Eşitlik-1'de yerine koyduğumuzda Eşitlik-7'yi elde etmiş oluruz.

$$E = \frac{1}{2} \rho A t v^3 \quad (7)$$

Rüzgarın anlık gücü de birim zamandaki enerji olarak Eşitlik-8 de ifade edilir.

$$P_r = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (8)$$

P_r : Rüzgarın anlık gücü (W)

Rüzgar gücünü etkileyen bir diğer parametre hava yoğunluğudur. Üretilen güç ile doğru orantılı olan hava yoğunluğunu hesaplamak için sıcaklık, nem ve basınç değerleri bilinmesi gerekmektedir.

$$\rho = \frac{PM}{RT} \quad (9)$$

P : Mutlak basınç (Pa)

M : Havanın molar kütlesi (kg/kmol)

T : Mutlak sıcaklık (kelvin)

R : Evrensel gaz sabiti (8,314 J/mol.K) (Bulut, 2022)

Deniz seviyesinde 15 °C sıcaklıkta 1 atmosfer basınç altında hava yoğunluğu 1,225 kg/m³'tür. Hava yoğunluğu yükseklik ve basınç değerleri ile ters orantılıdır. Yükseklik ve basınç arttıkça hava yoğunluğu azalacak, dolayısıyla rüzgardan elde edilecek güç

azalacaktır. Bu sebepten dolayı türbin kurulacak yerin hava yoğunluğu fizibilite çalışmaları için önemlidir. Hava yoğunluğunun rakım ile değişimi Çizelge 2.1’de, hava yoğunluğunu sıcaklık ile değişimi Çizelge 2.2’de listelenmektedir. Yetersiz veri durumlarında hesaplanamayan hava yoğunluklarını sıcaklık ve yükseklik gibi ulaşılması biraz daha kolay veriler sayesinde ilgili çizelgelerden bölgeye ait en yakın değer seçilebilmektedir (Altınsoy, 2013; Mamur ve Karayel, 2018).

Çizelge 2.1. Hava yoğunluğunun rakım ile değişimi

15° C’ de hava basıncının ve yoğunluğunun rakım ile olan değişimi Rakım (m)	Basıncı (atm)	Hava Yoğunluğu (kg/m ³)	Yükseklik Değişimi İçin Basıncı Oranı,
0	1,000	1,225	1,000
100	0,988	1,211	0,988
200	0,977	1,197	0,977
300	0,965	1,182	0,965
400	0,954	1,168	0,954
500	0,942	1,155	0,942
600	0,931	1,141	0,931
700	0,920	1,128	0,920
800	0,910	1,114	0,910
900	0,899	1,101	0,899
1000	0,888	1,088	0,888
1100	0,878	1,075	0,878
1200	0,867	1,063	0,867
1300	0,857	1,050	0,857
1400	0,847	1,038	0,847
1500	0,837	1,026	0,837
1600	0,827	1,014	0,827
1700	0,817	1,002	0,817
1800	0,808	0,990	0,808
1900	0,798	0,978	0,798
2000	0,789	0,967	0,789
2100	0,780	0,955	0,780

Çizelge 2.2. Hava yoğunluğunun sıcaklık ile değişimi

1 atm basıncı altında hava yoğunluğunun hava sıcaklığı ile değişimi Sıcaklık(°C)	Hava Yoğunluğu (kg/m ³)	Sıcaklık Değişimi İçin Yoğunluk Oranı,
-21	1,400	1,143
-18	1,384	1,130
-15	1,368	1,116
-12	1,352	1,104
-9	1,337	1,091
-6	1,322	1,079
-3	1,307	1,067
0	1,293	1,055
3	1,278	1,044
6	1,265	1,032
9	1,251	1,021
12	1,238	1,011
15	1,225	1,000
18	1,213	0,990
21	1,200	0,980
24	1,188	0,970
27	1,176	0,960
30	1,165	0,951
33	1,153	0,941
36	1,142	0,932
39	1,131	0,923
42	1,120	0,915

Bir türbinden ne kadar elektrik üretileceğini rüzgarın anlık gücü ve türbin güç katsayısının çarpımı ile hesaplanır.

$$P_r = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \quad (10)$$

C_p : Rüzgar türbininin güç katsayısı (Li, Chen, Li and Lee, 2013)

Bir bölgenin geçmiş yıllara ait rüzgar hızı verilerinin bilinmesi, o bölgenin gelecekteki rüzgar potansiyelini tahmin etmek için önemli bir avantaj sağlamaktadır. Bunun için belirli bir zaman diliminde toplanan rüzgar verilerinin, rüzgar hızı dağılımı veya frekans dağılımı yöntemiyle değerlendirilmesi gerekir. Bu değerlendirme sürecinde olasılık yoğunluk fonksiyonları devreye girer ve rüzgar hızının belirli bir aralıkta görülme olasılığı hesaplanır

(Sayılmaz, 2019; Şan, 2018). Bu hesaplamalarda birçok farklı olasılık yoğunluk fonksiyonu kullanılabilir. Ancak esnek yapısı, rüzgar dağılımına olan yüksek uyumu, az parametreye dayanması ve istenilen yüksekliklere kolayca uyarlanabilmesi sayesinde, en çok tercih edilen fonksiyon Weibull fonksiyonudur (Şan, 2018; Yaniktepe, Koroğlu ve Savrun, 2013; A. H. Yazar, 2013). Weibull dağılım fonksiyonu Eşitlik-11 de verilmiştir.

$$f_{(v)} = \frac{k}{c} \left(\frac{v-a}{c} \right)^{k-1} e^{\left[-\left(\frac{v-a}{c} \right)^k \right]} \quad (11)$$

$f_{(v)}$: Gözlenen rüzgar hızı v 'nin olasılığı

v : Rüzgar hızı

c : Rüzgar hızı için bağıl birikmiş frekans değişkeni (ölçek parametresi)

k : Rüzgar hızı dağılım şeklini gösteren değişken (şekil parametresi)

a : Konum değişkeni

Rüzgar enerjisi potansiyelinin değerlendirilmesinde, türbinin belirli bir yükseklikte konumlandırılacağı varsayıldığından, konum değişkeni sabit kabul edilmekte ve bu nedenle hesaplamalarda dikkate alınmamaktadır (Bulut, 2022). Bu nedenden dolayı birçok kaynakta Weibull dağılım fonksiyonu iki değişkenli olarak karşımıza çıkmaktadır. İki değişkenli Weibull değişkeni Eşitlik-12'de verilmiştir (Buyruk, 2019; Mamur ve diğerleri, 2017; Mamur ve Karayel, 2018; Shoaib, Siddiqui, Amir and Rehman, 2017; Shu, Li and Chan, 2015; Wais, 2017; Yaniktepe ve diğerleri, 2013).

$$f_{(v)} = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} e^{\left[-\left(\frac{v}{c} \right)^k \right]} \quad (12)$$

Rüzgar hızının, belirli bir v değerine eşit ya da küçük olma durumunu Weibull kümülatif dağılım fonksiyonu ile ifade edilir. Weibull olasılık fonksiyonunun birikimli dağılım fonksiyonu aşağıdaki Eşitlik-13'te verilmiştir (Köse, 2018).

$$F_{(v)} = 1 - e^{\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (13)$$

Weibull dağılım fonksiyonundaki ölçek parametresi c değeri, bölgenin rüzgar hızına bağlı değişmektedir. Yani rüzgar hızının bir birimindeki referans değerinin ifade etmektedir. Buradan da anlaşılıyor ki c değerinin artması potansiyel değerlendirmesinin değerinin artması anlamına gelmektedir (Bulut, 2022; Sayılmaz, 2019; Yazar, 2013).

Weibull dağılım fonksiyonunun diğer bir parametresi k , boyutsuz ve şekil parametresi olarak ifade edilir. 1 ile 10 arasında değer alan k parametresi rüzgar hızı dağılımının genişliğini ve bir bölgenin rüzgar dağılımı tepesini gösterir. Diğer bir değişle dağılımın ne kadar sivri olduğunu gösterir (Mohammadi, Alavi, Mostafaeipour, Goudarzi, and Jalilvand, 2016; Sayılmaz, 2019; Shu ve diğerleri, 2015; Wais, 2017).

Weibull dağılım fonksiyonundaki şekil parametresinin 2 olma durumu özel bir durum oluşturur ve bu durumda Rayleigh dağılım fonksiyonu kullanılır. Rayleigh dağılım fonksiyonu Eşitlik-14'te, kümülatif dağılım fonksiyonu ise Eşitlik-15'te ifade edilmiştir (Kurban, Hocaoglu ve Kantar, 2007).

$$f_R(v) = \left(\frac{2v}{c^2}\right) e^{\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^2\right]} \quad (14)$$

$$F_R(v) = 1 - e^{\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^2\right]} \quad (15)$$

Weibull dağılım parametrelerini hesaplamak için kullanılan birden fazla yöntem mevcuttur. Bölgeye göre farklılık göstermekle beraber düşük rüzgar rejimine sahip uygulamalarda Maximum Likelihood Estimation (MLE) kullanılmaktadır. Bu yöntem, gözlemlenen verilerin, belirli bir dağılıma ait olduğunu varsayarak, bu dağılıma ait parametrelerin veriyi en yüksek olasılıkla üretmesini sağlayan değerlerini bulmayı amaçlar. En çok olabilirlik bağıntısı Eşitlik-16'da verilmiştir.

$$L(c, k | v_1, \dots, v_n) = \prod_{i=1}^n f(v_i; c, k) \quad (16)$$

Türbinden anlık üretilen enerji miktarını Eşitlik-17’de verilmiştir (Şan, 2018).

$$E_T = \frac{1}{2} \rho_h A t v^3 C_p n_T \quad (17)$$

ρ_h : Havanın yoğunluğu (kg/m^3)

A: Rotorun Süpürme Alanı (m^2)

v : Türbinin göbek yüksekliğindeki rüzgar hızı (m/s)

t: Zaman (s)

C_p : Türbinin güç katsayısı

n_T : Türbinin verimi (Jeneratör, dişli kutusu ve kuplaj verimleri)

Belirli bir zaman aralığında türbinden üretilen enerji miktarı Eşitlik-18’de verilmiştir. (Altınsoy, 2013; Kurban ve diğerleri, 2007; Şan, 2018).

$$E_T = t \int_{v_{min}}^{v_{max}} P_T(v) f(v) dv \quad (18)$$

E_T : Belirlenen zaman aralığındaki enerji miktarı

V_{min} : Rüzgar türbinin elektrik üretmeye başladığı rüzgar hızı

V_{max} : Rüzgar türbininin elektrik enerjisi üretimini emniyet içi sonlandırdığı rüzgar hızı

t: Belirtilen zaman aralığı

$f(v)$: Rüzgar şiddetinin olasılık yoğunluğu

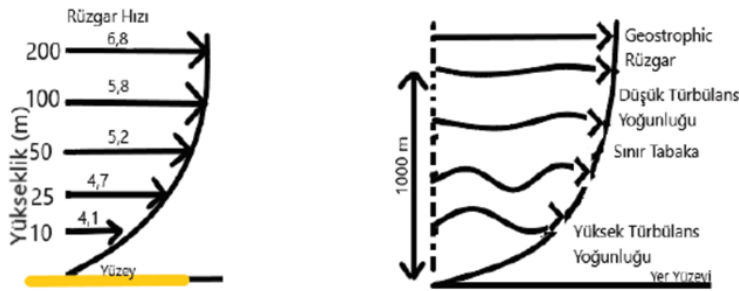
P_T : Türbinden üretilecek güç

Rüzgar hızının istenilen yüksekliklere taşınması için yüzey pürüzlülük konusu ayrıca ele alınmıştır.

Üretilen rüzgar enerjisi, rüzgar hızının küpü ile doğru orantılı olduğundan rüzgar hızında meydana gelen en ufak değişiklik dahi dikkate alınmalıdır (Güzel, 2012). Rüzgar enerjisinin elde edilmesinin ana faktörü rüzgar hızının yeterli seviyede olmasıdır. Bu kapsamda rüzgar hızını etkileyen unsurların belirlenmesi ve rüzgar hızı üzerinde ne gibi etkiye sahip olduğu belirlenmelidir.

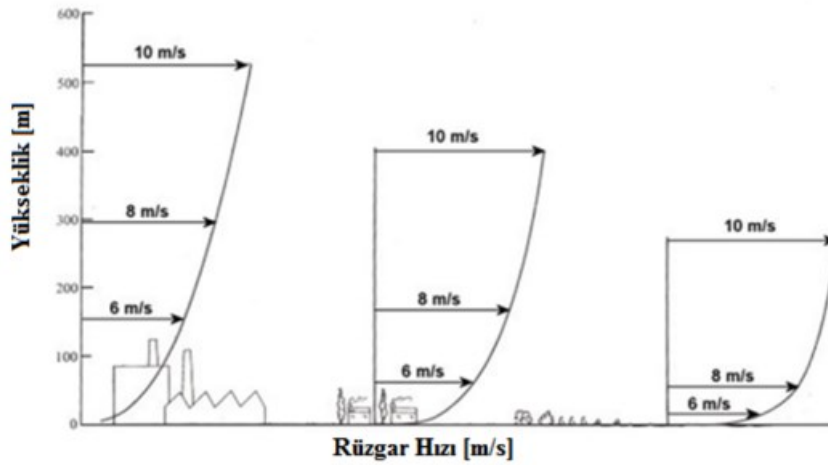
Rüzgar hızı temasta bulunduğu her nesneden etkilenmekte ve rüzgar profili üzerinde olumsuz etkiler bırakmaktadır. Rüzgar türbinlerinin kurulacağı yerler göz önüne alındığında rüzgarın çevresinde bulunan topografik yapı veya insan ürünü yapılar rüzgar üzerinde etkiye sahiptir. Verimli bir enerji üretimi sağlanabilmesi için türbin çevresinin düz ve pürüzsüz olması yani rüzgarı olumsuz olarak etkileyecek herhangi bir unsurun olmaması beklenmektedir.

Yeryüzünde rüzgar hızı sıfır iken yükseklik arttıkça yeryüzü şekillerinin yapısına bağlı olarak rüzgar hızı artmaktadır (Bektaş, 2013; Güzel, 2012). Şekil 2.30'da ifade edildiği gibi, rüzgar hızının artışı yeryüzü şekillerine bağlı olarak sınır tabakasına ulaşınca kadar logaritmik olarak artış sürer (Ertan, 2022).



Şekil 2.30. Rüzgar hız profiline yükseklikle değişimi (Ertan, 2022)

Rüzgar, su yüzeyleri, bitki örtüleri, ormanlık alanları ve yerleşim alanları gibi farklı yüzey özelliklerinden farklı oranlarda etkilenmektedir. Şekil 2.31'de de görüldüğü gibi, farklı yüzey özelliklerine sahip alanlarda yüksekliğe bağlı olarak rüzgar hızı değişmektedir. Yüzey pürüzlülüğünün az olduğu alanlarda, yere yakın bölgelerde rüzgar hızı daha yüksek olurken, pürüzlü yüzeylerde bu hızın düştüğü görülmektedir (Güzel, 2012).



Şekil 2.31. Rüzgar hızının farklı yüzeylerde yükseklik ve hız değişimi

Yüzey şekillerinin pürüzlülük değerleri pürüzlülük uzunluğu (m) olarak ifade edilmekte ve z_0 ile gösterilmektedir. Bir bölgenin pürüzlülük değeri, o bölge içerisindeki pürüzlülük oluşturan unsurların yüksekliği, dikey kesit alanı ve arazi üzerindeki yatay kesit alanı ile hesaplanmaktadır (Durak ve Özer, 2008).

$$z_0 = 0.5 \left(\frac{hS}{A_H} \right) \quad (19)$$

h : Pürüzlülüğe neden olan eleman yüksekliği

S : Rüzgara karşı dikey kesit alanı

A_H : Arazi üzerine dağılmış yatay kesit alanı

Pürüzlülük uzunluğu ve değerleri birçok kaynakta farklı değer aralıkları ile ifade edilmiştir (Bañuelos-Ruedas, Angeles-Camacho and Rios-Marcuello, 2010; Bektaş, 2013; Bulut, 2022; Djohra, Koussa and Seddik, 2014; Güzel, 2012; Şan, 2018). Bu durumun nedenleri, her bölgenin kendine ait özellikleri barındırması ve yapılacak hesaplamaların hassasiyeti olarak söylenebilir. Şöyle ki, rüzgar haritası gibi geneli ilgilendiren çalışmalarda sınıflandırmalar az ama sınıflandırmalara karşılık gelen değer aralığı geniş alınırken lokal bir bölge için daha fazla sınıflandırmaya ve dar değerler aralığı seçilmektedir. Literatürde kabul görmüş ve araştırmacıların en fazla kullandığı pürüzlülük sınıflandırması ve

pürüzlülük uzunlukları Çizelge 2.3, 2.4 ve 2.5'te verilmiştir. Yapılacak çalışmanın yapısına ve özelliğine göre seçim yapılmaktadır (Bañuelos-Ruedas ve diğerleri, 2010).

Çizelge 2.3. Farklı arazi tipleri için pürüzlülük uzunlukları 1

Pürüzlülük sınıfı	Tanım	Pürüzlülük uzunluğu, z (m)
0	Su yüzeyi	0,0002
1	Birkaç rüzgar kırıcıyla noktalanmış açık alanlar	0,03
2	1 km'den daha uzak mesafelerde bazı rüzgar kırıcılarla noktalanmış tarım arazileri	0,1
3	Çok sayıda rüzgar kırıcıya sahip kentsel bölgeler ve tarım arazileri	0,4
4	Yoğun nüfuslu kentsel veya ormanlık alanlar	1,6

Çizelge 2.4. Farklı arazi tipleri için pürüzlülük uzunlukları 2

Bölgenin özellikleri	z_0 (mm)
Çok yumuşak; buz veya çamur	0,01
Sakin açık denizler	0,20
Dalgalı yüksek denizler	0,50
Kar Yüzeyi	3,00
Çayır ve yeşil alanlar	8,00
Mera alanları	10,00
Ekilebilir arazi	30,00
Yıllık mahsuller	50,00
Seyrek ağaçlar	100,00
Yoğun ormanlık alanlar ve az sayıda bina	250,00
Büyük ağaçlarla kaplı ormanlık alan	500,00
Şehir dışı	1500,00
Çok sayıda yüksek binanın bulunduğu şehir merkezleri	3000,00

Çizelge 2.5. Farklı arazi tipleri için pürüzlülük uzunlukları 3

Pürüzlülük sınıfı	Pürüzlülük uzunluğu (m)	Manzara türü
0	0,0002	Su yüzeyi.
0,5	0,0024	Tamamen açık, düzgün yüzeyli zeminler, örneğin havaalanlarındaki beton pistler, biçilmiş çayırlar, vb.
1	0,03	Çit ve çalılık olmayan, çok dağınık binalar bulunan açık tarım alanları. Sadece yumuşak bir şekilde yuvarlatılmış tepeler.
1.5	0,055	Yaklaşık 1250 m mesafede bazı evlerin bulunduğu tarım arazileri ve 8 m yüksekliğinde çitler bulunmaktadır .
2	0,1	Yaklaşık 500 metre mesafede bazı evlerin bulunduğu tarım arazileri ve 8 metre yüksekliğinde çitler bulunmaktadır .
2.5	0,2	Çok sayıda ev, çalı ve bitkinin bulunduğu, ya da yaklaşık 250 m. uzunluğunda, 8 m. yüksekliğinde çitlerle korunan tarım arazisi.
3	0,4	Köyler, mezralar ve küçük kasabalar, çok sayıda veya yüksek çitlerle çevrili tarım arazileri, ormanlık alanlar ve çok engebeli ve engebeli araziler
3.5	0,8	Yüksek binalarla dolu büyük şehirler.
4	1,6	Yüksek binalar ve gökdelenlerle dolu çok büyük şehirler.

Yüzey pürüzlülük değeri, rüzgar hızını ölçüm yüksekliğinden türbin yüksekliğine taşınmasında kullanılmaktadır. Tanımlanan z_0 değeri, “logaritmik rüzgar yasası” veya “Wortman’ın rüzgar yasası” olarak bilinen Eşitlik-20 kullanılarak dikeydeki rüzgar hızı değişiminin hesaplanmasında kullanılmaktadır (Bañuelos-Ruedas ve diğerleri, 2010; Dabbaghiyan, Fazelpour, Abnavi, and Rosen, 2016; Djohra ve diğerleri, 2014; Durak ve Özer, 2008; Güzel, 2012).

$$\frac{v_{H_1}}{v_{H_0}} = \frac{\ln(H_0 - d / z_0)}{\ln(H_1 - d / z_0)} \quad (20)$$

H_0 : Rüzgar hızının ölçüldüğü yükseklik (m)

H_1 : Rüzgar hızının hesaplanması istenen yükseklik (m)

v_{H_0} : H_0 yüksekliğinde ölçülen rüzgar hızı (m/s)

v_{H_1} : H_1 yüksekliği için hesaplanacak rüzgar hızı (m/s)

d : Sıfır düzlemi yer değiştirme yüksekliği (m)

Rüzgar hızı, ölçülen yükseklikten istenilen yüksekliğe taşınmasında kullanılan birçok yöntem kullanılmaktadır. Mühendislik çalışmaların da kullanılan hesaplamalarının hata oranı düşük olması, kullanışlı olması ve elde etmek istediğimiz sonuca bizi ulaştırması beklenmektedir. Bu nedenden dolayı belirlenen bir yükseklikteki rüzgar hızını başka bir yüksekliğe taşımak için kullanılan, “hellmann yükseltme bağıntısı (Özdamar, Ulgen ve Kara, 2021)” veya “güç kanunu (Şan, 2018)” veya “rüzgar gücü yasası (Dabbaghiyan ve diğerleri, 2016)” veya α değeri 1/7’ye eşit olduğunda “kuvvet yasası” olarak adlandırılan bir diğer eşitlik, Eşitlik-21’de verilmiştir.

$$\frac{v_{H_1}}{v_{H_0}} = \left(\frac{H_1}{H_0} \right)^\alpha \quad (21)$$

v_{H_1} : H_1 yüksekliği için hesaplanacak rüzgar hızı (m/s)

v_{H_0} : H_0 yüksekliğinde ölçülen rüzgar hızı (m/s)

H_0 : Rüzgar hızının ölçüldüğü yükseklik (m)

H_1 : Rüzgar hızının hesaplanması istenen yükseklik (m)

α : Hellmann katsayısı (Arslan, Arıkan, Erten ve Çam, 2014; Bañuelos-Ruedas ve diğerleri, 2010; Bektaş, 2013; Çubukçu ve Özdamar, 2003; Dabbaghiyan ve diğerleri, 2016; Durak ve Özer, 2008; Ertan, 2022b; He, Chan, Li, Huang and Yim 2024; Kuzey Anadolu Kalkınma Ajansı [KUZKA], 2016; Şan, 2018)

Sonuç olarak, rüzgarın yüzeyle olan etkileşimi, yere yakın alanlarda rüzgar hızının ve dolayısıyla enerjisinin düşmesine ve rüzgar profilinin bozulmasına neden olmaktadır. Yere yakın bölgelerde rüzgar hızı düşükken, yükseklik arttıkça hız da artmakta, ancak belirli bir noktadan sonra bu artış sona ermektedir. Türbin yüksekliğinin, mümkün olduğunca rüzgar hızının artışının tamamlandığı noktaya ulaşması hedeflenir. Bu seviyeye ulaşamadığı durumlarda ise, türbinin yeryüzü şekillerinden minimum düzeyde etkilenmesi

beklenmektedir. Bu yüzden, türbin kurulacak bölgenin tanımlanabilmesi ve bölgenin rüzgar üzerindeki etkisinin ortaya konması için, yüzey pürüzlülük uzunluğunun (z_0) veya o bölgeye ait en uygun Hellmann katsayısının (α) belirlenmesi büyük önem taşımaktadır.

