

T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FOTOVOLTAİK PANEL TEMİZLİĞİNİN VERİM ÜZERİNE
ETKİSİ: BİNGÖL İLİ AŞAĞI KALEKÖY YARDIMCI GES
SANTRALİ ÖRNEĞİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SERHAT KÜÇÜKTÖRÜN

YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
Doç. Dr. Dursun ÖZTÜRK

BİNGÖL-2025

ÖNSÖZ

Bu tezin konusunu belirlemede, deneysel çalışmaların yönlendirilmesinde, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yardımlarını ve bilgi birikimini esirgemeyen, çalışmaların tamamlanabilmesi için gerekli desteği veren danışman hocam Doç. Dr. Dursun ÖZTÜRK'e çok teşekkür ederim. Tez çalışmasında kullanılan verileri sağlayan Kalehan Genç Enerji Üretim A.Ş. yönetimine katkılarından dolayı teşekkür ederim. Ayrıca mesai arkadaşlarım Mahmut YILMAZ ile Kader OZAN'a katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Bu günlere gelmemde emekleri olan anneme ve babama, tezin hazırlanması sırasında gösterdiği sabır, fedakârlık ve desteklerinden dolayı eşime teşekkür ederim.

Serhat KÜÇÜKTORUN

Bingöl 2025

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	iii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	iv
TABLolar LİSTESİ.....	v
ÖZET.....	vi
ABSTRACT.....	vii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	4
3. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI VE FV SİSTEMLER.....	10
3.1. Yenilenebilir Enerji Kaynakları.....	10
3.1.1. Güneş Enerjisi.....	10
3.1.2. Rüzgâr Enerjisi.....	12
3.1.3. Jeotermal Enerji.....	14
3.1.4. Hidrolik Enerji.....	15
3.1.5. Biyokütle Enerjisi.....	16
3.2. FV Sistemler.....	17
3.2.1. FV Sistemlerin Yapısı.....	18
3.2.2. FV Sistemlerin Verimliliği.....	22
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	24
4.1. Kullanılan Temizlik Robotunun Özellikleri.....	227
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	30
5.1. Mayıs Ayı Verileri.....	31
5.2. Haziran Ayı Verileri.....	33
5.3. Temmuz Ayı Verileri.....	35
5.4. Ekonomik Analiz.....	37
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	39
KAYNAKLAR.....	41

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

FV	: Fotovoltaik
GES	: Güneş Enerji Santrali
RES	: Rüzgâr Enerji Santrali
HES	: Hidroelektrik Santral
JES	: Jeotermal Enerji Santrali
I	: Akım
V	: Gerilim
P	: Güç
W	: Watt
KW	: Kilo Watt
MW	: Mega Watt
GW	: Giga Watt
m	: Metre
m ²	: Metrekare
GEPA	: Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası
h	: Saat
MPP	: Maksimum Güç Noktası
AC	: Alternatif Akım
DC	: Doğru Akım
REPA	: Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Atlası
°C	: Santigrat Derece
YEKA	: Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanları
YEK	: Yenilenebilir Enerji Kaynakları
MPTT	: Maksimum Güç Noktası Takibi

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1.	Türkiye güneş enerjisi potansiyeli haritası.....	11
Şekil 3.2.	Türkiye global radyasyon değerleri (kWh/m ² /gün).....	11
Şekil 3.3.	Türkiye güneşlenme süreleri (saat).....	12
Şekil 3.4.	Yıllık ortalama rüzgâr hızı dağılımı-100m.....	13
Şekil 3.5.	Türkiye'nin jeotermal kaynakları ve uygulama haritası.....	15
Şekil 3.6.	Biyokütle enerjisi çevrim.....	17
Şekil 3.7.	FV hücrenin çalışma prensibi.....	18
Şekil 3.8.	FV panelin I-V ve P-V karakteristikleri.....	20
Şekil 3.9.	Şebekeye bağlı bir FV sistemin genel yapısı.....	20
Şekil 3.10.	Şebekeden bağımsız bir FV sistemin genel yapısı.....	21
Şekil 4.1.	Aşağı Kaleköy Yardımcı Kaynak Güneş Enerji Santrali.....	25
Şekil 4.2.	Bingöl ili güneş radyasyon değerleri.....	25
Şekil 4.3.	Bingöl ili global radyasyon değerleri (kWh/m ² /gün.....	26
Şekil 4.4.	Bingöl ili güneşlenme süresi (saat)	26
Şekil 4.5.	Kullanılan temizlik robotuna ait etiket görseli.....	27
Şekil 4.6.	Temizlik işlemine ait görüntü.....	28
Şekil 4.7.	Temizlik işleminde kullanılan panellerin etiketine ait görüntü.....	29
Şekil 5.1.	Ölçüm işlemine ait görüntü.....	30
Şekil 5.2.	Mayıs ayı güç eğrileri.....	32
Şekil 5.3.	Haziran ayı güç eğrileri.....	34
Şekil 5.4.	Temmuz ayı güç eğrileri.....	36

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 5.1.	Mayıs ayı ölçüm değerleri.....	31
Tablo 5.2.	Haziran ayı ölçüm değerleri.....	33
Tablo 5.3.	Temmuz ayı ölçüm değerleri.....	35
Tablo 5.4.	Mayıs, Haziran ve Temmuz ayı güç değişim değerleri.....	36
Tablo 5.5.	Aşağı Kaleköy Yardımcı Kaynak Güneş Enerji Santralının Mayıs, Haziran ve Temmuz ayı güç üretim değerleri.....	37
Tablo 5.6.	Toplam enerji kaybının dolar ve TL bazında ekonomik değeri.....	37
Tablo 5.7.	Temizlik işleminin maliyet tablosu.....	38

FOTOVOLTAİK PANEL TEMİZLİĞİNİN VERİM ÜZERİNE ETKİSİ: BİNGÖL İLİ AŞAĞI KALEKÖY YARDIMCI GES SANTRALİ ÖRNEĞİ

ÖZET

Günümüzde artan nüfus, sanayileşme ve teknolojik gelişmeler enerji talebinde sürekli bir artışa neden olmaktadır. Bu artan talebi karşılamak için uzun yıllar boyunca fosil yakıtlar (petrol, kömür ve doğal gaz) temel enerji kaynağı olarak kullanılmıştır. Ancak fosil yakıtların sınırlı rezervlere sahip olmasının yanı sıra çevresel kirliliğe ve iklim değişikliğine neden olan sera gazı emisyonlarını artırması gibi önemli dezavantajları bulunmaktadır. Bu nedenle, sürdürülebilir bir gelecek için temiz, yenilenebilir ve çevre dostu enerji kaynaklarına yönelim kaçınılmaz hale gelmiştir. Güneş, rüzgâr, hidroelektrik ve biyokütle gibi yenilenebilir enerji kaynakları (YEK) hem çevresel etkilerin azaltılması hem de enerji arz güvenliğinin sağlanması açısından stratejik bir öneme sahiptir. Bu bağlamda, yenilenebilir enerji yatırımlarının artırılması ve fosil kaynaklara olan bağımlılığın azaltılması hem ekonomik kalkınma hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik bir gereklilik olarak değerlendirilmektedir.

YEK'ler arasında önemli bir yere sahip olan güneş enerjisinin toplam enerji üretimindeki payı dünya genelinde artış göstermektedir. Güneş enerjisi sistemleri, fotovoltaik (FV) paneller ve termal enerji kolektörlerinden oluşmaktadır. FV paneller güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürürken termal enerji kolektörleri ise güneş ışığını kullanarak sıcak su veya buhar üretmektedir. Bu sistemler, çevre dostu bir enerji kaynağı olmalarının yanı sıra sürdürülebilir enerji arzı açısından da büyük önem taşımaktadır.

FV panellerin verimliliği; güneş ışıınımı miktarı, sıcaklık, panelin yönü ve eğim açısı, panel tipi, yüzey kirliliği, gölgeleme, inverter kalitesi, kablo bağlantıları, zamanla oluşan aşınma ve düzenli bakım gibi birçok faktöre bağlı olarak değişmektedir. Panel yüzeylerinin kirlenmesi durumunda emilen radyasyon miktarı azalmakta ve bu da çıkış gücünde düşüşe neden olmaktadır. Bu çalışmanın amacı, FV panel yüzeylerinin temizlenmesiyle sağlanan üretim artışının ölçümlerle belirlenmesidir. Bingöl ilinde yer alan Aşağı Kaleköy Yardımcı Güneş Enerji Santrali'ndeki 199.440 panelin temizliği için, günlük 1–3 MW temizlik performansına sahip iki robot kullanılmaktadır. Yan yana bulunan ve aynı özellikteki 27'şer panelden oluşan iki dizi belirlenmiş olup, 3 aylık periyotta bu dizilerden biri her hafta temizlik robotu ile temizlenmiş, diğeri ise hiç temizlenmemiştir. Bu iki diziden de sürekli olarak akım ve gerilim ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, çıkış gücünde %7,59'a varan artışların sağlanabildiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Yenilenebilir enerji kaynakları, güneş enerjisi, FV panellerde kirlenme, FV panellerin verimliliği.

THE EFFECT OF CLEANING PHOTOVOLTAIC PANEL SURFACES USING A CLEANING ROBOT ON PANEL EFFICIENCY: AN EXPERIMENTAL STUDY

ABSTRACT

The increasing population, industrialization, and technological advancements in today's world have led to a continuous rise in energy demand. To meet this growing demand, fossil fuels (petroleum, coal, and natural gas) have been used as the primary energy sources for many years. However, in addition to having limited reserves, fossil fuels pose significant disadvantages, such as contributing to environmental pollution and increasing greenhouse gas emissions, which in turn drive climate change. Therefore, transitioning to clean, renewable, and environmentally friendly energy sources has become inevitable for a sustainable future. Renewable energy sources (RES), such as solar, wind, hydroelectric, and biomass, are of strategic importance both in terms of reducing environmental impacts and ensuring energy supply security. In this context, increasing investments in renewable energy and reducing dependency on fossil fuels are considered critical requirements for both economic development and environmental sustainability.

Among RES, solar energy holds a significant position, and its share in total energy production is increasing worldwide. Solar energy systems consist of photovoltaic (PV) panels and thermal energy collectors. While PV panels convert sunlight directly into electrical energy, thermal energy collectors use sunlight to produce hot water or steam. These systems are not only environmentally friendly but also crucial for a sustainable energy supply.

The efficiency of PV panels depends on various factors such as solar irradiance, temperature, panel orientation and tilt angle, panel type, surface cleanliness, shading, inverter quality, cable connections, wear over time, and regular maintenance. When panel surfaces become dirty, the amount of absorbed radiation decreases, resulting in a reduction in output power. The aim of this study is to determine the increase in energy production achieved through the cleaning of PV panel surfaces using direct measurements. For the cleaning of 199,440 panels at the Aşağı Kaleköy Auxiliary Solar Power Plant located in Bingöl Province, two robots with a daily cleaning performance of 1–3 MW are used. Two arrays, each consisting of 27 adjacent panels with identical characteristics, were selected. Over a three-month period, one array was cleaned weekly using a cleaning robot, while the other was left uncleaned. Continuous current and voltage measurements were taken from both arrays. The results showed that output power increased by up to 7.59% as a result of panel surface cleaning.

Keywords: Renewable energy sources, solar energy, soiling of PV panels, efficiency of PV panels.

1. GİRİŞ

Günümüzde artan enerji talebi; başta nüfus artışı, sanayi ve teknoloji alanındaki gelişmeler ile yaşam standartlarının teknolojik ilerlemelerle birlikte yükselmesi gibi etkenlerden kaynaklanmaktadır. Artan enerji ihtiyacının karşılanması, ülkeler için öncelikli hedeflerden biri hâline gelmiştir. Bu amaç doğrultusunda çeşitli enerji kaynakları kullanılmaktadır. Ancak fosil yakıtların kullanımı, atmosferdeki karbondioksit (CO_2) seviyesini artırarak başta sera etkisi olmak üzere çevresel sorunlara yol açmaktadır [1,2]. Fosil yakıtların sınırlı doğası dikkate alındığında, alternatif enerji kaynaklarına duyulan ihtiyaç daha belirgin hâle gelmektedir. Bu nedenle yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi artmakta ve bu kaynakların verimliliğinin en üst düzeye çıkarılmasına yönelik yoğun çalışmalar yapılmaktadır [3-5].

Dünyadaki artışa paralel olarak ülkemizde de YEK'lerin üretim kaynakları içerisinde payı sürekli yükselmektedir. Türkiye Elektrik İletim A.Ş'nin verilerine göre 2025 yılı Nisan ayında Türkiye'nin kurulu gücü 118,354 MW'a, toplam yenilenebilir kurulu gücü ise 71.269 MW'a ulaşmıştır. Böylelikle yenilenebilir enerjinin toplam güç içerisindeki payı %60,21'e ulaşmıştır [6].

Güneş enerjisi, temiz, çevre dostu ve sürekli bir birincil enerji kaynağı olarak öne çıkmaktadır. Güneş yüzeyindeki radyasyon şiddeti yaklaşık olarak $6,33 \times 10^7 \text{ W/m}^2$ 'dir [7]. Dünya atmosferinin dışında, güneş radyasyon şiddeti genellikle sabit kabul edilmekte olup yaklaşık 1370 W/m^2 'dir [8]. Dünya yüzeyinde ise bu şiddet 0 ile 1100 W/m^2 arasında değişiklik göstermektedir [9]. Gelen radyasyonun yaklaşık %30'u atmosfer tarafından yansıtılmaktadır. Kalan %70'lik kısmı yeryüzüne ulaşmakta ve burada ısı enerjisine dönüşerek tekrar yayılmaktadır [10]. Güneşten gelen toplam radyasyonun yalnızca %3 ile %6'lık bir kısmı fotosentezde kullanılmaktadır [11,12]. Dünya yüzeyine bir yılda ulaşan güneş enerjisi miktarı, $1,22 \times 10^{14}$ ton eşdeğer kömür ya da $0,814 \times 10^{14}$ ton eşdeğer petrole karşılık gelmektedir [13].

Teknolojik gelişmeler, güneş enerjisi sistemlerinin maliyetlerinde azalmaya yol açmış ve bu sistemlerin yaygınlaşmasını kolaylaştırmıştır. Başlangıçta elektriğe erişimin mümkün olmadığı kırsal yerleşim alanlarının enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla kullanılan bu sistemler, günümüzde tarım ve sanayi başta olmak üzere farklı alanlarda da yaygın olarak kullanılmaktadır.

FV sistemlerden elde edilecek enerji miktarını belirleyen en önemli faktörlerden biri panel verimliliğidir. Panel verimliliğini etkileyen çeşitli etkenler bulunmaktadır. Bunlardan bazıları panelin hücre tipi ve malzeme özellikleri gibi içsel özellikler iken; sıcaklık, radyasyon seviyesi, gölgeleme, ışığın geliş açısı ve kirlilik gibi dışsal faktörler de önemli rol oynamaktadır.

