

T.C.  
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARININ ENERJİ İHTİYACINI  
KARŞILAMADAKİ PAYININ ARTIRILMASI KAPSAMINDA TÜRKİYE  
RÜZGAR ENERJİSİNDEN YARARLANMA ANALİZİ**

**Yasin ASLAN**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**HAZİRAN 2023**

**ANTALYA**

T.C.  
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARININ ENERJİ İHTİYACINI  
KARŞILAMADAKİ PAYININ ARTIRILMASI KAPSAMINDA TÜRKİYE  
RÜZGAR ENERJİSİNDEN YARARLANMA ANALİZİ**

**Yasin ASLAN**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**HAZİRAN 2023**

**ANTALYA**

T.C.  
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARININ ENERJİ İHTİYACINI  
KARŞILAMADAKİ PAYININ ARTIRILMASI KAPSAMINDA TÜRKİYE  
RÜZGAR ENERJİSİNDEN YARARLANMA ANALİZİ

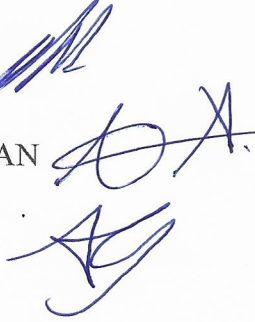
Yasin ASLAN  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 12/06/2023 tarihinde jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Afşin GÜNGÖR

Doç. Dr. Burçin DEDA ALTAN

Doç. Dr. Ali Özhan AKYÜZ



## ÖZET

# YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARININ ENERJİ İHTİYACINI KARŞILAMADAKİ PAYININ ARTIRILMASI KAPSAMINDA TÜRKİYE RÜZGAR ENERJİSİNDEN YARARLANMA ANALİZİ

Yasin ASLAN

Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Afşin Güngör

Haziran 2023; 33 sayfa

Bu tez çalışmasında yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji arzındaki konumunun önümüzdeki süreçler içerisinde artırılması hususunda ülkemizdeki rüzgar enerjisi uygulamalarına ilişkin araştırmalar yer almaktadır. Dünya genelinde artan nüfus ve sanayileşmeye bağlı olarak enerji ihtiyacı günden güne artmaktadır. Mevcut fosil yakıtların sınırlı olması, çevreye ve insan sağlığına olumsuz etkileri, kaynakların dünya genelinde homojen dağılmaması nedeniyle ekonomide dışa bağımlılığı tetiklemesi gibi sebeplerden ötürü yenilenebilir kaynaklar kullanılarak enerji elde edilmesine yönelik çalışmalar büyük bir hızla ilerlemektedir.

Yenilenebilir enerji uygulamaları içerisinde geleceğe yön verecek kaynakların güneş ve rüzgar enerjisi olduğu bilinmektedir. Rüzgar enerjisi yerli, ekonomide dışa bağımlılık gerektirmeyen, doğaya ve insan yaşamına olumsuz etkide bulunacak bir duruma yol açmayan, teknolojik yeniliklere açık uygulamalar olduğundan gelişim kaydeden bir kaynaktır. Türkiye’de rüzgar enerjisine dayalı kurulu güç 2011 yılında 1.729 MW iken 2022 yılı sonu itibari ile 11.396 MW değerine ulaşmış ve %500’ün üzerinde bir gelişim kaydetmiştir. Bu sıçrayış, rüzgar enerjisi uygulamalarının kurulu güç içerisindeki oranını %3,27 seviyelerinden %11 seviyelerine kadar çıkarmıştır. Önümüzdeki yıllarda da rüzgar enerjisi uygulamalarının Türkiye’nin enerji ihtiyacını karşılamada önemli bir rol oynaması beklenmektedir. Tahmin modellemelerine göre 2035 yılında 189,7 GW öngörülen kurulu güç içerisinde rüzgar enerjisinin 29,7 GW kurulu güce sahip olması ve bu sayede 90,1 TWh elektrik üretimine katkıda bulunması beklenmektedir. Rüzgar enerjisi uygulamalarının ülkemizde son yıllarda ivme kazanmasının bir diğer nedeni de yenilenebilir enerjiye eğilimin artmasının yanı sıra ciddi bir potansiyeli de bünyesinde bulundurmasıdır. Türkiye’nin toplam rüzgar enerjisi potansiyeli 47.849,44 MW’dır. Türkiye’de kara rüzgar potansiyelinin açık deniz üstü rüzgar potansiyeline nazaran 3,5 kat daha fazla olması, deniz üstü rüzgar santrali kurulumlarının 1,5-2 kat daha maliyetli olması gibi nedenlerden dolayı kara rüzgar potansiyelinin değerlendirilmesi stratejik olarak olumlu sonuçlar verebilir.

Rüzgar enerjisine dayalı kurulu gücün artırılmasının yanı sıra kurulum maliyetlerinin düşürülmesi adına türbin ve diğer aksamaların yerli üretimi oldukça önemlidir. Bu anlamda mevcutta Milli Rüzgar Enerji Sistemleri Geliştirilmesi ve Prototip Türbin Üretimi Projeleri gibi projeleri büyütme ve Ar-Ge planlamaları doğrultusunda milli projelere yönelmek gerek yedek parça hususunda gerekse tedarik süreçlerinin hızlandırılması noktasında ciddi manada önem arz etmektedir.

Türkiye'nin sürdürülebilir bir kalkınma sağlayabilmesi adına, istihdam oluşturma potansiyeli yüksek, ucuz ve güvenli bir enerji çeşidi olan rüzgar enerjisi uygulamaları yatırımlarını artırması önem arz etmektedir.

**ANAHTAR KELİMELEER:** Fosil yakıtlar, kurulu güç, rüzgar enerjisi, yenilenebilir enerji

**JÜRİ:** Prof. Dr. Afşin GÜNGÖR

Doç. Dr. Burçin DEDA ALTAN

Doç. Dr. Ali Özhan AKYÜZ

## **ABSTRACT**

### **ANALYSIS OF TÜRKİYE’S UTILIZATION OF WIND ENERGY IN SCOPE OF INCREASING THE SHARE OF RENEWABLE ENERGY SOURCES IN MEETING ENERGY NEEDS**

**Yasin ASLAN**

**MSc Thesis in Mechanical Engineering**

**Supervisor: Prof. Dr. Afşin Güngör**

**June 2023; 33 pages**

This study consist of the research on enhancing the forthcoming supply of the renewable energy sources in Türkiye’s future wind energy applications. The need for energy is increasing day by day due to industrialization and the global population growth. Because of the limited availability of fossil fuels, their negative effects on the environment and human health, the irregular distribution of resources through the world and the resulting economic dependence on foreign sources, global research on obtaining energy from renewable resources is accelarating more than ever before.

Solar and wind energy are believed to be the sources that will shape the future of renewable energy applications. Wind energy is a native source that does not require foreign economical dependency, it does not have a negative influence on the environment or human beigns and is a resource which can be improved because it is open for technological developments. As of january 2023, the installed wind energy capacity in Türkiye has increased by almost %500, from 1,729 MW in 2011 to 11,101 MW. This rise has boosted the percentage of wind energy installations from %3,27 to %11. Wind energy applications are anticipated to play a significant role in addressing Türkiye’s energy demands in the coming years. Our models predict that wind energy is expected to have 29,7 GW of the predicted 189,7 GW of installed power in 2035, contributing to the generation of 90,1 TWh of the produce of electricity. Alongside the growing trend, the significant potential of renewable energy applications is the reason behind the increasing capacity based on renewable sources in Türkiye. The wind energy potential in Türkiye is 47,849.44 MW. Due to the fact that the onshore wind potential in Türkiye is three-and-a half times greater than the offshore wind potential and the building of offshore wind farms is one-and-a-half or two times more expensive, evaluating onshore wind potential can have strategically beneficial outcomes.

In addition to increasing the installed power based on wind energy, local manufacturing facilities specializing in wind components are important to reduce installation costs. Because of this reason, it is crucial to extend currect projects, such as National Wind Energy Systems Development and Prototype Turbine Production Projects and to turn to national initiatives in accordance with R&D planning, both in terms of wind components and speeding up the supply processes.

A sustainable development for Türkiye can be achieved through enhancing its investment in wind energy applications, which offers high potential of employment and also supplies energy in an inexpensive and safe way.

**KEYWORDS:** Fossil fuels, installed power, renewable energy, wind energy

**COMMITTEE:** Prof. Dr. Afşin GÜNGÖR

Assoc. Prof. Burçin DEDA ALTAN

Assoc. Prof. Ali Özhan AKYÜZ

## ÖNSÖZ

Dünya genelinde etkisini gösteren COVID-19 salgını ve Rusya-Ukrayna savaşı ile beraber artan nüfus ve sanayileşmenin bir sonucu olarak enerji ihtiyacı günden güne artmaktadır. Fosil yakıt rezervlerine bağlılığın azaltılması için yenilenebilir enerji kaynaklarına olan eğilim günden güne artış göstermektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde dünya genelinde gelişim kaydeden rüzgar enerjisi uygulamaları ülkemiz için de özellikle enerji ithalatının azaltılması husunda oldukça önemli bir yere sahiptir. Bu tez çalışmasında ülkemizdeki enerji arzının karşılanması noktasında rüzgar enerjisinden faydalanmaya yönelik araştırmalar ve analizler detaylı olarak ele alınmıştır.

Tez çalışmamın belirlenmesinde, planlanmasında ve ilgili araştırmaların yapılmasında bilgi ve tecrübesini benden esirgemeyen sayın hocam Prof. Dr. Afşin GÜNGÖR'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Çalışmama vermiş oldukları değer ve destekten ötürü Arş. Gör. İsmet Faruk YAKA'ya teşekkür ederim.

Her ihtiyacım olduğunda desteklerini yanımda hissettiğim, hayattaki en büyük şansım olan kıymetli aileme sonsuz teşekkürler.



## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	iii
AKADEMİK BEYAN .....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xii
1. GİRİŞ .....	1
2. KAYNAK TARAMASI.....	3
2.1 Enerjinin Tanımı ve Gerekliği .....	3
2.2 Enerjinin Kaynaklarının Strüktürü.....	3
2.3. Yenilenemeyen Enerji Kaynakları .....	3
2.3.1. Kömür .....	3
2.3.2. Petrol.....	4
2.3.3. Doğal gaz .....	5
2.3.4. Nükleer enerji .....	5
2.4. Yenilenebilir Enerji Kaynakları .....	6
2.4.1. Güneş enerjisi .....	6
2.4.2. Jeotermal enerji .....	7
2.4.3. Hidroelektrik enerji.....	8
2.4.4. Hidrojen enerjisi .....	8
2.4.5. Dalga enerjisi.....	9
2.4.6. Biyokütle enerjisi.....	9
2.5. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Önemi .....	10
3. MATERYAL VE METOT .....	11
3.1. Rüzgar.....	11
3.2. Rüzgar Oluşumu.....	11
3.3. Rüzgar Özellikleri .....	11
3.3.1. Hız .....	11
3.3.2. Yön.....	11
3.3.3. Frekans .....	12
3.4. Rüzgar Enerjisinin Avantaj ve Dezavantajları .....	12

3.5. Rüzgar Türbinleri .....	14
3.5.1. Rüzgar türbini bileşenleri .....	14
3.5.2. Rüzgar türbini seçimi .....	15
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	18
4.1. Dünyada Rüzgar Enerjisi .....	18
4.2. Türkiye’de Enerjiye Genel Bakış ve Rüzgar Enerjisi .....	19
4.3. Türkiye’de Rüzgar Enerjisinin Kısa Tarihçesi.....	20
4.4. Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli.....	21
4.5. Türkiye’de Rüzgar Enerjisinin Mevcut Durumu .....	22
4.6. Türkiye’de Rüzgar Enerjisinin Geleceği .....	24
5. SONUÇLAR .....	27
6. KAYNAKLAR.....	30
ÖZGEÇMİŞ	

## AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Enerji İhtiyacını Karşılamadaki Payının Artırılması Kapsamında Türkiye Rüzgar Enerjisinden Yararlanma Analizi” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

12/06/2023

Yasin ASLAN



## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

C	: Karbon
CO <sub>2</sub>	: Karbondioksit
GW	: Gigawatt
km	: Kilometre
kW	: Kilowatt
kWh	: Kilowatt saat
MW	: Megawatt
m	: Metre
m <sup>3</sup>	: Metreküp
s	: Saniye
TWh	: Terawatt saat
%	: Yüzde

### Kısaltmalar

AB	: Avrupa Birliği
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
ARES	: Alaçatı rüzgar enerji santrali
Ar-Ge	: Araştırma ve geliştirme
ASELSAN	: Askeri Elektronik Sanayi
ETKB	: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
EÜAŞ	: Elektrik Üretim Anonim Şirketi
GEPA	: Güneş enerjisi potansiyeli atlası
GES	: Güneş enerji santrali
GSMH	: Gayrisafi millî hasıla

GZFT	: Güçlü yanlar-zayıf yanlar-fırsatlar-tehditler
HES	: Hidroelektrik santrali
JES	: Jeotermal enerji santrali
LPG	: Likit petrol gazı
MilRES	: Milli rüzgar enerji sistemleri
M.Ö.	: Milattan önce
MTA	: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü
MTEP	: Milyon ton eşdeğer petrol
NGS	: Nükleer güç santrali
OSB	: Organize sanayi bölgesi
RES	: Rüzgar enerji santrali
YEKA	: Yenilenebilir enerji kaynakları alanları
TÜREB	: Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 4.1. Türkiye kurulu gücünün yıllar itibari ile değişimi (Anonim 8).....	19
Şekil 4.2. Kurulu gücün kaynaklara göre dağılımı (Anonim 1).....	20
Şekil 4.3. Türkiye rüzgar atlası .....	21
Şekil 4.4. Türkiye’de rüzgar enerjisine dayalı kurulu güç grafiği (Anonim 1).....	22
Şekil 4.5. Türkiye’de rüzgar enerjisine dayalı kurulu gücün toplam güce oranı (Anonim 1).....	22
Şekil 4.6. Kaynaklar bazında güç tahminlemesi .....	26

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<b>Çizelge 3.1.</b> Rüzgar enerjisi GZFT analizi .....	12
<b>Çizelge 4.1.</b> Türkiye’de devrede olan RES profili .....	23
<b>Çizelge 4.2.</b> Elektrik üretim tesisi için yerli katkı desteği verilecek santrallerin kaynak bazlı sayıları .....	25

## 1. GİRİŞ

Enerji kaynakları sağlık, eğitim ve gıda sektörü dâhil günlük yaşamın vazgeçilmez bileşenlerinin pek çoğu ile direkt bağlantılı olgulardan biridir. Dolayısıyla gündelik yaşamın idame ettirilmesi hususunda vazgeçilmez bir boyuttadır. Evrendeki tüm maddelerin bir enerji gerekliliği vardır. Yaşamın olmazsa olmazları arasında sayılabilecek ulaşım, iletişim, üretim ve tarım gibi başlıkların sürdürülebilmesi adına enerji zaruri boyutta önemli bir kavramdır (Görgülü 2022).

Enerji kaynakları yenilenemez ve yenilenebilir enerji kaynakları olmak üzere iki sınıfta incelenebilir. Yenilenemez enerji kaynakları sürdürülebilir yapıda olmayan, çevreye zarar veren ve yeryüzünde yalnızca belli noktalarda rezervleri bulunan kaynaklardır ve kömür, petrol ve doğal gaz olarak kendi içinde sınıflandırılabilir. Yenilenebilir enerji kaynakları ise sürdürülebilir yapıda çevre dostu kaynaklardır ve rüzgar enerjisi, güneş enerjisi, hidroelektrik enerjisi, jeotermal enerji, dalga enerjisi, biyokütle enerjisi ve hidrojen enerjisi olarak kendi içinde sınıflandırılabilir (Saha vd. 2023).

Tüm yaşamsal faaliyetlerin sürdürülebilirliği açısından devletlerin asli görevlerinden kabul edilebilecek hususlardan birisi de enerjinin güvenli ve kesintisiz bir şekilde tüm vatandaşlara arz edilmesidir. Çünkü enerjiye erişim, temel hizmetlerin sağlanması ve ekonomik büyüme için bir ön koşuldur. Geline noktada enerjinin kullanılabilirliği, erişilebilirliği ve güvenliği önemli kalkınma göstergeleri olarak göz önüne çıkmaktadır.

Enerji arzının tedariki kadar önemli olan bir diğer husus da tedariki sağlanan enerjinin ne kadarının yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılandığıdır. Enerji ihtiyacının beklenen seviyede yerli ve temiz kaynaklar aracılığıyla sağlandığı ülkelerde ekonomik kalkınma ve ekolojik sürdürülebilirliğin sağlanması, iklim değişikliği ile mücadele konularında kolay çözümler elde edilmektedir (Chu vd. 2023). Özellikle gelişmiş ve gelişmekte olan dünya ülkelerinin hemen hemen hepsinde ekonomide dışa bağımlılığın azaltılması ve çevre sorunları ile mücadele kapsamında finansal gelişme, teknolojik yenilikler ve ekonomi politikalarının desteğiyle yenilenebilir enerji potansiyelinden en optimum seviyede yararlanmak kaçınılmaz boyutta öneme sahip olmuştur.

