T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEK MOTORLU ÇİFT EKSENLİ GÜNEŞ TAKİP SİSTEMİ TASARIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YUNUS GÜNEŞ

YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
Doç. Dr. Abdulkerim KARABİBER

BİNGÖL-2022

T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEK MOTORLU ÇİFT EKSENLİ GÜNEŞ TAKİP SİSTEMİ TASARIMI

Doç. Dr. Abdulkerim KARABİBER danışmanlığında, Yunus GÜNEŞ tarafından hazırlanan bu çalışma 27/07/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Başkan	: Doç. Dr. Ömer Faruk ALÇİN	*İmza*	:
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Dursun ÖZTÜRK	*İmza*	:
Üye	: Doç. Dr. Abdulkerim KARABİBER	*İmza*	:

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulunun ...../ ...../ ……..…. tarih ve . . . . . / . . . . . nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Zafer ŞİAR
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

REPUBLIC OF TURKEY
BİNGÖL UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE

SINGLE MOTOR DUAL AXIS SOLAR TRACKING SYSTEM DESIGN

This dissertation, created by Yunus GÜNEŞ under supervision of Assoc. Prof. Abdulkerim KARABİBER, was accepted as a Master thesis in department Renewable Energy Systems by the following committee on 27/07/2022 with the vote unity.

Head of examining committee: Assoc. Prof. Ömer Faruk ALÇİN *Signature :*

Member : Asst. Prof. Dursun ÖZTÜRK *Signature* :

Member : Assoc. Prof. Abdulkerim KARABİBER *Signature* :

This result has been approved on ..... / …… /.....… with the decision of ……./…… by Board of Directors of the Science Institute.

Prof. Dr. Zafer ŞİAR
Director of the institute

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖNSÖZ

Tez konumun belirlenmesinde ve gerçekleştirilme süresinin bütün aşamalarında her türlü bilgi birikimini benimle paylaşan, maddi ve manevi karşılaştığım her türlü sorunda yardımlarını esirgemeyen saygıdeğer danışman hocam; Doç. Dr. Abdulkerim KARABİBER'e teşekkürü borç bilirim. Ayrıca bu çalışmanın tasarım, kurulum ve ölçüm sonuçların elde edilmesinde bana destek olan kıymetli hocam; Arş. Gör. Feyyaz KOÇ'a da sonsuz teşekkür ederim.

Son olarak bugünlere gelmemde büyük pay sahibi olan, hayatımın her döneminde olduğu gibi yüksek lisans eğitimi süresince de göstermiş oldukları sabır, destek ve dualarından dolayı kıymetli aileme özellikle de anne ve babama teşekkürü bir borç bilirim.

Yunus GÜNEŞ

Bingöl 2022

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ..... i
İÇİNDEKİLER..... ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ..... iv
ŞEKİLLER LİSTESİ..... vi
TABLOLAR LİSTESİ..... viii
ÖZET..... ix
ABSTRACT..... x
1. GİRİŞ..... 1
2. KAYNAK ÖZETLERİ..... 5
3. MATERYAL VE YÖNTEM..... 18
3.1. Türk Solar Takipçi (TST)..... 18
3.2. TST'nin Kontrol Devresi..... 21
3.3. Asimetrik TST'nin Optimum Eğim Açısının Belirlenmesi..... 22
3.3.1. Güneş Açıları..... 22
3.3.1.1. Temel Güneş Açıları..... 23
3.3.1.1.1. Enlem Açısı..... 23
3.3.1.1.2. Saat Açısı..... 23
3.3.1.1.3. Deklinasyon Açısı..... 24
3.3.1.2. Türetilen Güneş Açıları..... 26
3.3.1.2.1. Güneş Geliş Açısı..... 27
3.3.1.2.2. Yüzey Azimut Açısı..... 27
3.3.1.2.3. Güneş Yükseklik Açısı..... 27
3.3.1.2.4. Zenit Açısı..... 28
3.3.1.2.5. Güneş Azimut Açısı..... 29
3.3.1.2.6. Eğim Açısı..... 29
3.4. Bingöl İçin Azimut ve Optimum Eğim Açısının Hesabı..... 30
3.4.1. Azimut Açısının Hesabı..... 30
3.4.2. Optimum Eğim Açısının Hesabı..... 31

3.5. Deney Düzeneği……..……..……..... 34
3.6. Deneysel Materyaller……..……..……..... 35
3.6.1. İnverter……...……..... 35
3.6.2. Ardunio UNO……..……..... 36
3.6.3. XL4015 DC-DC Voltaj Regülatörü……..…….…….... 37
3.6.4. Hioki PW3198 Güç Kalite Analizörü……..……..... 38
3.6.5. DC Motor……..……..…..... 39
3.6.6. LDR (Işığa Bağımlı Direnç)…..……..…..... 40
3.6.7. Güneş Paneli……..……..... 40
3.6.8. FH 2000 Isıtıcı……...……..…..... 41
3.6.9. İki Kanallı Röle Kartı...…….... 41
4. BULGULAR VE TARTIŞMA…….. 42
4.1. Optimum Eğim Açısının Belirlenmesine Ait Sonuçlar……..... 43
4.2. Azimut Açısının Belirlenmesine Ait Sonuçlar……..……..……..... 57
4.3. TST ve Sabit Güneş Paneline Ait Ölçüm Sonuçları……..……..……..... 58
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER……..... 63
KAYNAKLAR……... 66
EKLER……... 73
EK A…….…… 73
EK B…….……...……...……..... 74
EK C…….……...……..……..... 84
EK D…….……..……..... 89

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

TST	: Türk solar takipçi
GTS	: Güneş takip sistemi
MPPT	: Maksimum güç noktası izleme
AC	: Alternatif akım
DC	: Doğru akım
AB	: Avrupa Birliği
H_0	: Aylık ortalama günlük dünya dışı radyasyon (MJ/m²-gün)
H_T	: Eğik yüzeyde aylık ortalama günlük toplam küresel radyasyon (MJ/m²-gün)
R_b	: Eğik bir yüzeydeki ortalama radyasyonunun yatay yüzeydekine oranı
δ	: Deklinasyon açısı
Z	: Rakım
Ø	: Enlem açısı
m	: Aylık ortalama günlük güneşlenme süresi
N	: Aylık ortalama gün uzunluğu
β	: Eğim açısı
ω	: Saat açısı
a ve b	: Bölgeye bağlı sabitler
k	: Güneş sabitinin düzeltme faktörü
I	: Akım
V	: Gerilim
W	: Aktif güç
Wp	: Maksimum güç
Wh	: Saatlik Enerji
kg.cm	: Tork
kVA	: Görünür güç
Voc	: Açık devre voltajı
Isc	: Kısa devre akımı

Vmp : Maksimum güç voltajı

Imp : Maksimum güç akımı

PV : Fotovoltaik

θ_Z : Zenit Açısı

θ : Güneş geliş açısı

γ : Yüzey azimut açısı

α : Güneş yükseklik açısı

γ_s : Güneş azimut açısı

$\mathcal{y}$: Kesirli yıl

ω_s : Güneş ışınlarının eğik yüzey üzerine ilk düşüş saat açısı

ρ : Yerin yansıtma oranı

zd : Zaman denklemi

n : 1 Ocaktan itibaren gün olarak zaman

zf : Zaman farkı

ggs : Gerçek güneş saati

λ : Boylam

sd : UTC cinsinden saat dilimi

sa : Saat

dk : Dakika

s : Saniye

G_{SC} : Güneş sabiti

m / N : İzafi güneşlenme süresi

β_{opt} : Optimum panel eğim açısı

off-grid : Şebekeden bağımsız

on-grid : Şebekeye bağımlı

Gnd : Toprak

In1 ve In2 : Giriş

Vcc : Besleme voltajı

Hz : Frekans

NO ve NC : Normalde açık ve normalde kapalı kontak

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. TST'nin üç boyutlu görünümü 18
Şekil 3.2. Deneylerde kullanılan TST'nin ön (a) ve arka (b) kısımlarından görünümleri 19
Şekil 3.3. TST'nin öğleden sonra, öğle ve öğleden önceki görünümleri..... 20
Şekil 3.4. a) TST'nin yandan görünüşü, b) DC motorun bağlantısı, c) halat sarma mekanizması 21
Şekil 3.5. Motor sürücü devresinin bağlantı şeması..... 22
Şekil 3.6. Enlem (Ø), saat (ω) ve deklinasyon (δ) açılarının görünümü..... 23
Şekil 3.7. Deklinasyon açısının yıllık değişimi..... 24
Şekil 3.8. Ekinoks ve gün dönümlerinde deklinasyon açısı..... 25
Şekil 3.9. Zenit açısı ile güneş yükseklik açısı arasındaki ilişki..... 28
Şekil 3.10. Zenit, deklinasyon ve enlem açılarının yaz ve kış mevsimlerindeki görünümü..... 28
Şekil 3.11. Güneş azimut ve güneş yükseklik açısı arasındaki ilişki..... 29
Şekil 3.12. Yatay düzlemdeki panel eğim açısı..... 29
Şekil 3.13. PV panellerin üzerine düşen çeşitli güneş açılarının görünümü..... 30
Şekil 3.14. Deney düzeneğinin görünümü 35
Şekil 3.15. Ardunio UNO R3..... 36
Şekil 3.16. HIOKI PW3198 güç kalite analizörü..... 38
Şekil 3.17. TST'nin doğu-batı hareketini sağlamak üzere kullanılacak 24V silecek motor..... 39
Şekil 3.18. LDR sensörünün çıkış voltajını gösteren devre..... 40
Şekil 4.1. Bingöl ili için aylara bağlı ortalama radyasyon miktarı..... 42
Şekil 4.2. Bingöl ili için aylara bağlı ortalama güneşlenme süresi..... 43
Şekil 4.3. Bingöl ili için aylık ortalama günlük H_0, H ve H_d radyasyon değerleri.. 44
Şekil 4.4. Ocak-haziran ayları arasında farklı eğim açıları için eğik yüzeye gelen günlük küresel radyasyon miktarı (H_T)..... 45

Şekil 4.5. Temmuz-aralık ayları arasında farklı eğim açıları için eğik yüzeye gelen günlük küresel radyasyon miktarı (H_T)..... 46
Şekil 4.6. İlkbahar-kış mevsimleri arasında farklı eğim açıları için eğik yüzeye gelen günlük küresel radyasyon miktarı (H_T)..... 47
Şekil 4.7. Optimum eğim açılarının aylık, mevsimlik ve yıllık değerleri..... 48
Şekil 4.8. Bingöl ili için her bir ayın maksimum H_T miktarları..... 50
Şekil 4.9. Azimut açısının gün dönümü ve ekinoks tarihlerindeki değişimi..... 57
Şekil 4.10. Azimut açısının aylara bağlı ortalama değerleri..... 58
Şekil 4.11. Parçalı bulutlu bir gün için TST ve sabit sistemden elde edilen güç miktarları..... 59
Şekil 4.12. Güneşli bir gün için TST ve sabit sistemden elde edilen güç miktarları. 60
Şekil 4.13. Kısmi bulutlu bir gün için TST ve sabit sistemden elde edilen güç miktarları..... 61
Şekil 4.14. Çok bulutlu bir gün için TST ve sabit sistemden elde edilen güç miktarları..... 62

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 3.1. Her bir ayın ortalaması için tavsiye edilen günler, gün sayıları ve ortalama deklinasyon açıları 25

Tablo 3.2. Farklı yıllarda her ayın 1'i için ölçülen ve hesaplanan deklinasyon açısı değerleri..... 26

Tablo 3.3. Ardunio UNO R3 teknik özellikleri..... 37

Tablo 3.4. Silecek motoruna ait özellikler..... 39

Tablo 4.1. Bingöl ili için aylık ortalama günlük H_0,H ve H_d değerleri..... 44

Tablo 4.2. Bingöl ili için aylara bağlı optimum eğim açıları ve H_T miktarları..... 48

Tablo 4.3. Bingöl ili için mevsimlik ve yıllık optimum eğim açıları ve H_T miktarları..... 49

Tablo 4.4. Bingöl ili için aritmetik ortalamaya bağlı yıllık optimum eğim açısı ve aylık H_T miktarları..... 51

Tablo 4.5. Bingöl ili için ışınım ağırlıklı ortalamaya bağlı yıllık optimum eğim açısı ve aylık H_T miktarları..... 51

Tablo 4.6. Bingöl ili için ışınım ağırlıklı ortalama ile aritmetik ortalamaya bağlı aylık H_T farkı..... 52

Tablo 4.7. Bingöl ili için ışınım ağırlıklı ortalama ile aritmetik ortalamaya bağlı eğim açıları ile birlikte farklı bazı eğim açıları için yıllık H_T miktarı... 53

Tablo 4.8. Bingöl ili için aylık ortalama eğim açıları ve aritmetik ortalamaya bağlı yıllık eğim açısı için H_T farkı..... 54

Tablo 4.9. Bingöl ili için aylık ortalama eğim açıları ve ışınım ağırlıklı ortalamaya bağlı yıllık eğim açısı için H_T farkı..... 55

Tablo 4.10. Bingöl ili için aylık ortalama eğim açıları ve mevsimlik ortalamaya bağlı yıllık eğim açıları için H_T farkı..... 56

Tablo 4.11. Bingöl ili için 12 Mayıs 2022 ve 13 Mayıs 2022 tarihlerinde TST ve sabit güneş sistemine ait güç değerleri..... 84

Tablo 4.12. Bingöl ili için 13 Mayıs 2022 ve 14 Mayıs 2022 tarihlerinde TST ve sabit güneş sistemine ait güç değerleri..... 89

TEK MOTORLU ÇİFT EKSENLİ GÜNEŞ TAKİP SİSTEMİ TASARIMI

ÖZET

Güneş enerji sistemleri, yenilenebilir enerji kaynakları arasında en çok tercih edilen ve dünya çapında büyük finansal yatırımları çeken temiz enerji kaynaklarıdır. Teknolojinin gelişmesiyle artan küresel enerji talebini karşılamak ve fosil yakıtlardan kaynaklanan karbon emisyon miktarını azaltmak için güneş enerjisi sistemlerinin verimliliğinin artırılması gerekmektedir. Güneş enerji sistemlerinde enerji hasadını ve verimliliği artırmanın en etkili yollarından biri sabit güneş sistemleri yerine güneş takip sistemleri kullanmaktır. Gün boyunca güneşi takip ederek panellere gelen radyasyon miktarını maksimum düzeye çıkaran güneş takip sistemleri, ortalama %30-40 daha fazla elektrik enerjisi üretimi sağlamaktadır. Ancak, geleneksel güneş takip sistemleri, yüksek ilk yatırım maliyetleri ve ekstra bileşen gereksinimleri nedeniyle ticari olarak tercih edilmemektedir. Güneş takip sistemlerinin yaygın bir şekilde kullanılması, bu sistemlerin basitleştirilmesine, maliyetinin düşürülmesine ve üretim kolaylığına bağlıdır. Bu tez çalışmasında sunulan TST, güneş takip sistemlerine yeni bir yaklaşım getirmekte ve asimetrik bir stant ile güneş takip sisteminin tek eksen hareketi ile güneşin iki eksende izlenebileceğini ortaya koymaktadır. TST, asimetrik stant yapısı nedeniyle gün boyunca çift eksende güneşi takip ederek sabah doğuya, öğlen güneye, öğleden sonra batıya bakmaktadır. TST, geleneksel takip sistemlerinden daha basit bir yapıya sahiptir. Bu nedenle TST'nin yatırım ve işletme maliyetleri neredeyse sabit güneş enerjisi sistemleri kadar düşüktür.

Geleneksel çift eksenli güneş takip sistemleri, rüzgâr ve buz yüklerine dayanacak ağır metal yapılar ve beton temeller gerektirir. Ancak TST'nin asimetrik ayağı, DC motor yardımıyla zemin yüzeyine farklı açılarda ve konumlarda güvenli bir şekilde yerleşebilir. TST beton ve ağır metal yapılar gerektirmediği için ilk kurulumu diğer güneş takip sistemlerine göre daha kolay ve ucuzdur. Günümüzde güneş takip sistemleri sensörsüz olarak tasarlanmakta ve bu sistemler tarih ve saat bilgilerini kullanarak güneşi takip etmektedir. Sensörsüz güneş takip sistemleri, daha az teknik arızaya sahip oldukları ve daha az ekipman gerektirdiği için sensörlü güneş takip cihazlarına göre daha ucuz ve verimlidir. TST'nin güneş takip yöntemi geleneksel takip sistemlerinden farklı olduğu için TST'nin optimum eğim ve azimut açıları için yeni hesaplamalar ve testler gerekmektedir. Bu çalışmada, TST'nin yeni bir güneş izleme yöntemine sahip olması ve maksimum hasat edilen elektrik gücü için daha önce test edilmiş bir veri olmaması nedeniyle TST, LDR sensörleri kullanılarak tasarlanmıştır. Tasarlanan TST'nin performansı farklı hava koşulları altında sabit güneş paneli ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak TST, PV panellerin ürettiği elektrik enerjisini, sabit panellere kıyasla %25 ile %38 arasında artırmıştır. Bu çalışma, TST'nin yüksek enerji verimliliği, basit yapısı ve düşük maliyeti gibi çeşitli avantajları nedeniyle sabit güneş sistemlerinin yerini alma potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Solar sistemler, güneş takip sistemleri, yüksek enerji verimliliği, maliyetlerin azaltılması.