FV panellerin çıkış akımı ve gerilimini etkileyen temel faktörlerden biri ışınım şiddetidir. Panel çıkış gerilimi, güneş ışınımıyla logaritmik olarak değişirken, çıkış akımı ise ışınım şiddetiyle doğru orantılıdır. Panel verimliliğini etkileyen bir diğer önemli unsur ise güneş ışığının geliş açısıdır. Günün ilk ve son saatlerinde ve bulutlu havalarda, gelen ışığın açısına bağlı olarak panel verimliliği düşmektedir.

FV paneller üzerine düşen ışığın bir kısmı yüzeyden yansımakta ve bu durum yansıma kayıplarına neden olmaktadır. Panel yüzeylerinin daha az yansıma yapan malzemelerden üretilmesi, panel performansını artıracaktır. Ortalama ışınım koşullarında panellere gelen ışığın %90'ından fazlası emilmekte, geri kalan kısmı ise yansımaktadır. Ancak emilen ışığın yalnızca yaklaşık %15-20'lik bir kısmı elektrik enerjisine dönüştürülebilmektedir.

FV sistemlerde verimliliği etkileyen bir diğer önemli unsur gölgelemedir. Bulutlanma doğal bir gölgeleme kaynağıdır. Bunun dışında ağaçlar, binalar ve elektrik direkleri de paneller üzerinde gölge oluşturmaktadır. Ayrıca FV sistem tasarımındaki yerleşim nedeniyle paneller birbirini gölgeleyebilir. Gölgeleme durumu, FV sistem tasarımında mutlaka dikkate alınmalıdır. Panel yüzeyinin %20'sinin gölgelenmesi, %30'a kadar verim kaybına neden olabilmektedir. Bazı çalışmalarda gölgeleme kaynaklı kayıpların %50'ye kadar çıkabildiği belirtilmiştir [14].

Kum, toz, yosun, su ve kir gibi partiküllerin FV panel yüzeyine birikmesi, gelen ışığın hücrelere ulaşmasını engellemekte ve saçılmaya neden olmaktadır. Kirlenmeye bağlı kayıplar, coğrafi özellikler ve iklim koşullarına göre farklılık göstermektedir. Panel yüzeyindeki kirlenme, yaklaşık %10 verim kaybına neden olmaktadır. Ancak yağış miktarının düşük ve toz oranının yüksek olduğu bölgelerde bu kayıp %30-45 seviyelerine kadar çıkabilmektedir. Panellerin eğim açısı genellikle coğrafi enleme göre ayarlanmakta olup, pratikte yaygın olarak 15-20 derece arasında tercih edilmektedir [15]. Panel kirlenmesine bağlı verimlilik kaybı ve sistem ömründe azalmayı önlemek veya en aza indirmek amacıyla pek çok araştırmacı çeşitli çalışmalar yürütmüştür [16-18].

Bu çalışmada, FV sistemlerde kirlenmenin enerji üretimine olan etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda 2024 yılı Mayıs-Temmuz ayları boyunca Bingöl ilinde yer alan Aşağı Kaleköy Barajı ve Hidroelektrik Santrali bünyesinde yer alan 80 MW kurulu güce sahip Aşağı Kaleköy Yardımcı Kaynak Güneş Enerji Santralinde bulunan her biri aynı özellikteki 27 panelden oluşan 2 FV dizinin akım ve gerilim değerleri kaydedilmiştir. Bu dizilerden biri her hafta düzenli olarak temizlenmiş, diğer dizi ise ölçümler boyunca hiç temizlenmemiştir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak Bingöl İli koşullarında panel temizliğinin sistemin çıkış gücü üzerindeki etkisi ortaya konulmuştur.

Bu çalışmada hazırlanan tez altı bölümden oluşmaktadır. Giriş bölümünde; enerji kavramı ele alınarak YEK'lerden biri olan güneş enerjisinin verimini etkileyen faktörler hakkında bilgiler sunulmuştur. Bölüm 2'de panel kirliliğinin etkileri ve çözüm önerilerine ilişkin literatür özeti sunulmuştur. Bölüm 3'te YEK'lerden olan güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, jeotermal enerji ve hidrolik enerji hakkında bilgiler verilmiştir. Ayrıca FV sistemlerin yapısı ve verimliliği ele alınmıştır. Bölüm 4'te temizlik işleminde kullanılan robota ait teknik bilgiler ile takip edilen ölçüm yöntemi sunulmuştur. Bölüm 5'te elde edilen sonuçlar tablolar halinde verilirken, 6. Bölüm olan Sonuç ve Öneriler bölümünde ise elde edilen sonuçlar yorumlanarak gelecekte yapılabilecek çalışmalar için öneriler sunulmuştur.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Hammoud ve arkadaşları, robot kullanılarak gerçekleştirilen ıslak temizliğin etkinliğini araştırdıkları çalışmalarında elde ettikleri bulguları sunmuşlardır. Bu çalışma, Lübnan'ın kıyı bölgesinde yer alan Zahrani'deki 1 MW'lık güneş enerjisi santralinin bir bölümünde gerçekleştirilmiştir. Bu santral için özel olarak tasarlanan ve test edilen robot ile paneller 15 Haziran-30 Eylül 2018 tarihleri arasında temizlenmiştir. Elde edilen güç değerleri, 2017 yılının aynı döneminde temizlik yapılmadan elde edilen güç değerleriyle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, temizlik işleminin elektrik üretiminde ortalama %32,27 oranında bir artış sağladığını ortaya koymaktadır [19].

Fali Ju ve Xiangzhao Fu, tozun fotovoltaik performans üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla üç farklı analiz gerçekleştirmiştir: güneş ışığının iletimi, sıcaklık artışının etkisi ve ışık saçılımı nedeniyle oluşan radyasyon kaybı. Deneylerinde farklı düzeylerde kirlenme tespit etmiş ve bu durumlardan iki tanesi için fotovoltaik kirlenme katsayısını hesaplamışlardır. Ayrıca, yağış miktarı, toz yoğunluğu ve kirlenme katsayısını dikkate alarak bir temizlik programı önerisinde bulunmuşlardır [20].

Parrott ve arkadaşları ise Suudi Arabistan'da silikon ve kauçuk fırçalar kullanarak güneş panellerinin otomatik, robotik kuru temizliğini gerçekleştirmiştir. Bu çalışmanın sonucunda, FV sisteminin performansının günlük yaklaşık %0,25 oranında arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, test edilen robotik sistemin panellere kayda değer bir zarar vermediği de tespit edilmiştir [21].

Mousavi ve arkadaşları, FV panel yüzeylerini temizlemek amacıyla MFv01 adı verilen ve iki fırça takımına sahip vakumlu bir robot tasarlamış, üretmiş ve test etmiştir. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda, MFv01'in Antonelli ve Ecoppia T4 robotlarına kıyasla daha yüksek temizlik kalitesine sahip olduğu ortaya konulmuştur. Ayrıca, temizlik hızı bakımından da MFv01'in bu iki robota göre daha üstün olduğu belirlenmiştir [22].

Reinhart Appels ve arkadaşları, Belçika’da yaptıkları çalışmada fotovoltaik modüller üzerindeki toz kirliliğinin etkisini incelemişlerdir. Güç çıkışı üzerindeki etkilerini belirlemek için çeşitli ölçümler yapmış ve yüzeydeki tozun özelliklerini taramalı elektron mikroskobu ile analiz etmişlerdir. Ortadoğu’ya kıyasla daha düşük seviyede toz birikimi tespit edilmiş, ancak 35 °C sıcaklık ve düzenli yağış koşullarında dahi güç çıkışında %3 ila %4 arasında azalma gözlemlenmiştir. Ayrıca, yağmurun büyük toz parçacıklarını temizlemede etkili olduğu, ancak küçük parçacıklar üzerinde sınırlı etkisinin olduğu sonucuna varılmıştır [23].

Syed ve arkadaşları ise yaptıkları çalışmada, iklim koşulları ve çevresel kirliliğin FV modül performansı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Yapılan araştırmalar, toz birikiminin FV modüllerinin ışık geçirgenliğini azaltarak performans üzerinde önemli bir etki yarattığını göstermiştir. Çalışmada, çevresel etkileri ve kirliliği azaltmaya yönelik geçmişten günümüze geliştirilen yöntemler özetlenmiştir. Özellikle kurak bölgelerde, elektrostatik temizlik yöntemi ile mikro/nano ölçekli yüzey fonksiyonlandırma yönteminin birleştirilmesinin, toz birikiminin olumsuz etkilerini azaltma potansiyeline sahip olduğu ortaya konulmuştur [24].

Kayri ve arkadaşları tarafından 2021 yılında Batman ilinde gerçekleştirilen bir diğer çalışmada ise, tozlanmanın panel verimliliği üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu çalışmada, yüzeyi temiz olan bir FV panel ile yüzeyinde 5 gün, 1 ay ve 6 ay boyunca toz birikmiş panellerin enerji üretim değerleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen veriler doğrultusunda, temiz panel ile 5 günlük toz birikimine maruz kalan panel arasında %5,26’lık bir fark tespit edilmiştir. 1 ay boyunca toz birikimine maruz kalan panel ile temiz panel arasındaki fark %28,49 olurken, bu oran 6 ay boyunca temizlenmemiş panel için %78,38’e kadar yükselmiştir [25].

Ghazi ve arkadaşlarının çalışmasında, kirli FV panellerin yüzeylerinin temizlenmesinde kullanılan çeşitli yenilikçi yöntemler incelenmiş ve temizlik mekanizmasının farklı iklim koşulları göz önünde bulundurularak bütüncül bir yaklaşımla ele alınması gerektiği vurgulanmıştır. Dünya genelindeki toz dağılımı desenleri değerlendirilmiş; Orta Doğu ve Kuzey Afrika bölgelerinin toz birikimi açısından en kötü bölgeler olduğu belirlenmiştir. Çalışmada ayrıca, farklı iklim

bölgeleri ve özelliklerine uygun temizlik sistemleri için çeşitli öneriler ve yönergeler de sunulmuştur. Çalışma özellikle FV sistem kurulumu yapanlar açısından önemli bir kaynak niteliğindedir [26].

Dahlioui ve arkadaşları ise FV modüllerin temizlenmesi için ekolojik bir çözüm sunmayı amaçlayan bir çalışma gerçekleştirmiştir. Araştırma, Fas'ın kuzeybatısında yer alan Rabat şehrinde yapılmıştır. Cam yüzeylerde meydana gelen çığ suyu birikiminin FV modüllerin temizliği üzerindeki etkisini incelemek amacıyla sistematik kirlenme oranı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler, gerçek dış ortam koşullarına maruz kalan cam yüzeyler üzerinde yapılmıştır. Kirlenme oranı, camdan geçen ve alınan radyasyon ölçülerek belirlenmiştir. Güneşin doğuşuna yakın saatlerde, camın yatay pozisyonundan 30° eğim açısına getirilmesi çığ damlacıklarının akışını kolaylaştırmıştır. Ardından temizlik etkinliği incelenmiştir. Sabit cam ile eğimi değiştirilebilen cam arasında çığ suyu akışı ve kirlenme kaynaklı kayıplar karşılaştırılmıştır. Sabit cam için kirlilik kaynaklı ortalama enerji kaybı %9,3 olarak belirlenirken, açısı değiştirilen camlarda bu oran yalnızca %3,3 olarak ölçülmüştür. Başka bir deyişle, doğal çığ suyu ile yapılan temizlik sayesinde sabit cama göre enerji kaybı yaklaşık üç kat azaltılmıştır [27].

Fardila ve arkadaşları, tozun FV panel verimliliği üzerindeki etkilerini ve panelde toz birikimini kontrol eden faktörleri gözden geçirmiştir. Toz, değiştirilemeyen çevresel bir faktör olup fiziksel hasara, gelen güneş ışıının azalmasına ve sıcaklık artışı nedeniyle panel verimliliğinde düşüşe neden olabilmektedir. Yapılan ölçümlere göre, FV panel üzerinde 20 g/m^2 toz birikmesi durumunda kısa devre akımı %15-21, açık devre gerilimi %2-6 oranında azalmakta ve verimlilik %15-35 arasında düşmektedir [28].

R. R. Cordero ve arkadaşları Atacama Çölü'nde gerçekleştirdikleri çalışmada, farklı eğimlerdeki güneş panellerinde kirliliğin etkisini incelemiştir. Beş şehirde yürütülen çalışmada, bazı paneller temiz tutulurken diğerleri 12 ay boyunca doğal şekilde kirlenmeye bırakılmıştır. Sonuçlar, özellikle kuzey kıyı bölgelerinde %39'a varan enerji kaybı olduğunu göstermiştir. Daha yüksek rakımlı ve güneydeki bölgelerde ise

enerji kaybı daha düşük bulunmuştur. Genel olarak, Şili’de çevresel kirlilik nedeniyle yıllık ortalama %7 oranında enerji kaybı tespit edilmiştir [29].

Hafiz Muhammad Ali ve arkadaşları, Pakistan’ın Texila şehrinde yaptıkları çalışmada tozun FV modül performansı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Üç ay süreyle doğal koşullara maruz bırakılan mono ve polikristal modüller üzerinde yapılan ölçümler sonucunda, yüzeyde ortalama 0.9867 mg/cm^2 toz biriktiği belirlenmiştir. Toz birikiminin çıkış gücünde monokristal modüllerde %20, polikristal modüllerde %16 azalmaya yol açtığı, verim düşüşlerinin ise sırasıyla %3,55 ve %3,01 olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, monokristal modüllerin performans kaybının polikristallere göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir [30].

Karim Menoufia ve arkadaşları, Mısır’daki Beni-Süleyman Üniversitesi’nde Nil Nehri’nin doğusunu kapsayan bir vaka çalışması gerçekleştirmiştir. Çalışmada, açık alana yerleştirilen iki FV panelden biri üç ay boyunca doğal şekilde toz birikimine maruz bırakılmış, diğeri ise düzenli olarak temizlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, temizlenen panelle karşılaştırıldığında, tozlu panelin performansında belirgin bir düşüş olduğunu göstermiştir [31].

Juan Lopez-Garcia ve arkadaşları, Avrupa Solar Test Kurulumu tarafından 1981-1985 yıllarında kurulan ve 2014’te temizlenmeden sökülen 28 silikon bazlı FV modülünü incelemiştir. Düz ve dokulu cam yüzeye sahip bu modüller, subtropikal iklim koşullarında 30 yılı aşkın süre dış ortamda kalmıştır. Çalışmada, uzun süreli kirlenmenin performans üzerindeki etkileri ile manuel ve yüksek basınçlı suyla temizlik yöntemlerinin karşılaştırması yapılmıştır. Sonuçlar, elle yapılan temizliğin modüllerde daha etkili olduğunu ve P_{max} değerinde %3,5 ila %19,4, kısa devre akımında ise ortalama %6,7-%9,8 iyileşme sağlandığını göstermiştir [32].