Sosyal ekonominin hızlı gelişimi, küresel boyutta nüfus artışının kontrol edilemez seviyelere yükselmesi, fabrikalaşmanın artması ve tüm dünya ülkelerinde enerjiye zorunlu bağımlılık, alternatif enerji elde etme metodolojilerinin geliştirilmesi ve yenilenebilir enerji kaynakları potansiyellerinin efektif kullanımı hususlarında önemli ölçüde değer kazanmıştır. Geleneksel fosil yakıtların enerji ihtiyacını karşılamada birincil boyutta kullanılmasına karşın küresel ısınma ve hava kirliliği gibi pek çok çevresel sorunu tetikleme, rezervlerin sınırlı olması sebeplerinden kaynaklı sürdürülebilir olmaması ülkelerin yenilenebilir enerji teknolojilerine teşvik noktasında atılımlar yapmasına vesile olmuştur (Zheng vd. 2023).

Yenilenebilir enerji kaynakları içinde dünya genelinde kurulu rüzgar enerjisi kapasitesindeki hızlı artış özellikle potansiyel olarak ciddi kazanımlar elde edilebilecek ülkeler için bu sektörde küresel bazda ivmelenmenin yakalanması ve enerji ithalatının azaltılıp ülkedeki parayı içeride tutma konularında önem kazanmaktadır (Liu vd. 2023).



Yenilenebilir enerji sektöründe küresel rüzgar enerjisi piyasasının 2017 yılında 50 GW'ın üzerine çıkması rüzgar enerjisinin hızla büyüyen bir enerji kaynağı olduğunun yegane göstergelerinden biridir (Li vd. 2020).

Ülkemiz dünyanın en çok enerji tüketen ilk 20 ülkesinden biridir. Bu bağlamda artan nüfus yoğunluğunu taşımak, sanayi ve teknolojideki hızlı gelişmelere ayak uydurabilmek ve global çaptaki krizlerin ülke içinde yönetilebilir seviyede azaltılması hususlarının sağlanması noktasında enerjiye duyulan ihtiyaç günden güne artmaktadır. Bu enerji ihtiyacının; potansiyelin doğru yatırımlarla yerinde, yerli ve temiz kaynaklardan karşılanması gelişmişlik ve refah düzeyinin yukarılara çekilmesi hususunda ciddi önem arz etmektedir.

2022 yılında elektrik üretiminin %56,8'ini fosil yakıtlar aracılığıyla üreten ve enerji ihtiyacının yaklaşık dörtte üçünü ithal eden Türkiye için hem temiz enerji üretimi hem de enerjide dışa bağımlılığı azaltma konularında pozitif yönde ivme kazanabilmek adına kilometrekare başına 5 MW gücünde rüzgar santrali kurulabilecek potansiyelin optimum seviyede kullanılması, rüzgar enerjisine dayalı kurulu gücün ve toplam kurulu güç içerisindeki oranının artırılması ciddi manada önem arz etmektedir (Anonim 1).

Bu tezin amacı, Türkiye'deki rüzgar enerjisi uygulamaları üzerine araştırmalar yapmak ve geleceğe yönelik senaryolar hakkında stratejik analizler gerçekleştirmektir. Ülkemizde enerjinin yerli ve milli olması için geliştirilen projeler, yatırım ve teşvik planları, rüzgar enerjisi uygulamalarının gelişim ve değişim süreçlerini incelemek tezin hedefleridir.

## 2. KAYNAK TARAMASI

### 2.1 Enerjinin Tanımı ve Gerekliliği

Yunanca *energeia* kelimesinden gelen ve ilk olarak M.Ö. 4. yüzyılda Yunan filozof Aristo'nun çalışmalarında görülen, ilk kez *vis visa* kavramı yerine Thomas Young'un kullanmış olduğu enerji kavramı bir cismin iş yapabilme kabiliyeti olarak tanımlanabilir (Töman ve Odabaşı Çimer 2016).

Enerji; mekanik, elektrik, ısı ve kimyasal olmak üzere dört çeşitte değerlendirilebilir ve çeşitli tepkimelerle birbirlerine dönüştürülebilir.

Enerji, toplumların refah seviyesini doğrudan etkileyen ve belirleyen vazgeçilemez bir unsurdur. Bir ülkenin eğitim, tarım, hizmet, sosyal, turistik ve kültürel tüm süreçlerini etkileyen ve şekillendiren yegane kavramdır. Bu bağlamda toplumların ayakta kalma mücadelelerini devam ettirmek ve globalleşen dünya ekonomisinde var olabilmek adına devletler ihtiyaç duyulan enerjiyi düşük maliyetli ve temiz bir şekilde sağlamak zorundadırlar.

### 2.2 Enerjinin Kaynaklarının Strüktürü

Enerji kaynakları bakış açısının farklılığına göre farklı kategorilerde sınıflandırılabilir.

Herhangi bir farklılığa uğramayan enerji kaynakları birincil enerji kaynakları olarak tanımlanmakta ve kömür, petrol, doğal gaz, nükleer, biyokütle, hidrolik, güneş, rüzgar ve dalga enerjisi bu sınıfta değerlendirilmektedir. Elektrik, ikincil kömür, kok, hava gazı ve LPG ise birincil enerjinin değişime uğraması sonucu elde edilen ikincil enerji olarak adlandırılabilir.

Diğer ve yaygın sınıflandırma ise çevreye karşı zararlı, yüksek maliyetler gerektiren ve tükenbilir değerlendirilen yenilenemeyen enerji kaynakları ve çevre duyarlılığı nispeten daha fazla, az maliyetli ve tükenmeyen kaynaklar olan yenilenebilir enerji kaynaklarıdır. Yenilenemeyen enerji kaynakları fosil kaynaklı ve çekirdek kaynaklı olmak üzere iki sınıfta incelenebilir. Kömür, petrol ve doğal gaz fosil kaynaklı; uranyum ve toryum ise çekirdek kaynaklı yenilenemeyen enerji kaynaklarıdır. Hidrolik, güneş, biyokütle, rüzgar, jeotermal ve dalga enerjisi ise yenilenebilir enerji kaynakları çeşitleridir (Koç ve Kaya 2015).

### 2.3. Yenilenemeyen Enerji Kaynakları

Bu çalışma kapsamında yenilenemeyen enerji kaynakları kömür, petrol, doğal gaz ve nükleer enerji olarak incelenecektir.

#### 2.3.1. Kömür

Ana elementi C olan ve bitkilerin milyonlarca yıllık bir süreç içerisinde değişmesi sonucu oluşan kömürün üretimi artan enerji arzına dayalı son otuz beş yıllık süreç içerisinde neredeyse iki kat artmış ve dünya elektrik üretiminde 2021 yılı verilerine göre %35,9'luk payla ilk sırada yer almıştır (Anonim 2).

Küresel enerji arzının %28,1'i kömürle yapıldığından rezervlerin konumu da oldukça önemli bir yer kaplamaktadır (IEA 2023). Dünyada kömür rezervlerinde ABD, Çin, Hindistan, Rusya ve Avustralya öncü ülkelerdendir. Bu ülkelerdeki toplam rezerv yaklaşık 600 milyar tona tekabül etmektedir ve dünya genelindeki rezervlerin %80'ini kapsamaktadır (BP 2022).

Ülkemizdeki kömür rezervlerinin sınırlı olması nedeniyle enerji ihtiyacının karşılanması noktasında kömür ithalatı yapmaya zorunlu bir durum söz konusudur. Bu zorunluluğun minimum seviyelere indirilmesi adına MTA tarafından uzun yıllardır arama çalışmaları işletilmektedir. 19,31 milyar tonu linyit, 1,52 milyar tonu taş kömürü olmak üzere toplam 20,84 milyar ton kömür rezervi bulunmaktadır (Anonim 3).

Türkiye'de uzun yıllardır toplam enerji üretiminde kömürün %25-%30 seviyelerinde olduğu görülmektedir. Bu da kömürün Türkiye'de enerji üretiminde vazgeçilmez kaynaklardan biri olduğunun yegane göstergesidir. Dolayısıyla rezervlerin en optimum seviyede kullanılması ve arama çalışmalarının sürdürülebilirliği, kömür ile birlikte çalışabilecek hibrit enerji sistemlerinin üretime kazandırılması, verimliliğin artırılması adına Ar-Ge merkezlerinin oluşturulması ve temiz kömür teknolojileri geliştirilerek çevreye olumsuz etkilerinin azaltılması; ülkemizin enerjide dışa bağımlılığının azalması, yerli kaynaklar kullanılarak istihdamın artırılması gibi noktalarda ciddi önem arz etmektedir. Ancak her ne kadar temiz kömür teknolojileri geliştirilmeye çalışılsa da rezervlerin sınırlı ve tükeneceğinin bilinmesinden dolayı Türkiye'de kömür üzerinde geliştirici faaliyetler sürdürülürken özellikle yenilenebilir enerji kaynakları kullanımının yaygınlaştırılması ve teşvik stratejilerinin geliştirilmesi noktasında somut adımlar atılması zaruri olarak değerlendirilmektedir.

### 2.3.2. Petrol

Organik maddelerin basınç ve ısıya maruz kalarak bozunmasıyla meydana gelen ve kullanımı birçok alanda zorunlu olan petrolün 2019 yılı resmi verilerine göre rafinerisinin yaklaşık yarısının Orta Doğu ülkelerinde bulunması pek çok ülkeyi petrole bağımlı hale getirmektedir (Anonim 1).

Petrolün yaklaşık %70 kadarı ulaşım alanında kullanılsa da diğer temel ve ticari gereksinimlerin karşılanmasında kullanılan bir ham madde de olmasından kaynaklı enerji sürdürülebilirliği açısından önemli bir noktada değerlendirilebilir (Görgülü 2022).

Ülkemiz, jeopolitik konumu nedeniyle petrol zenginliği bakımından komşu ülkeleri kadar iyi bir durumda değildir. Dolayısıyla Türkiye petrol tüketiminin yalnızca %7'si yerli üretimle karşılanmaktadır. Sanayi ve ulaşımın hemen hemen her alanında kullanılan petrolün stratejik önemi tüm ülkeler için olduğu gibi enerjide dışa bağımlı ülkemiz için de ciddi bir yere sahiptir (Koçman 2022).

Türkiye'nin petrol stratejilerini belirlerken, petrolce zengin ülkelere komşu olması ve enerji geçiş yollarının kavşağında bulunması durumlarını avantaja çevirici hamlelere odaklanması gerektiği kaçınılmaz gerçeklerden biridir.

### 2.3.3. Doğal gaz

Yoğun olarak konutlarda, sanayide ve hizmet sektöründe kullanılan, rezervlerin Rusya, İran ve Katar'da yoğunlukta olduğu doğal gazın; artan enerji talepleri ve fosil yakıtlara bağlılıktan dolayı arz ve talebi günden güne artmaktadır (Kan vd. 2019).

Yapılan çalışmalar ve analizler neticesinde 2030 yılına kadar kullanım oranında artış beklenen tek fosil yakıt doğal gaz olarak değerlendirilmektedir. Bunun sebeplerinden biri olarak doğal gazın çevreye diğer fosil yakıtların verdiği gibi zarar vermemesi gösterilmektedir (İncekara 2021).

Ülkemizde doğal gaz tüketimi 2019 yılında yaklaşık 45,3 milyar m<sup>3</sup> iken bu tüketimin yalnızca 483 milyon m<sup>3</sup> kadarı üretilebilmiştir. Buna karşın son yıllarda sondaj çalışmalarının artması üretimi 2018 yılında %20, 2019 yılında ise %11 seviyelerinde artırmıştır (Anonim 1). Dolayısıyla Türkiye'nin orta ve uzun vadede kaynak çeşitliliğinin artırılması ve dışa bağımlılığının azaltılması adına sondaj faaliyetlerinin hız kazanması ve neticelendirilmesi gerekmektedir.

Doğal gazın çevreci, fosil yakıtlar içerisinde en verimli ve diğer kaynaklara nazaran daha ucuz olması sebebiyle ithalatı son yıllarda ciddi artış göstermiştir. Türkiye'nin de gelişmekte olan bir ülke olmasından kaynaklı günden güne artan bir enerji ihtiyacı vardır. Artan bu enerji talebi içerisinde doğal gazın yadsınamayacak bir paya sahip olması ve 2022 Ocak ayı verilerine göre üretimin tüketimi karşılama oranının %0,7 gibi az bir oranda olması bu konuda acil tedbirlerin alınması gerektiğine işaret etmektedir.

Sonuç olarak, ülkemizde doğal gazın tespitine yönelik arama ve inceleme faaliyetlerine ağırlık verilmelidir. Tespiti yapılan doğal gaz kaynaklarının kullanılabilir hale getirilmesi için gerekli teknolojik altyapılar hazırlanmalı ve üretim kapasitesini artıracak yatırım teşvikleri geliştirilmelidir (Konak 2019).

### 2.3.4. Nükleer enerji

Atom çekirdeğinden elde edilen nükleer enerji sürdürülebilir ve temiz bir enerji kaynağı olmasına karşın doğal bir süreç sonrasında ortaya çıkmadığından yenilenemeyen enerji kaynağı olarak değerlendirilmektedir.

Nükleer santrallerin en önemli fayda çıktılarında biri az yakıtla yüksek güç üretebilmeleridir. Bir örnekle açıklanacak olursa, 1000 MW güç üretmek için yıllık yaklaşık 2 milyon ton kömüre ihtiyaç duyulurken benzer bir nükleer santralde yaklaşık 190 ton doğal uranyum yeterli olacaktır (Sadiq vd. 2023).

Nükleer enerji pek tabii önemli bir enerji kaynağı olmasına rağmen birtakım potansiyel risk ve tehditleri de bünyesinde barındırmaktadır. Yüksek başlangıç maliyetlerinden dolayı yatırımcıların büyük bir kısmının bu alana yönelmek istememesi, uranyum rezervlerinin sınırlı olması, kansere yol açtığı bilinen radyoaktif atıklar ve bu atıkların nasıl bertaraf edileceğinin bilinmemesi, nükleer kazaların geri dönüşü olmayan sonuçlar doğurması nükleer enerjinin bazı dezavantajlarıdır (Meng vd. 2021). Ancak tüm bu dezavantajlara rağmen artan petrol ve doğal gaz maliyetlerinin yanı sıra kömür rezervlerinin sınırlı ve çevresel zararlarının fazla olmasından dolayı nükleer enerji, sürdürülebilir kalkınma için kaçınılmaz stratejik alternatiflerden biridir.

1973 yılında başlayan petrol krizi akabinde yatırımlarının ciddi ivmeler kazandığı nükleer enerji yaklaşık 30 ülkede kullanılmakta ve dünya enerji ihtiyacının %10'unu karşılamaktadır.

Ülkemizde ise biri inşaat diğeri projelendirme safhasında olan iki adet nükleer enerji santrali hayata geçecektir. Üçüncü bir santralin kurulumu adına ise fizibilite faaliyetleri işletilmektedir. İnşaat çalışmaları tamamlandıktan sonra Akkuyu NGS'nin yılda 35 milyar kWh elektrik üreterek ülkedeki ihtiyacın %10'unu karşılaması beklenmektedir (Anonim 4). Şu an projelendirme aşamasında olan Sinop NGS ise 4 reaktörden oluşacaktır ve ilk ünitenin 2023 yılında devreye alınması planlanmaktadır (Anonim 5).

Sanayileşmekte ve gelişmekte olan Türkiye için enerji güvenliği ve enerji arz çeşitliliğinin sağlanması adına NGS kurulum süreçlerinin hızlandırılması ve ekonomiye kazandırılması önem arz etmektedir.

## 2.4. Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Yenilenemeyen enerji kaynaklarının iklim değişikliği gibi toplumların sürdürülebilir sağlık politikalarını olumsuz yönde etkileyen çevre sorunlarına yol açması ve tükenen kaynaklar olmaları sebebiyle enerji verimliliğinin artırılması ve temiz enerji elde edilmesi için son yıllardaki enerji yatırımlarının merkezinde yenilenebilir enerji kaynakları yer almaktadır (Barnaş vd. 2023).

Başlıca yenilenebilir enerji kaynakları güneş, rüzgar, jeotermal, hidroelektrik, hidrojen, dalga ve biyokütle enerjisidir.

Rüzgar enerjisi bu bölüm kapsamında değil bir sonraki bölüm kapsamında detaylı olarak ele alınacak ve analiz edilecektir.