Kentsel ortamda, küçük güçlü rüzgar türbini kullanılarak yapılan akademik çalışmaları incelediğimizde, aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

Muğla Yatağan ilçesi TOKİ Tarımköy yerleşkesi seçilerek yapılmış çalışmada, 1,8 kWh'lik gücünde, 21,33 m direk yüksekliğinde, 3,72 m rotor çapına sahip Skystream 3.7 adlı türbini yerleşkede yer alan konutun bahçesine yerleştirmek üzere tasarlanmıştır. Çalışma simülasyon ortamında yürütülmüştür. Çalışma, TOKİ Tarımköy yerleşkesi ve dört farklı rüzgar bölgesi dikkate alınarak yürütülmüştür. Farklı rüzgar bölgelerine ayırırken REPA haritasından yararlanılmış olup, 1. rüzgar bölgesi (8-8,5 m/sn) Balıkesir/Bandırma ilçesi, 2. rüzgar bölgesi (7-7,5 m/sn) Mersin/Silifke ilçesi, 3. rüzgar bölgesi (5,5-6 m/sn) Muğla/Yatağan ilçesi, 4. rüzgar bölgesi (3,5-4 m/sn) Bolu/Gerede ilçesi olarak seçilmiş ve ısıtma, soğutma bir de aydınlatma için harcanan enerjinin ne kadarını karşıladığı tespit edilmiştir. Simülasyon sonucuna göre, ısıtma, soğutma ve aydınlatma için ihtiyaç olan enerjini 1. bölgede %100'ünü, 2. bölgede %100'ünü, 3. bölgede %80'ini ve 4. bölgede %10'nu karşıladığı sonucuna varılmıştır (Bektaş, 2013).

Rüzgar türbinin havalimanlarında kullanımı hassas bir konu olmasına rağmen East Midlands Havalimanında 250 kWh gücünde kurulan iki türbinin ürettiği enerji ile havalimanını elektrik ihtiyacının %6'sını karşılamıştır (Gençel ve Tarhan, 2020).

Karabük ilinin Ovacık ilçesi rüzgar verileri kullanılarak yapılan bir diğer çalışmada, 1 kWh gücünde, 9 m'lik direk yüksekliği ve 3 m rotor çapına sahip türbinin üreteceği enerji ve dört kişilik bir ailenin asgari olarak ihtiyaç duyulan enerjinin ne kadarını karşıladığını araştırmaktadır. 2021 yılında dört kişilik bir ailenin asgari elektrik tüketimi aylık 230 kWh, araştırma verilerine göre üretilen yıllık enerji miktarı 2734,8 kWh aylık ise 228 kWh sonucuna ulaşılmıştır. Yapılan çalışmaya göre kırsal bölgedeki bir evin elektrik ihtiyacını 1 kWh'lik rüzgar türbini ile karşılanabileceğini ortaya koymuştur (Özdemir, 2021).

(Örgen, 2017) çalışmasında teknolojinin gelişmesiyle birlikte üretilen rüzgar türbinlerinin de boyutları arttığını ve buna bağlı olarak rüzgar türbinlerinin kurulum yapılacak bölgeler

için yapılması gereken ölçümlerin de daha yüksek noktalarda yapılması durumu meydana geldiğini ifade etmiştir. Bu durumun ölçüm maliyetini dolayısıyla da yatırım maliyetini artıracığından, belirli bir yükseklikte ölçümü yapılan rüzgar hızını istenilen yüksekliklere taşımak için ve maliyeti azaltmak için ekstrapolasyon (yükseltme) yöntemlerini kullanılması gerektiğini ifade etmiştir. Bu kapsamda 6 farklı yükseltme yöntemi (birleştirilmiş güç kanunu, reed metodu, logaritmik güç kanunu, ekponansiyonel güç kanunu, Mikhail'in logaritmik metodu, Mikail ve Justun logaritmik metodu) kullanarak en ideal yöntemin hangisi olduğunu belirlemiş ve bir bölge için üç farklı rüzgar türbini (enercon E-53 (rotoçapı 52,9m, gücü 800 kW), LTW80 (rotor çapı 80,3 m, gücü 1000kW), EWT DW61 (rotor çapı 61 m, gücü 900kW)) ve 7 farklı yükseklikte (enercon E53 türbini 50m, 60m ve 73m, LTW80 türbini 65m ve 80 m, EWT DW61 türbini 77 m ve 100 m yükseklikte) hesaplamalarını yaparak hangi türbinin hangi yükseklikte kWh başına yatırım maliyetinin en düşük olduğu tespit etmiştir. Burdur'un Ağlasun ilçesi Başgoz tepesinde elde edilen 20 aylık veriler ile hesaplama yapılmış ve yükseltme yöntemleri arasında rüzgar hızlarının ± 1 m/s arasında değiştiği gözlenmiştir. Seçilen yükseltme yöntemiyle üretilen enerji ve maliyet karşılaştırması sonucunda, kWh başına 3,71 \$ maliyeti (hesaplamalar o günün şartlarına göre yapılmıştır) ile enercon E-53 türbini 50 m yükseklikte en ekonomik türbin yatırımı olduğu ortaya çıkmıştır. En yüksek enerji üretimi LTW-80 modeli türbin ile 80 m'de elde edilmesine rağmen üretim maliyeti hesaplamasında yatırım maliyeti en düşük çıkan enercon E-53 modelinin 50 m'de olduğu görülmektedir. Burada yapılan çalışmada türbin ve yükseklik seçiminin ne kadar önemli olduğunu vurgulamaktadır.

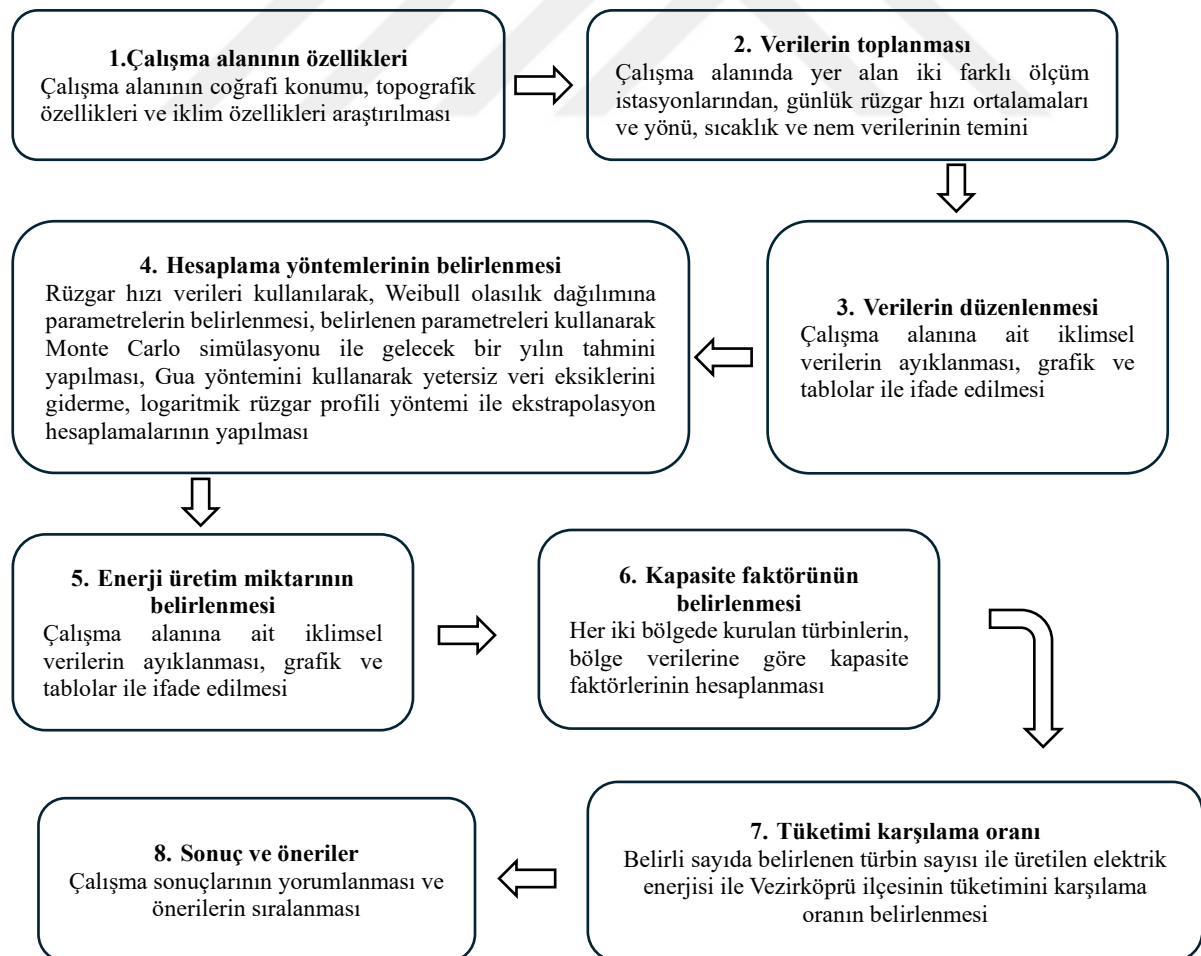
Yapılan çalışmalara ve projelere bakıldığında, çoğunlukla bir noktayı baz alarak ya da bir yapı özelinde rüzgar verilerinin hesaplandığı ve sonucunda ihtiyaç olunan enerjinin ne kadarının karşıladığı ortaya koymaktadır.

3. MATERİYAL VE YÖNTEM

Çalışmada ilk olarak bölgenin coğrafi ve iklimsel özellikleri araştırılmıştır. Ardından ölçüm istasyonlarından rüzgar hızı, yönü, sıcaklık ve nem verileri toplanmış, elde edilen veriler düzenlenerek tablolarla ifade edilmiştir.

Ardından, rüzgar hızına göre uygun dağılım parametreleri belirlenmiş ve dağılım parametreleri kullanılarak enerji üretimi hesaplamaları yapılmıştır. İki farklı türbin modeli için yıllık enerji üretim miktarı ve kapasite faktörleri ortaya konulmuş ve üretilen enerjinin ilçedeki tüketimi karşılama oranı değerlendirilmiştir. Son olarak çalışma bulguları yorumlanarak önerilere yer verilmiştir. Tez çalışmasının tamamlanmasında izlenen adımlar Çizelge 3.1’de detaylandırılmıştır.

Çizelge 3.1. Akış diyagramı



3.1. Vezirköprü İlçesi Karakteristik Özellikleri

Bu bölümde, Vezirköprü ilçesinin matematik konumu, coğrafi ve iklimsel özellikleri incelenmiştir. Ardında bölge için elde edilen veriler kullanılarak rüzgar hızı histogramı ve rüzgar gülü grafikleri oluşturulmuştur. Son olarak, bölge özelliğine göre türbin seçimine yönelik karşılaştırma yapılmıştır.

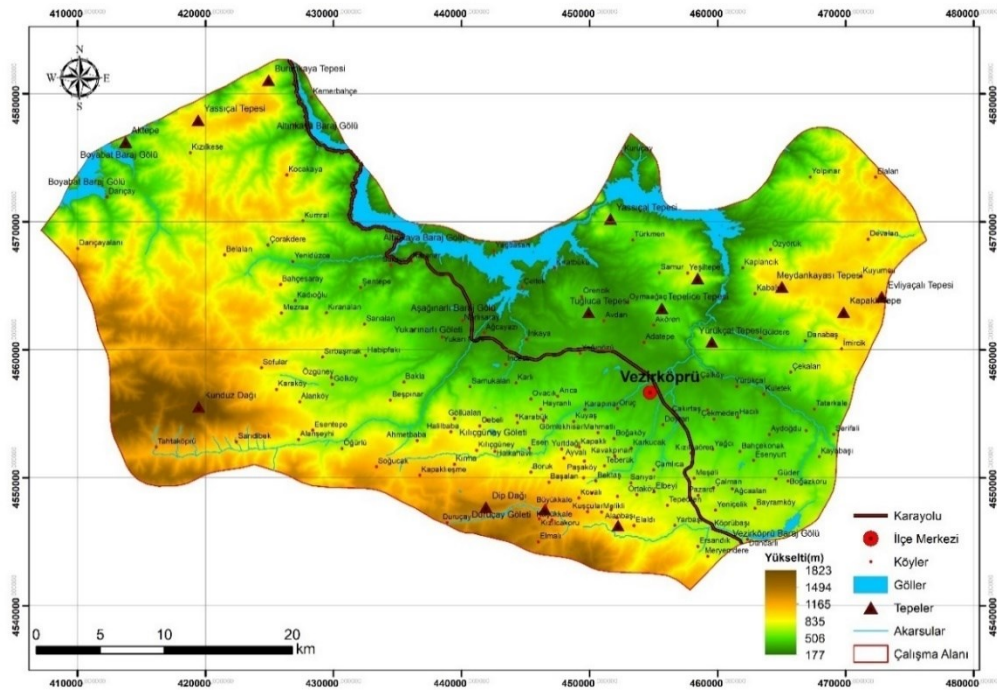
3.1.1. Vezirköprü ilçesinin coğrafi ve iklimsel özellikleri

Vezirköprü, Türkiye'nin Orta Karadeniz bölgesinde yer alan Samsun ilinin bir ilçesidir. Samsun il merkezine 110 km uzaklığı olan Vezirköprü il merkezinin güneybatısında ve $35^{\circ} 01' - 35^{\circ} 48'$ doğu boylamları ile $41^{\circ} 00' - 41^{\circ} 19'$ kuzey enlemleri arasında yer almaktadır. 2023 yılı verilerine göre 90.388 nüfuslu ilçenin denize kıyısı olmamakla birlikte doğusunda Samsun'un Havza ilçesi, batısında Sinop'un Saraydüzü ilçesi, kuzeyinde Samsun'un Alaçam ve Sinop'un Durağan ilçeleri, güneyinde Amasya'nın Gümüşhacıköy ve Merzifon ilçeleri, güneybatısında Çorum'un Osmancık ilçesi ve kuzeydoğusunda Samsun'un Bafra ilçesi yer almaktadır (Vezirköprü Ticaret ve Sanayi Odası, 2025). Vezirköprü lokasyon haritası Şekil 3.1'de verilmiştir.



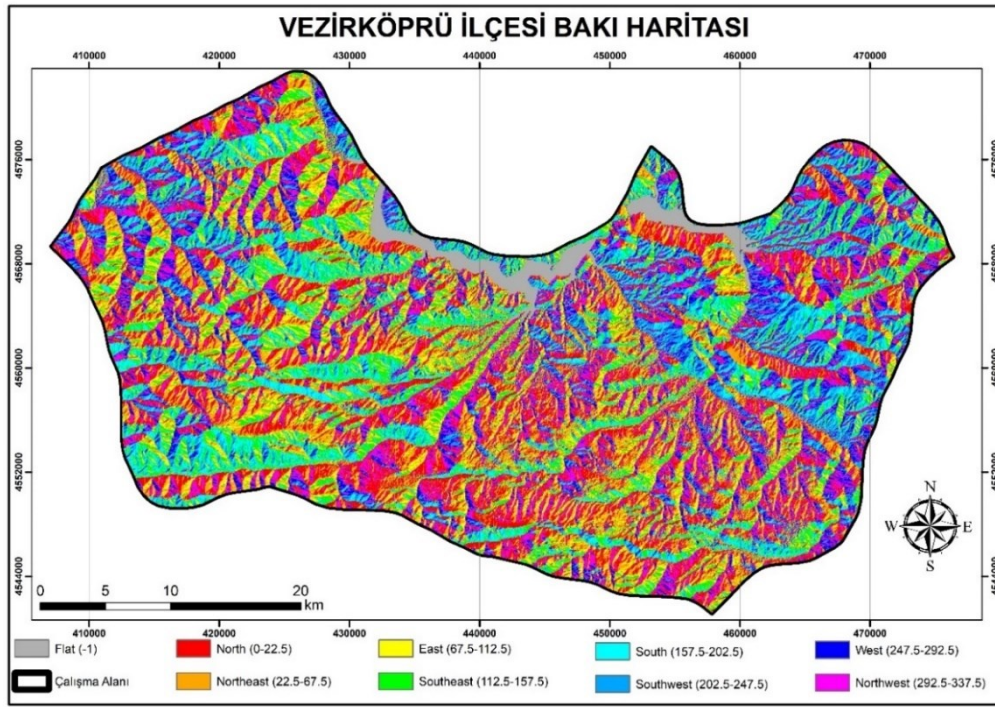
Şekil 3.1. Vezirköprü lokasyon haritası

Vezirköprü ilçesi 1713 km²'lik yüz ölçümü ile Samsun'un en büyük yüzeye sahip ilçesidir. İlçenin merkez rakımı 340 m ve çevresini çevreleyen dağlar sayesinde bir çanak şeklinde ova yapısına sahiptir. İlçenin kuzeyinde Bafra ilçesi ile arasında doğal sınır haline gelmiş Dedem Tepesi, Hamurcu Tepesi, Yund Dağı, Sıralı Dağı şeklinde sıralanan Kuzey Anadolu Dağlarını oluşturan tepeler yer almaktadır. İlçenin kuzeyinde Merzifon ilçesi ile doğal sınır oluşturan Tavşan Dağı, Kunduz Dağı, Dip Dağı, yer alırken batısında Gönülkaşı tepesi, Eğrikale tepesi, Küresirtı tepe, Asarcık tepe ve Çalıkayası tepesi yer almaktadır (Çoban, 2013). Vezirköprü fiziki haritası Şekil 3.2'de verilmiştir.



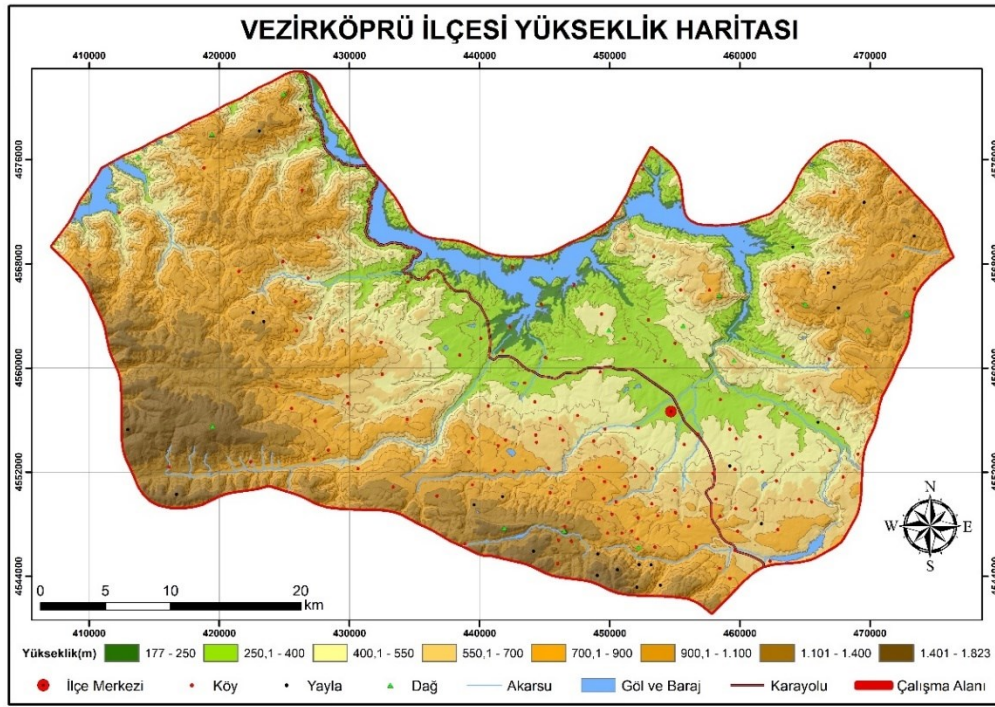
Şekil 3.2. Vezirköprü Fiziki Haritası

İlçenin kuzeyinde ve güneyinde yer alan tepelerin yükseklik farkının olması (güney tepeler daha yüksek) kuzeyindeki tepelerin ardı ılıman iklim etkisi ve güneyde yer alan tepelerin ardı ise karasallık etkisi görülmektedir. Kuzey ve güney yükseltilerde kışın yağışlı sıcaklık ise güneyde soğuk kuzeyde soğuk veya serin seyretmektedir. Yazın güneyde ve kuzeyde yağışlı veya az yağışlı seyrederken sıcaklık ise güneyde serin, kuzeyde sıcak seyretmektedir (Kor, 2010). Vezirköprü güneşlenme haritası, Şekil 3.3'te verilmiştir.