Sulaiman ve arkadaşları, laboratuvar koşullarında sabit ışınlam altında yapay toz kullanarak gerçekleştirdikleri çalışmada, FV panellerin yüzeyinde biriken tozun panel verimliliği üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Araştırma bulguları, toz nedeniyle panel çıkış gücünde %18’e varan düşüşler yaşanabileceğini ortaya koymuştur. Ayrıca, ışınlam şiddeti arttıkça tozun olumsuz etkisinin bir miktar azaldığı gözlemlense de

performans kaybının hâlâ önemli seviyelerde olduğu belirlenmiştir. Bu doğrultuda, güneş panellerinin yüksek verimle çalışabilmesi için yüzey temizliklerinin düzenli olarak yapılmasının gerekliliği vurgulanmıştır [33].

F. Mejia, J. Kleissl ve J. L. Bosch, 84 kW kapasiteli ticari bir güneş enerji santralinde kirliliğin verim üzerindeki etkisini incelemiştir. İnceleme sonucunda kirlilik kaynaklı günlük kaybın %0,21 oranında gerçekleştiği tespit edilmiştir. Özellikle yaz aylarında 108 günlük kuraklık süresince verimin %7,2'den %5,6'ya düştüğü, ancak yağmur sonrası bu oranın %7,1'e yükseldiği gözlemlenmiştir [34].

Hossain ve arkadaşları, Bangladeş'in Dhaka kentinde 125 gün süren bir çalışmada tozun FV panel verimi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. İkişer adet monokristal ve polikristal panel kullanılarak yapılan ölçümlerde, panellerin zamanla kirlenmesi sonucu sıcaklıkların 40 °C'nin üzerine çıktığı ve bu durumda monokristal ve polikristal panel çiftlerinde verimlilik düşüşünün sırasıyla %27,17 ve %20 olarak gerçekleştiği belirtilmiştir [35].

Coşgun ve arkadaşları 2022 yılında yaptıkları çalışmada, farklı boyutlardaki toz partiküllerinin FV panel verimi üzerindeki etkilerini incelemiştir. Tozlar çeşitli çap aralıklarına ayrılarak (-75, +75/-105, +105/-250, +250/-450 mikron) deneysel olarak test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, partikül boyutunun artmasıyla birlikte panelin çıkış geriliminin daha fazla düştüğünü ortaya koymuştur [36].

Maity ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, FV panelleri üzerinde biriken tozun enerji üretim verimliliğini düşürdüğü belirtilmiş ve bu sorunu çözmek amacıyla bir Evrişimli Sinir Ağı (Convolutional Neural Network-CNN) tabanlı yöntem önerilmiştir. LeNet mimarisi kullanılarak geliştirilen model, tozlu panel görüntülerinden oluşan ve çeşitli toz türlerini içeren 30.000 görselden oluşan etiketli bir veri kümesi üzerinde eğitilmiştir. Bu veri kümesi, voltaj ve akım ölçümleriyle desteklenmiş ve veri artırma teknikleri uygulanarak zenginleştirilmiştir. Görsel verilerden toz birikimini tespit edebilen model, panel performans kaybını tahmin etmede etkili olmuş ve 10 dönemlik eğitim sonunda %80 doğruluk oranına ulaşmıştır [37].

Alnaser ve arkadaşları tarafından çöl koşullarında yürütülen dokuz aylık deneysel araştırmada, FV panellerin yüzeyinde biriken tozun verim üzerinde ciddi etkiler doğurduğu tespit edilmiştir. Çalışma kapsamında, toz birikiminin panel verimini en fazla %32 oranında azaltabildiği belirlenmiştir. Aylık ölçümler ise ortalama %26'lık bir verim kaybına işaret etmiştir [38].

Maghami ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, biri düzenli temizlenen, diğeri ise temizlenmeyen iki sabit panel üzerinden 1 Nisan-5 Aralık 2013 tarihleri arasında 30 dakikalık aralıklarla veriler toplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, yüzeyde biriken tozun güç ve enerji verimliliğinde kayba yol açtığını göstermiştir. Çalışma, nemli tropikal iklim koşullarında enerji kaybının değerlendirilmesine katkı sağlamaktadır [39].

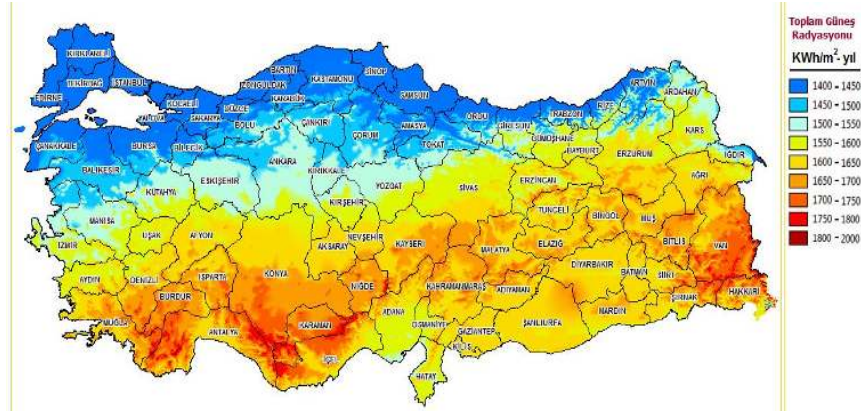
3. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI VE FV SİSTEMLER

3.1. Yenilenebilir Enerji Kaynakları

3.1.1. Güneş Enerjisi

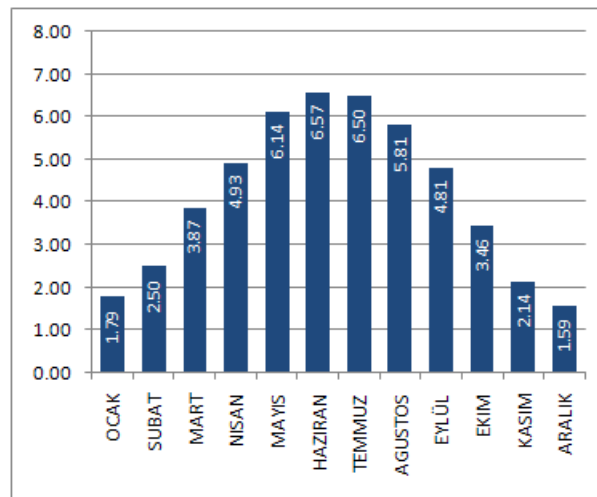
Günümüzde artan enerji ihtiyacı ve çevresel kaygılar, sürdürülebilir ve temiz enerji kaynaklarına yönelimi zorunlu hale getirmiştir. Bu bağlamda, YEK'lerden biri olan güneş enerjisi, çevreye duyarlı yapısı ve tükenmeyen doğasıyla öne çıkmaktadır. Güneş ışınlarının FV paneller aracılığıyla doğrudan elektriğe dönüştürülmesi, hem enerji üretiminde karbon salımını azaltmakta hem de uzun vadede ekonomik fayda sağlamaktadır. Ayrıca, güneş enerjisi sistemleri modüler yapıları sayesinde farklı ölçeklerde uygulanabilirlik sunarak bireysel, endüstriyel ve şebeke ölçekli kullanımlara olanak tanımaktadır. Bu özellikleri sayesinde güneş enerjisi, enerji arz güvenliğinin sağlanmasında ve iklim değişikliğiyle mücadelede stratejik bir rol üstlenmektedir. Türkiye, coğrafi konumu itibarıyla yüksek güneşlenme süresi ve güneş ışıınımı değerleriyle güneş enerjisi üretimi açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlasına (GEPA) göre, ülkenin yıllık toplam güneşlenme süresi 2.737 saat, yıllık toplam gelen güneş enerjisi ise 1.527 kWh/m² olarak belirlenmiştir. Bu potansiyel, özellikle Güneydoğu Anadolu, Akdeniz ve İç Anadolu bölgelerinde daha belirgindir [40]. 2025 yılı mart ayı itibarıyla Türkiye'nin güneş enerjisi kurulu gücü 21.833 MW'a ulaşmıştır. Bu değer toplam kurulu gücün %18,5'ine karşılık gelmektedir [41].

Şekil 3.1'de, Türkiye'deki şehirlerin güneş enerjisi potansiyeli farklı renklerle belirtilmiş olup, global radyasyon düzeyleri kentler arasında değişiklik göstermektedir. Ülkemiz genelinde yıllık ortalama global radyasyon miktarı 1400 ile 2000 kWh/m² arasında değişen bir aralıkta seyretmektedir.



Şekil 3.1. Türkiye güneş enerjisi potansiyeli haritası [40]

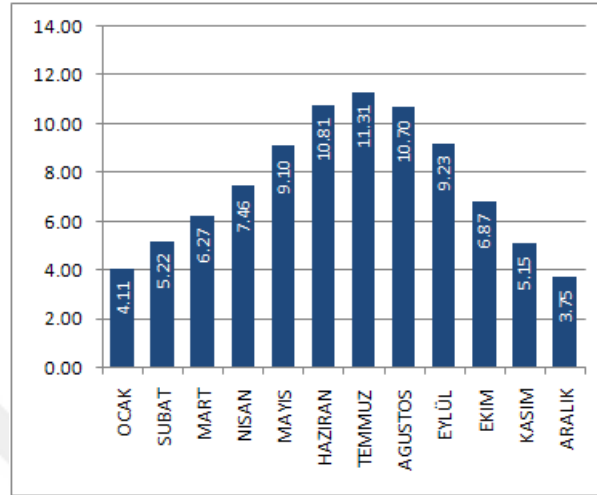
Şekil 3.2’de, Türkiye’de aylık ortalamalara göre günlük global radyasyon değerleri sunulmuştur. Haziran ayı, en yüksek radyasyon değerlerinin kaydedildiği dönem olarak öne çıkmaktadır. Ülke genelinde, aylık ortalamalar dikkate alındığında günlük global radyasyon şiddeti yaklaşık 4,18 kWh/m²-gün seviyesindedir. Bu veriye dayanarak yıllık ortalama toplam global radyasyon değeri yaklaşık 1.524,18 kWh/m²-yıl olarak hesaplanmaktadır [42].



Şekil 3.2. Türkiye global radyasyon değerleri (kWh/m² /gün) [40]

Şekil 3.3’te, Türkiye’nin aylık ortalama güneşlenme süreleri gösterilmektedir. Verilere göre, en uzun güneşlenme süreleri temmuz, haziran ve ağustos aylarında gözlemlenmektedir; bunları mayıs, eylül, nisan, ekim, mart, kasım, ocak ve aralık ayları takip etmektedir. Türkiye’de günlük ortalama güneşlenme süresi yaklaşık 7,49 saat olup,

yıllık toplam güneşlenme süresi 2.736,89 saat olarak hesaplanmaktadır. Bu değerler, Türkiye'nin güneş enerjisi açısından önemli bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır [42].



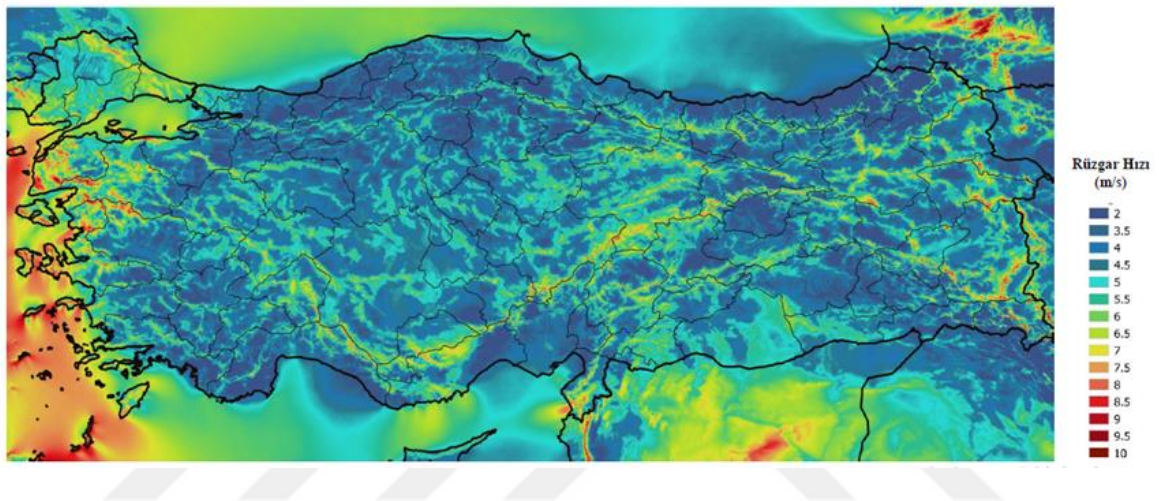
Şekil 3.3. Türkiye güneşlenme süreleri (saat) [40]

3.1.2. Rüzgâr Enerjisi

Rüzgâr enerjisi, sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda giderek daha fazla önem kazanan YEK'lerden biridir. Atmosferdeki hava hareketlerinin kinetik enerjisinin türbinler aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülmesi esasına dayanan bu teknoloji, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltırken çevresel etkileri en aza indirir. Rüzgâr enerjisinin çevreye zarar vermemesi, kaynak bakımından tükenmez oluşu ve işletme maliyetlerinin düşük olması gibi avantajları, onu enerji üretiminde önemli bir alternatif haline getirmiştir. Ayrıca, teknolojik gelişmeler sayesinde türbin verimliliklerinin artması ve yatırım maliyetlerinin düşmesi, rüzgâr enerjisinin küresel ölçekte daha yaygın kullanılmasına olanak tanımaktadır. Bu bağlamda, rüzgâr enerjisi hem ekonomik hem de ekolojik açıdan geleceğin enerji çözümleri arasında önemli bir yer edinmektedir. Türkiye, sahip olduğu coğrafi ve meteorolojik avantajları sayesinde rüzgâr enerjisi alanında önemli bir potansiyele sahiptir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından hazırlanan Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA) verilerine göre, teknolojik gelişmelerle birlikte Türkiye'nin toplam rüzgâr enerjisi kapasitesinin 140.000-150.000 MW seviyelerine ulaşabileceği öngörülmektedir [43]. 2025 yılı mart ayı itibarıyla, Türkiye'nin rüzgâr

enerjisi kurulu gücü 13.184 MW seviyesine ulaşmış olup bu değer toplam kurulu gücün %11,2'sine karşılık gelmektedir [41].

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın hazırlanmasına öncülük ettiği Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA) ile Türkiye genelinde her bölgenin ve ilin, yer seviyesinden 100 metre yükseklikteki yıllık ortalama rüzgâr hızı dağılımı, yıllık ortalama rüzgâr güç yoğunluğu dağılımı ve kapasite faktörü dağılımı görünür hale gelmiştir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Yıllık ortalama rüzgâr hızı dağılımı-100m [37]

2024 yılı itibarıyla, küresel rüzgâr enerjisi sektörü dikkat çekici bir büyüme sergilemiştir. Avrupa'da yıl boyunca 16,4 GW düzeyinde yeni rüzgâr enerjisi kapasitesi devreye alınmıştır. Bu kapasitenin yaklaşık %84'ü (13,8 GW) karasal rüzgâr santrallerinden, kalan %16'sı (2,6 GW) ise deniz üstü rüzgâr santrallerinden elde edilmiştir. Avrupa genelinde toplam rüzgâr enerjisi kapasitesi 285 GW'a ulaşmış; bunun %87'si (248 GW) kara kaynaklı, %13'ü (37 GW) ise deniz üstü kaynaklıdır. Türkiye, Avrupa rüzgâr enerjisi sıralamasında kurulu güç açısından Almanya, Birleşik Krallık, İspanya, Fransa ve İsveç'in ardından altıncı sıradaki yerini almıştır.

