



T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ ANABİLİM DALI

SÜRDÜRÜLEBİLİR KALKINMA DOĞRULTUSUNDA
ELEKTRİK TÜKETİMİ VE RÜZGÂR TÜRBİNİ ÜRETİMİNİN
TAHMİNLENMESİ VE EKONOMİK ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Süleyman ATILGAN

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Muzaffer ALİM

Ağustos-2022
BATMAN
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Süleyman ATILGAN tarafından hazırlanan “Sürdürülebilir Kalkınma Doğrultusunda Elektrik Tüketimi ve Rüzgâr Türbini Üretiminin Tahminlenmesi ve Ekonomik Analizi” adlı tez çalışması 18/08/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Ali KALLIOĞLU

.....

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Muzaffer ALIM

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Yıldırım YILMAZ

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Osman PAKMA
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdür V.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Süleyman ATILGAN
18/08/2022

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SÜRDÜRÜLEBİLİR KALKINMA DOĞRULTUSUNDA ELEKTRİK TÜKETİMİ VE RÜZGÂR TÜRBİNİ ÜRETİMİNİN TAHMİNLENMESİ VE EKONOMİK ANALİZİ

Süleyman ATILGAN

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Muzaffer ALİM

2022, 66 Sayfa

Jüri

Dr. Öğr. Üyesi Muzaffer ALİM
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Ali KALLIOĞLU
Dr. Öğr. Üyesi Yıldırım YILMAZ

Dünya üzerinde artan nüfus, endüstrileşme ve enerji tüketimi yüksek yeni nesil teknolojilerin yaygınlaşması ile birlikte enerjiye olan talep gün geçtikçe artmaktadır. Günlük hayatın hemen her alanında vazgeçilmez olan enerji, günümüzde daha çok fosil kaynaklı yakıtlardan üretilmektedir. Fakat bu doğal kaynakların giderek azalması, fiyat ve arzlarda oluşan belirsizlik ve bu kaynakların yanmasına bağlı olarak ortaya çıkan çevre sorunları alternatif enerji kaynakları arayışlarına hız vermiştir. Bu alternatiflerin başında da hem çevresel olarak zararların minimum olması hem de herkes tarafından erişilebilir olması nedeniyle yenilenebilir enerji gelmektedir. Türkiye'nin sürdürülebilir kalkınma politikası doğrultusunda temiz ve erişilebilir bir enerji en temel hedeflerden bir tanesidir. Bundan ayrı olarak enerjinin tüm sürdürülebilir hedeflerle hem doğrudan hem de dolaylı bir ilişkisi de vardır. Bu çalışmada, yenilenebilir enerji kaynaklarına bir genel bakış sunulmuştur. Sonrasında Türkiye'nin elektrik tüketiminin tahmin edilmesi ve buna bağlı olarak kaynağa bağlı elektrik üretim politikası değerlendirilmiştir. Maliyeti ve CO₂ emisyonunu en aza indirmek için her bir elektrik üretim teknolojisinin optimal payını sağlayan bir lineer matematiksel model geliştirilmiştir. Geliştirilen matematiksel model kullanılarak yıllık elektrik tüketimini karşılamak için hangi elektrik üretim kaynaklarının kullanılması gerektiği gösterilmiştir. Ele alınan bir diğer konu da rüzgâr türbini ve rüzgârdan elektrik üretimi üzerinedir. Çalışma için seçilen bölgedeki geçmiş dönem rüzgâr hızı verileri makine öğrenmesi teknikleri ile değerlendirilerek geleceğe yönelik tahminler yapılmıştır. Ayrıca aylık üretim verileri üzerinden farklı rüzgâr türbinlerinin ekonomik analizi yapılmış ve yatırım yapılabilirliği değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: CO₂ emisyonu, ekonomi, elektrik tüketimi, optimizasyon, rüzgâr enerjisi, sürdürülebilir kalkınma, tahmin, yenilenebilir enerji

ABSTRACT

MS THESIS

FORECASTING AND ECONOMIC ANALYSIS OF WIND TURBINE PRODUCTION AND ELECTRICITY CONSUMPTION IN LINE WITH SUNTAINABLE DEVELOPMENT

Süleyman ATILGAN

**Institute Of Graduate Studies Of Batman University
The Degree Of Master Of Science
In Renewable Energy Systems**

Advisor: Asst. Prof. Dr. Muzaffer ALIM

2022, 66 Pages

Jury

Asst. Prof. Dr. Muzaffer ALIM

Asst. Prof. Dr. Mehmet Ali KALLIOĞLU

Asst. Prof. Dr. Yıldırım YILMAZ

The demand for energy is growing day by day as a result of global population growth, industrialization, and the adoption of new technologies with high energy requirements. Today, fossil fuels are used primarily in producing energy, which is necessary for practically all aspects of daily living and industry. The quest for alternative energy sources has, however, been sped up due to the gradual depletion of these natural resources, the unpredictability of prices and supply, and the environmental issues that result from burning these resources. Renewable energy is presented first among these alternatives since it causes the least environmental harm and is widely accessible by everyone. In line with Turkey's sustainable development policy, one of the main goals is to provide clean, affordable and accessible energy. In addition, energy is connected, either directly or indirectly, to all sustainable objectives. An overview of renewable energy sources is given in this study. The estimation of Turkey's electricity consumption and the resource-dependent electricity generating policy that resulted from it is then assessed. A linear mathematical model that delivers the optimal share of each power generation technology has been developed in order to reduce costs and CO₂ emissions. It has been demonstrated that power generation resources should be used to meet the annual electricity consumption using the proposed mathematical model. The subject of wind energy and the production of power from it is also discussed. Time series analysis is used to examine the historical wind speed data in the study's chosen location and make future projections. Additionally, based on the monthly production data, an economic analysis of various wind turbines is conducted, and the viability of investment is assessed.

Keywords: CO₂ emission, economy, electricity consumption, forecasting, optimization, renewable energy, sustainable development, wind energy

ÖNSÖZ

Yüksek lisans öğrenimim boyunca ve tez çalışmamın her aşamasında bilgi, birikim ve tecrübeleri ile bana yol gösterici olan, kendisine ne zaman danışsam kıymetli zamanını ayırıp sabırla ve büyük bir ilgiyle bana faydalı olabilmek için elinden gelenden fazlasını sunan, güler yüzünü ve samimiyetini esirgemeyen, bilimsel kimliğini ve insanlığını örnek aldığım ve öğrencisi olmaktan gurur duyduğum değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Muzaffer ALİM'a en içten dileklerle teşekkür ederim.

Hayatımın her anında maddi ve manevi olarak her zaman bana destek olan, aldığım her türlü kararda arkamda durup bana daha iyi şartlar sunmak için her zaman çabalayan ve bugünlere gelmemde en büyük paya sahip annem Kumriye ATILGAN ve biricik kardeşim Betül ATILGAN'a gönülden teşekkür ederim.

Ayrıca desteklerini her zaman yanımda hissettiğim ATILGAN ve SEYYİDOĞLU ailelerine teşekkürlerimi sunarım.

Her ne kadar kendisini hatırlamasam da anlatılanlarla hayatıma örnek olan rahmetli babam M. Nurullah ATILGAN'ın anısına...

Süleyman ATILGAN
BATMAN-2022

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	x
KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
2. YENİLENEBİLİR ENERJİ.....	3
2.1. Güneş Enerjisi	4
2.1.1. Avantajları	5
2.1.2. Dezavantajları	6
2.2. Rüzgâr Enerjisi	6
2.2.1. Avantajları	8
2.2.2. Dezavantajları	8
2.3. Hidroelektrik Enerjisi	8
2.3.1. Avantajları	9
2.3.2. Dezavantajları	10
2.4. Jeotermal Enerji	10
2.4.1. Avantajları	11
2.4.2. Dezavantajları	12
2.5. Biyokütle Enerjisi	13
2.5.1. Avantajları	14
2.5.2. Dezavantajları	15
2.6. Dalga Enerjisi	15
2.6.1. Avantajları	16
2.6.2. Dezavantajları	17
2.7. Hidrojen Enerjisi	17
2.7.1. Avantajları	18
2.7.2. Dezavantajları	19
2.8. Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Kullanımı.....	19
3. RÜZGÂR TÜRBİNİ	22
3.1. Rüzgâr Türbini Kısımları ve Çalışma Prensibi	22
3.2. Rüzgâr Türbininde Enerji Dönüşümünün Fiziksel Prensipleri.....	24
3.3. Rüzgâr Türbini Aerodinamikleri	28
3.4. Rüzgâr Türbini Performansı	30

4. LİTERATÜR TARAMASI	31
4.1. Enerji Tüketimi ve Tahmini	31
4.2. Rüzgâr Türbini Üretim Tahmini ve Ekonomik Analizi	34
5. ELEKTRİK TÜKETİMİ TAHMİNİ VE FARKLI KAYNAKLARDAN ELEKTRİK ÜRETİMİNİN EKONOMİK VE ÇEVRESEL AÇIDAN OPTİMİZASYONU	38
5.1. Veri ve Modelleme Tekniği	38
5.1.1. Tahmin Tekniği	40
5.1.2. Model Seçimi	41
5.1.3. Matematiksel Model	41
5.2. Numerik Sonuçlar ve Bulgular	42
5.2.1. Elektrik Tüketimi Tahmini	42
5.2.2. Elektrik Tüketiminin Ekonomik ve Çevresel Etkisi	45
6. RÜZGÂR ENERJİSİNDEN ELEKTRİK ÜRETİM TAHMİNİ VE EKONOMİK ANALİZİ	49
6.1. Rüzgâr Enerjisi Hesaplamaları	50
6.2. Veri ve Matematiksel Yaklaşım	51
6.2.1. Tahmin Yöntemi	51
6.2.2. Ekonomik Model	54
6.3. Numerik Sonuçlar ve Tartışma	55
7. SONUÇLAR	57
KAYNAKLAR	58
ÖZGEÇMİŞ	67

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Güneş Enerjisi Üretim Şeması.....	5
Şekil 2.2. Rüzgâr Türbinleri.....	7
Şekil 2.3. Hidroelektrik Santrali ve Enerji Üretim Şeması	9
Şekil 2.4. Jeotermal Enerji Santrali.....	11
Şekil 2.5. Biyokütle Enerji Döngüsü	13
Şekil 2.6. Dalga Enerjisi Santrali	16
Şekil 2.7. Hidrojen Enerjisi Sistemi.....	18
Şekil 2.8. Yenilenebilir Kaynaklı Kurulu Gücün Yıllar İtibariyle Gelişimi	20
Şekil 2.9. Yenilenebilir Kaynaklı Kurulu Gücün Toplam Kurulu Güç İçindeki Payı	20
Şekil 2.10. Türkiye Elektrik Enerjisi Üretiminin Kaynaklara Göre Dağılımı	21
Şekil 2.11. Türkiye Yenilenebilir Enerji Kaynakları Dağılımı	21
Şekil 3.1. Düşey Eksenli Rüzgâr Türbinleri	22
Şekil 3.2. Yatay Eksenli Rüzgâr Türbini Parçaları	23
Şekil 3.3. Rüzgâr Türbini Akım Borusu	24
Şekil 3.4. Güç Katsayısı ile Hız Oranının Grafiği	27
Şekil 3.5. İdeal Türbin İçin Akım Koşulları	28
Şekil 3.6. Aktüatör Disk Üzerinde Hava Akışı.....	28
Şekil 5.1. Yıllar İtibariyle Değişkenler	39
Şekil 5.2. Polinom Regresyon Tahmini ve Gerçek Değer Grafiği.....	43
Şekil 5.3. ARIMA(0,1,1) Model Grafiği ve Kalıntı Değerleri	44
Şekil 5.4. Dinamik Regresyon ve ARIMA(1,0,2) Hata Model Grafiği ve Kalıntı Değerleri	44
Şekil 5.5. Dinamik Regresyon ve Zaman Serisi ile Gelecek Elektrik Tüketimi Tahmini	45
Şekil 5.6. 2021-2025 Çeşitli Elektrik Üretim Kaynaklarına Göre Maliyet-CO ₂ Değişimi	47
Şekil 6.1. Rüzgâr Türbini Güç Eğrisi.....	50
Şekil 6.2. 2010-2021 Konya İli Aylık Ortalama Rüzgâr Hızı Ölçümleri	51
Şekil 6.3. ARIMA(1,0,1)(2,1,1)[12] Kalıntı Değerleri	52
Şekil 6.4. ARIMA(1,0,1)(2,1,1)[12] Gelecek Tahmini	53
Şekil 6.5. Türbinlerin Aylara Göre Elektrik Üretim Potansiyeli	55

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 5.1. Tanımlayıcı İstatistikler	39
Tablo 5.2. Parametreler ve Değişkenler	41
Tablo 5.3. Modellerin Performans Kriterleri.....	44
Tablo 5.4. Çeşitli Elektrik Üretim Teknolojilerinin Ekonomik ve Emisyon Özellikleri.....	46
Tablo 5.5. Türkiye Kurulu Gücü ve Elektrik Üretimi	46
Tablo 6.1. Rüzgâr Türbinlerinin Teknik Özellikleri.....	55
Tablo 6.2. Rüzgâr Türbinlerinin Ekonomik Verileri.....	55
Tablo 6.3. Ekonomik Analiz Sonuçları	56

KISALTMALAR

ANFIS:	Uyarlama Ağ Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemi
ARIMA:	Otoregresif Entegre Hareketli Ortalama
GSYİH:	Gayri Safi Yurt İçi Hâsıla
MAE:	Ortalama Mutlak Hata
NPV:	Net Bugünkü Değer
RMSE:	Ortalama Hataların Karekökü

1. GİRİŞ

Enerji, yaşam standartlarının yükseltilmesi ve insanların temel ihtiyaçlarının karşılanması için vazgeçilmezdir. Dünyada sanayileşme, kentleşme, nüfus artışı ve teknolojik gelişmeler ile birlikte enerjiye olan talep her geçen gün artmaktadır. Çağımız, iletişim çağı, küreselleşme çağı ve bilgi çağının yanında enerji çağıdır. Sosyal ve ekonomik gelişmenin en temel unsurlarından biri olan enerji, ülkelerin iç ve dış politikalarının oluşturulmasında en önemli faktörlerden biridir. Enerji, siyasi, teknolojik, ekonomik, jeopolitik, ekolojik, ulusal ve uluslararası boyutları ile gündeme gelmektedir. Ülkelerin ekonomik durumları, enerji kaynaklarının varlığı, enerji üretim ve tüketim miktarları, siyasi ilişkileri, teknolojik gelişmeler, enerjinin kalitesi, çevresel etkileri ve maliyeti sabit olmayıp sürekli değişime uğramaktadır. Bu durum enerjiye olan talebi her geçen gün arttırmakta ve sürekli değerlendirilmesini gerektirmekte olduğunu açık bir şekilde göstermektedir (Erdoğan, 2016).

Enerji kaynaklarına olan talep Endüstri Devrimi sonrasında artış yaşamaya başlamış ve bu artış hızlı bir şekilde devam etmektedir. Dünyanın ihtiyaç duyduğu enerjinin çok büyük bir oranı fosil enerji kaynaklarından (petrol, kömür ve doğalgaz) karşılanmaktadır. Günlük yaşantımız içinde neredeyse her alanda kullanılan fosil enerji kaynakları, hem üretim teknolojisindeki gelişmeler hem de ucuz olmaları nedeniyle özellikle son iki yüzyıldır yaygın olarak kullanılmaktadır. Enerji arzı Endüstri Devrimi sonrasında kömürle başlayıp ilerleyen yıllarda bu arza petrol ve doğalgaz da eklenmiştir. Ancak, 1973 yılında meydana gelen petrol krizinden sonra fosil yakıtlarına karşı güven sorunu ortaya çıkması kaçınılmaz olmuş ve bu nedenden dolayı dünya ülkeleri alternatif enerji kaynaklarına yönelmişlerdir. Fosil yakıtlarının çevre dostu olmaması ve yoğun bir şekilde çevreyi kirletmesinden dolayı bu arayış önemli derecede hızlanmıştır. Bu süreçte çok uzun yıllardan beri bilinen ve kullanılan, ancak fosil yakıtlarla rekabet edemediği için hep bir sonraki plan olarak görülen yenilenebilir enerji kaynakları önem kazanmıştır (Yılmaz, 2012).

1980’li yıllarda ilk olarak Bruntland Raporunda kullanılan “Sürdürülebilir” kavramı mevcut kaynakları gelecek nesillere yetecek biçimde kullanımını ifade etmektedir. “Sürdürülebilirlik” kavramı var olan kaynakların küresel ısınma gibi olaylardan dolayı tükenmesini ve değişmesini baz almıştır. Sürdürülebilirlik, yakın gelecekte üretebilme yeteneğinin korunması olarak ifade edilmektedir. Sürdürülebilir kalkınma, doğal kaynaklar ile çevre değerlerinin akılcı yöntemlerle bugünkü ve gelecek nesillerin yararlarını ve haklarını göz

önünde bulundurarak kullanması ilkesini esas alarak ekonomik gelişmeyi amaçlayan çevreci dünya görüşü olarak tanımlanmaktadır (Seydioğulları, 2013).

Enerji, sürdürülebilir kalkınmanın temel bileşenleri olan çevresel koruma, ekonomik büyüme ve sosyal denge ile ilgili belirlenen hedeflere gelinmesinde önemli bir başlangıç noktasıdır. İnsanlığın ihtiyacı olan enerji tüketiminin çevreye zarar verilmeden ve ekonomik olarak sağlanması amacıyla sürdürülebilir kalkınma ile ilgili çalışmalarda enerji önemli konulardan biri olmuştur. Sürdürülebilir enerji kavramı; çevrim teknolojilerinde atık şeklinde ortaya çıkan enerjinin farklı çevrimlerde girdi olarak kullanılmasını, fosil kaynaklar yerine yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanmasını, birincil enerji kaynaklarından yapılan üretimin temiz teknolojilerle ve yüksek verimle gerçekleştirilmesini, yeni çevre dostu teknolojilerle fosil kaynakların değerlendirilmesini kapsayan ve bunu ekonomik büyüme ile bütünleştiren bir kavram olarak tanımlanmaktadır (Öymen ve Ömeroğlu, 2020).

Giriş bölümünü oluşturan bu bölümde araştırmanın konusu, problem durumu, amacı ve önemi gibi konular belirtilerek çalışma yöntemine ait bilgilere yer verilmiştir. İkinci bölümde yenilenebilir enerji kaynakları olan güneş, rüzgâr, hidroelektrik, jeotermal, biyokütle, dalga ve hidrojen enerji kaynaklarının genel bilgileri avantaj ve dezavantajlarıyla ele alınmış olup, Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ile ilgili güncel bilgilere yer verilmiştir. Üçüncü bölümde tez kapsamında ele alınan rüzgâr türbinlerinin kısımları, çalışma prensipleri, enerji dönüşümlerinin fiziksel prensipleri ve türbin performansı ile ilgili genel bilgilere yer verilmiştir. Dördüncü bölümde tez kapsamında enerji ve elektrik tüketiminin tahmin edilmesini ve bunun çeşitli ekonomik göstergeler ile arasındaki ilişkilerini ele alan çalışmalar incelenmiştir. Sonrasında ise rüzgâr türbininin elektrik üretim potansiyeli ve buna dayalı olarak yapılan ekonomik analizleri içeren çalışmalar taranarak detaylı bir şekilde sunulmuştur. Beşinci bölümde, Türkiye’nin geçmiş dönem verileri ele alınarak çeşitli yöntemlerle elektrik tüketimi tahmini yapılmıştır. Maliyeti ve CO₂ emisyonunu en aza indirmek için her bir elektrik üretim teknolojisinin optimal payını sağlayan bir lineer matematiksel model geliştirilmiştir. Geliştirilen matematiksel model kullanılarak yıllık elektrik tüketimini karşılamak için hangi elektrik üretim kaynaklarının kullanılması gerektiği gösterilmiştir. Altıncı bölümde CO₂ salınımı en az olan yenilenebilir enerji kaynağı rüzgâr enerjisi ele alınmıştır. Çalışma için seçilen bölgedeki geçmiş dönem rüzgâr hızı verileri makine öğrenmesi teknikleri ile değerlendirilerek geleceğe yönelik tahminler yapılmıştır. Ayrıca aylık üretim verileri üzerinden farklı rüzgâr türbinlerinin ekonomik analizi yapılmış ve yatırım yapılabilirliği değerlendirilmiştir.

2. YENİLENEBİLİR ENERJİ

Günümüzde fosil yakıtların tüketimi dünya nüfusunun artması, yaşam kalitesindeki gelişmeler ve gelişmekte olan ülkelerin sanayileşmesi ile birlikte önemli ölçüde artmaktadır. Bu aşırı tüketim çevre üzerinde olumsuz etkiler yaratmakta ve fosil yakıt rezervlerinin hızlı bir şekilde azalmasına yol açmaktadır. Ayrıca sağlık riskleri ve küresel iklim değişikliğini beraberinde getirmektedir. Bu nedenlerden dolayı ülkeler fosil yakıtlar yerine temiz, güvenilir ve tükenmez yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmişlerdir (Karagöl ve Kavaz, 2017).

Enerjinin önemi birinci petrol krizinin meydana geldiği 1973 yılından sonra tüm dünya ülkeleri tarafından daha iyi anlaşılmaya başlanmış ve meydana gelen krizden sonra ülkeler enerji kaynaklarını çeşitlendirerek arttırmaya ve alternatif enerjini kaynaklarının kullanımı noktasında önemli adımlar atmışlardır. Alternatif enerji kaynağı arayışları 2000’li yıllarda büyük bir ivme kazanarak yenilenebilir enerji üzerine yapılan çalışmalar hızlı bir şekilde artmıştır (Karagöl ve Kavaz, 2017).

Yenilenebilir enerji “kendini sürekli yenileyen ve doğal kaynaklardan elde edilebilen bir enerji kaynağı” olarak tanımlanabilir. Yenilenebilir enerjiyi diğer enerji kaynaklarından ayıran en önemli özellik kendini doğal bir şekilde yenileyebilmesi ve kendini sürekli yenilediğinden yok olmamasıdır. Bunun yanı sıra yenilenebilir enerji kaynakları çevreye önemli ölçüde zarar veren karbon salınımının azaltılması ve yerli kaynak olduğundan ülkelerin dışa bağımlılığın azaltılması gibi avantajlardan dolayı hem kullanılması hem de kullanılmaya teşvik edilmesi oldukça önemlidir (Karagöl ve Kavaz, 2017).

Yenilenebilir enerji kaynaklarını şu şekilde sıralanabilir;

- Güneş Enerjisi
- Rüzgâr Enerjisi
- Hidroelektrik Enerjisi
- Jeotermal Enerji
- Biyokütle Enerjisi
- Dalga Enerjisi
- Hidrojen Enerjisi

Yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş ve rüzgâr enerjisi üretimlerinin hızlı bir şekilde artmasına rağmen, fosil yakıtlar dünya genelindeki toplam enerji tüketiminin büyük bir

çoğunluğunu oluşturmaktadır. Dünya genelinde 2018 yılı itibarıyla, enerji tüketiminin %79,9'unu fosil yakıtlar, %11'ini modern yenilenebilir enerji kaynakları, %6,9'unu pişirme ve ısıtmaya yönelik geleneksel biyokütle, %2,2'sini nükleer enerji kullanımı oluşturmaktadır. Hidroelektrik santralleri, tüketilen modern yenilenebilir enerji kaynaklarının %3,6'sını oluşturmaktadır (Anonymous, 2020).

Yenilenebilir enerji üretim kapasitesi, dünya çapında kurulu 115 GW'lık bir üretim kapasitesine ulaşarak 2019 yılında en yüksek yıllık artışını gerçekleştirmiştir. 2019 yılındaki toplam kapasite 2018 yılına göre %8 oranında artmıştır. Yeni kurulan yenilenebilir enerji kapasitesinin yaklaşık %57'sini güneş PV sistemleri karşılamıştır. 2019 yılında güneş PV kapasitesi, fosil yakıtların ve nükleer enerjinin net ilavesinden daha fazla katkı sunmuştur. Geriye kalan yenilenebilir enerji kapasitesi katkılarının çoğunu ise rüzgâr ve hidroelektrik enerjileri oluşturmuş, rüzgâr enerjisi %30, hidroelektrik enerjisi ise %8 oranında katkı sağlamıştır (Anonymous, 2020).

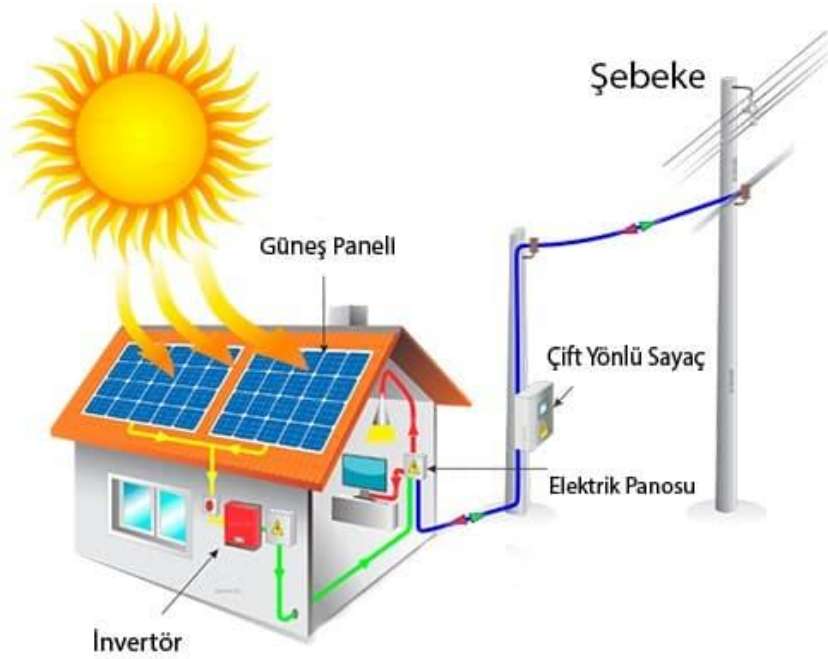
2.1. Güneş Enerjisi

Güneş enerjinin temel kaynağıdır. Güneşin çekirdeğinde meydana gelen büyük nükleer tepkimeler sonucunda ısı ve ışık ortaya çıkmaktadır. Güneşin çekirdeğindeki yüksek sıcaklık (15 milyon °C) ve yoğunluk hidrojen atomlarının helyum atomlarına dönüşmesine neden olmakta ve güneşin çekirdeğinde olan mevcut füzyon süreciyle çok güçlü bir enerji oluşmaktadır. Ortaya çıkan güneş enerjisi, radyasyon ile uzaya yayılım yapmakta ancak dünya yüzeyine ulaşan bu enerjinin miktarı tam olarak hesaplanamamaktadır. Güneşten gelen enerji ısıtıcılar yoluyla ısıtılmakta ya da güneş enerji santralleriyle elektrik enerjisine dönüştürülüp kullanılmaktadır (Erdoğan, 2016).

Güneş enerjisi, çekirdeğinde bulunan hidrojen gazının bazı kimyasal tepkimelerle helyuma dönüşmesi sonucunda açığa çıkan ışıma enerjisidir. Güneşten gelen enerjinin yarısı ya yansımalar sonucu geri döner ya da emilerek dünyaya ulaşmadan yok olmaktadır. Geri kalanı ise dünyada emilir. Güneş enerjisinin ortalama kuvveti 1.370 W/M^2 'dir. Güneşin atmosfer dışında olmasından dolayı 0 W/M^2 ile 1100 W/M^2 arasında dünyamıza güneş enerjisi ulaşmaktadır (Yeşil, 2015).