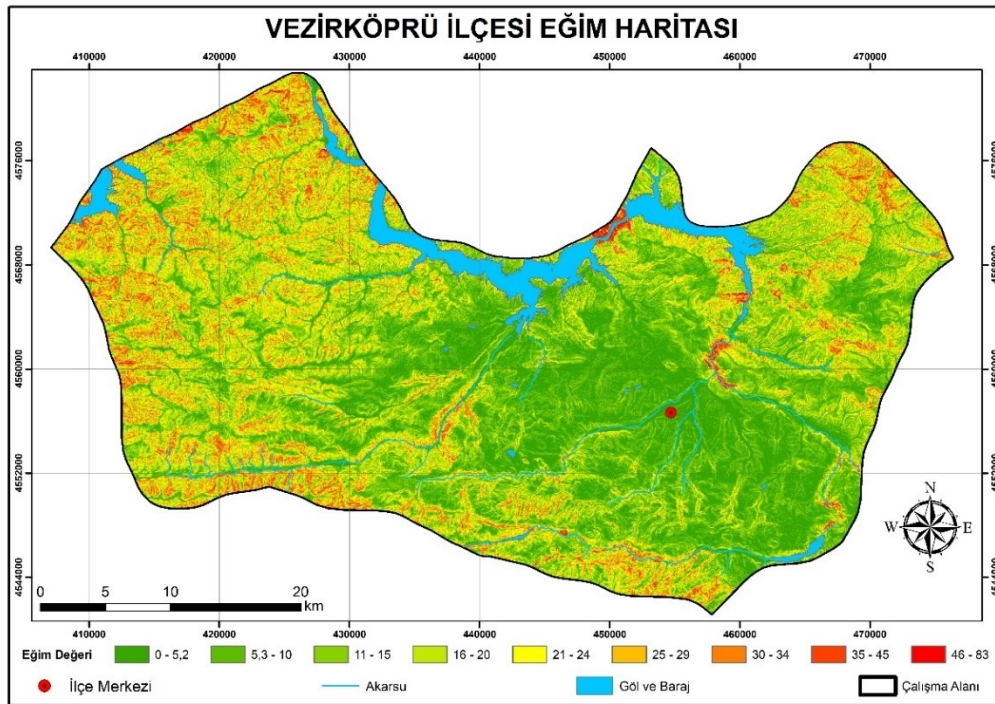
Şekil 3.3. Vezirköprü baki haritası

İlçenin 550-850 m'lik yükseltilerindeki iklim durumu tepelere göre sıcaklığının düşük, alçalara göre sıcaklığının yüksek olduğu bir geçiş iklim özelliği göstermektedir. Vezirköprü ovasını etrafını çevreleyen kuzey dağların ardı karadeniz iklimi güneyindeki dağların ardı karasal iklim göstermesine bağlı olarak rüzgarın esme yönü üzerine etki göstermesi ihtimaldir. Bu kapsamda, 1713 km²'lik çanak şeklindeki Vezirköprü ovasında sıcaklık değişimlerinin belirginliği farklı basınç bölgeleri ve dolayısıyla belirgin rüzgar varlığına işaret edebilmektedir. Rüzgarın esme sıklığına göre sırasıyla doğu, batı, kuzey ve kuzeydoğu yönünden almaktadır. (Kor, 2010).



Şekil 3.4. Vezirköprü yükseklik haritası

Vezirköprü yükseklik (Şekil 3.4) ve eğim (Şekil 3.5) haritası birlikte incelendiğinde, yüksekliğin 177-700 m arasında eğim 0-10 değeri arasında seyrettiği görülmektedir.



Şekil 3.5. Vezirköprü eğim haritası

3.1.2. Meteorolojik veriler

Vezirköprü ilçesinde iki farklı noktada ölçüm istasyonu bulunmaktadır. Bir tanesi ilçe merkezinde $41^{\circ}08'12.2''$ N $35^{\circ}28'08.8''$ E koordinatlarında ve 18134 numaralı istasyon, bir diğeri ise $41^{\circ}10'45.8''$ N $35^{\circ}09'22.1''$ E koordinatlarında ve 19038 numaralı Gölköy orman sahasında yer almaktadır (Meteoroloji Genel Müdürlüğü [MGM], 2025). 18134 numaralı merkez istasyonu 342 m rakımda yer alırken, 19038 numaralı orman sahasındaki ölçüm istasyonunun rakımı 865 m de yer almaktadır.



Şekil 3.6. Vezirköprü ölçüm istasyonları (Google Earth Pro)

2018 ile 2022 yılları arasındaki rüzgar hızı veriler MGM temin edilmiştir. 2018 İlçe merkezi günlük ortalama rüzgar hızları Çizelge 3.2’de ve orman sahası günlük ortalama rüzgar hızları Çizelge 3.3’te verilmiştir.

Çizelge 3.2. Vezirköprü merkez ölçüm istasyonu 2018 günlük ortalama rüzgar hızları

T.C.
ÇEVRE, ŞEHİRCİLİK VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ BAKANLIĞI
Meteoroloji Genel Müdürlüğü

Yıl: 2018 İstasyon Adı/No: VEZİRKÖPRÜ / 18134

Gün/Ay	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0,9	0,8	3	1,1	1,5	1,4	1,7	1,8	1,6	1,2	0,7	0,7
2	0,7	0,9	0,7	2,5	1,2	1,7	1,7	2,3	1,8	1,7	1	0,7
3	0,8	1,1	1,7	1,5	1,4	1,6	1,8	1,8	1,6	0,9	0,8	0,6
4	2,2		1,6	1,2	1,6	1,6	2,1	1,9	1,4	1,2	0,9	0,7
5	0,8		1,3	0,9	1,4	1,4	1,9	1,8	1,5	1,5	1	0,5
6	0,9		0,7	1,1	1,4	1,4	1,9	2	1,9	1,8	0,7	0,5
7	0,8	1	1,5	1,2	1,7	1,4	2,1	1,9	1,9	0,9	0,8	1,3
8	1,1	1,1	1,4	1,2	1	1,6	1,6	1,5	1,8	1,1	0,8	0,8
9	0,9	1,1	2	1,1	1,6	1,5	1,9	2,2	1,7	0,8	0,8	0,8
10	0,8	0,9	0,9	1,2	1,1	1,6	2	2,4	1,5	0,8	1	1,3
11	0,9	1,4	1	1,1	1,2	2,2	2	2,2	1,1	1	0,8	2,5
12	0,8	1,9	0,9	0,9	1,1	2,2	2,1	1,9	1,4	1,1	0,8	0,9
13	0,9	1	1,4	1,2	1,4	1,6	2,3	1,8	1,5	1,1	1,2	0,9
14	0,7	0,8	1,7	1,6	1,2	1,7	1,9	2,5	1,9	1,1	1,1	0,8
15	0,7	1,2	1,1	1,5	1,3	1,6	2,4	1,7	1,1	0,9	0,8	0,7
16	0,7	0,9	1,2	1,2	1,2	1,5	2	1,6	1,3	1	0,7	0,5
17	1	1,5	0,9	1,2	1,2	2	1,6	1,5	1,5	1	0,9	0,7
18	1,9	1,4	1	1,2	1,9	1,4	1,8	2,1	1,7	0,9	0,7	0,6
19	1,7	1,1	1,3	1,6	1,3	1,5	1,7	2,6	1,6	0,8	0,7	0,7
20	0,9	0,9	1,7	1,5	1,4	1,8	1,7	1,7	1,3	0,9	0,7	0,9
21	1,8	0,7	1,3	1,9	1,2	2,1	1,7	1,9	1,2	1,4	0,6	0,5
22	3,9	0,6	1,3	1,1	1	1,8	1,9	1,8	1,3	0,9	0,5	0,7
23	1,8	0,8	1,1	1,5	1,5	1,5	1,3	2	1,3	0,8	0,9	0,6
24	2,3	0,9	1,9	1,2	1,4	1,9	1,8	1,5	1,1	1,2	0,6	0,7
25	0,9	1,6	1,1	1,4	1,5	1,3	1,5	1,2	1,9	1,6	0,9	1,4
26	0,9	1,1	0,9	1,7	1,9	1,3	1,4	1,8	1,7	1,4	0,8	0,5
27	0,8	1,3	2,5	1,5	1,4	1,4	1,8	1,7	0,9	1	0,9	1,2
28	0,7	2		1,8	1,6	1,4	1,8	1,8	1	1	1	0,7
29	0,7			1,5	1,5	1,6	1,5	1,8	0,9	0,8	0,9	1,2
30	1		1,2	1,3	1,8	1,7	1,8	1,9	1,3	0,8	0,8	1
31	1,3		0,9		1,4		2	1,9		0,8		0,8

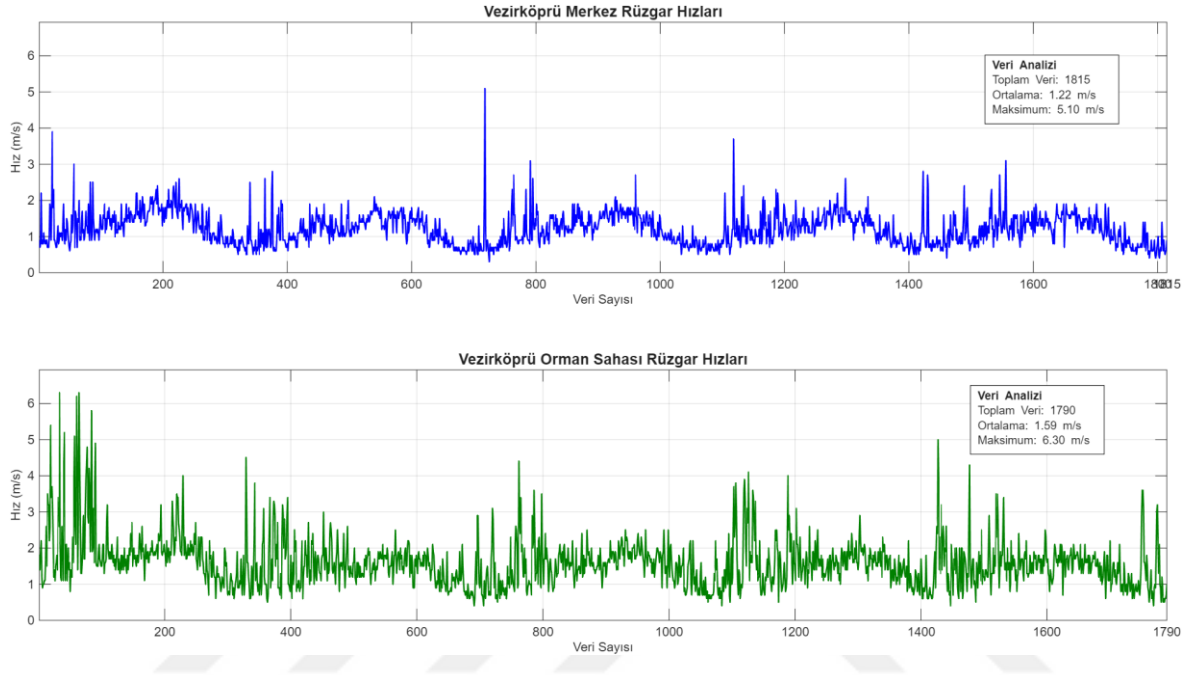
Çizelge 3.3. Vezirköprü orman sahası ölçüm istasyonu 2018 günlük ortalama rüzgar hızları

T.C.
ÇEVRE,ŞEHİRCİLİK VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ BAKANLIĞI
Meteoroloji Genel Müdürlüğü

Yıl: 2018 İstasyon Adı/No: VEZİRKÖPRÜ/GÖLKÖY ORMAN SAHASI / 19038

Gün/Ay	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1,8	1,4	2,6	3,8	1,8	1,8	2,2	2,3	1,9	1,7	0,7	1,2
2	1,4	3,4	2,1	4,9	1,5	2	1,9	3,3	2,1	1,8	1,1	1
3	1,8	2,6	6,2	1,6	1,7	1,7	1,8	2,8	2	1,2	1,3	0,6
4	2,2	6,3	4,6	1,5	1,4	1,8	1,8	2,5	1,8	1,2	1,1	0,6
5	1,2	2,1	1,4	1,5	1,6	1,6	1,9	1,8	1,9	1,7	1,1	0,7
6	0,9	1,2	2,8	1,5	1,9	1,5	1,8	1,9	2,4	1,9	0,7	1,5
7	1	1,1	6,3	1,9	2,3	1,8	1,9	2,3	2,1	1,3	0,9	1,3
8	1	2,6	4,4	2,1	1,4	1,8	2	2,2	2,7	1,2	0,6	0,7
9	1,1	1,9	3	1,7	1,7	1,6	2,1	3,5	1,7	1,2	0,8	1,4
10	1,1	1,1	1,3	1,6	1,5	1,9	1,7	3,4	1,6	0,6	1	2,3
11	1,6	4,4	1,3	1,5	1,3	2,4	2,4	3,4	1,4	1,1	1,1	3,8
12	2,6	5,2	1,6	1,5	1,6	2,1	2,2	2,7	1,8	1,5	1,3	1,1
13	1,5	1,1	2,2	1,7	1,8	1,9	2,2	2,5	2,3	1,2	1,9	1,5
14		2,1	2,9	2,1	1,4	1,7	2,4	2,3	2	1,3	0,9	1,6
15		2,1	1,7	2,1	1,8	2,6	3,2	1,9	1,5	1,2	0,9	1
16	3,5	1,1	1,7	1,3	1,7	1,9	1,9	1,9	2,3	1,2	0,9	0,8
17	3,2	1,6	3,1	1,6	1,4	2	1,8	1,8	2,3	1	1,1	1
18	3,2	2	3,9	1,6	2	1,7	1,9	3	2,3	0,8	1	0,7
19	2,2	1,4	4,3	1,7	1,5	1,1	1,9	4	1,7	0,9	1,7	1
20	2,6	1,6	4,8	2,8	1,7	1,7	2,1	2,6	1,6	1,2	1,1	1,5
21	5,4	0,8	2,9	3,2	1,4	2,1	1,9	1,8	1,3	1,1	0,7	0,7
22	3,4	1,4	2,7	2	1,3	1,7	1,8	2,3	1,3	1	1,1	1
23	3,7	1,3	4,2	1,8	1,8	1,8	1,5	2	1,2	0,9	1,8	2,1
24	3,2	1,2	3,5	1,7	1,4	1,9	2,2	1,7	1	2	0,7	2,2
25	2,3	2,3	1,9	1,9	1,7	1,6	1,6	1,7	1,9	1,9	1	3,1
26	1,2	1,6	3,4	1,7	2	1,6	1,8	1,9	1,4	1,5	1,5	1,2
27	1,4	4	5,8	1,7	1,8	1,9	2	2,1	1,3	1,6	4,5	1
28	1,1	5,1	1,9	2,1	2,4	1,8	1,8	1,8	1	1	3	1
29	1,5		2	1,9	1,9	2	1,6	2	0,7	0,7	1,6	1
30	1,6		3,1	1,6	2,7	1,9	1,9	1,8	2,2	0,8	1,6	0,6
31	1,8		1,6		1,5		1,8	2,2		0,8		0,5

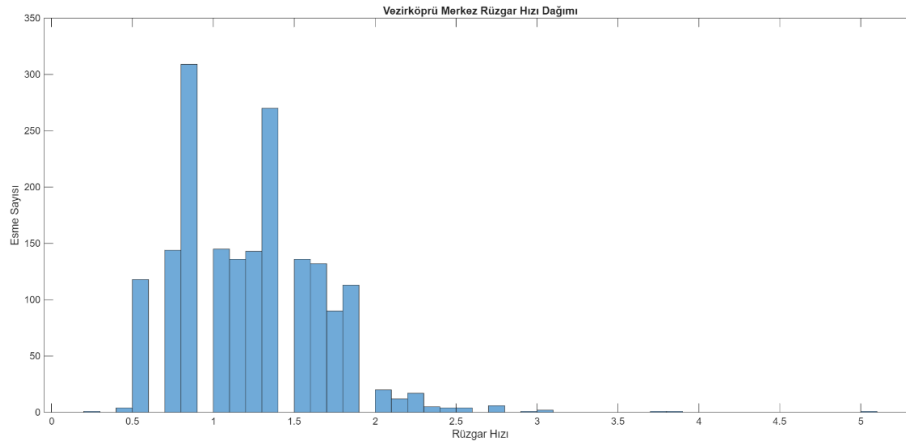
2018-2022 yılları arasında Vezirköprü ilçesinde bulunan merkez ve orman sahası istasyonlardan elde edilen verilerin sırasıyla rüzgar hızı ortalama grafiği Şekil 3.7’de verilmiştir.



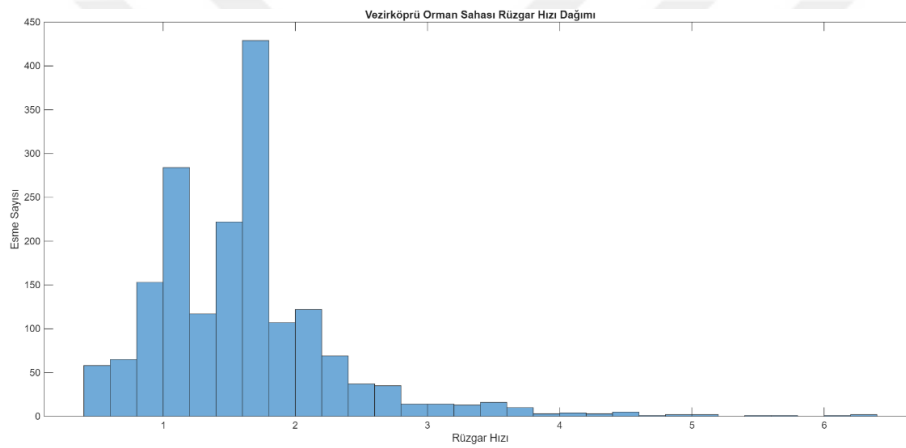
Şekil 3.7. 2018-2022 yılları Vezirköprü şehir içi ve orman sahası istasyonu rüzgar hızı ortalama grafiği

Çizelge 2.2 ve Çizelge 2.3’te elde edilen 2018 verileri ile Şekil 3.7’de verilen 5 yılın günlük ortalama grafik değerleri ölçüm direklerin bulunduğu 342 m ve 865 m rakım ve 10 m yüksekliğinde elde edilen değerlerdir. Şekil 3.6’da görüldüğü gibi merkezdeki ölçüm noktası binalar arasında ve orman sahasında ise ağaçlar arasında yer almaktadır. Ölçüm istasyonlarının etrafında rüzgarı olumsuz etkileyecek engellerin olması, rüzgar hızı ölçüm sonuçları üzerinde olumsuz etki oluşturmaktadır. Rüzgar hızını belirlemede veri kalitesini tartışılır hale getirmektedir.

Ölçüm istasyonlarından alınan verilere dayanarak 2018-2022 yılları arası alınan verilerin saatlik esme histogramı Şekil 3.8 ve Şekil 3.9’de, esme yönlerine göre rüzgar gülü grafikleri Şekil 3.10 ve Şekil 3.11’te gösterilmektedir.

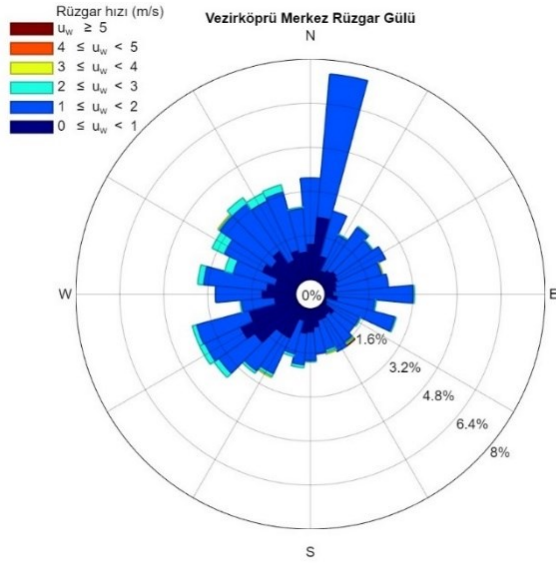


Şekil 3.8. Vezirköprü şehir içi rüzgar hızı histogramı

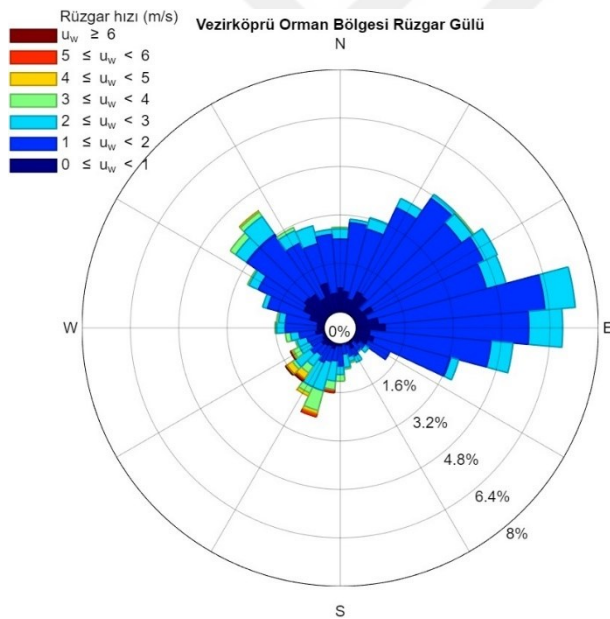


Şekil 3.9. Vezirköprü orman sahası rüzgar hızı histogramı

Merkez istasyonu rüzgar frekans grafiğinde, hakim rüzgar yönü kuzey olduğu görülmekle birlikte kuzeybatı, batı ve güney batı yönlerinde de esme sıklığı kuzey yönüne yakın seyretmektedir. Orman sahası rüzgar frekansında ise rüzgarın hakim esme yönü doğu olarak görülmektedir. Kuzeydoğu yönünden esen rüzgar esme sıklığı olarak doğuya en yakın yön olarak göze çarpmaktadır.