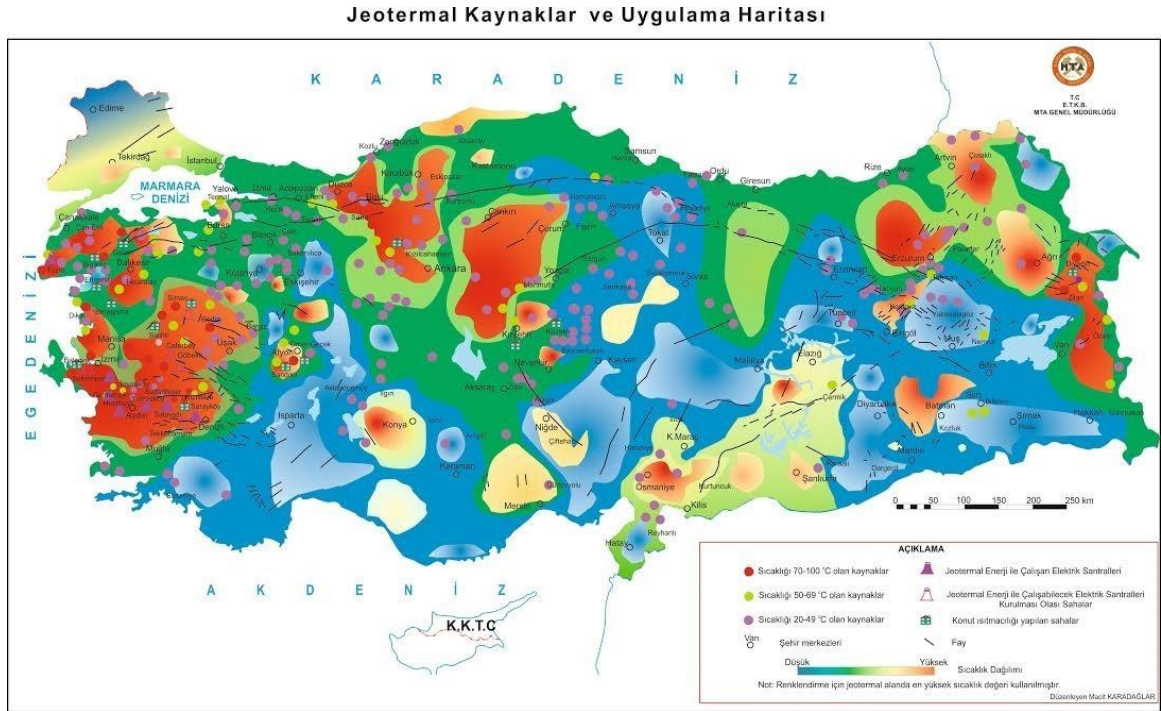
Dünya genelinde ise rüzgâr enerjisi sektörü önemli yapısal dönüşümler geçirmekte olup, Çin bu alanda liderliği elinde bulundurmaktadır. 2024 yılı sonunda Çin'in toplam rüzgâr kurulu gücü 520,68 GW'a yükselmiş; yalnızca bu yıl içinde 80,68 GW ilave kapasite devreye alınmıştır. Ülke ayrıca 41 GW deniz üstü rüzgâr kapasitesi ile bu alandaki küresel

toplamın yarısından fazlasını tek başına temsil etmektedir. Mevcut eğilimler, 2030 yılına kadar küresel rüzgâr enerjisi kapasitesinin 2.100 GW seviyesine çıkacağını ve bu artışın büyük bölümünün Çin tarafından sağlanacağını göstermektedir [44].

3.1.3. Jeotermal Enerji

Jeotermal enerji, yer kabuğunun derinliklerinde biriken ısının yeryüzüne taşınmasıyla elde edilen, çevre dostu ve sürdürülebilir bir enerji kaynağıdır. Yer altı suyu ve buharın kullanılması yoluyla elektrik üretimi, ısınma ve endüstriyel proseslerde değerlendirilebilen jeotermal enerji, düşük karbon salımı ile iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca, enerji ithalatını azaltma potansiyeli sayesinde jeotermal kaynaklar, ülkelerin enerji arz güvenliğine ve ekonomik kalkınmasına katkı sağlamaktadır. Bu özellikleri ile jeotermal enerji, geleceğin enerji sistemleri arasında yer almaktadır.

Türkiye, jeotermal enerji potansiyeli bakımından dünya genelinde ABD, Endonezya ve Filipinler'den sonra dördüncü, Avrupa'da ise birinci sıradadır. Ülkemizde yer alan jeotermal kaynakların dağılımını gösteren harita Şekil 3.5'te yer almaktadır. Ülkenin jeotermal kaynakları özellikle Ege Bölgesi'nde yoğunlaşmakta ve bu bölgede birçok jeotermal enerji santrali faaliyet göstermektedir [45]. 2025 yılı mart ayı verilerine göre, Türkiye'nin jeotermal enerji kurulu güç değeri 1.734 MW olup bu değer toplam kurulu gücün %1,5'ine karşılık gelmektedir [41].



Şekil 3.5. Türkiye'nin jeotermal kaynakları ve uygulama haritası [45]

3.1.4. Hidroelektrik Enerji

Hidroelektrik enerji, suyun potansiyel ve kinetik enerjisinden yararlanılarak elektrik üretiminin sağlandığı, en köklü ve yaygın YEK'lerden biridir. Nehirler veya akarsu sistemleri üzerine kurulan hidroelektrik santraller, büyük miktarda enerji üretme kapasitesine sahip olmaları nedeniyle birçok ülkenin enerji altyapısında önemli bir yer tutmaktadır. Fosil yakıtlara kıyasla düşük karbon salımı ve uzun ömürlü işletme süreleri ile çevre dostu bir alternatif sunan hidrolik enerji, aynı zamanda enerji arz güvenliğinin sağlanmasında da kritik öneme sahiptir. Ancak hem ekosistem hem de toplum üzerindeki sosyo-ekonomik etkileri dikkate alınarak planlama süreçlerinin yürütülmesi gerekmektedir.

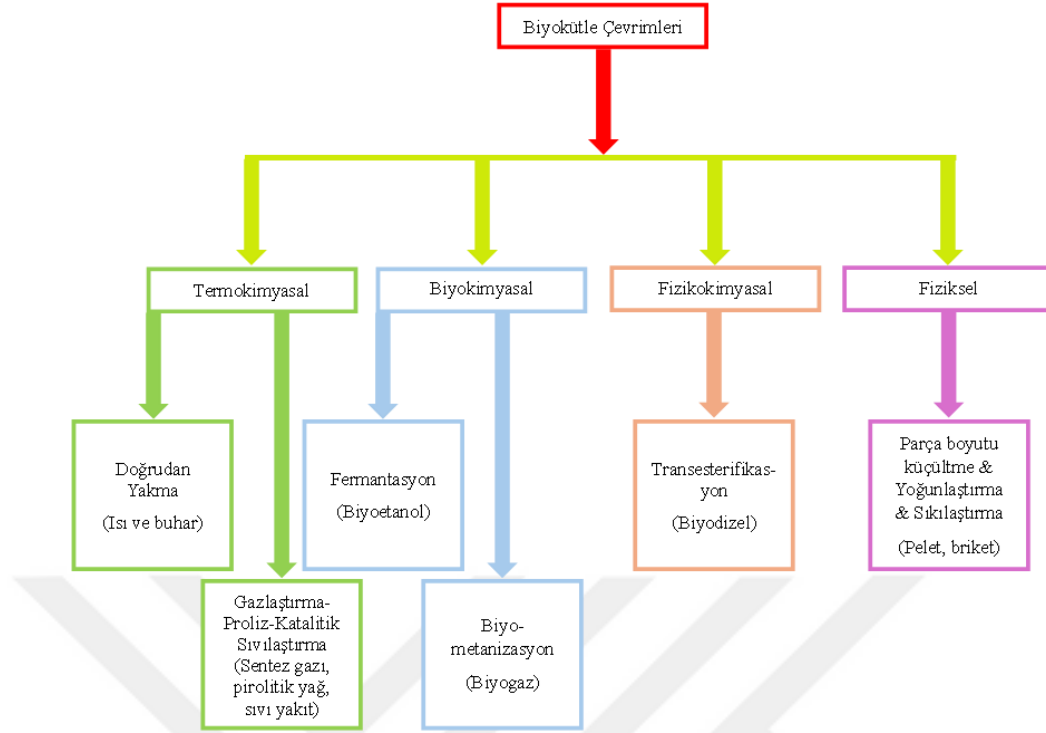
2024 yılı itibarıyla küresel hidroelektrik enerji kurulu gücü 1.443 GW seviyesine ulaşmıştır. Bu kapasiteyle aynı yıl içinde toplam 4.578 terawatt-saat (TWh) elektrik üretimi gerçekleştirilmiştir. Hidroelektrik santraller, bu üretim miktarıyla yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli bir paya sahip olmaya devam etmektedir.

Kurulu güç açısından değerlendirildiğinde, hidroelektrik sektöründe büyüme eğilimi sürmektedir. Nitekim 2023 yılında dünya genelinde hidroelektrik kapasitesine 22 GW'lık yeni ekleme yapılmışken, bu artış 2024 yılında 24,6 GW'a yükselmiştir [46].

Türkiye sahip olduğu hidroelektrik santraller bakımından dünyada dokuzuncu, Avrupa'da ise ikinci sıradadır [46]. Ülkenin teorik hidroelektrik potansiyeli 433 milyar kWh/yıl, teknik olarak değerlendirilebilir potansiyel 216 milyar kWh/yıl ve ekonomik olarak geliştirilebilir potansiyel ise 158 milyar kWh/yıl seviyesindedir [47]. 2025 yılı mart ayı itibarıyla, Türkiye'nin hidrolik enerjiye dayalı elektrik kurulu gücü 32.232 MW'a ulaşmıştır. Bu değer toplam kurulu gücün %27,3'üne karşılık gelmektedir [41].

3.1.5. Biyokütle Enerjisi

5346 sayılı Kanun kapsamında biyokütle, yalnızca yurt içi kaynaklardan temin edilmek şartıyla şu unsurları içerecek şekilde tanımlanmaktadır: belediye atıkları (çöp gazı dâhil), kullanım dışı bitkisel yağlar, gıda ve yem amaçlı kullanımı mümkün olmayan tarımsal atıklar, endüstriyel odun kapsamına girmeyen orman kökenli ürünler, işlenmiş atık lastiklerden elde edilen yan ürünler ile sanayi kaynaklı çamurlar ve atıksu arıtma tesislerinden çıkan çamurlar [48]. Şekil 3.6'da gösterildiği üzere, bu tür biyokütle kaynakları çeşitli çevrim teknolojileri aracılığıyla farklı türde yakıtlara dönüştürülebilmektedir.



Şekil 3.6. Biyokütle enerji çevrim yöntemleri [49]

Biyokütle enerji potansiyelinin değerlendirilmesine yönelik olarak hazırlanan Biyokütle Enerjisi Potansiyel Atlası (BEPA) verilerine göre, Türkiye’de toplanabilir nitelikteki atıkların toplam ekonomik enerji eşdeğeri yıllık yaklaşık 3,9 milyon ton eşdeğer petrol (MTEP) düzeyindedir [48]. Bu veri, biyokütle kaynaklarının enerji üretiminde ekonomik açıdan değerlendirilebilir önemli bir potansiyel sunduğunu göstermektedir.

2025 yılı mart ayı itibarıyla, Türkiye’nin biyokütle enerjiye dayalı elektrik kurulu gücü 2.431 MW’a ulaşmıştır. Bu değer toplam kurulu gücün %2,1’ine karşılık gelmektedir [41].

3.2. FV Sistemler

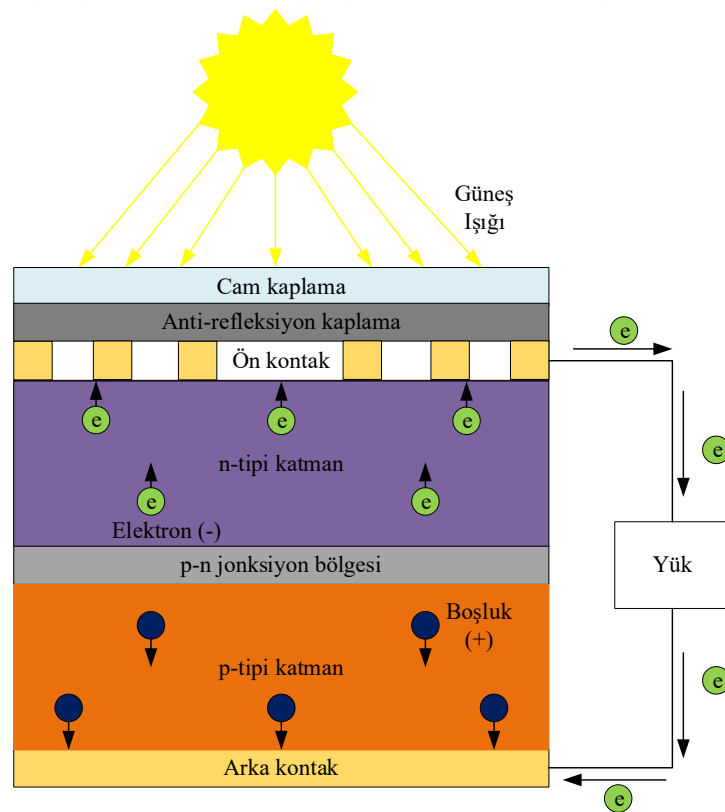
FV sistemler, güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yenilenebilir enerji teknolojileridir. Bu sistemler temel olarak güneş panelleri, inverter, şarj kontrol cihazı, batarya (varsa) ve izleme sistemlerinden oluşur. Güneş panelleri tarafından üretilen DC elektrik, sistemin önemli bir bileşeni olan Maksimum Güç Noktası Takibi (Maximum Power Point Tracking-MPPT) özelliğine sahip şarj kontrol cihazı ya da inverter aracılığıyla optimize edilir. MPPT teknolojisi, panelin anlık ışınlam ve sıcaklık koşullarına göre

maksimum verimle çalışmasını sağlayarak enerji üretimini artırır. Bu sistem yapısı, özellikle değişken hava koşullarında FV panellerin verimli çalışmasını desteklerken, aynı zamanda şebeke bağlantılı ya da ada tipi uygulamalarda sistem performansını önemli ölçüde iyileştirir.