SINGLE MOTOR DUAL AXIS SOLAR TRACKING SYSTEM DESIGN

ABSTRACT

Solar energy systems are clean energy sources that are the most preferred among renewable energy sources and attract large financial investments worldwide. It is necessary to increase the efficiency of solar energy systems in order to meet the increasing global energy demand with the development of technology and to reduce the amount of carbon emissions from fossil fuels. One of the most effective ways to increase energy harvest and efficiency in solar energy systems is to use solar tracking systems instead of fixed solar systems. Solar tracking systems, which maximize the amount of radiation coming to the panels by following the sun throughout the day, provide an average of 30-40% more electrical energy production. However, traditional solar tracking systems are not commercially preferred due to high initial investment costs and extra component requirements. The widespread use of solar tracking systems depends on the simplification, cost reduction and ease of production of these systems. TST, presented in this thesis, brings a new approach to solar tracking systems and reveals that the sun can be tracked in two axes with a single axis movement of the solar tracking system with an asymmetrical stand. Due to its asymmetrical stand structure, TST follows the sun on a double axis throughout the day and faces east in the morning, south at noon and west in the afternoon. TST has a simpler structure than traditional tracking systems. Therefore, TST's investment and operating costs are almost as low as fixed solar systems.

Traditional dual axis solar tracking systems require heavy metal structures and concrete foundations to withstand wind and ice loads. However, the asymmetric stand of TST can locate on the ground surface securely at different angles and positions with the help of an DC motor. Since TST does not require concrete and heavy metal structures, its initial installation is easier and cheaper than other solar tracking systems. Today, solar tracking systems are designed without sensors and these systems track the sun using date and time information. Sensorless solar tracking systems are cheaper and more efficient than the solar trackers with sensors as they have fewer technical faults and require less equipment. Since TST's solar tracking method is different from traditional tracking systems, new calculations and tests are required for optimum tilt and azimuth angles of TST. In this study, TST was designed using LDR sensors, as TST has a new solar tracking method and there is no previously tested data for maximum harvested electrical power. The performance of the designed TST was compared with the fixed solar panel under different weather conditions. As a result, TST has increased the electrical energy produced by PV panels between 25% and 38% compared to fixed panels. This study showed that TST has the potential to replace fixed solar systems due to its various advantages such as high energy efficiency, simple structure and low cost.

Keywords: Solar systems, solar tracking systems, high energy efficiency, reducing costs.

1. GİRİŞ

Teknolojinin gelişmesi ve artan nüfus ile beraber enerji ihtiyacı ve tüketimi her geçen gün artmaktadır. Günümüzde dünya enerji ihtiyacının büyük bir çoğunluğu petrol türevi ürünlerden sağlanmaktadır. İstatistiklere göre, petrol rezervlerinin 2050 yılına kadar tükeneceği ön görülmektedir (Banerjee et al., 2015). Petrol ürünlerinin çevreye vermiş olduğu zararlar ve gelecekte tükenecek olması, alternatif enerji kaynaklarını ön plana çıkarmıştır. Bu nedenle araştırmacılar artan enerji talebini karşılamak için yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmişlerdir. Güneş enerjisi; bolluğu, çevre dostu, ekonomik ve tükenme riskinin olmaması gibi birçok avantajı nedeniyle en önemli yenilenebilir enerji kaynağı olarak görülmektedir (Amir Abas et al., 2010).

Güneş enerjisi ısı ve ışık şeklinde yeryüzüne ulaşırken bir kısmı kırılma ve yansıma nedeniyle yeryüzüne ulaşmamaktadır. Dünya atmosferinin dışında güneş ışınımının şiddetinin değeri yaklaşık olarak 1370 W/m² olmasına rağmen kırılma ve yansımalar sonucu yeryüzüne ulaşan enerji miktarı 0-1100 W/m² arasındadır (Panwar et al., 2011). Güneş ışınlarının yeryüzüne ulaşmasını engelleyen bir diğer faktör bulutlardır. Bulutlar güneş ışınlarının saçılmasına neden olur ve bu nedenle yeryüzüne ulaşan güneş ışınları bir miktar zayıflar. Fotovoltaik (PV) sistemlerin verimliliğini belirleyen temel faktörlerin başında güneş radyasyon dağılımı ve yoğunluğu gelmektedir. Bu iki parametre coğrafi bölgelere göre farklılık göstermektedir. Yıllık güneşlenme süresinin yüksek olması nedeniyle yeryüzünde en yüksek güneş radyasyonu alan coğrafi bölge Afrika kıtasıdır. Ancak Afrika kıtasında, güneş radyasyonun elektrik üretimi için kullanılması potansiyeline oranla çok kısıtlıdır (Solargis, 2022).

Güneş enerjisinin maliyeti son on yılda %82 oranında azalmıştır. Bu nedenle güneş enerjisi AB'de en hızlı büyüyen yenilenebilir enerji kaynağı olarak görülmektedir. Ayrıca güneş enerjisi AB pazarında 2021 yılında 26 GW büyüme göstermiştir (European Commission, n.d.). International Renewable Energy Agency'nin yayınlamış olduğu rapora göre, küresel yenilenebilir enerji üretim kapasitesi 2019 yılında 2.537 GW'iken 2021 yılının sonunda 3.064 GW'a yükselmiştir. Ayrıca güneş enerjisi üretim kapasitesi 2019 yılı sonunda 586

GW'iken 2021 yılının sonunda yaklaşık %45'lik bir artışla 849 GW kapasiteye ulaşmıştır (IRENA, 2022). British Petroleum'un yayınlamış olduğu bir başka raporda ise, yenilenebilir enerjinin birincil enerjideki payının 2018'de %5'iken 2030 yılında %15'e ve 2045 yılında ise yaklaşık %40'a çıkması öngörülmektedir (Dale, 2020).

Türkiye'nin yıllık ve günlük toplam güneşlenme süresi sırasıyla 2,640 saat ve 7,2 saattir. Ortalama ve günlük toplam ışınım şiddeti ise sırasıyla 1.311 kWh/m² ve 3.6 kWh/m²'dir (Aksungur et al., 2013). Güneşlenme süresi ve güneş ışınımı miktarı PV panellerin enerji üretimi için büyük önem arz etmektedir. Türkiye'de en fazla güneş ışınımı yıllık 1460 kWh/m² ortalama ile Güneydoğu Anadolu bölgesine en az güneş ışınımı ise yıllık 1120 kWh/m² ortalama ile Karadeniz bölgesine aittir. Bunun nedeni, Karadeniz bölgesinin ekvatora uzak, Güneydoğu Anadolu bölgesinin ise ekvatora daha yakın olmasıdır. Ayrıca Karadeniz Bölgesinin en az ışınım almasının diğer nedenlerinden biri havanın nemli ve yağışlı olmasıdır. En fazla güneş ışınım şiddeti aralık ayında m² başına ortalama 729 kWh ile Güneydoğu Anadolu bölgesine, en az güneş ışınım şiddeti ise ortalama 345 kWh ile Marmara bölgesinde gerçekleşmiştir (Taşova, 2018).

Türkiye'de son yıllarda yenilenebilir enerjiye büyük yatırımlar yapılmaktadır. Statista'nın yayınlamış olduğu verilere göre, 2008 yılında Türkiye'de yenilenebilir enerji kapasitesi 14.329 MW iken 2021 yılında 53.233 MW'a ulaşmıştır (Jaganmohan, 2022). TEİAŞ (Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi) 2022 yılı Nisan ayı kurulu güç raporu verilerine göre ise ülkemizde, birincil enerji kaynaklarından üretim yapan santrallerin kurulu güçleri toplam 100.341,2 MW' tır. Güneş enerjisi, 8566 adet santral ve 8.084,9 MW kurulu güç ile toplam kurulu gücün %8,06'sını oluşturmaktadır (TEİAŞ, 2022). Ayrıca Türkiye'nin 2021 yılında elektrik üretimi ve tüketimi, teknolojinin gelişmesi ve sanayi üretimindeki artışa bağlı olarak yükselmiştir. 2021 yılında elektrik tüketimi ve üretimi 2020 yılına kıyasla %12 artarak sırasıyla 327 milyar kilovatsaat ve 329 milyar kilovatsaat olarak gerçekleşmiştir. Ayrıca Türkiye'nin 2021 yılında elektrik ithalatı 2020 yılına göre %23 artış göstererek 2,3 milyar kilovatsaate, elektrik ihracatı ise %68 artışla 4,1 milyar kilovatsaate yükselmiştir (TEİAŞ, 2021).

Güneşten elektrik enerjisi üretmek için PV paneller kullanılmaktadır. PV paneller günümüzde hızla büyüyen yenilenebilir enerji teknolojilerinden biri olup güneş ışığını

doğrudan elektrik enerjisine dönüştürürler (Ilse et al., 2018). Ayrıca PV panellerin enerji dönüşüm verimliliği, üzerine düşen ışık yoğunluğu ve güneşin gökyüzündeki konumunun sürekli değişmesiyle de doğrudan ilişkilidir. Bu yüzden PV panellerden elde edilecek gücün maksimum olabilmesi için güneş takip sistemleri (GTS) tasarlanmaktadır (Kaur et al., 2017). GTS'ler, PV panelin konumunun her zaman güneşe dik olmasını sağlar. Böylece PV panellerden elde edilecek verimlilik maksimum düzeye çıkarılır (K.Stefan, 2018). Sabit güneş panelinin kullanılması durumunda ise güneş panellerinin yönü kuzey yarım küre için güney, güney yarım küre için ise kuzey yönüne sabitlenmelidir. Ayrıca sabit bir PV panelin alacağı radyasyon miktarını en üst düzeye çıkarmak için PV panel bulunduğu yerin enlem bilgisine eşit bir açıya döndürülmelidir (Jain & Kaur, 2015). PV panellerin verimliliğini artırmak için sıklıkla kullanılan GTS'ler tek eksenli ve çift eksenli GTS'lerdir. Tek eksenli GTS'ler doğu-batı veya kuzey-güney, çift eksenli GTS'ler ise hem doğu-batı hem de kuzey-güney yöneliminde hareket yeteneklerine sahiptir (S Deepthi, A Ponni, R Ranjitha, 2013). Bununla birlikte tek eksenli GTS'ler basit yapılı ve ucuz, çift eksenli GTS'ler ise karmaşık yapıya sahip ve pahalıdır (Gündoğdu et al., 2016). Ayrıca çift eksenli GTS'ler tek eksenli GTS'lere nazaran daha verimlidir.

Bu tez çalışmasında güneş ışınlarının PV panellere dik açıyla gelmesini sağlayan, asimetrik stanta sahip çift eksenli güneş takip sistemi tasarlanmıştır. Ticari bir ürün olarak tasarlanan güneş takip sisteminin İngilizce ismi Turkish Solar Tracker ve İngilizce isime uyumlu olarak Türkçe ismi de Türk Solar Takipçi (TST) olarak belirlenmiştir. TST, kapalı döngü kontrolüne dayalı dinamik bir sistemdir. TST'nin güneşi takip etmesi için ışık sensörleri (LDR), doğu-batı yöneliminde hareketi sağlamak için DC motor ve kontrolör olarak Ardunio UNO kullanılmıştır. TST'nin yapısı geleneksel çift eksenli GTS'lerden farklı olarak tek eksende hareket ettiğinden, güneşi takip etmek için 2 adet motor yerine 1 adet motor yeterli olmaktadır. Ayrıca, TST asimetrik ayaklara sahip sehpası sayesinde güneş panellerini sabit tutmak için betona ihtiyaç duymamaktadır. TST asimetrik sehpa yapısı, betona ihtiyaç duymaması ve tek motor kullanımı gibi avantajları sayesinde GTS'lerin ilk kuruluş ve işletme maliyetlerini azaltmıştır.

Bu tez çalışması beş temel bölümden oluşturulmuştur. Giriş bölümünde; yenilenebilir enerji kaynakları ve güneş enerjisi potansiyeli hakkında özet bilgiler verilmiştir. Kaynak özetleri bölümünde; literatür çalışmalarından, güneş takip sistemlerinden, çalışmanın

amacı ve özgün değerinden bahsedilmiştir. Materyal ve yöntem bölümünde; deney düzeneği, PV panellerin optimum açı hesabı ve kontrol devresinin tasarımı sunulmuştur. Bulgular ve tartışma bölümünde; tasarlanan GTS ve sabit bir güneş paneline ait verilerin toplanması, PV panele ait açıların belirlenmesi ve analizi gerçekleştirilmiştir. Son olarak sonuçlar ve öneriler bölümünde; tasarlanan GTS ve sabit bir güneş paneli için deneysel sonuçlar tartışılmış ve sonraki çalışmalarda yapılması planlanan uygulamalar hakkında bilgiler verilmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

GTS'ler termal ve fotovoltaik solar sistemlerde enerji verimliliğini artırmak için kullanılabilmektedir. Güneş enerjili su ısıtma sisteminin termal performansını iyileştirmek için yapılan çalışmalar kısıtlıdır. Bu doğrultuda, (Abdelghani-Idrissi et al., 2018) çalışmalarında; güneş enerjili su ısıtma sisteminin termal verimliliğini artırmak için bir GTS tasarlamışlardır. Bu çalışmada güneş enerjisinin doğrudan ve dağınık akışı, güneş konumunun bir fonksiyonu olarak incelenmiştir. Ayrıca GTS ile farklı eğim açılarına sahip sabit güneş panelleri için termal kazanç, mevsimsel olarak karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, GTS'nin sabit güneş panellerine kıyasla termal enerjide %40'lık bir kazanç sağladığını göstermiştir.

PV sistemlerin yüksek verime sahip olması ve uygulanabilir şekilde tasarlanabilmesi için güneş ışınım değerleri, optimum eğim açısı, azimut açısı ve sıcaklık gibi çeşitli parametrelerin analiz edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, (Yilmaz et al., 2015) çalışmalarında; Gaziantep iklim koşullarında güneş ışınım değerlerini, güneş açılarını ve geliş açısı değerlerini analiz etmişlerdir. Ayrıca, 10 W gücüne sahip çift eksenli GTS ve sabit bir güneş paneli için deneysel çalışma yapmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre, çift eksenli GTS ve sabit bir güneş paneli gün boyunca sırasıyla 55,91 Wh ve 41,71 Wh enerji üretmiştir. Sonuç olarak, çift eksenli GTS sabit bir güneş paneline kıyasla %34,02 daha fazla enerji kazancı sağlamıştır. Ek olarak, teorik hesaplamalar neticesinde Gaziantep iline ait yüksek güçlü bir PV santral için benzer bir sistem kurulmuştur. Sabit bir güneş paneli ve çift eksenli GTS'nin çıkışında elde edilen enerjinin sırasıyla 7.233 kWh ve 10.096 kWh olduğu bulunmuş ve 10 W gücüne sahip ilk tasarımdan elde edilen veriler doğrulanmıştır.

GTS'lerin önemli bir dezavantajı gereksiz hareketlerle üretilen enerjiyi tüketmesidir. Bulanık Mantık Denetleyicisi gibi yapay zekâ yöntemleri ile bu durumun üstesinden gelmek mümkündür. Bulanık Mantık Denetleyicisi, 0 ile 1 arasında rastgele kararlar vermede bir insanın davranışlarını veya düşüncelerini andıran bir kontrol yöntemidir ve GTS'lerin daha verimli bir şekilde çalışmasına olanak sağlar. Bu nedenle, (Rosyadah et al.,

2022) çalışmalarında; sabit bir güneş paneline kıyasla Bulanık Mantık Denetleyicisi tarafından kontrol edilen bir GTS'nin performansını analiz etmişlerdir. Ölçümler, Endonezya'da farklı hava koşulları altında 15 gün boyunca alınmıştır. Çift eksenli GTS ve sabit güneş panellerinin çıkışında elde edilen maksimum güç sırasıyla 96,47 W ve 63,51 W elde edilmiş ve edilen en yüksek verim ise sırasıyla %25 ve %16 olarak bulunmuştur.