Şekil 3.10. Vezirköprü merkez istasyonu rüzgar frekans grafiği

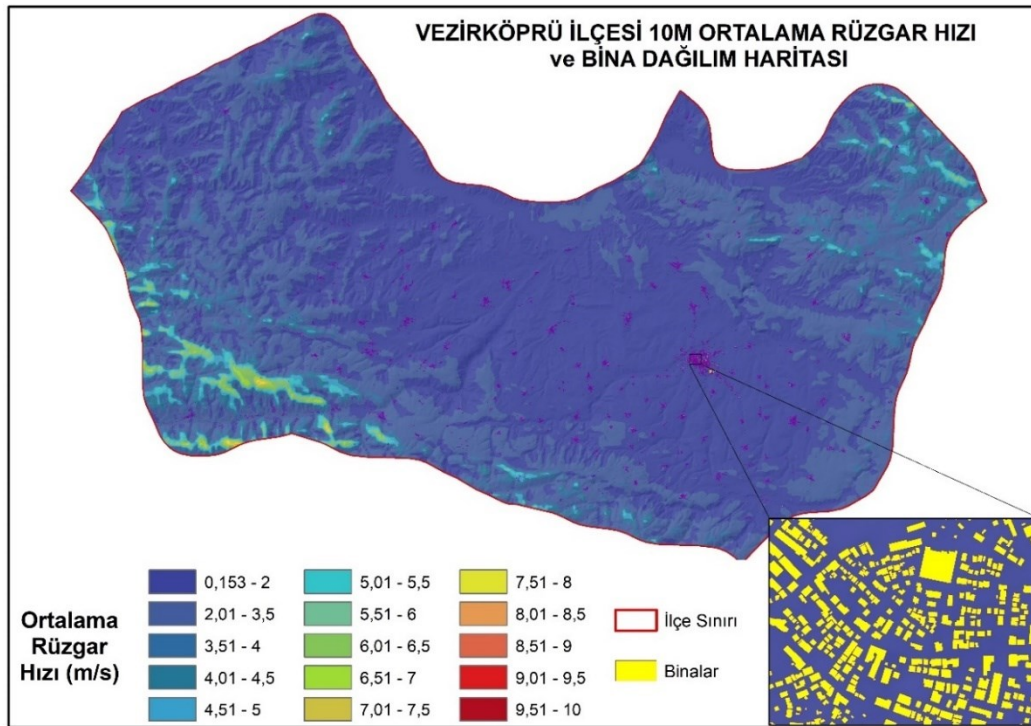


Şekil 3.11. Vezirköprü orman sahası istasyonu rüzgar frekans grafiği

Global Wind Atlas (GWA) kuruluşunun oluşturmuş olduğu farklı yüksekliklerde yıllık ortalama rüzgar hızı verileri (10 m, 50 m, 100 m, 150 m, 200 m) (Global Wind Atlas, 2025) ile Microsoft şirketinin 2014-2021 yılları arasında Bing haritalarından bina çatılarını tarayarak oluşturduğu bina verileri ve (GADM, 2025) elde edilen il ve ilçe sınır verileri ve (Alaska Satellite Facility [ASF], 2025) sayısal yükselti modeli (DEM) verileri ile Vezirköprü için binaların da yer aldığı 10 m ve 50 m yüksekliklerinde ortalama rüzgar hızı

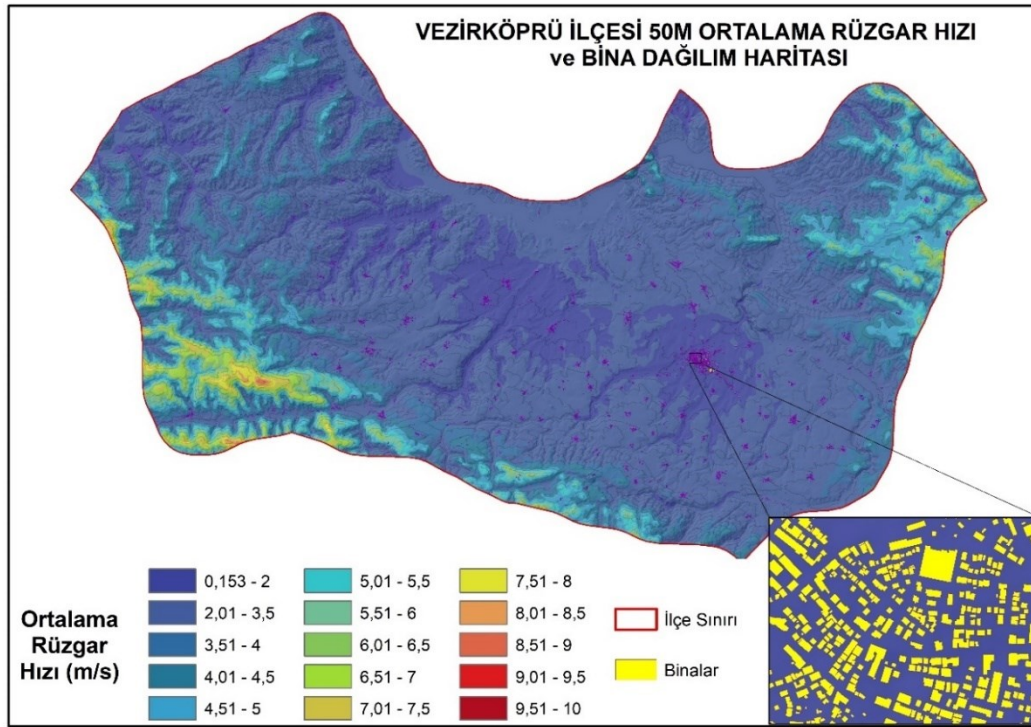
haritası oluşturulmuştur. Kentsel rüzgar enerjisini ele aldığımızdan ve Vezirköprü ilçesi birinci derece deprem bölgesi olduğu için bina yükseklikleri 10 m ve 50 m yükseklikleri arasında seyretmektedir.

Şekil 3.12’teki harita incelendiğinde yükseltinin düşük olduğu yani dağların arasında kalan ovada 10 m’lik yükseltide rüzgar hızı 0,153-2 m/s arasında seyretmektedir. Burada oluşturulan harita verileri ile ölçüm istasyonlarından alınan ortalama rüzgar hızları örtüşmektedir. Ortalama rüzgar hızları düşük seyretse de kent merkezinde yer alan bina konumlarını bireysel olarak değerlendirildiğinde, enerji üretimi için potansiyel barındırabileceği unutulmamalıdır. 10 m’lik ortalama rüzgar haritasında merkez dışındaki yerleşim yerlerinde çoğunlukla 2-3,5 m/s rüzgar hızlarına sahiptir. Diğer yandan azınlıkta da olsa 3,5-5 m/s’lik rüzgar hızına sahip yerleşim noktaları yer almaktadır.



Şekil 3.12. Vezirköprü ilçesi 10 m ortalama rüzgar hızı ve bina dağılım haritası

Şekil 3.13’teki 50 m yükseklikteki rüzgar hızı haritası incelendiğinde, 0,153-2 m/s arasındaki hızlara sahip rüzgar hızı bölgeleri azınlıkta, 2-4,5 m/s’lik rüzgar hızlarına sahip bölgeler çoğunlukta olduğu görülmektedir. Nadir de olsa 4,5-6 m/s’lik rüzgar hızlarına sahip yerleşim yerleri görülmektedir.

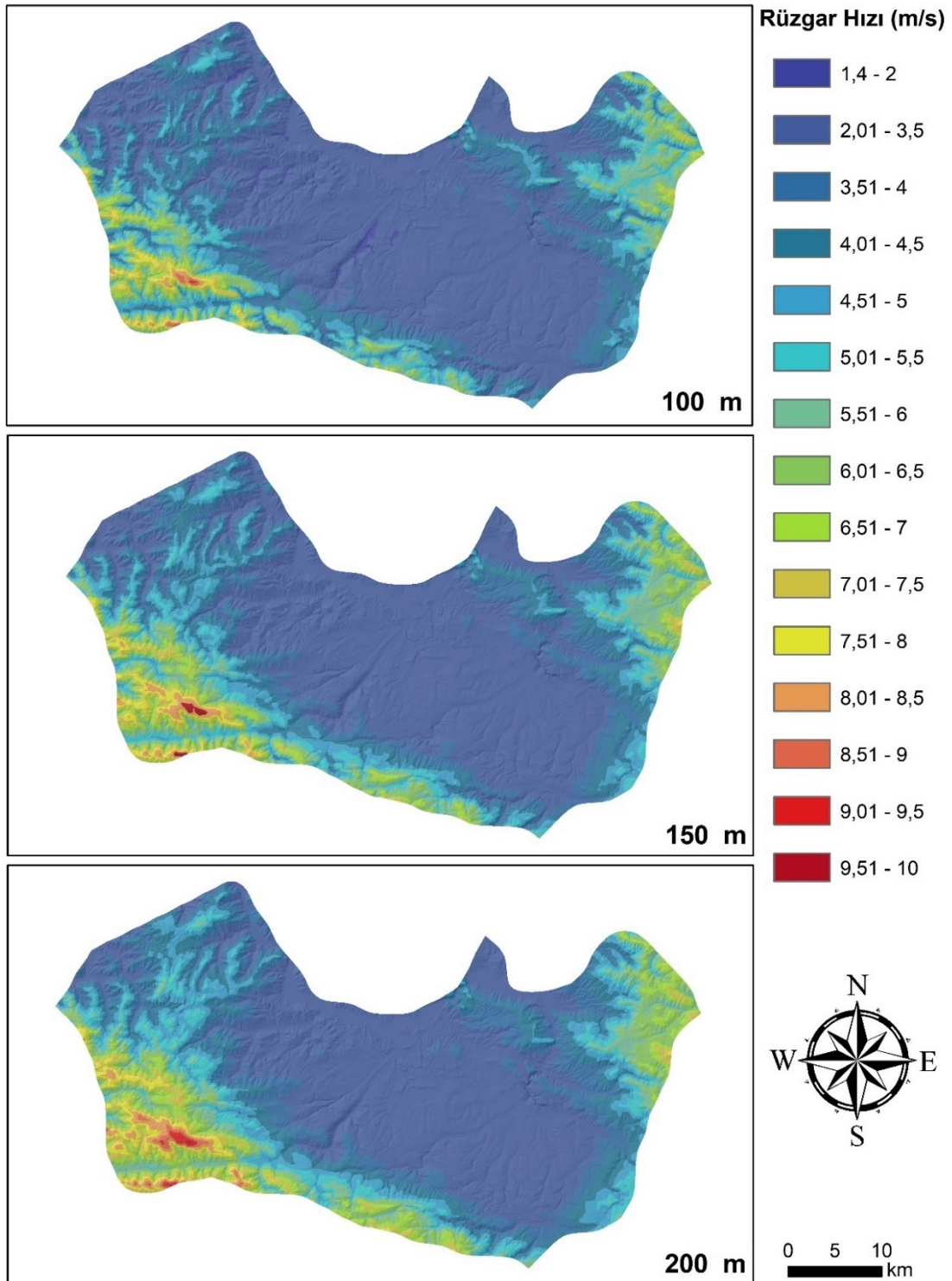


Şekil 3.13. Vezirköprü ilçesi 50 m ortalama rüzgar hızı ve bina dağılım haritası

Bu haritalarda, türbin yerleştirilecek yerleri belirlemek için kılavuzluk niteliği taşımaktadır. Şöyle ki, Vezirköprü ilçesi birinci derece deprem bölgesi olmasından dolayı bina katları 1-5 arasında seyretmektedir. Çoğunluk 3 katlı olmasının yanında 4 ve 5 katlı yüksekliklerde binalar da bulunmaktadır. Bu durumda bina yüksekliği ve kurulacak türbinin direk yüksekliğiyle birlikte türbin rotor yükseklik değeri 10 m ile 50 m arasında yer almaktadır. 10 m ve 50 m yükseklikteki rüzgar hızı haritalarını birlikte değerlendirerek rüzgar hızının yüksek olan noktaların belirlenmesi mümkündür. Haritaya bakarak yorumlama yapılsa da harita değerlerinin ortalama rüzgar hızı değeri olduğu unutulmamalıdır. Binalar bireysel değerlendirildiğinde, türbin kurulumu için daha fazla noktanın belirlenmesi mümkün olacaktır.

Vezirköprü ilçe bazında 100 m, 150 m ve 200 m yüksekliklerindeki ortalama rüzgar hızları Şekil 3.14'te verilmiştir. İlçe genelinde yükseklikle değişen ortalama rüzgar hızı değişimi genel durum hakkında bizlere fikir vermektedir. Büyük güçteki rüzgar türbinleri için potansiyel barındıran noktalar olduğunu söylemek mümkündür. İlçenin güney ve güneybatısı ile kuzeydoğu bölgeleri büyük güçteki türbinler için kurulum yapılabilecek kapasitede olduğu görülmektedir.

VEZİRKÖPRÜ İLÇESİ 100M, 150M ve 200M ORTALAMA RÜZGAR HIZI HARİTASI



Şekil 3.14. Vezirköprü ilçesi 100, 150 ve 200 m ortalama rüzgar hızı haritası

3.1.3. Türbin seçimi

Kent ortamlarının yaşam alanları olması, rüzgar türbini kurulumunda ses, titreşim ve güvenlik konuları daha fazla önem kazanmaktadır. Diğer yandan kentlerin ihtiyaç duyduğu enerji, gün geçtikçe artmaktadır. İhtiyaç duyulan bu enerjiyi karşılamaya aday rüzgar türbinlerinin önemi artmaktadır.

Kent ortamında rüzgar akışını olumsuz etkileyen unsurların varlığı, rüzgar profilinin bozuk olmasına neden olmaktadır. Kent ortamındaki rüzgar hızı 2-8 m/s arasında seyretmekte ve kent ortamında kullanılabilecek küçük güçlü rüzgar türbinlerini verimliliği %15-30 arasında değişmektedir (Faisal ve diğerleri, 2025; Mamur ve Karayel, 2018). Seçilecek türbinin düşük rüzgar hızlarında çalışabilir olması ve kent ortamında kullanılabilen türbinler bazında yüksek verimliliğe sahip olması gerekmektedir.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde, kentsel ortamlarda YERT'lerinden klasik üç kanatlı rüzgar türbini, DERT'lerinden de Savonius ve Darrieus tipi türbinlerinin kullanıldığı görülmektedir. Vezirköprü ilçesi için türbin seçiminde bu üç türbin türünün yanında bir de nispeten yeni olan YERT'leri kategorisine giren ASRT'i ele alınarak karşılaştırma yapılmıştır. Bu dört türbinin kentsel ortamdaki durumları incelenerek ele alınmıştır.

Üç kanatlı YERT'leri, ticari anlamda büyük güçlü türbinler olarak yaygın şekilde kullanılmakta ve bu alanda yapılan araştırmalar da oldukça yoğundur. Bunun bir sonucu olarak, kentsel alanlarda kullanılan küçük ölçekli rüzgar türbinleri pazarında da %74 gibi yüksek bir paya sahip oldukları görülmektedir. Büyük rüzgar türbinleri, rüzgarın düzgün bir şekilde türbinlere ulaşması ve rüzgarın yeterli olduğu bölgelerde kurulması ve aerodinamik yapısından dolayı verimi diğer türbinlere göre en yüksek olan türbin türüdür. Yalnız kentsel ortamlarda rüzgarın türbülanslı olmasından dolayı rüzgarı her zaman karşıdan alamayacağından ve sürekli rüzgarı takip ederek rüzgar yönüne dönmesinden dolayı istenilen verime ulaşamamaktadır. Bu durum YERT'lerin kentsel ortamda kendi kapasitesinin altında performans sergilemesine neden olmaktadır. (Kumar, Sivalingam, Lim, Ramakrishna and Wei, 2019; Wilberforce, Olabi, Sayed, Alalmi and Abdelkareem, 2023) Vezirköprü ilçesi gibi rüzgar potansiyelinin düşük seyreden bir bölgeyi ele aldığımızdan, düşük rüzgar hızlarında verimli çalışabilmesi önemlidir. YERT'lerin kanat ucu yapısından

dolayı ses seviyesi yüksek seyretmekte ve kentsel alanlar için dezavantajlı durumdadır (Tummala, Velamati, Sinha, Indraja and Krishna, 2016).

Darrieus tipi dikey eksenli rüzgar türbinleri, tasarım yapıları sayesinde rüzgar yönünden bağımsız çalışabilmekte, düşük ses seviyesi ve kompakt yapılarıyla kent ortamında kullanım için uygun bir seçenek sunmaktadır. Ayrıca, bu türbinlerin sosyal kabul oranı da diğer türbin türlerine göre daha yüksektir. Düşük rüzgar hızlarında ilk hareket için tahrik motoruna ihtiyaç duysalar da, yeterli rüzgar hızlarında Savonius ve Arşimet spirali türbinlerine kıyasla daha yüksek, üç kanatlı yatay eksenli türbinlere göre ise daha düşük güç katsayısına sahiptirler. Bununla birlikte, rotor çevresinde oluşan karmaşık aerodinamik etkiler zaman zaman verimlilik kayıplarına yol açabilmektedir. Bu sorunu azaltmak için yapılan araştırmalar; kanat profili geometrisinin geliştirilmesi, başlangıç hareketini kolaylaştıracak yardımcı sistemlerin tasarımı ve genel aerodinamik yapının iyileştirilmesi üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu tür geliştirmeler sayesinde, Darrieus türbinlerinin düşük rüzgar hızlarının hakim olduğu bölgelerde daha verimli şekilde çalışabilmesi mümkün olmakta ve bu durum söz konusu türbinleri sürdürülebilir enerji alanında daha cazip bir alternatif haline getirmektedir (Ali vd., 2018; Arpino, Scungio and Cortellessa, 2018; Douak, Aouachria, Rabehi and Allam, 2018; Ghazalla, Mohamed and Hafız, 2019; Hashem and Mohamed, 2018; Kouloumpis, Sobolewski and Yan, 2020; Lee and Lim, 2015; Tjiu, Marnoto, Mat, Ruslan and Sopian, 2015).

Savonius tipi rüzgar türbinleri, düşük rüzgar hızlarında da çalışabilme özelliğine sahip olup, tasarımı sayesinde rüzgarı her yönden alabilmektedir. Bunun yanı sıra, bu türbinlerde titreşim seviyesi ve oluşan ses düzeyi oldukça düşüktür. Tüm bu olumlu yönlerine rağmen aerodinamik yapısından dolayı düşük güç katsayısına sahiptir. Verimsiz olmaları nedeniyle çok fazla tercih edilmemektedir (Farozan, Soelaiman, Soetikno and Indartono, 2025).

Arşimet spirali formundaki rüzgar türbinleri yatay eksenli türbinler kategorisinde yer almaktadır. Klasik yatay eksenli türbinler genellikle kaldırma kuvvetiyle çalışırken, dikey eksenli türbinler çoğunlukla sürüklenme kuvvetinden faydalanır. Ancak Arşimet spirali türbinler, özgün spiral kanat yapısı sayesinde hem kaldırma hem de sürüklenme kuvvetlerinden aynı anda yararlanarak dönme hareketini gerçekleştirebilmektedir. Bu çift etkili aerodinamik yapı, türbine düşük rüzgar hızlarında dahi çalışma imkanı sunarken, rüzgar hızının artmasıyla birlikte kaldırma kuvvetinin daha baskın hale gelmesini sağlar.

Ayrıca kanat yapısı, rüzgarı her yönden yakalayarak türbinin rüzgar yönüne otomatik olarak hizalanmasını mümkün kılar; bu da ilave yönlendirme sistemlerine ihtiyaç duymadan kararlı bir çalışma sağlar. Arşimet türbinleri, klasik türbinlere kıyasla daha düşük gürültü ve titreşim seviyeleriyle de dikkat çeker. Düşük rüzgar hızlarında (0,9 m/s) dönmeye başlar ve 3 m/s hızına ulaştığında üretime başlamaktadır. Diğer türbinlere göre 14 m/s gibi kısmen düşük kalan rüzgar kesme sınırı sahiptir. Kapasite faktörü olarak klasik YERT'lerden düşük, Savonius türbine göre yüksektir. Flanş benzeri yönlendirme kullanımı sayesinde Darrieus türbinine yakın kapasite faktörüne ulaşmaktadır (Faisal ve diğerleri, 2025; Jang ve diğerleri, 2019; Konuk ve diğerleri, 2018).

Dört farklı türbinin temel özellikleri genel hatlarıyla değerlendirildiğinde, Çizelge 3.1'de sunulan karşılaştırma kriterlerine ulaşılmaktadır (Burton, Sharpe, Jenkins and Bossanyi., 2011; Jang ve diğerleri, 2019; Kamal, Nawar, Attai and Mohamed, 2023; Kim ve diğerleri, 2014; Refaie, Abdel Hameed, Nawar, Attai and Mohamed, 2021).

Çizelge 3.4 Türbin karşılaştırması

Özellik	3 Kanatlı (HAWT)	Arşimet Spirali (HAWT)	Savonius (VAWT)	Darrieus (VAWT)
Nominal rüzgar hızı (m/s)	10–15	10–13	8–10	10–15
Elektrik üretmeye başladığı rüzgar hızı (V_{min})(m/s)	3–4	2–3	2–4	3–5
Elektrik üretiminin kesildiği rüzgar hızı (V_{max}) (m/s)	20–25	14–20	15–20	20–25
Güç katsayısı (C_p)	0.45–0.50	0.25–0.35	0.15–0.25	0.30–0.40
Tip Speed Ratio (kanat uç hız oranı) (TSR)	6–9	1.5–2.5	0.8–1.2	4–6
Ses seviyesi	Orta-Yüksek	Düşük-Orta	Çok düşük	Orta

Bu durumda, kentsel ortamda kullanım açısından iki türbin tipi arasında tercih yapılmasının daha uygun olacağı görülmektedir. Bunlardan ilki Arşimet spirali rüzgar türbini, diğeri ise Darrieus tipi rüzgar türbinidir. Arşimet spirali türbini hem sürüklenme hem de kaldırma kuvvetinden yararlanabilmektedir. Darrieus türbini ise Arşimet türbinine kıyasla daha yüksek verim sağlamakta, ancak elektrik üretimine başlama hızı daha düşük kalmaktadır.

Her iki türbin de rüzgarı her yönden alabilme, ses ve titreşim seviyelerinin kabul edilebilir düzeyde olması gibi avantajlara sahiptir. Toplumsal kabul açısından değerlendirildiğinde, Darrieus türbininin, yeni nesil bir sistem olan Arşimet spirali türbinine göre daha yüksek kabul oranına sahip olduğu söylenebilir.

Her iki türbin tipi için de araştırma ve geliştirme çalışmaları devam etmektedir. Arşimet spirali türbinlerinde yürütülen verim artırma çalışmalarında, güç katsayısının (C_p) %50 seviyelerine yaklaştığı rapor edilmiştir (Faisal ve diğerleri, 2025). Benzer şekilde, Darrieus türbinlerinde de düşük rüzgar hızlarında daha verimli çalışmaya yönelik kanat tasarımı ve mekanik sistem geliştirme çalışmaları sürdürülmektedir. Bu tez çalışmasında, belirli bir bölge için enerji üretim potansiyeli ve maliyet analizi yapılacağından, her iki türbin için de mevcut ticari ürünler ve bu ürünlere ait teknik veriler dikkate alınarak değerlendirme yapılmıştır.

Bu kapsamda Arşimet spirali türbin türünde Archimedes Green Energys şirketinin üretimine ait olan AWM 1500D – 1000W modeli ile Darrieus türbin türünde Qingdao Greef New Energy Equipment Co., Ltd. şirketine ait olan Greef-500W modeli arasında karşılaştırılacaktır.