Güneşten ve güneşin ürettiği enerjiyi kullanmak adına insanlık tarihi boyunca birçok çalışma yapılmış ve 1970'lere gelindiğinde bu çalışmalarda büyük yol alınmıştır. Günümüzde güneş enerjisi teknolojileri her geçen gün artmakta ve maliyetler geçmiş yıllara göre düşmektedir. Daha önceki yıllarda sadece ısı enerjisi olarak kullanılan güneş enerjisi şimdilerde

fotovoltaik güneş panelleri kullanılarak elektrik üretilmektedir. Güneşten elde edilen enerji birçok alanda kullanılabilir. Bunlar; sıcak su kullanımı, su arıtma teknolojileri, güneş pilleri, güneş tabanlı ocaklar, tarımsal sulama, güneş enerjili otomobiller vb. alanlardır (Yeşil, 2015).



Şekil 2.1. Güneş Enerjisi Üretim Şeması (Anonim 2022a)

Güneş dünyaya ulaştıktan sonra doğal ve yapay dönüşüm yollarıyla dönüştürülerek kullanılmaktadır. Doğal dönüşüme örnek olarak güneş ışığıyla ısınan suyun buharlaşması ile su döngüsünün oluşması verilebilir. Bir diğer önemli dönüşüm tipi ise fotosentezdir. Dünya üzerinde bulunan canlıların varlığını sürdürebilmesi için fotosentez olmazsa olmazdır. Biyokütle, güneşten gelen enerji ile bitkiler fotosentez olayını gerçekleştirilmesiyle oluşur. Diğer doğal dönüşüm tiplerine örnek, deniz dalgaları ile okyanus akıntıları ve rüzgârdır. Rüzgâr atmosferdeki basıncın değişmesi sonucu ortaya çıkar. Bu basıncın değişmesinde güneş önemli rol oynar. Rüzgârın oluşumuyla akıntılar ve deniz dalgaları oluşur. Bu nedenlerden dolayı rüzgâr, akıntılar ve deniz dalgaları da güneşin türevleridir (Öztürk, 2008).

Güneş enerjisinin olumlu ve olumsuz yönleri bulunmaktadır. Bunları avantaj ve dezavantaj olarak düşünüp sıralayabiliriz.

2.1.1. Avantajları

- Güneş enerjisi yenilenebilir enerji kaynakları arasında olduğundan çevreci ve temiz bir enerji kaynağıdır.

- Güneş enerjisi dışa bağımlı olmadığından ülkelerin birbirlerine olan bağımlılığını kaldırır.
- Güneş enerjisi sessizdir.
- Güneş enerjisi tükenmeyen enerji kaynağı olduğundan kullanımı sırasında herhangi bir yakıtı ihtiyaç yoktur.
- Güneş enerjisinin bakım ve işlem maliyeti diğer enerji türlerine göre daha düşüktür.
- Güneş enerjisinden elektrik üretmek çok kolaydır.
- Güneş enerjisi tesisi kurulumu kolaydır yaklaşık 1-9 ay arasında santral kurmak mümkündür.
- Güneş enerjisi ile elektrik üreten tesislerin amortisman süresi 5-6 yıl arasındadır.
- Güneş enerjisi elektrik alt yapısı olmayan bölgelerde kullanılabilir.
- Güneş enerjisi şebekeye veya iletim hattına ihtiyaç duymaz.
- Güneş enerjisi karmaşık bir teknoloji gerektirmez.

2.1.2. Dezavantajları

- Güneş enerjisi hava şartlarına bağlı bir enerji olduğundan geceleri ve kışın enerji üretimi çok fazla düşmektedir.
- Güneş enerjisi santrallerinin yatırım maliyeti diğer enerji kaynaklarına göre daha yüksektir.
- Güneş panelleri ile güneş ışınlarının en fazla %20'sini elektrik enerjisine dönüştürülebildiğinden verimi düşüktür.
- Güneş panelleri kurulumu için geniş alanlara ihtiyaç duyulmaktadır.
- Güneş panellerinin tarıma elverişli yerlerde kurulması durumunda tarımsal üretim düşer.
- Güneş enerjisi anında kullanılmalı veya büyük bataryalarla depolanmalıdır.

2.2. Rüzgâr Enerjisi

Rüzgâr, güneş ışınlarının dünyayı farklı ısıtmasından dolayı oluşmaktadır. Havanın ve denizlerin farklı ısınması basınç farkı oluşmasına, bu basınç farkı ise havanın hareketine neden olmaktadır. Havanın hareketinin yüksek basınçtan alçak basınca doğru ilerlemesiyle rüzgâr oluşmaktadır (Koç ve Kaya, 2015). Rüzgârın oluşumunda coğrafi koşullar en önemli etkenlerden biridir. Dağlar, denizler ve vadiler rüzgârın oluşmasındaki faktörlerdir. Bu

faktörlerin yüzey şekilleri, perdeleme ve pürüzlülük gibi etkilerinin bulunmasından dolayı rüzgârın oluşumu tetiklenmektedir (Durak ve Özer, 2008).

Rüzgâr enerjisi milattan önceki yıllarda kullanılmaya başlanmış, karalarda rüzgâr değirmenlerine ve yel değirmenlerine, denizlerde ise yelkenli gemilere ana güç kaynağı olmuştur. Özellikle su pompalama, buğday ve mısır öğütme gibi ihtiyaçlar bu yolla karşılanmıştır. Rüzgâr enerjisi milattan önce 2800’lü yıllarda Orta Doğu’da kullanılmaya başlanmıştır. Rüzgâr enerjisi milattan önce 17. Yüzyılda Mezopotamya’da tarımda sulama amacıyla kullanılmakta iken aynı dönemde Çin’de de kullanılmaktaydı. İlk olarak yel değirmenleri İskenderiye civarında kurulmuştur. Türkler ve İranlılar yel değirmenlerini milattan sonra 7. Yüzyılda kullanmaya başlamışlardır. Avrupalılar ise ilk olarak yel değirmenlerini haçlı seferlerinde görmüşlerdir. Avrupa’da Endüstri Devrimine kadar hızla yayılan yel değirmenleri su pompalamak, hızar çalıştırmak, tarımsal ürünleri öğütmek gibi amaçlarla geliştirilmişlerdir (Elibüyük ve Üçgül, 2014).



Şekil 2.2. Rüzgâr Türbinleri (Anonim 2022b)

Rüzgâr enerjisi, buhar makinesinin yapılması ve kömür, odun gibi yakıtların üretimine başlanması ile önemini yitirmiştir. Bununla beraber, 1890’lı yıllarda Danimarka’da elektrik üretiminde kullanılan ilk makineler olan rüzgâr türbinleri yapılmıştır. Mühendis Paul la Cour tarafından rüzgâr enerjisinden elektrik üretilen ilk türbin Danimarka’da üretilmiştir. Rüzgâr türbini, rüzgârda bulunan kinetik enerjiyi önce mekanik enerjiye, ardından oluşan mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir (Elibüyük ve Üçgül, 2014).

Rüzgâr enerjisinin olumlu ve olumsuz yönleri bulunmaktadır. Bunları avantaj ve dezavantaj olarak düşünüp sıralayabiliriz.

2.2.1. Avantajları

- Rüzgâr enerjisi ekolojik dengeyi korur ve sera gazı emisyonu oluşturmadiğından kirlilik yaratan yenilenemeyen enerji kaynaklarına alternatif olan yenilenebilir bir enerji kaynağıdır.
- Rüzgâr enerjisi dışa bağımlı olmadığından ülkelerin birbirlerine olan bağımlılığını kaldırır.
- Rüzgâr enerjisi dünyanın bir çok yerinde mevcuttur.
- Rüzgâr enerjisi yenilenebilir bir enerji kaynağı olduğundan, hammadde maliyeti bulunmamaktadır.
- Rüzgâr türbinleri bulundukları alanı paylaşabilir.
- Rüzgâr enerjisi santralleri, güneş enerjisi santralleri gibi çok alan kaplamaz.
- Rüzgâr türbinleri daha verimli yerlere taşınabilir.
- Rüzgâr enerjisinin ilk kurulumundan sonra işletme maliyeti düşüktür.

2.2.2. Dezavantajları

- Rüzgâr türbinleri elektromanyetik dalgayı etkileyebilir.
- Rüzgâr enerjisinden istenilen verim sadece yüksek tepelik alanlardan elde edilir.
- Rüzgâr türbinleri uçan canlılar için tehdit oluşturmaktadır.
- Rüzgâr türbinlerinin çalışabilmesi için rüzgârın optimum seviyede esmesi gerekmektedir.
- Rüzgâr türbinlerinin devrilme ve yanma riskleri vardır.
- Rüzgâr enerjisinin yatırım maliyeti çok yüksektir.
- Rüzgâr türbinleri gürültülü bir şekilde çalıştığından yakın çevrede yaşayan insanları rahatsız etmektedir.

2.3. Hidroelektrik Enerjisi

Hidroelektrik enerji, akışkanların akışı esnasındaki gücün kullanılmasıyla üretilen enerjiye denir. Bu enerji kaynaklar üzerine barajlar inşa edilerek akan suyu biriktirmek ve bu suyun potansiyel enerjisinden faydalanılarak kinetik enerjiye dönüşmesi ile elektrik enerjisi üretmektedir. Hidroelektrik santralleri ihtiyacın olduğu yere değil kaynağın olduğu yere kurulabilir. Hidroelektrik santrallerinin kurulması uzun zaman ve yüksek maliyet gerektirmektedir (Erdoğan, 2016).

Hidroelektrik enerji, yenilenebilir temiz enerji kaynaklarının başında gelmekte ve tüm dünyada büyük önem arz etmektedir. Gelişmekte olan ülkeler için büyük bir yenilenebilir enerji potansiyeli olup, görmemezlikten gelinemez. Dünyadaki 24 ülkede toplam elektrik üretiminin %90'ı hidroelektrik santrallerinden karşılanmakta, 63 ülkede ise elektrik üretiminin %50'si bu yolla karşılanmaktadır. Bu durum hidroelektrik santrallerinin önemini açık bir şekilde göstermektedir (Bozkurt ve Tür, 2015).

Hidroelektrik enerji, dünyada kullanılan yenilenebilir enerji kaynakları arasında kurulu güç olarak ilk sırada yer almaktadır. Elektrik enerjisi üretiminde bu kaynakların kullanımı her geçen gün artmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansının tahminlerine göre yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı 2040 yılına kadar %6,9 büyüme oranı ile hızlı bir şekilde artması beklenmekte olup, bu büyüme içerisinde hidroelektrik enerji gücünün yıllık ortalama %1,8 oranında büyümeye sahip olması beklenmektedir (Özcan ve ark., 2017).



Şekil 2.3. Hidroelektrik Santrali ve Enerji Üretim Şeması (Anonim 2022c ve Anonim 2022d)

Hidroelektrik enerji kaynaklarının kullanımı ile ilgili beklentiler elektrik ihtiyacındaki artışla beraber artması yönündedir. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında en ekonomik olan hidroelektrik enerji potansiyelinin ancak %20'sinden faydalanılmaktadır. Ayrıca 10 GW'a kadar kurulu güce sahip hidroelektrik santrallerinin kurulması bu enerjinin gelecek vadeden yönünü gösterecektir (Özil ve ark., 2013).

Hidroelektrik enerjisinin olumlu ve olumsuz yönleri bulunmaktadır. Bunları avantaj ve dezavantaj olarak düşünüp sıralayabiliriz.

2.3.1. Avantajları

- Hidroelektrik enerjisi dışa bağımlı olmadığından ülkelerin birbirlerine olan bağımlılığını kaldırır.
- Hidroelektrik enerji sera gazı emisyonu oluşturmadığından kirlilik yaratan yenilenemeyen enerji kaynaklarına alternatif olan yenilenebilir bir enerji kaynağıdır.

- Hidroelektrik santrallerinin sağlığa ve çevreye olumsuz yönleri yoktur.
- Hidroelektrik santralleri spor aktiviteleri ve turizm alanlarına da fayda sağlamaktadır.
- Hidroelektrik santrallerinde iletim ve enerji depolama işlemleri kolaydır.
- Hidroelektrik santrallerinin yakıt giderleri olmamakla beraber kayıpları oldukça azdır.
- Hidroelektrik enerjisi yenilenebilir bir enerji kaynağı olduğundan, hammadde maliyeti yoktur.
- Hidroelektrik santrallerinin kurulum amacı elektrik üretmek olsa da sulama işlemleri içinde büyük yarar sağlamaktadır.
- Hidroelektrik santralleri oluşabilecek yüksek enerji ihtiyaçlarını hızlı bir şekilde karşılayabilir.
- Hidroelektrik elektrik santralleri güvenilirdir.
- Hidroelektrik santrallerinin birim enerji maliyeti düşük ve verimi sürekli dir.

2.3.2. Dezavantajları

- Hidroelektrik santrallerinin ilk kurulum maliyeti çok yüksek ve kurulum süresi çok uzundur.
- Hidroelektrik santralının enerjisi bölgedeki yağış miktarıyla doğru orantılıdır.
- Hidroelektrik santrallerinde suyun tutulmasından kaynaklanan iklim değışiklikleri ve tarımsal alanlarda azalmalar meydana gelmektedir.
- Hidroelektrik santralleri suda yaşayan canlıların göç hareketlerini engellemekte ve ekosistemine zarar vermektedir.
- Hidroelektrik santralleri kurulumunda bazı yerleşim yerleri su altında kaldığından bölgedeki halk için yerleşim yeri sorunu ortaya çıkmaktadır.

2.4. Jeotermal Enerji

Jeotermal enerji, yer kabuğunun farklı derinliklerinde devamlı olarak atmosfer sıcaklığından yüksek olan ve çevresinde bulunan su kaynaklarına göre daha fazla minarel, tuz ve gaz bulunduran basınç altındaki su ve buhar kaynaklarına denir. Jeotermal enerjinin ortaya çıkan ısısı yer kabuğunun derinliklerinde bulunan magma kütesinden kaynaklanmaktadır. Jeotermal enerjiler sıcaklıklarına ve taşıdıkları enerjilere göre; düşük entalpili, orta entalpili ve yüksek entalpili olarak sınıflandırılmaktadır. Sıcaklığı 25°C'den küçük olanlara düşük entalpili, sıcaklığı 125-225°C arasında olanlara orta entalpili ve sıcaklığı 225°C'den yüksek olanlar yüksek entalpili olarak adlandırılmaktadır (Erkul, 2012).

Jeotermal enerjiden elektrik enerjisi üretimi, sera ısıtma, konut ısıtma, kent ısıtma ve sıcak su bağlama, tropikal bitki yetiştirme, fizik tedavi ve yüzme havuzu ısıtma, havaalanı pistlerini ısıtma, toprak ve cadde ısıtma, kâğıt, konserve yapımında, dokuma ve boyamacılıkta, çeşitli endüstriyel kullanımlar, ağaç kaplama sanayisi ve kerestecilikte, derilerin kurutulması ve işlenmesinde, yiyeceklerin kurutulmasında, beton blok kurutulmasında, yıkama amaçlı çamaşırhanelerde kullanımı, soğutularak içme suyu kullanımı, soğutma tesislerinde ve sağlık amaçlı kaplıca kullanımı gibi alanlarda faydalanılmaktadır (Erkul, 2012).



Şekil 2.4. Jeotermal Enerji Santrali (Anonim 2022e)

Jeotermal enerji kaynaklarının kullanım alanları sıcaklığa bağlı olarak değişiklik göstermektedir. 20°C’de balık çiftliklerinde, 30°C’de sağlık amaçlı kaplıcalarda, 40°C’de toprak ısıtmada, 50°C’de mantar yetiştirmede, 60°C’de sera, ahır ve kümeslerin ısıtılmasında, 70°C’de soğutmada (lityum bromür yöntemiyle), 80°C’de yer ısıtmasında, 90°C’de balık kurutmada, 100°C’de meyve ve sebze kurutmada, 110°C’de çimento kurutmada, 120°C’de temiz su elde edilmesinde, 130°C’de şeker rafinasyonunda buharlaştırmada, 140°C’de tarım ürünlerinin hızlı kurutulmasında, 150°C’de alüminyum elde edilmesinde, 160°C’de kereste kurutmada, 170°C’de diatomik malzeme kurutma, ağır su ve hidrojen sülfid proseslerinde ve 180°C’de elektrik üretiminde kullanılmaktadır (Arslan ve ark., 2001).

Jeotermal enerjinin olumlu ve olumsuz yönleri bulunmaktadır. Bunları avantaj ve dezavantaj olarak düşünüp sıralayabiliriz.

2.4.1. Avantajları

- Jeotermal enerji kaynakları yerli teknolojinin gelişmesiyle ısıtma kolay ve ucuz olmaktadır.

- Jeotermal enerji yenilenebilir enerji kaynakları arasında olduğundan temiz bir enerji kaynağıdır.
- Jeotermal enerji kaynakları güneş, yağmur ve rüzgâr gibi meteorolojik olaylardan etkilenmez.
- Jeotermal enerji kaynaklarının kullanım alanı oldukça geniştir.
- Jeotermal enerji santralleri doğalgaz enerji santrallerinin ürettiği CO₂ miktarının altıda birini üretmektedir.
- Jeotermal enerji santralleri diğer enerji santrallerine göre daha az sürede faaliyete alınmaktadır.
- Jeotermal enerji santralleri diğer enerji santrallerine göre devamlı enerji üretilmesi sağlanabilmektedir.
- Jeotermal enerji düşük işletme ve bakım maliyetine sahiptir.
- Jeotermal santrallerde üretilen enerjinin diğer enerji türleriyle rekabet edebilecek kadar ucuzdur.
- Jeotermal yenilenebilir enerji kaynağı olduğu için fiyat hareketliliğinden fosil yakıtlar gibi etkilenmez.

2.4.2. Dezavantajları

- Jeotermal enerji kaynakları genellikle volkanik aktiviteye yakın olduklarından jeolojik bir sorunla karşılaşabilmektedir.
- Jeotermal enerji kaynaklarının hazırlık ve ön araştırma maliyetleri oldukça yüksektir.
- Jeotermal enerji santrallerinin ilk kurulum maliyeti çok yüksektir.
- Jeotermal enerji dünyanın belirli bölgelerinde vardır.
- Jeotermal enerji santrallerinin kurulduğu yer yerleşim yerlerine yakın olmaması gerekmektedir.
- Jeotermal enerji santrali kurulumunda en ufak bir hatada zehirli gazlar dışarıya sızma ihtimali yüksektir.
- Jeotermal enerji kaynaklarından üretilen enerji, enerjinin kullanılacağı yerleşim yerinden uzaktır.
- Jeotermal enerji kaynaklarından elektrik üretimi sırasında bazı kimyasallar ortaya çıkmaktadır.
- Jeotermal enerji kaynaklarının bulunduğu yerlerde hidrojen sülfür gazının salınmasından dolayı kötü bir koku oluşmaktadır.

2.5. Biyokütle Enerjisi

Biyokütle enerjisi, hayvansal ve bitkisel kökenli ana bileşenleri karbo-hidrat olan maddelerden üretilen yenilenebilir enerjiye denir. Yeşil bitkilerin güneşten gelen ışınları fotosentez yoluyla enerjiye dönüştürerek depolaması sonucu bitkisel biyokütle oluşmaktadır. Biyokütle enerjisi, yenilenebilir enerji kaynağı olması, elektrik üretilabilen, çevre dostu, çeşitli hallerde yakıtlar elde edilebilen ve her yerde yetiştirilebilmesinden dolayı önemli bir yenilenebilir enerji kaynağı olarak görülmektedir. Biyokütle çeşitli işlemlerden geçirilerek yakıt kalitesi artırılıp veya doğrudan yakılarak, mevcut yakıtlarla aynı özelliklerde alternatif biyoyakıtlar üretilmektedir (Karaosmanoğlu, 2006).

Biyokütle enerjisi kapsamında; bitkisel atıklar (saman, kabuk, dal, sap, kök vb.), elyaf bitkileri (sorgum, kenevir, kenaf, keten vb.), karbo-hidrat bitkileri (pancar, mısır, buğday, patates vb.), yağlı tohum bitkileri (aspir, pamuk, soya, kolza, ayçiçek vb.), odun (ağaç atıkları, enerji ormanları), şehirsal ve endüstriyel atıklar ile hayvansal atıklar değerlendirilmektedir. Biyokütle fiziksel süreçler (filtrasyon, ekstraksiyon ve birikitleme, kurutma, küçültme) ve dönüşüm süreçleri (termokimyasal ve biyokimyasal) ile pek çok katı, sıvı ve gaz biyoyakıt elde edilmektedir (Karaosmanoğlu, 2006).



Şekil 2.5. Biyokütle Enerji Döngüsü (Anonim 2022f)

Biyokütle enerjisi, dünyada bulunan enerji kaynakları arasında en büyük dördüncü enerji kaynağı olduğundan önemli bir konumda bulunmaktadır. Enerji kaynağı olarak kullanımında farklı hallerde yakıtlar elde edilmesi için çeşitli teknolojiler kullanılmaktadır. Biyokütleden biyodizel, biyogaz, biyoetanol gibi yakıtlar elde edilmektedir. Bu yakıtların yanı sıra odun briketi, metan, hidrojen ve gübre daha birçok yakıt biyokütleden elde edilmektedir.

Bu yakıtların elde edilmesinde biyokimyasal ve termokimyasal olarak ayırt edilebilen yeni teknikler geliştirilerek verimlilikleri arttırılmıştır (Kaplukan, 2014).

Biyokütle kaynaklarından farklı çevrim yöntemleri kullanılarak farklı yakıtlar elde edilmektedir. Havasız çürütme yöntemi ile biyogaz, piroliz yöntemi ile etanol, doğrudan yakma ile hidrojen, gazlaştırma yöntemi ile metanol, biyofotoliz ve esterleşme reaksiyonu yöntemleri ile motorin yakıtı elde edilmektedir. Biyoyakıtlar ısı, elektrik, içten yanmalı makinelerde, türbinlerde, jeneratörlerde, kazanlarda, yakma sistemlerinde ve taşıtlar için yakıt olarak da kullanılabilir. Biyokütleden enerjinin yanında yalıtım maddesi yapımı, kâğıt, mobilya gibi birçok alanda yararlanılmaktadır. Ulaşılabilir istatistiksel verilere bakıldığında biyokütle enerjisinin tüm dünyada önemli bir teknik potansiyele sahip olduğu açık bir şekilde görülmektedir (Kaplukan, 2014).

Biyokütle enerjisinin olumlu ve olumsuz yönleri bulunmaktadır. Bunları avantaj ve dezavantaj olarak düşünüp sıralayabiliriz.

2.5.1. Avantajları

- Biyokütle enerjisi yenilenebilir enerji kaynakları arasında olduğundan temiz bir enerji kaynağıdır.
- Biyokütle enerjisi atıkların değerlendirilmesini sağlar.
- Biyokütle enerjisinin insan sağlığına ve çevreye olumsuz etkileri yok denecek kadar azdır.
- Biyokütle enerjisi dışa bağımlı olmadığından ülkelerin birbirlerine olan bağımlılığını kaldırır.
- Biyokütle enerjisinin çevrim ve üretim yöntemleri iyi bilinmektedir.
- Biyokütle enerjisi diğer enerji kaynaklarına daha az sera etkisi oluşumuna sebep olmaktadır.
- Biyokütle enerjisi üretimi için yüksek sıcaklıklara ihtiyaç yoktur.
- Biyokütle enerjisinin SO₂ ve NO_x salınımı çok düşük olduğundan çevre kirliliği oluşturmaz.
- Biyokütle enerji üretim santralleri pek çok enerji üretim santraline göre daha az kurulum maliyetine sahiptir.
- Biyokütle enerjisinin depolama işlemleri kolaydır.
- Biyokütle enerjisi kırsal kesimin sosyal ve ekonomik iyileşmesini sağlar.

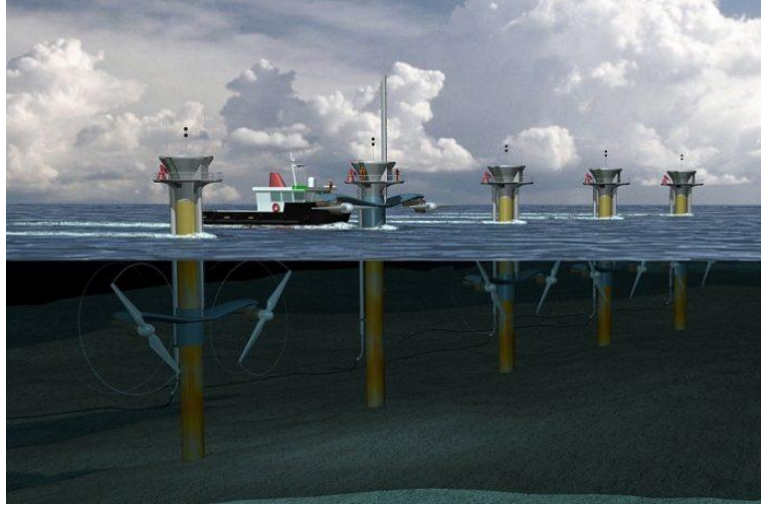
2.5.2. Dezavantajları

- Biyokütle enerjisi fosil yakıtlara göre daha düşük enerjiye sahiptir.
- Biyokütle enerjisi üretimi için gerekli olan bitkilerin üretilmesine ağırlık verilmesi diğer gıda ürünlerinin fiyatlarının artmasına neden olur.
- Biyokütle kaynakları genellikle dağınık olduğu için diğer enerji kaynaklarına göre taşıma maliyeti daha yüksektir.
- Biyokütle enerjisinin su ihtiyacı çok fazladır.
- Biyokütle enerjisi kurulumu için geniş alanlara ve geniş yerleşim bölgelerine ihtiyaç duymaktadır.
- Biyokütle enerji kaynaklarının ekilmesi, işlenmesi ve kullanılması uzun zamanlar almaktadır.
- Biyokütle enerjisi tarım alanlarında rekabet oluşmasına neden olur.

2.6. Dalga Enerjisi

Dalga; rüzgâr, ay ve güneşin çekim kuvveti, deniz altındaki depremler veya denizlerdeki hareketli taşıtların olumsuz etkileri sonucunda dengesi bozulan deniz yüzeyinin tekrar denge konumuna dönmek için yaptığı harekettir. Deniz kökenli tüm yenilenebilir enerjileri; deniz akıntıları enerjisi, gel-git (med-cezir) enerjisi, deniz dalga enerjisi, deniz yüzeyi buharlaşma enerjisi, deniz tuzluluk gradyent enerjisi ve deniz sıcaklık gradyent enerjisi olarak sıralamak mümkündür. Türbinlerin verimi ve çevre faktörleri göz önüne alındığında, deniz akıntıları enerjisi, deniz yüzeyi buharlaşma enerjisi, deniz tuzluluk gradyent enerjisi ve deniz sıcaklık gradyent enerjisini günümüzdeki teknolojik sistemlerle ekonomik olarak elektrik enerjisine veya farklı enerji türlerine dönüştürme olanağı yoktur (Örer ve ark., 2003).