PV panellerde hasat edilen enerjiyi artırmak ve güneşin doğuşundan batışına kadar güneşin yolunu izlemek için GTS'lere ihtiyaç vardır. GTS'ler, PV panellerin azimut ve eğim açılarını ayarlayarak solar sistemlerin daha fazla ışınım toplamasını sağlar. Ayrıca optimum eğim açısı, PV sistemlerin kurulacağı bölgenin enlemine ve iklim değişkenlerine bağlıdır. (Bahrami et al., 2016) çalışmalarında; Avrupa ve Afrika'daki farklı konumların enlemleri için çift eksenli, doğu-batı, kuzey-güney, eğimli doğu-batı ve dikey eksenli GTS'lerin performansını araştırmışlardır. Yapılan bu çalışmada elde edilen sonuçlar sırasıyla şunlardır:

- Enlem bilgisi her ne olursa olsun çift eksenli GTS en iyi performansı gösteren GTS'dir.
- Enlem bilgisinin 64°'den küçük olduğu konumlarda, sabit güneş paneli en kötü performansa sahiptir. Buna karşılık, enlem bilgisinin 64°'den büyük olduğu konumlarda ise doğu-batı hareket sistemine sahip GTS en kötü performansı sergilemiştir.
- Enlem bilgisi 26° ile 57° arasında ise doğu-batı hareket sistemine sahip GTS kuzey-güney hareket sistemine sahip GTS'den daha verimlidir. Ancak, enlem bilgisi 57° ile 64° arasında olduğunda bu durum tam tersidir.
- Dikey eksenli GTS, enlem bilgisinin 26°'den büyük olduğu konumlarda en iyi performansa sahip ikinci GTS'dir.
- Enlem bilgisinin doğu-batı GTS'nin performansı üzerindeki etkisi diğer GTS'lere göre daha önemlidir. Bunun nedeni, enlem bilgisinin artmasına bağlı olarak doğu-batı GTS'nin performansının sürekli bir düşüşle en düşük sıraya geçmesidir.
- Farklı konumlar için çift eksenli GTS'ler, sabit bir güneş paneline kıyasla %17,72 ile %31,23 arasında bir enerji kazancına sahiptir. Bu durum tek eksenli GTS'ler için ise %0,42 ile %23,4 arasında değişmektedir.

GTS'ler PV panellerin verimliliğini ışık yoğunluğunu artırarak iyileştirir. GTS'leri geliştirmek için ışık toplama kayıpları, inverter kayıpları ve depolama kayıpları minimize edilebilir. Bu doğrultuda, (Makhija et al., 2017) çalışmalarında; kayıpları en aza indirebilmek için güneş ışınımı, akü voltajı ve sıcaklık gibi çeşitli verileri kart üzerine kaydeden ve Arduino IDE kullanılarak programlanmış bir otomatik çift eksenli GTS tasarlamışlardır. Tasarlanan sistemin çıkış voltajı 20° bir açıyla ayarlanmış sabit bir güneş paneli ile karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlara göre sabit güneş panelinin ortalama gerilim değeri 3,53 V iken çift eksenli GTS'nin ortalama gerilim değeri 4,815 V olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak tasarlanan sistem, sabit güneş paneline kıyasla %37 daha fazla verimlilik sağlamıştır.

Sabit eğim açısına sahip PV panellerde, güneş açısının göreli değişmesi nedeniyle önemli düzeyde enerji kaybı görülür. PV panel tarafından toplanan enerjiyi maksimize etmek ve güneşten gelen ışıma miktarının arttırılması için GTS'ler kullanılmaktadır. Ancak, GTS'ler, sabit sistemlere kıyasla ek maliyetlere sahiptir. Bu nedenle, (Hammoumi & Ghzizal, 2018) tarafından yapılan çalışmada; sistemde kullanılan bileşen sayısı azaltılarak düşük maliyetli ve basit bir aktif çift eksenli GTS tasarlanmıştır. Tasarlanan sistemin verimliliği Excel'e dayalı gerçek zamanlı bir sanal araç kullanılarak belirlenmiştir. Son olarak tasarlanan sistemin çıkışında elde edilen enerji sabit bir panelin ürettiği enerji ile karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlara göre tasarlanan sistem, sabit sisteme kıyasla %36,26 daha fazla enerji üretimi sağlamıştır.

Hindistan'ın kuzeydoğu eyaletlerine bağlı bazı bölgelere, dağlık arazi nedeniyle elektrik şebekesinin ulaşması son derece zordur. Elektriği olmayan bu bölgeler için alternatif olarak, bağımsız PV santrallerin kurulması etkili bir çözüm yöntemidir. Bu doğrultuda, Hindistan'ın ihtiyaç duyduğu elektrik talebini karşılamak için bazı araştırmacılar güneş enerjisi üretimi ile ilgili çeşitli çalışmalar yapmıştır. (Bhakta & Mukherjee, 2017) tarafından, Hindistan'ın kuzeydoğu eyaletlerinde sabit güneş paneli ve çift eksenli GTS için tekno-ekonomik ve performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Yıllık ortalama küresel güneş radyasyonu, sabit güneş paneli ve çift eksenli GTS için sırasıyla 0,180–0,220 kW/ m^2 ve 0,226–0,287 kW/ m^2 olarak bulunmuştur. Ayrıca her iki sistem için maliyet analizi yapılmıştır. Sonuçlar, sabit güneş paneli ve çift eksenli GTS için elde edilen enerji

maliyetinin sırasıyla 0,383 $/kWh-0,497 $/kWh ve 0,523 $/kWh-0,732 $/kWh arasında değiştiğini göstermiştir.

Tek eksenli ve çift eksenli GTS'ler sensörlü ve sensörsüz olmak üzere iki tipte sınıflandırılır. Sensör tabanlı GTS'ler, geri besleme prensibine göre çalışan kapalı çevrim bir sistemdir. Yani sistemde bulunan sensörler yardımıyla çıkış verisi girişe aktarılarak, güneş panelinin konum kontrolü yapılır. Sensörsüz GTS'lerde ise çıkış verisi girişe verilmez. Sensörsüz GTS'ler, güneşin gökyüzündeki konumunun belirlenmesi için zaman, tarih bilgisi ve güneş konum algoritmalarını kullanır. Bu doğrultuda, (Fathabadi, 2016) çalışmasında; sensör tabanlı ve sensörsüz olmak üzere iki yeni çift eksenli GTS tasarlamış ve enerji verimliliklerini karşılaştırmıştır. Tasarlanan bu sistemde, sensör tabanlı GTS 0,14°, sensörsüz GTS'nin ise 0,43°'lik bir izleme hatasına sahip olduğu görülmüştür. Deneysel sonuçlara göre sensör tabanlı GTS sabit güneş paneline kıyasla kış, ilkbahar, sonbahar, yaz mevsiminde ve bir yıl boyunca sırasıyla %27,7, %32,5, %37,3, %42,7 ve %35,22 oranında enerji verimliliğini arttırmıştır. Sensörsüz GTS'de ise sabit güneş paneline kıyasla enerji verimliliğindeki artış sırasıyla %19,1, %22,4, %26,1, %30,2 ve %24,59 olmuştur. Ayrıca sensör tabanlı GTS'nin karmaşık ve pahalı bir yapıya sahip olduğu belirtilmiştir.

Tacikistan, güneş enerjisi de dahil olmak üzere yenilenebilir enerji kaynakları bakımından büyük bir enerji potansiyeline sahiptir. Ancak, yenilenebilir enerji kaynaklarının sınırlı olması ve elektrik şebekelerinde meydana gelen enerji kayıpları nedeniyle, toplam üretim gerçek enerji talebini karşılayamamaktadır. Bu durum, Ekim-Nisan ayları arasında periyodik olarak elektrik kesintilerine neden olmaktadır. Enerji talebinin karşılanması için sıklıkla kullanılan ve çevreye zarar veren petrol ürünleri yerine solar sistemler ön plana çıkmıştır. Bu nedenle, (Safaraliev et al., 2020) tarafından yapılan çalışmada; Tacikistan'ın güneyi ve Pamir bölgesine ait güneş enerjisi potansiyelinin değerlendirilebilmesi için sabit bir güneş paneli ve çift eksenli bir GTS'nin performansı karşılaştırılmıştır. Aylık, mevsimlik ve yıllık bazda güneş radyasyonu seviyelerinin ölçümleri alınmıştır. Deneysel sonuçlara göre çift eksenli GTS sabit güneş sistemine kıyasla yaz mevsiminde %45,6, ilkbahar mevsiminde %27,2, sonbahar mevsiminde %27 ve kış mevsiminde %20,4 oranında verim artışı sağlamıştır.

Güneş, sürdürülebilirliği ve bolluğu nedeniyle önemli bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Uluslararası Enerji Ajansı, 2050'de yenilenebilir enerjinin yaklaşık %11'inin güneş enerjisi tarafından sağlanabileceğini tahmin etmektedir. Bu nedenle, (Tharamuttam & Ng, 2017) çalışmalarında; güneşin gökyüzündeki konumunu tespit edebilen mikrodenetleyici tabanlı ve hibrit algoritma destekli bir GTS'nin tasarlanmasını amaçlamışlardır. Bu sistem sensörler ve matematiksel modellerin birleşmesiyle oluşturulmuştur. Daha sonra bu sistemin çıkışında elde edilen enerji, bulutlu ve güneşli günlerde geleneksel aktif ve kronolojik algoritmalı sistemlerle karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak hibrit algoritmanın sabit güneş paneline kıyasla bulutlu günlerde geleneksel aktif sistemlerden %6,5, kronolojik algoritmalı sistemlerden ise %5 daha fazla enerji ürettiği görülmüştür.

Güneş ve rüzgâr enerjisi kaynaklarını aynı anda kullanan sistemler hibrit sistem olarak adlandırılırlar. Bu tür sistemler, sadece güneş veya rüzgâra dayalı bir sisteme kıyasla sistemin genel verimliliğini artırır ve enerji depolama gereksinimide azaltırlar. Ancak bu tür sistemlerin ekonomik ve verimli bir şekilde kullanılabilmesi için optimum konfigürasyonların belirlenmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda, (Sinha & Chandel, 2016) çalışmalarında; Hindistan'ın düşük rüzgârlı Hamirpur bölgesinde sabit eğimli güneş paneli ve farklı GTS'lere dayalı 6 kW gücünde PV-mikro rüzgâr hibrit sisteminin optimum kombinasyonlarını analiz etmişlerdir. GTS olarak yatay eksen günlük ayarlı, yatay eksen haftalık ayarlı, yatay eksen aylık ayarlı, yatay eksen sürekli ayarlı, dikey eksen sürekli ayarlı ve çift eksenli GTS'ler kullanılmıştır. Ayrıca sabit güneş panelleri Hamirpur bölgesinin enlem açısı olan 31° ve yıllık optimum eğim açısı olan 29,25°'ye ayarlanmıştır. Bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar ve öneriler elde edilmiştir:

- Hamirpur bölgesinde yıl boyunca aylık optimum eğim açıları 0° ile 60° arasında değişim göstermiştir. Mevsimsel optimum eğim açıları kış, ilkbahar, yaz ve sonbahar için sırasıyla 57,3°, 32,33°, 1,33° ve 26° olarak bulunmuştur. Ayrıca yıllık optimum eğim açısı hesaplanmış ve 29,25° olarak bulunmuştur.
- Enerji ve başlangıç maliyeti sırasıyla 3,165 $/kWh ve 90,726 $/kWh ile en yüksek çift eksenli GTS'de, en düşük ise sırasıyla 2,857 $/kWh ve 79,254 $/kWh ile dikey eksen sürekli ayarlı GTS'de görülmüştür.
- Hamirpur bölgesinin enlem açısı olan 31° ve konumun enlemine yakın olan 29,25° yıllık optimum açısı için sistemin ürettiği enerji arasında %0,03'lük küçük bir fark vardır. Bu nedenle sabit PV sistemin eğim açısı, enlem açısına göre ayarlanabilir.

- Enerji üretimi göz önüne alındığında çift eksenli GTS, sabit eğimli güneş panelinden %26,29, yatay eksen günlük ayarlı, yatay eksen haftalık ayarlı ve yatay eksen aylık ayarlı GTS'lerden %4,88 ve yatay eksen sürekli ayarlı GTS'den ise %6,58 oranında daha fazla enerji üretmiştir.
- Aylık optimum eğim açısına ayarlanmış PV sistem, 31° enlem açısına ayarlı sabit sistemle karşılaştırıldığında şubat, mart, nisan, ağustos, eylül ve ekim aylarında sırasıyla %2,72, %0,108, %2,12, %4,76, %0,16 ve %1,56 gibi çok az enerji artışı sağlamıştır. Ayrıca yatay eksen günlük ayarlı ve yatay eksen sürekli ayarlı GTS'ler şubat, temmuz, ağustos ve aralık aylarında daha az, nisan, mayıs ve haziran aylarında ise daha fazla enerji üretmiştir. Bu nedenle aylık optimum eğim açısı ayarlanarak PV sistemler kullanılabilir.
- Rüzgâr enerjisi üretim sisteminde bir değişiklik yapılmadığı için her bir durum için enerji üretimi 176 kW/h / kWp/yıl'dır.

PV modüller, ortam sıcaklığı, yağmur, gölgelenme, kirlenme vb. parametrelerden etkilenirler. Bu nedenle, (Akbar et al., 2017) çalışmalarında; Irak'ın Kerkük şehrinde farklı sıcaklık ve hücre kaplama durumu altında çift eksenli bir GTS tasarlamış ve sabit güneş paneli ile karşılaştırmışlardır. Ölçümler, Kerkük yerel saatiyle sabah 9'dan akşam 4'e kadar alınmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, çift eksenli GTS'nin sabit güneş paneline kıyasla %26,22 oranında performans artışı sağladığı görülmüştür.

PV sistemlerin performansını optimize etmek için maksimum güç noktası takibi (MPPT) ve güneşin konumunun izlenmesi gibi çeşitli teknikler kullanılmaktadır. Literatürde PV sistemlerin verimliliğini artırmak için bu teknikler ile alakalı birçok çalışma mevcuttur. Ancak, bu çalışmaların birçoğunda, GTS'lerin verimliliğiyle bağlantılı olan enerji tüketimi dikkate alınmamıştır. Bu nedenle, (Tchakounté et al., 2022) çalışmalarında; çok az enerji tüketen akıllı bir GTS tasarlayarak sabit bir güneş paneline göre performansını analiz etmişlerdir. Ölçümler, Ngaoundere Üniversitesi'nde farklı hava koşulları altında sabit bir güneş paneli ve tasarlanan GTS için alınmıştır. Sonuçlar, bulutlu ve güneşli günler için elde edilen enerji kazancına bağlı olarak GTS'nin sırasıyla %0,22 ve %0,14 düzeyinde bir enerji tüketimine sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca, GTS'nin enerji tüketimi göz önüne alındığında, sabit bir güneş paneline göre bulutlu ve güneşli günler için sırasıyla %22,45 ve %25,86 oranında bir enerji artışı sağladığı görülmüştür.

Güneşin gökyüzündeki konumu gün boyunca değişmektedir. Bu durum PV panellerin çıkış gücünü ve verimini etkiler. PV paneller, güneş ışınlarının açısına dik bir konuma yerleştirilir ve böylece verim artışı sağlanır. Bu doğrultuda, (Saeedi & Effatnejad, 2021) çalışmalarında; PV panelleri güneş ışınlarının açısına göre ayarlayan LDR'lere dayalı yeni bir çift eksenli GTS tasarlamışlardır. Tasarlanan GTS, LDR'ler ile birlikte Wheatstone köprü devresi işlevini kullanan kapalı döngü bir sistemdir. Tasarlanan takip sistemine ve sabit panele ait I-V ve P-V ölçümleri 7:00 ile 19:00 saatleri arasında her 30 dakikada bir alınmış ve karşılaştırılmıştır. Üretilen maksimum enerji, sabit sistem için yaklaşık 6.14 Wh/Wp ve çift eksenli GTS için yaklaşık 9.10 Wh/Wp'dir. Sonuç olarak, çift eksenli GTS'nin verimlilik kazancının sabit panelden %48,2 daha yüksek olduğu görülmüştür.

PV panellerin çıkış gücünün arttırmak için eksenel izleme ve MPPT gibi çeşitli yöntemler mevcuttur. Bu yöntemlerin verimli bir şekilde uygulanması için, kontrolörler temelde geleneksel yöntemler (değiştir&gözle ve tepe tırmanma) ve akıllı yaklaşımlar (bulanık mantık ve yapay sinir ağları) kullanır. Bu doğrultuda, (Bawa & Patil, 2013) çalışmalarında; bulanık mantık kontrolüne ve MPPT'ye dayalı bir GTS tasarlamışlardır. Ayrıca MPPT için DC-DC dönüştürücü kullanılmıştır. Tasarlanan sistem hem MATLAB ortamında simüle edilmiş hem de Arduino Uno kullanılarak gerçek zamanlı olarak test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar bulanık mantık kontrolünün sistem verimliliğini %33.41 artırdığını göstermiştir.

Günümüzde PV sistemlerin verimliliğini iyileştirmek araştırmacıların temel görevidir. GTS'ler, PV panellerin güneşe doğru yönelmesini sağlayarak enerji verimliliğini artırır ve eksen yapısına göre tek eksenli ve çift eksenli olarak sınıflandırılırlar. Mevcut literatürde, güneş panellerinin verimliliğini arttırmak için çeşitli mekanizma ve yöntemlere sahip tek eksenli GTS'ler ele alınmaktadır. Ancak, olumsuz hava koşulları altında LDR'lere ve programa dayalı GTS'lerin performansı ve karşılaştırmalı analizi hakkında çalışmalar kısıtlıdır. Bu nedenle, (Kuttybay et al., 2020) tarafından yapılan çalışmada; LDR ve programa dayalı tek eksenli GTS tasarlanmış ve farklı hava koşulları altında sabit bir güneş paneli ile performansı karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlara göre bulutlu ve yağışlı hava koşulları altında program tabanlı GTS'nin LDR kullanan GTS'ye kıyasla %4,2 daha verimli olduğu görülmüştür. Ayrıca program tabanlı GTS, sabit bir güneş paneli ile karşılaştırıldığında %57,4 daha fazla enerji kazancı sağlamıştır.