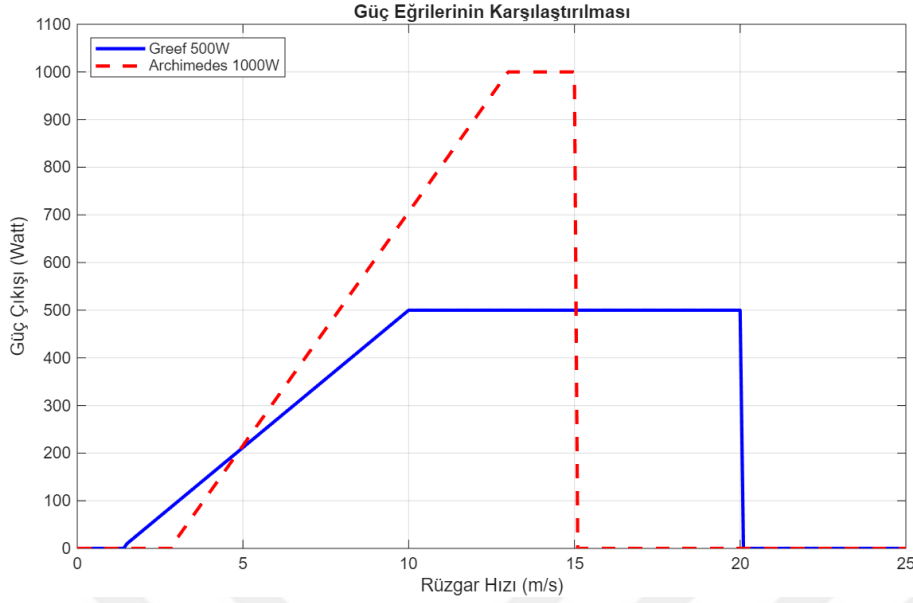
Çizelge 3.5. Seçilen iki türbin karşılaştırması

Özellik	Greef 500W VAWT	Archimedes AWM 1500D (1000W)	Notlar ve Yorumlar
Nominal Güç	500 W	1000 W	Archimedes, nominal olarak iki kat daha fazla güç kapasitesine sahip.
Başlangıç Hızı	1,5 m/s	3 m/s	Greef, çok daha düşük rüzgar hızlarında dönmeye başlar. Bu, düşük rüzgarlı bölgeler için önemli bir avantajdır.
Nominal Hız	10 m/s	13 m/s	Greef, nominal gücüne daha düşük bir rüzgar hızında ulaşır.
Kesme Çıkış Hızı	20 m/s	15 m/s	Archimedes'in varsayılan cut-out hızı daha düşük.

Çizelge 3.5. (devamı)

Gürültü Seviyesi	(Düşük Gürültü) olarak belirtilmiş	45 dB	Her ikisi de sessiz çalışmak üzere tasarlanmış, bu da kentsel uygulamalar için önemlidir. Archimedes belirli bir dB değeri vermiş.
Yönlenme Mekanizması	Gerekli değil	Gerekli değil	Her ikisi de karmaşık yönlenme sistemlerine ihtiyaç duymaz.
Dayanıklılık (Genel)	Ürün sayfasında detay yok	Kar, kir, yağmurdan etkilenmediği belirtilmiş	Archimedes, zorlu hava koşullarına dayanıklılık konusunda daha fazla bilgi sunuyor.
Boyutlar	Ürün resimlerinden daha kompakt görünüyor	1.5m çap, 1.9m uzunluk	Boyut ve süpürme alanı, yakalanacak rüzgar miktarını doğrudan etkiler.

Şekil 3.15'te belirlenen iki türbin için güç eğrisini karşılaştırdığımızda; 1,5-3 m/s aralıkta sadece Greef 500W türbini güç üretmeye başlar fakat Archimedes 1000W bu aralıkta enerji üretememektedir. Vezirköprü gibi bir bölgede ortalama rüzgar hızının çok düşük olduğundan Greef 500W türbininin daha sık enerji üreteceği anlamına gelir, ancak ürettiği güç miktarı düşük olacaktır. 3 m/s'nin üstündeki rüzgar hızlarında Arşimet türbini enerji üretimine başlayacağı için Greef 500W'a göre daha fazla enerji üretecek fakat çalışma aralığı düşünüldüğünde Arşimet rüzgar türbini daha erken üretimi kesecektir. Diğer yandan Greef 500W modeli daha erken nominal hıza ulaşması ve geniş çalışma aralığından dolayı güç üretimi düşükte olsa aktif olarak daha uzun sürelerde enerji üretecektir.



Şekil 3.15. Güç Eğrilerinin Karşılaştırması

3.2. Çalışma Metodolojisi

Bu çalışmada, 2018-2022 yılları arasında ormanlık alan ve şehir içi olmak üzere iki farklı noktadan elde edilen 5 yıllık günlük ortalama rüzgar hızı verileri kullanılarak, Vezirköprü ilçesinin rüzgar enerji potansiyelinin analiz edilmesi amaçlanmaktadır. Bu çalışma kapsamında, iki farklı rüzgar türbini; performans, enerji üretim miktarı, kapasite faktörü ve toplam enerji tüketimini karşılama oranı açısından karşılaştırılacaktır.

Çalışmanın temel metodolojisi, rüzgar hızı verilerinin istatistiksel modellenmesinde, Weibull dağılımı parametreleri (k ve c) en çok olabilirlik yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. c ve k değerleri kullanılarak Monte Carlo simülasyonu ile gelecek bir yılın günlük ortalama rüzgar hızları üretilmiştir. Bu aşamadan sonra yapılacak hesaplamalar için günlük ortalama rüzgar hızlarının veri çözünürlüğü düşük olduğundan, (Guo ve diğerleri, 2006) yöntemini kullanarak günlük verileri saatlik verilere çevrilmiştir. Ölçüm yapılan yükseklik ile türbin kurulacak yükseklikler eşit olmadığı için logaritmik rüzgar yasası yöntemi kullanılarak türbin göbek yüksekliğine yükseltilmiştir. Belirlenen iki farklı türbin verileri kullanılarak üreteceği güç üretimi, kapasite faktörü ve tüketimi karşılama oranları hesaplanmıştır. Ardından, çalışma sonuçları yorumlanarak bölge için uygun türbin modeli seçimi ve öneriler verilmiştir.

Bu çalışmanın, özellikle uzun süreli saatlik rüzgar verilerinin bulunmadığı durumlar için bir ön fizibilite değerlendirme aracı olarak kullanılabilecek, adım adım izlenebilir bir metodoloji sunması hedeflenmektedir. Elde edilen sonuçlar, kentsel alanda farklı türbin konfigürasyonlarının rüzgar enerjisi potansiyeli açısından karşılaştırmalı bir değerlendirmesini sunacaktır.

3.2.1. Weibull dağılımı

Rüzgar hızı, doğası gereği anlık olarak sürekli değişkenlik gösteren bir büyüklük olduğundan, sadece ortalama değerler ile yapılan analizler yetersiz olmaktadır. Bir bölgenin rüzgar enerjisi potansiyelini değerlendirmek için, rüzgar hızının belirli bir zaman dilimindeki olma olasılığını bulmak önemlidir. Weibull dağılımı da rüzgar hızlarının olasılık dağılımını modellemek için yaygın olarak kullanılan bir dağılımdır. Temel amacı, belirli bir bölgede ölçülen rüzgar hızlarının esme sayısını istatistiksel olarak temsil etmek ve bu sayede rüzgar enerjisi potansiyelini değerlendirmeye olanak sağlamaktır. Diğer bir ifadeyle, rüzgarın ne sıklıkta hangi hızlarda estiğini gösteren bir frekans dağılımıdır. Weibull dağılımı, bu değişkenliği kümülatif ve yoğunluk fonksiyonları aracılığıyla modelleyerek, rüzgar türbinlerinin enerji üretim potansiyelinin daha isabetli hesaplanmasını sağlar (Manwell, McGowan and Rogers, 2010).

Bir bölgeye ait verilerle hesaplanan Weibull dağılım parametreleri (k şekil parametresi, c ölçek parametresi) o bölge bölgeye ait rüzgar karakteristiğini özetler. k değeri düşük olduğunda, rüzgar hızlarının çok değişken olduğunu k değeri arttıkça rüzgar hızları daha dar bir aralıkta yani ortalama etrafında toplandığını gösterir. k değeri genellikle 1.5 ile 3 arasında değişmektedir. k değeri, enerji üretimi planlamasında türbin seçimi açısından kritik önemdedir. c değerinin birimi m/s'dir ve rüzgar hızlarının genel seviyesini belirleyen bir parametredir. Yüksek c değeri, o bölgede genel olarak daha yüksek rüzgar hızlarının gözlemlendiğini gösterir. Bu parametre aynı zamanda ortalama rüzgar hızıyla doğrudan ilişkilidir ve genellikle ortalama hızın yaklaşık 1,12 katı olarak kabul edilir (Manwell ve diğerleri, 2010).

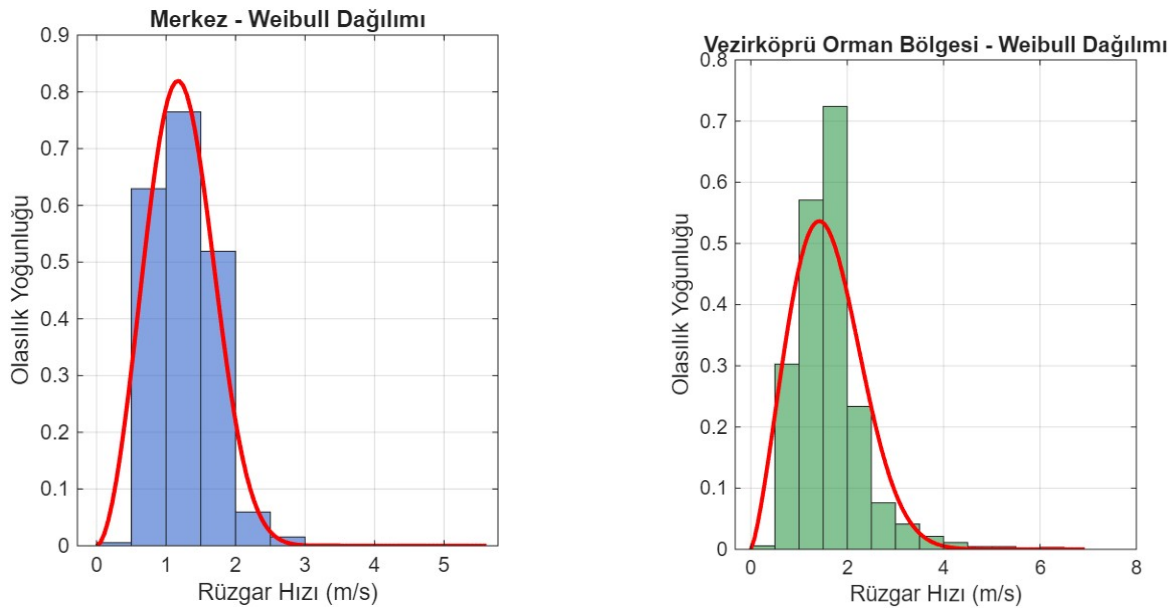
Weibull parametrelerinin doğru tahmini, türbin yerinin seçimi, uygun türbin tipi belirleme ve yıllık enerji üretimi hesaplamalarında önemli bir role sahiptir.

(Bulum, 2019) çalışmasında 2017 yılı rüzgar verilerini kullanarak dağılım fonksiyonlarının uyumluluğu araştırmış ve Vezirköprü ilçesi için Weibull dağılımının (Weibull olasılık fonksiyonunun ve kümülatif dağılım fonksiyonu Eşitlik 12 ve 13'te verilmiştir) uyumlu olduğunu ifade etmiştir. Yine aynı çalışmada Weibull dağılımında kullanılan parametreleri en çok olabilirlik yöntemi ile belirlenmiştir. Bu çalışmada da, Vezirköprü için denemiş olmasından dolayı Weibull dağılım fonksiyonu ve parametreler için en çok olabilirlik yöntemi (Maximum Likelihood Estimation – MLE) tercih edilmiştir.

MLE yöntemi, gözlemlenen veri setinin ($v_1, v_2, \dots, v_n$) bu parametrelerle tanımlanan Weibull dağılımından gelme olasılığını maksimize eden c ve k değerlerini bulmayı amaçlar. Olabilirlik fonksiyonu Eşitlik-22'da verilmiştir.

$$L(c, k | v_1, \dots, v_n) = \prod_{i=1}^n f(v_i; c, k) \quad (22)$$

Gerekli hesaplamalar sonucunda Vezirköprü şehir içi k değeri 2.84, c değeri 1,37 m/s ve orman sahası için k değeri 2.35, c değeri 1,80 m/s elde edilmiştir. Çalışma bölgesinin Weibull dağılılı Şekil 3.16'da verilmiştir.



Şekil 3.16. Vezirköprü merkez(solda) ve orman sahası(sağda) Weibull dağılımı

3.2.2. Monte Carlo simülasyonu

Monte Carlo simülasyonu, rastgele örnekleme yoluyla karmaşık sistemlerin veya süreçlerin davranışını modellemek ve analiz etmek için kullanılan güçlü bir sayısal tekniktir. Yöntem, bir veya daha fazla olasılık dağılımı tarafından yönetilen girdilere sahip bir modelin, çok sayıda rastgele deneme çalıştırılarak çıktıların olasılık dağılımını tahmin etmesine dayanır. (Metropolis and Ulam, 1949). Bu çalışmada Monte Carlo simülasyonu, bir önceki adımda tahmin edilen Weibull parametrelerini (c ve k) kullanarak gelecekteki bir yılın her günü için olası günlük ortalama rüzgar hızı değerlerini üretmek amacıyla kullanılmıştır.

Bu yaklaşımın sayesinde, rüzgarın doğal değişkenliğini ve belirsizliğini simüle edilebilmekte, farklı olası gelecek senaryoları oluşturarak risk ve performans değerlendirilebilmekte ve sınırlı geçmiş veriden daha uzun süreli sentetik veri serileri üretilebilmektedir.

3.2.3. Günlük verilerden saatlik rüzgar hızı tahmini

Birçok rüzgar enerjisi modeli, günlük ortalama veriler yerine saatlik veya daha yüksek çözünürlüklü rüzgar hızı verilerine ihtiyaç duyar. Ancak, saatlik veriler her zaman mevcut olmayabilir. (Guo ve diğerleri, 2016) yöntemi günlük rüzgar istatistiklerinden saatlik rüzgar hızı serileri üretmek için basit ve etkili bir downscaling (ölçek küçültme) yöntemi önermişlerdir. Önerilen bu çalışmada, veri varlığına dayalı iki farklı yolla hesaplama yapılabileceği söylenmiştir. Eğer günlük ortalama rüzgar hızlarına ait gün için maksimum değer verisi var ise Eşitlik-23, sadece günlük ortalamalar var ise Eşitlik-24 kullanılacağı belirtilmiştir. Ayrıca Eşitlik-23 ve 24'te yer alan mantık geçerli olmakla birlikte, bir de rüzgar hızının gün içerisinde en yüksek olduğu saat kabulü ile hesaplama yapılabilen eşitlikler, Eşitlik-25 ve 26'da verilmiştir.

$$W_n = W_{ave} + \frac{1}{\pi} W_{max} \cos\left(\frac{n.\pi}{12}\right) \quad (23)$$

$$W_n = W_{ave} + \frac{1}{2} W_{ave} \cos\left(\frac{n.\pi}{12}\right) \quad (24)$$

$$W_n = W_{ave} + \frac{1}{\pi} W_{max} \cos \left(\frac{(n-H_{max}).\pi}{12} \right) \quad (25)$$

$$W_n = W_{ave} + \frac{1}{2} W_{ave} \cos \left(\frac{(n-H_{max}).\pi}{12} \right) \quad (26)$$

W_n : n. saatteki tahmini rüzgar hızı (m/s)

W_{ave} : Hesaplanması yapılan günün ortalama rüzgar hızı (m/s)

W_{max} : Gün içinde rüzgar hızının maksimuma ulaştığı hız (m/s)

n : Gün içi saatleri temsil eder (0, 1, ..., 23)

H_{max} : Gün içerisinde rüzgar hızının maksimuma ulaştığı saat (genelde öğlenden sonra rüzgar hızı yüksek olma eğilimindedir. Bu çalışmada H_{max} değeri 14 alınmıştır.)

Mevcut verilerimiz sadece günlük ortalama verilerini içerdiğinden ve günlük rüzgarın en yüksek genel varsayımından dolayı bu çalışmada Eşitlik-26 kullanılmıştır. Bu yöntem, gün içindeki rüzgar hızının günlük ortalama rüzgar hızı (W_{ave}) etrafında kosinüsoidal bir salınım yaptığını varsayar. Diğer bir deyişle, rüzgarın pik yaptığı ve ortalamaya göre çok düşük seyrettiğini varsaymaktadır.

Eğer hesaplanan W_n değeri negatif çıkarsa, rüzgar hızı fiziksel olarak negatif olamayacağı için sıfır olarak kabul edilir. Bu yöntem, her bir simüle edilmiş günlük ortalama hız için 24 saatlik bir rüzgar hızı profili oluşturmamızı sağlar. Bu, gün içindeki değişkenliği basit bir şekilde modelleyerek daha gerçekçi enerji üretim tahminleri yapılmasına olanak tanır.

3.2.4. Rüzgar hızının istenilen yükseklik için hesaplanması

Rüzgar hızlarının saatlik verilere dönüştürülmesinin ardından, türbin enerji üretim hesaplamalarının yapılabilmesi için bu verilerin göbek yüksekliğine uyarlanması gerekmektedir.

Vezirköprü için elde edilen veriler 10 m yükseklikte ölçülmüştür. Çalışma alanı deprem bölgesinde olması ve yerleşim yerinde binaların çoğunluğu 3 kat olması türbin

yerleştirilecek yükseklikte yaklaşık 15 m seviyesindedir. 10 m’de ölçülen rüzgar hızları logaritmik rüzgar kanunu yöntemi (Eşitlik-20) kullanılarak 15 m yükseltilmiştir.

Ekstrapolasyon işlemi yapılabilmesi için z_0 pürüzlülük değeri (m) ve d sıfır düzlemi yer değiştirme yüksekliği (m) değerleri belirlenmelidir.

Daha önce yapılan çalışmalarda z_0 değerli için belirli yüzey özellikleri için değer çizelgeleri oluşturulmuştur. Çizelge 2.1, 2.2 ve 2.3’te verilen ve çalışma alanı özelliklerini de dikkate alarak z_0 değerini şehir içi 0,5 m ve orman sahası için 0,8 m alınmıştır.

Türbin kurulumu yapılacak yerin deniz üstü veya düz arazilerde kurulmasında d değeri ihmal edilebilmektedir. Kentsel bölgeler için bu durum hesaplama hatalarına neden olmaktadır. d değeri türbin kurulacak bölgenin yoğun orman ve bina olması durumunda, engel yüksekliğinin yaklaşık $2/3$ ’üne denk gelmektedir (Stull, 1988). Çalışmamızda d değeri, şehir içinde 2 m, orman bölgesi için 10 m alınmıştır.

Bu ekstrapolasyon, her bir saatlik rüzgar hızına uygulanarak, türbin göbek yüksekliğindeki rüzgar hızları tahmin edilir.

3.2.5. Rüzgar türbini güç üretimi

Bir rüzgar türbininin belirli bir rüzgar hızında ne kadar elektrik gücü üreteceği, üretici tarafından sağlanan güç eğrisi ile belirlenir. Bu eğri, türbinin performans karakteristiğini gösterir ve genellikle aşağıdaki kritik hızları içerir.

Başlama hızı: Türbinin dönmeye ve güç üretmeye başladığı minimum rüzgar hızı

Nominal hız: Türbinin nominal gücüne ulaştığı rüzgar hızı

Kesme hızı: Türbinin çok yüksek rüzgar hızlarında yapısal hasarı önlemek için kendini durdurduğu veya üretimi kestiği hız

Nominal güç: Türbinin üretebileceği maksimum tasarım gücü.

Betz Kanunu'na göre, bir rüzgar türbini rüzgardaki enerjinin maksimum %59'unu yakalayabilir (Betz, 1926: 42). Gerçek türbinler, aerodinamik ve mekanik kayıplar nedeniyle bu limitin altında bir verimlilikle çalışır. Güç eğrisi, tüm bu faktörleri içeren pratik bir ölçümdür.

Bu çalışmada, seçilen iki türbin (Greef 500W ve Archimedes 1000W) için üretici verilerine göre, her bir saatlik rüzgar hızı için güç eğrileri üzerinde lineer interpolasyon yapılarak anlık güç üretimi hesaplanmıştır.

Burada izlenen yol, rüzgar hızı türbinin dönmeye başlayacağı hızdan küçük ise üretilen enerji sıfır, eğer rüzgar hızı türbinin kesme hızından fazla ise üretilen enerji yine sıfır varsayımı ile yapılmıştır. Her iki türbininde kendi enerji üretebileceği rüzgar hızı değerleri arasında, güç eğrisi verileri kadar üretim yapabilmektedir.

Belirli bir zaman aralığında üretilen toplam enerji, anlık gücün o zaman aralığı boyunca entegre edilmesiyle bulunur. Saatlik güç verileri kullanıldığında, günlük enerji hasadı, o günkü 24 saatlik anlık güç üretimlerinin toplanmasıyla elde edilir. Yıllık enerji hasadı ise tüm günlerin günlük enerji hasatlarının toplanmasıyla bulunur. Her iki türbinden üçer adet kullanıldığından, üretilen yıllık toplam enerji 3 ile çarpılarak karşılaştırma yapılmıştır.

3.2.6. Kapasite faktörü

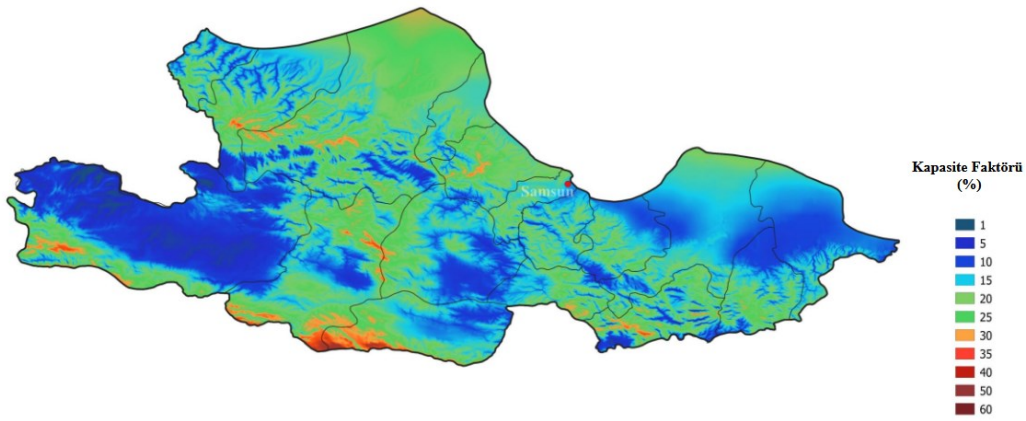
Rüzgar enerjisi santrali (RES) kurulumu öncesinde, yatırımın uygunluğunu ve amortisman süresini belirlemek amacıyla kapsamlı fizibilite çalışmaları yürütülmektedir. Bu çalışmaların temel kriterlerinden biri kapasite faktörüdür. Kapasite faktörü, bir rüzgar enerji santralinin belirli bir zaman diliminde ürettiği gerçek enerji miktarının, santralin teorik olarak üretebileceği maksimum enerji miktarına oranı olarak tanımlanır. Başka bir deyişle, kurulu gücün ne kadarının aktif güce dönüştürüldüğünü gösterir. Bu bağlamda, kurulum yapılacak bölgenin rüzgar hızı profiline uygun türbin seçimi, kapasite faktörünü doğrudan etkileyen kritik bir unsurdur (Gençel ve Tarhan, 2019).

$$KF = \frac{\text{Yılda Üretilen Toplam Enerji Miktarı}}{\text{Türbinin Nominal Güçte Yılda Üretmesi Gereken Enerji Miktarı}} \quad (27)$$

Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, RES kurulumu için en az %25 kapasite faktörü şartı aramaktadır (Gençel ve Tarhan, 2019).