### 2.4.1. Güneş enerjisi

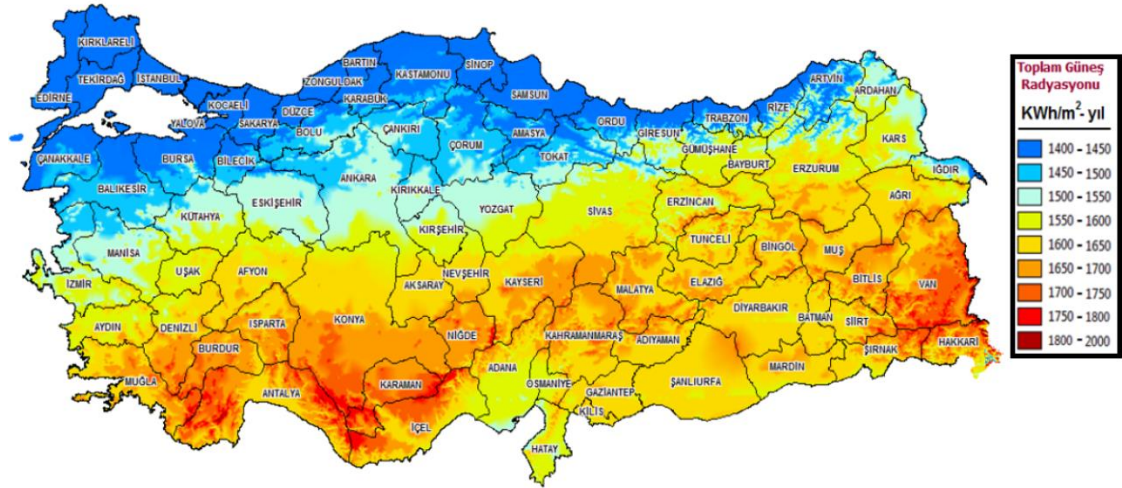
Güneş enerjisi uygulamaları, sürdürülebilir enerji amacına ulaşma noktasında ulusal ve uluslararası enerji politikalarında oldukça popüler bir konumda yer almaktadır (Koçaslan 2020).

Küresel çaptaki güneş enerjisi potansiyeli diğer sürdürülebilir kaynaklara nazaran çok daha yüksek seviyededir. Halihazırda yeryüzüne düşen güneş enerjisi, insanlar tarafından tüketilen yıllık ticari güçten toplam 200 kat daha fazladır (Kumar vd. 2023). Bu da enerji arzının giderek arttığı yeryüzünde güneş enerjisinden yararlanma oranının artırılabilceği anlamına gelmektedir.

Potansiyelinin oldukça yüksek ve düşük yatırım maliyetleri ile yüksek verim alınabilir olmasından dolayı hemen hemen tüm dünya ülkelerinde güneş enerjisinden az veya çok enerji üretimi yapılmaktadır. 2020 Aralık verilerine dayanarak kurulu gücü 255 MW ile Çin lider ülke konumundadır. Çin'i 75 MW ile ABD ve 67 MW ile Japonya takip etmektedir. Ülkemiz ise 8275 MW ile dünya ülkeleri arasında 14. sırada yer almaktadır (Anonim 5).

Ülkemiz, coğrafi konumu hasebiyle önemli bir güneş enerjisi potansiyeline sahiptir. Şekil 1.'de Türkiye GEPA görünümü ve potansiyel atlası gösterilmiştir.

Özellikle İç Anadolu Bölgesi'nin güney kısımları ve Akdeniz Bölgesi'nde toplam güneş radyasyonunun diğer bölgelere ve illere nazaran daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Bu kapsamda potansiyelin bu alanlarda değerlendirilmesinin verimlilik açısından daha olumlu olacağı düşünülmektedir.



**Şekil 2. 1.** GEPA'da yer alan Türkiye güneş enerjisi genel potansiyel görünümü (Anonim 1)

Türkiye'de güneş enerjisi uygulamaları son yıllarda oldukça ciddi bir ivme kazanmıştır. Son 6 yılda kurulu güç 833 MW'dan 8479 MW'a çıkarak %1000'den fazla bir gelişim kaydetmiştir. Bu gelişim, kurulu güç içerisinde güneş enerjisinin rolünü de değiştirmiş ve 2023 Ocak verilerine göre %9,3 seviyelerine gelmiştir (Anonim 1).

Yıllık ortalama 2460 saat güneşlenme potansiyeline sahip ülkemiz için güneş enerjisinden azami fayda sağlanacak teknolojilerin geliştirilmesi, güneş enerjisi kullanılarak çalışan sistem ve uygulamaların artırılması önem arz etmektedir (İnce 2021).

#### 2.4.2. Jeotermal enerji

Yer altından çıkan sıcak su ve su buharından elde edilen ısı enerjisi olarak tanımlanabilen jeotermal enerji; fosil yakıtların çevreye olan zararlarının azaltılması, enerjinin sürdürülebilir gelişiminin sağlanması, enerji kullanımının verimliliğinin artırılması noktalarında alternatif bir enerji kaynağı olarak değerlendirilmektedir (Liu vd. 2022).

Jeotermal enerji kullanımını üç ana sınıfta toplamak mümkündür.

- Doğrudan kullanım ve bölgesel ısıtma sistemleri: Bu sistemler, yeryüzüne yakın yerlerde bulunan kaynaklardan gelen sıcak suyu kullanmaktadır. Gıda dehidrasyonu, süt pastörizasyonu ve altın madenciliğinde yaygın olarak kullanılmaktadır.
- JES: Yüksek sıcaklıklarda su veya buhar gerektirmektedir. Türbin ve jeneratör kullanılarak elektrik enerjisi elde edilir.

- Isı pompaları: Yapıları ısıtmak ve/veya soğutmak için yüzeye yakın sabit sıcaklıktan faydalanılır.

Ülkelere göre JES kurulumuna bakıldığında ABD 3714 MW ile ilk sırada yer alırken 2133 MW ile Endonezya ikinci sırada, 1918 MW ile Filipinler üçüncü sırada yer almaktadır. Yaklaşık 50 yıldır jeotermal enerjiden elektrik enerjisi üretimi faaliyetleri sürdürülen ülkemiz ise dünya ülkeleri arasında 1679 MW kurulu güç ile dördüncü sırada yer almaktadır (Anonim 5).

Türkiye’de özellikle Ege Bölgesi’nde bu konuyla ilgili ciddi çalışmalar işletilmektedir (Tunçbilek ve Yılmaz 2021). Bir tespitle örneklendirilecek olursa Türkiye’de bulunan 58 jeotermal santralin 28 tanesi Aydın ili sınırları içerisinde bulunmaktadır.

Türkiye’de 2015 yılında jeotermal enerji kurulu gücü 624 MW iken günümüzde 1679 MW seviyelerine çıkmıştır (Küçük 2022). JES elektrik üretim birim maliyetlerinin diğer enerji kaynaklarına bakılarak nispeten daha az maliyetli olması, ülkemizin yüksek jeotermal potansiyele sahip ülkeler içinde yer alması; sürdürülebilir enerji ve enerji güvenliği hususlarının sağlanması noktasında Türkiye’de jeotermal enerji yatırım ve teşviklerinin artırılması zaruri boyutta önem arz etmektedir.

#### **2.4.3. Hidroelektrik enerji**

Hidroelektrik enerji, su kaynaklarından elektrik üretmek için konsolide bir teknolojidir ve temiz bir yöntem olarak kabul edilir. Her ne kadar çevresel boyutta bazı tartışmalar söz konusu olsa da bölgesel ve küresel bazda ekonomiye sunduğu iyileştirmelerden dolayı hem kısa vadede kalkınma hem de sürdürülebilir enerji kaynaklarının yaygınlaştırılması açısından ülkelerin HES profili oldukça stratejik bir öneme sahiptir (Catolico vd. 2021).

Dünya geneline bakıldığında 2018 yılında hidroelektrik enerji vasıtasıyla elde edilen elektrik üretimi ortalama 4200 TWh seviyelerine ulaşmıştır. Hidroelektrik güç potansiyeli ise 1292 GW olarak açıklanmıştır. Bu seviyenin hidroelektrik enerji üretimi ve kullanımı bakımından oldukça üst seviyelerde olduğu kabul edilebilir (Albayrak ve Turanlı 2022).

Ülkemizde potansiyel bazda değerlendirme yapılacak olursa Fırat ve Dicle nehri dâhil olmak üzere yirmi beşten fazla nehir havzası vardır. Bu potansiyelin bir yansıması olarak ülkemiz 60 adet baraj 100 MW’den fazla kurulu güce sahiptir ve dünya genelinde hidroelektrik enerji üretiminde ilk 10’da yer almaktadır (Anonim 5). Ekonomik ömrü uzun ve yakıt gideri olmayan hidroelektrik enerjisinden yararlanma oranının artırılması, dışa bağımlılığın azaltılması ile paralel süreçler olarak ilerleyecektir. Dolayısıyla sosyal ve ekonomik bakımdan hidroelektrik enerjisinin geliştirilmesine daha çok imkân tanınmalıdır.

#### **2.4.4. Hidrojen enerjisi**

Temiz, düşük karbonlu, esnek ve verimli bir kaynak olan hidrojen enerjisi; enerji sistemleri içerisinde önemi günden güne artan bir kavramdır (Gao ve An 2022).

Hidrojen enerjisinin yaygınlaştırılması adına pek çok ülkede tesisler kurulmaktadır. Hidrojen üretimi yapılabilmesi ve enerji elde edilebilmesi için Çin, Arjantin, Güney Kore, Hindistan ve Libya'da hibrit sistemler geliştirilmektedir (Karabağ vd. 2021). Japonya'da deniz suyundan elde edilen hidrojen enerjisi, Almanya'da hidrojen depolama sistemlerinin geliştirilmeye çalışılması, AB'nin hidrojen ekonomisi üzerine yeni stratejiler oluşturması dünyada hidrojen enerjisinin ileride ciddi anlamda ivme kazanacağını göstergelerindedir.

Ülkemizde de Samsun, Giresun, Sinop ve Zonguldak'ta hidrojen üretim tesisleri oluşturmak adına ön fizibilite çalışmaları yürütülmektedir. Hidrojen ile çalışan araba yapımı, hidrojenin doğal gaz sektöründe kullanılması adına ileri hedeflerin konulması da ülkemizde hidrojen enerjisine dayalı sistemlerin gelişeceğine dair işaretlerdendir.

Tüm olumlu taraflarıyla beraber hidrojen enerjisi otomotiv sektöründe yakıt alternatifi olarak çok makul bir enerji çeşidi olarak görülse de hidrojenin diğer yakıtlara nazaran çok pahalı olması ve kurulum bedellerinin yüksek olmasından ötürü maliyet düşürücü teknolojik gelişmeler olmadan yaygınlaşması pek mümkün görülmemektedir. Bünyesinde birçok sorunu barındıran hidrojen enerjisi için daha fazla çalışma ve araştırma yapılarak problemlerin minimize edilmesi önem arz etmektedir.

#### **2.4.5. Dalga enerjisi**

Dalga enerjisi yüzey hareketleri sonucu oluştuğundan literatürde gel-git enerjisi olarak da adlandırılmaktadır (Bekar 2020). Su kaynaklarında oluşan dalgaların yaratmış olduğu itme gücünden yararlanıldığı için de %75'i sularla kaplı dünyamız adına potansiyel anlamda eşsiz bir olanaktır (Shabara ve Abdelkhalik 2023).

Yeryüzünün dalga enerjisi potansiyeli yıllık yaklaşık 32.000 TWh olarak hesaplanmıştır. Dalga enerjisi net gücü 574 GW olan Avustralya ve Yeni Zelanda dünya genelinde lider konumda yer almaktadır. Avustralya ve Yeni Zelanda'yı 324 GW ile Güney Amerika'nın batısı ve 286 GW ile Avrupa'nın kuzeyi ve batısı takip etmektedir.

8210 km kıyı uzunluğu olan ülkemizde ne yazık ki her kıyı bölgesinde küçük dalga enerji sistemleri kurmak için teknik manada uygunluk bulunmamaktadır. Türkiye'nin yaklaşık 2.11 GW dalga enerjisi potansiyeli vardır. Dalga enerjisi için en iyi kurulum yapılabilecek bölgeler olan İstanbul Boğazı'nın kuzeyi, Batı Karadeniz bölgesi ve Ege'nin güneybatı kıyılarında Ar-Ge çalışmaları yapılarak gerekli planlamaların oluşturulması önemlidir.

#### **2.4.6. Biyokütle enerjisi**

Fosil kökenli olmayan organik maddelerin farklı reaksiyonları sonucu elde edilen enerjiye biyokütle enerjisi adı verilmektedir ve 100 yıldan daha az zamanda kendisini yenileyebilmektedir. Biyokütle enerjisi yaygın olarak tarımsal kökenli olmakla beraber kentsel ve endüstriyel kökenli de olabilmektedir.

Çin, Hindistan, ABD, Almanya, İsveç, Finlandiya, Fransa, Avusturya ve Brezilya potansiyel olarak tarımsal altyapıya sahiptir ve teşvik politikaları uygulanmaktadır. Dünya toplam biyokütle üretim ve arzı, sıvı biyoyakıtlardan dolayı uzun yıllardır artış göstermektedir. Biyokütle enerjisi potansiyelinin 2050 yılında dünya elektrik üretiminin



%7,5'ini ve ulaşımda kullanılan yakıtın %27'sini karşılaması beklenmektedir (Bayraç ve Özarslan 2018).

Türkiye, biyokütle kaynağı elde edilmesi açısından oldukça zengin bir ülke olarak nitelendirilebilir. Ülkemizde yaklaşık 17 MTEP kullanılabilir seviyede biyokütle enerjisi vardır. Biyokütle enerjisine dayalı kurulu güç ülkemizde 2172 MW olup toplam kurulu güce oranı %2.14'tür (Anonim 1). Ülkemizdeki klasik biyokütle üretimi yerine modern biyokütle üretimine geçiş, düzgün atık planlaması, uzun vadede stratejik eylem planları, gerekli yasal düzenlemeler işletilerek biyokütle ve biyokütle enerjisi elde edilmesi bütünlük bir yaklaşımla ele alınmalıdır.

## 2.5. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Önemi

Dünya nüfusunun 2050 yılında 9,7 milyar olacağı öngörülmektedir. Öngörülen bu nüfusun tüm temel gereksinimleri enerji esasına dayanmaktadır. COVID-19'un etkileri, Rusya-Ukrayna savaşı, gıda krizleri gibi hususlar da önümüzdeki yıllarda yeryüzünü enerji arzı noktasında ciddi sorunlarla baş başa bırakacaktır. Mevcut ekosistemleri korumak için tüketim kalıplarında değişimlere ve enerjide radikal yeni teknolojilere ihtiyaç vardır (Kobayashi vd. 2022).

Yenilenemeyen enerji kaynakları rezervlerinin günden güne azalıyor olması ve çevresel boyutta tehlikelere mahal vermesi hasebiyle pek çok ülke enerji tedarik sistemlerini yenilenebilir enerji kaynakları üzerinde revize etme yoluna gitmiştir. Bir örnekle açıklamak gerekirse Güney Afrika elektrik ihtiyacının büyük bir kısmını kömürle çalışan eski elektrik santrallerinden elde etmektedir. Ancak kömüre bağımlılık ve eski işletim sistemleri nedeniyle hala sık sık elektrik kesintileri yaşanmaktadır.

İklim değişikliği ile mücadele; düşük karbonlu, temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji elde edilmesi hususu küresel çapta bir ivme kazanmakta ve bu alanda yapılan yatırımlar günden güne artmaktadır.

Tüm çalışmalar gözden geçirildiğinde enerjinin sürdürülebilir kullanımı, karbon emisyonunun azaltılması ve gelişmişlik seviyelerinin artırılması için ülkelerin yenilenebilir enerji potansiyellerini son damlasına kadar kullanmaları gerektiği göz önüne çıkmaktadır (Leng ve Zhang 2023).

Yenilenebilir enerji kaynaklarından, daha az nüfuslu ve/veya şebekeden uzak yerlerde, enerji depolama sistemleri geliştirilerek yararlanılabilir. Yine aynı şekilde Afrika ülkeleri incelenecek olursa yenilenebilir enerji potansiyelinin oldukça yüksek ancak teknolojik anlamda yeterli donanımların olmaması ve buna bağlı gelişmişliğin diğer ülkelere nazaran az olması hasebiyle yeşil kalkınmanın desteklenmesi kapsamında diğer ülke yatırımcılarının bu bölgelere yoğunlaşması küresel bazda sorunların çözümü noktasında faydalı olabilir.

Teknolojik gelişmelerin artırılması paralelinde doğru yatırımlarla yenilenebilir enerji teşviklerinin artırılması, ülkelerin dışa bağımlılık seviyelerinin azalması ve gelişmişlik düzeylerinin artırılmasına katkıda bulunacaktır.