PV projelerin kâr durumuna, maliyetine ve elde edilen enerjinin artırılmasına ait çözümlere hâlâ ihtiyaç duyulmaktadır. GTS'lerin PV projelere dahil edilmesi enerji üretiminin iyileştirilmesine katkı sağlar. Ancak bu tip PV projelerde, GTS'lerin neden olduğu ek maliyet aşılması gereken temel zorluktur. Bu nedenle, (Talavera et al., 2019) çalışmalarında; seviyelendirilmiş elektrik maliyetini hesaplayarak GTS'nin, sabit güneş paneline kıyasla kâr durumunu ve maliyet açısından rekabetçiliğini analiz etmişlerdir. Sonuçlar, sabit, tek eksenli ve çift eksenli GTS'ler için seviyelendirilmiş elektrik maliyetinin sırasıyla %213, %240 ve %262 olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, sabit ve tek eksenli GTS'lerin, çift eksenli GTS'lere kıyasla elektrik maliyeti açısından rekabetçi olduğu görülmüştür. Ancak seviyelendirilmiş elektrik maliyetinin iyi olması yüksek kârlılık anlamını ifade etmez. Bu yüzden tekno-ekonomik ve finansal parametrelere göre optimizasyon stratejilerinin belirlenmesi ve elektrik tarifelerinin analize dahil edilmesi gerekmektedir.

Açık döngü sistemi, güneşi izlemek için basit bir yaklaşıma sahiptir ve maksimum güç üretimi elde etmek için manuel hizalama gerektirir. Kapalı döngü sistemi ise karmaşık devre yapısı ve sistem maliyetine sahiptir. Ancak, açık döngü sistemine kıyasla güneş takibi açısından yüksek doğruluk sunar. Sistem maliyeti ve basit yaklaşım göz önüne alınarak (Sidek et al., 2017) tarafından açık çevrim kontrol yöntemine sahip çift eksenli GTS üzerine bir çalışma yapılmıştır. GTS, standart silindirik alüminyum oyuk ve poliüretan kullanılarak tasarlanmış ve üretilmiştir. Ayrıca GPS bilgilerini kullanan güneş yolu yörünge algoritması takip sistemine yerleştirilmiş ve güç üretimi sabit eğimli PV sistem ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, güneş yolu yörünge algoritmasına göre ±0,5° doğrulukla otomatik konumlandırma gerçekleştirilmiştir. Ek olarak bulutlu ve güneşli bir günde çift eksenli GTS, sabit eğimli PV sisteme kıyasla sırasıyla %12,8 ve %26,9 güç artışı sağlamıştır.

Sabit bir eğim açısına sahip güneş panelleri yerine güneşi takip eden GTS'ler kullanılarak yaklaşık %20 ila %40 oranında enerji artışı sağlanmaktadır. Bulutlu hava koşullarında yapılmış son çalışmalarda, PV panelin başucuna (yatay konum) baktığı sabit güneş panellerinin kullanıldığı görülmektedir. Bu nedenle, (Quesada et al., 2015) çalışmalarında; yüksek enlem derecelerine sahip bölgelerde bulutlu hava koşulları altında optimum izleme stratejisinin tespit edilmesini ve sabit güneş paneli ile karşılaştırılmasını amaçlamışlardır.

Deneysel sonuçlar GTS'lerin mevsimlere bağlı olarak ve sabit güneş paneline kıyasla %96 oranında dezavantajlı olduğunu göstermiştir. Ayrıca GTS'lerin ilkbaharda bulutlu günlerde sabit güneş panellerinden %25'e kadar daha az enerji ürettiği doğrulanmıştır.

Son zamanlarda, iki yüzeyli modüller de PV sistemlerin performansını artırmak için kullanılmaya başlanmıştır. İki yüzeyli modüller, PV hücresinin hem ön yüzeyine düşen hem de arka yüzeyine yerden yansıyan ışıktan enerji üretebildikleri için geleneksel modüllere kıyasla %25'e varan enerji kazancı sağlayabilmektedir. Bu nedenle, (Barbosa de Melo et al., 2022) çalışmalarında; Brezilya'nın yedi farklı bölgesinde hem sabit hem de GTS'ler için tek yüzlü ve iki yüzlü modüllere ait simülasyon sonuçlarının karşılaştırmalı bir analizini gerçekleştirmişlerdir. Deneysel sonuçlar, farklı hava koşullarına ve sistem konfigürasyonuna bağlı olarak iki yüzeyli modüllerde kazancın %3,78 ile %8,16 arasında değiştiğini göstermiştir. Bu durum GTS'ler için ise %13,40 ile %18,20 arasındadır. Ayrıca hem iki yüzeyli modüllerin hem de GTS'lerin kullanılması durumunda elde edilen kazancın %19,39 ile %27,39 arasında olduğu bulunmuştur.

İran'ın mevcut güneş potansiyelinin fazla olması, güneş enerjisinin kullanımını diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına kıyasla daha fazla geliştirmiştir. Bu potansiyel, yıllık enerji talebini karşılamak, petrol türevlerine olan bağımlılığı azaltmak ve konutların ihtiyaç duyduğu enerjiyi sağlamak için etkili bir çözümdür. Bu amaçla, (Vaziri Rad et al., 2020) çalışmalarında; İran'ın farklı iklimlere sahip sekiz bölgesinde şebeke bağlantılı konut güneş enerjisi kurulumları için çeşitli GTS'lerin tekno-ekonomik analizini gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlar, GTS'lerin kullanılmasının, konutlar için ihtiyaç duyulan panel sayısını önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. Ancak panel sayısındaki bu azalma, izleme ünitelerinin yüksek maliyeti nedeniyle her zaman uygun maliyet ile sonuçlanmamaktadır. Elde edilen sonuçlara göre çift eksenli GTS en verimli GTS'dir ve sabit güneş paneline kıyasla güç üretimini ortalama %32 oranında artırmıştır. Ayrıca dikey GTS, 0,241 $/kWh enerji maliyeti ile en uygun maliyet verimliliğine sahiptir ve sabit güneş paneline kıyasla çıkış gücünde ortalama %23 iyileşme göstermiştir.

PV izleme sisteminin seçimini ve verimini etkileyen önemli parametrelerden biri de sıcaklıktır. Aşırı ısınma ve aşırı güneş radyasyonu, panellerin verimini önemli ölçüde azaltır. Bu nedenle, (Eldin et al., 2016) çalışmalarında; güneşin takip edilebilmesi ve bir

PV panelin performansını tespit edebilmek için bir matematiksel model belirlemişlerdir. Belirlenen bu matematiksel model soğuk ve sıcak iklim bölgeleri için uygulanmış ve deneysel olarak kanıtlanmıştır. Almanya'nın Berlin kenti gibi soğuk bir şehir için GTS'den elde edilen elektrik enerjisindeki kazancın yaklaşık %39 olduğu bulunmuştur. Ancak bu durum Mısır'ın Aswan kenti gibi sıcak bir şehirde olması durumunda, enerji kazancının %8'i geçmediği görülmüştür. Enerji kazancında ki bu düşüşün, PV panellerin aşırı ısınmasının yarattığı olumsuzluktan kaynaklandığı belirtilmiştir. Sonuç olarak bir PV panelin ürettiği elektrik enerjisinin %5 ila %10'u GTS'ler için bu analize eklenirse, sıcak ülkelerde GTS'nin verimli olmadığı ifade edilmiştir.

Güneş panellerinin ürettiği elektrik gücü, güneş pilleri, sıcaklık ve ışık şiddeti seviyesi gibi çeşitli faktörlerden etkilenmektedir. Bu faktörler, geleneksel güneş paneli uygulamalarının nispeten düşük çıkış verimliliği ile sonuçlanmasına neden olmaktadır. PV sistemlerin verimliliği, güneş panelini güneşe doğru yönlendiren GTS ile arttırılabilir. Bu yüzden, (Syafii et al., 2015) çalışmalarında; güneşin konumunun tespiti için yerel tarih, saat, coğrafi konum, yükseklik ve saat dilimi gibi çeşitli parametrelerden faydalanarak sensörsüz bir çift eksenli GTS tasarlamışlardır. Tasarlanan sensörsüz GTS ve sabit güneş sistemine ait elektrik güç çıkışının ölçümü 7 saat boyunca alınmıştır. Elde edilen sonuçlar sensörsüz GTS'nin sabit güneş sistemine kıyasla çıkış gücünü ve verimini %26 artırdığını göstermiştir.

GTS'ler, güneş ışınımını gün doğumundan gün batımına kadar güneş paneline dik olarak gelecek şekilde ayarlayan sistemdir. Eksen yapısına göre çift eksenli ve tek eksenli olarak sınıflandırılırlar. Çift eksenli GTS'ler hem azimut hem de yükselme açısını baz alırken, tek eksenli GTS'ler sadece yükselme açısını baz alırlar. Bu doğrultuda, (S et al., 2021) çalışmalarında; minimum güç tüketimine ve düşük maliyete sahip Arduino kontrollü bir çift eksenli GTS tasarlamışlardır. Ölçümler, Malezya Perlis Üniversitesinde çift eksenli GTS ve sabit eğimli bir güneş paneli için güneşli ve bulutlu hava koşullarında sabah 7.00'den akşam 7.00'ye kadar alınmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, çift eksenli GTS'nin çıkış gücü, sabit eğimli bir güneş paneline kıyasla güneşli bir günde %15,93 ile %21,64 arasındadır. Buna karşılık, bulutlu bir günde GTS'nin çıkış gücündeki artış %53,27 olarak bulunmuştur. Ayrıca tasarlanan GTS'nin izleme maliyeti, sabit eğimli bir güneş panelinden sadece %20 daha fazladır.

Yeryüzüne düşen güneş radyasyonu güneşli bir gün için deniz seviyesinde güneş ışınlarına dik bir yüzeyde yaklaşık 1000 W/m²'dir. Bu enerjiyi verimli bir şekilde kullanmak için birçok araştırma yapılmasına rağmen radyasyon toplama verimliliği yetersizdir. Çift eksenli GTS, güneş enerjisinden etkin bir şekilde yararlanabilmeyi sağlayan yöntemlerden biridir. Bu doğrultuda, (Sawant et al., 2019) çalışmalarında; Ardunio tabanlı bir çift eksenli GTS tasarlamış ve tek eksenli GTS ile performans analizi gerçekleştirmişlerdir. Güneşli bir günde sabah 07:00 ile gece 01:00 arasında ölçümler alınmıştır. Elde edilen sonuçlara göre çift eksenli GTS'nin, tek eksenli GTS'ye kıyasla verimliliği %24,78 oranında arttırdığı gözlemlenmiştir.

GTS'lerden elde edilen kazanç, sabit güneş panellerine kıyasla araştırmacıların büyük ilgisini çekmektedir. Bununla birlikte, GTS'lerde yatırım, işletme ve bakım maliyetleri fazladır. Bu yüzden, (Hammad et al., 2017) çalışmalarında; Ürdün, Zarqa, Hashemite Üniversitesi'nde kurulu sabit güneş paneli ve çift eksenli GTS'nin deneysel performansını ve ekonomik analizini gerçekleştirmişlerdir. Her biri 7,98 kWp kapasiteye sahip sabit güneş paneli ve çift eksenli GTS'ye ait ölçümler 9 Şubat 2014 ile 8 Şubat 2015 arasında alınmıştır. Deneysel sonuçlar GTS'nin yıllık enerji üretimini sabit sisteme kıyasla %31,29 arttırdığını göstermiştir. Ayrıca sabit güneş sistemine ait elektrik maliyetinin, GTS'ye göre %20 daha ucuz olduğu bulunmuştur.

PV modüller, sıcaklık, güneş ışınlarının geliş açısı, kirlenme ve ışınların bulutlar üzerindeki saçılımı gibi çeşitli nedenlerle maksimum verimlilikle çalışamazlar. Ayrıca, bulutlu hava koşullarında PV modüllerin performansındaki düşüş, yeşil ekonomiye geçiş için önemli bir dezavantajdır. Sonuç olarak, bulutlu hava koşullarında PV modüllerin verimliliğini artırmak için çeşitli algoritmaların geliştirilmesi ve uygulanması gerekmektedir. Bu nedenle, (Saymbetov et al., 2021) çalışmalarında; bulutlu hava koşullarında çift eksenli GTS'lerin performansını, uyarlamalı bir algoritma ile karşılaştırmışlardır. Üç gün boyunca alınan ölçümler neticesinde önerilen uyarlamalı algoritma, çift eksenli GTS'ye kıyasla %41 daha verimlidir. Ayrıca, Kazakistan, Almatı'daki meteorolojik veriler kullanılarak üç ay boyunca, altı güneş paneline sahip çift eksenli GTS tarafından üretilen enerjide tahmin edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, aynı koşullar altında önerilen uyarlamalı algoritmanın, geleneksel çift eksenli GTS'lerden %66-69 arasında daha fazla enerji ürettiğini göstermiştir.

PV sistemler ve yoğunlaştırılmış PV sistemler, izleme doğruluğu için farklı taleplere sahiptir. PV sistemler için düşük doğrulukta bir izleyici, alıcı tarafında yakalanan güneş enerjisinde kayıplara sebep olacağından yoğunlaştırılmış PV sistemlerinde kullanılamaz. Ayrıca, PV sistemler için yüksek doğrulukta bir izleyici kullanılıyorsa, kontrol sistemi nedeniyle maliyetler artacaktır. Bu nedenle, (Yao et al., 2014) çalışmalarında; güneş enerjisi sistemleri için çok amaçlı çift eksenli bir GTS geliştirmişlerdir. Geliştirilen bu sistemde ana ekseni doğu-batı yönünde konumlandıran bir sapma saati montaj sistemi kullanılmıştır. Bu montaj sistemine bağlı olarak, PV sistemler için normal izleme stratejisi, yoğunlaştırılmış PV sistemler için ise günlük ayarlama stratejisi geliştirmişlerdir. Deneysel sonuçlar, normal izleme stratejisine ve günlük ayarlama stratejisine sahip sistemin enerji verimliliğinin, sabit bir güneş paneline kıyasla sırasıyla %23,6 ve %31,8'den daha fazla olduğunu göstermiştir.

PV modülden maksimum çıkış gücü elde etmek için, panelin yüzeyi, mümkün olan en yüksek miktarda güneş radyasyonuna maruz kalmalıdır. Bu amaçla, (Morón et al., 2017) çalışmalarında; farklı ışınım koşulları altında Ardunio kontrolörüne dayalı ve düşük maliyetli bir GTS prototipi geliştirmişlerdir. Bu prototip iki eksende güneş takibi yapılmasına olanak sağlayan geri beslemeli kontrol sistemine dayalı bir sistemdir. Bu sistem daha sonra sabit güneş sistemi ile 5 ay boyunca ölçümler yapılarak karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar GTS'nin sabit sisteme kıyasla %18 enerji kazancı sağladığını göstermiştir. Son olarak, prototipin diğer ticari çalışmalara kıyasla %12 oranında düşük bir performans sergilemesine rağmen düşük imalat maliyeti, basitliği ve binaya entegre edilebilirliği sayesinde evlerde kurulum için rekabetçi olduğu belirtilmiştir.