3.2.1. FV Sistemlerin Yapısı

FV sistemler, güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Fotovoltaik etki ilk olarak 1839 yılında Becquerel tarafından araştırılmıştır [48]. Güneş ışığından gelen enerji, fotonlar aracılığıyla taşınmaktadır. Fotonlar panel yüzeyine çarptığında, bir kısmı panel tarafından soğurularak enerji üretiminde kullanılır.

Şekil 3.7’de gösterilen FV hücresi, güneş ışığını soğurarak elektrik akımı üreten yarı iletken malzemelerden oluşmaktadır. Hücrenin üst katmanındaki elektronlar, güneş enerjisinin etkisiyle alt katmana doğru hareket eder. Bu iki katman arasındaki elektron hareketi sayesinde elektrik akımı üretilir.



Şekil 3.7. FV hücrenin çalışma prensibi

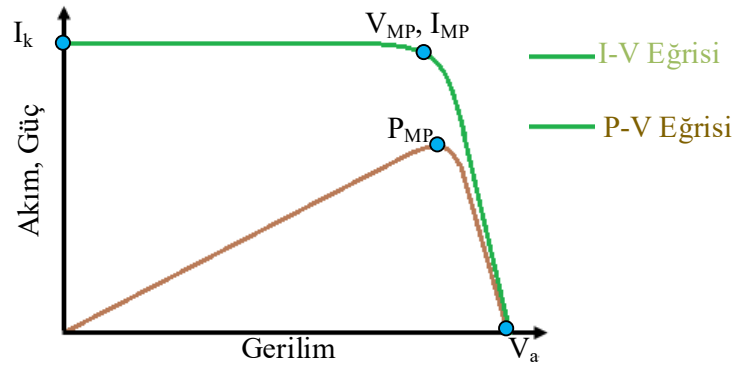
FV hücrenin akımına (I_{FV}) ait eşitlik Denklem 3.1’de verilmiştir [49]. Denklemde de görüldüğü gibi güneş ışınlam değeri, FV hücresinde üretilen akımı ve dolayısıyla panelin çıkış gücünü doğrudan etkilemektedir.

$$I_{FV} = [I_k + k_t \cdot (T_{FV} - T_{ref})] \cdot \frac{G}{G_{ref}} \quad (3.1)$$

Burada; I_{FV} FV hücrenin akımını, I_k 25 °C sıcaklık ve 1000 W/m² ışınlam koşullarında kısa devre akımını, k_t kısa devre akımı sıcaklık katsayısını ($k_t=0,0017$ A/°C), T_{FV} FV hücresinin Kelvin cinsinden sıcaklığını, T_{ref} referans sıcaklık değerini ($T_{ref}=298,15$ °K), G Güneş ışınlamı miktarını (W/m²) ve G_{ref} ise referans güneş ışınlamı değerini ($G_{ref}=1000$ W/m²) ifade etmektedir.

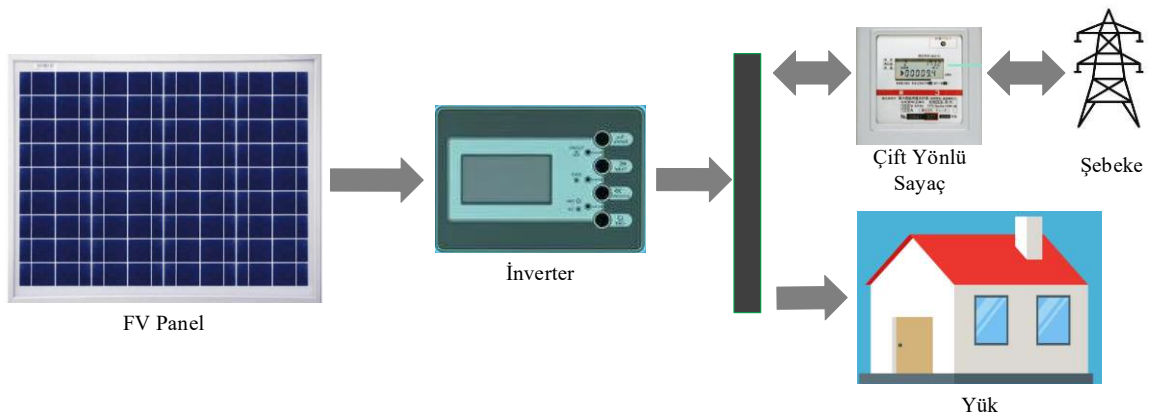
Bir FV panel, güneş enerjisini soğurarak doğru akım (direct current-DC) üreten çok sayıda hücreden oluşan bir elektrik üretim sistemidir. Panel boşa iken ve maksimum ışınlam altında çalışırken panel uçları arasında ölçülen gerilim, açık devre gerilimi (V_a) olarak tanımlanır. Maksimum ışınlam koşullarında panel çıkış uçları kısa devre yapılarak kısa devre akımı (I_k) ölçülür. Açık devre gerilimi ve kısa devre akımı, panel gücünün hesaplanmasında temel parametrelerdir.

Şekil 3.8’de bir FV panele ait I-V (akım-gerilim) ve P-V (güç-gerilim) karakteristik eğrileri gösterilmektedir. Şekilde de görülebileceği üzere güç değeri hem kısa devre akımı hem de açık devre gerilimi noktalarında sıfırdır. FV panel çıkış akımı, ışınlam miktarının artmasıyla birlikte artar. Bu artış sonucunda I-V karakteristik eğrisi yukarı doğru kayar. Maksimum güç noktası (P_{MP}), eğrinin eğiminin sıfır olduğu noktadır.



Şekil 3.8. FV panelin I-V ve P-V karakteristikleri

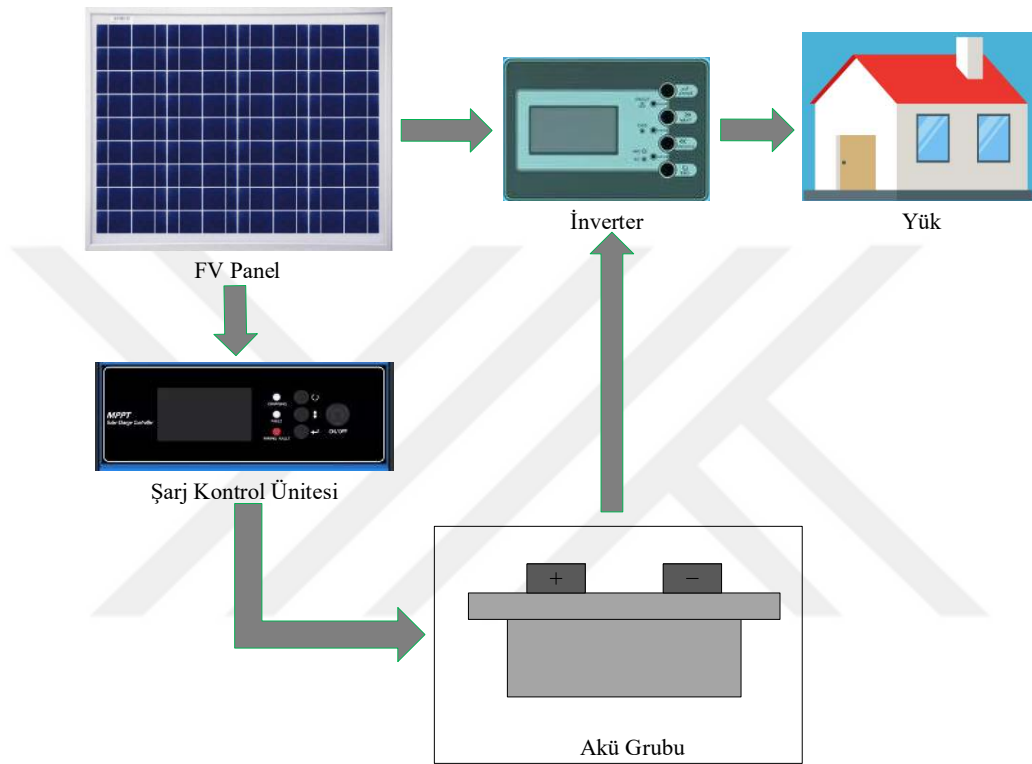
FV sistemler temel olarak iki ana kategoriye ayrılır: şebekeden bağımsız (off-grid) ve şebekeye bağlı (on-grid) sistemler. Şebekeye bağlı sistemlerde (Şekil 3.9), güneş panellerinden elde edilen elektrik enerjisi inverterler aracılığıyla şebeke frekansına sahip AC gerilime dönüştürülür. Tüketilmeyen fazla enerji şebekeye aktarılır. Eğer yüklerin tükettiği enerji, FV panellerin ürettiği enerjiden fazla ise, bu fark şebekeden karşılanır. FV sistemlerde dağıtım panosuna bağlı çift yönlü sayaçlar, şebekeye verilen ve şebekeden çekilen enerji miktarlarını kaydeder. Böylece, tüketiciler ile dağıtım şirketleri arasında bu değerlere dayalı olarak enerji alışverişi ve faturalandırma yapılabilir.



Şekil 3.9. Şebekeye bağlı bir FV sistemin genel yapısı

Şebekeden bağımsız sistemlerde (Şekil 3.10) ise, panellerden elde edilen elektrik enerjisi yine inverterler yardımıyla AC gerilime çevrilir. Yükler tarafından kullanılmayan fazla

enerji bataryalarda depolanır. Enerji üretiminin yetersiz olduğu zamanlarda, bataryalarda depolanan enerji inverter aracılığıyla tekrar kullanılabilir hâle getirilir. Bu sistemlerde batarya kullanımı zorunlu olup, bu durum maliyetleri artırmaktadır. Ayrıca, enerji depolama kaynaklı kayıplar nedeniyle bu sistemlerin verimliliği görece olarak daha düşüktür.



Şekil 3.10. Şebekeden bağımsız bir FV sistemin genel yapısı

FV panellerin çıkışında DC gerilim elde edilir ve bu gerilim, DC yüklerin doğrudan beslenmesinde kullanılabilir. Alternatif akım (Alternative Current-AC) yüklerin beslenebilmesi için ise panel çıkışına bir inverter bağlanarak DC enerji, AC enerjiye dönüştürülür. Gün içerisinde ve mevsimsel koşullara bağlı olarak güneş ışınımının değişkenlik göstermesi nedeniyle panellerden üretilen güç de değişmektedir. Bu nedenle panellerden üretilen güç zaman zaman yetersiz veya fazla olabilir. Talep edilen enerjiden daha fazla enerji üretildiği durumlarda fazla enerji bataryalarda depolanmaktadır. Üretimin yetersiz olduğu zamanlarda ise bataryalarda depolanan enerji kullanılarak yüklerin kesintisiz beslenmesi sağlanmaktadır. Bataryalar şarj edilirken sabit bir gerilimle beslenmelidir. FV panellerin çıkış gerilimi değişken olduğundan, bataryaların doğrudan

panellere bağlanarak şarj edilmesi uygun değildir. Ayrıca, bataryalar tamamen şarj edildiğinde gerilimin kesilmesi gerekmektedir. Tüm bu sorunların giderilmesi amacıyla, batarya şarj kontrolörleri kullanılmaktadır.

3.2.2. FV Sistemlerin Verimliliği

Bir FV sistemin verimliliği, güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürme yeteneği olarak tanımlanır ve genellikle yüzde cinsinden ifade edilir. Verimlilik, FV sistemlerinin elektrik üretimindeki etkinliğini belirler ve çeşitli faktörlere bağlıdır. Öncelikle güneş ışığının şiddeti ve süresi, FV hücrelerine ulaşan enerji miktarını belirler. Güneş ışınım şiddetinin yüksek olması ve uzun süreli maruz kalma genellikle daha yüksek verimlilik sağlar. FV hücrelerinin yapımında kullanılan malzemeler ve hücre tasarımı verimliliği etkileyen diğer bir faktördür. Yarı iletken malzemelerin elektron taşıma özellikleri, hücre verimliliğinde kilit rol oynar. Ayrıca ön ve arka hücre yüzeylerinin özel işlemlerle kaplanması yansımayı azaltır. Böylece daha fazla ışığın emilmesi sağlanarak verimlilik artırılır. Son olarak, FV sistem bileşenleri arasındaki elektriksel bağlantıların ve eşleştirmenin uygunluğu da sistem verimliliğini etkiler. Günümüzde gelişen teknolojiler sayesinde FV hücre verimliliği sürekli artmakta, bu da FV sistemlerini ticari ve endüstriyel kullanımlar için daha cazip hale getirmektedir. Bu nedenle FV sistemlerinin verimliliği, güneş enerjisinin yaygın olarak benimsenmesi ve sürdürülebilir enerji dönüşümünün teşvik edilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

Güneş ışınımı şiddeti, FV hücrelerine çarpan foton sayısını belirler ve dolayısıyla sistemin ürettiği elektrik akımını etkiler. Bununla birlikte, ışınımın karakteristik özellikleri de önemlidir. Örneğin, ışığın dalga boyu ve spektral bileşimi, FV hücrelerinin malzeme özelliklerine bağlı olarak farklı şekillerde emilir. Bazı FV teknolojileri belirli dalga boylarında daha etkin çalışırken bazıları ise daha geniş spektrumlarda yüksek performans sergiler. Ayrıca güneş ışığının geliş açısı da FV sistemlerinin performansını etkiler. Güneş ışığı doğrudan geldiğinde FV hücreleri maksimum verimde çalışırken farklı açılarda ya da bulutlu havalarda verimlilik düşmektedir. Bu nedenle güneş ışığının panel üzerine maksimum düzeyde düşmesi için FV sistemlerin doğru konumlandırılması büyük önem taşımaktadır.

FV sistemlerin verimliliği çevresel koşullardan da doğrudan etkilenmektedir. Bu bağlamda, gölgelenme ve panel yüzeyinde biriken kirlilik, sistem performansını önemli ölçüde düşüren iki temel faktördür. Gölgeleme, özellikle dar alanlarda kurulan sistemlerde ya da yakın çevrede bulunan ağaç, bina veya diğer yapıların oluşturduğu engellemeler sonucu, güneş ışınlarının panele eşit dağılmasını engelleyerek elektrik üretiminde ciddi kayıplara yol açmaktadır. Benzer şekilde, panel yüzeyinde oluşan toz, kir, kuş pisliği ve benzeri kirlleticiler, güneş ışığının hücrelere ulaşmasını kısıtlayarak enerji dönüşüm verimliliğini azaltmaktadır. Bu tür etkiler, özellikle uzun süre temizlenmeyen veya düzenli bakım yapılmayan sistemlerde daha belirgin hale gelmektedir. Dolayısıyla, FV sistemlerinin maksimum verimlilikle çalışabilmesi için düzenli temizlik ve uygun yer seçimi büyük önem taşımaktadır.