### 3. MATERYAL VE METOT

Yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgar enerjisi kapsamında rüzgar oluşum ve özelliklerinin incelenmesi, rüzgar enerjisinin artı ve eksi yönlerinin değerlendirilmesi, rüzgardan elektrik enerjisi elde edilmesinde yaygınlıkla kullanılan rüzgar türbinlerine ilişkin araştırmaların sunulması, dünyada ve ülkemizde rüzgar enerjisi uygulamalarının araştırılması bu tezin kapsamını oluşturmaktadır.

#### 3.1. Rüzgar

Atmosferdeki havanın yatay hareketleri olarak değerlendirilen rüzgarı alçak basınç ile yüksek basınç arasında yer değiştiren hava akımı olarak tanımlayabiliriz. Rüzgar yönünü tespit etmek için rüzgar gülü, hızını tespit etmek için ise 1450 yılı civarlarında Leon Battista Alberti tarafından tanımı yapılan anemometre kullanılmaktadır.

#### 3.2. Rüzgar Oluşumu

Rüzgar oluşumu için öncelikli husus iki ayrı noktada basınç farkı olması gereğidir ve hava akımı her zaman alçak basınçtan yüksek basınca doğru ilerlemektedir.

Alçak basınç ancak ve ancak hava kütlelerinin genişleyip yükselmesi sonucu yani hava sıcaklığı artarsa iki merkezden birinde gözlemlenir. Sıcaklığı nispeten daha az bölgede ise hava soğuyarak sıkışır ve yoğunlaşır aşağı yönde çökmeye başlar. Bunun neticesinde meydana gelen yüksek basınç bölgesindeki hava alçak basınç bölgesine doğru ilerler ve akabinde rüzgar oluşur (Karaoğlu 2018).

#### 3.3. Rüzgar Özellikleri

Rüzgarın özelliklerini hız, yön ve frekans olarak inceleyebiliriz.

##### 3.3.1. Hız

Birim zamanda yapılan yer değiştirme hareketine hız adı verilir ve basınç farkı, basınç merkezleri arasındaki uzaklık, Dünya'nın kendi eksenine etrafındaki hareketi ve yer şekilleri rüzgar hızını etkileyen parametreler olarak kabul edilir. Yerden yüksekte, sürtünmenin minimum ve basınç farkının nispeten yüksek olduğu noktalarda rüzgar hızı yüksektir. Hızlı ve düzenli rüzgar daha fazla enerji oluşturacağından rüzgar enerjisinden yararlanılması planlanan hususlarda fizibilite çalışmaları bu parametreler ve kabuller doğrultusunda gerçekleştirilir.

Rüzgar hızının rastgeleliği ve doğrusal olmaması rüzgar enerjisinin kullanımını doğrudan etkilemektedir. Bundan dolayı son zamanlarda rüzgar hızı tahmin modellemesine ilişkin çalışmalar ilerletilmektedir. Çünkü etkili bir rüzgar hızı tahmin modeli, rüzgar enerjisi sistemlerinin yeterli ve verimli çalışmasını sağlamaktadır (Yang vd. 2023).

##### 3.3.2. Yön

Atmosfer hareketlerine bağlı olarak değişkenlik gösteren rüzgar yönü, türbin yerleştirilmesi gibi önemli hususların kararı noktasında önem arz etmektedir. Faaliyetler

incelendiğinde rüzgarın en çok estiği yön olan hakim rüzgar yönü üzerine pek çok çalışma olduğu gözlemlenmiştir.

Genel olarak rüzgarın hangi yönden kaç defa estiği tespit edilerek hakim rüzgar yönü belirlenmektedir. Dolayısıyla esme rakamlarını tespit edebilen bir rüzgar gülü vasıtasıyla basit olarak rüzgar yönü anlaşılacakla beraber geometrik hesaplamalar ve çeşitli formüllerle de hesaplama yapılabilmektedir (Avcı 2020).

Günümüz teknolojisinde enerji gülü olarak tanımlanan ve en fazla enerjinin üretileceği yön ve/veya yönleri gösteren sistemlerin büyük çapta üretim tesislerinde kullanılması rüzgardan maksimum fayda sağlamak adına önemlidir.

### 3.3.3. Frekans

Rüzgarın esiş sıklığına ya da sayısına frekans adı verilmektedir. Rüzgar frekansının belirlenmesi, uzanış doğrultularının tahmin edilmesi gibi konuların tespiti açısından önemlidir.

Rüzgar frekansı, rüzgar gülü diyagramları vasıtasıyla gösterilmektedir. Böylece, bir yerin hakim rüzgar yönüne bakılarak yer şekillerinin uzanış doğrultusu tahmin edilir.

### 3.4. Rüzgar Enerjisinin Avantaj ve Dezavantajları

Son yıllarda artan fosil yakıt tüketimi ciddi bir enerji krizine ve çevre sorunlarına yol açmaktadır. Yenilenebilir enerjinin geliştirilmesi ve kullanılması için rüzgar enerjisi önemli bir araç olarak pek tabi kabul görmüştür. Rüzgar enerjisi büyük rezervler, geniş bir dağıtım alanı ve kirlilik içermeyen yenilenebilir enerji kaynağı olduğundan özellikle son yıllardaki krizlerin bir sonucu da olarak ciddi ilgi görmektedir (Li vd. 2022).

Rüzgar enerjisi, kaynaklarının sınırsız olması ve geliştirilebilir teknolojiyle ivme kazanma potansiyeline sahip olduğundan revaçta olan enerji türlerinden biridir.

Rüzgar enerjisinin artı ve eksi yönlerinin değerlendirilmesi adına Çizelge 3.1.'de GZFT analizi sunulmuştur.

**Çizelge 3. 1.** Rüzgar enerjisi GZFT analizi

<b>G (Güçlü Yanlar)</b>	<b>Z (Zayıf Yanlar)</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Çevre dostu bir enerji çeşididir.</li> <li>• Amortisman süresi kısadır.</li> <li>• Tükenme durumu yoktur.</li> <li>• Doğada serbest halde bulunmaktadır.</li> <li>• Potansiyeli yüksektir.</li> <li>• Güvenli bir enerji kaynağıdır.</li> <li>• Enerji stratejileriyle uyumludur.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bakım onarım zorluğu vardır.</li> <li>• Yedek parça sayısı çoktur.</li> <li>• Erozyon riski barındırır.</li> <li>• Estetik değildir ve gürültülü çalışır.</li> <li>• Kuşların ölümüne neden olmaktadır.</li> <li>• Mevsimsel verimle çalışmaktadır.</li> <li>• Dengeli bir enerji kaynağı değildir.</li> </ul>

F (Fırsatlar)	T (Tehditler)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Yenilenmeye açık bir enerjidir.</li> <li>• İstihdama katkıda bulunur.</li> <li>• Kamuoyu desteği yüksektir.</li> <li>• Konutların enerji ihtiyacında kullanılabilir.</li> <li>• Pazar payı gittikçe büyümektedir.</li> <li>• Yatırım teşvikleri sağlanmaktadır.</li> <li>• Az yer kaplarlar.</li> <li>• Bulunduğu alanı paylaşabilirler.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Yatırım planlamalarında belirsizlikler olabilmektedir.</li> <li>• Öncü ülkeler rekabet gücünü artırmaktadır.</li> <li>• Parça tedarikinde dışa bağımlılık söz konusu olabilmektedir.</li> <li>• Rüzgar gücü her yerde aynı değildir.</li> <li>• Enerji depolanması problemi vardır.</li> </ul>

Rüzgar enerjisinin pek çok güçlü yanları ve fırsatları olmasına karşın bazı zayıf yönleri ve yatırım bazlı tehditleri de bulunmaktadır. Mevsime ve lokasyona bağlı rüzgar gücündeki belirsizlikler, enerjinin yatırım güvenliğini riske atmaktadır. Bu bağlamda rüzgar hızı tahmin modellemelerinin gelişen teknolojiye paralel güncellenmesi ve tolerans aralıklarının daraltılması oldukça büyük bir öneme sahiptir. Hassas gerçek zamanlı rüzgar tahmini, büyük ölçekli rüzgar enerjisi entegrasyonlarının sağlanmasına katkıda bulunacaktır. Dakikalar öncesindeki doğru rüzgar hızı tahminleri sayesinde rüzgar enerjisi yakalama oranı %6'dan %10'a çıkarılabilir ve yorgunluk yükünü %16 ile %25 arası azaltabilir (Li vd. 2023).

Rüzgar enerjisi yenilenemeyen enerji kaynaklarına nazaran her ne kadar yenilenebilir ve çevre dostu olarak nitelendirilse de kanatlar, jeneratör, iç dişliler ve diğer ilgili ekipmanlar yüksek sesli çalıştıklarından gürültü kirliliğine neden olmaktadır. Aynı zamanda kuşların geçiş yollarını engellemekte ve ölümlerine de sebep olabilmektedir. Dolayısıyla rüzgar türbinlerinin yerleşim yerlerinden uzak alanlarda konumlandırılması, mikro rüzgar türbinleri gibi standart rüzgar türbinlerinin dezavantajlarını engelleyici sistemlerin geliştirilmesi ilerleyen yıllarda rüzgar enerjisi uygulamalarının yaygınlaştırılmasının önünü açacaktır.

Rüzgar enerjisinin frekanslarındaki bozulmaların engellenmesi, türbin çıkışının iyileştirilmesi, şebeke esnekliği ve güvenilirlik açısından enerji depolama sistemleri teknolojilerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu geliştirmelerle beraber rüzgar enerjisi verim potansiyelinin gittikçe iyileştirileceği öngörülmektedir.

Rüzgar enerjisinin dezavantajları kısa ve uzun vadede doğru stratejiler geliştirip bu doğrultuda politikalar belirlenerek, ilerleyen teknolojiye paralel sistemler oluşturup kayıplar mümkün mertebe önlenerek, fizibilite çalışmaları uygun yapılmış yatırımların önü açılarak azaltılabilir.

Atmosfer dostu bir enerji kaynağı olması nedeniyle karbon emisyonunun azaltılması ve sürdürülebilir enerjinin sağlanması noktasında çevresel bazda, istihdam ve buna bağlı refah düzeyinin artırılması noktasında sosyoekonomik bazda, dışa bağımlılığın azaltılması ve GSMH'nin artırılması noktasında ekonomik bazda pozitif etkileri göz önünde bulundurulduğunda rüzgar enerjisi uygulamalarının genişletilmesi ve teknolojiyle

paralel dezavantajlarının en aza indirilmesi son yıllardaki enerji krizlerinin ve ülkelerin enerjide bağımlılık seviyelerinin azalması hususlarında oldukça önemli bir paya sahiptir.

### 3.5. Rüzgar Türbinleri

Rüzgar türbinleri, rüzgarın sağladığı itme gücünden yararlanarak kinetik enerjiyi önce mekanik enerjiye ve daha sonra elektrik enerjisine dönüştürerek elektrik üretimi sağlar ve pek çok bileşenden oluşur.

Günümüzdeki rüzgar teknolojisindeki en önemli araştırmalar, rüzgar türbinlerinin mevcut sistemlerinin yeni teknolojiye angaje edilerek kaynak verimliliğini en üst seviyeye çıkarma odaklıdır (Aravindhan vd. 2022).

#### 3.5.1. Rüzgar türbini bileşenleri

Rüzgar türbini pervane, kule, jeneratör ve elektronik parçalar olmak üzere 4 ana bileşenden oluşmaktadır. Rüzgar türbinlerini oluşturan parçalar ve parçalara ilişkin yapılmış literatür incelemeleri aşağıda sunulmuştur.

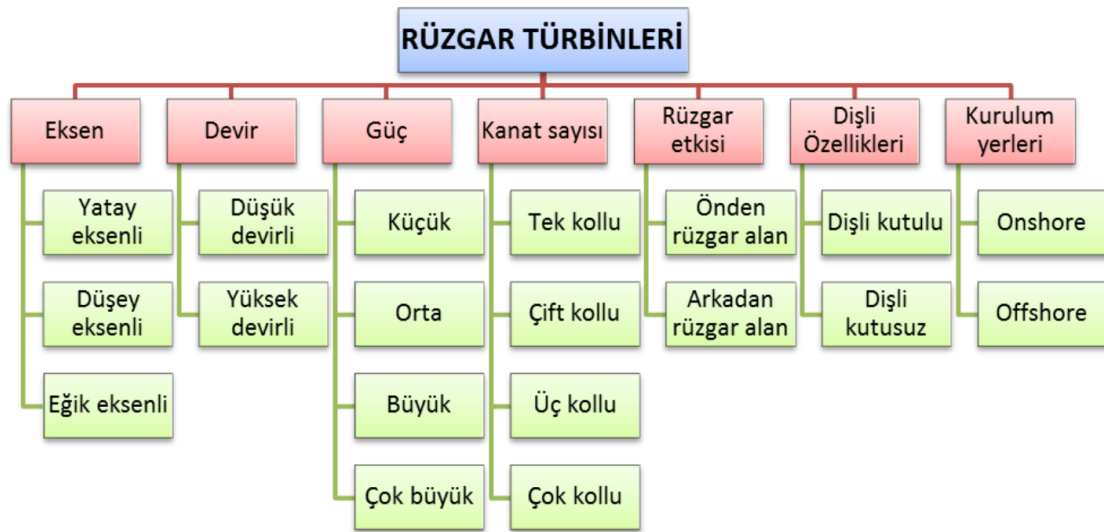
- Rotor: Pervane kanatları ve göbek arasında kalan kısımdır.
- Pervane: Rüzgarın kinetik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren parçadır. Rüzgar türbini tasarımı yapılırken en dikkat edilmesi gereken hususlardan biri pervane dizaynidir. Pervane malzemesi hafif ancak dayanıklı seçilmeli ve rüzgarın kinetik enerjisinin olabildiğince en az kayıpla pervane miline aktarılması hedeflenmelidir.
- Dişli Kutusu: Pervane milinden elde edilen devir sayısının jeneratör miline aktarılmasını sağlayan parçadır. Dolayısıyla dişli kutusu çevrim oranının doğru seçimi son derece önemli olsa da bazı modern rüzgar türbinlerinde çok kutuplu ve çift devirli elektrik makinesi kullanılarak dişli kutusu uygulamadan kaldırılmaktadır.
- Anemometre: Rüzgar hızını ölçen cihazdır. Son yıllarda rüzgar ölçümü için ultrasonik anemometreler kullanılmakta ancak geleneksel çanak anemometrelerden de düşük maliyet ve yüksek sağlamlık nedeniyle tam anlamıyla vazgeçilmiş değildir. Bu bağlamda pratik uygulamalarda geleneksel anemometrelerin ölçüm doğruluğunu artırmak amacıyla saha ölçümlerine dayalı veri odaklı kalibrasyon stratejileri önerilmektedir (Li ve Kikumoto 2022).
- Rüzgar Vanası: Rüzgar vanasından gelen sinyaller, rüzgar türbininin yönünü belirlemek ve döndürmek için kullanılır (Şipar 2011).
- Jeneratör: Mekanik enerji jeneratör vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştürülür ve aküler aracılığıyla depolanarak araçlara iletilir.
- Fren: Devir sayısının sabit bir değerde tutulması, sınırının aşılması amacıyla fren mekanizması yerleştirilmektedir. Bu mekanizma vasıtasıyla öngörülen devir değerinin üzerine çıkılması engellenmekte ve diğer bileşenlerin zarar görmesi engellenmektedir. Fren mekanizmasında, belli bir devir sayısının üzerine çıkıldığında arıza durumlarının önüne geçmek adına sistem direkt durdurulmaktadır (Keleş vd. 2013).
- Yönetici: Türbinleri rüzgarın estiği yöne çevirerek maksimum enerji elde edilmesi noktasında kullanılır (Anonim 6).

- Kule: Çelik, hibrit ve betonarme gibi farklı yapılarda oluşturulabilen kuleler, rüzgar türbinini taşıyan parametreler olduğundan güçlü malzemelerden yapılan ve statik hesapları oldukça önem arz eden bir bileşendir. Rüzgar türbini kulelerinin yüksekliği de verimlilik açısından oldukça önemli parametrelerden biridir. Maksimum rüzgar hızlarının elde edilebilmesi adına daha yüksek kulelerin inşa edilmesi tavsiye edilmektedir. Yapılan bazı incelemeler neticesinde maliyetleri doğrudan etkileyen kule tasarımlarında hibrit kule sistemlerinin en efektif sonuçları verdiği ve uygulamada yaygınlaştırılması gerektiği de ortaya çıkmıştır (Yiğit ve Akpınar 2021).
- Şebeke Bağlantı Sistemleri: Elektrik enerjisinin şebekeye aktarılmasına vesile olan bileşendir. Özellikle açık rüzgar türbinlerinde oldukça yüksek öneme sahip olan şebeke bağlantı sistemlerinde projelendirme safhasında hesapların doğru yapılması verimlilik açısından önem arz etmektedir.

### 3.5.2. Rüzgar türbini seçimi

Rüzgar enerjisinin gelecek yıllarda enerji politikalarına yön verme oranının artması öngörüsünde bulunulacak olursa dinamik koşullarda yeni RES kuruluşlarında genel verimliliği artırmak ve yatırım maliyetlerinin kısa süreli geri dönüşlerini sağlamak amacıyla doğru türbin seçimi oldukça büyük öneme sahiptir.