REPA tarafından hazırlanan kapasite faktörü dağılım haritası ve ilgili hesaplamalara göre, Samsun ili için kapasite faktörü ortalama değeri %16,47 olarak belirlenmiştir. Bu durum, il genelinde rüzgar enerjisi potansiyelinin bakanlık tarafından belirlenen eşik değerin altında kaldığını göstermektedir (REPA, 2006).

KAPASİTE FAKTÖRÜ DAĞILIMI – 100 METRE



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

Şekil 3.17. Samsun kapasite faktörü dağılımı haritası (REPA, 2006)

Samsun'un Vezirköprü ilçesinde, şehir içi ve ormanlık alan olmak üzere iki farklı saha için yapılan bir yıllık enerji üretim hesaplamalarında, her bir sahanın potansiyeli değerlendirilmiştir. Bu çalışmada, Greef 500W ve Arşimet 1000W olmak üzere iki farklı rüzgar türbini modelinden üçer adet kullanılmıştır. Greef 500W türbinlerinin kurulu gücü toplamda 1500W (3 x 500W), Arşimet 1000W türbinlerinin kurulu gücü ise toplamda 3000W (3 x 1000W) olarak dikkate alınmıştır.

3.2.7. Tüketimi karşılama oranı

Karadeniz Bölgesi'nin önemli bir merkezi olan Samsun'un elektrik tüketim profili, Türkiye'nin metropol sanayi bölgelerinden farklı özellikler sergilemektedir. Samsun Ticaret

ve Sanayi Odası tarafından yayımlanan 2022 yılı verilerine göre, ilin toplam elektrik tüketimi 3.991.685 MWh olarak kaydedilmiştir. Bu tüketimin abone gruplarına göre dağılımı incelendiğinde, en büyük payın %33,0 ile mesken abonelerine ait olduğu görülmektedir. Sanayi aboneleri tüketimin %25,7'sini, ticaret aboneleri ise %23,7'sini oluşturmaktadır. Geriye kalan tüketim ise tarımsal sulama ve diğer aboneler arasında dağılmaktadır (Samsun TSO, 2022, s. 10). Bu veriler, il ekonomisinde hizmet sektörü ve konut tüketiminin, sanayi tüketimine kıyasla daha baskın bir role sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Türkiye genelindeki ortalamanın altında kalan kişi başına elektrik tüketimi de bölgedeki sanayileşme yoğunluğunun daha düşük olduğunu teyit etmektedir (Samsun TSO, 2022, s. 11).

Samsun'un kırsal nüfus yoğunluğu ve yüzölçümü bakımından öne çıkan ilçelerinden biri olan Vezirköprü, sanayinin sınırlı olduğu bir yapıya sahiptir. Bu durum, elektrik tüketim deseninin analizinde özel bir öneme sahiptir. Türkiye İstatistik Kurumu'nun (TÜİK) verilerine göre, 2023 yılı için Vezirköprü ilçesinin toplam elektrik tüketimi 244.702.332 kWh, ilçe nüfusu ise 88.564 kişidir (TÜİK, 2025). Bu veriler kullanılarak ilçedeki kişi başına düşen yıllık elektrik tüketimi yaklaşık 2.763 kWh olarak hesaplanmıştır. Bu değer, Samsun ilinin genel ortalamasına oldukça yakındır ve il ortalamasının Vezirköprü gibi büyük kırsal ilçelerin etkisiyle şekillendiğini göstermektedir.

Hane başına tüketimi daha doğru analiz edebilmek için öncelikle ilçedeki toplam hane sayısının tahmin edilmesi gerekmektedir. TÜİK tarafından 2023 yılı için açıklanan Türkiye ortalaması olan hane halkı büyüklüğü (3,17 kişi/hane) baz alınarak, ilçedeki tahmini hane sayısı Eşitlik-28'de gösterildiği gibi hesaplanmıştır (TÜİK, 2024).

$$Tahmini\ Hane\ Sayısı = \frac{Toplam\ Nüfus}{Ortalama\ Hane\ Halkı\ Büyüklüğü} \quad (28)$$

Bu hesaplama sonucunda Vezirköprü için tahmini hane sayısı yaklaşık 27.938 olarak bulunmuştur. Bu veriler ışığında, Vezirköprü ilçesi için yıllık ve aylık hane başına düşen ortalama elektrik tüketimi, toplam ilçe tüketiminin tahmini hane sayısına bölünmesini ifade eden Eşitlik-29 kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\text{Hane Başı Tüketim} = \frac{\text{Toplam Tüketim}}{\text{Tahmini Hane Sayısı}} \quad (29)$$

Yapılan hesaplama sonucunda yıllık hane başına tüketim yaklaşık 8.758 kWh, aylık ortalama tüketim ise yaklaşık 730 kWh olarak bulunmuştur. Hesaplanan bu değer, Türkiye'deki standart bir mesken abonesinin ortalama tüketiminin oldukça üzerindedir. Bu durumun temel nedeni, analize dahil edilen toplam tüketim rakamının sadece meskenleri değil, aynı zamanda ilçedeki ticarethaneleri, tarımsal sulama faaliyetlerini ve diğer tüm abone gruplarını kapsamasıdır. Bölgenin %70'e varan kırsal yapısı, özellikle tarımsal sulamanın toplam tüketim içindeki payını artırarak hane başına düşen ortalama değeri yükselten en önemli faktörlerden biri olarak öne çıkmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, iki farklı rüzgar rejimini temsil eden orman arazisi ve şehir içi lokasyonları için iki farklı rüzgar türbini modelinin (Greef 500W ve Archimedes 1000W) performansı analiz edilmiştir. Şehir içi rüzgar potansiyeli daha yüksek olduğundan, daha detaylı bölgesel fizibilite analizlerinde şehir içi lokasyonunun simüle edilmiş rüzgar verileri referans alınmıştır.

Buraya kadar yaptıklarımızı genel olarak gözden geçirdiğimizde; iki farklı coğrafi lokasyon (ormanlık arazi ve şehir içi) için rüzgar enerjisi potansiyeli, yaklaşık 5 yıllık geçmiş günlük ortalama rüzgar hızı verileri kullanılarak detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Adım 1'de, her lokasyonun rüzgar hızı karakteristiği, Weibull olasılık dağılımı kullanılarak modellenmiş dağılımın ölçek (c) ve şekil (k) parametreleri tahmin edilmiştir. Bu istatistiksel model, Adım 2'de, gelecekteki bir yılın her günü için olası günlük ortalama rüzgar hızlarının Monte Carlo simülasyonu ile türetilmiştir. Veri kısıtlılığını aşmak ve gün içi rüzgar değişkenliğini daha iyi yansıtabilmek amacıyla, Adım 3'te, (Guo ve diğerleri, 2016) tarafından önerilen bir yöntem ile simüle edilen her bir günlük ortalama hızdan 24 saatlik bir rüzgar hızı serisi üretilmiştir. Bu yaklaşım, saatlik veri gerektiren daha hassas enerji üretim tahminlerine olanak tanımıştır.

Daha sonra, Adım 4'te, üretilen bu saatlik rüzgar hızları, standart ölçüm yüksekliğinden (10m) belirlenen türbin göbek yüksekliğine (15m), atmosferik sınır tabakası teorilerine uygun olarak logaritmik rüzgar profili kullanılarak ekstrapole edilmiştir. Bu işlem, yüzey pürüzlülüğü (z_0) ve yer değiştirme yüksekliği (d) gibi lokasyona özgü parametreleri dikkate

almıştır. Adım 5’te, türbin göbek yüksekliğindeki her bir saatlik rüzgar hızı için, iki farklı rüzgar türbini modelinin (Greef 500W ve Archimedes 1000W) üretici verilerinden elde edilen güç eğrileri kullanılarak anlık güç üretimi hesaplanmıştır. Bu anlık güç değerleri, Adım 6’da, her gün için toplanarak günlük toplam enerji hasadı bulunmuş ve ardından 365 gün için birleştirilerek yıllık toplam enerji hasadı elde edilmiştir. Adım 7’de, elde edilen yıllık enerji verileri doğrultusunda kapasite faktörü hesaplanmıştır. Adım 8’de, her iki türbinden elde edilen üretim değerleri dikkate alınarak Vezirköprü geneli tüketilen enerji miktarını karşılama oranı hesaplanmıştır.

Bu kapsamlı metodoloji, farklı rüzgar türbinlerinin performansını farklı koşullar altında değerlendirmek ve rüzgar enerjisi projelerinin ön fizibilitesi için önemli bilgiler sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar, türbin seçimi ve projenin ekonomik uygulanabilirliği hakkında karar vericilere yol gösterici niteliktedir.

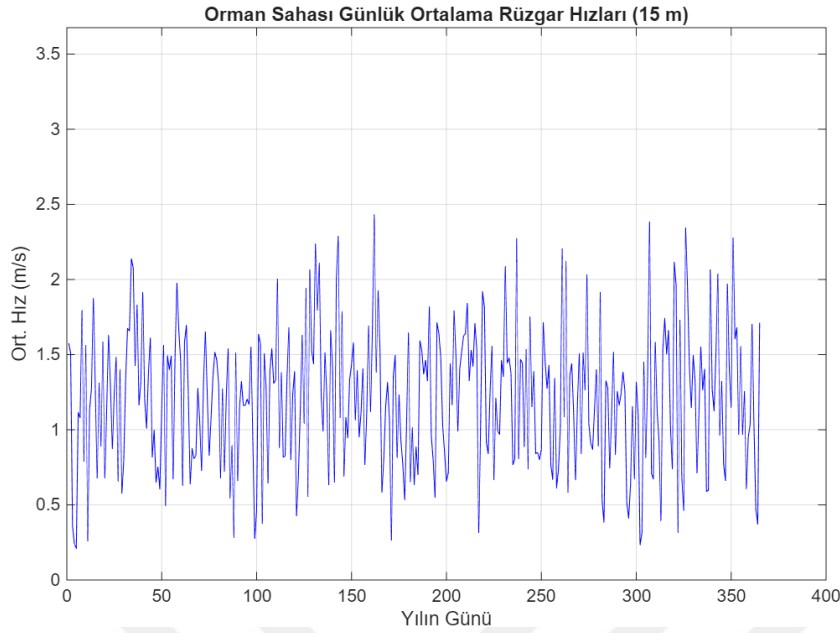
4. BULGULAR

Bu bölümde, iki farklı coğrafi lokasyon (orman sahası ve şehir içi/merkez) için yapılan rüzgar enerjisi potansiyel analizleri ve iki farklı rüzgar türbini tipinin (Greef 500W ve Archimedes 1000W) performans karşılaştırmalarından elde edilen temel bulgular sunulmaktadır. Analizler, geçmiş günlük ortalama rüzgar hızı verilerine dayalı olarak, Weibull dağılımı, Monte Carlo simülasyonu ve (Guo ve diğerleri, 2016) tarafından önerilen saatlik hız tahmini yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her bir türbin tipinden üçer adet olduğu varsayımıyla, türbin güç üretimi ve kapasite faktörü hesaplanmıştır. Son olarak şehir içi verileri ile Vezirköprü geneli elektrik tüketimi karşılama senaryoları incelenmiştir. Bulgular, öncelikle her lokasyon için ayrı ayrı ele alınacak, ardından genel bir karşılaştırma yapılacaktır.

4.1. Orman Sahası Bulguları

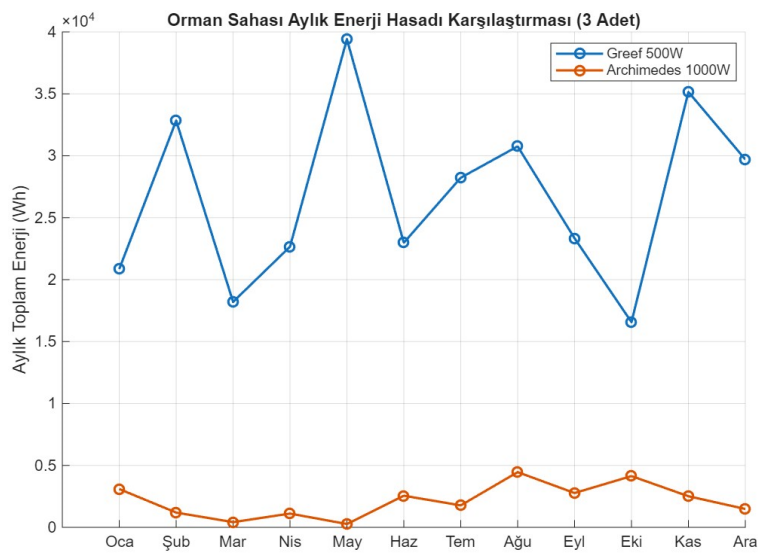
Ormanlık arazi için yapılan analizler sonucunda elde edilen grafikler Şekil 4.1, 4.2, 4.3 ve 4.4'te sunulmuştur.

Şekil 4.1'de, 15 m türbin göbek yüksekliğinde bir yıl boyunca nasıl bir dağılım gösterdiğini sergilemektedir. Görüldüğü üzere, ormanlık arazideki rüzgar hızları genellikle düşük seviyelerde seyretmekte olup, ortalama hızlar çoğunlukla 0,5 m/s ile 2 m/s aralığında yoğunlaşmaktadır. Zaman zaman bu ortalamaların üzerine çıkan pikler gözlemlense de genel rüzgar rejimi düşük hızlı bir karakteristiğe işaret etmektedir. Bu durum, seçilecek türbinin özellikle düşük rüzgar hızlarındaki performansının kritik olacağını göstermektedir.



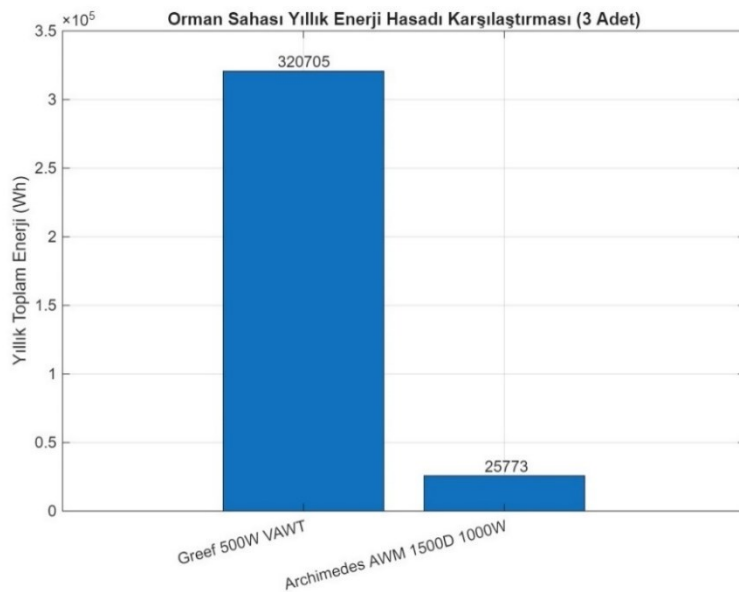
Şekil 4.1. Orman Sahası Günlük Ortalama Rüzgar Hızları (15 m)

Şekil 4.2’de, aylık enerji üretimlerine bakıldığında, her iki türbin için de mevsimsel bir dalgalanma gözlemlenmektedir. Greef 500W, yıl boyunca Archimedes 1000W modeline göre tutarlı bir şekilde daha yüksek enerji üretimi sergilemiştir. Özellikle ilkbahar ve sonbahar aylarında rüzgar hızlarının bir miktar artmasıyla Greef 500W türbininin üretimindeki artış daha belirgindir. Archimedes 1000W türbininin aylık üretimi ise oldukça düşük seviyelerde kalmıştır, bu da başlama hızının bu lokasyon için yüksek olduğunu teyit etmektedir.



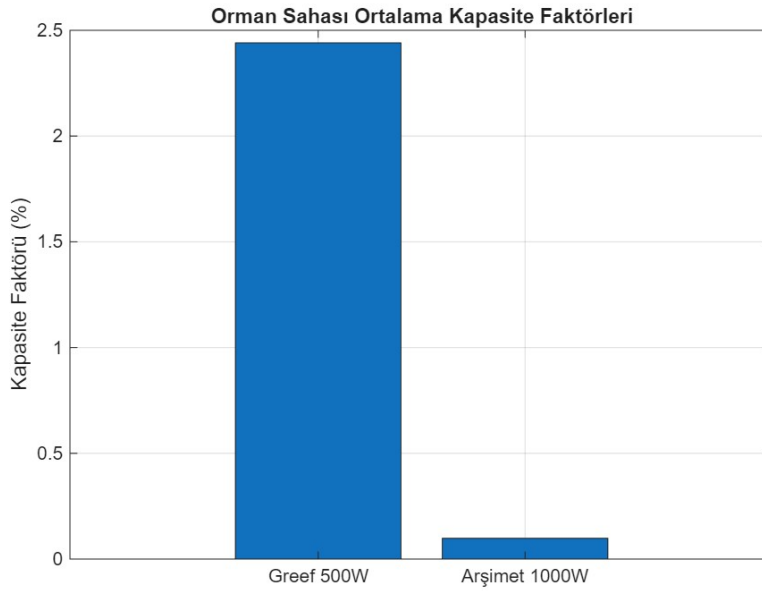
Şekil 4.2. Orman sahası aylık enerji hasadı karşılaştırması (3 Adet)

Şekil 4.3'te yıllık toplam enerji üretimi karşılaştırıldığında, Greef 500W modelinin (3 adet) yıllık yaklaşık 320.705 Wh enerji ürettiği, Archimedes 1000W modelinin (3 adet) ise yıllık yaklaşık 25.773 Wh enerji ürettiği görülmektedir. Bu sonuç, ormanlık arazinin genel düşük rüzgar hızlarında, Greef 500W türbininin daha düşük başlangıç hızına (1,5 m/s) sahip olmasının ve daha sık çalışabilmesinin, nominal gücü daha yüksek olan Archimedes türbinine göre belirgin bir avantaj sağladığını göstermektedir. Archimedes 1000W türbininin 3 m/s'lik kesme hızı, bu lokasyondaki rüzgar koşullarında sıkça devreye girmesini engellemiş olabilir.



Şekil 4.3. Orman sahası yıllık enerji hasadı karşılaştırması (3 adet)

Şekil 4.4'te kapasite faktörünün karşılaştırıldığında, orman sahasında kurulu 3 adet Greef 500 W ve 3 adet Archimedes 1000 W rüzgar türbini için hesaplanan karşılaştırmalı kapasite faktörleri grafiksel olarak sunulmuştur. Yıllık bazda yapılan hesaplamalar sonucunda, Greef 500 W türbinleri için ortalama kapasite faktörü %2,44, Archimedes 1000 W türbinleri için ise %0,10 olarak belirlenmiştir. Elde edilen bu değerler, her iki türbin tipi açısından da T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından belirlenen kabul edilebilir kapasite faktörü sınırlarının oldukça altında kalmaktadır.

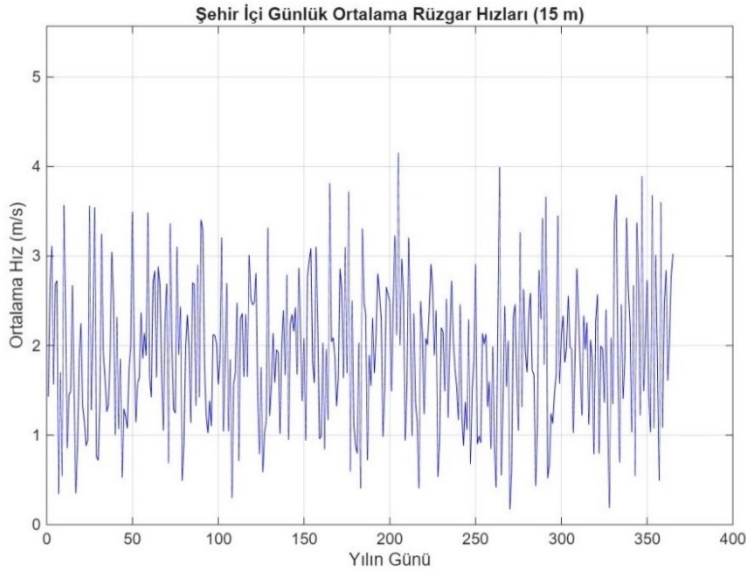


Şekil 4.4. Orman sahası ortalama kapasite faktörü

4.2. Şehir İçi Bulguları

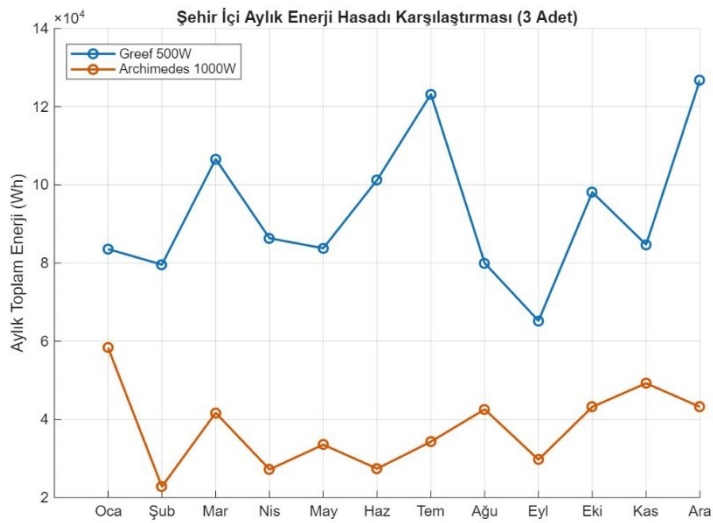
Şehir içi lokasyonu için yapılan analizler sonucunda elde edilen grafikler Şekil 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10 ve 4.11’de sunulmuştur.