4. MATERYAL VE YÖNTEM

FV sistemlerde düzenli bakım ve temizlik işlemleri, sistemin verimliliği açısından son derece önemlidir. Panellerin yüzeyinde biriken toz, polen, kuş pislikleri ve diğer kirleticiler, güneş ışığının panel yüzeyine ulaşmasını engelleyerek elektrik enerjisi üretiminde düşüşe neden olabilir. Bu nedenle, FV sistemlerin düzenli olarak temizlenmesi, maksimum verimlilik ve performansın sağlanması açısından büyük önem taşımaktadır. Paneller hem manuel olarak hem de üstün teknoloji seviyesine sahip temizlik robotları kullanılarak temizlenebilmektedir. Bu robotlar panel yüzeyini tarayarak kirleticileri temizleyecek şekilde tasarlanmaktadır.

Temizlik robotlarının kullanımı, iş gücünden tasarruf sağlayarak bakım maliyetlerini azaltabilir ve sistem bakımını daha etkili hale getirebilir. Ayrıca düzenli temizlik işlemi panellerin ömrünü uzatabilir ve bakım giderlerini azaltabilir. Ancak, temizlik robotlarının etkinliği; tasarım özellikleri, kullanılan temizlik teknolojisi ve uygulama koşullarına bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Özellikle yoğun kirletici ortamlarda ya da zorlu hava koşullarında, manuel temizlik hâlâ gerekli olabilir. Bu nedenle, FV sistemlerde temizlik robotlarının kullanımı ve etkinliği, uygulama koşulları dikkate alınarak değerlendirilmelidir. Temizlik robotlarının tasarımı ve performansının iyileştirilmesine yönelik araştırmalar devam etmekte olup bu sayede FV sistemlerin bakımı daha verimli ve ekonomik hâle getirilmeye çalışılmaktadır.

Aşağı Kaleköy Barajı ve Hidroelektrik Santrali (HES) Projesi, Bingöl ili sınırlarında, Yiğitler Deresi ile Murat Nehri'nin birleştiği noktadan yaklaşık 2 km aşağısında yer almaktadır. Murat Nehri üzerine inşa edilen barajın yapımı Aralık 2019'da tamamlanmış olup, 2020 yılının ilk çeyreğinden itibaren 500 MW kurulu güç ile her yıl yaklaşık 1.200 GWh enerji üretmektedir.

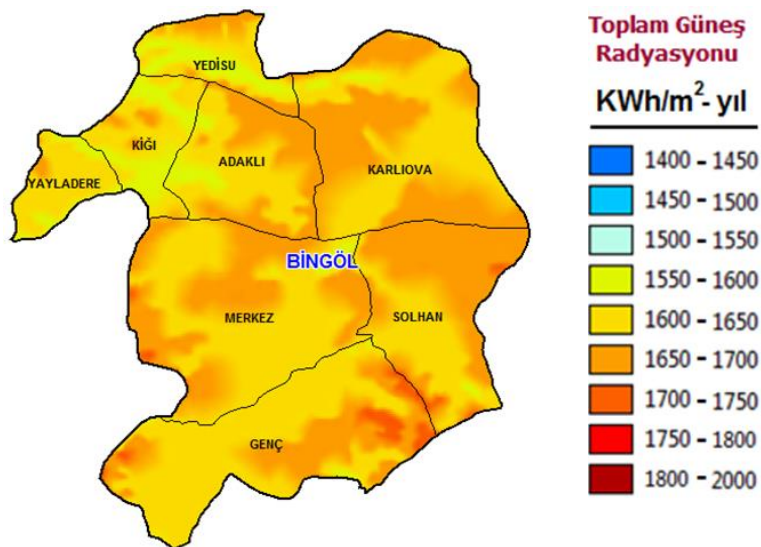
Aşağı Kaleköy Yardımcı Kaynak Güneş Enerji Santrali, Aşağı Kaleköy Barajı'nın mansabında, sağ ve sol sahil nehir regülasyon alanları boyunca yer almakta olup, toplamda 1.100 dönümlük (yaklaşık 110 hektar) bir alanı kapsamaktadır (Şekil 4.1). 2020 yılının son

çeyreğinde devreye alınan Aşağı Kaleköy Yardımcı Kaynak GES Tesisi, Aşağı Kaleköy Barajı ve HES ile Türkiye'nin ilk Birleşik Yenilenebilir Enerji Üretim Tesisi unvanını kazanmıştır. Ayrıca, 200.000 adet fotovoltaik panel ve 79,99 MW kurulu gücü ile Aşağı Kaleköy Yardımcı Kaynak GES Tesisi, Türkiye'de Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanları (YEKA) dışındaki en büyük güneş enerjisi santrali konumundadır [50].



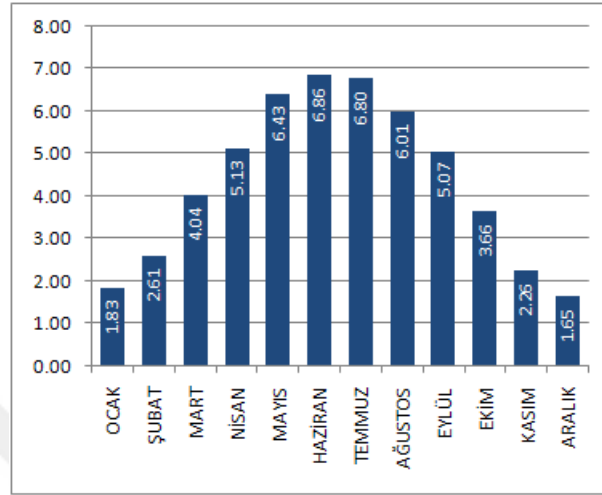
Şekil 4.1. Aşağı Kaleköy Yardımcı Kaynak Güneş Enerji Santrali

Çalışmanın yapıldığı Bingöl ilinin güneş enerjisi global radyasyon değerlerinin 1550-1700 kWh/m²-yıl arasında değiştiği Şekil 4.2'de görülmektedir.



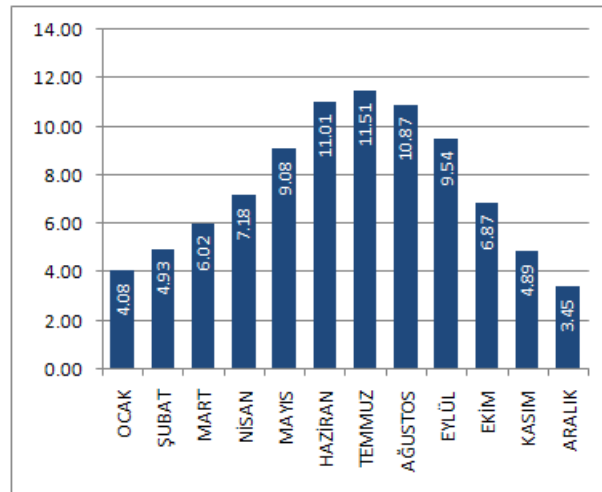
Şekil 4.2 Bingöl ili güneş radyasyon değerleri [40]

Şekil 4.3'te Bingöl ilinin aylık bazda günlük global radyasyon değerleri gösterilmiştir. Bingöl ilinin ortalama global radyasyon değeri $4285 \text{ kWh/m}^2\text{-yıl}$ olup bu değer Türkiye'nin ortalama global radyasyon değerinden ($1524,18 \text{ kWh/m}^2\text{-yıl}$) büyüktür.



Şekil 4.3. Bingöl ili global radyasyon değerleri ($\text{kWh/m}^2\text{/gün}$) [40]

Şekil 4.4'te Bingöl ilinin güneşlenme süresi gösterilmiştir. Bingöl ilinin güneşlenme süresinin yaz aylarında Türkiye ortalamasının üzerinde olduğu, yaz ayları dışındaki geri kalan dönemlerde ise hemen hemen aynı olduğu görülmektedir.



Şekil 4.4. Bingöl ili güneşlenme süresi (saat) [40]

4.1. Kullanılan Temizlik Robotunun Özellikleri

Tez çalışmasında aynı özelliklere sahip iki adet robot kullanılmıştır. AC gerilimle çalışan robotların enerji ihtiyacı mobil dizel jeneratör yardımıyla karşılanmaktadır. Hem temizlik performansını artırmak hem de panel yüzeylerine zarar vermemek amacıyla saf su kullanılmaktadır. Temizlenen panellerin kirlilik durumuna bağlı olarak robotun hareket hızı manuel olarak ayarlanabilmektedir. Böylece kirli yüzeylerde daha yavaş, temiz yüzeylerde ise daha hızlı hareket edebilmektedir. Robotlar, temizlik esnasında panel yüzeyinin zarar görmemesi için plastik kıllardan oluşan bir fırça sistemine sahiptirler. Temizlik robotuna ait etiket görseli Şekil 4.5'te verilmiştir.



Teknik Parametreler:

Özellikler	Parametreler
Çalışma Sistemi	Electric AC veya DC Motor
Uzunluk (mm)	4200 mm
Gerilim Voltajı	220 Metreça
Çalışma açısı	110 kg
Fırça Uzunluğu	4000 mm
Fırça Tipi	Çizmeyen Eva yada Plastik Kil fırça
Temizlik Hızı	10 - 30 Metre/Dakika
Temizlik Performansı	2000-6000 m ² / Saat (1-3 mw / gün)
Sıcaklık Çalışma Değerleri	(+60) - (-10)°C
Su Tüketimi	Ortalama 8-20 Litre/Dakika
Personel sayısı	2 Kişi
Fırça Sayısı	2 adet

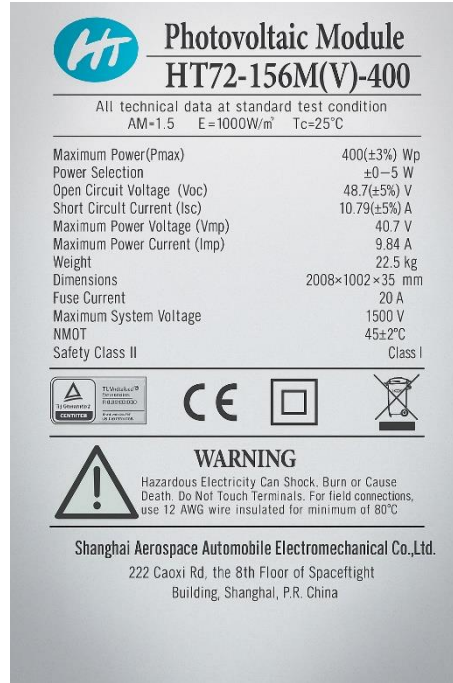
Şekil 4.5. Kullanılan temizlik robotuna ait etiket görseli

Şekil 4.6'da verilen görselde de görüldüğü gibi temizlik işlemlerinde özellikle kuş pisliği gibi bazı kirlerin bir seferde temizlenmemesi nedeniyle ardışık şekilde yatay eksenle hareket eden iki adet robot kullanılmıştır.



Şekil 4.6. Temizlik işlemine ait görüntü

Aşağı Kaleköy Yardımcı Kaynak Güneş Enerjisi Santrali'nde toplam 7386 dizi bulunmaktadır. Her bir dizide 27 panel yer almaktadır. Dört farklı markaya ait panellerin bulunduğu santralde, bu çalışma kapsamında kullanılan veriler için aynı teknik özelliklere sahip paneller tercih edilmiştir. Temizlik işlemine tabi tutulan panellerin gücü 400 W'tır. Bu çalışmada temizlik işlemi uygulanan panellere ait etiket görseli Şekil 4.7'de sunulmuştur.



Şekil 4.7. Temizlik işleminde kullanılan panellerin etiketine ait görüntü

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

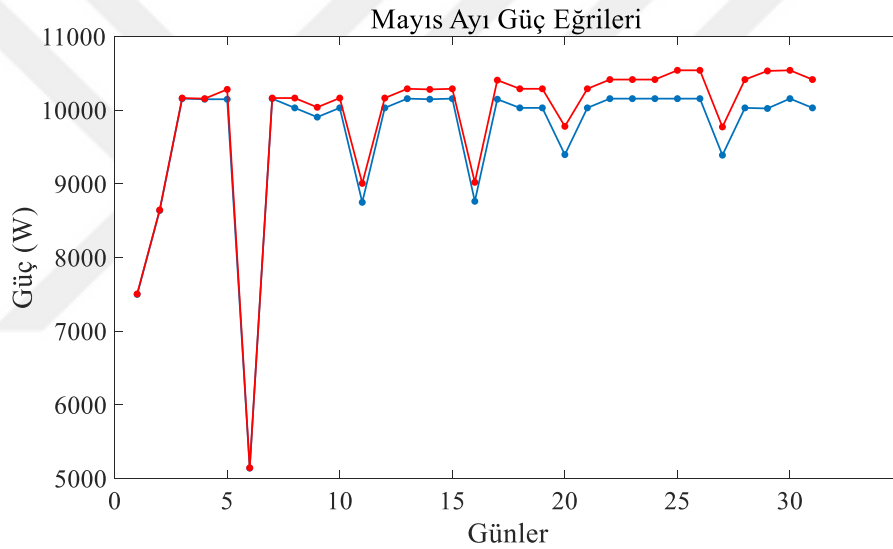
Bu tez çalışmasında tamamen aynı özelliklere sahip ve her biri 27 adet panelden oluşan iki adet panel dizisi kullanılmıştır. Dizilerden birisi (Dizi-1) çalışma süreci boyunca (01.05.2024-24.07.2024) hiç temizlenmezken diğer dizi (Dizi-2) her gün yaklaşık aynı saatte temizleme işlemine tabi tutulmuştur. Şekil 5.1’de gösterildiği gibi ölçülen akım, gerilim ve güç değerleri kaydedilmiştir. Sıcaklık, panel gücünü etkileyen önemli bir faktör olduğu için ölçüm esnasında panel sıcaklık değeri de ölçülerek kaydedilmiştir. Ayrıca ölçüm yapılan günlerin meteorolojik durum bilgisi de kayıt altına alınmıştır. Ancak tablodaki bilgi ölçüm yapılan zamandaki durumu göstermektedir. Dolayısıyla ölçüm öncesi veya sonrası farklı meteorolojik olaylar gerçekleşmiş olabilir.



Şekil 5.1. Ölçüm işlemine ait görüntü

Tablodaki veriler incelendiğinde görüleceği gibi Dizi-1 ile Dizi-2 başlangıçta aynı gücü üretmektedirler. Ancak daha sonra her gün temizlenen Dizi-2'nin gücü ile temizlenmeyen Dizi-1'in güç değerleri git gide ayrılmaktadır. 29 Mayıs tarihinde diziler arası güç farkı %5,08 ile en yüksek değişim değerine ulaşmıştır. Mayıs ayı ortalama güç farkı ise %2,17 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 5.1'de sunulan her iki diziye ait günlük güç üretim değerleri, Şekil 5.2'de grafiksel olarak karşılaştırmalı şekilde gösterilmiştir. Söz konusu grafik üzerinde Dizi-1'e ait ölçümler mavi renkli eğriyle, Dizi-2'ye ait ölçümler ise kırmızı renkli eğriyle temsil edilmiştir.