Şekil 3.1.'de rüzgar türbinlerinin sınıflandırılmasına ilişkin bilgi verilmiştir.



Şekil 3. 1. Rüzgar türbinlerinin sınıflandırılması (Elibüyük ve Üçgül 2014)

Rüzgar türbinleri dönme eksenlerine göre yatay, düşey ve eğik eksenli olarak sınıflandırılabilirler. Son zamanlarda modern yatay eksenli rüzgar türbinleri uygulamadaki fayda-maliyet analizine göre bir, iki, üç veya daha fazla kollu olarak tasarlanmakta ve enerji elde edilmesinde kullanılmaktadır. Ancak simetri özelliğinin olması, az gürültülü çalışması ve kanattaki kütleli atalet momentinin aynı olmasından mütevellit uygulamada genel olarak üç kanatlı yatay eksenli rüzgar türbinleri ön plandadır.

Dikey eksenli rüzgar türbinlerine bakılacak olursa en büyük avantajın rüzgarın her yönden alınabileceği söylenebilir. Verim açısından yatay eksenli rüzgar türbinlerinden az verimde çalışsalar da düşük rüzgar hızlarında ve hatta kulesiz çalışabilmelerinden dolayı küçük çaplı uygulamalarda tercih edilebilmektedir (Keleş Çetin vd. 2019).

Eğik eksenli rüzgar türbinleri ile uygulamada pek karşılaşılmamaktadır. Bu türbin çeşidinde kanatlar ile dönme eksenini arasında belli bir açı bulunur.

Rüzgar türbinleri ürettikleri güç kapasitesine göre de küçük, orta, büyük ve çok büyük rüzgar türbinleri olarak da ayrılabilir. Güçleri 30 kW'a kadar olanlar küçük, 30-100 kW arası olanlar orta, 100-1000 kW arası olanlar büyük ve 1 MW'dan büyük olanlar ise çok büyük rüzgar türbinleri olarak değerlendirilmektedir.

Yüksek devir ve düşük devir olarak da sınıflandırılabilen rüzgar türbinleri kanat sayılarına göre de çeşitlendirilebilir. Tek kollu türbinlerde dönme hızı kanat sayısına göre oldukça yüksektir. Bunun bir sonucu olarak tasarımlarda makine ağırlığı ve rotorun dönme momenti azalmaktadır. Ancak aerodinamik dengeyi tutturmak için oldukça fazla tasarım engelini de bünyesinde barındırmaktadır. Kanat uç hızı çok yüksek olduğundan gürültü kirliliğine sebebiyet vermektedir. Çift kollu rüzgar türbinlerinin rotor denge ayarı tek kollu türbinlere nazaran daha iyi olsa da dinamik hareketlerin önünü kesmek için eklenen teknik gereksinimlerden ötürü yatırım maliyetleri fırlamaktadır. Kanat uç hızları üç kollu rüzgar türbinlerine nazaran yüksek olsa da çalıştığında yüksek gürültü çıkarması ve yaklaşık 3 m/s gibi düşük rüzgar hızlarında faaliyet gösterebilmesinden dolayı uygulamada pek tercih edilmemektedir. Üç kollu rüzgar türbinleri ise estetik olarak diğer kollu türbinlere nazaran daha estetik, dönme momenti daha dengeli, titreşim önleyici pahalı parçalara gereksinimi olmadığından uygulamada en sık tercih edilen rüzgar türbinleridir. Çok kollu rüzgar türbinleri ise uzun yıllar su pompalamasında kullanılmışlardır.

Türbinler, rüzgarı alışı yönüne göre de iki ayrı sınıfta incelenebilir. Rüzgarı önden alan türbinlerde rotor yüzü rüzgara doğrudur. Kulenin arkasında meydana gelen rüzgar gölgeleme etkisine az miktarda maruz kaldığından bu durum bir avantaj olarak kabul edilebilir. Ancak kule imalatı her ne kadar düz ve yuvarlak yapılmış olsa bile kolun kule hizasından her geçişinde güç kaybı yaşanır. Bu yüzden güç kaybını minimum seviyeye indirmek için kanat malzeme yapısı sert tasarımlar uygulamada daha çok tercih edilir. Bu türbinlerin bir diğer dezavantajı da rotoru döndürmek için bir yaw mekanizmasına ihtiyaç duyulmasıdır. Rüzgarı arkadan alan türbinlerde ise rotorlar kulenin arka kısmında konumlandırılır. Bu sebepten en önemli avantajı bir yaw mekanizmasına ihtiyaç duymamasıdır. Ayrıca kollar esnek olarak imal edilebileceğinden kuleye binen yük de oldukça azalmaktadır. Ancak güç dengesizliği nedeniyle rüzgarın türbine vereceği zarar rüzgarı önden alan türbinlere nazaran oldukça fazladır.

Rüzgar türbinleri dişli kutulu ya da dişli kutusuz olarak da tasarlanabilir. Dişli kutusu olmayan türbinlerde gerilim ve frekansın daha doğru ayarlanabilmesi adına rotor ve stator boyutu daha büyük imalatlar gerçekleştirilir. Yüksek devirli türbinlerde jeneratör devir sayısını dengelemek için dişli kutusu kullanılırken düşük devirli türbinlerde böyle bir gereksinime ihtiyaç olmadığından dişli kutusu kullanılmaz (Yücel ve Özder 2018).

Rüzgar türbinleri, karada kurulan ve açık denizde kurulan rüzgar türbinleri olarak da incelenebilir. 2021 yılı içerisinde devreye alınan açık deniz rüzgar kapasitesi 2020 yılına nazaran üç kat daha artarak 21,1 GW seviyelerine ulaşmıştır. Açık deniz rüzgar yatırımlarında dünya genelinde birinci sırayı 27,7 GW ve %80'lik pay ile Çin almıştır. Avrupa'nın benzer seviyeye gelebilmesi için yaklaşık 30 yıl öngörülmektedir (GWEC 2022).

Açık deniz rüzgar türbinlerinin gelişimi son 20 yılda ciddi bir ivme kazanmış ve yeni bir uygulama alanı olarak global çapta rüzgar enerjisi endüstrisinde %5'in üzerinde paya sahip olmuştur.

Öte yandan rüzgar enerjisinden elektrik elde edilmesi adına türbin kurulumları yapım maliyetlerinin yanı sıra kurulacak yere göre de değişkenlik göstermektedir. Örneğin açık deniz rüzgar türbinlerinin kurulacağı alanda su derinliği arttıkça maliyet de artmaktadır. Aynı zamanda kıyıya olan mesafe arttıkça kablo uzunluğu da artacağından kablo ve yükleme maliyetleri de artmaktadır. Dolayısıyla karada kurulan rüzgar türbinleri açık denizlerde kurulan rüzgar türbinlerine nazaran 1,5-2 kat daha az maliyetlidir. Ancak karada kurulum yapılan türbinlerin gürültü ve görsel açıdan uygun olmamaları gibi problemlerden dolayı kıyıya şeridi olan ülkelerde son zamanlarda açık deniz rüzgar türbini uygulamaları yaygınlaştırılmaktadır (Kocatürk vd. 2017).

Tüm bu sınıflandırmalar ışığında rüzgar türbini kurulumları için öncelikli olarak doğru yer tespitinin yapılması ciddi önem arz etmektedir. Rüzgarın geliş yönü, hız düzeni ve frekans aralıkları yapılan fizibilite çalışmaları sonrası netleştirilip dönme eksenini, kanat sayısı gibi pek çok tasarım parametresi gözden geçirilerek yapılan fayda-maliyet analizleri neticesinde maksimum verimin alınabileceği rüzgar türbini tasarımları yapılmalı ve sürdürülebilir enerji hedeflerinin yakalanması açısından yatırım teşviklerinde bulunulmalıdır.



#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde dünyada ve Türkiye’de rüzgar enerjisinin mevcut durumu incelenmiştir. Ülkemizdeki rüzgar enerjisi tarihine ilişkin değerlendirmelerde bulunulmuş ve potansiyel atlas üzerinden bölgesel bazda rüzgar enerjisi potansiyeli analizi gerçekleştirilmiştir. Mevcut durum ve gelecek senaryolarına ilişkin analizler sunulmuştur.

##### 4.1. Dünyada Rüzgar Enerjisi

Enerji piyasaları, COVID-19 salgını sonrası ciddi bir daralmaya maruz kalmıştır. Bu durum 2022 yılının ilk çeyreğinde başlayan ve halen devam eden Rusya-Ukrayna savaşı ile tetiklenmiş ve tam bir küresel kriz haline gelmiştir. Doğal gaz ve petrol fiyatlarının zirveyi görmesi bazı ülkelerin elektrik arzını karşılama noktasında sorunlar yaşamasına neden olmuştur.

Dünya genelinde, geleceği hızla tehdit eden enerji açığının kapatılması adına alternatif çözüm yolları üzerine araştırmalar ve yatırımların sayısı son zamanlarda ciddi bir ivme kazanarak artmaktadır. Bu bağlamda fosil yakıtların enerji çözümlerinin çevresel bazda olumsuz etkilerini en aza indirmek için yenilenebilir enerji kaynaklarına eğilim günden güne artmaktadır.

Fosil yakıtların sürekli kullanımı, ithalat bağımlılığı, fiyat dalgalanmaları, maliyet verimsizlikleri ve en önemlisi ekolojik dengenin bozulması uzun vadede sorunlara sebebiyet vermektedir. Bu bağlamda 2050 yılında yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının günümüze nazaran %60 oranında artması beklenmektedir (Chen vd. 2023).

Destekleyici politikalar ve düşen maliyetler sayesinde rüzgar üretim kapasitesi son 25 yılda 111 kat artmış ve 7,5 GW’dan 837 GW seviyelerine yükselmiştir (IRENA 2023). Hem karada hem açık denizde, rüzgar enerjisi potansiyeli daha fazla dağıtım ve iyileştirme için muazzam bir potansiyele sahiptir. Dolayısıyla yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde son yıllarda oldukça popüler bir noktaya gelen rüzgar enerjisi uygulamalarının önümüzdeki yıllarda enerji sektöründe daha da fazla söz sahibi olması beklenmektedir.

2020 yılı rüzgar enerjisi için altın çağını yaşamıştır ve %53 büyüme ile tarihin en iyi yılı olarak kayıtlara geçmiştir (World Energy Council 2021).

2021 yılında 2020 yılındaki rekor büyümenin yalnızca %1,8 oranında gerisinde kalmış ve toplam 94 GW kapasite ile en iyi ikinci yıl yaşanmıştır. Avrupa, Latin Amerika, Afrika ve Orta Doğu’da 2020 yılına nazaran kara kurulumu %18 daha az gerçekleşmiştir. Bunun nedeni ise dünyada rüzgar enerjisi piyasalarına özellikle projelendirme ve üretim bazlı yön veren Çin ve ABD’de kara rüzgarı büyümesindeki azalmadır. Özellikle Çin’de açık deniz rüzgar kapasitesinin artırılmasına yönelik faaliyetler arttığından kara rüzgarı yatırımlarında azalmalar olması normal olarak değerlendirilebilir. Çin’deki açık deniz rüzgar türbinleri kapasitesinin 27,7 GW’a çıkarılması bunun bir göstergesi olarak ifade edilebilir. Toplam küresel rüzgar enerjisi kapasitesi 837 GW’a ulaşmış olup bu sayede Güney Amerika’nın toplam CO<sub>2</sub> emisyonuna eş değer 1,2 milyar tondan fazla CO<sub>2</sub>’den kaçınmasına katkıda bulunulmuştur (GWEC 2022).

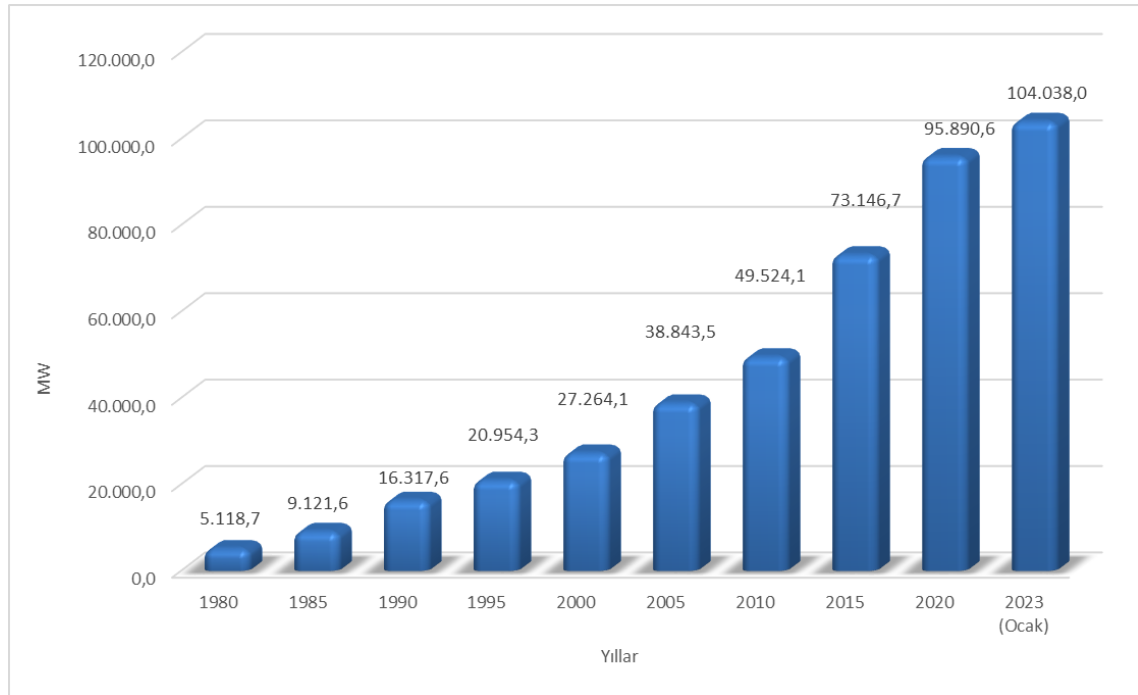
## 4.2. Türkiye’de Enerjiye Genel Bakış ve Rüzgar Enerjisi

Türkiye gelişmekte olan bir ÷lke olduğundan son 10 yıldır enerji talebi ciddi oranda artan ÷lkelerden biridir. Ancak ÷lkemiz enerji ihtiyacını karşılama noktasında yaklaşık dörtte üç oranında dışa bağımlı bir ÷lkedir.

2022 yıl sonu itibari ile enerji ithalatı 8.181,107 milyar dolar olarak açıklanmıştır. Bu rakam, Türkiye’nin toplam ithalatının yaklaşık %25’ini oluşturmaktadır (Anonim 7).

Enerji ithalatı ve makroekonomik bir sorun haline gelen cari açık arasında yadsınamaz doğrusal bir ilişki vardır. ÷lkemizde ekonomik genişleme ve üretim artışına bağlı olarak birincil enerji talebi de arttığından enerji ithalatı da kriz ve ekonomik durgunluk dönemleri hariç yıllar içinde artış göstermiştir. Enerji ithalatının azaltılması için yerli ve alternatif enerji yatırımların doğru planlamalar ile geliştirilmesi gerekmektedir. Bu sayede enerji ithalatının dış ticaret ve cari açık üzerindeki olumsuz etkileri mümkün mertebe azaltılabilir (İnançlı ve Akı 2022).

Enerji ithalatının azaltılmasındaki başlıca hususlardan biri kurulu gücün mümkün mertebe artırılmasıdır. Şekil 4.1.’de Türkiye’deki kurulu gücün yıllara göre dağılımına ilişkin bilgi sunulmuştur (Anonim 8). Kurulu gücün beş yıllık periyotlardaki değişimine bakılacak olursa pozitif yönde bir ivme kazanıldığı rahatlıkla söylenebilir.