Şekil 4.5’te, şehir içi lokasyonunda 15m yükseklikteki günlük ortalama rüzgar hızları, ormanlık araziye kıyasla bir miktar daha yüksek ve daha değişken bir profil sergilemektedir. Ortalama hızlar genellikle 1 m/s ile 3 m/s aralığında olup, zaman zaman daha belirgin pikler gözlemlenmektedir. Bu durum, şehir içindeki yapılaşmanın ve açık alanların rüzgar akışını farklı şekillerde etkileyebileceğini düşündürmektedir. Yine de, genel olarak bu lokasyon da düşük ila orta hızlı bir rüzgar rejimine sahip olduğu görülmektedir.



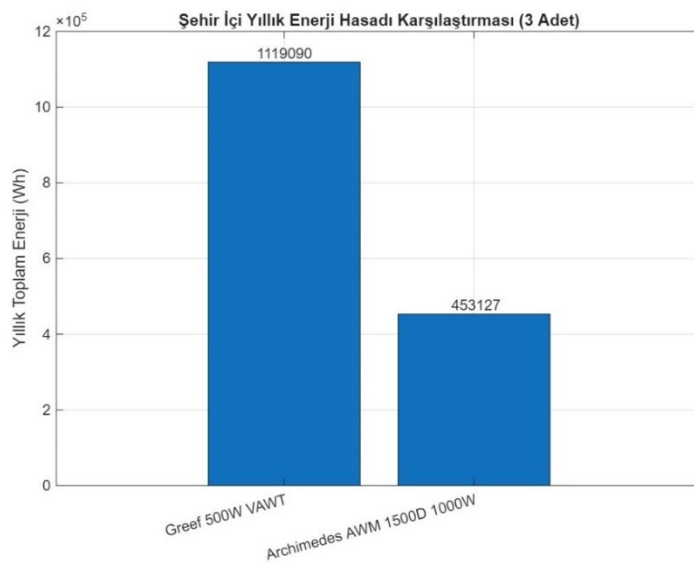
Şekil 4.5. Şehir içi günlük ortalama rüzgar hızları (15 m)

Şekil 4.6’da aylık enerji üretimleri incelendiğinde, şehir içinde de mevsimsel bir değişkenlik görülmektedir. Greef 500W, yılın tüm aylarında Archimedes 1000W modelinden daha yüksek enerji üretimi sağlamıştır. Her iki türbin için de kış ve ilkbahar başı aylarında üretimde bir artış, yaz aylarında ise bir düşüş eğilimi gözlemlenmektedir. Greef 500W türbininin aylık üretimindeki dalgalanma, rüzgar koşullarına daha hassas bir tepki verdiğini gösterirken, Archimedes 1000W üretimi daha sınırlı bir aralıkta kalmıştır.



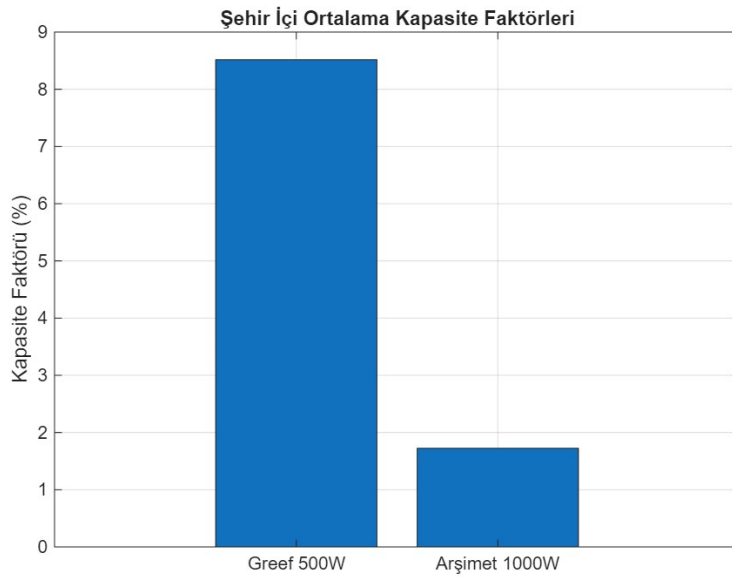
Şekil 4.6. Şehir içi aylık enerji hasadı karşılaştırması (3 adet)

Şekil 4.7’de şehir içi lokasyonunda yıllık toplam enerji üretimi karşılaştırıldığında, Greef 500W modelinin yıllık yaklaşık 1.119.090 Wh enerji ürettiği, Archimedes 1000W modelinin ise yıllık yaklaşık 453.127 Wh enerji ürettiği görülmektedir. Ormanlık araziye kıyasla her iki türbinin de üretimi artmış olsa da, Greef 500W türbini yine Archimedes 1000W modeline göre yaklaşık 2,4 kat daha fazla enerji üretmiştir. Bu, şehir içindeki ortalama rüzgar hızlarının Greef 500W’ın çalışma aralığına daha uygun olduğunu ve Archimedes 1000W’ın başlama hızını daha yüksek olmasından, Greef 500W’ın daha düşük hızlarda sürekli çalışmasının toplam üretime daha fazla katkı sağladığını göstermektedir.



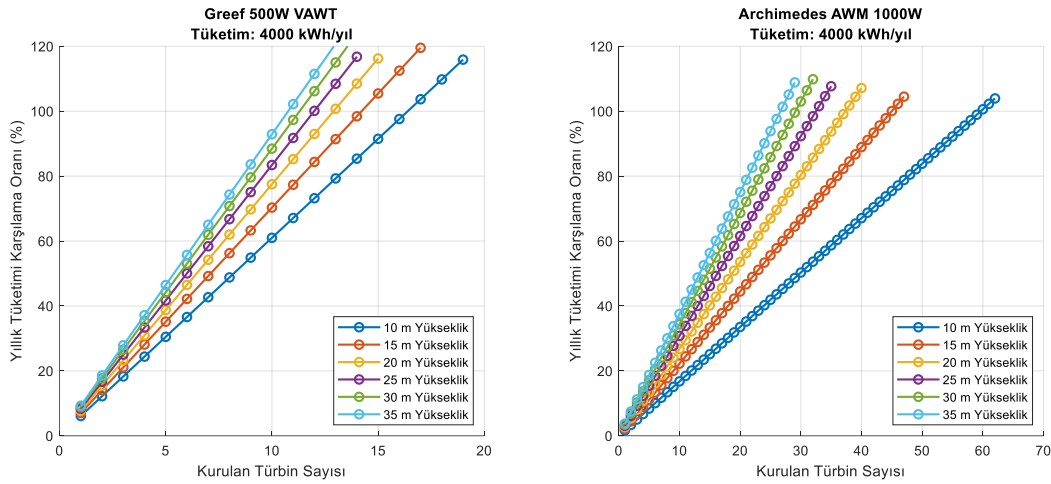
Şekil 4.7. Şehir içi yıllık enerji hasadı karşılaştırması (3 adet)

Şekil 4.8’de türbinleri kapasite faktörü karşılaştırmalı grafiğinde, şehir içi kurulu 3 adet Greef 500W ve 3 adet Archimedes 1000W rüzgar türbini için hesaplanan karşılaştırmalı kapasite faktörleri grafiksel olarak sunulmuştur. Yıllık bazda yapılan hesaplamalar sonucunda, Greef 500W türbinleri için ortalama kapasite faktörü %8,52, Archimedes 1000W türbinleri için ise %1,72 olarak belirlenmiştir.



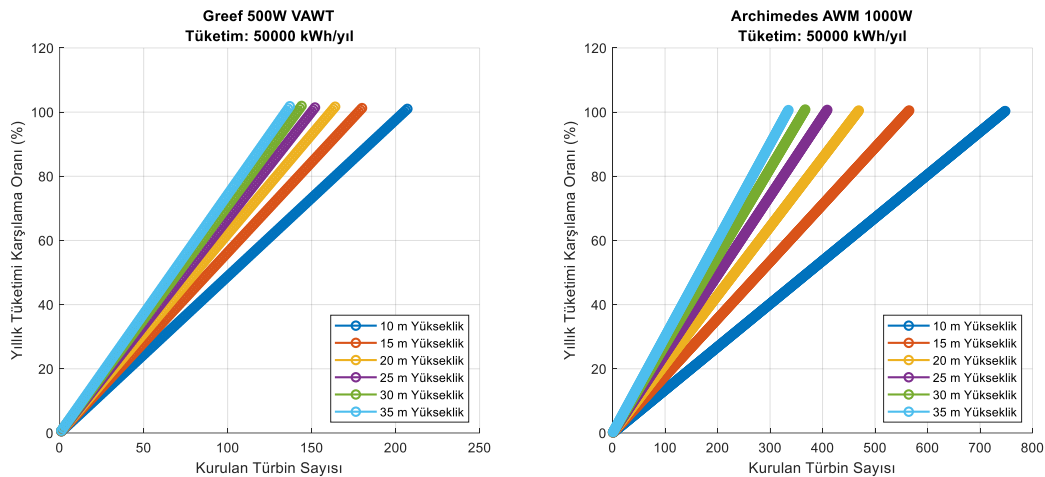
Şekil 4.8.Şehir içi ortalama kapasite faktörü

Bu bölümde, farklı senaryolar için türbinlerin tüketimi karşılama potansiyeli analiz edilmiştir. Şekil 4.9’da tek bir ortalama hanenin yıllık 4.000 kWh’lık enerji ihtiyacının karşılanma durumunu, türbin sayısı ve kurulum yüksekliğine bağlı olarak göstermektedir. Analize göre, Greef 500W türbini için, 15 metre yüksekliğe kurulan 11 adet türbinin bir hanenin tüm ihtiyacını karşılayabildiği görülmektedir. Kurulum yüksekliği 35 metreye çıkarıldığında ise bu sayı 6 adete düşmektedir. Bu durum, kurulum yüksekliğindeki artışın enerji verimliliğini önemli ölçüde artırdığını ortaya koymaktadır. Archimedes 1000W türbini ise daha düşük verimliliği nedeniyle aynı koşullarda daha fazla sayıda kurulum gerektirmektedir.



Şekil 4.9. Tek bir ortalama hane için tüketim karşılama analizi

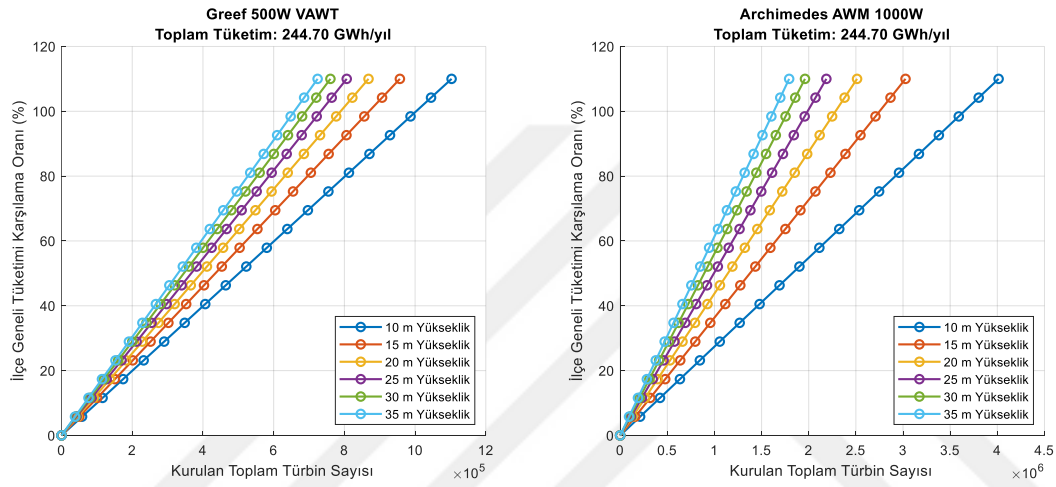
Vezirköprü'nün kırsal yapısı göz önüne alındığında, tarımsal sulama yapan işletmelerin enerji ihtiyacı kritik öneme sahiptir. Yıllık 50.000 kWh tüketimi olan varsayımsal bir tarımsal işletme için yapılan analiz Şekil 4.10'da sunulmuştur. Bu grafiğe göre, 35 metre yüksekliğe kurulacak 72 adet Greef 500W türbini, bu işletmenin yıllık tüm enerji ihtiyacını karşılayabilmektedir. Bu senaryo, tek bir işletme için yüksek sayıda türbin gerektirse de kooperatifleşme veya köy bazlı ortak projelerle uygulanabilir bir model sunmaktadır.



Şekil 4.10. Tek bir tarımsal işletme için tüketim karşılama analizi

Son olarak, ilçe genelindeki tüm hanelerin (toplam 27.938 adet) toplam enerji tüketiminin karşılanması senaryosu incelenmiştir. Şekil 4.11'de görüldüğü üzere, Vezirköprü'nün 244.7 GWh'lık toplam yıllık tüketimini karşılamak için çok büyük ölçekli bir yatırım

gerekmektedir. Örneğin, 35 metre yüksekliğe kurulacak Greef 500W türbininden yaklaşık 330.000 adet gerekmektedir. Bu sonuç, ilçenin tamamının enerjisinin sadece bu tip küçük ölçekli türbinlerle karşılanmasının pratik olmadığını, ancak bu türbinlerin özellikle şebekeden uzak kırsal hanelerin veya tarımsal işletmelerin enerji ihtiyacını karşılamada (off-grid veya on-grid) önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Dağıtık enerji üretimi modeli, şebeke yükünü azaltma ve yerel enerji güvenliğini artırma açısından değerli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır.



Şekil 4.11. Vezirköprü ilçesi genel tüketim karşılama analizi

4.3. Bulguların Genel Değerlendirmesi

Yapılan analizler, incelenen her iki lokasyonun da genel olarak düşük ila orta hızlı rüzgar rejimlerine sahip olduğunu göstermiştir. Ormanlık arazi, şehir içine kıyasla daha düşük ortalama rüzgar hızlarına sahiptir. Bu koşullar altında, Greef 500W VAWT modelinin, daha düşük başlangıç hızı ve nominal gücüne daha düşük rüzgar hızlarında ulaşması nedeniyle, her iki lokasyonda da Archimedes 1000W modeline göre daha yüksek enerji üretimi sağlamıştır.

Archimedes türbininin 1000W gibi daha yüksek bir nominal güce sahip olmasına rağmen, 3 m/s'lik kesme hızı, incelenen düşük hızlı rüzgar rejimlerinde sıkça devreye girmesini engellemiş ve potansiyelini tam olarak kullanamamasına neden olmuştur. Greef türbini ise daha düşük hızlarda dahi çalışarak, yıl boyunca daha tutarlı bir enerji hasadı sağlamıştır.

Bu bulgular, rüzgar türbini seçiminde sadece nominal gücün değil, aynı zamanda lokasyonun spesifik rüzgar karakteristiği ile türbinin başlangıç ve nominal çalışma hızları gibi operasyonel parametrelerinin uyumunun da büyük önem taşıdığını vurgulamaktadır. Düşük rüzgarlı bölgelerde, daha düşük başlangıç hızına sahip ve o bölgenin tipik rüzgar hızlarında verimli çalışabilen türbinler, nominal gücü daha yüksek ancak çalışma aralığı daha dar olan türbinlere göre daha avantajlı olabilir. Elde edilen sonuçlar, özellikle ön fizibilite aşamasında, dikkatli bir saha analizi ve türbin performans modellemesinin kritik olduğunu göstermektedir.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, iki farklı coğrafi özelliğe sahip (ormanlık arazi ve şehir içi) lokasyon için rüzgar enerjisi potansiyeli, geçmiş günlük ortalama rüzgar hızı verileri kullanılarak analiz edilmiş ve iki farklı rüzgar türbini modelinin (Greef 500W ve Archimedes 1000W) performansı karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Lokasyon bazlı rüzgar potansiyeline baktığımızda; incelenen her iki lokasyonun da (ormanlık arazi ve şehir içi), 15 metre türbin göbek yüksekliği için genel olarak düşük ila orta seviyede rüzgar potansiyeline sahip olduğu belirlenmiştir. Şehir içi lokasyonunun, ormanlık araziye kıyasla bir miktar daha yüksek ortalama rüzgar hızlarına ve dolayısıyla daha yüksek rüzgar enerjisi potansiyeline sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, ormanlık arazideki yoğun bitki örtüsünün rüzgar hızını önemli ölçüde azaltıcı etkisiyle açıklanabilir.

Türbin performans karşılaştırması irdelediğimizde; Greef 500W rüzgar türbini daha düşük başlangıç hızına sahip olması ve nominal gücüne daha düşük rüzgar hızlarında ulaşması nedeniyle, incelenen her iki düşük hızlı lokasyonda da Archimedes 1000W modeline göre daha yüksek enerji üretimi sağlamıştır.

Enerji üretimine baktığımızda, şehir içi lokasyonunda kurulu 3 adet Greef 500W rüzgar türbini ile yıllık 1119,1 kWh, 3 adet Archimedes 1000W rüzgar türbini ile ise yıllık 453,1 kWh enerji üretimi tahmin edilmiştir. Ormanlık alanda aynı türbin sayısı için yapılan hesaplamalarda ise, Greef türbinleri yıllık 320,7 kWh, Archimedes türbinleri ise yıllık 25,8 kWh enerji üretimi sağlamaktadır. Elde edilen bu sonuçlar, şehir içi alanının rüzgar potansiyeli ve enerji üretimi bakımından ormanlık alana göre daha uygun olduğunu ortaya koymaktadır.

Kapasite faktörü hesaplamalarına baktığımızda, şehir içi lokasyonunda yapılan değerlendirmede, Greef 500W türbinlerinin ortalama kapasite faktörü %8,52 olarak belirlenmiştir. Aynı alanda Archimedes 1000W türbinleri için hesaplanan kapasite faktörü ise %1,72 seviyesindedir. Ormanlık alanda kapasite faktörleri incelendiğinde, Greef 500W

türbinlerinde bu değer %2,44, Archimedes 1000W türbinlerinde ise %0,10 olarak hesaplanmıştır.

Tüketimi karşılama oranı incelendiğinde, Vezirköprü ilçesinin mevcut tüketim profili ve kırsal ağırlıklı yapısı dikkate alındığında, küçük ölçekli rüzgar türbinlerinin özellikle bireysel haneler ve tarımsal işletmeler için anlamlı bir enerji alternatifi sunduğu görülmektedir. İlçenin tüm enerji ihtiyacının bu tür sistemlerle tamamen karşılanması pratikte mümkün görünmese de yerel ölçekte yapılacak planlı uygulamalar, hem enerji arz güvenliğine katkı sağlayacak hem de kırsal bölgelerde yenilenebilir enerji kullanımını teşvik edecektir.

Metodolojik çıkarımlara göz attığımızda; Weibull dağılımı, geçmiş rüzgar hızı verilerini modellemek ve gelecekteki rüzgar rejimlerini simüle etmek için etkili bir araç olarak kullanılmıştır. (Guo ve diğerleri, 2016) tarafından önerilen günlük ortalama hızlardan saatlik hız tahmini yöntemi, saatlik veri eksikliği durumunda gün içi rüzgar değişkenliğini basit ancak işlevsel bir şekilde modellemeye olanak tanımıştır.

Elde edilen sonuçlar ve yapılan analizler ışığında aşağıdaki öneriler sunulmaktadır:

Bu çalışma geçmiş günlük ortalama verilere dayanmaktadır. Daha kesin ve güvenilir bir rüzgar enerjisi potansiyel analizi için, potansiyel kurulum sahalarında, özellikle planlanan türbin göbek yüksekliğinde veya yakın yüksekliklerde, en az bir yıl süreli, saatlik veya daha yüksek çözünürlüklü rüzgar hızı ve yönü ölçümlerinin yapılması şiddetle tavsiye edilir. Bu, z_0 ve d gibi parametrelerin daha doğru belirlenmesini ve rüzgar rejimi modellemesinin iyileştirilmesini sağlayacaktır.

Düşük ortalama rüzgar hızlarına sahip bölgelerde (bu çalışmadaki lokasyonlar gibi), türbin seçiminde sadece nominal güç kapasitesine odaklanılmamalıdır. Türbinin başlangıç hızı, nominal hıza ulaştığı rüzgar hızı ve güç eğrisinin düşük hızlardaki performansı gibi operasyonel parametreler dikkatle incelenmelidir. Bu çalışmada görüldüğü gibi, daha düşük nominal güce sahip ancak daha düşük hızlarda çalışabilen bir türbin, toplamda daha fazla enerji üretebilir.

Rüzgar türbini kurulumlarının potansiyel çevresel etkileri (gürültü, görsel etki, yaban hayatı vb.) ve sosyal kabul edilebilirlik gibi faktörler de değerlendirilmelidir. Bu çalışmada seçilen türbinlerin düşük gürültülü ve kuş/yarasa dostu olduğu belirtilse de, her proje için yerel koşullar dikkate alınmalıdır.

Bu çalışmada iki spesifik türbin modeli incelenmiştir. Piyasada farklı tasarımlara ve özelliklere sahip çok sayıda küçük ölçekli rüzgar türbini bulunmaktadır. Potansiyel sahalarda için daha geniş bir türbin yelpazesinin karşılaştırmalı analizi faydalı olabilir.

Özellikle şebekeden bağımsız uygulamalar için, rüzgar türbinlerinin güneş panelleri ve batarya depolama sistemleri ile entegre edildiği hibrit enerji sistemleri değerlendirilebilir. Bu, enerji arzının sürekliliğini ve güvenilirliğini artırabilir.

Sonuç olarak, bu tez çalışması, sınırlı verilere dayalı olarak rüzgar enerjisi potansiyelini değerlendirmek ve türbin performansını karşılaştırmak için kapsamlı bir metodolojik çerçeve sunmuştur. Elde edilen bulgular, düşük rüzgarlı bölgelerde türbin seçiminin dikkatli yapılması gerektiğini ve operasyonel parametrelerin nominal güç kadar önemli olabileceğini göstermiştir. Sunulan önerilerin, gelecekte yapılacak daha detaylı saha çalışmaları ve fizibilite analizleri için yol gösterici olması beklenmektedir. Rüzgar enerjisinin sürdürülebilir bir geleceğe katkısı göz önüne alındığında, bu tür analizlerin ve doğru teknoloji seçimlerinin önemi daha da artmaktadır.