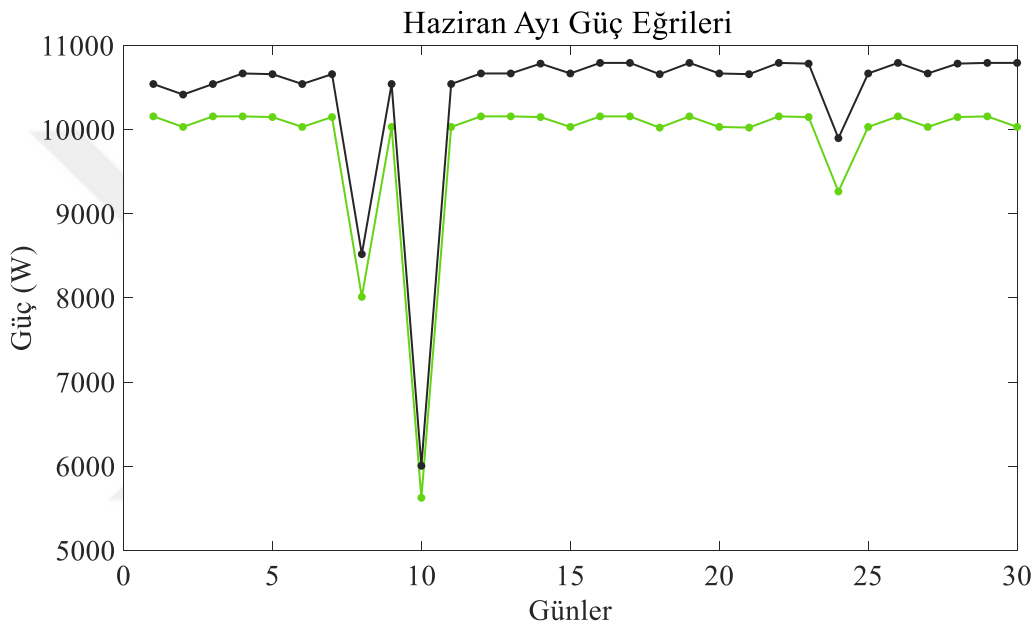
Şekil 5.2. Mayıs ayı güç eğrileri

Grafik incelendiğinde, yukarıda da ifade edildiği gibi, ayın ilk günlerinde iki dizi arasında oldukça benzer güç üretim değerlerinin kaydedildiği, dolayısıyla performans farkının minimal düzeyde olduğu görülmektedir. Ancak zaman ilerledikçe, özellikle ayın ikinci yarısından itibaren, Dizi-2'nin Dizi-1'e kıyasla anlamlı düzeyde daha yüksek güç üretimi sağladığı açıkça gözlemlenmektedir.

Bingöl ilinde mayıs ayları genelde yağmurlu geçmekle beraber ölçüm yapılan 2024 yılında tablodan da görüldüğü gibi çalışma bölgesinde çok fazla yağış gerçekleşmemiştir. Yağışsız zamanlarda temizlik yapılmayan panelin yağmurla temizlenme durumu ortadan kalktığı

Tablodaki veriler incelendiğinde görüleceği gibi Dizi-1 ile Dizi-2’de başlangıçta %3,79 olan güç farkı ay sonunda %7,59’a ulaşmıştır. Haziran ayı ortalama güç farkı ise %5,79 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 5.2’de yer alan her iki diziye ait günlük güç üretim değerleri, Şekil 5.3’te grafiksel olarak sunulmuştur. Söz konusu grafik üzerinde Dizi-1’e ait güç değerleri yeşil renkli eğriyle, Dizi-2’ye ait değerler ise siyah renkli eğriyle gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Haziran ayı güç eğrileri

Haziran ayının ortalarına kadar %5 civarında seyreden güç farkı sonraki dönemlerde %7’ye kadar yükselmiştir. Uzun süre yağmurun yağmaması ve rüzgâr hızının azalması, panellerde biriken kirlerin artmasına neden olmaktadır. Böylece her gün temizlenen panel dizisi ile temizlenmeyen panel dizisinin güç değerleri arasındaki fark açılmaktadır. Bu durum ölçülen değerler üzerinden çok açık bir şekilde görülmektedir.

Mayıs ayı ortalama güç farkı %2,17 iken bu değer haziran ayında %5,79 değerine ulaşmıştır. Bu değişim de yukarıda açıklandığı gibi yağışların olmadığı zamanlarda kirlenmeye bağlı güç kaybının yükseleceğini göstermektedir.

5.3. Temmuz Ayı Verileri

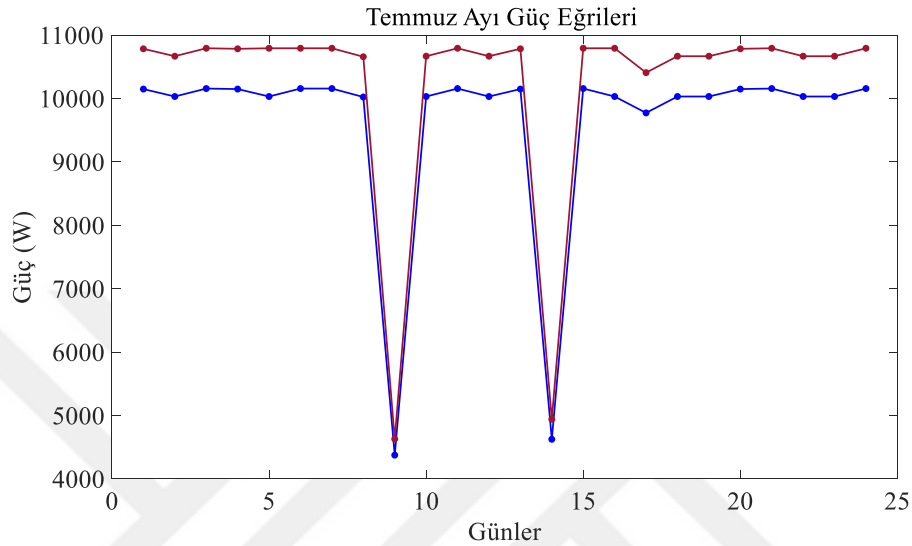
2024 yılı temmuz ayında her gün yaklaşık saat 12:00 civarında yapılan ölçümler sonucu elde edilen değerler Tablo 5.3'te sunulmuştur.

Tablo 5.3. Temmuz ayı ölçüm değerleri

Temmuz Ayı Verileri										
Tarih	Saat	t (°C)	Dizi-1			Dizi-2			Değişim	Hava Durumu
			Akım (A)	Gerilim (V)	Güç (W)	Akım (A)	Gerilim (V)	Güç (W)		
1.07.2024	12:03	38	8,1	1253	10149	8,6	1254	10784	6,26%	Güneşli
2.07.2024	12:05	38	8	1254	10032	8,5	1255	10668	6,33%	Güneşli
3.07.2024	12:00	38	8,1	1254	10157	8,6	1255	10793	6,26%	Güneşli
4.07.2024	12:01	38	8,1	1253	10149	8,6	1254	10784	6,26%	Güneşli
5.07.2024	12:03	38	8	1254	10032	8,6	1255	10793	7,59%	Güneşli
6.07.2024	12:04	38	8,1	1254	10157	8,6	1255	10793	6,26%	Güneşli
7.07.2024	12:03	38	8,1	1254	10157	8,6	1255	10793	6,26%	Güneşli
8.07.2024	12:05	38	8	1253	10024	8,5	1254	10659	6,33%	Güneşli
9.07.2024	12:02	31	3,5	1250	4375	3,7	1251	4629	5,80%	Bulutlu
10.07.2024	12:01	38	8	1254	10032	8,5	1255	10668	6,33%	Güneşli
11.07.2024	12:04	38	8,1	1254	10157	8,6	1255	10793	6,26%	Güneşli
12.07.2024	12:03	38	8	1254	10032	8,5	1255	10668	6,33%	Güneşli
13.07.2024	12:04	38	8,1	1253	10149	8,6	1254	10784	6,26%	Güneşli
14.07.2024	12:03	34	3,7	1250	4625	4,0	1251	4941	6,84%	Bulutlu
15.07.2024	12:04	38	8,1	1254	10157	8,6	1255	10793	6,26%	Güneşli
16.07.2024	12:03	38	8	1254	10032	8,6	1255	10793	7,59%	Güneşli
17.07.2024	12:02	36	7,8	1253	9773	8,3	1254	10408	6,50%	Güneşli
18.07.2024	12:01	38	8	1254	10032	8,5	1255	10668	6,33%	Güneşli
19.07.2024	12:04	38	8	1254	10032	8,5	1255	10668	6,33%	Güneşli
20.07.2024	12:03	38	8,1	1253	10149	8,6	1254	10784	6,26%	Güneşli
21.07.2024	12:05	38	8,1	1254	10157	8,6	1255	10793	6,26%	Güneşli
22.07.2024	12:00	38	8	1254	10032	8,5	1255	10668	6,33%	Güneşli
23.07.2024	12:04	38	8	1254	10032	8,5	1255	10668	6,33%	Güneşli
24.07.2024	12:03	38	8,1	1254	10157	8,6	1255	10793	6,26%	Güneşli
Temmuz Ayı Ortalama Değişim Miktarı									%6,41	

Tablodaki veriler incelendiğinde görüleceği gibi Dizi-1 ile Dizi-2'de arasındaki güç farkı temmuz ayında %6'ların altına hemen hemen hiç düşmemiştir. 5 Temmuz ve 16 Temmuz günlerinde diziler arası güç farkı %7,59 ile en yüksek değişim değerine ulaşmıştır. Temmuz ayı ortalama güç farkı ise %6,41 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 5.3'te yer alan her iki diziye ait günlük güç üretim değerleri, Şekil 5.4'te grafiksel olarak sunulmuştur. Söz konusu grafik üzerinde, temizlenmeyen panel dizisine ait güç üretimi mavi eğriyle, düzenli olarak temizlenen panel dizisine ait güç üretimi ise kırmızı eğriyle temsil edilmiştir.



Şekil 5.4. Temmuz ayı güç eğrileri

Ölçüm yapılan mayıs, haziran ve temmuz aylarına ait Dizi-1 ve Dizi-2 panellerinin ortalama güç farkı değerleri Tablo 5.4'te verilmiştir.

Tablo 5.4. Mayıs, Haziran ve Temmuz ayı güç değişim değerleri

	Aylık ortalama güç farkı (%)
Mayıs	2,17
Haziran	5,79
Temmuz	6,41

Güneş paneli dizilerinde düzenli temizlik ile temizlik yapılmaması arasındaki aylık ortalama güç farklarının analizi, panel yüzeyindeki kirlenmenin performans kaybına önemli ölçüde yol açtığını göstermektedir. Mayıs ayında %2,17 olan güç verimliliği farkı, haziran ve temmuz aylarında sırasıyla %5,79 ve %6,41'e yükselmiş; bu durum, yaz aylarında artan toz ve diğer kirlleticilerin panel yüzeyinde oluşturduğu engellemelerin enerji üretimini belirgin şekilde olumsuz etkilediğini ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgular, güneş panellerinin verimliliğini sürdürebilmek ve enerji kayıplarını en aza indirmek

amacıyla, özellikle yüksek ısıtım alan dönemlerde düzenli temizlik işlemlerinin zorunlu olduğunu vurgulamaktadır.

5.4. Ekonomik Analiz

Aşağı Kaleköy Yardımcı Kaynak Güneş Enerji Santralinin 2024 yılı mayıs haziran ve temmuz ayı elektrik enerjisi üretim değerleri Tablo 5.5'te sunulmuştur.

Tablo 5.5. Aşağı Kaleköy Yardımcı Kaynak Güneş Enerji Santralinin mayıs, haziran ve temmuz ayı güç üretim değerleri

	Üretilen Enerji (MW/h)
Mayıs	11.846,00
Haziran	11.987,00
Temmuz	12.383,00

Tablo 5.4'te verilen mayıs, haziran ve temmuz ayı ortalama güç kayıp oranları üretim değerlerine uygulanacak olursa bu aylara ait toplam enerji kayıp değerleri sırasıyla 257,06 MW/h, 694,05 MW/h ve 793,75 MW/h olarak elde edilmektedir. Bu değerler kirlenmeye bağlı kayıp gücün büyüklüğünü çok net bir şekilde ortaya koymaktadır.

Enerji Piyasaları Düzenleme Kurulunun (EPDK) belirlediği 1 MW/h enerji alım bedeli 73 dolardır [51]. Bir USD dolarının yaklaşık 40 TL olduğu kabul edilerek dolar ve TL bazında toplam enerji kaybı maliyeti hesaplanmıştır (Tablo 5.6).

Tablo 5.6. Toplam enerji kaybının dolar ve TL bazında ekonomik değeri

	Kayıp Enerji Miktarı (MW/h)	Toplam Ekonomik Kayıp (\$)	Toplam Ekonomik Kayıp (TL)
Mayıs	257,06	18.765,38	750.615,2
Haziran	694,05	50.665,65	2.026.626
Temmuz	793,75	57.943,75	2.317.750
TOPLAM	1.744,86	127.374,78	5.094.991,20

Bununla beraber ilgili çalışmanın gider kalemleri Tablo 5.7'de sunulmuştur. Bu tabloda temizlik için 3 adet personel çalıştırılacağı ve günlük 2 MW'lık temizlik yapılacağı öngörülmüştür. Günlük çalışma süresi olarak ise 7,5 saat olarak alınmıştır.

Tablo 5.7. Temizlik işleminin maliyet tablosu

	Personel İşveren Maliyeti (TL)	Mazot Maliyeti (TL)	Toplam Maliyeti (\$)
Giderler	211.526,46 TL	51.000	262.526,46 \$

Tablodaki değerler şöyle hesaplanmıştır: Çalışma döneminde bir işçinin işverene aylık maliyeti 23.502,94 TL'dir. Buna göre, üç işçinin temizlik süresi boyunca işverene toplam aylık maliyeti 211.526,46 TL olarak hesaplanmıştır. Temizlik robotunun enerji ihtiyacını karşılayan dizel generatörün günlük mazot tüketimi 15 litredir. 2024 yılı Mayıs, Haziran ve Temmuz aylarındaki ortalama mazot fiyatı litre başına 40 TL olarak hesaba katıldığında ilgili dönem için toplam yakıt gideri 51.000 TL olarak gerçekleşmiştir. Böylece, çalışma dönemi boyunca gerçekleşen toplam temizlik maliyeti 262.526,46 TL seviyesinde hesaplanmıştır.