Dalga enerjisi, dalganın periyoduna ve yüksekliğine göre değişmektedir. 100 kW ile 100 MW arasında ihtiyaca göre her güçte santral kurulması mümkündür. Meydana gelen afetler dışında Dünya’da görülen en büyük dalga 1933’te Alaska kıyılarında görülmüştür. Bu dalganın periyodu 14,8 s, yüksekliği 34 m ve boyu 342 m olarak ölçülmüş, hız olarak bu veriler 23,1 m/s ve grup hızı olarak 11,5 m/s olarak tespit edilmiştir. Birim genişliğe etkisi olan dünyadaki ortalama dalga güçleri; Çin’de 0,7-4,5 kW/m, Güney Afrika’da 10-14 kW/m, Kanada’da 0,6-101,6 kW/m, Portekiz sahillerinde 5-26 kW/m ve Kuzeydoğu Atlantik’te 100 kW/m olarak verilmektedir (Kapluhan, 2014).



Şekil 2.6. Dalga Enerjisi Santrali (Anonim 2022g)

Dalga enerjisinden yararlanılacak bölgede dalga enerjisinin potansiyelinin daha gerçekçi ve açık olarak belirlenebilmesi için oldukça pahalı ve uzun yıllara dayanan ölçümler yapmak gerekmektedir. Bu ölçümlerin yapılmasına imkân olmayan durumlarda daha ekonomik olan rüzgâr ölçümleri yapılarak, dalga ve rüzgâr arasındaki bağıntıyı veren ve birçok ölçüm sonucunda elde edilen verilerle dalga enerjisi hesaplanmaktadır. Dalganın gücü hareket periyodu ve genliğinin karesi ile doğru orantılıdır (Kapluhan, 2014).

Dalga enerjisinin olumlu ve olumsuz yönleri bulunmaktadır. Bunları avantaj ve dezavantaj olarak düşünüp sıralayabiliriz.

2.6.1. Avantajları

- Dalga enerjisi kıyıların korunmasını sağlar.
- Dalga enerjisi yenilenebilir enerji kaynakları arasında olduğundan temiz bir enerji kaynağıdır.
- Dalga enerjisi elektrik şebekesi bulunmayan bölgelerdeki elektrik ihtiyacının giderilmesini sağlar.
- Dalga enerjisi dışa bağımlı olmadığından ülkelerin birbirlerine olan bağımlılığını kaldırır.
- Dalga enerjisi sayesinde tuzlu su tatlı suya dönüştürülebilir.
- Dalga enerji dünyada çok önemli bir potansiyele sahip olduğundan bu alanda bilimsel çalışmaların artması enerji sorununu ortadan kaldırabilir.

2.6.2. Dezavantajları

- Dalga enerjisi yeni bir teknoloji olduğundan elektrik üretmek için çok fazla yöntem bulunmamaktadır.
- Dalga enerjisi santrallerinin kurulacağı yer yerleşim bölgelerine yakın olması gerekmektedir.
- Dalga enerjisi santrallerinin kurulum maliyeti oldukça yüksektir.
- Dalga enerjisi santralleri oluşabilecek kötü hava sonucunda zarar görebilir.
- Dalga enerjisinde her dalga boyu için farklı ve yeni bir sistem geliştirilmesi gerekmektedir.
- Dalga enerjisi sistemi yeni bir teknoloji olduğundan yeterli kalifiyeli eleman bulunması zordur.

2.7. Hidrojen Enerjisi

Hidrojen, güneş ve yıldızların termonükleer tepkimeye karşı verdikleri ısıнын yakıtıdır. Dünyada en çok bulunan ve en basit elementtir. Hidrojenin sıvı ve gaz hallerindeki hacminin oranı 1/700'dür. Tüm yakıtlara kıyasla birim kütle başına en çok enerjiye sahip gazdır. 2,8 kg petrol veya 2,1 kg doğal gaz 1 kg hidrojenin sahip olduğu enerjiye sahiptir. Havadan 14,4 kat daha hafif, zehirsiz, kokusuz ve renksiz bir gazdır. Hidrojen enerjisi her alanda kullanılabilen, güvenli ve kolay bir şekilde taşınabilen ve enerji kaybı az olan bir enerji türüdür. Doğada bileşikler halinde bulunan hidrojenin en çok bilinen bileşiği sudur. Hidrojen ile çalışan yakıt pilleri hidrojen enerjisinin geleceği için önemli teknolojilerdendir (Önal ve Yarbay, 2011).

Hidrojenin yakılması durumunda çevreyi kirleten veya sera etkisini arttıran hiçbir zararlı madde açığa çıkmamakla birlikte açığa çıkan ürün sadece su ve su buharıdır. Ayrıca diğer fosil yakıtlara göre 1,33 kat daha verimli bir yakıttır. Hidrojen doğalgaz ve kömürden elde edildiği gibi biyokütleden, dalga enerjisinden ve rüzgâr enerjisinden de üretilmektedir. Hidrojen enerji kaynağı yaygın olarak kullanıldığında hava kalitesi, enerji verimliliği ve global iklim değişikliği iyileşecektir. Fosil yakıtlarının yanmasına göre daha verimli bir enerji kaynağıdır. Hidrojen kirlilik ve sera gazı emisyonlarının seviyelerini düşürmesi ve petrole bağımlılığı azaltması ile önemli enerji problemlerini çözmektedir. Ancak günümüzde kullanılan geleneksel enerji kaynaklarından daha maliyetlidir (Önal ve Yarbay, 2011).



Şekil 2.7. Hidrojen Enerjisi Sistemi (Veziroğlu ve Türe, 2006)

Hidrojeni biyokütleden üretmede çeşitli teknolojiler bulunmaktadır. Bazı temel dönüşüm prosesleri uygulanarak biyokütleler hidrojen enerjisine dönüştürülebilir. Zeytin küspesi, çay ve saman atıkları piroliz ile, fındık kabuğu buhar gazlaştırma ile, kağıt atığı ve gübre çamuru mikrobiyal fermentasyon ile, şehirselle katı atıklar ve tahıl atıkları süperkritik su ekstraksiyonu ile dönüştürülebilmektedir (Demirbaş, 2009).

Hidrojen enerjisinin olumlu ve olumsuz yönleri bulunmaktadır. Bunları avantaj ve dezavantaj olarak düşünüp sıralayabiliriz.

2.7.1. Avantajları

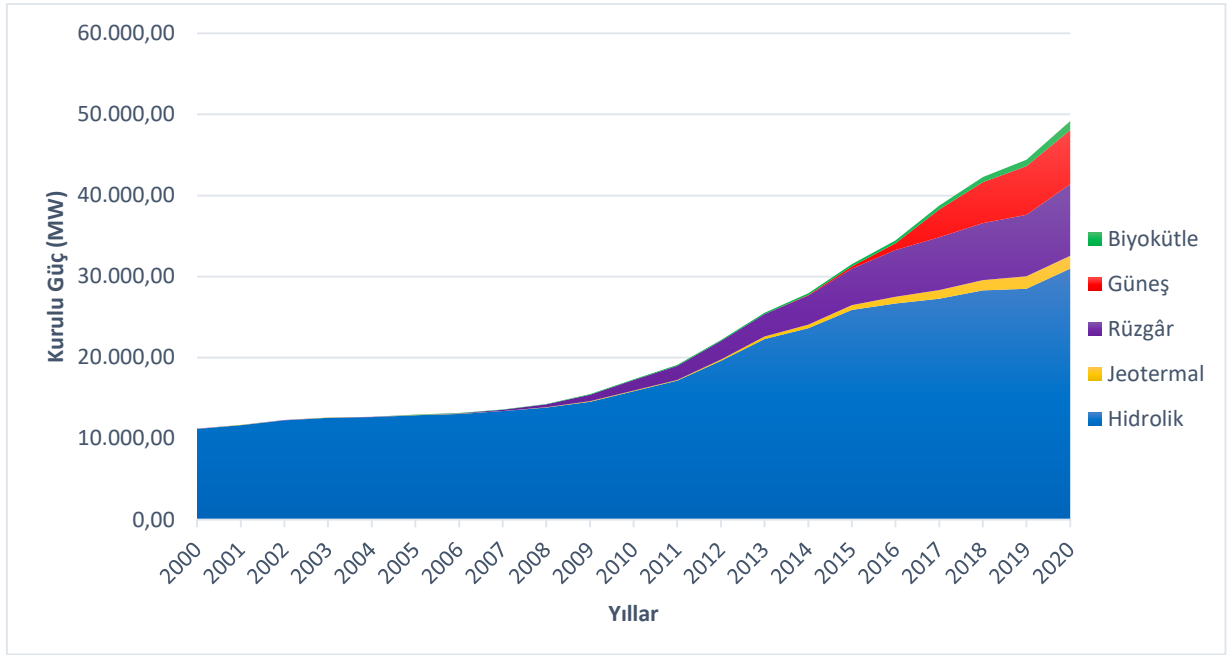
- Hidrojen enerjisi yenilenebilir enerji kaynakları da olmak üzere birçok enerji kaynağından elde edilebilir.
- Hidrojen uzak mesafelere boru hatları ve tankerler aracılığıyla taşınabilmesi mümkündür.
- Hidrojen gaz, sıvı ve metal hidrit şeklinde depolanabilir.
- Hidrojen enerjisi yenilenebilir enerji kaynakları arasında olduğundan temiz bir enerji kaynağıdır.
- Hidrojen enerjisinin depolanması ve kullanılması sırasında çevreyi kirleten hiçbir madde açığa çıkmaz.
- Hidrojen enerjisi son kullanımı sırasında en yüksek verime sahiptir.
- Hidrojenin kullanılması ve yakılması sırasında açığa sadece su ve su buharı çıkmaktadır.
- Hidrojen elektrik enerjisi kullanılarak da üretilebilmektedir.

2.7.2. Dezavantajları

- Hidrojen enerjisi üretimi sırasında saflaştırma işlemi maliyetli olduğundan kullanılan hidrojen gazı saf olmalıdır.
- Hidrojenin yanması sırasında alev görülmemektedir.
- Hidrojenin depolanması için geniş bir alana ihtiyaç vardır. Bu nedenden dolayı uygulama aşamasında birçok sorun ortaya çıkabilir.
- Hidrojen enerjisinin içten yanmalı motorlarda kullanımı sırasında çeşitli sorunlar ortaya çıkmaktadır.
- Hidrojen diğer enerji yakıtlarına göre daha pahalıdır.
- Hidrojen kokusuz olduğu için herhangi bir sızıntı sırasında diğer yakıtlara göre fark edilmesi zordur.

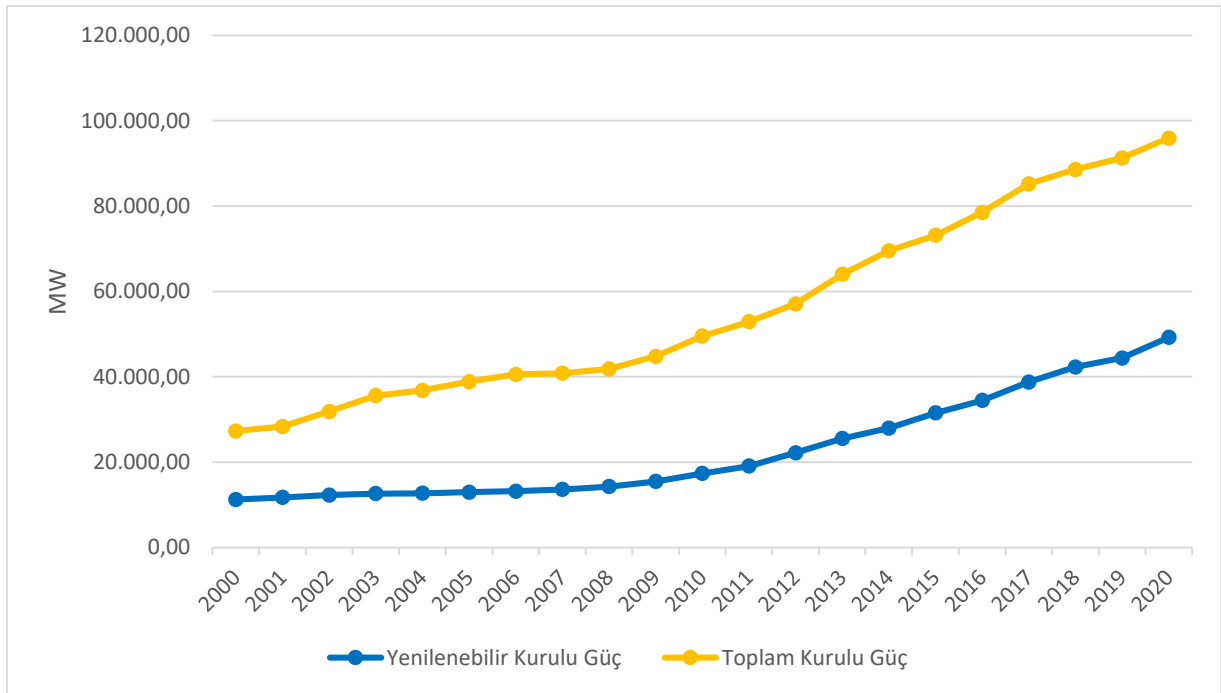
2.8. Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Kullanımı

Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynaklarının farklı alternatifleri olmasına rağmen; yaygın olarak hidroelektrik santralleri kullanılmakta ve ortalama olarak üretilen elektriğin üçte birine yakın kısmı bu yenilenebilir enerji kaynağından sağlanmaktadır. Ancak hidroelektrik santrallerinin üretimi kuraklığın yaşandığı dönemlerde olumsuz olarak etkilendiğinden önümüzdeki yıllarda Türkiye’de ve tüm dünyada yaşanabilecek kuraklık hidroelektrik santrallerini dezavantajlı duruma düşürmektedir. Türkiye’nin gelecek yıllara ait en büyük hedeflerinden biri, ürettiği elektriğin üçte ikisini yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlamaktır. Ancak Türkiye yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı noktasında benzer durumda olduğu ülkelere göre yenilenebilir enerji kaynaklarına daha az yatırım yapmıştır. Bu nedenlerden dolayı Türkiye kısa ve orta vadede ısıtma, soğutma, sanayi ve ulaşımın yanı sıra yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretimini de içeren bir plana ihtiyaç duyulmaktadır. Türkiye’nin en büyük yenilenebilir kaynaklı elektrik üretimi hidroelektrik santrallerinden sağlamakta ve üretilen toplam elektriğin %30,9’u bu yenilenebilir enerji kaynağından sağlanmaktadır. Hidroelektrik santrallerinden sonra Türkiye’de yenilenebilir kaynaklı en büyük elektrik üretimi %8,8 ile rüzgâr enerjisinden sağlanmaktadır. Ardından sırasıyla güneş, jeotermal ve biyokütle enerjileri gelmektedir. Türkiye’nin batı bölgelerinde rüzgâr enerjisinin güney bölgelerinde ise güneş enerjisinin üretiminin artmasıyla, Türkiye’nin ihtiyaç duyduğu enerji talebinin önemli bir kısmının yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanma potansiyeli bulunmaktadır (TEİAŞ, 2020).



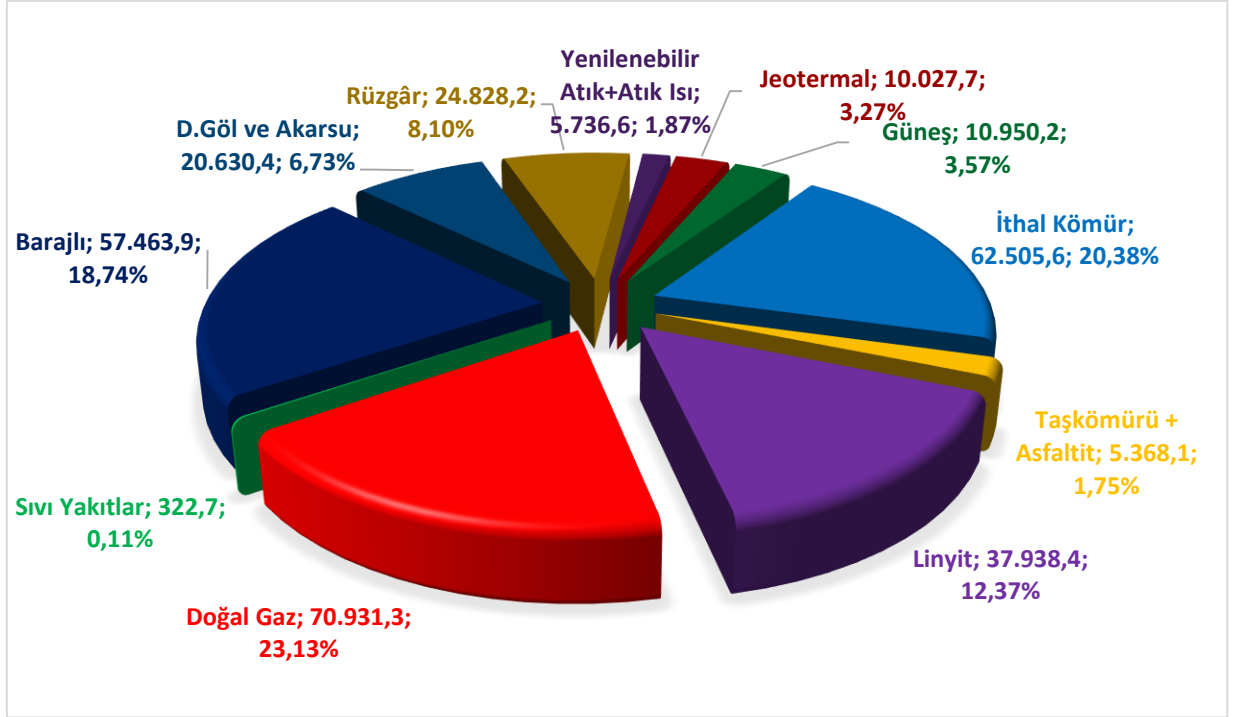
Şekil 2.8. Yenilenebilir Kaynaklı Kurulu Gücün Yıllar İtibariyle Gelişimi (TEİAŞ, 2020)

Şekil 2.8.'de 2020 yılı elektrik üretim-iletim istatistiklerine göre Türkiye'de yenilenebilir kaynaklı kurulu gücün yıllar itibariyle gelişimi verilmiştir. 2000 yılında 11.221,60 MW olan yenilenebilir kurulu güç 2020 yılı sonunda 49.202,0 MW'a ulaşmıştır.



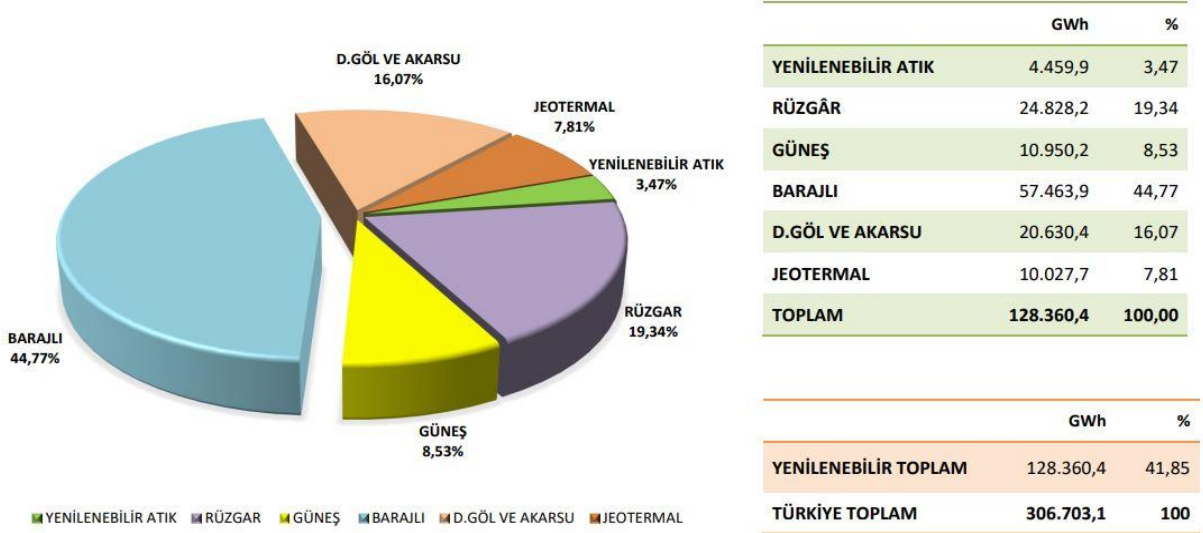
Şekil 2.9. Yenilenebilir Kaynaklı Kurulu Gücün Toplam Kurulu Güç İçindeki Payı (TEİAŞ, 2020)

Şekil 2.9.'da Türkiye'de yenilenebilir kaynaklı kurulu gücün toplam kurulu güç içindeki payı verilmiştir. 2000 yılında yenilenebilir kaynaklı kurulu gücün toplam kurulu güç içindeki payı %41,2 iken 2020 yılı sonunda %51,3 oranına ulaşmıştır.



Şekil 2.10. Türkiye Elektrik Enerjisi Üretimine Kaynaklara Göre Dağılımı (TEİAŞ, 2020)

Şekil 2.10’da Türkiye’de üretilen elektriğin kaynaklara göre dağılımı verilmiştir. Burada barajlı hidroelektrik santrallerinin 57.463,9 MW ile %18,74, göl ve akarsu hidroelektrik santrallerinin 20.630,4 MW ile %6,73, rüzgâr enerji santrallerinin 24.828,2 MW ile %8,10, güneş enerji santrallerinin 10.950,2 MW ile %3,57, jeotermal enerji santrallerinin 10.027,7 MW ile %3,27 ve yenilenebilir atık kaynaklı elektrik üretiminin 5.736,6 MW ile %1,87’lik bir paya sahip oldukları görülmektedir.



Şekil 2.11. Türkiye Yenilenebilir Enerji Kaynakları Dağılımı (TEİAŞ, 2020)

3. RÜZGÂR TÜRBİNİ

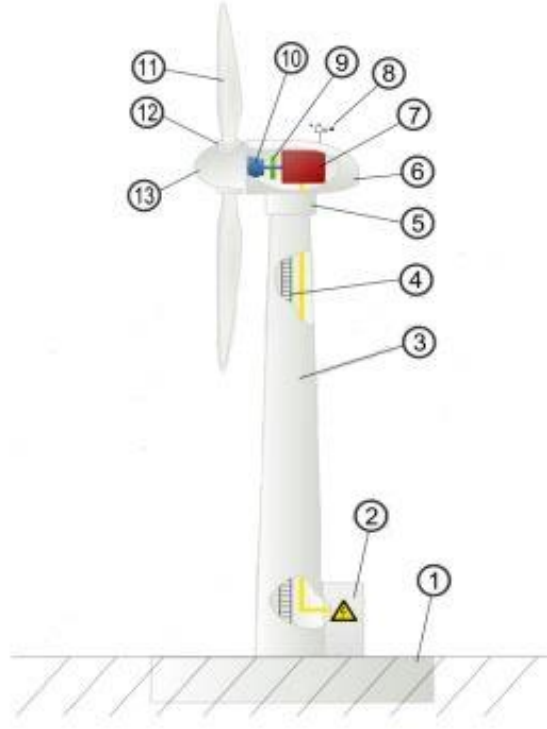
3.1. Rüzgâr Türbini Kısımları ve Çalışma Prensibi

Rüzgâr türbini, rüzgârda bulunan kinetik enerjiyi önce mekanik enerjiye, ardından oluşan mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Yel değirmenleri rüzgâr türbinlerinin atası olarak kabul edilmekte ve rüzgâr enerjisini mekanik enerjiye çevirmektedir. Yel değirmenleri bu bakımdan rüzgâr türbinin bir parçası olarak düşünülebilir. Rüzgâr türbinlerinin kanat sayısı, kule şekilleri, temel yapıları bakımından birçok türü mevcuttur ancak en temel ayırım yatay ve düşey eksenli türbinler olarak çeşitlenmesidir. Genellikle kullanılan rüzgâr türbinleri yatay eksenli türbinlerdir (Manwell ve ark., 2010).



Şekil 3.1. Düşey Eksenli Rüzgâr Türbinleri (Anonim 2022h)

Rüzgâr türbininin bileşenleri incelendiğinde farklı yapıdaki birçok sistemi içinde barındırdığı görülmektedir. Kablo sistemleri (rüzgâr türbininde üretilen elektriği trafolarla aktarır), kule-temel bileşenleri (yapının ayakta kalmasını sağlar) ve hareketli döner sistemler (rüzgâr enerjisini elektrik enerjisine dönüştürür) rüzgâr türbininin en temel bileşenleridir. Kara üzerine kurulan yatay eksenli rüzgâr türbinin parçaları Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Rüzgâr türbinlerinin açık denizlerde kurulması ile karada kurulması arasında temel ve gövde bakımından farklılıklar oluşmaktadır. Numaralandırılan kısımlar sırasıyla; 1-Temel, 2-Elektrik şebekesi bağlantı kutusu, 3-Rüzgâr türbini kulesi, 4-Erişim merdiveni, 5-Rüzgâr yönü disk, 6-Motor kutusu, 7-Jeneratör, 8-Anemometre, 9-Fren sistemi, 10-Şanzıman kutusu, 11-Kanat, 12-Kanat yönü kontrolü, 13-Kanat göbeği’dir (Bianchi ve ark., 2007).



Şekil 3.2. Yatay Eksenli Rüzgâr Türbini Parçaları (Bianchi ve ark., 2007)

Rüzgâr türbininin maruz kaldığı dinamik ve statik yükleri taşıyan kısımlar kule ve temel kısımlarıdır. Rüzgâr türbinleri binlerce tonlara varan ağırlığa sahip yapılardır. Bununla birlikte rüzgâr gibi yüksek dinamik kuvvetlerin tesiri altında kalmaktadır. Bu nedenlerden dolayı türbinlerin kule ve temel kısımları bu yükleri taşıyabilecek kapasiteye sahip olarak üretilmesi gerekmektedir. Kule kısmı çoğunlukla boru şeklinde tasarlanmakla beraber farklı tasarımları da bulunmaktadır. Kule içinde bulunan erişim merdiveni, oluşabilecek arıza durumlarında motor kutusuna müdahale imkânı sağlamaktadır. Kulelerin yapımında en çok tercih edilen yapı malzemesi çeliktir (Hau, 2013).

Motor kutusu içerisinde rüzgârda bulunan kinetik enerjiyi öce mekanik enerjiye, ardından oluşan mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren şaft, şanzıman ve dişli sistemleri bulunmaktadır. Kanatların hareket etmesiyle motor kutusunun içerisinde bulunan düşük hızlı şaft açısal hızla dönmektedir. Düşük devirle dönen şaft, şanzıman kutusu sayesinde yüksek devirlere çıkmaktadır. Oluşan bu hareket enerjisi, elektrik enerjisine jeneratör vasıtasıyla dönüştürülmektedir. Ayrıca yüksek hızlarda hareketi engellemek için motor kutusunun içinde fren sistemleri bulunmaktadır (Hau, 2013).

Rüzgârın vasıtasıyla dönen parçalar kanatlardır. Motor kutusunun arka bölümünde bulunan anemometreler ve kanatlar vasıtasıyla rüzgâr türbininin kanatları ve göbek kısmı

rüzgâr yönüne göre dönmektedir. Bu şekilde rüzgâr tam karşıdan alınarak rüzgârdan maksimum verimin alınabilmesi amaçlanmaktadır (Manwell ve ark., 2010).