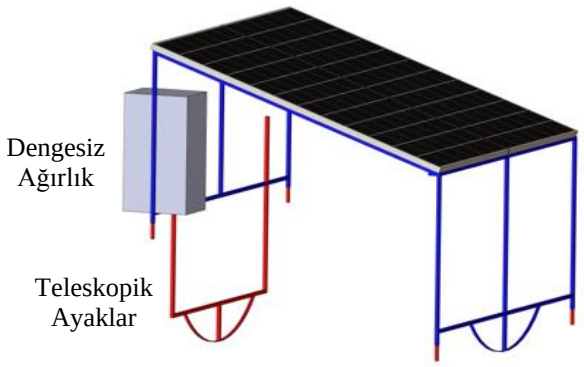
Solar sistemler, petrol ürünlerine olan bağımlılığını azaltmak ve günümüzde elektrik ihtiyacını karşılamak için giderek daha fazla kullanılmaktadır. Bununla birlikte, solar sistemlerin maliyeti yüksektir ve birçoğunun sabit sistem yapısına sahip olması nedeniyle enerji üretimi nispeten düşüktür. Solar sistemlerde GTS'ler kullanılarak yaklaşık %20 ile %40 arasında enerji üretimi artışı sağlanabilmektedir. Bu doğrultuda araştırmacılar, çeşitli algoritmalar ve kontrol yöntemleri geliştirererek GTS'lerin enerji üretimini artırmayı hedeflemiştir. Yapılan literatür taramasında tek eksenli ve çift eksenli GTS'lerin sabit güneş panellerine kıyasla üretilen enerji miktarını ortalama %35'e kadar arttırdığı görülmüştür. Çift eksenli GTS'ler sabit sistemlere kıyasla mevsimsel olarak incelendiğinde

enerji artışı kış ve yaz mevsiminde sırasıyla yaklaşık olarak %20 ve %45 olarak gerçekleşmiştir. Ayrıca çift eksenli GTS'lerin enerji maliyetinin sabit güneş panellerine kıyasla yaklaşık %10 ile %40 arasında daha fazla olduğu belirtilmiştir. Seviyelendirilmiş elektrik maliyeti göz önüne alındığında ise çift eksenli GTS'lerin elektrik maliyetinin sabit güneş panellerine ve tek eksenli GTS'lere kıyasla sırasıyla %23 ve %10 daha fazla olduğu ifade edilmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Türk Solar Takipçi (TST)

2 adet 250 Wp polikristal PV panelden oluşan TST'nin üç boyutlu modeli Şekil 3.1'de gösterilmektedir. TST'nin köşelerinde 4 adet teleskopik ayak, ön ve arka kısmında ise 2 adet yarım daire ayak bulunmaktadır. Arka kısımda bulunan yarım daire teleskopik ayak tamamen kapatıldığında, TST'nin önü ve arkası hizalanır, böylece panellerin eğim açısı sıfır olur. Ön ve arka kısımda bulunan yarım daire ayaklar belirli aralıklarla TST'ye iki metal parça ile vidalanır, böylece panellerin eğim açısı ön ve arka teleskopik yarım daire ayak ile ayarlanır. Metal parçaların boylarını ayarlanmadan önce vidalar gevşetilir ve metal parçaların boyları ayarlandıktan sonra tekrar vidalar sıkılır. PV panellerin optimum eğim açısı ayarı, TST'nin gün ortası konumuna göre yapılır. Gün ortasında, TST'nin yönünü ayarlayan DC motor sayesinde paneller sadece yarım daire ayaklar üzerinde kalmaktadır. TST gün ışığında genellikle yarım daire bacaklar üzerindedir ve yarım daire bacaklar TST'nin bir eksende hareketini kolaylaştırır. Gün doğumu ve gün batımında TST, sırasıyla doğu ve batı taraflarında iki düz teleskopik ayak üzerindedir. Optimum eğim açıları, PV paneller doğuya veya batıya baktığında köşelerdeki teleskopik ayaklar ile ayarlanır. DC motor yardımıyla tek eksende hareket eden TST, asimetrik duruşu sayesinde gün ışığının başlangıcında doğuya, öğlen saatlerinde güneye ve gün ışığının sonunda batıya bakmaktadır.



Şekil 3.1. TST'nin üç boyutlu görünümü

2 PV panel için tasarlanmış olan sabit solar sistem ve TST Şekil 3.2 (a)'da gösterilmektedir. Her iki sistemde de panel açıları mayıs ayı için optimum eğim açısı ve azimut açılarına uygun olarak ayarlanmıştır. TST standının ön ve arka kısmı hareket kolaylığı sağlaması için yarı oval yapılmıştır. Stant iki nokta üzerinde hassas bir dengede durduğundan sağa veya sola doğru hareket ettirmek için az bir kuvvet yeterli olmaktadır. TST'nin optimum eğim açısı ayarlanırken bacakları aşağı yukarı ve öne arkaya doğru ayarlanabilmektedir. 2 PV panelli TST'nin bacak boyu sadece bir kişi tarafından kolaylıkla yapılabilmektedir. TST bacaklarını ayarlamak için uzanabilir bacakları tutan cıvataların gevşetilmesi ve uzunluk ayarlandıktan sonra tekrar sıkılması yeterlidir. Ayrıca günün başı ve sonunda daha hassas ayar için standın köşelerinde uzayabilir dört adet bacak bulunmaktadır. Standın bacak boyu ayarları sezonluk yapılacağı için kullanıcılara önemli bir iş yükü getirmemektedir. Şekil 3.2 (b)'de solar sistemlerin arkadan görünümü gösterilmektedir. TST'nin kontrolü için gerekli olan motor ve sürücü devresi standın arka bacağı üzerine montaj edilmiştir. TST'de kullanılan DC motor 24 V olduğundan 12 V'luk 2 adet aküye ihtiyaç vardır. Ayrıca güneş panelinden elde edilen enerji ile aküler şarj edilmiştir. Akü sayısının ve kapasitesinin fazla olması durumunda, stant yükünü azaltmak için aküler muhafazalı bir şekilde yere konulmalıdır. Rüzgâr ve kar yüküne karşı standın mukavemetini artırmak için bacaklar dik yerine daha geniş açılı olacak şekilde konumlanmıştır.



Şekil 3.2. Deneylerde kullanılan TST'nin ön (a) ve arka (b) kısımlarından görünümleri

TST tek yönde hareket etmesine rağmen, asimetrik standı sayesinde çift eksenli olarak güneşi takip etmektedir. Şekil 3.3'te TST'nin günün farklı saatlerinde aldığı pozisyonlar

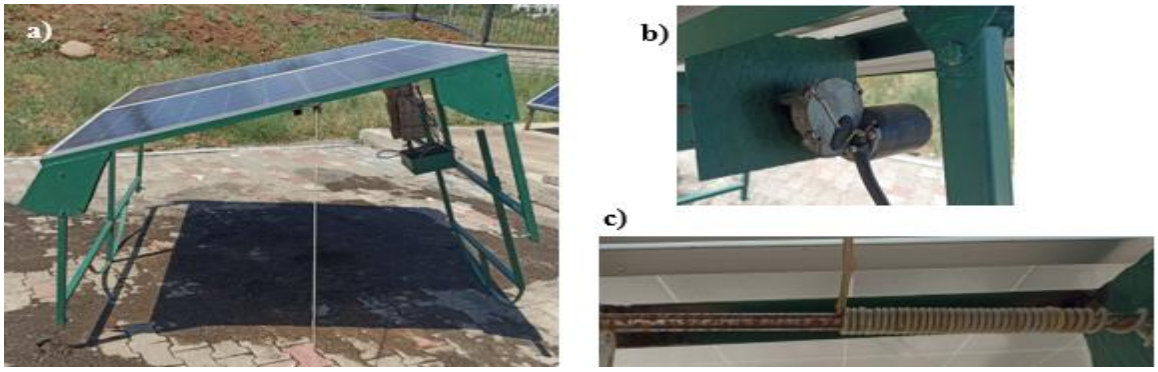
gösterilmektedir. Sabah saatlerinde TST panel yüzeylerini tamamen doğuya çevirmiştir. Ön ve arka bacakların uç kısımlarında uzunluklar eşit olduğu için paneller yataya paralel durmaktadır. Saatlerin ilerlemesiyle güneş pozisyonu değişmekte ve LDR sensörler yardımıyla TST güneşi takip etmektedir. Gün ortasında güneş tam zirvedeyken TST panelleri güneye doğru bakmaktadır. Öğlen saatlerinde oluşan eğim açısı daha önce mayıs ayı için ayarlanan açıdır ve bu açı 0°-60° arasında ayarlanabilmektedir. Eğim açısı, TST'nin kullanılacağı bölgeye bağlı olarak aylık, mevsimlik ve yıllık olarak ayarlanabilmektedir. Akşam saatlerinde TST panel yüzeylerini yönünü batıya doğru çevirmiştir. Panellerin konumu sabah saatlerine göre asimetrik bir pozisyona sahiptir. Geleneksel GTS'lerde panellerin yere yakın olan kenarı gün boyunca aynıdır ve yere paraleldir. Halbuki TST'nin yere yakın olan kenarı gün içerisinde asimetrik hareket nedeniyle doğal olarak değişmektedir. Sabah, öğle ve akşam saatlerinde sırasıyla panellerin doğu, güney ve batıya bakan kenarları yere daha yakın olmaktadır. Ayrıca yere yakın olan kenarın yer ile arasındaki açı güneşin pozisyonuna bağlı olarak sürekli değişmektedir. Bu nedenle, TST'nin eğim ve azimut açıları hesaplanırken referans nokta olarak panel kenarları yerine panel yüzeyinin norm vektörü alınmaktadır.



Şekil 3.3. TST'nin öğleden sonra, öğle ve öğleden önceki görünümleri

TST sistemi güneşi doğu ve batı yönünde tek eksen takip etmektedir. TST'nin doğu tarafından yandan görünümü Şekil 3.4 (a)'da gösterilmektedir. TST'nin bir tarafında yük bulunurken diğer tarafı ise çelik destekli plastik iple yere sabitlenmiştir. Yere sabitlenen çelik destekli plastik ip, TST'nin optimum açıyı bulması için doğu-batı doğrusunda hareket etmesini sağlamaktadır. Ayrıca optimum açı bulunduktan sonra TST'nin eğik pozisyonda kalmasını yine çelik destekli plastik ip sağlamaktadır. Çelik destekli plastik ipi yere

sabitlemek için metal angajman cıvatası kullanılmıştır. Angajman cıvataları toprak ve taş parke gibi sert yüzeylere montaj edilebildikleri için ekstra betona ihtiyaç yoktur. Böylece, TST hemen her yerde sıfır beton kullanılarak montaj edilebilmektedir. TST'nin doğu-batı doğrusunda hareketini sağlayan 24 VDC motorun TST'ye bağlantısı Şekil 3.4 (b)'de verilmiştir. Şekil 3.4 (b)'de görüldüğü üzere 24 VDC motor sac levhaya sabitlenmiştir. Motorun mil kısmına ise 12 mm çapa sahip çelik çubuk mil eklenmiştir. Şekil 3.4 (c)'de çelik destekli plastik ipin sarıldığı, DC motora bağlı çelik çubuk mil görülmektedir. TST'nin batı kısmına eklenen yük sayesinde sistemin doğu-batı hareketi TST'nin doğu kısmına bağlanan çelik destekli plastik iple sağlanmaktadır. Motor çelik destekli plastik ipi sardığında TST doğuya doğru, çelik destekli plastik ipi bıraktığında ise TST batıya doğru yönelim gösterir. Güneş konumunu takip etmek için iki adet LDR sensör kullanılmıştır. LDR sensörler sayesinde PV paneller güneşi doğu ve batı yönünde takip etmektedir.

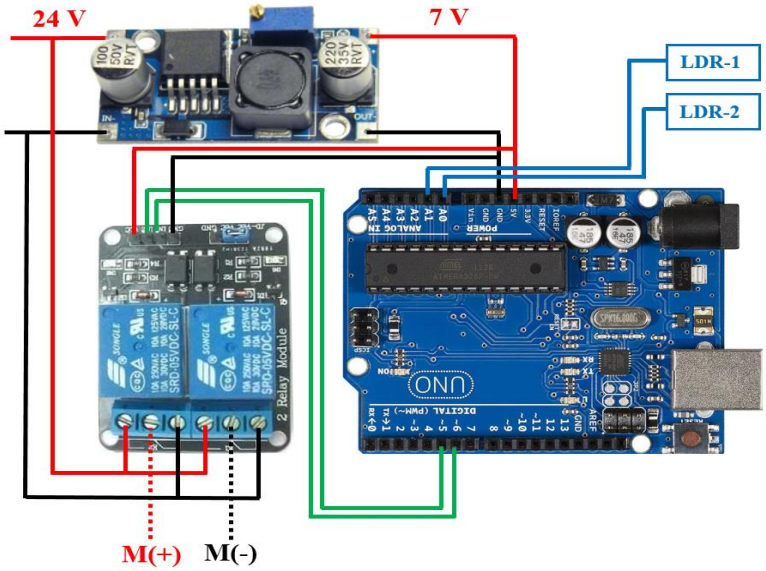


Şekil 3.4. a) TST'nin yandan görünüşü, b) DC motorun bağlantısı, c) halat sarma mekanizması

3.2. TST'nin Kontrol Devresi

Şekil 3.5'te TST'nin motor sürücü devresinin bağlantı şeması görülmektedir. Sürücü devrede kontrolör olarak Ardunio UNO kullanılmıştır. TST'nin kontrol devresine ait yazılım EK-A de sunulmuştur. Ardunio dünya genelinde yaygın olarak kullanılan ve deneysel uygulamalar için pratik çözüm ve donanıma sahip bir işlemcidir. Ardunio UNO'nun tavsiye edilen besleme gerilimi 7-12 V aralığındadır. Bununla birlikte yapılan uygulamalarda besleme geriliminin düşük olması durumunda Ardunio'nun ömrü daha uzun olmaktadır. Bu nedenle akülerden gelen 24 V gerilimi 7 V'a dönüştürmek için XL4015 Ayarlanabilir DC/DC voltaj regülatörü kullanılmıştır. TST'nin iki yönlü hareketini sağlamak için bir adet 24 V DC motor kullanılmıştır. Motorun yönü, 2 kanallı 5

V röle kartı ile kontrol edilmektedir. Röle modülleri, ucuz, yüksek güç kapasiteli ve kolay kontrol edilebilmeleri nedeniyle Ardunio uygulamaları için oldukça uygundur. Sürücü devresi temel olarak LDR'lerden okunan direnç değerlerini karşılaştırarak motorun ileri veya geri yönde dönmesini sağlamaktadır. Aydınlanmanın fazla olduğu tarafa bakan LDR'de direnç, diğerine nazaran fazla olmaktadır. TST aydınlanmanın fazla olduğu yöne dönmesi durumunda LDR dirençleri arasındaki fark azalır. LDR'lerin direnç değerlerinin birbirine eşit veya çok yakın olması durumunda panellerin yüzeyi güneşe doğrudur, bu nedenle, motorun durması gerekir.



Şekil 3.5. Motor sürücü devresinin bağlantı şeması

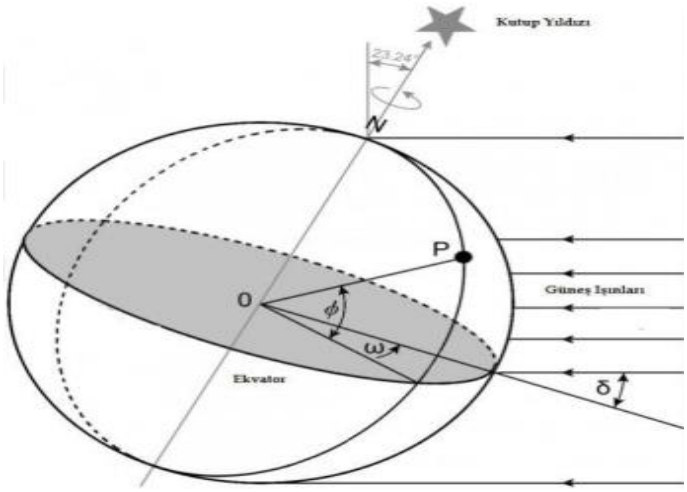
3.3. Asimetrik TST'nin Optimum Eğim Açısının Belirlenmesi

3.3.1. Güneş Açıları

Yeryüzüne düşen güneş ışınları, dünya üzerindeki yüzeyler arasında bazı açılar oluşturur. Güneşin gökyüzündeki konumu hesaplayabilmek ve güneş enerjisinden etkin bir biçimde yararlanabilmek için bu açıların bilinmesi gerekmektedir. Ayrıca güneşin dönüşü bulunduğu yerin enlem, boylam, tarih ve gün içindeki zaman dilimine göre değişmektedir. Bu nedenle güneşin pozisyonunun belirlenmesinde güneş açıları önem arz etmektedir. Güneşin gökyüzündeki konumunun tespiti için yapılacak hesaplamalar, temel ve türetilen güneş açılar olmak üzere ikiye ayrılır (İlcihan, 2019).

3.3.1.1. Temel Güneş Açıları

Belirli zaman periyotlarında yeryüzündeki herhangi bir noktaya düşen güneş ışınları enlem açısı (Ø), saat açısı (ω) ve deklinasyon (δ) açısı yardımıyla hesaplanabilir. Şekil 3.6'da enlem açısı (Ø), saat açısı (ω) ve deklinasyon (δ) açısı ve birbirleriyle yapmış oldukları bağıntılar görülmektedir.



Şekil 3.6. Enlem (Ø), saat (ω) ve deklinasyon (δ) açılarının görünümü (İlcihan, 2019)

3.3.1.1.1. Enlem Açısı (Ø)

Ekvatorun kuzeyindeki veya güneyindeki herhangi bir noktayı dünya merkezine birleştiren doğrunun, ekvator düzlemi ile yaptığı açıdır. Enlem açısı ekvatordan kuzeye doğru gidildikçe pozitif değer, güneye doğru ise negatif değer alarak, $-90 \leq \emptyset \leq 90$ değerleri arasında değişim gösterir (G. Yılmaz, 2018).