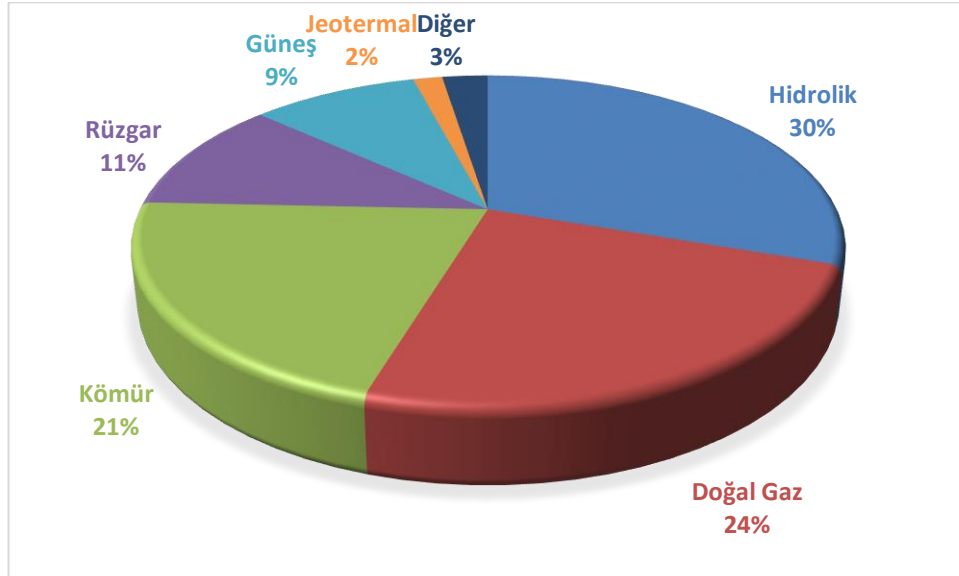
Şekil 4. 1. Türkiye kurulu gücünün yıllar itibari ile değişimi (Anonim 8)

÷lkemizdeki en büyük enerji sorunu tüketimin fosil yakıtlara bağlı olması ve ithal enerji kaynaklarının enerji arzındaki büyük oranıdır. Kurulu güç oranının artırılmasının yanı sıra bu artışın birincil enerji kaynakları bazında da paralel artması önem arz etmektedir. ÷lkemizde talep duyulan enerjiyi ekonomik, güvenilir ve kaliteli bir şekilde

sunmak için kurulu güç planlamalarına hız kazandırılmalı ve doğru planlamalarda stratejik kararlar alınmalıdır.

2035 yılında toplam kurulu gücün 189,7 GW olacağı ve yenilenebilir enerji payının da %51,8'den %64,7'ye çıkacağı tahmin edilmektedir (ETKB 2023).

Şekil 4.2.'de Türkiye'deki kurulu gücün kaynaklar bazında dağılımı verilmiştir. Ülkemizde 2023 Ocak itibari ile 751'i hidroelektrik, 67'si kömür, 360'ı rüzgar, 63'ü jeotermal, 345'i doğal gaz, 9546'sı güneş ve 491'i diğer kaynaklı santral olmak üzere lisanslı ve lisanssız toplam 11.623 adet santral kurulmuştur.



Şekil 4. 2. Kurulu gücün kaynaklara göre dağılımı (Anonim 1)

İlerleyen yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam elektrik üretimi içindeki oranının artırılması beklenmektedir. Bu bağlamda 2035 yılına gelindiğinde 5 GW'ı açık deniz ve 24,6 GW'ı kara kurulumu olmak üzere rüzgar enerjisinde 29,6 GW kurulu güce ulaşılması hedeflenmiştir. Bu hedef güneş enerjisi için 52,9 GW, hidroelektrik enerjisi için 35,1 GW, jeotermal ve biyokütle enerjisinde toplam 5,1 GW olarak belirlenmiştir (ETKB 2023).

### 4.3. Türkiye'de Rüzgar Enerjisinin Kısa Tarihçesi

Ülkemizde rüzgar enerjisinin tarihi çok eskilere dayanmamaktadır. Araştırma ve geliştirme faaliyetlerinin artırılması kapsamında ilk olarak 1989 yılında çeşitli araştırmalar sonrası Elektrik İşleri Etüt Dairesi'nde Rüzgar Enerjisi Şube Müdürlüğü kurulmuştur (Pınar vd. 2020).

Türkiye'de resmi kayıtlara göre uluslararası çapta ilk rüzgar elektriği 1998 yılının ilk çeyreğinde İzmir'in Çeşme ilçesi Germiyan köyünde bir Alman firmasından alınarak kurulan rüzgar türbini vasıtasıyla elde edilmiştir (Özdamar 2000).

Çeşme Germiyan Rüzgar Santrali üretime günümüzde halen devam etmekte olup 10,70 MW kurulu güce sahiptir.

Germiyan RES'ten sonra aynı yıl yap-işlet-devret modeli ile 7,2 MW elektrik üretimi gerçekleştiren ARES kurulmuştur. Türkiye'de RES kurulumlarında yapılan üçüncü atılım ise 2000 yılında 10,2 MW elektrik gücü üreten Çanakkale'deki Bozcaada RES olmuştur. Bozcaada RES'i 2006 yılında Balıkesir'de 30 MW güce sahip Bandırma RES takip etmiştir (Koçaslan 2010).

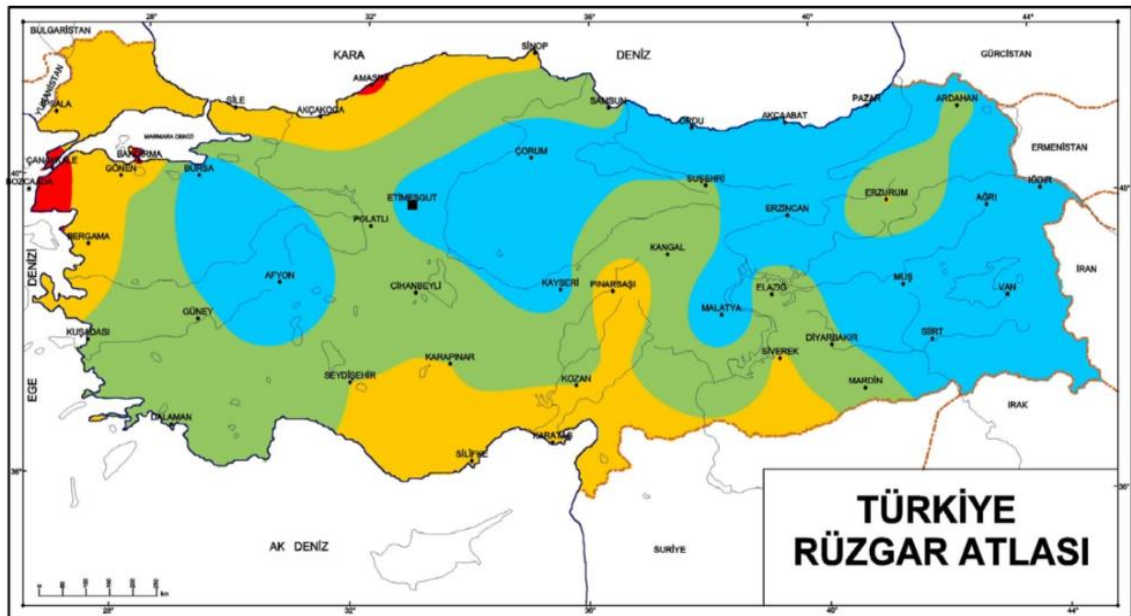
2008 yılında yine Balıkesir'de kurulan ve Türkiye'nin 2010 yılına kadar en yüksek rüzgar enerjisi elektrik üretimine sahip olan Şamlı RES günümüzde 127 MW elektrik üretimi ile ülkemizin en büyük 11. RES'i olarak kayıtlarda yerini almaktadır.

Özellikle son 10 yıldır ülkemizde rüzgar enerjisine dayalı yatırım teşviklerinin de düzenlenmesi ile birlikte ciddi atılımlar gerçekleştirilmiş olup rüzgar enerjisine dayalı kurulu güç pozitif bir ivme yakalayarak günden güne artmaktadır.

#### 4.4. Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli

Ülkemiz rüzgar enerjisi potansiyeli açısından farklı yaklaşımlar olsa da avantajlı bir ülke olarak kabul edilebilir. Türkiye'de kurulabilecek RES kapasitesi 47.849,44 MW olarak belirlenmiştir (Anonim 1).

Şekil 4.3.'te ülkemizin beş farklı topoğrafik durumu için 50 m yükseklikteki rüzgar potansiyeli verilmiştir (Meteoroloji Genel Müdürlüğü). Potansiyel atlas incelendiğinde Kuzey Ege, Doğu Akdeniz, Batı Karadeniz ve Marmara Bölgesi'nde rüzgar hızlarının diğer bölgelere nazaran daha fazla olduğu gözlemlenmektedir. Türkiye'de rüzgar hızının en yüksek olduğu iller Çanakkale, İzmir ve Balıkesir'dir.



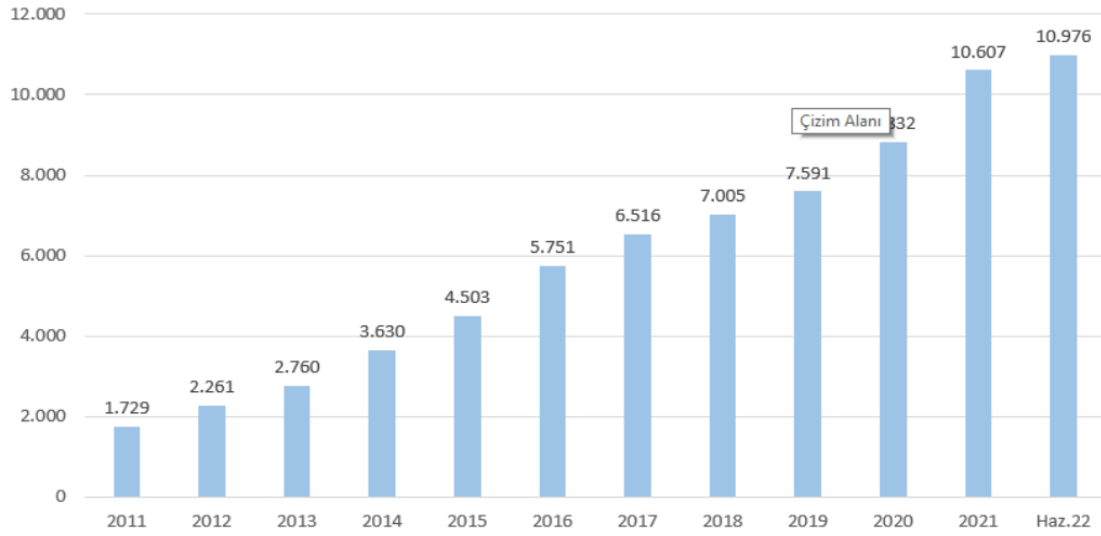
Beş farklı topoğrafik durum için yer seviyesinden 50 m yükseklikteki rüzgar potansiyelleri <sup>1</sup>										
	Kapalı Araziler <sup>2</sup> ms <sup>-1</sup> Wm <sup>-2</sup>	Açık Araziler <sup>3</sup> ms <sup>-1</sup> Wm <sup>-2</sup>	Kıyılar <sup>4</sup> ms <sup>-1</sup> Wm <sup>-2</sup>	Açık Deniz <sup>5</sup> ms <sup>-1</sup> Wm <sup>-2</sup>	Tepe ve Bayırlar <sup>6</sup> ms <sup>-1</sup> Wm <sup>-2</sup>					
Dark Blue	> 8.0	> 250	> 7.5	> 500	> 8.5	> 700	> 9.0	> 800	> 11.5	> 1900
Red	5.0 - 8.0	150 - 250	5.5 - 7.5	300 - 500	7.0 - 8.5	400 - 700	8.0 - 9.0	600 - 800	10.0 - 11.5	1200 - 1900
Yellow	4.5 - 5.0	100 - 150	5.5 - 6.5	200 - 300	6.0 - 7.0	250 - 400	7.0 - 8.0	400 - 600	8.5 - 10.0	700 - 1200
Green	3.5 - 4.5	50 - 100	4.5 - 5.5	100 - 200	5.0 - 6.0	150 - 250	6.5 - 7.0	200 - 400	7.0 - 8.5	400 - 700
Light Blue	< 3.5	< 50	< 4.5	< 100	< 5.0	< 150	< 5.5	< 200	< 7.0	< 400

Şekil 4. 3. Türkiye rüzgar atlası

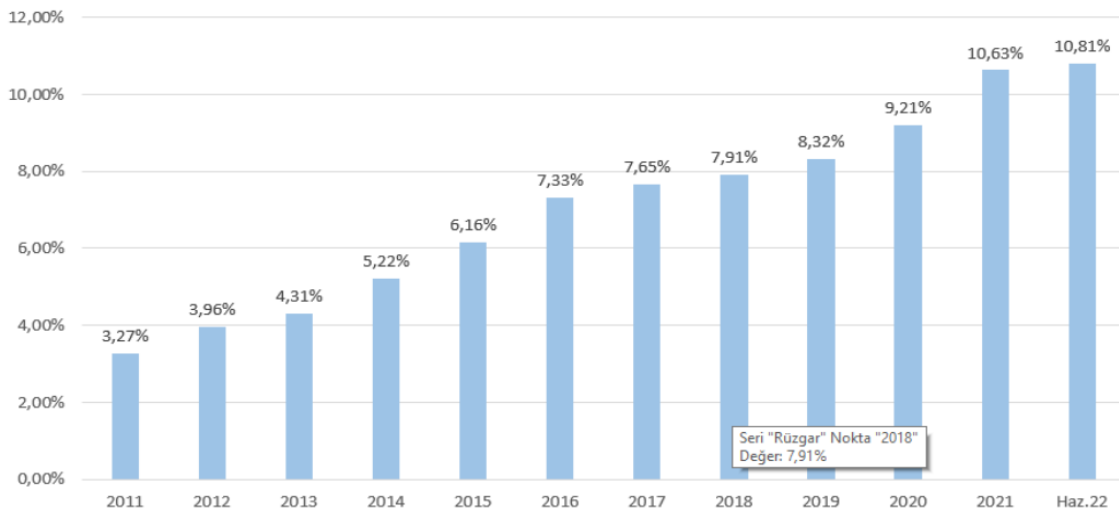
Rüzgar elektrik santrallerinde başlangıç hızı 2,5-4 m/s, süreklilik açısından ise 7 m/s rüzgar hızı olmalıdır. Bu bağlamda ilgili bölgelerin bu bakımdan zengin olduğu söylenebilir. Çünkü Türkiye uzun kıyı şeridinde sahip olduğundan rüzgarı sürekli ve belli bir düzende alan nadir ülkelerden biridir.

#### 4.5. Türkiye’de Rüzgar Enerjisinin Mevcut Durumu

Şekil 4.4.’de Türkiye’de son 11 yılda rüzgar enerjisine dayalı kurulu güç ve Şekil 4.5.’de kurulu güç içerisindeki orana ilişkin grafik bilgileri sunulmuştur. Türkiye’de rüzgar enerjisine dayalı kurulu güç 2011 yılında 1.729 MW iken Haziran 2022 verilerine göre 11 MW’a kadar dayanmıştır ve bu oranlar doğrultusunda kurulu güç içindeki oran %3,27’den %10,81’e yükselmiştir (ETKB 2023).



Şekil 4. 4. Türkiye’de rüzgar enerjisine dayalı kurulu güç grafiği (Anonim 1)



Şekil 4. 5. Türkiye’de rüzgar enerjisine dayalı kurulu gücün toplam güce oranı (Anonim 1)

2022 yıl sonu verilerine göre ülkemizdeki rüzgar enerjisine dayalı kurulu güç 11.396 MW değerine ulaşmış ve bu noktada rüzgar enerjisinden elektrik üretimi %11'lik pay ile ciddi bir konuma ulaşmıştır. Ülkemizde şu an 273 adet santral işletme halindedir. Bunun yanı sıra 20 adet santral de inşa halindedir (TÜREB).

Kısmen devreye alınan ve inşaatı devam eden projeler tamamlandığında kurulu gücün 12.318 MW olacağı öngörülmektedir. Potansiyelin tamamının kullanılması durumunda 47.849,44 MW elektrik elde edilebilir. Bu da kurulu güç oranının yıllar içerisinde artırılması hususunda ciddi teşvikler ve yatırımlar gerektiğinin rakamsal ifadesi olarak göz önünde bulundurulmalıdır (ETKB).

Çizelge 4.1.'de ülkemizde kurulu gücü 100 MW'dan yüksek RES bilgisi verilmiştir. Türkiye'deki kurulu gücün yaklaşık %20 kadarı İzmir ilinde bulunmaktadır. İzmir'i sırasıyla Balıkesir ve Çanakkale illeri izlemektedir. Türkiye'de 39 ilde RES bulunurken diğer illerde kurulu güç bulunmamaktadır (TÜREB, Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu, 2021).