3.2. Rüzgâr Türbininde Enerji Dönüşümünün Fiziksel Prensipleri

Hareket halinde olan havanın kinetik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren dönüşüm elemanları rüzgâr türbininin en önemli bileşenleridir. Bu enerji dönüşüm işleminin dayandığı fiziksel prensipler vardır. Bu prensipler rüzgâr enerjisinin dönüşümünü kavrayabilmek adına oldukça önemlidir (Hau, 2013).

Hava, rüzgâr enerjisinde hareket halinde olan maddedir. Kinetik enerji hareket halinde olan her maddenin kütlesi ve hızının karesiyle doğru orantılıdır. Denklem (3.1)'de kütlesi (m) hızı (v) olan hareket eden havanın kinetik enerjisi verilmiştir.

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3.1)$$

Denklem (3.2)'de belirli bir (A) alandan (v) hızıyla geçen havanın oluşturduğu hacimsel debi ($\dot{V}$) verilmiştir.

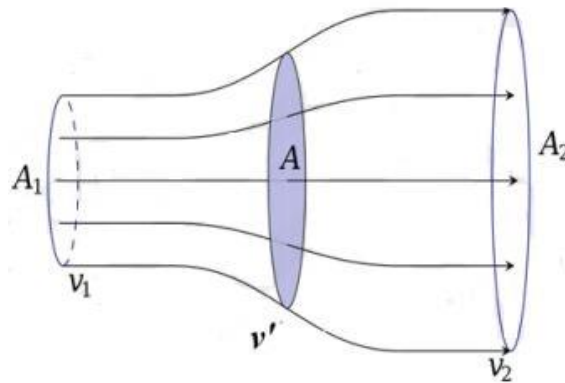
$$\dot{V} = vA \quad (3.2)$$

Denklem (3.3)'te birim zamanda birim alandan geçen kütle miktarı yani kütleli debi ($\dot{m}$) verilmiştir. Havanın yoğunluğuna (ρ) ile gösterilmiştir.

$$\dot{m} = \rho vA \quad (3.3)$$

Denklem (3.4)'te rüzgârdan elde edilebilecek güç (P) verilmiştir. Denklem (3.1)'de verilen kütle yerine kütleli debi yerleştirilir.

$$P = \frac{1}{2}\rho v^3A \quad (3.4)$$



Şekil 3.3. Rüzgâr Türbini Akım Borusu (Bianchi ve ark., 2007)

Rüzgâr türbinlerinde rüzgârın kinetik enerjisi vasıtasıyla mekanik enerji elde edilmektedir. Şekil 3.3'te A ile gösterilen alan, rüzgâr türbini kanatları tarafından süpürülen alandır. V_1 hızıyla rüzgâr türbini akım borusuna A_1 alanından giriş yapan rüzgâr, A alanından geçerek V_2 hızıyla türbinin arka tarafındaki A_2 alanından çıkmaktadır. Türbinin önündeki kinetik enerjinin bir kısmı türbinde mekanik enerjiye dönüşeceğiinden türbinin arkasında hızın azalması muhtemeldir. Kütleli debi sabit olduğundan hızın azalmasından ötürü türbin arkasındaki A_2 alanı A_1 alanından büyüktür (Bianchi ve ark., 2007).

Türbinden önceki akım gücü ile türbinden sonraki akım gücünün farkı türbindeki mekanik enerjiye eşittir. Denklem (3.5) ve Denklem (3.6)'da verilmiştir.

$$P = \frac{1}{2}\rho A_1 v_1^3 - \frac{1}{2}\rho A_2 v_2^3 \quad (3.5)$$

$$P = \frac{1}{2}\rho(A_1 v_1^3 - A_2 v_2^3) \quad (3.6)$$

Türbinin hem önünde hem de arkasında kütleli debi sabit olduğundan Denklem (3.7) gibi olur.

$$\rho A_1 v_1 = \rho A_2 v_2 \quad (3.7)$$

Kütleli debi Denklem (3.6)'da sabit olduğu için Denklem (3.8) veya Denklem (3.9) yazılabilir.

$$P = \frac{1}{2}\rho A_1 v_1 (v_1^2 - v_2^2) \quad (3.8)$$

$$P = \frac{1}{2}\dot{m}(v_1^2 - v_2^2) \quad (3.9)$$

Denklem (3.9) dikkate alındığında, v_2 hız değeri sıfır olduğu zaman elde edilebilecek en yüksek güç değerine ulaşılmaktadır. Denklem (3.7)'de v_2 değeri sıfır olarak alınırsa, eşitlik gereği v_1 değerinin de sıfır olması gerekmektedir. Fiziksel olarak bu durum anlamsızdır. Fiziksel olarak anlamlı olan durum ise, gücün maksimum değerde olacağı nokta belirli bir $\frac{v_1}{v_2}$ oranında olmasıyla mümkündür. Bu oranı elde edebilmek için bir başka eşitlik ile mekanik güç tanımlanmalıdır. Hareket eden havanın rotor üzerine itki kuvveti, momentum korunumu kanunuyla Denklem (3.10) yazılabilir (Manwell ve ark., 2010).

$$F = \dot{m}(v_1 - v_2) \quad (3.10)$$

Denklem (3.10)'da verilen kuvvete eşit bir kuvvet etki-tepki kuralı gereği rotor tarafından havaya uygulanmaktadır. Bu kuvvet, v' hızıyla hava kütlesini akım düzleminde itmektedir. Denklem (3.11)'de gerekli güç verilmiştir.

$$P = Fv' = \dot{m}(v_1 - v_2)v' \quad (3.11)$$

Denklem (3.8) ve Denklem (3.11)'den rüzgârdan elde edilebilecek mekanik enerji elde edilmektedir. Her iki denklem birbirine eşitlenerek, v' hızı v_1 ve v_2 cinsinden Denklem (3.12) ve Denklem (3.13)'te yazılmıştır.

$$\frac{1}{2} \dot{m}(v_1^2 - v_2^2) = \dot{m}(v_1 - v_2)v' \quad (3.12)$$

$$v' = \frac{1}{2}(v_1 + v_2) \quad (3.13)$$

Böylelikle türbin kanatlarının süpürdüğü A alanındaki hız, türbin öncesi ve sonrasındaki hızların (v_1 ve v_2) aritmetik ortalamalarına eşittir. Denklem (3.14)'te verilmiştir.

$$v' = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (3.14)$$

Böylelikle kütleli debi, Denklem (3.15)'te verildiği şekliyle yazılabilir.

$$\dot{m} = \rho v' A = \frac{1}{2} \rho A (v_1 + v_2) \quad (3.15)$$

Denklem (3.16)'da rotordan mekanik güç çıkışı verilmiştir.

$$P = Fv' = \dot{m}(v_1 - v_2)v' = \frac{1}{4} \rho A (v_1 + v_2)(v_1^2 - v_2^2) \quad (3.16)$$

Denklem (3.17)'de türbin önünde v_1 hızına sahip değişikliğe uğramamış rüzgâr akımından elde edilebilecek güç verilmiştir.

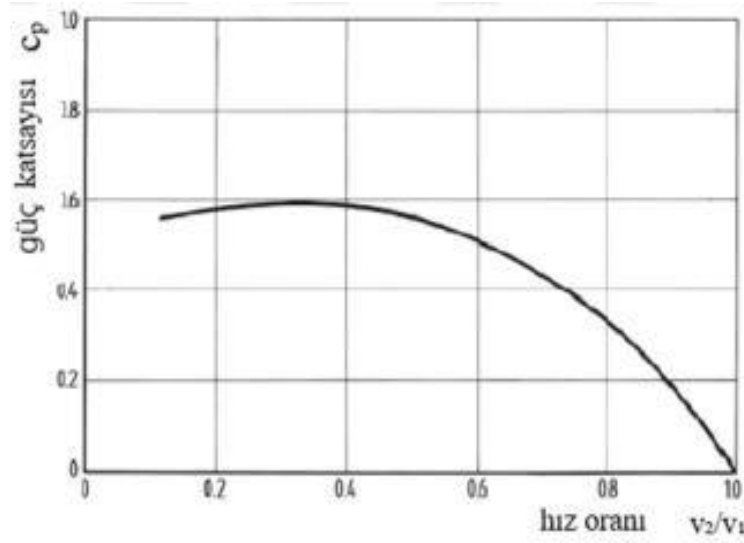
$$P_0 = \frac{1}{2} \rho v_1^3 A \quad (3.17)$$

Denklem (3.16)'da rotordan mekanik güç çıkışı verilmiştir. Güç katsayısı, rotordan mekanik güç çıkışı ile türbin önündeki bozulmamış rüzgâr akımından elde edilebilecek gücün birbirine oranıdır. Denklem (3.17)'de verilmiştir ve ' c_p ' şeklinde gösterilmektedir.

$$c_p = \frac{P}{P_0} = \frac{\frac{1}{4} \rho A (v_1 + v_2)(v_1^2 - v_2^2)}{\frac{1}{2} \rho v_1^3 A} \quad (3.18)$$

Bazı düzenlemeler Denklem (3.18) üzerinde yapıldıktan sonra güç katsayısı $\frac{v_2}{v_1}$ hız oranının bir fonksiyonu olarak Denklem (3.19) yazılabilir.

$$c_p = \frac{P}{P_0} = \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right] \left[1 + \left(\frac{v_2}{v_1} \right) \right] \quad (3.19)$$



Şekil 3.4. Güç Katsayısı ile Hız Oranının Grafiği (Hau, 2013)

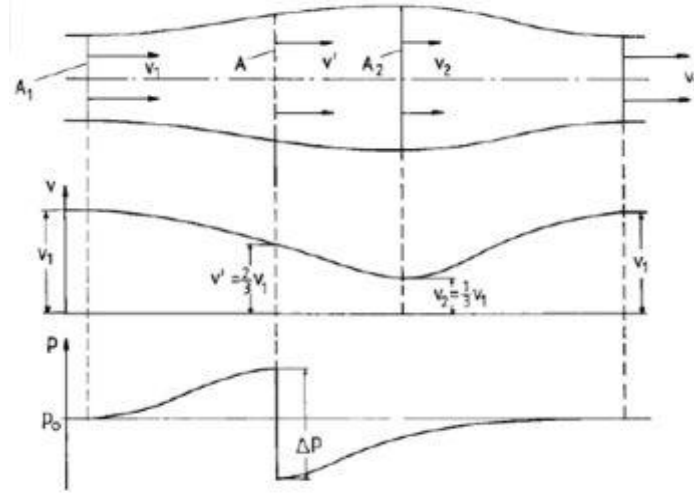
Denklem (3.19)'un analitik olarak çözümlenip grafiği çizilirse Şekil 3.4'teki güç katsayısı ile hız oranının grafiği elde edilir. Grafikte görüldüğü gibi, güç katsayısı maksimum değerini belirli bir hız oranı değerinde almaktadır. Güç katsayısının maksimum değeri $c_p=0,593$ 'tür. Bu değere 'ideal güç katsayısı' denmektedir. Alman fizikçi Albert Betz tarafından bulunduğu için güç sayısının bu değeri 'Betz faktörü' olarak adlandırılmakta ve fiziksel açıdan değişikliğe uğramamış bir rüzgâr akımından elde edilebilecek maksimum güç oranını ifade etmektedir.

Denklem (3.20)'de $\frac{v_2}{v_1} = 1/3$ değerinde ideal güç katsayısı verilmiştir.

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3} \rightarrow c_p = \frac{16}{27} = 0,593 \quad (3.20)$$

İdeal bir rüzgâr türbinini göz önüne aldığımızda türbin öncesi ve türbin sonrası hız oranlarının $\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3}$ olduğu gösterilmişti. Denklem (3.14)'te türbin rotorunun taradığı A alanındaki hız v' ile v_1 ve v_2 hızları arasındaki bağıntı verilmiştir. Bu bağıntı dikkate alınarak ideal bir türbin için rotor bölgesindeki hız, Denklem (3.21)'deki gösterildiği gibi yazılabilir (Manwell ve ark., 2010).

$$v' = \frac{2}{3} v_1 \quad (3.21)$$



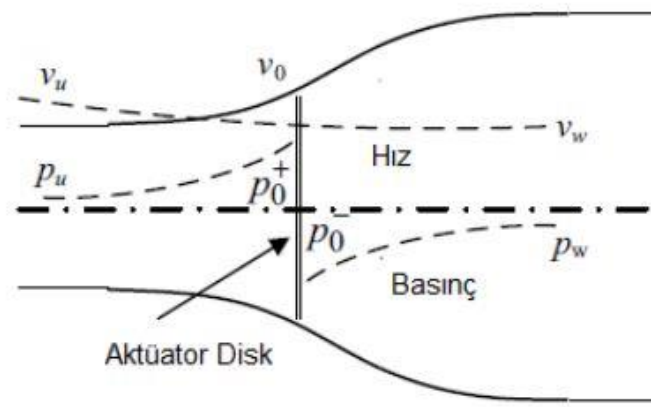
Şekil 3.5. İdeal Türbin İçin Akım Koşulları (Hau, 2013)

Rotor bölgesi, rotor öncesi ve rotor sonrası bölgelerindeki güç çıkışları, alanlar ve hızlar hakkında çıkarımlar verilmiştir. Bu ilişkiler göz önüne alınıp, Şekil 3.5’de akım çizgileri incelendiğinde rotor sonrasında A_2 alanının A alanından ve A_1 alanından büyük olduğu görülmektedir. Alanda meydana gelen bu değişim hızın azalmasına yol açmaktadır. Rotor bölgesine yaklaşan havanın hızının azalmasından dolayı basınç artmakta ve rotor bölgesinde ani bir basınç artması meydana gelmektedir. Daha sonra rotor arkasında basınç değeri atmosfer basıncına doğru yükselmektedir (Hau, 2013).

3.3. Rüzgâr Türbini Aerodinamikleri

Rüzgâr türbini rotorunun yaptığı hareket, türbin kanatlarından geçen havanın akışına göre değiştiğinden kanat profili rotorun hareketinde belirleyici olmaktadır (Hau, 2006).

Hava akışına maruz kalan bir aktüatör disk ile rüzgâr türbininin aerodinamik hareketi açıklanabilir.



Şekil 3.6. Aktüatör Disk Üzerinde Hava Akışı (Hau, 2006)

Disk in önündeki hız v_u ile üzerindeki hız ise v_0 şeklinde gösterilmiş olup, disk in önündeki basınç p_u ile üzerindeki basınç ise p_0 şeklinde gösterilmiştir.

Denklem (3.22)'de alandan m kütleli bir havanın akışı esnasında oluşacak momentum verilmiştir.

$$M = m(v_u - v_w) \quad (3.22)$$

Denklem (3.23)'te momentin zamana oranından hava akışının oluşturduğu kuvvet bulunmaktadır.

$$F = \frac{\Delta M}{\Delta t} = \frac{\Delta m(v_u - v_w)}{\Delta t} = \frac{\rho A v_0 \Delta t (v_u - v_w)}{\Delta t} = \rho A v_0 \Delta t (v_u - v_w)$$

$$F = A(p_0^+ - p_0^-) \quad (3.23)$$

Denklem (3.24)'de bernoulli eşitliğine göre basınç farkı verilmiştir.

$$p_0^+ - p_0^- = \frac{1}{2} \rho (v_u^2 - v_w^2) \quad (3.24)$$

Bu durumda Denklem (3.23)'ü de kullanarak kuvvet bulunabilir.

$$F = \frac{1}{2} \rho A (v_u^2 - v_w^2) \quad (3.25)$$

Denklem (3.26)'da m kütleline sahip ve v hızıyla hareket eden havanın oluşturduğu kinetik enerji verilmiştir.

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 \quad (3.26)$$

Diskten geçen havanın kütleline (m), akış hızının (v_0) ve havanın yoğunluğunun (ρ) çarpımı olduğu kabul edilirse denklem (3.27) diskte oluşan güç ifadesini vermektedir.

$$P = \frac{1}{2} \rho A v_0 (v_u^2 - v_w^2) \quad (3.27)$$

Denklemin tekrar düzenlenebilmesi için (3.28)'deki eşitlikler dikkate alınmalıdır.

$$v_0 = \frac{1}{2} v_u + v_w \rightarrow v_u - v_w = 2 v_u - v_0 \quad (3.28)$$

Disk in yakaladığı havanın gücü, (3.27)'deki Denklem (3.28)'deki denkleme göre tekrar düzenlenerek Denklem (3.29)'da verildiği gibi hesaplanır.

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 4a (1 - a^2) \quad (3.29)$$

Rüzgârdan yakalanan gücün toplam rüzgâr gücüne oranı rüzgâr türbini güç katsayısı vermektedir.

$$C_p = \frac{P}{P_t} = \frac{0.5\rho A v^3 4a(1-a^2)}{0.5\rho A v^3} = 4a(1-a^2) \quad (3.30)$$

C_p rüzgâr türbini güç katsayısı $a = 1/3$ için $C_p = 0.59$ maksimum değerini alır. Bu değer Betz faktörüdür (Tanrıöven, 2011).

3.4. Rüzgâr Türbini Performansı

Rüzgâr türbin performansının rüzgârın hızıyla doğrudan bağlantılı olmasının nedeni rüzgâr türbinlerinin rüzgârın mekanik enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmesinden kaynaklanmaktadır.

Rüzgâr türbinin performansını karakterize etmek için genellikle kullanılan yöntem boyutu olmayan karakteristik eğriler kullanmaktır.

Kanat uç hızının, rüzgâr hızına oranı kanat uç hız oranını vermektedir. Kanat uç hız oranı λ ile gösterilir.

$$\Lambda = \frac{Rw_r}{v} \quad (3.31)$$

Rotor çapı R , rotor hızı w_r , rüzgâr hızı v şeklinde gösterilmiştir.

Güç katsayısı (C_p) rüzgâr türbininin rüzgâr gücünü ne kadar tutabildiğini belirleyen katsayıdır. $C_p - \lambda$ eğrisi ise türbinin aerodinamik performansını belirlemektedir.

Rüzgârın kanat açısı (β) ile güç katsayısı (λ) arasındaki ilişki aerodinamik hesaplar ve rüzgâr kanat bileşenleri yoluyla yaklaşık olarak belirlenebilmektedir. Bu konuda fazla yaklaşım bulunmamakla beraber Denklem (3.32)'de verilen formül en fazla kabul gören formüldür.

$$C_p \lambda, \beta = 0.22 \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5e^{\frac{-12.5}{\lambda_i}}$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (3.32)$$

Rotorun çıkış torkunu karakterize eden tork katsayısıdır (C_T). Güç katsayısının kanat uç hız oranına oranından hesaplanmaktadır.

$$C_T = \frac{C_p(\lambda)}{\lambda} \quad (3.33)$$

4. LİTERATÜR TARAMASI

Tez kapsamında genel olarak ele aldığımız konular elektrik tüketiminin ve rüzgâr türbinlerinin üretim potansiyelinin tahmin edilmesi ve bunlara göre ekonomik analiz yapılması olarak seçilmiştir. Bu nedenle ilk olarak gelecekteki enerji ve elektrik tüketiminin tahmin edilmesini ve bunun çeşitli ekonomik göstergeler ile arasındaki ilişkilerini ele alan çalışmalar incelenmiştir. Sonrasında ise rüzgâr türbininin elektrik üretim potansiyeli ve buna dayalı olarak yapılan ekonomik analizleri içeren çalışmalar taranarak detaylı bir şekilde sunulmuştur.

4.1. Enerji Tüketimi ve Tahmini

Enerjinin tüm üretim ve hizmet süreçlerine doğrudan ve dolaylı etkisinin olması bu alanda literatürde birçok araştırma yapılmasını beraberinde getirmektedir. Birçok araştırmacı, enerji ile çeşitli ekonomik, çevresel ve sosyal parametreler arasındaki ilişkiye ilgi duymuştur. Bu bölümdeki çalışmanın kapsamı, elektrik tüketiminin tahmin edilmesi ve elektrik/enerji tüketimi ile ekonomik göstergeler arasındaki ilişkidir.

Ekonomik büyüme ve gayri safi yurtiçi hâsıla (GSYİH), enerji tüketimi ile en yakından ilişkili ekonomik parametreler olarak düşünülmektedir. Artan ekonomik büyüme ve milli gelire paralel olarak enerji tüketiminin artması beklenmektedir. Enerji tüketimi ve ekonomik büyüme arasındaki ilişkiyi incelemek için Tang ve ark. (2016), Vietnam için Granger nedensellik testini kullanmışlardır. Bulgular, bu iki değişkenin çift yönlü nedensel ilişkiye sahip olduğunu göstermektedir. Benzer bir analiz beş farklı Asya ülkesi için yapılmış ve enerji tüketimi ile ekonomik göstergeler arasındaki ilişki türünün farklı ülkeler için farklılık gösterebileceği keşfedilmiştir (Azam ve ark., 2015). Benzer şekilde Chontanawat (2020), enerji tüketimi ile ekonomi arasında uzun dönemli bir ilişki olduğunu ancak bu ilişkinin bazı ülkelerde tek yönlü, bazılarında ise çift yönlü olduğunu ortaya koymuştur. Magazzino (2015), İtalya'nın verileri üzerinden zaman serilerini kullanarak, enerji tüketimi ile GSYİH arasında uzun vadeli ve çift yönlü bir ilişki olduğunu belirlemiştir. Öztürk (2017), çeşitli gelir gruplarındaki birçok ülkenin verilerini analiz etmiş ve Vektör Otoregresyon modeli ve Granger nedensellik testi ile enerji tüketimi ile reel GSYİH arasındaki ilişkiyi incelemiştir.

Literatürde sadece enerji olarak elektrik tüketimine odaklanan çalışmalar da mevcuttur. Bazı Güney Asya ülkelerinde zaman serilerini kullanan çalışmalar, elektrik tüketimi ile ekonomik büyüme arasında uzun vadeli bir ilişki olduğunu göstermektedir (Raza ve ark., 2016). Benzer şekilde Türkiye için yapılan bir çalışmada elektrik tüketimi ile GSYİH arasında çift yönlü bir ilişki olduğu gibi, elektrik tüketimi ile ekonomik büyüme arasında da pozitif bir etki

olduğu tespit edilmiştir (Aslan, 2014). Çin'de elektrik tüketimi ve ekonomik büyüme (Zhang ve ark., 2017), Avustralya'da farklı endüstrilerde internet kullanımı, elektrik tüketimi ve ekonomik büyüme ilişkileri (Lu, 2017) ve gelişen ekonomiler için benzer ilişki incelemesi (Bayar ve ark., 2014) literatürde bu tür örneklerdir.

Ekonomik ilişkilere ek olarak, enerji tüketiminin çevresel etkileri de araştırılmaktadır. Artan çevre sorunlarının başlıca nedenlerinden biri olan CO₂ emisyonuna enerji tüketiminin etkisi kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. AsumaduSarkodie ve Owusu (2017), Gana'nın 1960-2013 yılları arasındaki verilerini kullanarak enerji tüketimi, CO₂ emisyonu ve makroekonomik göstergeler arasındaki nedensellik ilişkisini araştırmışlardır. Benzer bir çalışma İtalya'da da yapılmakta ve çalışmanın amacı yenilenebilir enerji tüketimi ile ekonomik büyüme arasındaki ilişkiyi anlamaktır (Magazzino, 2016, 2017). Araştırma sonucunda uzun vadede yenilenebilir enerji kullanımı %1 artarsa GSYİH'nin %0.23 düşeceği tespit edilmiştir. Malezya'da GSYİH, enerji tüketimi ve nüfus artışının CO₂ emisyonu üzerindeki etkisini inceleyen Begum ve ark. (2015), CO₂ emisyonlarının GSYİH'deki artışla azalacağı sonucuna varmıştır. Menyah ve Wolde-Rufael (2010) çalışmalarında, ABD'nin 1960 ve 2007 yılları arasındaki yenilenebilir enerji ile nükleer enerji tüketimi, CO₂ emisyonları ve GSYİH arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Nükleer enerji tüketiminin CO₂ emisyonlarını azaltmaya yardımcı olabileceğine dair hiçbir kanıt bulamamışlar, ancak yenilenebilir enerji tüketiminin CO₂ emisyonlarını azaltmaya yardımcı olabileceğini tespit etmişlerdir. Enerji tüketimi ve CO₂ emisyonlarının nedensellik ve ilişki analizleri, çeşitli ülkelerden gelen veriler kullanılarak ele alınmakta ve çeşitli açılardan analiz edilmektedir (Acaravcı ve Öztürk, 2010; Alam ve ark, 2012; Pao ve Tsai, 2011; Pao ve ark., 2011, 2012).

Nişancı (2005), Türkiye'de elektrik enerjisi talebi ve ekonomik büyüme ile elektrik enerjisi tüketimi arasındaki ilişkiyi araştırmıştır. Çalışmada Türkiye'nin enerjisi talebi ve milli gelir ile elektrik tüketimi arasındaki nedensellik ilişkisi test edilmiştir. Aydın (2010), enerji tüketimi ve ekonomik büyüme ilişkisini araştırmıştır. Çalışmada toplulaştırılmış denklemlerle enerji tüketimi ile ekonomik büyüme ilişkisi incelenmiş daha sonra birincil enerji tüketimini oluşturan kaynakların ekonomik büyüme üzerindeki etkisi ayrıştırılmış denklemlerle analiz edilmiştir. Sevilgen ve Kılıç (2013), yenilenebilir enerji kaynakları ve sürdürülebilirlik endeksini araştırmışlardır. Çalışmada sürdürülebilirliğin değerlendirme araçları ifade edilmiş ve Türkiye şartları için örnek uygulamalar yapılmıştır. Küresel sürdürülebilirlik ve indeks göstergeleri yenilenebilir enerji kaynakları için örnek uygulamalarla ifade edilmiştir. Es ve ark. (2014), Türkiye'nin net enerji talebini yapay sinir ağları ile tahmin etmişlerdir. Çalışmada 1970 ile 2010 yılları arasındaki ihracat, ithalat, nüfus, taşıt sayısı, bina yüz ölçümü ve GSYİH

değişken verileri kullanılarak 2011 ile 2025 yılları arasındaki Türkiye'nin net enerji talebi tahmin edilmiştir. Batı (2014), Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynaklarının sürdürülebilir kalkınmaya etkisi hakkında yatırımcı, sektör, düzenleyici otorite, kullanıcı tutumlarını test eden bir saha araştırması gerçekleştirmiştir. Özşahin ve ark. (2016), ekonomik büyüme ve yenilenebilir enerji arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Çalışmada Türkiye'nin 2000 ile 2013 yılları arasındaki veriler kullanılarak analiz yapılmış ve ekonomik gelişmişlik ile yenilenebilir enerji tüketimi arasında pozitif yönlü bir ilişki olduğunu tespit etmişlerdir.