3.3.1.1.2. Saat açısı (ω)

Yeryüzündeki herhangi bir noktanın boylamı ile güneş ışınlarının bulunduğu boylam arasındaki açıdır. Saat açısının başlangıç noktası güneş öğlesi yani saat 12:00 olarak kabul edilir. Güneş öğlesinden önce negatif (-), sonra ise pozitif (+) değerini alır. Her 1 saat için 15º'lik bir saat açısı oluşmaktadır. Bunun nedeni dünyanın güneş etrafında 1 tam tur dönmesi ile 360º'lik bir açı yapacak olmasıdır. Bir günün 24 saat olması göz önüne

alındığında 360º'lik bu açı her 1 saat için 15º olur. Ayrıca Saat açısı -180 ≤ ω ≤ 180 arasında değişmektedir. Saat açısının hesabı denklem (3.1) yardımıyla hesaplanır (Altıntaş, 2012).

$$\omega = ((\text{saat} * 60 + \text{dakika}) - 720)/4 \quad (3.1)$$

3.3.1.1.3. Deklinasyon Açısı (δ)

Deklinasyon açısı güneş ışınları ve yerküre arasında ki açı ilişkisi bakımından en önemli olan açıdır. Sapma açısı olarak da bilinmektedir. Kısaca, mevsimlere ve aylara göre güneş ışınlarının yeryüzüne geliş açısı olarak ifade edilir. Deklinasyon açısının pozitif değeri kuzey yarım küreyi, negatif değeri ise güney yarım küreyi gösterir. Dünyanın kendi ekseni ve yörünge düzleminin normali ile yaptığı 23,45° açı olmak üzere -23,45° ≤ δ ≤ 23,45° değerleri arasında yer alır (Duffie et al., 2020). Yörünge düzlemi ile dünyanın ekvator düzlemi arasında ki bu açı yaz gündönümünde (21 Haziran) en yüksek değerini (23,45°), kış gündönümünde (21 Aralık) ise en düşük (-23,45°) değerini alır. Şekil 3.7'de deklinasyon açısının yıl boyu içerisindeki değişimi verilmektedir. Deklinasyon açısı Şekil 3.7'de görüldüğü üzere, kendini her yıl tekrarlamaktadır. Bununla birlikte deklinasyon açısı aynı tarihe sahip bir günde her yıl için çok az değişime sahip olduğundan belirli bir günde sabit kabul edilebilir.



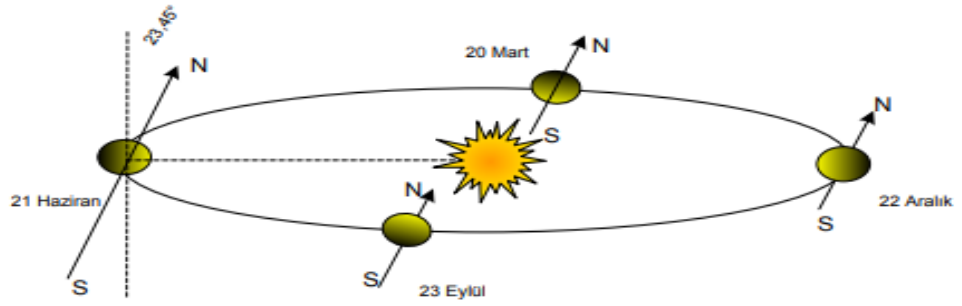
Şekil 3.7. Deklinasyon açısının yıllık değişimi

Güneş ışınım hesapları yapılırken genellikle belirlenen ayın her günü yerine aylık ortalama deklinasyon açısının tekabül ettiği günler kullanılmaktadır. Bu yüzden aylık ortalama deklinasyon açısına ihtiyaç duyulur. Her bir ay için tavsiye edilen ortalama günler, gün sayıları ve ortalama deklinasyon açıları Tablo 3.1'de verilmiştir (Klein, 1977).

Tablo 3.1. Her bir ayın ortalaması için tavsiye edilen günler, gün sayıları ve ortalama deklinasyon açıları (Bakirci, 2012)

Aylar	Tarih	Yılın günü	Deklinasyon açı değeri
Ocak	17 Ocak	17	-20,92
Şubat	16 Şubat	47	-13,29
Mart	16 Mart	75	-2,42
Nisan	15 Nisan	105	9,41
Mayıs	15 Mayıs	135	18,79
Haziran	11 Haziran	162	23,09
Temmuz	17 Temmuz	198	21,18
Ağustos	16 Ağustos	228	13,45
Eylül	15 Eylül	258	2,22
Ekim	15 Ekim	288	-9,60
Kasım	14 Kasım	318	-18,91
Aralık	10 Aralık	344	-23,05

Deklinasyon açısı yıl içerisinde farklı değerler almasına rağmen dönence noktalarında (20 Mart ilkbahar dönencesi, 23 Eylül sonbahar dönencesi), güneş ışınlarının ekvatora dik gelmesi nedeniyle sıfır değerini almaktadır (Aydın, 2020). Şekil 3.8'de ekinoks ve gün dönümleri için deklinasyon açısı görülmektedir.



Şekil 3.8. Ekinoks ve gün dönümlerinde deklinasyon açısı (Aydın, 2020)

Deklinasyon açısının hesaplanması için ampirik formüller kullanılmaktadır. Literatürde sıklıkla kullanılan ampirik formüller denklem 3.2'de 1969 yılında oluşturulan Cooper formülü ve denklem 3.3'te 1980 yılında oluşturulan Lunde formülüdür (Ajder, 2011).

$$\delta = 23{,}45 * \sin(360\ ((n + 284))/365) \quad (3.2)$$

$$\delta = 23{,}45 * \sin(360\ ((n - 80))/370) \quad (3.3)$$

Burada n, 1 Ocaktan 31 Aralık'a kadar yılın gün sayısını belirten değişkendir. Tablo 3.2'de deklinasyon açısının değişik yıllar için aynı günlerde ölçülen ve hesaplanan değerleri görülmektedir.

Tablo 3.2. Farklı yıllarda her ayın 1'i için ölçülen ve hesaplanan deklinasyon açısı değerleri (Altıntaş, 2012)

Aylar	**Ölçülen Deklinasyon Açı Değeri**		**Hesaplanan Deklinasyon Açı Değeri**	
	1950	**1976**	**1969**	**1980**
	Coffari(1977)	**Thekaekara(1977)**	**Cooper**	**Lunde**
Ocak	-23,07	-23,09	-23,01	-22,84
Şubat	-17,32	-17,4	-17,52	-17,07
Mart	-7,88	-7,62	-8,29	-7,81
Nisan	4,23	4,51	4,02	4,35
Mayıs	14,83	15,04	14,9	15,04
Haziran	21,97	22,04	22,04	22,04
Temmuz	23,17	23,12	23,12	23,15
Ağustos	18,14	18,04	17,91	18,12
Eylül	8,58	8,32	7,72	8,17
Ekim	-2,53	-3,15	-4,22	-3,57
Kasım	-14,11	-14,4	-15,36	-14,73
Aralık	-21,41	-21,79	-22,11	-21,76

3.3.1.2. Türetilen Güneş Açıları

Eğimli ve yatay bir düzleme gelen güneş ışınım miktarının bulunmasında, güneş ışınlarının doğrultusuyla ilgili bazı açılar kullanılır. Bu açılar; zenit açısı, güneş yükseklik açısı, güneş

geliş açısı, yüzey azimut açısı, güneş azimut açısı ve eğim açısı olup türetilen güneş açıları olarak ifade edilmektedir (M. Yılmaz, 2013).

3.3.1.2.1. Güneş Geliş Açısı (θ)

Yeryüzündeki farklı noktalara doğrudan gelen güneş ışınlarının o yüzeyin normali ile yapmış olduğu açıdır. Bu açı değeri aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$cos\theta = cos\theta_Z cos\beta + sin\theta_Z sin\beta \cos(\gamma_s - \gamma) \quad (3.4)$$

Burada γ, yüzey azimut açısını ifade etmektedir.

3.3.1.2.2. Yüzey Azimut Açısı (γ)

Yüzeyin dikeyinin yatay düzlemde oluşturduğu izdüşümü ve yerel boylama göre sapmasını gösteren açıdır. Bu açı değeri -180º ile 180º arasında değişim gösterir ve güneye bakan yüzey için sıfır, doğuya yönelen yüzey için pozitif ve batıya yönelen yüzeyde ise negatif değer alır.

3.3.1.2.3. Güneş Yükseklik Açısı (α)

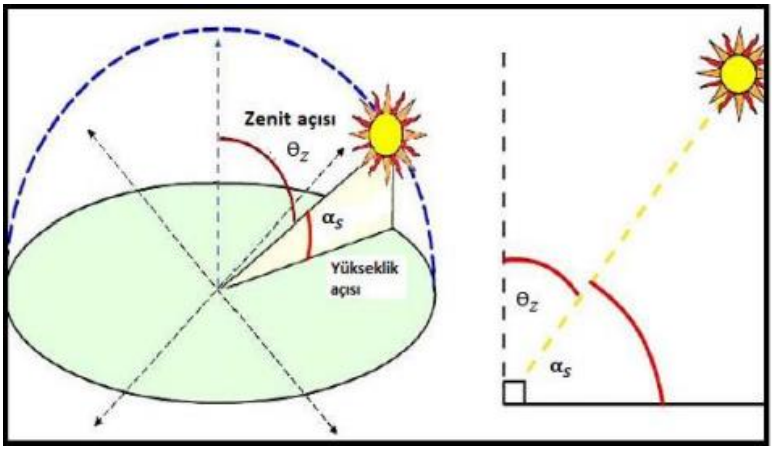
Güneş ışınımı ile yatay yüzeyin oluşturduğu açıdır. Güneş yükseklik açısı ile zenit açısının toplamı her zaman 90º'dir. Buradan güneş yükseklik açısı;

$$\alpha = 90° - \theta_Z \quad (3.5)$$

şeklinde ifade edilir. Güneş yükseklik açısı, öğle vakitlerinde maksimum değerini alır, güneşin doğuşu ve batışı esnasında ise sıfırdır. Güneş yükseklik açısı denklem (3.6) ile hesaplanır;

$$\alpha = sin^{-1}[\cos(\delta)\cos(\emptyset)\cos(\omega)\sin(\delta)\sin(\emptyset)] \quad (3.6)$$

Şekil 3.9'da zenit açısı ile güneş yükseklik açısı arasındaki bağıntı görülmektedir.



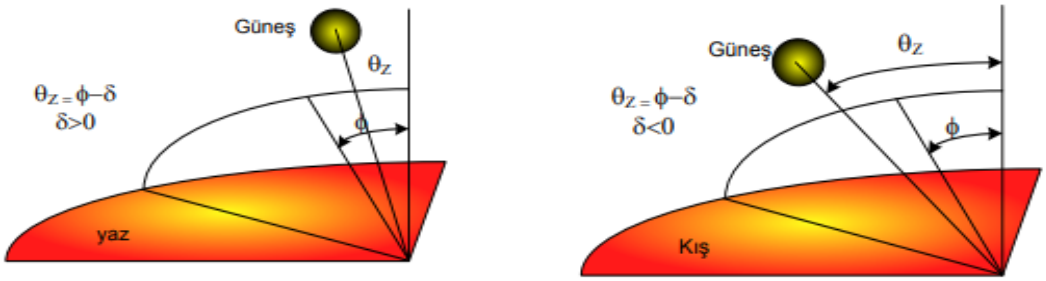
Şekil 3.9. Zenit açısı ile güneş yükseklik açısı arasındaki ilişki (Muslim, 2019)

3.3.1.2.4. Zenit Açısı (θ_Z)

Direkt güneş ışınımı ile yatay yüzeyin normali arasındaki açıdır. Zenit açısı, diğer bir ifade ile güneş ışınlarının yatay düzleme geliş açısıdır. Bu açı, güneşin doğuşu ve batışı esnasında 90 º iken, öğle saatinde güneş ışınlarının yatay düzleme dik bir şekilde gelmesi durumunda ise 0º olmaktadır (Karafil et al., 2015). Zenit açısı diğer açılara bağlı olarak denklem (3.7) ile hesaplanabilir;

$$cos\theta_Z = \cos(\delta)\cos(\emptyset)\cos(\omega) + \sin(\delta)\sin(\emptyset) \quad (3.7)$$

Denklem (3.7)'de belirtilen zenit, deklinasyon ve enlem açılarının yaz ve kış mevsimindeki değişimi Şekil 3.10'da gösterilmektedir (Messenger & Abtahi, 2018).



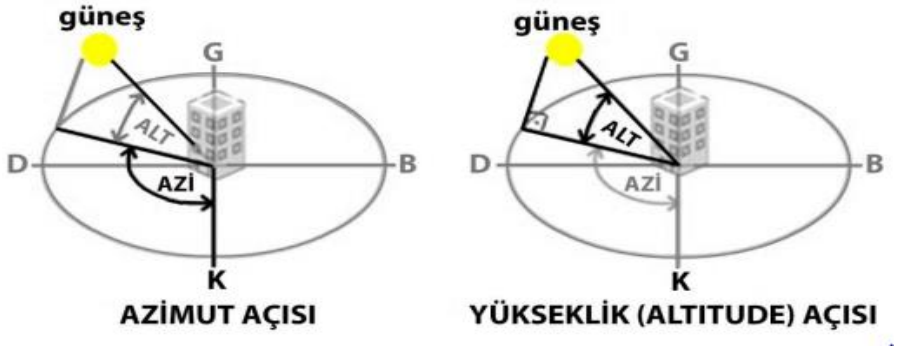
Şekil 3.10. Zenit, deklinasyon ve enlem açılarının yaz ve kış mevsimlerindeki görünümü (Messenger & Abtahi, 2018)

3.3.1.2.5. Güneş Azimut Açısı (γ_s)

Güneş azimut açısı**,** kuzey-güney doğrultusu ile direkt güneş ışınımı arasındaki açı olarak tanımlanır. Güneş azimut açısı -180º ile 180º arasında değişim gösterir. Başlangıç noktasında yani güney yönünde 0º olarak kabul edilir ve doğuya doğru negatif batıya doğru pozitif değerler alır. Bu açı denklem (3.8) ile hesaplanır;

$$\gamma_s = \cos^{-1}\left[(\sin(\emptyset)\ \cos(\theta_Z) - \sin(\delta))/(\cos(\emptyset)\ \sin(\theta_Z))\right] \quad (3.8)$$

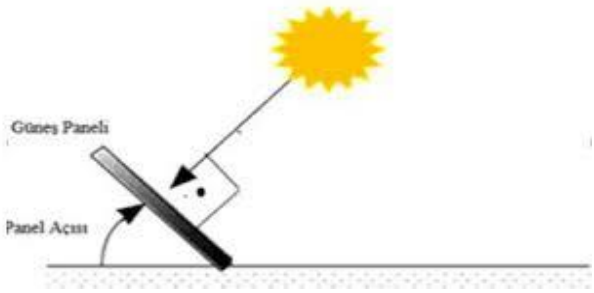
Şekil 3.11'de ise güneş azimut açısı ile güneş yükseklik açısının ilişkisi görülmektedir.



Şekil 3.11. Güneş azimut ve güneş yükseklik açısı arasındaki ilişki (Ofluoglu, 2018)

3.3.1.2.6. Eğim Açısı (β)

Eğim açısı, eğik düzlem ile yatay düzlem ile arasında kalan açıdır. Bu açı 0º ile 90º arasında değişim gösterir. Şekil 3.12'de eğim açısı görülmektedir (Dal, 2021).

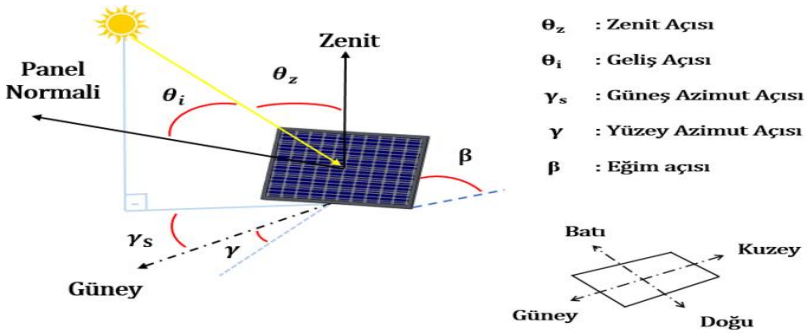


Şekil 3.12. Yatay düzlemdeki panel eğim açısı (Dal, 2021)

3.4. Bingöl İçin Azimut ve Optimum Eğim Açısının Hesabı

3.4.1. Azimut Açısının Hesabı

PV sistemlerinin performansını artırmak için birçok yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden bir tanesi de güneş açılarıdır. Bu açılardan azimut açısı ve eğim açısı PV sistemlerin verimliliklerinde büyük öneme sahiptir. Şekil 3.13'te azimut açısı ve eğim açısı görülmektedir. Başlangıçta azimut açısının hesabı gerçekleştirilmiştir (NOAA, 2018).



Şekil 3.13. PV panellerin üzerine düşen çeşitli güneş açılarının görünümü

İlk olarak, radyan cinsinden (γ) kesirli yıl hesaplanır.

$$\gamma = (2\pi)/365 * (n - 1 + (sa - 12)/24) \quad (3.9)$$

Eşitlik 3.9 sayesinde zaman denklemini dakika cinsinden ve güneş sapma (deklinasyon) açısını ise radyan cinsinden tahmin edebiliriz.

$$zd = 229.18 * [(0.000075 + 0.001868\cos(\gamma) - 0.032077\sin(\gamma) - 0.01461\cos(2\gamma) - 0.040849\sin(2\gamma)] \quad (3.10)$$

$$\delta = 0.006918 - 0.399912\cos(\gamma) + 0.070257\sin(\gamma) - 0.006758\cos(2\gamma) + 0.000907\sin(2\gamma) - 0.002697\cos(3\gamma) + 0.00148\sin(3\gamma) \quad (3.11)$$

Daha sonra, gerçek güneş zamanı aşağıdaki denklemler sayesinde hesaplanır. Önce dakika cinsinden zaman farkı bulunur, daha sonra dakika cinsinden gerçek güneş saati bulunur.

$$zf = zd + 4 * \lambda - 60 * sd \quad (3.12)$$

$$ggs = 60 * sa + dk + s/60 + zf \quad (3.13)$$

Zaman denklemi (zd) dakika cinsinden, boylam (λ) derece cinsinden, saat dilimi (sd) UTC'den saat cinsindendir. Ayrıca sa saattir (0-23), dk dakikadır (0-59), s saniyedir (0-59).