**Çizelge 4. 1.** Türkiye'de devrede olan RES profili

Sıra	Santral Adı	İl	Kurulu Güç (MW)
1	Soma Rüzgar Santrali	Manisa	288
2	Karaburun Rüzgar Santrali	İzmir	227
3	Dinar Rüzgar Santrali	Afyonkarahisar	200
4	İstanbul RES	İstanbul	200
5	Geycek Rüzgar Santrali	Kırşehir	168
6	Balıkesir Rüzgar Santrali	Balıkesir	143
7	Saros RES	Çanakkale	138
8	Osmaniye Gökçedağ RES	Osmaniye	135
9	Evrencik RES	Kırklareli	130
10	Kangal Rüzgar Santrali	Sivas	128
11	Şamlı Rüzgar Santrali	Balıkesir	127
12	Bergama Rüzgar Santrali	İzmir	120
13	Bilgin Enerji Soma Rüzgar Santrali	Manisa	120

14	Zonguldak RES	Sakarya	120
15	Göktepe RES	Yalova	110
16	Tatlıpınar RES	Balıkesir	108
17	Şah Rüzgar Santrali	Balıkesir	105
18	Kuşadası RES	Aydın	104
19	Bağlar RES	Konya	100
20	Ömerli RES	İstanbul	100

Ülkemizde yerli üretim, kalifiyeli personel istihdamı ve tedarik süreçlerinin geliştirilmesi için ihale usulüyle devlet tarafından özel kurumlara verilen YEKA projeleri yapılmaktadır. Şimdiye kadar 2000 MW RES ve 2000 MW GES YEKA yarışmaları tamamlanmıştır. YEKA RES-1 yarışması sonucu %65 oranında yerli üretim olarak yapılacak rüzgar türbin fabrikası 104 türbin kapasiteli olarak kurulmuştur. YEKA RES-2 kapsamında toplam 1000 MW kurulu güç üretecek projelere ön lisans vermiştir. YEKA RES-3 projesinde 18 adet alan belirlenmiş ve bu alanlara kurulacak RES projeleri için başvuru süreçleri başlatılmıştır (ETKB, Faaliyet Raporu, 2022).

#### 4.6. Türkiye’de Rüzgar Enerjisinin Geleceği

Ülkemizde HES kurulumları ile birlikte 2000’li yılların ortasında başlayan yenilenebilir enerji uygulamaları son 10 yılda güneş enerjisi ve rüzgar enerjisine yapılan yatırımlarla birlikte önemli gelişimler kaydetmiştir. Ülkemizdeki kurulu gücün yarısından fazlasını yenilenebilir enerji kaynakları oluşturmakta ve rüzgar enerjisi de yüksek enerji üretimine imkân verdiği için diğer enerji kaynaklarına nazaran tercih edilebilir enerji kaynaklarından biri olmuştur.

Türkiye kara üstü rüzgar santralinde Avrupa’da ilk 5 sırada kendine yer edinmiştir. Ancak deniz kurulumlarında aynı başarı yakalanamamıştır. Yaklaşık 69 GW deniz üstü rüzgar enerjisi kurulum potansiyeli olan ülkemiz için ilerleyen süreçlerde bu potansiyelin doğru yatırımlarla birlikte efektif değerlendirilmesi önem arz eden hususlardan biridir.

Sadece karbon emisyonu ve sera gazı etkilerinin azaltılması anlamındaki çevresel tedbirler değil aynı zamanda ileri yıllarda yaşanması muhtemel susuzluk sorununun önüne geçilmesi anlamında da rüzgar enerjisi uygulamalarının ciddi manada katkı sağlayacağı söylenebilir. Türkiye’nin küresel çaptaki hedeflerinden birini de önümüzdeki on yıllık periyot içerisinde rüzgar enerjisi uygulamalarını artırarak 16 m<sup>3</sup> su tasarrufu sağlanması oluşturmaktadır.

Türkiye’de rüzgar enerjisi uygulamaları hakkında gelecek planlamaları yapılırken dikkate alınması gereken bir diğer husus da rüzgar türbin üretimi ve geliştirme faaliyetlerinin yerli üretim ve tedariklerle sağlanmasıdır. Ülkemizde faaliyet gösteren

4.180 adet türbinin 490 tanesinin menşei bilinmezken bu türbinlerin yalnızca 8 tanesi Türkiye menşelidir. Bu türbinlerin yarısına yakını Almanya’da üretimi gerçekleştirilen türbinlerdir. Yatırım maliyetlerinin azaltılması ve yatırımcıyı rüzgar enerjisine yönlendirme amaçlarına istinaden türbin üretiminde yerli ürünlerin pazar paylarının artırılması yönünde fabrikalaşma faaliyetlerinin geliştirilmesi ve yerli üretime teşvik desteği sağlanmalıdır (Enerji Atlası).

Ülkemizin bağımsız enerji üretimine katkıda bulunmak amacıyla gelecek hedeflerinden biri olarak ETKB’nin de desteğiyle 2011 yılı itibari ile MİLRES Projesi başlatılmıştır. Türkiye tarihinin en büyük Ar-Ge projesi olarak değerlendirilen projede ilk etapta 500 kW güç üreten rüzgar türbini geliştirilmesi ve akabinde 2,5 MW prototipin üretilmesi hedeflenmiştir. Sonuç olarak İstanbul’da Terkos Gölü kıyısına prototip türbin kurulumu yapılmıştır. Prototipin üretiminde parçaların %80’den fazlası yerli üretimler vasıtasıyla oluşturulmuştur. Projenin 2020-2025 yılları arasında 8 kat büyümesi ve mevcut üretim kapasitesinin artırılması hedeflenmektedir. Bu gibi yerleşme ve millileşme projelerinin rüzgar enerjisi kurulumlarında dışa bağımlılığın azaltılması noktasında ciddi önem arz ettiği aşıkardır (MİLRES).

Ülkemizdeki rüzgar enerjisi ve güneş enerjisi uygulamalarının yerlileştirilmesi ve millileştirilmesi adına düzenlenen YEKA yarışmalarının geliştirilmesi de önem arz etmektedir.

Yenilenebilir enerjide yerli aksamın desteklenmesine ilişkin yıllık bazda yerli katkı ilave fiyat çalışmaları yürütülmektedir. Gerekli incelemeler ETKB tarafından yapılmakta ve yararlanma süresi belirlenip kısmi kabuller ve kapasite artışı konuları belirlenmektedir. Çizelge 4.2’de 2023 yılı Nihai Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması analizleri neticesinde yerli fiyat desteği verilecek santral bilgisi sunulmuştur (ETKB). Görüldüğü üzere rüzgar enerjisine verilecek destek hemen hemen diğer kaynakların toplamı kadardır. Bu da ülkemizdeki RES yatırımlarının önümüzdeki süreçte pozitif yönde ivmeleneceğinin göstergelerinden biri olarak değerlendirilebilir.

**Çizelge 4. 2.** Elektrik üretim tesisi için yerli katkı desteği verilecek santrallerin kaynak bazlı sayıları

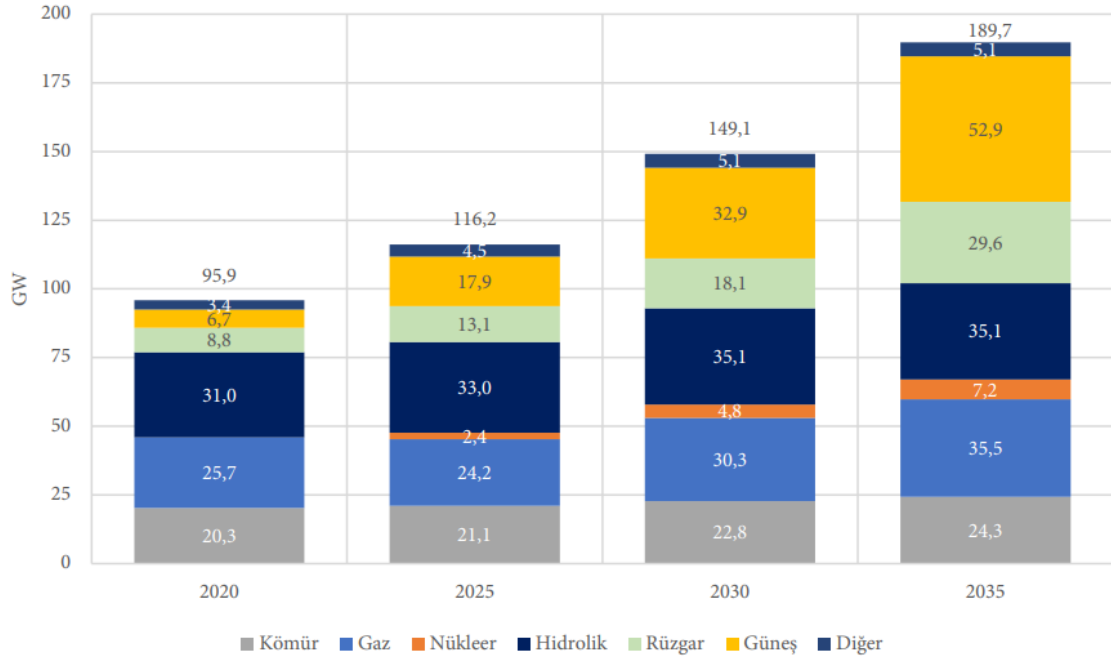
Santraller (2023)	HES	RES	JES	BES	GES	TOPLAM
	56	109	23	20	31	<b>239</b>

Türkiye’nin 2053 yılına kadar net sıfır emisyon hedefi vardır. Bu hedefin yakalanabilmesi adına yenilenebilir enerji kaynakları bazında kısa ve uzun vadede tahmin ve modelleme çalışmalarının geliştirilmesi gerekmektedir. ETKB tarafından temel göstergeler ve sektörel aktiviteler esas alınarak 2035 yılına kadar bazı kabuller gerçekleştirilmiş ve hedefler belirlenmiştir. Belirlenen senaryolar 19.01.2023 tarihi itibari ile Türkiye Ulusal Enerji Planı olarak yayımlanmıştır.

İlgili raporda Türkiye’nin gelecek yıllardaki enerji planında rüzgar ve güneş enerjisi gibi kaynakların önümüzdeki dönemlerde elektrik üretiminde payının artırılabacağı vurgulanmıştır.



Şekil 4.6.'da kaynaklara göre kurulu güç tahminlemesi sunulmuştur. Verilen grafiğe göre rüzgar ve güneş enerjilerinde ciddi atılımlar olacağı anlaşılmaktadır. Rüzgar enerjisi kurulu gücünün 2025-2030 arası 5 GW, 2025-2030 arası 11,6 GW artacağı görülmektedir. 2025-2030 yılları arası ilave kurulu güç, Türkiye'nin mevcut kurulu gücünden çok daha yüksektir (ETKB).



Şekil 4. 6. Kaynaklar bazında güç tahminlemesi

## 5. SONUÇLAR

Yenilenemeyen enerji kaynaklarının çevreye olan olumsuz etkileri, 200 yılı içerisinde tamamının tükeneceği öngörüsü, yeryüzünde homojen bir dağılımlarının olmamaları gibi sebeplerden dolayı dünya genelinde özellikle gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde yenilenebilir enerji kaynaklarına olan yatırım ve Ar-Ge çalışmaları gittikçe hız kazanmıştır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının çevresel bazda olumsuz etkilerinin kömür, petrol ve doğal gaz gibi yenilenemeyen enerji kaynaklarına nazaran oldukça düşük olması, tükenmeyen ve dünyanın hemen hemen her yerinde kurulabilecek seviyelerde olması ve en önemlisi ekonomik bağımsızlığı tetiklemeden dolayı gelecekte daha popüler bir noktaya geleceği rakamsal veriler ışığında da kaçınılmaz bir boyuta ulaşmıştır. 2021 yıl sonu itibari ile yenilenebilir enerji kaynaklarının küresel ekonomideki payı %28 seviyelerine ulaşmıştır.

Yenilenebilir enerjiye duyulan gereklilik farkındalığının giderek artması, bu alanda yerel ve genel yatırım teşviklerinin artırılması, teknolojik gelişmelerin yenilenebilir enerji yatırımlarına pozitif etkisi sayesinde yeni iş alanlarının ortaya çıkması, donanımlı mühendis ve teknik personel ihtiyacını da giderek artırmaktadır.

Yenilenebilir enerji ekipmanlarının üretimi ve ihracatı noktasından aktif kurulu güçlerde çalışan insan profiline kadar dünya genelinde mevcutta sektörde 11.000.000 insan bu alanda istihdam edilmektedir. Hiç şüphe yok ki ilerleyen yıllarda bu sayı katlanarak artacak ve yeşil işler kapsamında istihdam edilecek insan sayısı potansiyelin yüksek olduğu ülkelerde günden güne fazlalaşacaktır.

Rüzgar enerjisi uygulamaları da yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde son zamanlarda oldukça revaçtadır. Geleceğin ekonomik yapısı ve yeşil enerji anlayışı şekillendirilirken en önemli dinamiklerden biri de hiç şüphe yok ki rüzgar enerjisi olacaktır. Rüzgar enerjisi potansiyeli dünya genelinde 53000 TWh/yıl olup özellikle Kuzey Amerika ve Doğu Avrupa'da oldukça yüksek bir potansiyel mevcuttur.

Dünyada rüzgar enerjisi uygulamalarında Çin, özellikle açık deniz rüzgar enerjisi kurulumlarında yapmış oldukları atılımlardan sonra lider konumunu korumuş ve ABD ile arayı ciddi oranda açmıştır. Ülkemiz ise 11.396 MW kurulu güç ile İtalya'dan sonra dünya genelinde 12. sırada yer almaktadır. Rüzgar enerjisi potansiyeli enerji elde etme adına hemen hemen tüm coğrafyalarda mevcut olduğundan dünyada 100'den fazla ülkede rüzgar enerjisinden elektrik elde edilmektedir. 2021 yılı sonunda Avrupa, Latin Amerika, Afrika ve Orta Doğu ülkelerinin yoğun kara kurulumları, 2020 yılına nazaran üç kat daha fazla açık deniz rüzgar türbini kurulumunun artırılması, dünya genelinde rüzgar enerjisi ihalesi faaliyetlerinin bir önceki yıla göre %153 oranında artırılması neticesinde toplam küresel rüzgar enerjisi kurulumları 837 GW'a ulaşmıştır. Bu sayede 1,2 milyar tondan fazla CO<sub>2</sub>'den kaçınılmıştır.

Rüzgar enerjisi uygulamalarının yaygınlaştırılmasının yanı sıra türbin kurulum maliyetlerinin azaltılması ve yerleştirilmesi de oldukça büyük bir önem arz etmektedir. Bu anlamda milli rüzgar türbini üretim projelerinin teknolojik gelişmelere paralel olarak artırılması gerekmektedir. Hem sanayileşme faaliyetlerinin artırılması hem de yenilenebilir enerji yatırımlarında parça bağımlılığı ve teknik destek eksikliği

sorunlarının azaltılması adına rüzgar enerjisi uygulamalarında yerli üretime teşvikler sağlanmalıdır. Dünya genelinde rüzgar enerjisi çalışmaları ivmelenerek artmasına karşın potansiyelin hemen hemen %1 kadarı kullanılmaktadır. İlerleyen süreçlerde enerji ihtiyacının karşılanmasında yenilenebilir enerji kaynaklarının rolünün artacağı varsayıldığında yerli türbin üretim konusunda henüz geç kalınmamıştır. Özellikle elektriği üreten kısım olan jeneratör, türbin maliyetinin yaklaşık dörtte üçünü oluşturmaktadır. Bu bağlamda ilk etapta ele alınması gereken ilk husus yerli bir jeneratör yapımıdır. Türkiye’de yerli enerji çözümlerinin geliştirilmesi adına ASELSAN ve EÜAŞ ortaklığı ile yapılan %100 yerli rüzgar türbini projesi 2024 yılı itibari ile Alaçatı’da konumlandırılacak şekilde planlanmıştır. Bunun yanı sıra yerli üretimi teşvik amaçlı YEKA ve MilRES Projeleri de hayata geçen ve katma değer sağlayan işler olarak nitelendirilebilir.

Yerli üretimin yanı sıra yabancı şirketlerin de Türkiye’de rüzgar enerjisi uygulamalarına yatırımları sosyal boyutta istihdamın artırılmasının yanı sıra enerjide %77 oranında dışa bağımlı olan ülkemiz için özellikle bu bağımlılığın azaltılması ve cari açığın azaltılması anlamında da ciddi bir yere sahiptir.

Türkiye’de rüzgar enerjisi uygulamaları özellikle son 10 yıldır pozitif yönde ivmelenmiştir. Kurulu gücün toplam kurulu güç içerisindeki oranı da her yıl kademe kademe artmış ve enerji elde edilmesinde rüzgar enerjisi uygulamalarını vazgeçilemez seviyede önemli bir noktaya taşımıştır. 2022 yıl sonu itibari ile Türkiye’de toplam 11.396 MW kurulu rüzgar gücüne ulaşılmıştır. Bu rakamın Türkiye enerji modeline göre 2030 yılı itibari ile 18,1 GW ve 2035 yılı itibari ile 29,6 GW seviyelerine yükselmesi beklenmektedir. Bu bağlamda önümüzdeki 15 yıllık süreç tamamlandığında rüzgar enerjisinden elektrik elde edilmesi oranının kaynaklar bazında %20 seviyelerine yaklaştırılması hedeflenmektedir.