Bayramoğlu ve ark. (2017), Türkiye birincil enerji talep tahmininde bulunmuşlardır. Çalışmada Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) yöntemi ile Türkiye'nin enerji talebi belirlenmeye çalışılmıştır. Bayraç ve Çildir (2017), Avrupa Birliği yenilenebilir enerji politikalarının ekonomik büyüme üzerine etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada Avrupa Birliğine üye ülkelerin 2006 ile 2015 yılları arasındaki verileri kullanılarak analiz gerçekleştirilmiştir. Alper (2018), 1990 ile 2017 yılları arasındaki ekonomik büyüme ile yenilebilir enerji arasındaki ilişkiyi araştırmıştır. Analiz sonuçlarına göre yenilebilir enerji kullanımındaki %1'lik artışın ekonomik büyümeyi %0.19 artıracığı tespit edilmiştir. Dinçer ve Karakuş (2020), 1990 ile 2015 yılları arasındaki yıllık veriler incelenerek yenilebilir enerjinin sürdürülebilir ekonomik kalkınma üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çandarlı ve Unakıtan (2021), sürdürülebilir ekonomik büyümeye yenilebilir enerji kullanımının etkisini araştırmışlardır. Çalışmada 1990 ile 2019 yılları arasındaki veriler kullanılarak nedensellik ilişkisi test edilmiştir. Sonuçlara göre toplam enerji tüketimi içinde yenilenebilir enerji kullanımının %10 artması durumunda GSYİH %1.8 oranında artış olacağı tahmin edilmiştir.

Enerji tüketiminin etkileri üzerine yapılan çalışmaların yanı sıra, enerji tüketiminin gelecekteki değerlerinin tahmin edilmesi de literatürde önemli bir yere sahiptir. Bazı araştırmalar, sadece geçmiş dönemlerin enerji tüketimine dayalı olarak geleceğe yönelik tahminler yapmaktadır. Diğer bazı çalışmalarda, enerji tüketimini tahmin etmek için nedensellik analizinden türetilen farklı tahminciler de kullanılmaktadır. Sonuç olarak çalışmalarda, değişen koşullara cevap verebilecek daha doğru bir tahmin yöntemi ortaya çıkarmaya çalışılmaktadır. Mohamed ve Bodger (2005), Yeni Zelanda'nın 1965 ile 1999 yılları arasındaki GSYİH, ortalama elektrik fiyatı ve nüfus verilerini kullanarak elektrik tüketimini tahmin etmişlerdir. Çoklu doğrusal regresyon analizi kullanılarak modeller geliştirilmiştir. Gul ve ark. (2011), Pakistan'ın elektrik enerjisi talebini tahmin etmek için tek değişkenli zaman serileri ve ekonometrik modeller geliştirmişlerdir. Ghanbari ve ark. (2009), İran'ın GSYİH ve nüfus verilerini kullanarak elektrik tüketimini yapay sinir ağları ve regresyon modelleri

kullanarak tahmin etmişlerdir. Bianco ve ark. (2013), İtalya'nın elektrik tüketimini tahmin etmek için 1970 ile 2007 yılları arasındaki GSYİH ve nüfus zaman serileri dikkate alınarak çoklu bir regresyon modeli kullanmışlardır. Panklib ve ark. (2015), Tayland'ın uzun vadeli elektrik tüketimini tahmin etmek için yapay sinir ağı ve bir regresyon modeli uygulamışlardır. Akdi ve ark. (2020), Türkiye'nin 2012 ile 2016 yılları arasındaki elektrik tüketim miktarını istatistiksel araçlar kullanarak inceleyerek günlük elektrik enerjisi tahmininde bulunmuşlardır. Harmonik regresyon modeli ile ARIMA modelini karşılaştırmışlardır.

4.2. Rüzgâr Türbini Üretim Tahmini ve Ekonomik Analizi

Bir bölgedeki rüzgâr enerji üretim potansiyeli o bölgedeki rüzgâr hızına bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle rüzgâr potansiyeli hesaplanırken bölgenin geçmiş dönem rüzgâr hızı verilerine dayanarak tahmin yapılmaktadır. Literatürde rüzgâr hızı ve rüzgâr enerjisinden elektrik üretim tahminleri üzerine çalışmalar bulunmaktadır.

Mabel ve Fernandez (2008), rüzgâr enerjisinden üretilebilecek elektrik üretiminin analizini ve tahminini yapmışlardır. Çalışmada Hindistan'daki yedi rüzgâr çiftliğinden alınan 2002 ile 2005 yılları arasındaki 3 yıllık veriler kullanılmıştır. Rüzgâr çiftliklerinin aylık güç üretiminin tahmini için yapay sinir ağları kullanılmış ve rüzgâr enerjisi tahmin modelini geliştirmek için MATLAB araç kutusu kullanılarak geri yayılım algoritmali bir ileri beslemeli sinir ağı uygulanmıştır. Riahy ve Abedi (2008), yaptıkları çalışmada doğrusal tahmin yöntemini kullanarak rüzgâr türbinleri için kısa vadeli rüzgâr hızı tahmininde bulunmuşlardır. Hong ve ark. (2010), çok katmanlı bir ileri beslemeli sinir ağı kullanılan yeni bir rüzgâr enerjisi ve hız tahmin yöntemi önermişlerdir. Çalışmada bir rüzgâr çiftliğinin 2003 ile 2004 yılları arasındaki saatlik ölçülen rüzgâr hızı ve rüzgâr enerjisi üretim verileri kullanılmıştır. Önerilen yöntemle 30 dakikalık ileri rüzgâr gücü ve hızı tahmininde bulunularak yöntem test edilmiş ve çok iyi doğruluk gösterdiği görülmüştür. Kusiak ve Zhang (2010), yeni bir rüzgâr hızı ve gücü tahmin modeli oluşturmuşlardır. Büyük bir rüzgâr çiftliğinde 10 saniyelik aralıklarla toplanan rüzgâr türbini verilerini kullanarak tahminde bulunulmuştur. Rüzgâr hızı tahmin modellerinden biri gelecek 1 dakika için tahmininin %90 doğrulukta olduğu tespit edilmiştir. Rüzgâr gücü tahmin modeli oluşturulmak için ise beş farklı veri madenciliği algoritması kullanılarak üç model oluşturulmuştur. Bu modellerin kapsamlı performans analizi yapılmış ve üç güç tahmin modelinin de kısa zaman dilimlerinde üretilen gücü doğru bir şekilde tahmin etmiştir.

Liu ve ark. (2010), rüzgâr hızı tahmini için yeni bir zaman serisi tahmin yöntemi önermişlerdir. Çalışmada ABD'deki bir gözlem alanından gelen bir yıllık saatlik rüzgâr hızı verileri kullanılmıştır. Önerilen yöntem Taylor Kriging modelinin rüzgâr hızı zaman serilerinin tahmini için uygun şekilde değiştirilmiş halidir. Bu yöntem ARIMA yönteminden %18.60 ve %15.23 daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir. Bouzgou ve Benoudjit (2011), rüzgâr hızı tahmini için farklı tahmin algoritmalarından oluşan çoklu mimari sistemine dayalı yeni bir model önermişlerdir. Önerilen model Cezayir'deki yedi gözlem noktasından alınan 10 yıllık veriler kullanarak test edilmiş ve deneysel sonuçlar geleneksel tahmin yöntemlerine kıyasla rüzgâr hızı tahmininin kesinliğini arttırdığı görülmüştür. Zhang ve ark. (2013), radyal tabanlı fonksiyon sinir ağı, mevsimsel düzeltme yöntemi ve melezleyen hibrit modele dalgacık dönüşümü tekniği uygulanarak rüzgâr hızı tahmin için yeni bir model önermişlerdir. Önerilen model Çin'de bulunan iki bölgenin bir ay için 24 saatlik ortalama verileri kullanılarak test edilmiştir. Sonuçlar önerilen modelin diğer modellere göre en küçük hataya sahip olduğunu göstermektedir. Li ve ark. (2015), rüzgâr çiftliklerinde enerji üretimini tahmin etmek için yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Çalışmada geliştirilen yöntem ABD'de bulunan dokuz rüzgâr çiftliğinden alınan 10 dakikalık aralıklarla ölçülen 1 yıllık rüzgâr hızı ve gücü verileri kullanılarak test edilmiştir. Test sonuçlarına göre geliştirilen yöntemle elde edilen tahminlerin güvenilir olduğu tespit edilmiştir. Dinçer ve ark. (2017), Kilis ili için 10 metre yükseklikteki rüzgâr hızı verilerini kullanarak farklı yükseklikteki rüzgâr hızlarını tahmin etmişlerdir.

Şenol ve Musayev (2017), rüzgâr enerjisinden elektrik üretimini yapay sinir ağıları modeli oluşturarak tahmin etmişlerdir. Tahmin sonuçlarına göre seçilen bölgedeki rüzgâr enerjisi potansiyelinin oldukça iyi olduğunu ve kaliteli rüzgâr türbinleri kullanarak yüksek elektrik üretiminin sağlanabileceği görülmüştür. Dikmen ve Örgen (2018), Burdur Ağlasun bölgesindeki 2 metre yükseklikteki rüzgâr hızı verilerini kullanarak farklı yükseklikteki rüzgâr hızlarını tahmin etmişlerdir. Rüzgâr hızı dikkate alınarak bölge için en uygun türbin tespiti yapılarak bölgeden rüzgâr enerjisi ile elde edilebilecek enerjiyi tespit etmişlerdir. Naik ve ark. (2018), çekirdek sırtı regresyonu ile ampirik mod ayrıştırmasına dayalı kısa vadeli rüzgâr hızı ve gücü tahmini için bir hibrit yöntem önermişlerdir. ABD'de bulunan bir rüzgâr çiftliğinden alınan 10 dakika, 30 dakika ve 1 saatlik rüzgâr hızı ve gücü verileri kullanılarak önerilen yöntem test edilmiştir. Test sonuçlarında önerilen modelin en az hata metrikleri ve en yüksek kolerasyon katsayısı ile üstün tahmin performansı sergilediği görülmüştür. Shabbir ve ark. (2019), rüzgâr enerjisi üretiminin kısa vadeli tahmini için destek vektör makinası tabanlı regresyon algoritması önermişlerdir. Estonya'daki 1 aylık veriler kullanarak rüzgâr enerjisi

üretimini 1 gün öncesinden tahmini yapılmıştır. Çalışmada önerilen algoritma Estonya enerji düzenleme kuruluştaki tahmin algoritmasının sonuçlarıyla karşılaştırmış ve önerilen algoritmanın %10 daha az ortalama kare hatası değerine sahip olduğu görülmüştür. Gorgel ve Kavlak (2020), İzmir Urla bölgesindeki rüzgâr hızı verilerini kullanarak rüzgâr enerjisinden üretilebilecek elektrik üretim miktarını tahmin etmişlerdir. Lee ve ark. (2020), kısa vadeli rüzgâr enerjisi tahmini için üç topluluk öğrenme dayalı model önermişlerdir. Tahmin doğruluğunun değerlendirilmesi için Türkiye ve Fransa’da bulunan rüzgâr türbinlerinden her 10 dakikada bir alınan ölçümleri kullanılmıştır. Çalışma sonucundan önerilen modellerin iyi bir tahmin sağladığı tespit edilmiştir.

Rüzgâr enerjisinin üretim potansiyeli mevsim şartlarına bağlı olduğu için doğru bir planlama yapılmaksızın kurulan türbinler ekonomik verimliliği sağlamayabilir. Rüzgâr türbinleri kurulmadan önce kurulması planlanan bölgedeki rüzgâr hızı, rüzgâr üretim gücünün doğru şekilde tespit edilmesi ve buna bağlı olarak ekonomik analizinin yapılması gereklidir. Kurulum maliyeti, işletme maliyeti ve bakım maliyeti gibi faktörler kurulması planlanan bölgedeki rüzgâr türbininin amortisman süresini ortaya koymaktadır. Literatürde rüzgâr türbinlerinin ekonomik analizleri üzerine çalışmalar bulunmaktadır.

Blanco (2009), rüzgâr enerjisinin ekonomisini ve Avrupa’daki rüzgâr enerjisi projelerinin mevcut üretim maliyetlerini araştırmıştır. Araştırmada karadaki bir rüzgâr çiftliğinin üretim maliyeti 4,5 ile 8,7 ¢cent/kWh arasında, açık denizlerde bulunan bir rüzgâr çiftliğinin üretim maliyetinin ise 6 ile 11.1 ¢cent/kWh arasında olduğunu tespit etmiştir. Malik ve Al-Badi (2009), Umman’da bulunan bir rüzgâr türbininin ekonomisini araştırmışlardır. Çalışmada yıllık ortalama rüzgâr hızı 5,7 m/s olan bir bölgede bulunan 50 kW gücündeki bir türbinini ele almışlardır. Araştırma sonucunda rüzgâr türbininin toplam özgül maliyetinin 7,4 ile 8,45 ¢cent/kWh arasında olduğunu ve türbinin basit geri ödeme süresinin 5.1 ile 5.4 yıl arasında indirimli geri ödeme süresinin ise 6.7 ile 8 yıl arasında olduğunu tespit etmişlerdir. Vardar ve Çetin (2009), 22 farklı bölgedeki 1990 ile 2005 yılları arasındaki rüzgâr hızının saatlik ortalama değerlerini kullanarak 2500, 1300 ve 600 kW’lık kapasitede olan üç rüzgâr türbininin ürettiği elektriğin bu bölgeler için kWh başına maliyetini hesaplamışlardır. Araştırmada türbinlerden üretilen elektriğin minimum maliyeti sırasıyla 0,023, 0,0316 ve 0,0478 ¢cent/kWh olarak Kumköy bölgesinde, maksimum maliyeti ise sırasıyla 0,3929, 0,5184 ve 0,806 ¢cent/kWh olarak Yalova bölgesinde olacağı tespit edilmiştir.

Mohammadi ve Mostafaeipour (2013), İran'ın Aligoodarz şehrinin 2005 ile 2009 yılları arasındaki 10 metre yükseklikte ölçülen rüzgâr hızı verilerini kullanarak güçleri 20 kW ve 150 kW arasında değişen altı rüzgâr türbininin ekonomik fizibilitesini değerlendirmişlerdir. Farklı türbinler için enerji maliyetleri 0,0470 ile 0,0720 \$/kWh aralığında olduğu tespit edilmiştir. Geri ödeme süresi ve fayda maliyet oranı analizi yapıldığında bir türbin modeli dışında incelenen tüm rüzgâr türbinlerinin kurulumunun ekonomik olarak uygulanabilir olduğunu göstermiştir. Katsigiannis ve Stavrakakis (2014), farklı rüzgâr türbini sınıfları için Avustralya'nın çeşitli bölgelerinde rüzgâr enerjisi üretiminin tahminini yapmışlardır. Çalışmada farklı rüzgâr türbinlerinin ekonomik analizi yapılmıştır. Effiom ve ark. (2016), Nijerya'da bulunan 500 MW'lık bir açık deniz rüzgâr türbini çiftliklerinin geliştirilmesinin fizibilitesi üzerine ekonomik maliyet değerlendirmesi yapmışlardır.

5. ELEKTRİK TÜKETİMİ TAHMİNİ VE FARKLI KAYNAKLARDAN ELEKTRİK ÜRETİMİNİN EKONOMİK VE ÇEVRESEL AÇIDAN OPTİMİZASYONU

Enerji arzı belirsiz olduğundan zaman içinde enerji arzını ve enerji talebini bir dengede tutmak giderek daha zor hale gelmektedir (Weitzel ve Glock, 2018). Elektrik talebi zaman içinde sürekli bir artış içindedir ve bu nedenle iyi bir tahmin modeli kurmak gelecekteki tüketimi anlamak için önem arz etmektedir (Jain ve ark., 2018). Son yıllarda, ekonomide ve endüstride ve meydana gelen değişiklikler nedeniyle tüm dünya ülkelerinde enerji tüketimi hızla artmaktadır. Bu hızlı artış optimal bir strateji geliştirmek için doğru talep tahminleri ile mümkün olabilmektedir (De Oliveira ve Oliveira, 2018). Ghalekhondabi ve ark. (2017), çalışmalarında enerji talebi ile ilgili yapılan tahmin çalışmalarının 1995–2014 yılları arasındaki dağılımının giderek arttığı görülmektedir. Enerji talebinin doğru olarak tahmin edilebilmesi için kullanılan birçok farklı yöntem vardır. Bu yöntemlerden bazıları regresyon modelleri, Otoregresif Entegre Hareketli Ortalama (ARIMA) yöntemi ve ARIMA hatalarını içeren regresyon yöntemi gibi yöntemler olarak sayılabilir. Gelecekteki enerji ihtiyacının tahmin edilmesinde kullanılabilen en basit modellerden birisi zaman serisi modelleridir (Suganthi ve Samuel, 2012). Zaman serisi analizleri ile elektrik enerjisinin tahminini yapan literatürde birçok çalışma vardır. Güç sistemlerinin büyümesi ve karmaşıklıklarının artmasıyla, elektrik enerjisi üretimi ve tüketiminde birçok faktör etkili olmaktadır.

Bu bölümde, GSYİH ile elektrik tüketimi arasında ile paralel bir ilişki olduğunu kabul edilmiş (Aslan, 2014) ve literatürdeki diğer bazı çalışmalara benzer şekilde bu değişken elektrik tahmininde kullanılmıştır. Bu tahminin yapılabilmesi için literatürde yaygın olarak kullanılan regresyon modeli kullanılmaktadır. Geleneksel regresyona ek olarak oluşan hatanın zaman serileri ile modellendiği dinamik regresyon modeli ile tahmin edilen değer ile gerçek değer arasındaki fark iyileştirilmiş ve daha etkin bir tahmin elde edilmiştir. Geliştirilen matematiksel model, maliyet ve emisyonu en aza indirecek şekilde kaynaklara göre elektrik üretim politikalarını vermektedir. Bildiğimiz kadarıyla, literatürde elektrik tahmini ve ilgili kaynak optimizasyon problemini bir arada ele alan herhangi bir çalışma bulunmamaktadır ve bu çalışma bu alandaki boşluğa katkı sağlayacaktır.

5.1. Veri ve Modelleme Tekniği

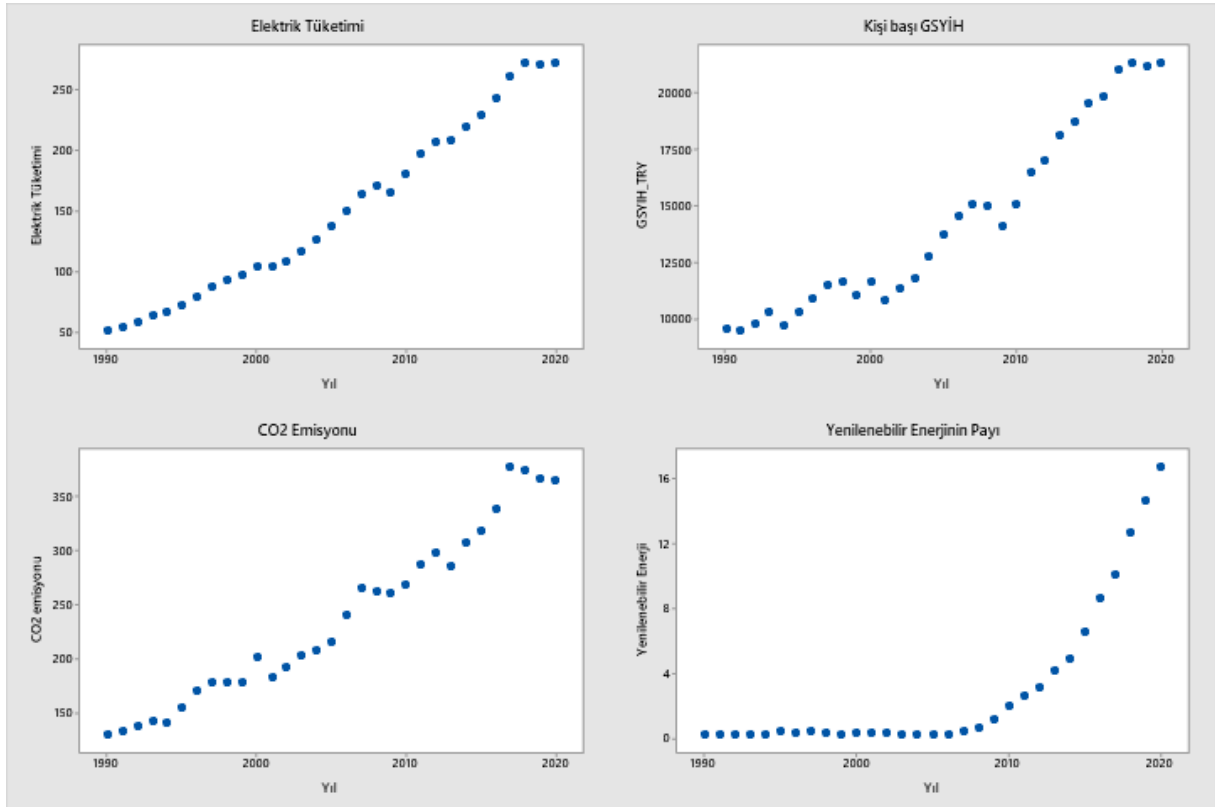
Bu bölümde 1990 ile 2020 yılları arasındaki dönemi kapsayan değişkenlerin yıllık değerlerini içeren bir Türkiye veri seti kullanılmıştır. Bu veri setinde yıllık elektrik tüketimi, CO₂ emisyonu, kişi başına düşen GSYİH ve yenilenebilir enerjinin toplam enerji içindeki payı

yer almaktadır. Mevcut veriler, gelecekteki elektrik tüketiminin tahmin edilmesinde kullanılmıştır. Maliyeti ve CO₂ emisyonunu en aza indirmek için her bir elektrik üretim teknolojisinin optimal payını sağlayan bir lineer matematiksel model geliştirilmiştir. Tahmin teknikleri ve matematiksel model detaylıca tanıtılmaktadır. Tablo 5.1’de veri setindeki değişkenlerin tanımlayıcı istatistikleri verilmiştir.

Tablo 5.1. Tanımlayıcı İstatistikler

Değişken	Birim	Ortalama	Standart Sapma	Maximum	Minimum
CO ₂ Emisyonu	Milyon Ton	237,5	79,1	128,8	378,6
Elektrik Tüketimi	Terawatt-Saat	149,4	73	50,1	273,6
Yenilenebilir Payı	Yüzde (%)	2,975	4,722	0,139	16,830
Kişi Başı GSYİH	Yerel Para Birimi (TRY)	14345	4068	9422	21389

Veri setinde bulunan değişkenlerin zaman içindeki değişimleri Şekil 5.1’de gösterilmiştir. Zamanla elektrik tüketiminde ve CO₂ emisyonunda artan bir eğilim görülmekte ve benzer şekilde yenilenebilir enerjinin toplam enerji içindeki payı da son yıllarda artış göstermiştir. Yenilenebilir payının artmasıyla CO₂ yavaşlama hatta azalma beklemek oldukça mantıklı görülmektedir. Gelecek dönemler için elektrik tüketimi tahminlerine dayanarak bu durumun CO₂ emisyonu üzerindeki etkisi ayrıca tartışılmaktadır.



Şekil 5.1. Yıllar İtibariyle Değişkenler (The World Bank, 2022)

5.1.1. Tahmin Tekniği

Tahmin, geçmiş verilere dayanarak gelecek hakkında beklentilerde bulunma sürecidir. Bu amaçla kullanılan bazı matematiksel yaklaşımlar yalnızca zamana dayalı tahminler yaparken, bazıları da tahminlerin doğruluğunu artırmak için farklı bilgilere dayalı tahminlerde bulunmaktadır. Bu iki yaklaşım arasındaki farkı ortaya çıkarmak için her iki türde de en çok kullanılan tahmin modelleri detaylı olarak incelenmiştir.

Regresyon modelleri, tahminlerini çeşitli tahmin öğelerini içeren bilgilere dayandırır. Zaman serisi modelleri (ARIMA) ise geçmiş gözlemlere dayalı olarak geleceği tahmin etmektedir. Bununla birlikte regresyon tekniğinden farklı olarak ARIMA modelleri, bilgi taşıyan farklı tahmin edicilerden yoksundur. Dinamik regresyon modelleri ise regresyon ve zaman serisi özelliklerini birleştiren tahmin teknikleridir. Tahmin ile gerçek değer arasındaki hata payı, geleneksel regresyona ek olarak bir zaman serisi olarak tahmin modeline eklenir. Bu nedenle geleneksel regresyon veya zaman serisi modellerinden daha iyi sonuçlar vermesi beklenmektedir. Sıradan bir regresyon modelinin denklemi Denklem (5.1)'de verilmiştir.

$$y_t = \beta_0 + \beta_1 x_{1,t} + \dots + \beta_r x_{r,t} + \epsilon_t, \epsilon_t \sim N(0, \sigma^2) \quad (5.1)$$

Burada tahmin edilen değer olarak y_t , çoklu tahmin edicilerin ($x_{1,t}, \dots, x_{r,t}$) doğrusal bir fonksiyonu ve tahmin ile gerçek değerler arasındaki farkı gösteren bir hata terimi olan ϵ_t 'dir. Hata teriminin, ortalaması sıfır olan normal bir dağılım izlediği varsayılır. Regresyon modelinde y_t bağımlı değişken iken $x_{r,t}$ bağımsız değişkenlerdir. Bağımsız değişkenlerin n 'inci derecede olması durumunda, bir tahmin edici ile Denklem (5.2)'deki gibi polinom regresyonu olur.

$$y_t = \beta_0 + \beta_1 x_t + \beta_2 x_t^2 + \dots + \beta_n x_t^n + \epsilon_t, \epsilon_t \sim N(0, \sigma^2) \quad (5.2)$$

Geleneksel ve dinamik regresyon arasındaki fark, hata teriminin nasıl değerlendirileceğine bağlıdır. ϵ_t 'nin ilişkisiz bir hata terimi (beyaz gürültü) olduğunu varsaydığımızda, formülasyon sıradan regresyon modeli haline gelir. Ancak ϵ_t 'nin otomatik korelasyonlu olmasına izin verilirse (ARIMA süreci), model dinamik regresyona dönüşür. Böyle bir durumda hata terimini n_t ile değiştiririz ve dinamik regresyonu Denklem (5.2) yeniden düzenlenerek Denklem (5.3) elde edilir.

$$y_t = \beta_0 + \beta_1 x_{1,t} + \dots + \beta_r x_{r,t} + n_t, n_t \sim ARIMA(p, d, q) \quad (5.3)$$

Denklem (5.3)'te gösterilen p gecikme sırası, d fark derecesi ve q hareketli ortalama sırasındır. Buradaki ana varsayımın, hataların ilişkili olduğu ve bu da onları bazı bilgiler içermelerine neden olduğuna dikkat edilmesi gerekir.

5.1.2. Model Seçimi

Gerçek ve tahmin edilen değerler arasındaki fark, bir tahmin modelinin performansını değerlendirmek için kullanılır. Bu çalışmada, Ortalama Hataların Karekökü (RMSE) ve Ortalama Mutlak Hata (MAE) kriterleri kullanılarak modellerin performansları karşılaştırılmaktadır. Bir dizi gözlem (n) üzerinden gerçek değer (y_t) ile tahmin edilen değer ($\hat{y}_t$) arasındaki fark, Denklem (5.4) ve Denklem (5.5)'te gösterildiği gibi hesaplanabilir.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (y_t - \hat{y}_t)^2} \quad (5.4)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |y_t - \hat{y}_t| \quad (5.5)$$

5.1.3. Matematiksel Model

Geliştirilen lineer matematiksel model kullanılarak yıllık elektrik tüketimini karşılamak için hangi elektrik üretim kaynaklarının kullanılması gerektiği gösterilmiştir. Bu modelde amaç fonksiyonu, elektrik üretiminden kaynaklanan toplam maliyeti ve CO₂ emisyonunu minimize etmektedir. Her kaynağın elektrikteki payı, ekonomik ve çevresel etkilerin değişen önemine göre hesaplanacaktır. Tablo 5.2 modelde kullanılan parametreleri ve değişkenleri göstermektedir.