Temizlik işleminin gerçekleştirilmesi durumunda elde edilecek brüt kazanç 5.094.991,20 TL olarak Tablo 5.6'da sunulmuştur. Bu tutardan Tablo 5.7'de yer alan giderler düşüldüğünde, net kazanç 4.832.464,74 TL olarak hesaplanmaktadır. Elde edilen bu sonuç, temizlik işleminin yol açtığı maliyetlerin sağlanan kazanca kıyasla oldukça düşük olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Yüzdelik olarak ifade edildiğinde, giderlerin kazanca oranı yaklaşık %5,15 seviyesindedir. Bu durum, temizlik uygulamasının ekonomik açıdan yüksek verimlilik sağladığını ve maliyetlerin görece önemsiz kaldığını göstermektedir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, güneş panel yüzeylerinin düzenli olarak temizlenmesinin panel verimliliği üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Tamamen aynı özelliklere sahip iki ayrı panel dizisi kullanılmış; Dizi-1 çalışma süresi boyunca temizlenmeden bırakılırken, Dizi-2 her gün aynı saatte düzenli olarak temizlenmiştir. Üç aylık (Mayıs, Haziran ve Temmuz 2024) süreçte elde edilen veriler analiz edilerek panel temizliğinin enerji üretimi üzerindeki etkisi ortaya konmuştur.

Çalışmanın başında, her iki panel dizisi neredeyse aynı güç çıktısını üretmiştir. Ancak zamanla özellikle yağışsız ve tozlu dönemlerde temizlenmeyen panellerin verimi belirgin şekilde azalmıştır. Mayıs ayında diziler arasındaki ortalama güç farkı %2,17 olarak ölçülürken, bu fark haziran ayında %5,79'a ve temmuz ayında ise %6,41'e kadar yükselmiştir. Temmuz ayında gün içerisinde %7,59'a ulaşan anlık güç farkları, kirlenmenin uzun vadede enerji üretimini önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir.

Bu güç kayıpları, büyük ölçekli güneş enerji santralleri için ciddi ekonomik sonuçlara yol açmaktadır. Aşağı Kaleköy Yardımcı Kaynak Güneş Enerji Santrali'nin üretim değerleri üzerinden yapılan ekonomik analiz, üç ayda yalnızca kirlilik kaynaklı toplam 1.744,86 MW/h enerji kaybı olduğunu göstermektedir. Bu kaybın ekonomik karşılığı yaklaşık 127.375,00 dolar ya da 5.095.000 TL gibi oldukça yüksek bir değere ulaşmaktadır. Temizlik işleminin toplam maliyeti olan 262.526,46 TL'nin, ortaya çıkan kayba kıyasla oldukça düşük kaldığı belirlenmiştir.

Elde edilen bulgular, güneş panellerinin özellikle yaz aylarında düzenli olarak temizlenmesinin hem teknik verimlilik hem de ekonomik açıdan büyük önem taşıdığını açıkça ortaya koymuştur. Güneş enerjisi yatırımlarının geri dönüş süresinin optimize edilmesi ve üretim kayıplarının önlenmesi açısından temizlik faaliyetlerinin düzenli ve sistematik biçimde sürdürülmesi gerekmektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma; panel yüzeyi temizliğinin, fotovoltatik sistemlerin uzun vadeli performansı ve ekonomik sürdürülebilirliği üzerinde kritik bir rol oynadığını deneysel verilerle ortaya koymuştur. Güneş enerjisi yatırımlarında sadece panel kalitesi ve yerleşim açısı gibi fiziksel etkenler değil, aynı zamanda bakım ve temizlik süreçlerinin de dikkatle planlanması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Bu çalışmada yalnızca panel yüzeyi temizliğinin fotovoltatik performansa etkisi ele alınmıştır. Daha sonra yapılacak çalışmalarda ise farklı temizlik yöntemlerinin (rneğin su bazlı, kuru temizlik, robotik sistemler vb.) hem enerji verimliliği hem de ekonomik sürdürülebilirlik açısından karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi, yatırımcılara uygulanabilir ve gerçekçi çözüm nerileri sunulması açısından faydalı olacaktır. Ayrıca, panel yüzeyinde biriken kirletici türlerinin (toz, kuş pisliği, polen, endüstriyel atıklar vb.) ayrı ayrı etkilerinin nicel olarak incelenmesi ve bu bağlamda yapay zekâ temelli kirlenme tahmin modellerinin geliştirilmesi, panel bakım stratejilerinin daha etkin şekilde planlanmasına katkı sağlayabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Abdallah L, El-Shennawy T. Reducing Carbon Dioxide Emissions from Electricity Sector Using Smart Electric Grid Application. Journal of Engineering. (2013). 2013: 845051.
- [2] Omer AM. Energy use and environmental impacts: A general review. J. Renewable Sustainable Energy. (2009). 1(5): 053101.
- [3] Butt OM., Zulqarnain M., Butt TM. Recent advancement in smart grid technology: Future prospects in the electrical power network. Ain Shams Engineering Journal. (2021). 12(1): 687-695.
- [4] Ekinçi F., Yavuzdeğer A., Nazlıgül H., Esenboğa B., Mert BD., Demirdelen T. Experimental investigation on solar PV panel dust cleaning with solution method. Solar Energy. (2022). 237: 1-10.
- [5] Xie Y., Khoo KS., Chew KW., Devadas VV., Phang SJ., Lim HR. Advancement of renewable energy technologies via artificial and microalgae photosynthesis. Bioresource Technology. (2022).363: 127830.
- [6] https://ytbsbilgi.teias.gov.tr/ytbsbilgi/frm_istatistikler.jsf (Erişim Tarihi: 26.05.2025).
- [7] Kaur H., Kaur I. Energy return on investment analysis of a solar photovoltaic system. In: Innovation in Energy Systems New Technologies for Changing Paradigms. IntechOpen: London; (2019).
- [8] Matsumoto Y., Valdés M., Urbano JA., Kobayashi T., López G., Peña R. Global Solar Irradiation in North Mexico City and Some Comparisons with the South. Energy Procedia. (2014). 57: 1179-1188.
- [9] <https://enerji.gov.tr/eigm-renewable-energy-resources-biomass> (Erişim tarihi: 16.11.2023).
- [10] Ziaemehr B., Jandaghian Z., Ge H., Lacasse M., Moore T.. Increasing Solar Reflectivity of Building Envelope Materials to Mitigate Urban Heat Islands: State-of-the-Art Review. Buildings. (2023). 13: 2868.

- [11] Sorgüven E., Özilgen M., Thermodynamic efficiency of synthesis, storage and breakdown of the high-energy metabolites by photosynthetic microalgae. *Energy*. (2013). 58: 679-687.
- [12] Miyamoto K. Chapter 1. Biological energy production, Editor(s): K. Miyamoto, Renewable biological systems for alternative sustainable energy production, FAO, Rome, (1997). *Agricultural Services Bulletin* 128.
- [13] Rustemli S., Dincer F. Modeling of Photovoltaic Panel and Examining Effects of Temperature in Matlab/Simulink. *Electronics and Electrical Engineering*. (2011). 109: 1392-1215.
- [14] Craciunescu D., Fara L. Investigation of the Partial Shading Effect of Photovoltaic Panels and Optimization of Their Performance Based on High-Efficiency FLC Algorithm. *Energies*. (2023). 16: 1169.
- [15] Zhang C., Ma Y., Mi Z., Yang F., Zhang L. A rolling-horizon cleaning recommendation system for dust removal of industrial PV panels. *Applied Energy*. (2024). 353: 122168.
- [16] Al-Addous M., Dalala Z., Alawneh F., Class CB. Modeling and quantifying dust accumulation impact on PV module performance. *Solar Energy*. (2019). 194: 86-102.
- [17] Zhao W., Lu H. Self-Cleaning Performance of Super-Hydrophilic Coatings for Dust Deposition Reduction on Solar Photovoltaic Cells. *Coatings*. (2021). 11: 1059
- [18] Altıntaş M., Arslan S. The Study of Dust Removal Using Electrostatic Cleaning System for Solar Panels. *Sustainability*. (2021). 13: 9454.
- [19] Hammoud M., Shokr B., Assi A., Hallal J., Khoury P. Effect of dust cleaning on the enhancement of the power generation of a coastal PV-power plant at Zahrani Lebanon. (2019). 184: 195201.
- [20] Ju, F. 2011. Research on Impact of Dust on Solar Photovoltaic(PV) Performance 978-1-4244-8165-1/11/\$26.00 © IEEE.
- [21] Parrott B., Zanini PC., Shehri A., Kotsovos K., Gereige I. Automated, robotic dry-cleaning of solar panels in Thuwal, Saudi Arabia using a silicone rubber brush. *Solar Energy*. (2018). 171: 526-533
- [22] Mousavi S., Farahani G. Introducing a new method of automatic cleaning of the PV array surface using a suction robot. *Mechatronics*. (2022). 85: 102845.

- [23] Appels R., Lefevre B., Herteleer B., Goverde H., Beerten A., Paesen R., De Medts K., Driesen J., Poortmans J. Effect of soiling on photovoltaic modules / Solar Energy. (2013). 96 283–291
- [24] Said SAM., Hassan G., Walwil HM., Al-Aqeeli N. The effect of environmental factors and dust accumulation on photovoltaic modules and dust-accumulation mitigation strategies, Renewable and Sustainable Energy Reviews. (2018). 82(1): 743-760.
- [25] Kayri İ., Bayar MT. Toz Faktörünün Fotovoltaik Panellerin Verimi Üzerindeki Etkisinin Araştırılması Batman Örneği. International Symposium on Engineering. Natural And Social Sciences ISENS-21. Batman (2021). 88-96.
- [26] Ghazi S., Sayigh A., Ip K. Dust effect on flat surfaces A review paper. Renewable and Sustainable Energy Reviews. (2014). 33: 742–751.
- [27] Dahlioui D., Traore L., Laarabi B., Barhdadi A. Ecological cleaning of PV panels by exploitation of dew water in Morocco. Materials Today: Proceedings. (2022). 66(1): 130-134.
- [28] Zaihidee FM., Mekhilef S., Seyedmahmoudian M., Horan B. Dust as an unalterable deteriorative factor affecting PV panel's efficiency: Why and how. Renewable and Sustainable Energy Reviews. (2016). 65: 1267–1278.
- [29] R. R. Cordero. Effects of soiling on photovoltaic (PV) modules in the Atacama Desert scientific reports. (2018). 8: 13943.
- [30] Ali HM., Zafar MA., Bashir MA., Nasir MA., Ali M., Siddiqui AM. Effect of dust deposition on the performance of photovoltaic modules in city of taxila, pakistan thermal science. (2017). Vol. 21, No. 2, pp. 915-923.
- [31] Karim M., Hamdy FM., Farghala. Dust accumulation on photovoltaic panels: a case study at the East Bank of the Nile (Beni-Suef, Egypt) Karim Menoufi et al. / Energy Procedia. (2017). 128 24–31.
- [32] Lopez JG., Pozza A., Sample T. Long-term soiling of silicon PV modules in a moderate subtropical climate/ Solar Energy. (2016). 130 174–183.
- [33] Yu J., Lin L., Hao L. A novel model to estimate the cleaning frequency for dirty solar photovoltaic (PV) modules in desert environment Y. Jiang et al. / Solar Energy. (2016). 140 236–240.
- [34] F. Mejia., Kleissl J., Bosch JL. The effect of dust on solar photovoltaic systems / Energy Procedia. (2014). 49 2370 – 2376.

- [35] Hossain M., Rabbi F., Zaman, S., Rahman, F., Islam, M.S. Study of Dust Effect on PV Panel's Efficiency During Winter for Dhaka, Bangladesh, 2nd International Conference on Sustainable Technologies for Industry 4.0 (STI), 1-4, Dhaka/Bangladesh, (2020).
- [36] Coşgun AE., Demir H. "The experimental study of dust effect on solar panel efficiency", *Politeknik Dergisi*. (2022). 25(4): 1429-1434.
- [37] Maity R., Shamaun Alam, M., Pati, A. An Approach for Detection of Dust on Solar Panels Using CNN from RGB Dust Image to Predict Power Loss, *Cognitive Computing in Human Cognition: Perspectives and Applications*. (2020). 41-48.
- [38] Sulaiman, SA., Singh AK., Mokhtar MMM., Bou-Rabee MA. Influence of Dirt Accumulation on Performance of PV Panels, *Energy Procedia*. (2014). 50, 50-56.
- [39] Maghami M., Hizam H., Gomes C. Impact of dust on solar energy generation based on actual performance, *IEEE International Conference on Power and Energy (PECON)*. (2014). 388-393.
- [40] <https://gepa.enerji.gov.tr/> (Erişim tarihi:14.03.2025)
- [41] [https://enerji.gov.tr/haber-detay?id=21486#:~:text=Sadece%20r%C3%BCzg%C3%A2r%20ve%20g%C3%BCne%C5%9Fin%20toplamlam,29%2C7\)%20olarak%20ger%C3%A7ekle%C5%9Fti.&text=Mart%20ay%C4%B1%20sonu%20itibar%C4%B1yla%20yerli,Mart%C4%B1nda%20y%C3%BCzde%2067%20idi](https://enerji.gov.tr/haber-detay?id=21486#:~:text=Sadece%20r%C3%BCzg%C3%A2r%20ve%20g%C3%BCne%C5%9Fin%20toplamlam,29%2C7)%20olarak%20ger%C3%A7ekle%C5%9Fti.&text=Mart%20ay%C4%B1%20sonu%20itibar%C4%B1yla%20yerli,Mart%C4%B1nda%20y%C3%BCzde%2067%20idi). (Erişim tarihi:11.06.2025)
- [42] Kan Kaynar N. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Güneş Enerjisinin Amasya İlindeki Potansiyeli. *Bilge International Journal of Science and Technology Research*. (2020). 4(2), 48-54.
- [43] <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-ruzgar> (Erişim tarihi:15.03.2025).
- [44] <https://www.tureb.com.tr/yayin/turkiye-ruzgar-enerjisi-istatistik-raporu-ocak-2025--ozet-/1167> (Erişim tarihi:30.06.2025)
- [45] <https://www.enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-jeotermal> (Erişim tarihi:15.03.2025)
- [46] <https://www.hydropower.org/publications/2024-world-hydropower-outlook> (Erişim tarihi:11.06.2025)

- [47] <https://temsın.gov.tr/p/186/hidroelektrik> (Erişim tarihi: 11.06.2025)
- [48] <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-biyokutle> (Erişim tarihi: 30.06.2025)
- [49] Aydın F. Yenilenebilir Enerji Tabanlı Hibrit Sistemlerde Enerji Yönetimi. Yüksek lisans tezi, Bingöl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. (2024).
- [50] Fonash SJ. Chapter Six - Surface-barrier Solar Cells, Editor(s): Stephen J. Fonash, Solar Cell Device Physics (Second Edition). Academic Press. (2010). Pages 263-294.
- [51] Karafil A, Özbay H, Kesler M. Temperature and Solar Radiation Effects on Photovoltaic Panel Power. Journal of New Results in Science. (2016). 12: 48-58.
- [52] <https://kalehan.com.tr/en/projects/lower-kalekoy-dam-and-hepp/> (Erişim tarihi: 26.04.2024)
- [53] <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/5-15767/2025-yili-nihai-yek-listesi-yayinlanmistir> (Erişim tarihi: 15.06.2025)