Türkiye’deki rüzgar enerjisi uygulamalarına bir diğer açıdan bakılacak olursa potansiyel bazda değerlendirme olarak analiz edilebilir. Ülkemizde 7 m/s’nin üzerinde rüzgar hızı analiz edildiğinde toplam potansiyeli 47.849,44 MW olarak kabul edilmektedir. Bu potansiyelden efektif olarak değerlendirilmesi adına özellikle potansiyelin yüksek olduğu Ege Bölgesi’nde yatırım teşviklerinin artırılması önem arz etmektedir. Ülkemizde kara rüzgar potansiyeli olumlu anlamda değerlendirilse de ne yazık ki açık deniz rüzgar enerjisi kurulumu hiç yoktur. Bunun bir gerekçesi olarak açık deniz rüzgar santrali kurulum maliyetlerinin kara rüzgar santrali kurulum maliyetlerine göre daha yüksek olması olarak açıklanabilir. Ancak gelişen teknoloji ve Ar-Ge çalışmaları ile yatırım maliyetlerinin düşürülüp amortisman süreleri kısaltılarak açık deniz RES kurulumları da milli ekonomiye katkıda bulunacaktır.

Lisanssız Elektrik Üretimi Yönetmeliği ile yatırım teşviklerinin önü açılmıştır. Bu sayede herhangi bir sanayici ister OSB ister dışarıda herhangi bir dağıtım bölgesinde elektrik santrali kurabilmektedir. Aynı şekilde üretim tesisi ile farklı ölçüm noktasındaki tüketim tesisi de ilişkilendirilmiştir. İlgili yönetmelikle beraber yatırımcının önündeki pek çok engel ortadan kaldırılmıştır. Bu sayede yenilenebilir enerji ve dolayısıyla rüzgar enerjisi uygulamalarının sayısının artması beklenmektedir.

Türkiye’de yenilenebilir enerji teşviklerinin artırılması ve ülkemizi temiz enerji yatırımlarının cazibesi haline getirebilmek için Yenilenebilir Enerji Yasası’ndaki bazı hususlar güncellenebilir. Tedarik süreçlerinin hızlandırılması için vergi indirimleri,

üretimi teşvik etmek adına bankalarla iş birliği yapılarak kredi imkânları genişletilmelidir.

Rüzgar enerjisi uygulamalarının yaygınlaştırılması adına bir diğer husus da bu konudaki farkındalığın artırılmasıdır. Bu farkındalığın artırılması için ilkökul eğitim müfredatlarında enerji konularına değinilerek çocuklara enerji tasarrufu bilinci ve yenilenebilir enerjinin önemi aşılmalıdır. Bu durum çocukların yenilenebilir enerji uygulamaları üzerindeki ilgisini yoğunlaştıracağından ilerleyen süreçlerde bu meslek alanlarına yönelmelerine de vesile olacaktır. Bu durum istihdam alanlarının genişlemesine ve Türkiye'nin gelecek enerji politikalarında yetişmiş liyakatli kadroların atılımda bulunmasına sebep olacaktır.

Rüzgar enerjisi uygulamaları yazılı ve görsel basında daha fazla yer kaplamalı, böylece bilinçli toplum zemini sağlanarak konu hakkındaki duyarlılık düzeyi artırılmalıdır.

Rüzgar enerjisi uygulamalarının olumsuz etkileri gerekli teknik altyapı ve şartların sağlanmasına paralel olarak geliştirilmeli ve ülkemiz için yatırım teşvikleri artırılarak ekonomik bağımsızlığın sağlanması için adımlar atılmalıdır.

## 6. KAYNAKLAR

- Albayrak, S. ve Turanlı, M. 2022. Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri İle Türkiye’de HES (Hidroelektrik Santral) Seçimi. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*. 21 (41): 68-79.
- Anonim 1: <https://enerji.gov.tr> [Son erişim tarihi: 06.02.2023].
- Anonim 2: <https://www.tki.gov.tr> [Son erişim tarihi: 07.02.2023].
- Anonim 3: <https://www.mta.gov.tr> [Son erişim tarihi: 08.02.2023].
- Anonim 4: <http://www.akkunpp.com> [Son erişim tarihi: 09.02.2023].
- Anonim 5: <https://www.enerjiatlas.com> [Son erişim tarihi: 10.02.2023].
- Anonim 6: <https://www.incitas.com.tr> [Son erişim tarihi: 11.02.2023].
- Anonim 7: <https://ticaret.gov.tr> [Son erişim tarihi: 12.02.2023].
- Anonim 8: <https://www.teias.gov.tr> [Son erişim tarihi: 15.02.2023].
- Aravindhan, N., Bibin, C., Kumar, R. A., Kalyan, K. S., Balaji, K. S., Kugan, R., Rajesh, K., Arunkumar, S. 2022. Performance analysis of various types of ducted wind turbines – A review. *Materials Today: Proceedings*.
- Avcı, S. 2020. Hâkim Rüzgâr Yönünün Belirlenmesi İçin Bir Yazılım Önerisi: PrevailingWindRUB 1.0. *Coğrafya Dergisi*. (41): 209-219.
- Barnas, K., Jeleński, T., Nowak-Ocłoń, M., Racoń-Leja, K., Radziszewska-Zielina, E., Szewczyk, B., Śladowski, G., Toś, C., Verbanov, P.S. (2023). Algorithm for the comprehensive thermal retrofit of housing stock aided by renewable energy supply: A sustainable case for Krakow. *Energy*. 263: 125774.
- Bayraç, H. N. ve Özarslan, B. 2018. Biyokütle Enerjisi ve Ekonomik Büyüme Arasındaki İlişkinin Ampirik Bir Analizi: Türkiye Örneği. *Yalova Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*. 8 (17): 1-17.
- Bekar, N. 2020. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Açısından Türkiye’nin Enerji Jeopolitiği. *Türkiye Siyaset Bilimi Dergisi*. 3 (1): 37-54.
- BP. 2022. bp Statistical Review of World Energy Report. BP Report, Londra.
- Catolico, A. C. C., Maestrini, M., Strauch, J. C. M., Giusti, F., Hunt, J. 2021. Socioeconomic impacts of large hydroelectric power plants in Brazil: A synthetic control assessment of Estreito hydropower plant. 151: 111508.
- Chen, M., Huang, W., Ali, S. 2023. Asymmetric linkages between wind energy and ecological sustainability: Evidence from quantile estimation. *Environmental Development*. 45: 100798.
- Chu, L. K., Ghosh, S., Doğan, B., Nguyen, N.H., Shahbaz, M. 2023. Energy security as new determinant of renewable energy: The role of economic complexity in top energy users. *Energy*. 263: 125799.
- Elibüyük, U. ve Üçgül, İ. 2014. Rüzgar Türbinleri, Çeşitleri Ve Rüzgar Enerjisi Depolama Yöntemleri. *Yekarum*. 2 (3).
- ETKB. 2023. Türkiye Ulusal Enerji Planı Raporu. ETKB raporu, Ankara.

- Gao, X., An, R. 2022. Research on the coordinated development capacity of China's hydrogen energy industry chain. *Journal of Cleaner Production*. 377: 134177.
- Görgülü, Y. F. 2022. Enerji Krizi ve Yenilenebilir Enerji. Efe Akademi Yayınları: İstanbul, 100 s.
- GWEC. 2022. Global Wind Report. GWEC Report, Brussels.
- IEA. 2023. Electricity Market Report. IEA Report, Paris.
- IRENA. 2023. World Energy Transitions. IRENA Report.
- İnançlı, S. ve Akı, A. 2022. Türkiye’de enerji ithalatı ile cari açık ilişkisinin 2010-2019 dönemi için ampirik analizi. *Business & Management Studies: An International Journal*. 10 (1): 120-131.
- İnce, İ. T. 2021. Güneş Enerjisi ile Elektrik Üretiminde Örnek Uygulamalar. *Disiplinlerarası Yenilik Araştırmaları Dergisi*. 1 (1): 1-10.
- İncekara, Ç. Ö., Dünyanın ve Türkiye’nin Doğal Gaz Talep Senaryosu. *Euroasia Journal of Mathematics, Engineering, Natural&Medical Sciences*. 8 (17): 44-57.
- Kan, S., Chen, M., Meng, J., Chen, G. 2020. An extended overview of natural gas use embodied in world economy and supply chains: Policy implications from a time series analysis. *Energy Policy*. 137: 111068.
- Karabağ, N., Çobanoğlu Kayıkçı, C. B., Öngen, A. 2021. %100 Yenilenebilir Enerjiye Geçiş Yolunda Dünya ve Türkiye. (21): 230-240.
- Karaoğlu, M. 2018. Rüzgar ve Rüzgar Olayları. *Ziraat Dergisi*. 1 (2): 39-48.
- Keleş Çetin, S., Genç, M. S., Dalbadan, F. 2019. Dikey Eksenli Rüzgâr Türbinleri-Küçük Ölçekli Uygulamalar. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*. 6 (2): 539-551.
- Keleş, D., Ayhan, V., Parlak, A., Cesur, İ., Boru, B., Koç, T. 2013. Bir rüzgar türbini tasarımı ve geliştirilmesi. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*. 17 (2): 207-216.
- Kobayashi, Y., Kotilainen, T., Carmona-García, G., Leip, A., Tuomisto, H. L. 2022. Vertical farming: A trade-off between land area need for crops and for renewable energy production. *Journal of Cleaner Production*. 379: 134507.
- Kocatürk, A. S., Duranay, A., Fırat, B., Ünsan, Y. 2017. Rüzgâr Enerji Santrallerinin Geleceği. *GİDB Dergi*. (8): 50-65
- Koç, E. ve Kaya, E. 2015. Enerji Kaynakları-Yenilenebilir Enerji Durumu. *Mühendis ve Makina Dergisi*. 56 (668): 36-47.
- Koçaslan, G. 2020. Dünyada ve Türkiye’de Güneş, Rüzgar ve Jeotermalde Güncel İktisadi Görünümü. *Ömer Halisdemir Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*. 13 (2): 213-226.
- Koçaslan, G. 2010. Sürdürülebilir Kalkınma Hedefi Çerçevesinde Türkiye’nin Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Yeri ve Önemi. *Sosyal Bilimler Dergisi*. 0 (1): 53-61.
- Koçman, Ö. 2022. Dünyada ve Türkiye’de petrol sektöründe yeşil yönetim Türkiye için bir model önerisi. Doktora tezi, Ankara Üniversitesi, Ankara, 251 s.

- Konak, A. 2019. Türkiye'nin Doğal Gaz Bağımlılığı ve Alternatif Enerji Kaynakları Üretimine Gerekliği. *Uluslararası Afro-Avrasya Araştırmaları Dergisi*. 4 (7): 196-209.
- Kumar, C. M. S., Singh, S., Gupta, M. K., Nimdeo, Y. M., Raushan, R., Deorankar, A. V., Kumar, T. M. A., Rout, P. K., Chanotiya, C. S., Pakhale, V. D., Nannaware, A. D. 2023. Solar energy: A promising renewable source for meeting energy demand in Indian agriculture application. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 55: 102905.
- Küçük, Ü. 2022. Türkiye'de Yenilenebilir Enerji Konusunda Kurumsal Yapılanma ve Yerel Yönetimlere İlişkin Mevzuat İçinde Yenilenebilir Enerji. 12 (1): 369-381.
- Leng, Y. J. and Zhang, H. 2023. Comprehensive evaluation of renewable energy development level based on game theory and TOPSIS. *Computers & Industrial Engineering*. 175: 108873.
- Li, B., Yuan, X., Chen, M., Bo, S., Xia, L., Guo, Y., Zhao, S., Ma, Z., Wang, T. 2020. How to strive for balance of coastal wind energy development with waterbird conservation in the important coastal wetlands, a case study in the Chongming Islands of East China. *Journal of Cleaner Production*. 263: 121547.
- Li, R. and Kikumoto, H. 2022. Data-driven calibration of cup anemometer based on field measurements and artificial neural network for wind measurement around buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 231: 105239.
- Li, X., Gao, Q., Cao, Y., Yang, Y., Liu, S., Wang, Z. L., Cheng, T. 2022. Optimization strategy of wind energy harvesting via triboelectric-electromagnetic flexible cooperation. *Applied Energy*. 307: 118311.
- Li, Y., Shen, X., Zhou, C. 2023. Dynamic multi-turbines spatiotemporal correlation model enabled digital twin technology for real-time wind speed prediction. *Renewable Energy*. 203: 841-853.
- Liu, F., Wang, X., Sun, F., Kleidon, A. 2023. Potential impact of global stilling on wind energy production in China. *Energy*. 263: 125727.
- Liu, G., Zhao, Z., Xu, H., Zhang, J., Kong, X., Yuan, L. 2022. A robust assessment method of recoverable geothermal energy considering optimal development parameters. *Renewable Energy*. 201: 426-440.
- Meng, Y., Dincer, H., Yüksel, S. 2021. Understanding the innovative developments with two-stage technology S-curve of nuclear energy projects. *Progress in Nuclear Energy*. 140: 103924.
- Pınar, A., Buldur, A., Tuncer, T. 2020. Türkiye'deki Rüzgar Enerji Santralleri Dağılımının Coğrafi Perspektiften Analizi. *Doğu Coğrafya Dergisi*. 25 (43): 167-182.
- Özdamar, A. 2000. Dünya ve Türkiye'de Rüzgar Enerjisinden Yararlanılması Üzerine Bir Araştırma. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 6 (2): 133-145.
- Sadiq, M., Shinwari, R., Wen, F., Usman, M., Hassan, S. T., Taghizadeh-Hesary, F. 2023. Do globalization and nuclear energy intensify the environmental costs in top nuclear energy-consuming countries.

- Saha, S., Saleem, M. I., Roy, T.K. 2023. Impact of high penetration of renewable energy sources on grid frequency behaviour. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 145: 108701.
- Shabara, M. A. and Abdelkhalik, O. 2023. Dynamic modeling of the motions of variable-shape wave energy converters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 173: 113070.
- Şipar, E. 2011. Rüzgar enerjisi türbin sistemleri için gerçek zamanlı dinamik analiz simülatörü gerçekleştirilmesi. Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 186 s.
- Töman, U., Odabaşı Çimer. 2016. Enerji Kavramının Farklı Öğrenim Seviyelerinde Öğrenilme Durumunun Araştırılması. *Bayburt Eğitim Fakültesi Dergisi*. 6 (1): 31-43.
- Tunçbilek, Ö. F. ve Yılmaz, M. 2021. Türkiye’de Jeotermal Elektrik Enerjisi Üretimi İçinde Aydın İlinin Yeri ve Önemi. *Ankara Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*. 12 (2): 138.
- TÜREB. 2021. Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu.
- World Energy Council. 2021. Global Wind Energy Report, Londra.
- Yang, W., Hao, M., Hao, Y. 2023. Innovative ensemble system based on mixed frequency modeling for wind speed point and interval forecasting. *Information Sciences*. 622: 56-586.
- Yiğit, M. E. ve Akpınar, M. E. 2021. Rüzgar Türbin Kulesi Alternatiflerinin Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri İle Değerlendirilmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*. (23): 386-393.
- Yücel, M. ve Özder, S. 2018. Yaw ve Pitch Kontrollü Dişli Kutusuz 5kW Rüzgâr Türbini Üretilmesi Ve Verimliliği. *Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. 4 (1): 74-87.
- Zheng, J., Du, J., Wang, B., Klemeš, J. J., Liao, Q., Liang, Y. 2023. A hybrid framework for forecasting power generation of multiple renewable energy sources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 172: 113046.



## ÖZGEÇMİŞ

**YASİN ASLAN**

**yasinaskan.trt@gmail.com**



### ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2020-2023	Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2014-2019	Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Antalya

### MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Uzman Yardımcısı	Türkiye Radyo Televizyon Kurumu
2020-Devam Ediyor	Genel Müdürlük, Proje Yönetimi Dairesi Başkanlığı, Ankara

### ESERLER

#### Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

1- Şencan Şahin, A., Ağ, C., Özyurt, O., Aslan, Y. 2021. İç Isı Değiştiricili Bir Organik Rankin Çevriminin Enerji ve Ekserji Analizi. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi. (1): 31-40.

#### Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler

1- Güngör, A., Ağ, C., Özyurt, O. Aslan, Y. 2022. Current Status of Wind Energy Use in Turkey. 5. International Conference on Technology and Science, Antalya.

- 2- Güngör, A., Ağ, C., Özyurt, O. Aslan, Y. 2022. Current Status of Geothermal Energy Use in Turkey. 5. International Conference on Technology and Science, Antalya.
- 3- Güngör, A., Ağ, C., Özyurt, O. Aslan, Y. 2022. Current Status of Solar Power Plants Energy Use in Turkey. 5. International Conference on Technology and Science, Antalya.
- 4- Güngör, A., Ağ, C., Özyurt, O. Aslan, Y. 2022. Current Status of Hydroelectric Energy Use in Turkey. 5. International Conference on Technology and Science, Antalya.
- 5- Güngör, A., Ağ, C., Özyurt, O. Aslan, Y. 2019. Analysis of Thermal Efficiency of Alpha and Beta Type Stirling Engines and Comparison According Each Other. 2. International Conference on Technology and Science, Burdur.