Tablo 5.2. Parametreler ve Değişkenler

Parametreler	Açıklama
i	Elektrik üretim teknolojisi endeksleri
c_i	i teknolojisinin birim CO ₂ emisyonu (gr/kWh)
E	Yıllık elektrik talebi (kWh)
K_i	i teknolojisinin sermaye maliyeti (\$/kW)
s_i	i teknolojisinin yıllık sabit işletme maliyeti (\$/kW)
o_i	i teknolojisinden üretilen elektriğin işletme maliyeti (\$/kWh)
I_i	i teknolojisinin kurulu gücü (kW)
N_i	i teknolojisinin ömrü (yıl)
a_i	i teknolojisinin yıl boyunca kullanılabilirliği
e_i	i teknolojisinin verimliliği (%)
α	Amaç fonksiyonundaki maliyet faktörünün ağırlığı
β	Amaç fonksiyonundaki çevre (CO ₂) faktörünün ağırlığı
Değişkenler	
x_i	i teknolojisinin toplam elektrik üretimi
y_i	i teknolojisindeki kurulu güç artışı

Amaç fonksiyonu çok amaçlıdır ve maliyet ile CO₂ emisyonları olmak üzere iki değişken içermektedir. Denklem (5.6)'da gösterilen birinci bileşen, kurulu kapasitenin yatırım maliyeti, yıllık sabit işletme ve yönetim maliyeti ve elektrik üretim maliyetinin toplamıdır. Elektrik yatırımlarının farklı yaşam döngüleri olduğundan, ilk kurulum maliyeti kullanım ömrüne bölünür. İkinci bölümde üretilen birim başına CO₂ emisyonlarının toplamı hesaplanmıştır. Denklem (5.7) her teknolojinin ürettiği elektrik miktarının toplam üretim kapasitesini aşmamasını sağlar. Elektrik üretim kapasitesi, her bir teknolojinin kurulu gücü, verimliliği ve kullanılabilirliği ile belirlenir. Denklem (5.8) ise üretilen elektrik miktarının yıllık talebi karşılamasını zorunlu kılmaktadır.

$$\text{Min} \quad \alpha \sum_{\forall i} \left(\frac{K_i}{N_i} (I_i + y_i) + s_i (I_i + y_i) + o_i x_i \right) + \beta \sum_{\forall i} (c_i x_i) \quad (5.6)$$

$$x_i \leq (I_i + y_i) a_i e_i \quad \forall i \quad (5.7)$$

$$\sum_{\forall i} x_i \geq E \quad (5.8)$$

5.2. Numerik Sonuçlar ve Bulgular

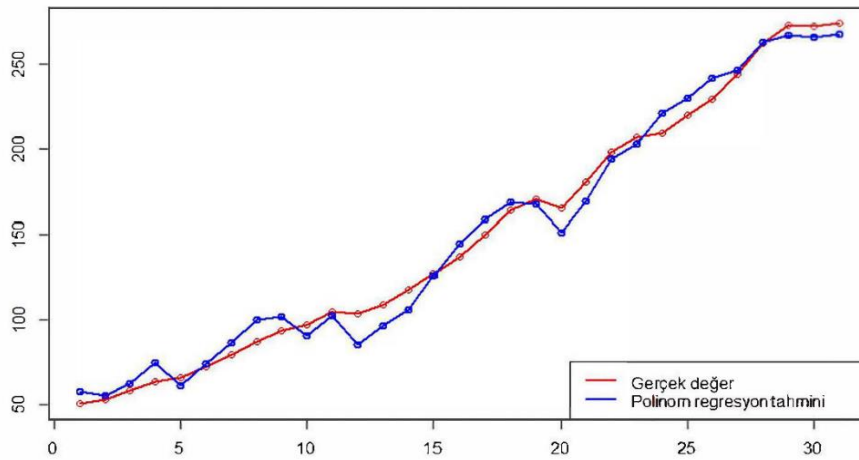
Bu bölümde bölüm 5.1'de sunulan verilerle model test edilmiş ve sayısal sonuçlar gösterilmiştir. Bu analizin temel olarak iki amacı vardır. Bunlardan ilki elektrik tüketimi tahmini için öncelikle hata payı en düşük tahmin yöntemini belirlemektir. Test edilen tahmin yöntemleri arasında yalnızca geçmiş gözlemlere dayalı tahminde bulunan, bir tahmin ediciye dayalı tahminde bulunan ve hem geçmiş gözlemlerin hem de bir tahmin edicinin birleşimini dikkate alan bir yöntem bulunmaktadır. İkinci olarak hem mevcut kurulu güce hem de geleceğe yönelik beklentilere göre CO₂ emisyonunu ve toplam maliyeti en aza indirecek elektrik üretim politikası belirlemektir. Geliştirdiğimiz matematiksel model ile daha ekonomik ve daha çevreci olacak her bir elektrik üretim teknolojisinin mevcut kurulu gücünden ne kadar elektrik üretilmesi gerektiği belirlenecektir. Ayrıca, önümüzdeki 5 yılda elektrik tüketimindeki büyümenin farklı teknolojilerle karşılanmasının ekonomik ve çevresel etkisi, tahmin yaklaşımından elde edilen elektrik tüketim verileri kullanılarak değerlendirilmektedir.

5.2.1. Elektrik Tüketimi Tahmini

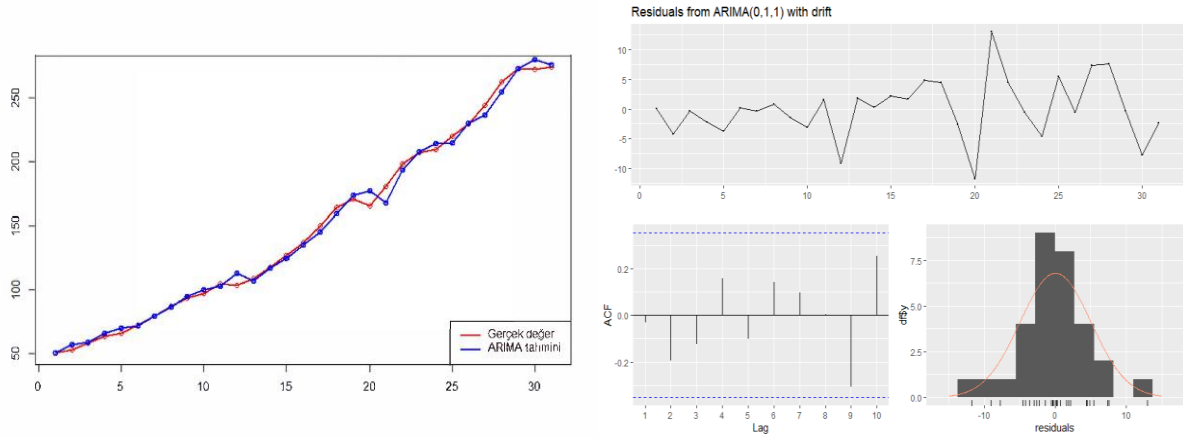
Önümüzdeki yıllar için elektrik tüketiminin tahmin edilmesi, enerji politikası stratejilerinin planlanması ve belirlenmesi için hayati önem taşımaktadır. Çünkü enerji

kaynaklarının öngörülen talebe göre planlanması ve talep bilgilerine göre kaynağın ihracat ve ithalat politikalarının belirlenmesi gerekmektedir. Uluslararası ölçekteki enerji anlaşmaları genellikle uzun vadelidir ve tahminlerdeki hatalar, gerekli enerjinin aşırı ithalatına veya ihracatına neden olabilir. Elektrik talebinin tahmin edilen değerden yüksek olması, elektrik kesintilerine ve üretim hizmetlerinde aksamalara neden olabilir. Bölüm 5.1’de sunulan verilere dayanarak, polinom regresyon, ARIMA ve dinamik regresyon dâhil olmak üzere tahmin tekniklerini geçmiş dönem verilerine uygulanarak Şekil 5.2, 5.3 ve 5.4’te gerçek ve tahmin değerleri grafiklerini gösterilmiştir.

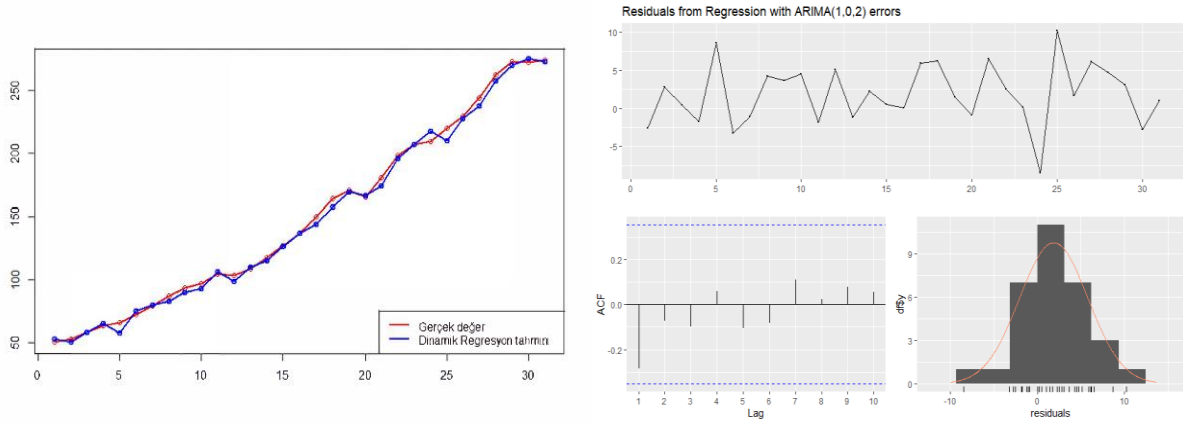
Şekil 5.2, 3. derece polinom regresyonunun sonuçlarını göstermektedir. Elektrik tüketimi, yerel para biriminde GSYİH’ye göre hesaplanır. Bu nedenle, regresyon modelinde gelecekteki elektrik tüketimini tahmin etmek için GSYİH verileri gereklidir. Tahminimizde kullanılan ARIMA modeli yalnızca geçmiş gözlemlere dayanmaktadır. En iyi model olarak ARIMA(0,1,1) seçildikten sonra bu modelden elde edilen elektrik tüketim verileri ile gerçek veriler Şekil 5.3’te gösterilmiştir. Ayrıca, otokorelasyon grafiği, tüm örneklerin otokorelasyonunun %95 güven aralığında kaldığını göstermektedir. Böylece, tüm artıkların bağımsız olduğu varsayımı kanıtlanabilmektedir. Son olarak, geleneksel regresyon ve hata terimi ARIMA(2,0,1) olarak modellenen dinamik regresyon kullanılarak tahmin yapılmıştır. Şekil 5.4’te sunulan sonuçlar, model verilerinin gerçek verilerle iyi bir uyum sağladığını göstermektedir. ARIMA modeli gibi tüm örneklerin otokorelasyonları güven aralığı sınırları içindedir. Veriler yıllık olarak ele alındığı için herhangi bir mevsimselliğin olmaması zaten beklenen bir durumdur.



Şekil 5.2. Polinom Regresyon Tahmini ve Gerçek Değer Grafiği



Şekil 5.3. ARIMA(0,1,1) Model Grafiği ve Kalıntı Değerleri



Şekil 5.4. Dinamik Regresyon ve ARIMA(1,0,2) Hata Model Grafiği ve Kalıntı Değerleri

Gerçek veri ile uyumu grafikten de okunmasına karşın hangi yöntemin tahminlerinin daha uygun olduğunu belirlemek için performans kriterlerinin değerleri incelenmelidir. Tablo 5.3, modellerin performansını değerlendirmek için daha önce tanıtılan RMSE ve MAE değerlerini içermektedir. Bu metriklerin daha düşük değerlerinin gerçek verilere daha iyi uyduğunu gösterdiğini söyleyebiliriz.

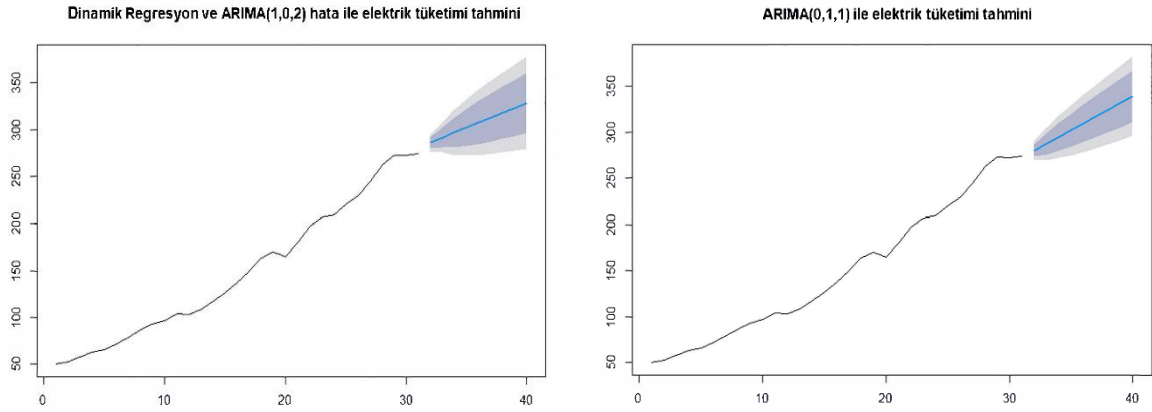
Tablo 5.3. Modellerin Performans Kriterleri

Model	Tip	RMSE	MAE
Lineer Regresyon	GSYİH bağlı	9.66	8.09
Polinomsal Regresyon	GSYİH bağlı	8.49	7.30
ARIMA	Zamana bağlı	4.91	3.56
Dinamik Regresyon	GSYİH-Zamana bağlı	4.31	3.41

Performans kriterlerine göre dinamik regresyon modeli en düşük hata payına sahiptir. ARIMA modeli arasında çok az hata farkı olmasına rağmen geleneksel regresyon modellerine

göre daha iyi sonuçlar vermektedir. Dinamik regresyonlu tahmin, geleceğe yönelik GSYİH verilerine sahip olmayı gerektirir. GSYİH beklentileri ile geleceğe yönelik planların farklılaşması durumunda dinamik regresyon avantajlı hale gelmektedir. Ancak, gelecekte GSYİH ile ilgili bir tahmin yoksa veya büyük oranda belirsizlikler söz konusu ise tahminde büyük sapmalar olabilir.

2021-2030 dönemi için elektrik tüketimini tahmin etmek için ARIMA(0,1,1) zaman serisi modeli ve ARIMA(1,0,2) hata ile dinamik regresyon modeli kullanılmış ve gelecek değerler Şekil 5.5'te gösterilmiştir. Dinamik regresyonu çalıştırmak için gelecekteki GSYİH değerleri, Şekil 3.1'de verilen geçmiş GSYİH verilerinden polinom regresyonu ile elde edilmiştir.



Şekil 5.5. Dinamik Regresyon ve Zaman Serisi ile Gelecek Elektrik Tüketimi Tahmini

5.2.2. Elektrik Tüketiminin Ekonomik ve Çevresel Etkisi

Artan elektrik tüketiminin karbon emisyonu üzerindeki etkisi, artan çevresel kaygılar nedeniyle daha da önemli hale gelmektedir. Emisyonları azaltmak için daha az kirlüten, temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması gerekmektedir. Çevresel faydaları olmasına rağmen, yenilenebilir enerji kaynaklarına sahip olmak için yatırım ve belirli ekonomik maliyetler gerekir. Ayrıca bu kaynaklarla elektrik üretiminde bazı fiziksel kısıtlamalar (mevsimsellik, hava durumu vb.) bulunmaktadır. Her elektrik üretim teknolojisin kendi avantajları ve dezavantajları vardır. Bunların temel özellikleri Tablo 5.4'te gösterilmiştir (Kumar ve Madlener, 2016).

Tablo 5.4. Çeşitli Elektrik Üretim Teknolojilerinin Ekonomik ve Emisyon Özellikleri

Teknoloji	Kurulum Maliyeti (\$/kW)	Sabit Maliyet (\$/kW)	Değişken Maliyet (\$/kWh)	CO ₂ emisyonu (ton/GWh)
Kömür Termal	890	10.7	0.014	888
Gaz Termik	667	23.5	0.029	499
Hidroelektrik	1334	12.9	0.9	26
Nükleer	1446	42	0.002	66
Güneş	3500	10	-	23
Rüzgâr	889	10	-	10
Diğer Yenilenebilir	885	41.5	0.48	32

Çeşitli enerji kaynaklarının ve teknolojilerinin özelliklerine göre, elektrik üretimi ve enerjide yeni yatırım için en uygun kaynakların hangisinin seçileceğinin değerlendirilmesi kritik önem taşımaktadır. Enerji çeşitliliği, enerji güvenliği ve ham kaynak temini gibi çeşitli kısıtlamalara rağmen, birincil amaç, ekonomi ve CO₂ emisyonu açısından en iyi elektrik üretim politikasını bulmaktır. Geliştirdiğimiz matematiksel model, Tablo 5.4'te tanıtılan parametrelerle Bölüm 5.2.1'de sunulan ARIMA modeli ile elde edilen elektrik tahmini kullanılarak test edilmiştir. Tablo 5.5'te bu modelden elde edilen üretim payları ile Türkiye'deki mevcut durum karşılanarak sonuçlar özetlenmiştir. Modellerin performans ölçütü, elektrik üretiminden kaynaklanan toplam maliyet ve toplam CO₂ emisyonudur. Bu durumda hem mevcut durum hem de geliştirdiğimiz model kurulu güç kullandığından sadece değişken maliyete dikkat ederek kurulum ve sabit maliyet ihmal edilmiştir.

Sonuçların mevcut durumla karşılaştırılması, çeşitli teknolojilerin elektrik üretim paylarının ekonomik ve çevresel etkileri hakkında bize anlamlı bilgiler vermektedir. Tablo 5.5'teki ekonomik model, yalnızca toplam maliyeti minimize etme amaç fonksiyonu ile geliştirilen matematiksel modeli ifade eder. Benzer şekilde CO₂ emisyonunu en aza indirme hedefi de tabloda çevresel model olarak gösterilmiştir.

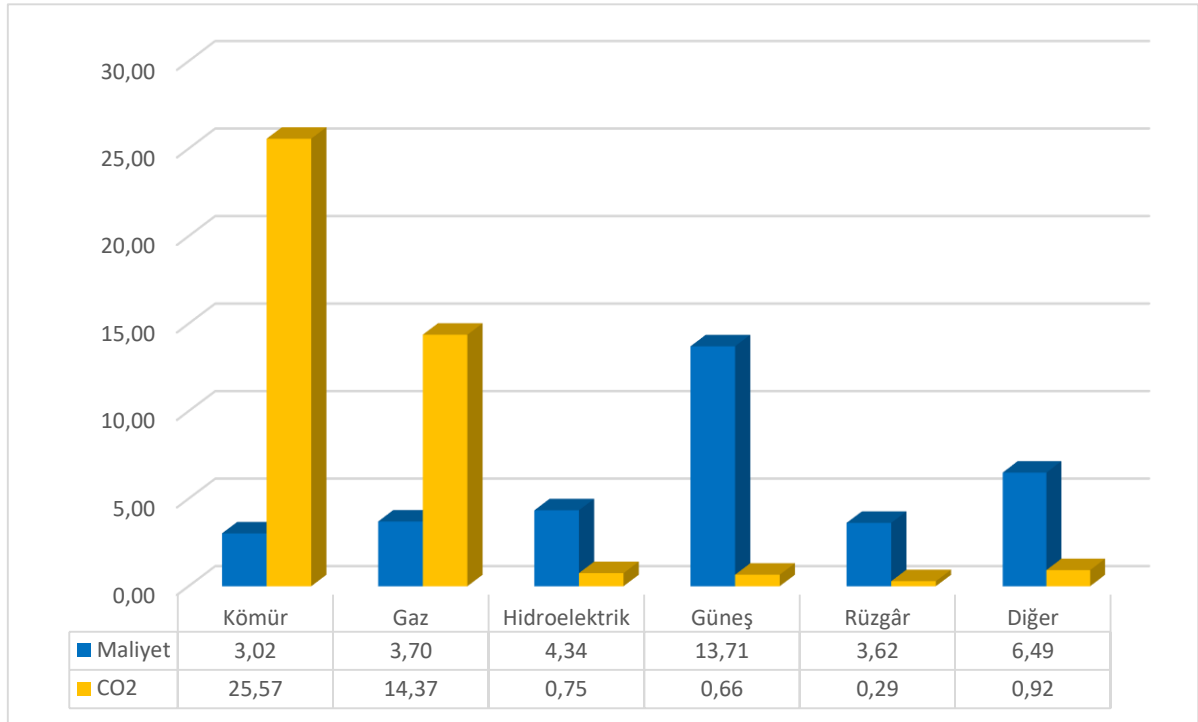
Tablo 5.5. Türkiye Kurulu Gücü ve Elektrik Üretimi

Teknoloji	Kurulu Güç (MW)	Mevcut Üretim (%)	Ekonomik Model (%)	Çevresel Model (%)
Kömür	20322.6	36.8523	40.5375	30.5375
Gaz	25693.4	25.3854	27.9239	27.9239
Hidroelektrik	31177.9	28.6001	21.4601	31.4601
Güneş	6869.4	0.1539	0.1639	0.1693
Rüzgâr	9192.2	9.0072	9.9079	9.9079
Diğer Yenilenebilir	3140.5	0.0012	0.0013	0.0013
Toplam Maliyetteki Değişim (%)		0	-23.34	9.48
Toplam CO ₂ Emisyonundaki Değişim (%)		0	9.44	-9.21

Finansal açıdan bakıldığında, kömür ve gaz teknolojileri hidroelektrikten daha avantajlı görünmektedir. Zaten değişken maliyetleri daha düşük olduğu için bu beklenen bir durumdur.

Elektrik üretim potansiyeli düşük olmasına rağmen, yenilenebilir enerji kaynağı düşük işletme maliyetleri nedeniyle büyük kazançlar sağlamaktadır. Ekonomik modeli Türkiye'deki mevcut durumla karşılaştırdığımızda %23'lük bir operasyonel maliyet düşüşü görüyoruz. Emisyon değerleri ise % 9,44 oranında artış göstermiştir. Modelde CO₂ emisyonuna öncelik verdiğimizde ise maliyet % 9,48 artarken emisyon % 9,21 düşmektedir. Geleneksel teknolojiler göz önüne alındığında, hidroelektrik santrali emisyon açısından avantajlı olsa da işletme maliyetinin yüksek olması nedeniyle ekonomik olarak tercih edilmemektedir. Sonuç olarak, kömür ve gaz gücü, elektrik üretiminin birincil kaynağıdır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının potansiyelini artırmadan hem ekonomik hem de çevresel ilerlemeyi sağlamanın oldukça zor olduğu görülmektedir. Tablo 5.5'teki sonuçlar ise yalnızca Türkiye'deki mevcut kurulu güce dayanmaktadır.

Gelecek dönemde enerji tüketimindeki artışın karşılandığı kaynak türüne göre matematiksel modeli çalıştırarak ilgili maliyet ve emisyonu gözlemlenmektedir. ARIMA modelini kullanarak elde ettiğimiz elektrik talebindeki artışın önümüzdeki beş yıl boyunca ekonomiyi ve çevreyi nasıl etkilediğini analiz edilmektedir. Şekil 5.6'da elektrik talebinin yalnızca kömür, gaz, hidroelektrik, güneş, rüzgâr ve diğer yenilenebilir kaynaklarla önümüzdeki beş yıl içinde ayrı ayrı sağlanmasından kaynaklanan maliyet ve CO₂ emisyonlarındaki artış gösterilmektedir.



Şekil 5.6. 2021-2025 Çeşitli Elektrik Üretim Kaynaklarına Göre Maliyet-CO₂ Değişimi

Hâlihazırda kurulu güç kapasitesine ek yatırımlar gerektiğinden, sermaye ve sabit maliyetler de dikkate alınmaktadır. Kömür, elektrik tüketimindeki artışı karşılamak için en ucuz seçenek olsa da, CO₂ emisyonunda %25'lik bir artışa neden olmaktadır. Rüzgâr enerjisi, düşük maliyetli, düşük emisyonlu bir alternatif olarak görülmektedir. Artan elektrik talebi, ekonomik ve çevresel hedefler doğrultusunda bir veya birden fazla kaynaktan sağlanabilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları daha çevre dostudur ancak maliyetleri de önemlidir. Ayrıca yenilenebilir kaynaklardan elektrik üretiminin fiziksel sınırlara tabi olduğu da unutulmamalıdır. Çünkü radyasyon değerleri düşük olan yerlerde veya denizlerde güneşten elektrik üretmek daha zordur. Aynı şekilde rüzgârın yeterli olmadığı bölgelerde de rüzgâr türbinleri verimsiz hale gelmektedir. Uygun yatırım stratejisi ise onların maksimum potansiyellerinden yararlanmaya yardımcı olabilir. Sonuç olarak, elektrik kullanımında öngörülen artışlar için temiz ve uygun maliyetli alternatifler sunulabilir.

6. RÜZGÂR ENERJİSİNDEN ELEKTRİK ÜRETİM TAHMİNİ VE EKONOMİK ANALİZİ

Enerji talebindeki artış, çevresel sorunlar ve kaynakların azalması yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi giderek arttırmaktadır. Sürdürülebilir kalkınma için enerjide arz-talep dengesinin sağlanması ve enerji üretiminin çevresel açıdan en temiz şekilde yapılması gerekmektedir. Ayrıca ekonomik olarak herkes tarafından erişilebilir olması için maliyetler de makul bir düzeyde olmalıdır.

Temiz ve ulaşılabilir enerjiyi teşvik etmek için ülkeler, direkt ve dolaylı olarak çeşitli uygulamalar ortaya koymaktadır. Temiz enerji kaynaklarının kullanımında vergi avantajları sunulduğu gibi ayrıca CO₂ emisyon kotası uygulanarak dolaylı olarak da firmalar yönlendirilmektedir. Ayrıca temiz enerji üretimi yapan firmalar, karbon sertifikası alarak üretimlerini daha rahat bir şekilde yapabilmektedir. Gelişmiş ülkelerde emisyonu düşürmenin maliyeti hem daha yüksek hem de enerji verimliliği zaten yüksek olduğu için emisyon azaltma potansiyeli de çok düşüktür. Örneğin, Japonya'da bir ton karbon emisyonu azaltmanın maliyetinin 500 dolar olduğu tespit edilmiştir. Fakat buna karşın emisyon kredilerinin değeri bunun çok altındadır. Emisyon ile ilgili düzenlemeler dünyanın herhangi bir yerinde yapılan emisyon azaltımını ülke içindeki ile bir tutmaktadır. Bu nedenle gelişmekte olan ülkeler, yenilenebilir enerji yatırımları için firmaları cezabetmektedir. Bu ülkelerden de hem rüzgâr hem de güneş enerjisinde büyük bir potansiyele sahip olan Türkiye, temiz enerji yatırımlarına uyguladığı vergi indirimleri ve elektrik satın alma garantisi ile öne çıkmaktadır.