KAYNAKLAR

- Altınsoy, A. (2013). *Aksaray Bölgesi Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray.
- Anbarsooz, M. and Amiri, M. (2022). Towards Enhancing the Wind Energy Potential At the Built Environment: Geometry Effects of Two Adjacent Buildings. *Energy*, 239.
- Anuraj, U., Hameed, S. H. I., Rajakaruna, R. M. D. A., Ktdys, P., and Madhuwantha, W. K. D. C. D. (2022, March). *Conceptualizing a Design and Prototyping Method for a Reconfigurable and Portable Archimedes Spiral Wind Turbine*. 7th International Conference on Environment Friendly Energies and Applications, Kilinochchi.
- Arpino, F., Scungio, M. and Cortellessa, G. (2018). Numerical Performance Assessment of an Innovative Darrieus-Style Vertical Axis Wind Turbine With Auxiliary Straight blades. *Energy Conversion and Management*, 171, 769-777.
- Arslan, Ö. P., Arıkan, Y., Erten, M. Y., ve Çam, E. (2014). Kırıkkale Üniversitesi'ne Kurulacak Olan Rüzgar Türbini İçin Enerji ve Maliyet Analizinin Yapılması. *International Journal of Engineering Research and Development*, 6(2).
- Ashanin, V., Elinov, D. and Birjukova, O. (2022, August). *Prospects for Using Vertical-Axis Wind Turbines In the Context of Current Urban Development*. International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, Penza.
- Bañuelos-Ruedas, F., Angeles-Camacho, C. and Rios-Marcuello, S. (2010). Analysis and Validation of the Methodology Used in the Extrapolation of Wind Speed Data at Different Heights. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(8), 2383-2391.
- Bektaş, A. (2013). *Binalarda Rüzgar Enerjisi Kullanımının Farklı Bölgeler Açısından Değerlendirilmesine Yönelik Bir Çalışma: Toki Tarımköy Projesi Örneği*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Beller, C. (2009). Urban Wind Energy-State Of The Art 2009 (Risø-R-1668(EN)). *Risø National Laboratory for Sustainable Energy, Technical University of Denmark*, Roskilde.
- Betz, A. (1926). *Windenergie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen*. Leipzig: VDI-Verlag, 42.
- Budea, S. (2023). *Assessments Regarding the Performances of Wind Turbines From the Roofs of Buildings*. E3S Web of Conferences 404, Bucharest.
- Bulum, Ö. (2019). *Samsun İli Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Uygun İstatistiksel Dağılımlar Yardımıyla Değerlendirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.

- Bulut, A. (2022). *Rüzgar Potansiyelinin Tahmininde Weibull Dağılım Parametrelerinin Belirlenmesi: Isparta Bölgesi için Çalışma Örneği*, Yüksek Lisans Tezi, Isparta Uygulama Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Isparta.
- Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N. and Bossanyi, E. (2001). *Wind energy handbook* (Birinci Baskı). Chichester: John Wiley & Sons.
- Buyruk, T. (2019). *Türkiye Kıyılar Rüzgar ve Dalga İklimi ile Enerji Potansiyelinin CBS Tabanlı Elektronik Atlası*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Carcangiu, S. and Montisci, A. (2012, 9-12 Eylül). *A Building-Integrated Eolic System for The Exploitation Of Wind Energy in Urban Areas*. Proceedings of the 2nd IEEE International Energy Conference, Florence.
- Çoban, A. (2013). Vezirköprü İlçesinin İdari Coğrafya Analizi. *The Journal of Academic Social Science Studies*, 6, 403-420.
- Çubukçu, M. ve Özdamar, A. (2003). *Enerji Eldesinde Ortalama Rüzgar Hızı Ölçüm Aralığı ve Hellmann Katsayısının Önemi: Söke Örneği*, Ege Üniversitesi.
- Dabbaghiyan, A., Fazelpour, F., Abnavi, M. D., and Rosen, M. A. (2016). Evaluation of Wind Energy Potential in Province of Bushehr, Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 455-466.
- Dar, A. S., Armengol Barcos, G. and Porté-Agel, F. (2022). An Experimental Investigation Of A Roof-Mounted Horizontal-Axis Wind Turbine In An Idealized Urban Environment. *Renewable Energy*, 193, 1049-1061.
- Djohra, S., Koussa, M. and Seddik, H. (2014). Technical and Economical Study of a Stand-Alone Wind Energy System for Remote Rural Area Electrification in Algeria. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 1(12), 638-643.
- Douak, M., Aouachria, Z., Rabehi, R. and Allam, N. (2018). Wind Energy Systems: Analysis of the Self-Starting Physics of Vertical Axis Wind Turbine. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1602-1610).
- Durak, M. ve Özer, S. (2008). *Rüzgar Enerjisi: Teori ve Uygulama* (İkinci Baskı). Ankara: Enermet Enerji Meteoroloji Müşavirlik ve Mümessillik Ltd. Şti.
- Elibüyük, U. ve Üçgül, İ. (2014). Rüzgar Türbinleri, Çeşitleri ve Rüzgar Enerjisi Depolama Yöntemleri. *YEKARUM e-Dergi*, 2(3), 1-14.
- Ermış, F. (2019). *Türkiye’de Rüzgar Enerjisi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- Ertan, M. (2022). *Kütahya’nın Seçilen İlçeleri İçin Rüzgar Potansiyelinin Değerlendirilmesi ve Teknik Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Kütahya.

- Faisal, A. E., Lim, C. W., Al-Quraishi, B. A. J., Alkawsi, G., Tan, C. H., Milano, J., Phing, C. C., Al-Farhany, K. and Tiong, S. K. (2025). Investigating the Techniques Used for Improving the Aerodynamic Performance of Archimedes Spiral Wind Turbines: A Comprehensive Review and Future Work Avenues. *Results in Engineering*, 25, 21.
- Farozan, I., Soelaiman, T. A. F., Soetikno, P. and Indartono, Y. S. (2025). The Effect of Rotor Aspect Ratio, Stages, and Twist Angle on Savonius Wind Turbine Performance In Low Wind Speeds Environment. *Results in Engineering*, 25.
- Ghazalla, R. A., Mohamed, M. H. and Hafiz, A. A. (2019). Synergistic Analysis of a Darrieus Wind Turbine Using Computational Fluid Dynamics. *Energy*, 189.
- Guo, Z., Chang, C. and Wang, R. (2016). A Novel Method to Downscale Daily Wind Statistics to Hourly Wind Data for Wind Erosion Modelling. *Communications in Computer and Information Science*, 569, 611-619.
- Güzel, B. (2012). *Açık Deniz Rüzgar Enerjisi, Fizibilite Adımları ile Bozcaada ve Gökçeada Örnek Çalışmaları*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- Hashem, I. and Mohamed, M. H. (2018). Aerodynamic Performance Enhancements of H-Rotor Darrieus Wind Turbine. *Energy*, 142, 531-545.
- He, J. Y., Chan, P. W., Li, Q. S., Huang, T. and Yim, S. H. L. (2024). Assessment of Urban Wind Energy Resource in Hong Kong Based on Multi-Instrument Observations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 191.
- Işıklı, İ., Köse, B. ve Sağbaş, M. (2023). Lazer tabanlı sensörler kullanılarak rüzgar hızı ve yönü ölçüm cihazı geliştirilmesi. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 3(12), 752-761.
- İnternet: Alaska Satellite Facility. (2025). *ASF Data Search Platform*. URL: <https://search.asf.alaska.edu/#/>. Son Erişim Tarihi: 26.02.2025.
- İnternet: Aslan, Y. ve Yaşar, C. (2005). *Dumlupınar Üniversitesi Kampüsündeki Rüzgar Enerjisinin Değerlendirilmesi İçin Örnek Bir Uygulama*. URL: https://www.emo.org.tr/ekler/64939da0c6ae8ee_ek.pdf. Son Erişim Tarihi: 09.04.2025.
- İnternet: Defensehere, (2022, Temmuz). *Türk Firma, Kartal Kanadından Esinlenerek Dünyanın En Verimli Rüzgar Türbinini Geliştirdi*. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=y0ONKFf9FT0>. Son Erişim Tarihi: 14.04.2025.
- İnternet: GADM, (2025). *Global Administrative Areas*. URL: <https://gadm.org/index.html>. Son Erişim tarihi: 24.02.2025.
- İnternet: Global Wind Atlas, (2025). *Global Wind Atlas*. URL: <https://globalwindatlas.info/en/>. Son Erişim Tarihi: 27.02.2025.

- İnternet: Halbes, (2025). *Halbes 3 kW Rüzgar Türbini Ürün Sayfası*. URL: <https://www.halbes.com.tr/product-page/halbes-3kw>. Son Erişim Tarihi:14.04.2025.
- İnternet: Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM), (2025). *İstasyon Bilgileri Veritabanı*. URL: <https://www.mgm.gov.tr/kurumsal/istasyonlarimiz.aspx?il=Samsun>. Son Erişim Tarihi: 22.04.2025.
- İnternet: Momentum ARGE, (2019). *Küçük Ölçekli Rüzgar Türbini*. URL: <https://momentumarge.com.tr/>. Son Erişim Tarihi:09.04.2025.
- İnternet: Our World in Data, (2024). *Electricity Production By Source*. URL: <https://ourworldindata.org/grapher/electricity-prod-source-stacked>. Son Erişim Tarihi: 20.04.2025.
- İnternet: REPA, (2006). *Türkiye Yıllık Ortalama Rüzgar Hızı Dağılımı*. URL: <https://repa.enerji.gov.tr/REPA/bolgeler/TURKIYE-GENELI.pdf>. Son Erişim Tarihi: 27.02.2025.
- İnternet: Samsun Ticaret ve Sanayi Odası. (2022). *Göstergelerle Elektrik Enerjisi 2022*. URL: <https://samsuntso.org.tr/upload/Dosyalar/Yayinlar/Diger/Gostergelerle-Elektrik-Enerjisi-2022-2022.pdf>. Son Erişim Tarihi: 03.07.2025.
- İnternet: Soner, (2024, Şubat). *Basınç ve Rüzgarlar*. URL: <https://www.sonerhocam.com/2024/02/11/basinc-ve-ruzgarlar/>. Son Erişim Tarihi: 24.12.2024.
- İnternet: Türkiye İstatistik Kurumu. (2024). *Hanehalkı Büyüklüğü, 2023. Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi Sonuçları*. URL: <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Adrese-Dayali-Nufus-Kayit-Sistemi-Sonuclari-2023-49685>. Son Erişim Tarihi: 03.07.2025
- İnternet: Türkiye İstatistik Kurumu. (2025). *Coğrafi İstatistik Portalı*. URL: <https://cip.tuik.gov.tr/>. Son Erişim Tarihi: 03.07.2025.
- İnternet: Vezirköprü Ticaret ve Sanayi Odası, (2025). *Vezirköprü'ye genel bakış* URL: <https://vezirkoprutso.org.tr/vezirkopru/genel-bakis/>. Son Erişim Tarihi:15.04.2025.
- İnternet: Worldometer, (2025). *World population*. URL: <https://www.worldometers.info/population/world/>. Son Erişim Tarihi: 03.04.2025.
- Jang, H., Kim, D., Hwang, Y., Paek, I., Kim, S. and Baek, J. (2019). Analysis of Archimedes Spiral Wind Turbine Performance By Simulation and Field Test. *Energies*, 12(24).
- Juan, Y.-H., Rezaeiha, A., Montazeri, H., Blocken, B., Wen, C.-Y. and Yang, A.-S. (2022). CFD Assessment of Wind Energy Potential for Generic High-Rise Buildings In Close Proximity: Impact of Building Arrangement and Height. *Applied Energy*, 321.
- Juan, Y.-H., Wen, C.-Y., Li, Z. and Yang, A.-S. (2021). Impacts of Urban Morphology on Improving Urban Wind Energy Potential for Generic High-Rise Building Arrays. *Applied Energy*, 299.

- Kamal, A. M., Nawar, M. A. A., Attai, Y. A. and Mohamed, M. H. (2023). Archimedes Spiral Wind Turbine Performance Study Using Different Aerofoiled Blade Profiles: Experimental and Numerical Analyses. *Energy*, 262.
- Karakaya, S. (2009). *Eskişehir-Kütahya-Bilecik İllerinde Rüzgar Potansiyellerinin Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Karipoğlu, F. (2021). *Türkiye'deki Denizüstü Rüzgar Potansiyelinin Teknik, Çevresel ve Sosyo-Ekonomik Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Kekezoğlu, B. (2013). *Yeni Bir Rüzgar Enerji Üretim Sisteminin Optimal Tasarımı, Gerçeklenmesi ve Performans İyileştirmesi*, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Keleş Çetin, S., Genç, M. S. ve Daldaban, F. (2019). Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri-Küçük Ölçekli Uygulamalar. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6(2), 539-551.
- Kim, K. C., Ji, H. S., Kim, Y. K., Lu, Q., Baek, J. H. and Mieremet, R. (2014). Experimental and Numerical Study of the Aerodynamic Characteristics of an Archimedes Spiral Wind Turbine Blade. *Energies*, 7(12), 7893-7914.
- Koç, E. and Kaya, K. (2015). Enerji Kaynakları-Yenilebilir Enerji Durumu. *Mühendis ve Makina*, 56(668), 36-47.
- Koç, T. (2008). Kuzeybatı Anadolu'da (Türkiye) Hava Tipleri. *Çanakkale Araştırma Türk Yıllığı*, 103-132.
- Konuk, E. B., Özdamar, A. ve Şentürk, U. (2018, 18-20 Nisan). *Arşimet Spirali Formunda Kanatlara Sahip, Geleneksel Olmayan Bir Rüzgar Türbininin Performansının Sayısal Olarak Belirlenmesi*. IV. Uluslararası Katılımlı Anadolu Enerji Sempozyumu, Edirne.
- Kor, K. (2010). *Şehir Coğrafyası Açısından Vezirköprü (Samsun)*, Yüksek Lisans Tezi, Uşak Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Uşak.
- Kouloumpis, V., Sobolewski, R. A. and Yan, X. (2020). Performance and Life Cycle Assessment of a Small Scale Vertical Axis Wind Turbine. *Journal of Cleaner Production*, 247.
- Köse, B. (2018). *Rüzgar Hız ve Potansiyelinin Stokastik Süreçlerle Modellenerek Karabük İlinde Uygulanması*, Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Kumar, P. M., Sivalingam, K., Lim, T. C., Ramakrishna, S. and Wei, H. (2019). Strategies for Enhancing the Low Wind Speed Performance of H-Darrieus Wind Turbine. *Clean Technologies*, 1(1), 185-204.

- Kurban, M., Hocaoglu, F. O. and Kantar, Y. M. (2007). Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Tahmininde Kullanılan İki Farklı İstatistiksel Dağılımın Karşılaştırmalı Analizi. *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 1(13), 103-109.
- Kuzey Anadolu Kalkınma Ajansı (KUZKA) (2016). Rüzgar Enerjisi Santrali (RES) Ön Fizibilite Raporu (Birinci Basım), *Kastamonu*, 28-29.
- Kwok, K. C. S. and Hu, G. (2023). Wind Energy System for Buildings In an Urban Environment. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 234.
- Lee, Y. T. and Lim, H. C. (2015). Numerical Study of the Aerodynamic Performance of a 500W Darrieus-Type Vertical-Axis Wind Turbine. *Renewable Energy*, 83, 407-415.
- Li, B., Luo, Z., Sandberg, M. and Liu, J. (2015). Revisiting the “Venturi Effect” In Passage Ventilation Between Two Non-Parallel Buildings. *Building and Environment*, 94, 714-722.
- Li, Q. S., Chen, F. B., Li, Y. G. and Lee, Y. Y. (2013). Implementing Wind Wurbines in a Tall Building for Power Generation: A Study of Wind Loads and Wind Speed Amplifications. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 116, 70-82.
- Liu, S., Zhang, L., Lu, J., Zhang, X., Wang, K., Gan, Z., Liu, X., Jing, Z., Cui, X. and Wang, H. (2025). Advances In Urban Wind Resource Development and Wind Energy Harvesters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 207.
- Longo, R., Nicastro, P., Natalini, M., Schito, P., Mereu, R. and Parente, A. (2020). Impact Of Urban Environment On Savonius Wind Turbine Performance: A Numerical perspective. *Renewable Energy*, 156, 407-422.
- Mamur, H., Bektaş, E., Çiçek, A., Korkmaz, F., Topaloğlu, İ. ve Arı, M. (2017). Programlanabilir Lojik Denetleyici Tabanlı Rüzgar İzleme Sistemi Uygulaması. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 9(2), 76-85.
- Mamur, H. ve Karayel, M. (2018). Türkiye, Samsun-Havza Rüzgar Enerji Potansiyeli Değerlendirilmesi. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(1), 316-323.
- Manwell, J. F., McGowan, J. G. and Rogers, A. L. (2009). *Wind energy explained: Theory, design, and application* (İkinci Baskı). Chichester: John Wiley & Sons.
- Metropolis, N. and Ulam, S. (1949). The Monte Carlo Method. *Journal of the American Statistical Association*, 44(247), 335-341.
- Micallef, D. and Van Bussel, G. (2018). A Review of Urban Wind Energy Research: Aerodynamics and Other Challenges. *Energies*, 11(9).
- Mohammadi, K., Alavi, O., Mostafaeipour, A., Goudarzi, N. and Jalilvand, M. (2016). Assessing Different Parameters Estimation Methods of Weibull Distribution to Compute Wind Power Density. *Energy Conversion and Management*, 108, 322-335.

- Oral, F., Ekmekçi, İ. ve Ayhan, O. (2011, 11 Mart). *Enerji Üretim Amaçlı Rüzgar Ölçümü ve Analizi*. Rüzgar Enerjisi ve Türbinleri Yerel Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 173-182,
- Örgen, F. K. (2017). *Rüzgar Enerji Sistemlerinin Analizi ve Yöresel Bir Uygulama*, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Özbektaş, S., Şenel, M. C. ve Sungur, B. (2023). Dünyada ve Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Durumu ve Kurulum Maliyetleri. *Mühendis ve Makina*, 64(711), 317-351.
- Özdamar, A., Ulgen, K. ve Kara, Ö. (2021). Rüzgar Hızlarının Daha Yüksekçe Taşınmasında Hellmann Katsayısının Değişimi Üzerine Bir Araştırma: Söke Örneği. *VI. Türk-Alman Enerji Sempozyumu Kitapçığı*, 493-500, İzmir.
- Özdemir, M. T. (2021). *Karabük İli Kırsal Kesimleri İçin Küçük Ölçekli Rüzgar Türbin Tasarımı ve Aerodinamik Performans Optimizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Yüksek Lisans Enstitüsü, Karabük.
- Öztürk, U. (2018). *Küçük Ölçekli Rüzgar Türbinlerinin Yerleşim Alanlarında Kullanımının Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- Refaie, A. G., Abdel Hameed, H. S., Nawar, M. A. A., Attai, Y. A. and Mohamed, M. H. (2021). Qualitative and Quantitative Assessments of an Archimedes Spiral Wind Turbine Performance Augmented by A Concentrator. *Energy*, 231.
- Rezaeiha, A., Montazeri, H. and Blocken, B. (2020). A Framework for Preliminary Large-Scale Urban Wind Energy Potential Assessment: Roof-Mounted Wind Turbines. *Energy Conversion and Management*, 214, 16.
- Sáenz-Díez Muro, J. C., Blanco Barrero, J. M., Jiménez Macías, E., Blanco Fernández, J. and Pérez de la Parte, M. (2011). Optimization of Power Generation From Small Wind Energy In Building Through Modular Wind Collector for Cornice© for Capturing and Amplification of the Vertical Wind Component. *In 2011 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*, (609-613). Logroño.
- Sayılmaz, S. (2019). *Osmaniye Bölgesinde Weibull Parametrelerinin Altı Farklı Yöntemle Hesaplanması ve Hata Analizlerinin Yapılması*, Yüksek Lisans Tezi, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Osmaniye.
- Shoaib, M., Siddiqui, I., Amir, Y. M. and Rehman, S. U. (2017). Evaluation Of Wind Power Potential in Baburband (Pakistan) Using Weibull Distribution Function. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 1343-1351.
- Shu, Z. R., Li, Q. S. and Chan, P. W. (2015). Investigation Of Offshore Wind Energy Potential in Hong Kong Based on Weibull Distribution Function. *Applied Energy*, 156, 362-373.
- Şan, B. (2018). *Türkiye’nin Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesi ve Yerel Yönetimlerce Kullanılabilirliğinin Araştırılması*, Uzmanlık Tezi.

- Tjiu, W., Marnoto, T., Mat, S., Ruslan, M. H. and Sopian, K. (2015). Darrieus Vertical Axis Wind Turbine for Power Generation I Assessment of Darrieus VAWT Configurations. *Renewable Energy* 75, 50-67.
- Tummala, A., Velamati, R. K., Sinha, D. K., Indraj, V. and Krishna, V. H. (2016). A Review on Small Scale Wind Turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 1351-1371.
- Türüdü, B. (2021). Isı Transferiyle Çalışan Anemometre Sistemleri. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 28,614-617.
- Vadhyar, A., Sridhar, S., Reshma, T. and Radhakrishnan, J. (2024). A Critical Assessment of the Factors Associated With the Implementation of Rooftop VAWTs: A Review. *Energy Conversion and Management: X*, 22.
- Wais, P. (2017). Two and Three-Parameter Weibull Distribution in Available Wind Power Analysis. *Renewable Energy*, 103, 15-29.
- Wilberforce, T., Olabi, A. G., Sayed, E. T., Alalmi, A. H. and Abdelkareem, M. A. (2023). Wind turbine Concepts for Domestic Wind Power Generation at Low Wind Quality Sites. *Journal of Cleaner Production*, 394.
- Yaniktepe, B., Koroğlu, T. ve Savrun, M. M. (2013). Investigation of Wind Characteristics and Wind Energy Potential in Osmaniye, Türkiye. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 703-711.
- Yazar, A. H. (2013). *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Aşar Kampüsünde Rüzgar Enerjisi Verimliliğinin İzlenmesi ve Elektrik Üretim Potansiyelinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
- Gençel, H. ve Tarhan, İ. (2019). Rüzgar Enerjisinin Önemli Geçiş Yerlerinden Olan Çanakkale Bölgesindeki Bazı Rüzgar Enerji Santralleri için Kapasite Faktörü İncelemesi. *Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 1(5), 120-139.
- Yıldız, N. E. (2020). Üniversite Yerleşkelerinde Ekolojik Peyzaj Tasarımı: Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Örneği. *International Journal of Social Humanities Sciences Research (JSHSR)*, 7(62), 3594-3604.
- Yıldız, Ö. F., Yılmaz, M., Çelik, A. ve İmık, E. (2020). Havalimanlarında Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Kullanılması. *Journal of Aviation*, 4(1), 162-174.

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı :Şükrü ÇELENKLİ

Bilimsel Faaliyetler

- 1- Çelenkli, Ş ve Zöhra, B. (2025). *Samsun Kentsel Alanlarında Arşimet Rüzgar Türbinlerinin Uygulanabilirliği ve Enerji Potansiyeli*. 6. Bilisel International Gordion Scientific Researches Congress. s358, Haziran 01-02, 2025, Ankara.

Eğitim Bilgileri

Lisans Eğitimi :Gazi Üniversitesi / Endüstriyel Sanatlar Eğitim Fakültesi / Endüstriyel Teknoloji Eğitimi

Görevi :Bafra Bilim ve Sanat Merkezi Teknoloji ve Tasarım Öğretmeni
Bafra/Samsun