Derece cinsinden güneş saat açısı;

$$\omega = (ggs/4) - 180 \quad (3.14)$$

Güneş zenit açısı (θ_z) yatay yüzeyin normali ile güneş ışınları arasında oluşan açıdır ve saat açısı (ω), enlem (Ø) ve güneş sapma açısından (δ) bulunabilir:

$$\theta_z = cos^{-1} * [\sin(Ø) * \sin(\delta) + \cos(Ø) * \cos(\delta) * \cos(\omega)] \quad (3.15)$$

Güneş azimut açısı güneş ışınlarının kuzeye göre, saat dönüş yönünde sapmasını gösteren açıdır ve şuradan bulunur:

$$\gamma_s = cos^{-1} * [(\sin(Ø) * \cos(\theta_z) - \sin(\delta))/(\cos(Ø) * \sin(\theta_z))] \quad (3.16)$$

Güneş yükseklik açısı güneş ışınımı ile yatay yüzey arasındaki açıdır ve eşitlik (3.17) ile hesaplanır.

$$\alpha = 90^o - \theta_z \quad (3.17)$$

Olur.

3.4.2. Optimum Eğim Açısının Hesabı

PV paneller elektrik üretiminde temel olarak güneş radyasyonundan yararlanırlar. Bu yüzden PV panellerin üreteceği elektrik enerjisi hesaplanırken radyasyon miktarının bilinmesi gerekmektedir. PV panellerin konumlandırıldığı bölge, coğrafi koşullar,

tozlanma, kirlenme ve çevresel faktörler PV panellerin verimliliğini etkileyen başlıca unsurlardır. PV panellerin üzerine düşen toplam radyasyon miktarı dağınık radyasyon, yerden yansıyan radyasyon ve doğrudan gelen radyasyon toplamı olarak ifade edilmektedir. Eğik düzleme gelen toplam radyasyon denklem (3.18) ile tanımlanır.

$$H_T = H * (1 - H_d/H) * R_b + H_d * ((1 + \cos\beta)/2) + H * \rho * ((1 - \cos\beta)/2) \quad (3.18)$$

Burada ρ yerin yansıtma oranı, R_b ise direkt radyasyonun yataydaki radyasyona oranı ve β ise PV panelin eğim açısını ifade eder. H_d, aylık ortalama günlük yayılı radyasyon oranı olup denklem (3.19) ile hesaplanır (Liu, B, Jordan, 1962).

$$H_d = H\,(1 - 1.13\ H/H_0\ ) \quad (3.19)$$

H_0, aynı bölgede aylık ortalama atmosfer dışı yatay düzleme gelen günlük güneş radyasyonu olup denklem (3.20) ile hesaplanır.

$$H_0 = 24 * 3600 * (G_{SC}/\pi) * k * (\cos(Ø)\cos(\delta)\sin(\omega_s) + ((2\pi\omega_s)/360) \sin(Ø)\sin(\delta)) \quad (3.20)$$

Burada ω_s , hesaplama yapılan ayın ortalama gününde eğik düzlem için güneş ışınlarının eğik yüzey üzerine ilk düşüş saat açısını simgeler ve denklem (3.21) ile hesaplanır.

$$\omega_s = \min\,((\cos^{-1}(-\tan Ø * \tan\delta)) \,|\,|\, (\cos^{-1}(-\tan(Ø - \beta) * \tan\delta))) \quad (3.21)$$

Denklem (3.21)'de kullanılan 'min', bu iki değerden küçük olanının kullanılacağını ifade etmektedir. Ayrıca Ø yerel enlem açısını, ω_s saat açısını, δ deklinasyon açısını ifade etmektedir. Deklinasyon açısı denklem (3.22) ile hesaplanır.

$$\delta = 23{,}45 * \sin(360\ ((n + 284))/365) \quad (3.22)$$

Burada 'n' değeri, 1 Ocak'tan 31 Aralık'a kadar gün olarak zamanı ifade etmektedir. H_0 atmosfer dışı yatay düzleme gelen günlük güneş radyasyonu formülünde belirtilen güneş sabitinin düzeltme faktörü (k), günlere göre değişimi ifade etmektedir ve denklem (3.23) ile hesaplanır.

$$k = 1 + 0{,}033 * \cos((360 * n)/365\ ) \quad (3.23)$$

R_b değeri, eğik düzlem üzerine gelen direkt güneş radyasyonun yatay düzlem üzerine gelen radyasyon miktarına oranını ifade eder ve denklem (3.24) ile hesaplanır.

$$R_b = (\cos(Ø - \beta) * \cos(\delta) * \sin(\omega_s) + (\omega_s * \pi/180) * \sin(Ø - \beta * \sin(\delta)) / (\cos(Ø) * \cos(\delta) * \sin(\omega_s) + (\omega_s * \pi/180) * \sin(Ø) * \sin(\delta)) \quad (3.24)$$

Gelen radyasyon miktarı R_b hesaplandıktan sonra yatay düzleme gelen aylık ortalama günlük güneş radyasyonu H denklem (3.25) ile hesaplanır.

$$H = H_0((a + b) * m/N) \quad (3.25)$$

Burada m/N izafi güneşlenme süresi, a ve b ise bölgeye bağlı sabitlerdir. Türkiye için bölgeye bağlı a ve b sabitleri deklinasyon açısı (δ), rakım (Z) ve enlem açısına (Ø) bağlı olarak belirlenmiştir ve sırasıyla denklem (3.26) ve (3.27)'de verilmiştir (Çağlar, 2018).

$$a = 0.103 + (0.000017 * Z) + (0.198 * \cos(Ø - \delta)) \quad (3.26)$$

$$b = 0.533 - (0.165 * cos(Ø - \delta)) \quad (3.27)$$

İzafi Güneşlenme Süresi formülünde kullanılan 'm' aylık ortalama günlük güneşlenme süresini ifade etmektedir. 'N' ise aylık ortalama gün uzunluğu olup denklem (3.28) yardımıyla hesaplanır.

$$N = 2/15 * (cos^{-1}(-\tan Ø * \tan\delta) \quad (3.28)$$

H_T, 0° ile 90° arasındaki tüm eğim açısı (β) değerleri kullanılarak hesaplanmaktadır. Radyasyon miktarının maksimum olduğu anda ki eğim açısı değeri, o ayın optimum eğim açısı olarak ifade edilir. İlgili yerin aylık optimum eğim açısı denklem (3.29) ile yıllık optimum eğim açısı ise aritmetik ortalamaya bağlı olarak denklem (3.30) ile hesaplanır.

$$\sum \beta_{Eğim} = \beta_{Ocak} + \beta_{Şubat} + \beta_{Mart} + \beta_{Nisan} + \beta_{Mayıs} + \beta_{Haziran} + \beta_{Temmuz} + \beta_{Ağustos} + \beta_{Eylül} + \beta_{Ekim} + \beta_{Kasım} + \beta_{Aralık} \quad (3.29)$$

$$\sum \beta_{Opt} = \sum \beta_{Eğim} /12 \quad (3.30)$$

Literatürdeki birçok çalışma göz önüne alındığında aritmetik ortalamaya bağlı olarak yıllık optimum eğim açısının hesaplandığı görülmüştür. Bu tez çalışmasında ikinci bir yöntem olan denklem (3.31) ile aylık maksimum radyasyon miktarları dikkate alınarak yıllık optimum eğim açısı hesaplanmıştır.

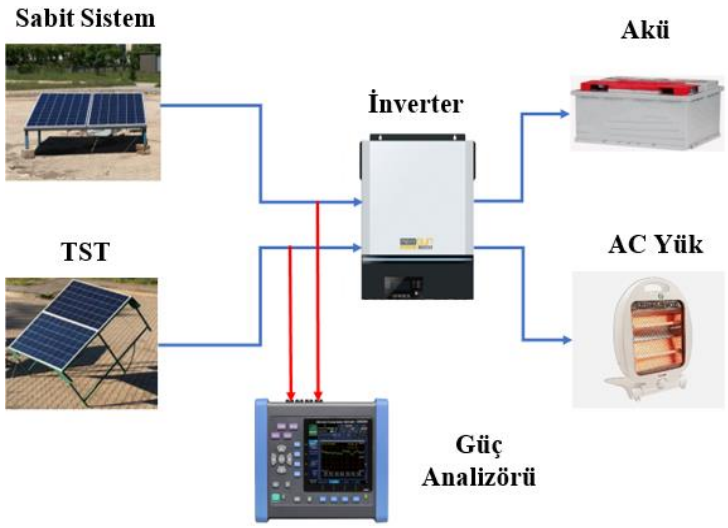
$$\begin{aligned}\sum H_{Tmax}(\beta) = {} & H_{Tmaxocak}(\beta) + H_{Tmaxşubat}(\beta) + H_{Tmaxmart}(\beta) + H_{Tmaxnisan}(\beta) + \\ & H_{Tmaxmayıs}(\beta) + H_{Tmaxhaziran}(\beta) + H_{Tmaxtemmuz}(\beta) + H_{Tmaxağustos}(\beta) + \\ & H_{Tmaxeylül}(\beta) + H_{Tmaxekim}(\beta) + H_{Tmaxkasım}(\beta) + H_{Tmaxaralık}(\beta) \quad (3.31)\end{aligned}$$

Denklem (3.31)'de her bir ay için eğik düzleme gelen maksimum radyasyon miktarı ifade edilmiştir, böylece eğik düzleme gelen toplam maksimum radyasyon miktarı hesaplanmıştır. Bu bağlamda optimum eğim açısı β_{Opt} denklem (3.32) ile hesaplanır.

$$\begin{aligned}\beta_{Opt} = {} & \beta_{Ocak} * H_{Tmaxocak}(\beta) + \beta_{Şubat} * H_{Tmaxşubat}(\beta) + \cdots + \beta_{Aralık} * \\ & H_{Tmaxaralık}(\beta) / H_{Tmax}(\beta) \quad (3.32)\end{aligned}$$

3.5. Deney Düzeneği

Deneysel çalışmalar Bingöl Üniversitesinde 38,89° doğu boylamında ve 40,48° kuzey enleminde gerçekleştirilmiştir. TST ve sabit güneş paneli sistemlerinin elektrik üretim performanslarının karşılaştırıldığı şebekeden bağımsız güneş sistemi Şekil 3.14'te gösterilmektedir. PV panel olarak Telefunken CWT-250-60P modelli ve maksimum 250 Wp'lik güce sahip polikristal güneş modülleri kullanılmıştır. Her iki güneş enerjisi sistemi de seri bağlı iki panelden oluşmakta ve 500 Wp güce sahiptir. Güneş enerjisi sistemlerinin optimum eğim ve azimut açıları elektriksel ölçümlerin yapıldığı mayıs ayına göre ayarlanmıştır. Her iki güneş enerjisi sisteminin çıkışında elde edilen elektriksel güç, Hioki PW3198 güç kalite analizörü yardımıyla ölçülmüştür. Her iki güneş enerjisi sistemi de 5 kVA gücünde ve 48 V giriş voltajına sahip bir Tommatech İnverter'e bağlıdır. İnverter 4 adet aküyü şarj eder ve AC yükleri besler.



Şekil 3.14. Deney düzeneğinin görünümü

3.6. Deneysel Materyaller

3.6.1. İnverter

Elektriksel güç dönüştürme elemanı olarak da ifade edilen inverterler herhangi bir DC kaynaktan giriş olarak aldıkları doğru akımı (DC) çıkış için alternatif akıma (AC) dönüştürürler. Solar sistemlerde de sıklıkla kullanılan inverterler çeşit olarak şebekeden bağımsız (off-grid) ve şebekeye bağımlı (on-grid) olarak ifade edilirler. On-grid inverterler PV panellerin üretmiş olduğu DC akımı doğrudan AC akıma dönüştürerek dağıtım şirketlerine gönderirler. Off-grid sistemler ise elektrik şebekesinin uzanamadığı bölgelerde sıklıkla kullanılan akü ve şarj kontrol cihazlarıyla entegreli sistemlerdir. Bu çalışmada TST ve sabit güneş paneli tarafından üretilen DC akım Tommatech 5 kVA inverter sayesinde AC akıma dönüştürülmüş ve akü grubu şarj edilmiştir. Tommatech 5 kVA inverter'e ait özellikler ise şunlardır:

- İnverter modu

  Çalışma sıcaklığı 0° ile 55° arasındadır.

  İnverter'ın anma gücü 5000 VA-4000 W'tır.

  Giriş gerilimi 48 VDC ve akımı ise 93 A'dir.

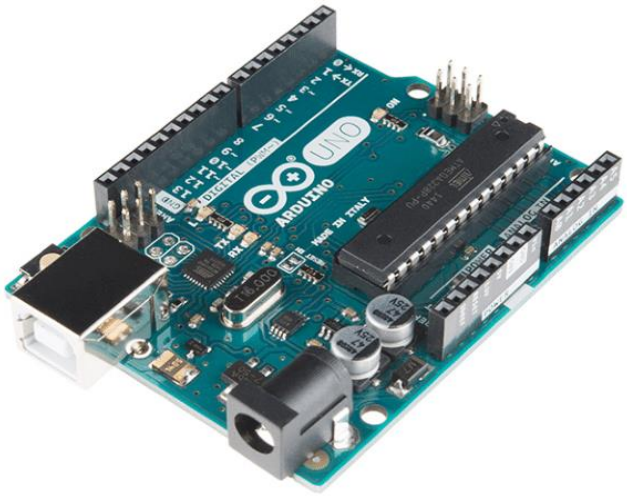
  Çıkış gerilimi 230 VAC, akımı 22 A, tek fazlı ve frekansı 50 Hz'dir.

- AC şarj modu
  Giriş gerilimi 230 VAC, akımı 35 A, tek fazlı ve frekansı 50 Hz'dir.
  Çıkış gerilimi 54 VDC, maksimum akım 60 A'dir.

- Solar şarj modu
  Anma akımı 50 A, Sistem voltajı 48 VDC'dir.
  Minimum solar voltajı 36 VDC ve maksimum solar voltajı ise 105 VDC'dir.

3.6.2. Ardunio UNO

Ardunio, açık kaynaklı temel bir elektronik devre elemanı olmakla beraber basit donanım, yazılım, esnek yapı ve kullanım kolaylığı gibi çeşitli avantajlara sahiptir. Ardunio, sensörler vasıtasıyla giriş olarak aldığı değerler ile motor veya aktüatör gibi çeşitli cihazları tetikleyebilirler. 14 adet lojik giriş-çıkış pininin bulunmaktadır. Bunların 6 adeti PWM çıkış olarak kullanılabilir ve bu pinlerden 8 bitlik analog çıkış sağlanabilmektedir. Bununla birlikte, Ardunio bilgisayar ile iletişim kurmak için USB bağlantı noktasına sahiptir ve herhangi bir karmaşık PCB tasarımına ihtiyaç duymadan programlanabilir. Ayrıca modül üzerinde 16 Mhz kristal osilatörü, 5 Voltluk lineer regülatör, güç ledi ve reset butonu da bulunmaktadır. Şekil 3.15'te kullanılacak olan Ardunio UNO ve Tablo 3.3'te Ardunio UNO ait özellikler verilmiştir.



Şekil 3.15. Ardunio UNO R3 (Sipani et al., 2018)

Tablo 3.3. Ardunio UNO R3 teknik özellikleri (Mishra et al., 2017)

Mikro Denetleyici	ATmega328
Çalışma Gerilimi	5 V
Besleme Gerilimi	7-12 V
Maksimum Besleme Gerilimi	20 V
Dijital I / O Pinleri	14 (6'sı PWM çıkışı sağlar)
Analog Giriş Pinleri	6
I / O Pini Başına DC Akım	40 mA
3.3 V Pin için DC Akım	50 mA
Flash Bellek	32 KB, önyükleyici tarafından kullanılan 0,5 KB
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Saat hızı	16MHz

3.6.3. XL4015 DC-DC Voltaj Regülatörü

XL4015, yüksek verimlilik, düşük dalgalanma ve yük regülasyonu gibi çeşitli özellikleri sayesinde 5A'lik bir yükü çalıştırabilen ve 180 KHz sabit frekansa sahip bir PWM DC-DC voltaj düşürücüdür. XL4015 DC-DC voltaj düşürücü minimum sayıda harici bileşene sahiptir ve kullanımı kolaydır. İçerisinde bulunan 8 A'lik aşırı akım koruma devresi sayesinde kısa devre akımlarına karşı güvenlidir.