Rüzgâr enerjisinin, sürdürülebilir bir dünyada yenilenebilir enerji kaynağı olarak önemli bir yeri olduğu görülmektedir. Rüzgâr enerjisinin diğer yenilenebilir enerji türleri gibi ilk maliyeti diğer kaynaklar ile karşılaştırıldığında yüksek olmasına karşın kullanım maliyetleri oldukça düşüktür. Ayrıca çevresel açıdan en temiz enerji üretim teknolojilerinden birisidir. Fakat rüzgâr hızına bağlı olarak değişen üretim potansiyeli, yatırım açısından bazı riskler doğurmaktadır. Bu da enerji üretim potansiyelinin doğru değerlendirilerek etkili bir performans maliyet analizinin yapılması ile ancak aşılabılır.

Bu çalışmada belirlenen bölgelerdeki rüzgâr hızlarına bağlı olarak rüzgâr üretim potansiyelinin tahminlemesi yapılarak buna göre ekonomik analiz yapılmaktadır. Paranın zaman değerini de içeren NPV yaklaşımı kullanılarak yapılan ekonomik analiz hem doğru rüzgâr türbinin belirlenmesinde hem de geri ödeme süresinin doğru tespit edilmesinde analitik bir destek olmaktadır.

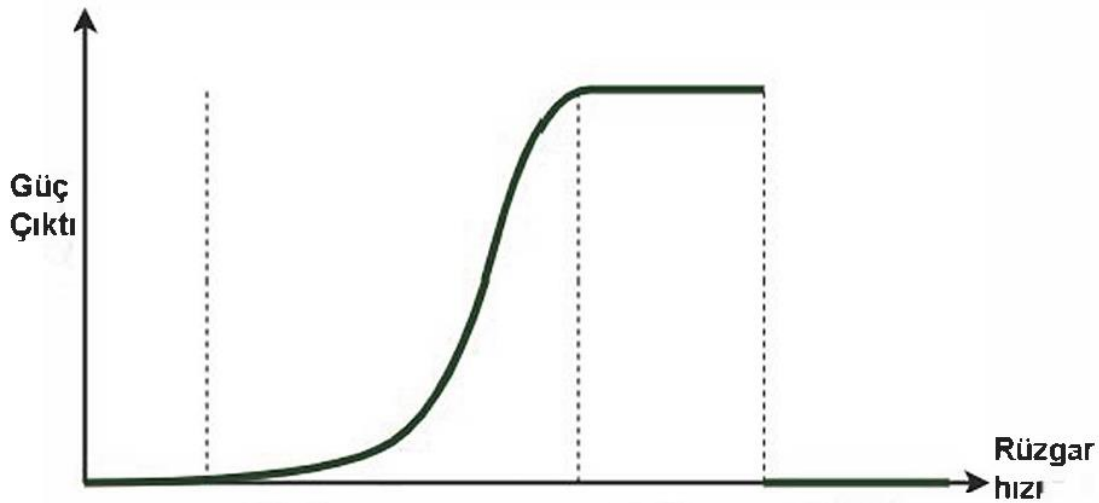
6.1. Rüzgâr Enerjisi Hesaplamaları

Rüzgâr türbinleri, rüzgâr enerjisindeki kinetik enerjiyi rotor kanatlarını hareket ettirerek mekanik enerjiye ve ardından elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Bölüm 3.2’de rüzgâr enerjisinden elektrik üretim hesaplamaları detaylı bir şekilde sunulmuştur. Kısaca rüzgâr gücünden üretililecek enerji miktarı Denklem (6.1)’deki gibidir.

$$P_t = c_p \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (6.1)$$

Buradaki denklemde, c_p güç katsayısı olarak tanımlanmaktadır. Betz Kanunu’na göre hiçbir rüzgâr türbini, rüzgârdaki kinetik enerjinin %59’undan fazlasını elektrik enerjisine dönüştüremez. Bu nedenle c_p değeri maksimum 0,59 olarak belirlenmiş olmasına karşın gerçekte bu değer 0,30 ile 0,45 arasındadır.

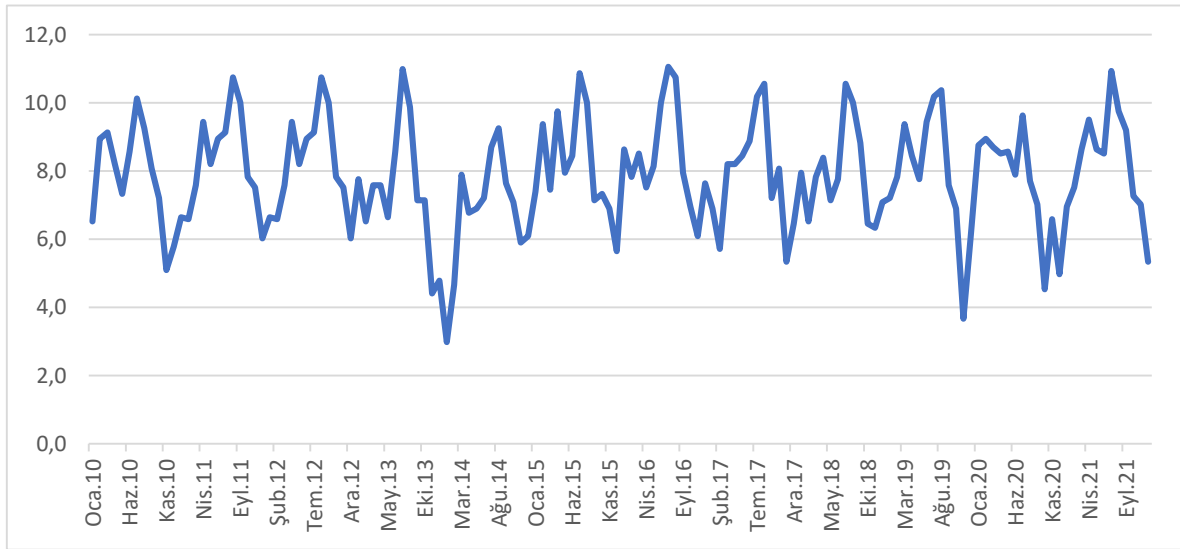
Tipik bir rüzgâr türbinindeki güç eğrisi dört bölümden oluşmaktadır. Türbinin üretime başladığı ilk rüzgâr hızına devreye alınma hızı denir ve rüzgârın bu hızın altında olması durumunda herhangi bir elektrik üretimi gerçekleşmez. Elektrik üretimi belirli bir seviyeye kadar rüzgâr hızıyla birlikte artış gösterir. Anma hızı olarak tanımlanan en yüksek hıza ulaştıktan sonra elektrik üretimi rüzgâr hızındaki artıştan bağımsız olarak sabit kalmaya başlar. Son olarak rüzgâr hızı devre kesme hızının üzerine çıkarsa türbin üretimi durdurur. Güç eğrisinde bahsedilen bu dört bölüm Şekil 6.1’de sunulmuştur.



Şekil 6.1. Rüzgâr Türbini Güç Eğrisi

6.2. Veri ve Matematiksel Yaklaşım

Belirlenen problem doğrultusunda yapılacak olan analiz iki kısımdan oluşmaktadır. Öncelikle elde edilen rüzgâr hızı verilerine bağlı olarak seçili bölgenin rüzgâr hızı ile ilgili gelecek tahmini yapılmaktadır. Türkiye’deki rüzgâr enerjisinden elektrik üretim potansiyeli en yüksek illerden birisi olan Konya şehri bu analiz için seçilmiştir. Hâlihazırda kurulu 263 MW rüzgâr üretim kapasitesine sahip olan Konya bu alanda Türkiye’deki ilk 15 şehir içerisinde yer almaktadır. Ayrıca deniz üstü kurulu rüzgâr türbinlerinde daha yüksek rüzgâr hızlarına erişilebilirken toprak üzerinde kurulu türbinlerde rüzgâr hızları daha düşük olmaktadır. Bu da aslında kara türbinleri için yapılan bir ekonomik analizin deniz üstü türbinleri için çok daha ekonomik olacağı beklentisini doğurmaktadır. Konya ili havaalanı bölgesi için 2010-2021 yılları arasındaki aylık rüzgâr hızı verileri Şekil 6.2 de gösterilmektedir (Weather Online, 2022).



Şekil 6.2. 2010-2021 Konya İli Aylık Ortalama Rüzgâr Hızı Ölçümleri (mil/saat)

Şekil 6.2’deki grafik incelendiği zaman rüzgâr hızında aylara göre değişen bir mevsimsellik olduğu açıkça görülmektedir. Eldeki rüzgâr hızı verilerin ortalaması alındığında bunun 7,9 mil/s olduğu görülmektedir. Ayrıca 2010-2021 yılları arasında rüzgâr hızı en düşük 2,9 mil/s iken en yüksek 11,1 mil/s olarak gerçekleşmiştir.

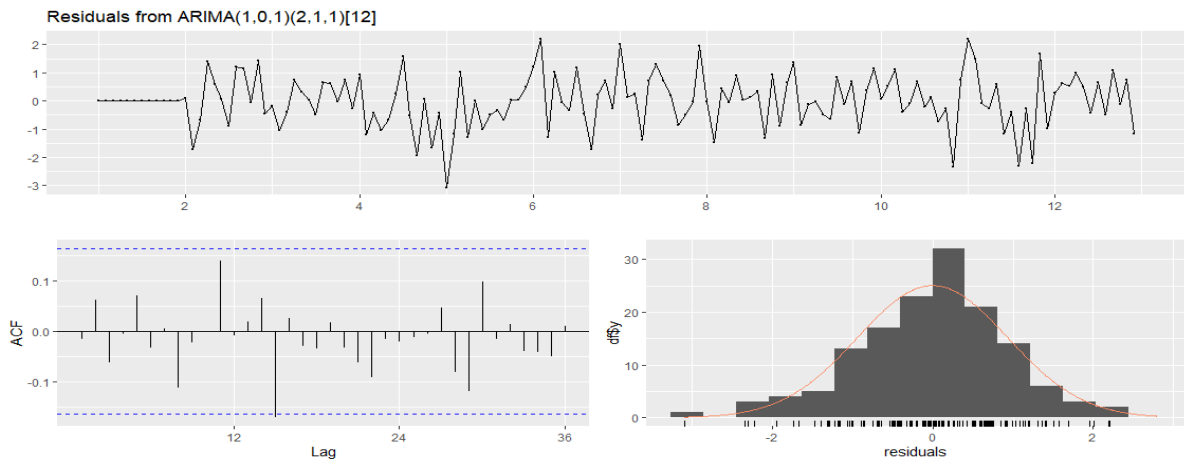
6.2.1. Tahmin Yöntemi

Şekil 6.2’de sunulan geçmiş rüzgâr hızı verilerine bakıldığında farklı yılların aynı aylarında belirgin şekilde bir mevsimsellik gözlemlenmektedir. Beklendiği gibi rüzgâr hızı çeşitli aylarda yüksek iken bazı aylarda daha düşük seyirde ilerlemektedir. Bu nedenle mevsimselliği göz önüne bulunduran zaman serileri ile tahminleme yapılmıştır.

ARIMA (Auto Regressive Integrated Moving Average), belirli bir zaman serisini kendi geçmiş değerlerine, yani kendi gecikmelerine ve gecikmeli tahmin hatalarına dayanarak açıklayan bir modeldir. Bu model, gelecekteki değerleri tahmin etmek için kullanılabilir. Klasik bir ARIMA model $ARIMA(p,d,q)$ ile gösterilir. ARIMA modelleri tahmin edicilerin korelasyonsuz ve birbirinden bağımsız olduğu durumlar en iyi şekilde çalışmaktadır. Bu nedenle serinin durağan olması için fark alınması yani değerlerin bir önceki değerden çıkarılarak farkların gösterilmesi gerekmektedir. d değeri ise seriyi durağan hale getirmek için gereken minimum fark alma sayısıdır. Seri eğer durağan ise $d=0$ olur. Ama bazı karmaşık durumlarda bir den fazla kez fark alınması da gerekebilir. p , “Otomatik Gerileme (AR)” teriminin derecesidir. Tahmin edici olarak kullanılacak y gecikmelerinin sayısını ifade eder. q ise “Hareketli Ortalama (MA)” teriminin derecesidir. ARIMA modeline girmesi gereken gecikmeli tahmin hatalarının sayısını ifade etmektedir.

Mevsimselliği göz önünde bulunduran zaman serisi modellerinde ise normal modele ek olarak bir de mevsimsellik kısmı bulunmaktadır. Bu mevsimsel kısımda, tüm ARIMA parametrelerindeki faktörler gecikmenin yani bir sezondaki dönem sayısının katları boyunca çalışır. Mevsimsel bir ARIMA modeli, $ARIMA(p,d,q)(P,D,Q)_s$ olarak gösterilir. Buradaki (p,d,q) normal ARIMA modeliyle aynı iken P , mevsimsel otoregresyon modelinin derecesini, D , mevsimsel fark alma sayısını, Q , mevsimsel hareketli ortalama modelinin derecesini ve s ise bir sezondaki dönem sayısını ifade etmektedir.

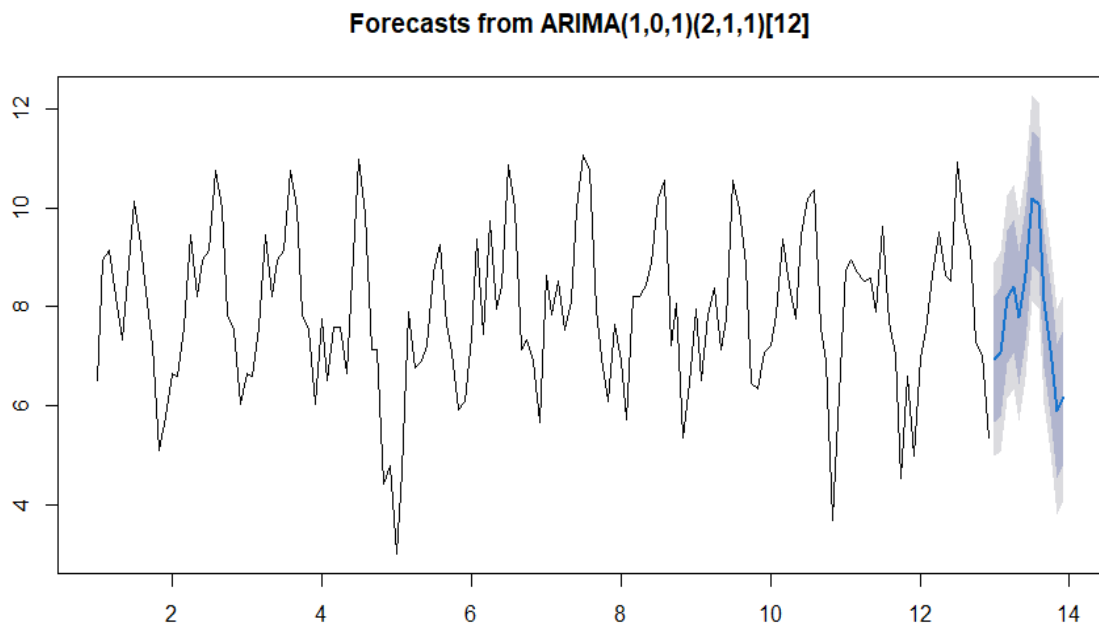
Aylık periyotta mevsimseli hareketlerin yaşandığını gördüğümüz geçmiş dönem rüzgâr hızı verilerine mevsimsel ARIMA modelini R programı üzerinde uygulanmıştır. Eldeki veriye en yakın sonuçlara ulaşan $ARIMA(1,0,1)(2,1,1)_{12}$ modeli olduğu görülmüş ve bu modele ait grafik ve sonuçlar Şekil 6.3’te sunulmuştur.



Şekil 6.3. $ARIMA(1,0,1)(2,1,1)_{12}$ Kalıntı Değerleri

Şekil 6.3'teki ACF grafiğine baktığımızda neredeyse tüm değerlerin anlamlılık sınırları içerisinde olduğunu ve sadece bir tanesinde küçük bir aşma olduğunu görebiliriz. Bu nedenle elde ettiğimiz kalıntıların beyaz gürültü serisine oldukça yakın olduğu söylenebilir. ARIMA modelleri için kurulan varsayımın böylelikle sağlandığı görülmektedir.

Elde edilen model ile gelecek yıl için rüzgâr hızı verileri tahmini yapıldığında ise sonuç Şekil 6.4'teki gibi gerçekleşmektedir. Görüldüğü gibi geçmiş dönem hareketlere benzer şekilde bir gelecek tahmini yapılmıştır. Tahmin ortalamasının üzerinde koyu ve daha açık koyu alan ise %80 ve %95 güven aralıklarına göre tahminin oynayabileceği seviyeleri göstermektedir.



Şekil 6.4. ARIMA(1,0,1)(2,1,1)[12] Gelecek Tahmini

Şekil 6.4'te görüldüğü gibi rüzgâr hızı ortalamaları aynı yılın aynı dönemlerinde belirli bir artış ve azalış trendinde görülmektedir. Bu analiz, hangi aylarda rüzgâr hızında artış hangi aylarda düşüş olduğunu göstermektedir. Fakat rüzgâr türbinin için yapılacak analizde sadece ortalama rüzgâr hızı verilerini kullanmak yanı sıra neden olabilmektedir. Çünkü rüzgâr hızı ortalaması, türbinin devreye alma hızından düşük olsa bile bu hiçbir enerji üretimi olmayacak anlamına gelmemektedir. Bu nedenle ekonomik modelde aylık rüzgâr hızı güçleri ve bunların sıklıkları kullanılmıştır.

6.2.2. Ekonomik Model

Rüzgâr türbini yatırımının ekonomik analizinin yapılabilmesi için paranın zaman değerini de göz önünde bulunduran bir yöntem tercih edilmelidir. Çünkü bu tür yatırımlar on yıllar sürecek kapasitede olduğu için zaman içinde paranın azalan değerinin de dikkate alınması gerekmektedir. Rüzgâr türbini yatırımı için ekonomik maliyetler temel olarak ilk yatırım maliyetleri, dönemlik sabit maliyetler ve değişken maliyetleri olarak sınıflandırılabilir. İlk yatırım maliyetleri genel olarak, türbinin ve gerekli tesislerin kurulumu için gereken tek seferlik teçhizat, işçilik ve diğer maliyetlerdir. Toplam içerisindeki en büyük pay genellikle bu maliyete aittir. Dönemlik sabit maliyetler ise bakım-onarım maliyetleridir. Bunlar, düzenli olarak belirli periyotlarda yapılan bakım çalışmaları için ödenmektedir. Bunun üretilen elektrik ile herhangi bir ilişkisi yoktur ve sabit şekilde gerçekleşir. Değişken giderler ise türbinin çalışmasına bağlı olarak değişen maliyetlerdir. Üretilen enerji miktarı ile doğru orantılı olarak bu maliyetler artış göstermektedir. Yenilenebilir enerji türlerinin bir avantajı da herhangi bir yakıt tüketimi olmadığı için bu değişken maliyetlerin, diğer enerji türlerindeki göre daha düşük olmasıdır (Kumar ve Madlener, 2016).

Ekonomik modelde, maliyetler kesikli olarak ödenirken, üretilen elektrikten elde edilen gelir sürekli olarak elde edilmektedir. Bu nedenle toplam gelirin Net Bugünkü Değeri, Denklem (6.2)'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$NPV_{\text{rüzgâr}} = s_e \sum_{t=1}^N P_t(v_t) \left(\frac{1+i}{1+r} \right)^t - C_0 - C_{\text{sabit}} \left(\frac{1+i}{r-i} \right) \left[1 - \left(\frac{1+i}{1+r} \right)^N \right] + C_s \left(\frac{1+i}{1+r} \right)^N \quad (6.2)$$

Denklem (6.2)'deki ilk terim, türbinin kullanım süresi boyunca üretilecek elektriğin satılması ile elde edilen geliri göstermektedir. Kurulan ekonomik modelde, bu elektriğin üretildiği anda satıldığı ve ücretlendirildiği varsayılmıştır. Bu kısımdaki s_e , elektriğin birim satış fiyatını, N , türbinin kullanım ömrünü, $P_t(v)$, t döneminde rüzgâr hızına bağlı olarak üretilen elektrik miktarını ve i ise faiz oranını ifade etmektedir. C_0 rüzgâr türbinin kurulması için bugün harcanan maliyetleri kapsamaktadır. Bu maliyet kurulacak rüzgâr türbinin çeşidine göre değişmektedir. C_{sabit} ise yıllık düzenli olarak gerçekleşen bakım onarım maliyetleridir ve bunların bugünkü değeri için Denklem (6.2)'deki şekilde faiz formülüyle çarpılmıştır. Kullanım ömrü sonunda eldeki türbinin C_s fiyatına satılabileceği öngörülmektedir. Bu miktar genellikle kurulum maliyetindeki malzeme maliyetinin %10'u olarak kabul edilmektedir (Vardar ve Çetin, 2009). i enflasyon oranı (%10) ve r faiz oranı (%12) olarak seçilmiştir. $NPV_{\text{rüzgâr}}$ değerinin pozitif olması durumunda elde edilecek gelirlerin giderlerden fazla olduğu, aksi

durumda ise bu yatırımın zarar ettiği söylenebilir. Projenin geri ödeme süresi ise yapılan yatırımların karşılandığı ilk döneme denir. Bu döneme ulaşıldığında projeye yapılan yatırımın alındığı ve kâr elde edilmeye başlandığı anlamına gelir.

6.3. Numerik Sonuçlar ve Tartışma

Seçilen bölgenin rüzgâr hızı verileri ve bunun gelecek tahminine bağlı olarak ekonomik analiz yapılmaktadır. Şekil 6.4'te sunulan gelecek tahmini ekonomik model için kullanılacaktır. Rüzgâr hızı verilerinin aylık olarak değişmesi nedeniyle satılan elektrik üretiminde aylık faiz oranı kullanılırken diğerleri yıllık bazda ödendiği için yıllık faiz oranı kullanılacaktır. Türbine dair teknik bilgiler Tablo 6.1'de ve bu türbinlerin ekonomik maliyetleri Tablo 6.2'de sunulmuştur.

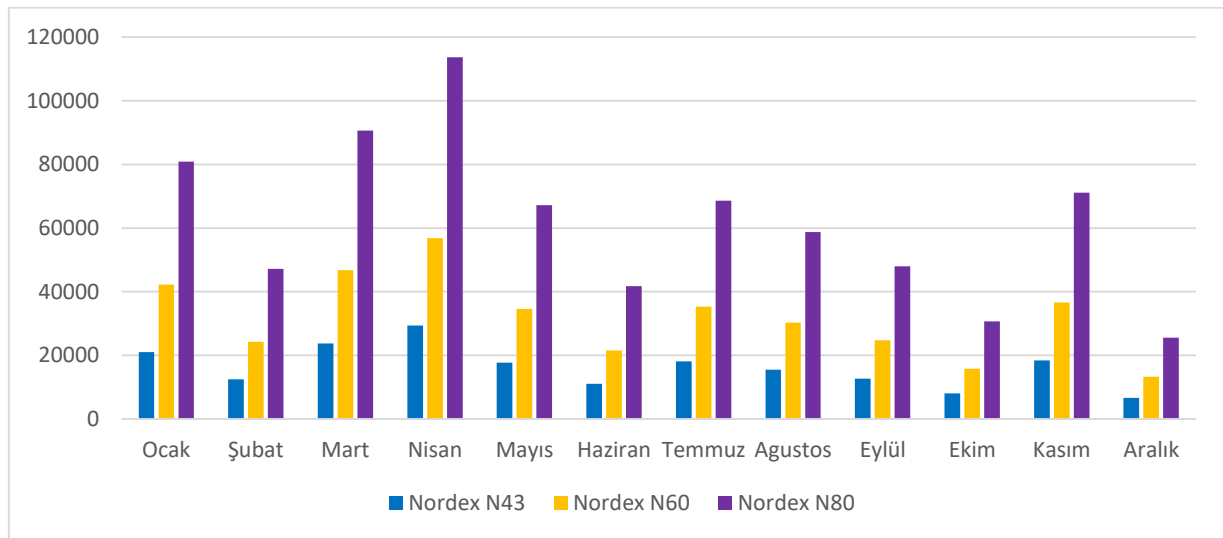
Tablo 6.1. Rüzgâr Türbinlerinin Teknik Özellikleri (Vardar ve Çetin, 2009)

Rüzgâr Türbini	Başlama ve Bitirme Hızı (m/s)	Anma Hızı (m/s)	Üretim Gücü (kW)	Rotor Çapı (m)	Yaşam Ömrü (yıl)
Nordex N43/600	3-25	13,5	600	43	20
Nordex N60/1300	3-25	15	1300	60	20
Nordex N80/2500	3-25	14	2500	80	20

Tablo 6.2. Rüzgâr Türbinlerinin Ekonomik Verileri (Vardar ve Çetin, 2009)

Rüzgâr Türbini	Yatırım Maliyeti (Euro)	Kule Maliyeti (Euro)	Kontrol Ünite Maliyeti (Euro)	Toplam İnşaat Maliyeti (Euro)	Yıllık Bakım Onarım Maliyeti (Euro)
Nordex N43/600	308.600	7.800	5.400	14.000	23.400
Nordex N60/1300	603.000	10.940	5.400	18.400	23.400
Nordex N80/2500	1,137,000	15.600	5.400	25.000	23.400

2021 yılı verileri baz alındığında ele alınan iki farklı türbinin Konya bölgesi için elektrik üretim potansiyeli Şekil 6.5'teki gibi gerçekleşmektedir.



Şekil 6.5. Türbinlerin Aylara Göre Elektrik Üretim Potansiyeli (kWh)

Rüzgâr hızı verileri genelde düşük aralıkta olduğu için üretim potansiyeli de biraz düşük kalmaktadır. Ekonomik olarak analiz edildiğinde ise 20 yıllık toplam maliyet, üretim miktarları ve satış gelirlerinin bugünkü değeri göz önüne alındığında ekonomik sonuçlar Tablo 6.3'teki gibi elde edilmiştir.

Tablo 6.3. Ekonomik Analiz Sonuçları

Rüzgâr Türbini	Toplam Üretim (kWh)	Elde edilen Gelir (Euro)	Maliyet (Euro)	Birim Maliyet (Euro/kWh)	Geri Ödeme Süresi (yıl)
Nordex N43/600	3,90 milyon	78.695	701.803	0,180	-
Nordex N60/1300	7,65 milyon	154.408	982.685	0,129	-
Nordex N80/2500	14,88 milyon	300.430	1.489.918	0,010	76,97

Elektrik satış fiyatının 0,052 euro/kWh olarak belirlendiği bir ortamda eldeki rüzgâr hızı verilerine dayalı ekonomik analiz her üç türbin için de yapılmıştır. Buna göre 20 yılda Nordex N43 türbini 3,9 milyon kWh elektrik üretimi yaparken Nordex N60 7,65 milyon kWh ve Nordex N80 ise 14,88 milyon kWh üretim gerçekleştirmektedir. Birim başına maliyetlere bakıldığında ise 20 yıllık süreç için seçilen rüzgâr türbinlerinin birim maliyetleri sırasıyla 0,180, 0,129 ve 0,010 olarak hesaplanmıştır. Projenin yatırım yapılabilirliğinin önemli bir ölçüsü de yatırılan kaynağın ne kadar sürede geri alınabileceğidir. Nordex N43 ve N60 modelleri için yıllık elektrik üretiminden elde edilen gelir bakım onarım maliyetinin altında olduğu için bu rüzgâr türbinleri kendilerini amorti etmemektedir. Nordex N80 modeli ise yüksek ilk yatırım maliyeti olmasına karşın daha fazla elektrik üretim potansiyeline sahip olduğu ve bakım onarım maliyetleri üç türbin için de aynı olduğu için diğerlerine oranla daha avantajlı görülmektedir. Fakat yine de bu türbinin geri ödeme süresi 76,97 yıl gibi oldukça yüksek çıkmaktadır. Bu da mevcut veriler altında özellikleri verilen üç rüzgâr türbininin de aslında yatırıma çok uygun olmadığını göstermektedir. Burada ekonomik analizi değiştirebilecek bir diğer konu da yenilenebilir enerji yatırımları sayesinde CO₂ emisyonu düşürüldüğü için elde edilecek olan karbon sertifikalarıdır. Bu sertifikalar, karbon kotası uygulanan ülkelerdeki pek çok işletme için oldukça kıymetli olup 2022 itibarıyla 1 tonluk karbon sertifikası değeri 5 ile 10 dolar arasında değişmektedir. Tabi ki burada yine de önemli olan rüzgâr hızı verileri daha iyi olan bir bölgenin ele alınmasıdır. Çünkü daha çok elektrik üretimi daha çok karbon azaltımı sağlayacağı için üretim en çok olduğu yerlerde daha büyük bir ekonomik potansiyel olacaktır. Tabi ki bu durum Konya ilinin rüzgâr potansiyeli düşük anlamına gelmemektedir. Esasında bu analizde kullanılan veriler havaalanı ölçümlerini baz aldığı için rüzgâr potansiyeli daha düşük çıkabilmektedir. Çünkü havaalanları genellikle uçakların rüzgârdan daha az etkilenmesi için daha az rüzgârlı bölgeleri kurulmaktadır. Alternatif olarak çalışmada sunulan analizin daha yüksek ve rüzgârlı bölgelerde tekrarlanması yatırımın yapılabilirliği konusunda farklı sonuçlar doğurabilecektir.

7. SONUÇLAR

Artan teknolojik gelişmeler ve enerjide dışa bağımlılık ve bunun neden olduğu enerji krizleri enerjinin önemini giderek arttırmaktadır. Özellikle son dönemde gelişen Rusya-Ukrayna krizi Avrupa'nın enerjide bağımlılığının ne denli önemli siyasi sonuçları olabileceğini göstermektedir. Bu siyasi etkilerin yanında fosil kaynaklı enerji yakıtlarının neden olduğu çevresel problemler de küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi büyük sorunlara neden olmaktadır. Bu da yenilenebilir enerji kaynaklarını etkin bir alternatif olarak öne çıkarmaktadır.

Bu tezde, yenilenebilir enerji kaynaklarına bir genel bakış sunulmuştur. Sonrasında Türkiye'nin elektrik tüketiminin tahmin edilmesi ve buna bağlı olarak kaynağa bağlı elektrik üretim politikası değerlendirilmiştir. Çevresel ve ekonomik amaçlar ayrı ayrı önceliklendirildiğinde farklı üretim politikaları ortaya çıkmaktadır. Örneğin ekonomi önceliklendirildiğinde daha ucuz kaynaklardan elektrik üretimi seçilmekte ve buna bağlı olarak da maliyetler %23,34 azalırken karbon salınımı %9,44 artmaktadır. Çevreyi esas alan yaklaşımda ise karbon salınımı %9,21 azalırken maliyetler %9,48 artmaktadır. Ayrıca tahmin edilen elektrik tüketimindeki artışın hangi kaynaklardan karşılanmasının nasıl sonuçlar doğuracağı irdelenmiştir. Ele alınan bir diğer konu da rüzgâr türbini ve rüzgârdan elektrik üretimi üzerinedir. Burada seçili bir bölge üzerinden rüzgâr hızı verileri analiz edilerek gelecek dönemle ilgili tahminler yapılmıştır. Ayrıca aylık üretim verileri üzerinden farklı rüzgâr türbinlerinin ekonomik analizi yapılmış ve yatırım yapılabilirliği değerlendirilmiştir.

Sürdürülebilirlik açısından hem ekonomik hem çevresel faktörlerin birlikte değerlendirilmesi ve ayrıca enerjide dışa bağımlılığın etkileri düşünüldüğünde yenilenebilir enerji kaynaklarına büyük önem verilmesi gerektiği görülmektedir. Son yıllardaki yenilenebilir kurulu güçteki büyük artış da bu önemi göstermektedir. Bu tür kaynaklar mevsimsel şartlara bağlı olduğu için çeşitli kısıtlara sahiptir. Eldeki kısıtlı imkânlarla, bu alana yapılan yatırımlardan maksimum verimin elde edilebilmesi için doğru bir planlama ve analiz yapılması gerekmektedir. Bu durum da mevcut çalışmaların daha detaylı bir şekilde enerjinin tüm boyutlarını ele alacak şekilde geliştirilmesini mecburi hale getirmektedir. Gelecek dönem çalışmaların da enerji planlamadaki tüm boyutları ele alan daha detaylı analizlere ve hibrit santrallere yoğunlaşacağını öngörmekteyiz.

KAYNAKLAR

- Acaravcı, A., and Öztürk, I. (2010). On The Relationship Between Energy Consumption, CO₂ Emissions And Economic Growth İn Europe. *Energy*, 35(12), 5412-5420.
- Akdi, Y., Gölveren, E., and Okkaoğlu, Y. (2020). Daily Electrical Energy Consumption: Periodicity, Harmonic Regression Method And Forecasting. *Energy*, 191, 116524.
- Alam, M. J., Begum, I. A., Buysse, J., and Van Huylenbroeck, G. (2012). Energy Consumption, Carbon Emissions And Economic Growth Nexus İn Bangladesh: Cointegration And Dynamic Causality Analysis. *Energy policy*, 45, 217-225.
- Alper, F. Ö. (2018). Yenilenebilir Enerji ve Ekonomik Büyüme Arasındaki İlişki: 1990-2017 Türkiye Örneği. *Çankırı Karatekin Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 8(2), 223-242.
- Anonim 2022a Web: “Güneş Enerjisi Üretim Şeması” <https://www.elektrikde.com/gunes-panellerinde-on-grid-ve-off-grid-baglanti-sistemleri> , [Ziyaret tarihi: 1 Ocak 2022].
- Anonim 2022b Web: “Rüzgâr Türbinleri” <https://www.enerjimgunesten.com/dikey-eksenli-ruzgar-turbini.html> , [Ziyaret tarihi: 5 Ocak 2022].
- Anonim 2022c Web: “Hidroelektrik Santrali” <https://www.sabah.com.tr/egitim/hidroelektrik-santrali-nedir-3860984> , [Ziyaret tarihi: 15 Ocak 2022].
- Anonim 2022d Web: “Hidroelektrik Santrali Enerji Üretim Şeması” <https://maabir.com/hidroelektrik-santral-nedir> , [Ziyaret tarihi: 15 Ocak 2022].
- Anonim 2022e Web: “Jeotermal Enerji Santrali” <https://www.milliyet.com.tr/egitim/haritalar/turkiye-jeotermal-santralleri-haritasi-jeotermal-santral-nedir-turkiyede-nerelerde-var-6310036> , [Ziyaret tarihi: 25 Ocak 2022].
- Anonim 2022f Web: “Biyokütle Enerji Döngüsü” <https://medyabar.com/haber/5053357/sogutluye-57-milyonluk-yatirim-geliyor> , [Ziyaret tarihi: 5 Şubat 2022].

Anonim 2022f Web: “Dalga Enerjisi Santrali” <https://www.topraklama.com.tr/ruzgar-enerjisi/gelgit-enerjisi-avantajlari> , [Ziyaret tarihi: 10 Şubat 2022].

Anonim 2022h Web: “Düşey Eksenli Rüzgâr Türbinleri” <https://www.adb.org/sites/default/files/publication/696291/adbi-wp1250.pdf> , [Ziyaret tarihi: 25 Şubat 2022].

Anonymous. (2020). “Renewables 2020 Global Status Report”, Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21), Web: https://www.globalwomennet.org/wp-content/uploads/2020/06/GSR2020_Full_Report_with_Endnotes.pdf , [Ziyaret tarihi: 15 Ocak 2022].

Arslan, S., Darıcı, M., ve Karahan, Ç. (2001). Türkiye’nin Jeotermal Enerji Potansiyeli. *Jeotermal Enerji Semineri*, 21-27.

Aslan, A. (2014). Causality Between Electricity Consumption And Economic Growth İn Turkey: An ARDL Bounds Testing Approach. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 9(1), 25-31.

Asumadu-Sarkodie, S., and Owusu, P. A. (2017). The Causal Nexus Between Energy Use, Carbon Dioxide Emissions, And Macroeconomic Variables İn Ghana. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 12(6), 533-546.

Aydın, F. (2010). Enerji Tüketimi ve Ekonomik Büyüme. *Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, (35), 317-340.

Azam, M., Khan, A. Q., Bakhtyar B., and Emirullah, C. (2015). The Causal Relationship Between Energy Consumption And Economic Growth İn The ASEAN-5 Countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 732-745.

Bai, G., Ding, Y., Yildirim, M. B., and Ding, Y. H. (2014). Short-Term Prediction Models For Wind Speed and Wind Power. *In The 2014 2nd International Conference on Systems and Informatics (ICSAI 2014)* (pp. 180-185). IEEE.

Batı, O. (2014). Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Sürdürülebilir Kalkınmaya Etkisi Konusunda Bir Alan Araştırması, *Trakya Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*. 16(2), 27-38.

- Bayar, Y., and Özel, H. A. (2014). Electricity Consumption And Economic Growth İn Emerging Economies. *Journal of Knowledge Management, Economics and Information Technology*, 4(2), 1-18.
- Bayraç, H. N., ve Çildir, M. (2017). AB Yenilenebilir Enerji Politikalarının Ekonomik Büyüme Üzerindeki Etkisi. *Uluslararası Yönetim İktisat ve İşletme Dergisi*, 13(13), 201-212.
- Bayramoğlu, T., Pabuçcu, H., ve Boz, F. Ç. (2017). Türkiye İçin Anfis Modeli İle Birincil Enerji Talep Tahmini. *Ege Akademik Bakış Dergisi*, 17(3), 431-445.
- Begum, R. A., Sohag, K., Abdullah, S. M. S., and Jaafar, M. (2015). CO₂ Emissions, Energy Consumption, Economic And Population Growth İn Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 594-601.
- Bianchi, F. D., De Battista, H., and Mantz, R. J. (2007). *Wind Turbine Control Systems: Principles, Modelling And Gain Scheduling Design* (Vol. 19). London: Springer.
- Bianco, V., Manca, O., and Nardini, S. (2013). Linear Regression Models To Forecast Electricity Consumption İn Italy. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 8(1), 86-93.
- Blanco, M. I. (2009). The Economics Of Wind Energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6-7), 1372-1382.
- Bouzgou, H., and Benoudjit, N. (2011). Multiple Architecture System For Wind Speed Prediction. *Applied Energy*, 88(7), 2463-2471.
- Bozkurt, S., ve Tür, R. (2015). Dünyada ve Türkiye’de Hidroelektrik Enerji Gelişimi ve Genel Değerlendirme. *Ulusal Su Yapıları Sempozyumu*, 322-330. 4.
- Chontanawat, J. (2020). Dynamic Modelling of Causal Relationship between Energy Consumption, CO₂ Emission, and Economic Growth in SE Asian Countries. *Energies*, 13(24), 6664.
- Çandarlı, M., ve Unakıtan G. (2021). Yenilenebilir Enerji Kullanımının Sürdürülebilir Ekonomik Büyümeye Etkisi. *Balkan ve Yakın Doğu Sosyal Bilimler Dergisi*, 29-36.
- De Oliveira, E. M., and Oliveira, F. L. C. (2018). Forecasting Mid-Long Term Electric Energy Consumption Through Bagging ARIMA And Exponential Smoothing Methods. *Energy*, 144, 776-788.

Demirbas, A. (2009). *Biohydrogen* (pp. 163-219). Springer London.

Dikmen, E., ve Örgen, F. K. (2018). Ağlasun Bölgesi İçin Rüzgâr Hızı Tahmini ve En Uygun Türbin Tespiti. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(2), 871-879.

Dinçer, F., Rüstemli, S., Yılmaz, Ş., ve Çıngı, A. (2017). Kilis İli İçin Farklı Yüksekliklerdeki Rüzgâr Potansiyelinin Belirlenmesi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6(1), 12-20.

Dinçer, H., ve Karakuş H. (2020). Yenilenebilir Enerjinin Sürdürülebilir Ekonomik Kalkınma Üzerindeki Etkisi: Brics ve Mıntı Ülkeleri Üzerine Karşılaştırmalı Bir Analiz. *Esam Ekonomik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 1(1), 100-123.

Durak, M., ve Özer, S. (2008). Rüzgâr Enerjisi Teori ve Uygulama. *Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği*.

Effiom, S. O., Nwankwojike, B. N., and Abam, F. I. (2016). Economic Cost Evaluation On The Viability Of Offshore Wind Turbine Farms İn Nigeria. *Energy Reports*, 2, 48-53.

Elibüyük, U., ve Üçgül, İ. (2014). Rüzgâr Türbinleri, Çeşitleri ve Rüzgâr Enerjisi Depolama Yöntemleri. *SDÜ Yekarum e-Dergi*, 2(3).

Elum, Z. A., and Momodu, A. S. (2017). Climate Change Mitigation And Renewable Energy For Sustainable Development İn Nigeria: A Discourse Approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 72-80.

Erdoğan, S. (2016). Arz Güvenliği Bakışı İle Türkiye’de Enerji Politikaları. *Ankara: Orion*.

Erkul, H. (2012). Jeotermal Enerjinin Ekonomik Katkıları ve Çevresel Etkileri: Denizli-Kızıldere Jeotermal Örneği. *Yönetim Bilimleri Dergisi*, 10(19), 115-133.

Es, H. A., Kalender, F. Y., ve Hamzaçebi, C. (2014). Yapay Sinir Ağları ile Türkiye Net Enerji Talep Tahmini. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(3).

Ghalekhondabi, I., Ardjmand, E., Weckman, G. R., and Young, W. A. (2017). An Overview Of Energy Demand Forecasting Methods Published İn 2005–2015. *Energy Systems*, 8(2), 411-447.

Ghanbari, A., Naghavi, A., Ghaderi, S. F., and Sabaghian, M. (2009). Artificial Neural Networks And Regression Approaches Comparison For Forecasting Iran's Annual

- Electricity Load. In *2009 International Conference On Power Engineering, Energy And Electrical Drives* (pp. 675-679). IEEE.
- Görgel, P., ve Kavlak, E. (2020). Uzun Kısa Süreli Hafıza ve Evrişimsel Sinir Ağları ile Rüzgâr Enerjisi Üretim Tahmini. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 11(1), 69-80.
- Gul, M., Qazi, S. A., and Qureshi, W. A. (2011). Incorporating Economic And Demographic Variables for Forecasting Electricity Consumption In Pakistan. In *2011 2nd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS)* (pp. 1-5). IEEE.
- Güney, T. (2019). Renewable Energy, Non-Renewable Energy And Sustainable Development. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 26(5), 389-397.
- Hau, E. (2013). Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics. *Springer Science & Business Media*.
- Hau, E., and Turbines, W. (2006). Fundamentals, Technologies, Application. *Economics, Springer-Verlag, Berlin*.
- Hong, Y. Y., Chang, H. L., and Chiu, C. S. (2010). Hour-Ahead Wind Power and Speed Forecasting Using Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation (SPSA) Algorithm and Neural Network With Fuzzy Inputs. *Energy*, 35(9), 3870-3876.
- Jain, P. K., Quamer, W., and Pamula, R. (2018). Electricity consumption forecasting using time series analysis. In *International Conference on Advances in Computing and Data Sciences* (pp. 327-335). Springer, Singapore.
- Kapluhan, E. (2014). Enerji Coğrafyası Açısından Bir İnceleme: Biyokütle Enerjisinin Dünyadaki ve Türkiye'deki Kullanım Durumu. *Marmara Coğrafya Dergisi*, (30), 97-125.
- Kapluhan, E. (2014). Enerji Coğrafyası Açısından Bir İnceleme: Dalga Enerjisinin Dünya'daki ve Türkiye'deki Kullanım Durumu. *Uluslararası Avrasya Sosyal Bilimler Dergisi*, Sayı 17.
- Karagöl, E.T., ve Kavaz, İ. (2017). Dünyada ve Türkiye'de Yenilenebilir Enerji. *Analiz. Seta*, 197, 18-28.
- Karaosmanoğlu, F. (2006). Biyoyakıt Teknolojileri ve İTÜ Araştırmaları. *İTÜ Enerji Çalıştayı ve Sergisi*, İstanbul, 110-125.

- Katsigiannis, Y. A., and Stavrakakis, G. S. (2014). Estimation Of Wind Energy Production İn Various Sites İn Australia For Different Wind Turbine Classes: A Comparative Technical And Economic Assessment. *Renewable Energy*, 67, 230-236.
- Koç, E., ve Kaya, K. (2015). Enerji Kaynakları – Yenilenebilir Enerji Durumu. *Mühendis ve Makine*, 56(668), 36-47.
- Kumar, S., and Madlener, R. (2016). CO₂ Emission Reduction Potential Assessment Using Renewable Energy İn India. *Energy*, 97, 273-282.
- Kusiak, A., and Zhang, Z. (2010). Short-Horizon Prediction Of Wind Power: A Data-Driven Approach. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 25(4), 1112-1122.
- Lee, J., Wang, W., Harrou, F., and Sun, Y. (2020). Wind Power Prediction Using Ensemble Learning-Based Models. *IEEE Access*, 8, 61517-61527.
- Li, P., Guan, X., and Wu, J. (2015). Aggregated Wind Power Generation Probabilistic Forecasting Based On Particle Filter. *Energy Conversion and Management*, 96, 579-587.
- Liu, H., Shi, J., and Erdem, E. (2010). Prediction Of Wind Speed Time Series Using Modified Taylor Kriging Method. *Energy*, 35(12), 4870-4879.
- Lu, W. C. (2016). Electricity Consumption And Economic Growth: Evidence From 17 Taiwanese Industries. *Sustainability*, 9(1), 50.
- Mabel, M. C., and Fernandez, E. (2008). Analysis Of Wind Power Generation And Prediction Using ANN: A Case Study. *Renewable Energy*, 33(5), 986-992.
- Magazzino, C. (2015). Energy Consumption And GDP İn Italy: Cointegration And Causality Analysis. *Environment, Development and Sustainability*, 17(1), 137-153.
- Magazzino, C. (2016). The Relationship Between CO₂ Emissions, Energy Consumption And Economic Growth İn Italy. *International Journal of Sustainable Energy*, 35(9), 844-857.
- Magazzino, C. (2017). Renewable Energy Consumption-Economic Growth Nexus İn Italy. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 7(6), 119-127.
- Malik, A., and Al-Badi, A. H. (2009). Economics Of Wind Turbine As An Energy Fuel Saver—A Case Study For Remote Application İn Oman. *Energy*, 34(10), 1573-1578.

- Manwell, J. F., McGowan, J. G., and Rogers, A. L. (2010). *Wind Energy Explained: Theory, Design And Application*. John Wiley & Sons.
- Menyah, K., and Wolde-Rufael, Y. (2010). CO₂ Emissions, Nuclear Energy, Renewable Energy And Economic Growth In The US. *Energy policy*, 38(6), 2911-2915.
- Mohamed, Z., and Bodger, P. (2005). Forecasting Electricity Consumption In New Zealand Using Economic And Demographic Variables. *Energy*, 30(10), 1833-1843.
- Mohammadi, K., and Mostafaeipour, A. (2013). Economic Feasibility Of Developing Wind Turbines In Aligoodarz, Iran. *Energy Conversion and Management*, 76, 645-653.
- Naik, J., Satapathy, P., and Dash, P. K. (2018). Short-Term Wind Speed And Wind Power Prediction Using Hybrid Empirical Mode Decomposition And Kernel Ridge Regression. *Applied Soft Computing*, 70, 1167-1188.
- Nişancı, M. (2005). Türkiye’de Elektrik Enerjisi Talebi ve Elektrik Tüketimi ile Ekonomik Büyüme Arasındaki İlişki. *Sosyal Ekonomik Araştırmalar Dergisi*, 5(9), 107-121.
- Önal, E., ve Yarbay R. Z. (2011). Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kaynakları Potansiyeli ve Geleceği. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(18), 77-60.
- Örer, G., Gürsel. K.T., Özdamar, A., ve Özbalta, N. (2003). Dalga Enerjisi Tesislerine Genel Bakış. II. *Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, 126-140.
- Öymen, G., ve Ömeroğlu M. (2020). Yenilenebilir Enerjinin Sürdürülebilirlik Üzerindeki Rolü. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 19(39), 1069-1087.
- Özcan, E. V., Varlı, E., ve Eren, T. (2017). Hidroelektrik Santrallerde Vardiya Çizelgeleme Problemleri İçin Hedef Programlama Yaklaşımı. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 10.4(2017): 363-370.
- Özil, E., Şişbot, S., Özpınar, A., ve Olgun, B. (2013). Elektrik Enerjisi Teknolojileri ve Enerji Verimliliği Konvansiyonel Elektrik Santrallerinde Elektrik Üretimi. *İstanbul: TESAB*.
- Özşahin, Ş., Mucuk, M., ve Gerçekler, M. (2016). Yenilenebilir Enerji ve Ekonomik Büyüme Arasındaki İlişki: BRICS-T Ülkeleri Üzerine Panel ARDL Analizi. *Siyaset, Ekonomi ve Yönetim Araştırmaları Dergisi*, 4(4), 111-130.

- Öztürk, F. (2017). Energy Consumption–GDP Causality İn MENA Countries. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 12(3), 231-236.
- Öztürk, H. H. (2008). Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Kullanımı. *Teknik Yayın Evi*, Ankara.
- Panklib, K., Prakasvudhisarn, C., and Khummongkol, D. (2015). Electricity Consumption Forecasting İn Thailand Using An Artificial Neural Network And Multiple Linear Regression. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 10(4), 427-434.
- Pao, H. T., and Tsai, C. M. (2011). Modeling And Forecasting The CO₂ Emissions, Energy Consumption, And Economic Growth İn Brazil. *Energy*, 36(5), 2450-2458.
- Pao, H. T., Fu, H. C., and Tseng, C. L. (2012). Forecasting Of CO₂ Emissions, Energy Consumption And Economic Growth İn China Using An Improved Grey Model. *Energy*, 40(1), 400-409.
- Pao, H. T., Yu, H. C., and Yang, Y. H. (2011). Modeling The CO₂ Emissions, Energy Use, And Economic Growth İn Russia. *Energy*, 36(8), 5094-5100.
- Raza, S. A., Jawaid, S. T., and Siddiqui, M. H. (2016). Electricity Consumption And Economic Growth İn South Asia. *South Asia Economic Journal*, 17(2), 200-215.
- Riahy, G. H., and Abedi, M. (2008). Short Term Wind Speed Forecasting For Wind Turbine Applications Using Linear Prediction Method. *Renewable Energy*, 33(1), 35-41.
- Sevilgen, G., ve Kılıç, M. (2013). Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Sürdürülebilirlik Endeksi. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 18(1), 69-79.
- Seydioğulları, H. S. (2013). Sürdürülebilir Kalkınma İçin Yenilenebilir Enerji. *Planlama Dergisi*, 23(1), 19-25.
- Shabbir, N., AhmadiAhangar, R., Kütt, L., Iqbal, M. N., and Rosin, A. (2019). Forecasting Short Term Wind Energy Generation Using Machine Learning. In *2019 IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)* (pp. 1-4). IEEE.
- Suganthi, L., and Samuel, A. A. (2012). Energy models for demand forecasting—A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 16(2), 1223-1240.

- Şenol, Ü., ve Musayev, Z. (2017). Rüzgâr Enerjisinden Elektrik Üretiminin Yapay Sinir Ağları İle Tahmini. *Bilge Uluslararası Fen ve Teknoloji Araştırmaları Dergisi*, 1(1), 23-31.
- Tang, C. F., Tan, B. W., and Ozturk, I. (2016). Energy Consumption And Economic Growth İn Vietnam. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1506-1514.
- Tanrıöven, M. (2011). Rüzgâr ve Güneş Enerjili Sistemler Ders Notları, İstanbul.
- The World Bank (2022). Web: <https://data.worldbank.org> , [Ziyaret tarihi: 20 Mart 2022].
- TEİAŞ, (2020). Türkiye Elektrik Üretim-İletim 2020 Yılı İstatistikleri. *Türkiye Elektrik İletim A. Ş.*, Web: <https://www.teias.gov.tr> , [Ziyaret tarihi: 10 Mart 2022].
- Vardar, A., and Çetin, B. (2009). Economic Assessment Of The Possibility Of Using Different Types Of Wind Turbine İn Turkey. *Energy Sources, Part B*, 4(2), 190-198.
- Veziroğlu, N., ve Türe, E., (2006). 21.Yüzyılın Enerjisi: Hidrojen Enerji Sistemi. *Türkiye 10. Enerji Kongresi*, İstanbul.
- Weather Online, (2022). Web: <https://www.weatheronline.co.uk> , [Ziyaret tarihi: 10 Nisan 2022].
- Weitzel, T., and Glock, C. H. (2018). Energy Management For Stationary Electric Energy Storage Systems: A Systematic Literature Review. *European Journal of Operational Research*, 264(2), 582-606.
- Yeşil, M. A. (2015). TRA2 Bölgesindeki Yeşil Enerji Kaynakları Sektör Raporu. *T.C. Serhat Kalkınma Ajansı*, Kars.
- Yılmaz, M. (2012). Türkiye'nin Enerji Potansiyeli ve Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Açısından Önemi. *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, sayı 4 (2), s. 33-54.
- Zhang, C., Zhou, K., Yang, S., and Shao, Z. (2017). On Electricity Consumption And Economic Growth İn China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 353-368.
- Zhang, W., Wang, J., Wang, J., Zhao, Z., and Tian, M. (2013). Short-Term Wind Speed Forecasting Based On A Hybrid Model. *Applied Soft Computing*, 13(7), 3225-3233.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Süleyman ATILGAN
Uyruğu : T.C.

EĞİTİM

Derece	Adı, Bölümü	Bitirme Yılı
Lisans	: Batman Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği	2020
Yüksek Lisans :	Batman Üniversitesi, Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim Dalı	2022

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2015 – Halen	Batman Üniversitesi	Memur

UZMANLIK ALANLARI

- Enerji Sistemleri
- Yenilenebilir Enerji

YABANCI DİLLER

- İngilizce

YAYINLAR

- Atılğan, S., ve Yılmaz, A. (2021). Mardin İlinin Hayvansal Gübre Kaynaklı Biyogaz Potansiyelinin Belirlenmesi. *Engineer and the Machinery Magazine*, 62(704), 429-445.
- Atılğan S., ve Alım, M. (2022). Türkiye’de Yenilenebilir Enerjinin Mevcut Durumu ve Gelecek Tahmini. *International Korkut Ata Scientific Researches Conference*, 615-621.