XL4015 DC-DC Voltaj Regülatörü' ne ait diğer özellikler ise şunlardır:

- IN+ ve IN- pozitif ve negatif girişi, OUT+ ve OUT- ise pozitif ve negatif çıkışı ifade etmektedir.
- Giriş voltajı 8 V ile 36 V arasında değişmektedir.
- Çıkış voltajı 1,25 V ile 32 V arasında sürekli bir şekilde ayarlanabilir.
- Çıkış akımı sabit ve 5 A'dir.
- Çalışma frekansı 180 kHz'dir.
- -40 ile +85 derece arasında çalışma sıcaklığı mevcuttur.
- Maksimum 75 W çıkış gücüne sahiptir.
- Aşırı sıcaklığa maruz kaldığında sistemi otomatik kapatır.
- %96 gibi yüksek dönüştürme verimliliğine sahiptir.
- 54 mm uzunluğa, 23 mm genişliğe 15 mm yüksekliğe ve 20 gr ağırlığa sahiptir.

3.6.4. Hioki PW3198 Güç Kalite Analizörü

Bu çalışmada, TST ve sabit güneş panelinin çıkışında elde edilen akım, gerilim ve güç değerleri Şekil 3.16'da gösterilen HIOKI PW3198 güç kalite analizörü adlı cihaz ile elde edilmiştir. Bu güç kalite analizörü tek faz veya üç faz AC-DC ölçüm alma kabiliyetine sahiptir. Geçici aşırı gerilim, maksimum 6.000 V ve minimum 0,5 µs (2 MS/s) aralığında ölçülebilir. PW3198 güç kalite analizörü, hata olaylarını erkenden tespit etme ve hızlı bir şekilde sorunun nedenini çözebilme yeteneğine sahiptir.

HIOKI PW3198 güç kalite analizörüne ait diğer teknik özellikler ise şunlardır:

- Maksimum giriş voltajı : 1000 V AC, 600 V DC
- Doğruluk : V = Nominal voltajın ±0.1%'i , A ve W = ±0.2 % rdg. ±0.1 % fs
- Güç aralığı : 300 W ile 3.0000 MW arasındadır.
- Akım aralığı : Kullanılan akım sensörüne bağlı olarak 500.00 mA - 5.0000 kA AC arasındadır.
- Kayıt aralığı : 35 gün sürekli kayıt alır ve 1 hafta aralıklarla 55 hafta kayıt alma yeteneğine sahiptir.
- Ara yüzler : SD/SDHC hafıza kartı, RS-232C, LAN (HTTP sunucu işlevi), USB2.0
- Boyutlar ve kütle : 300 mm genişlik × 211 mm yükseklik × 68 mm çıkıntılar hariç kalınlık ve 2,6 kg ağırlığa sahiptir.
- Ölçüm Yetenekleri : Frekans, voltaj, akım, aktif ve reaktif güç, titreme, maksimum ve minimum değerler, yüksek dereceli harmonikler (80kHz)



Şekil 3.16. HIOKI PW3198 güç kalite analizörü (HIOKI, n.d.)

3.6.5. DC Motor

DC motorlar, içerisinde bulunan sabit mıknatıslar ve sargılardan akım geçmesi ile elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürürler. Mikro denetleyicinin çıkışında elde edilen sinyalin büyüklüğünün yetersiz olması ve DC motorların çıkış akımının sınırlandırılabilmesi için motor sürücü kartlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada TST'nin doğu-batı hareket yönelimini sağlamak üzere 24 V silecek motoru kullanılmıştır. Şekil 3.17'de kullanılacak olan DC motor ve Tablo 3.4'te DC motora ait özellikler verilmiştir.



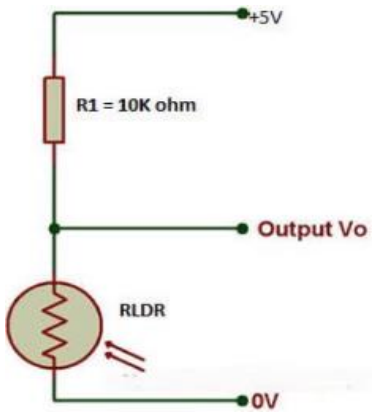
Şekil 3.17. TST'nin doğu-batı hareketini sağlamak üzere kullanılacak 24 V silecek motor

Tablo 3.4. Silecek motoruna ait özellikler

24 V silecek motoru	
Çalışma Gerilimi	24 V
Çalışma Akımı	2 A
Zorlanma Akımı	10 A
Motor Gücü	120 W
Mil Çapı	10 mm
Mil Uzunluğu	29 mm
Tork Değeri	100 kg.cm
Ağırlık	1330 V
Motor Çapı	62 mm

3.6.6. LDR (Işığa Bağımlı Direnç)

LDR'ler bulunduğu ortamın ışık şiddetindeki değişimine bağlı olarak direnç değerinde artış veya azalış gösteren temel bir elektronik devre elemanıdır. Bu özellikleri nedeniyle elektronik devre kartlarında ve mikro kontrollerde sıklıkla kullanılmaktadırlar. Şekil 3.18'de LDR'nin çıkış voltajının ölçüleceği örnek bir devre gösterilmiştir.



Şekil 3.18. LDR sensörünün çıkış voltajını gösteren devre (Xi et al., 2017)

3.6.7. Güneş Paneli

Bu çalışmada, 1640 x 990 x 40 mm boyutunda Telefunken CWT-250-60P modelli ve maksimum 250 Wp'lik güce sahip iki adet polikristal güneş modülleri kullanılmıştır. Kullanılacak güneş panelleri seri bağlantı şekline göre bağlanacaktır. Güneş paneline ait diğer teknik bilgiler ise şunlardır:

- Model Numarası : CWT-250-60P
- Nominal Maksimum Güç (Pmax) : 250 Wp
- Tolerans : 0 ± 3
- Maksimum Güç Voltajı (Vmp) : 30.6 V
- Maksimum Güç Akımı (Imp) : 8.17 A
- Açık Devre Voltajı (Voc) : 36.3 V
- Kısa Devre Akımı (Ioc) : 8.71 A
- Maksimum Sistem Voltajı : 1000 V
- Maksimum Seri Sigorta Değeri : 15 A
- Boyut : 1640 x 990 x 40 mm

- Ağırlık : 21 kg
- Hücreler : 60 PCS, 156 x 156

3.6.8. FH 2000 Isıtıcı

Bu çalışmada TST ve sabit güneş panelinin çıkışında elde edilen akım miktarını ölçmek için Budget FH 2000 marka ısıtıcı inverterin çıkışına AC yük olarak bağlanmıştır. FH 2000 ısıtıcı sayesinde aküler belirli aralıklarla deşarj edilip elde edilen akım miktarının ölçümü gerçekleşmiştir. FH 2000 marka ısıtıcıya ait teknik özellikler aşağıda verilmiştir:

- 4 farklı modu bulunmaktadır. Bunlar; kapalı, fan modu (ısıtma yok), düşük ısıtma gücü ve yüksek ısıtma gücüdür.
- 2000 W güce sahiptir.
- Gerilim değeri 230 V'tur.
- Frekans 50 Hz'dir.
- Ölçüleri 25*19*15 cm
- Ağırlık ise 400 gr'dır.

3.6.9. İki Kanallı Röle Kartı

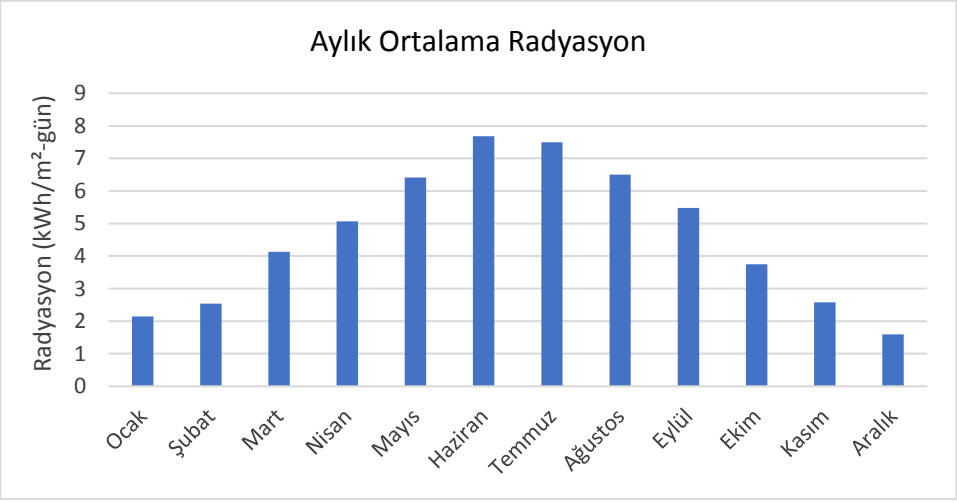
Röle kartı, mikro denetleyicinin kaldırabileceğinden çok daha fazla gerilim veya akımı kullanarak yüksek güçlü bir alıcıyı açıp kapatmaya izin veren ve birden fazla kontağa sahip anahtarlama elemanıdır. Mikro denetleyicinin çalıştırdığı alçak gerilim devresi ile yüksek güç devresi arasında bağlantı bulunmamaktadır. Röle, bu iki devreyi birbirinden koruma özelliğine sahiptir.

- Besleme gerilimi 3,75 V ile 6 V arasında değişmektedir.
- Mikro denetleyiciden aldığı tetik sinyali sırasında 20 mA'lik akım çekmektedir.
- Maksimum voltaj değeri 220 V AC veya 30 V DC'dir.
- Maksimum akım değeri ise 10 A'dir.
- Her bir röleye ait kontrol ledleri ve çıkış olarak NO, NC ve GND bacakları bulunmaktadır.
- Giriş portları Gnd, In1, In2 ve Vcc'dir.
- Uzun ömürlüdür.
- PCB Boyutu: 45,8 mm x 32,4 mm'dir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

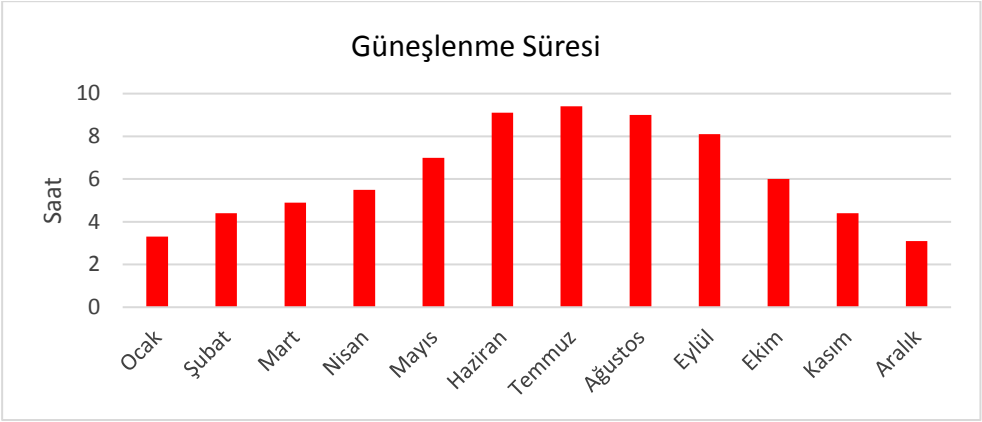
Materyal ve yöntem bölümünde bahsedilen optimum eğim açısının çeşitli varyasyonlar için hesabı MATLAB algoritması ile gerçekleştirilmiş ve kullanılan yazılımın kodları EK-B de sunulmuştur. Aylık, mevsimlik ve yıllık optimum eğim açıları tespit edilmiş ve 0°-90° arasındaki eğim açıları için güneş panellerine gelen dağınık, yerden yansıyan, doğrudan gelen ve toplam radyasyon miktarları elde edilmiştir. Optimum eğim açısı hesaplanırken PV panellerin güney yönüne baktığı durum baz alınmıştır, böylece azimut açısı optimum eğim açısı hesabında 0° olarak kabul edilmiştir. Optimum eğim açısının ve azimut açısının hesabı Bingöl ili için yapılmıştır. Azimut açısı için daha önceden verilen formüller Excel ortamında kullanılarak Bingöl ili için günlük ve yıllık azimut açı değerleri hesaplanmıştır.

Bingöl ili coğrafi koordinat sistemine göre 38.88º kuzey enlemi ile 40.48º doğu boylamı arasında yer almaktadır. Yüzölçümü ve deniz seviyesinden yüksekliği (rakım) sırasıyla 8.125 km² ve 1125m'dir. Bingöl iline ait her ay için aylık ortalama radyasyon miktarı Şekil 4.1'de verilmiştir. Şekil 4.1'de görüldüğü üzere en düşük radyasyon miktarı 1,596 kWh/m²-gün ile aralık ayında, en yüksek ise 7.681 kWh/m²-gün ile haziran ayında olmuştur. Mevsimsel olarak bakıldığında en yüksek radyasyon miktarı sırasıyla yaz, ilkbahar, sonbahar ve kış olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 4.1. Bingöl ili için aylara bağlı ortalama radyasyon miktarı (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, n.d.)

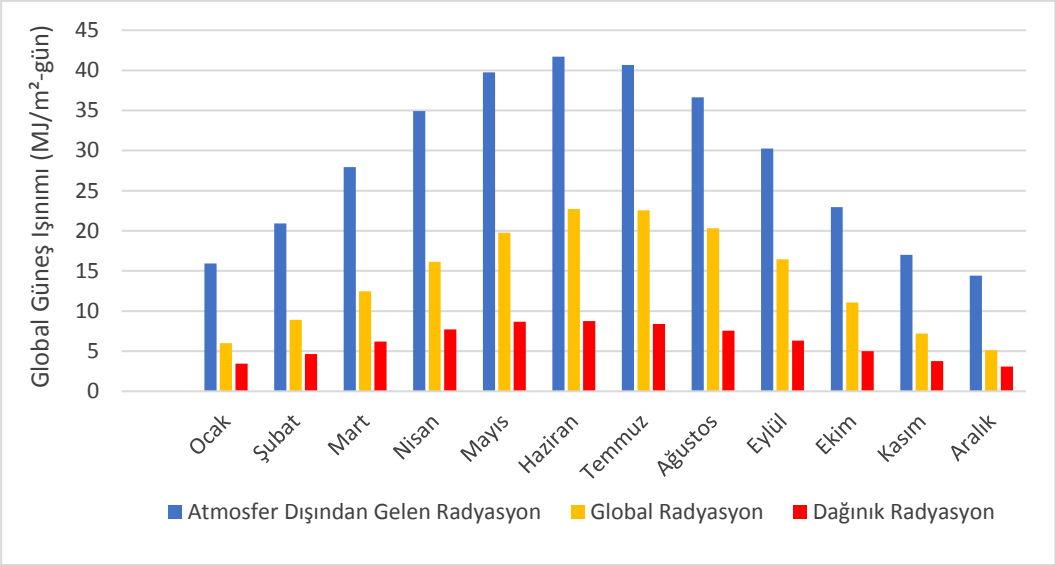
Bingöl iline ait izafi güneşlenme süresinin hesaplanabilmesi için Şekil 4.2'de verilen aylık ortalama güneşlenme sürelerinin bilinmesi gerekmektedir. Şekil 4.2'de görüldüğü üzere en yüksek ortalama güneşlenme süresi 9,4 saat ile temmuz ayında, en düşük ise 3,1 saat ile aralık ayında olmuştur. Mevsimsel olarak güneşlenme süresi ilkbaharda 17,4 saat, yaz için 27,5 saat, sonbaharda 18,5 saat ve kış mevsiminde 10,8 saat olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 4.2. Bingöl ili için aylara bağlı ortalama güneşlenme süresi (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, n.d.)

4.1. Optimum Eğim Açısının Belirlenmesine ait Sonuçlar

PV sistemlerin enerji verimliliğinin iyileştirilmesi için tasarımı ve kurulumu gerçekleştirilen bölgeye ait güneş radyasyon miktarları dikkate alınmalıdır. Dünya yüzeyine gelen güneş radyasyonunun belirli bir bölümü atmosferde saçılmaya maruz kalmaktadır. Bu nedenle yeryüzüne ulaşan güneş radyasyon miktarının belirli bir kısmının enerjisi zayıflar. Atmosferde saçılmaya maruz kalan bu radyasyon dağınık radyasyon olarak adlandırılır. Saçılan radyasyon miktarının belirli bir bölümü yeryüzüne ulaşırken kalan bölümü ise uzaya geri yansıtılır. Yeryüzüne saçılmaya maruz kalmadan direkt bir şekilde ulaşan bu radyasyona ise doğrudan ışınım denir. Ayrıca PV panellerin yüzeylerine gelen güneş radyasyon miktarının belirli bir bölümü yansımaya maruz kalırken, bir bölümü PV panellerin yüzeyi tarafından soğrulur ve kalan bölüm yüzey tarafından geçirilir. Eğik bir yüzeye gelen toplam güneş radyasyon miktarı doğrudan radyasyon, saçılmaya maruz kalan dağınık radyasyon ve yerden yansıyan radyasyon miktarının toplamı olarak ifade edilir. Şekil 4.3 ve Tablo 4.1'de Bingöl ili için yatay düzleme gelen atmosfer dışı radyasyon, küresel radyasyon ve dağınık radyasyon miktarlarının, aylık ortalama günlük değerleri sunulmuştur.



Şekil 4.3. Bingöl ili için aylık ortalama günlük H_0, H ve H_d radyasyon değerleri

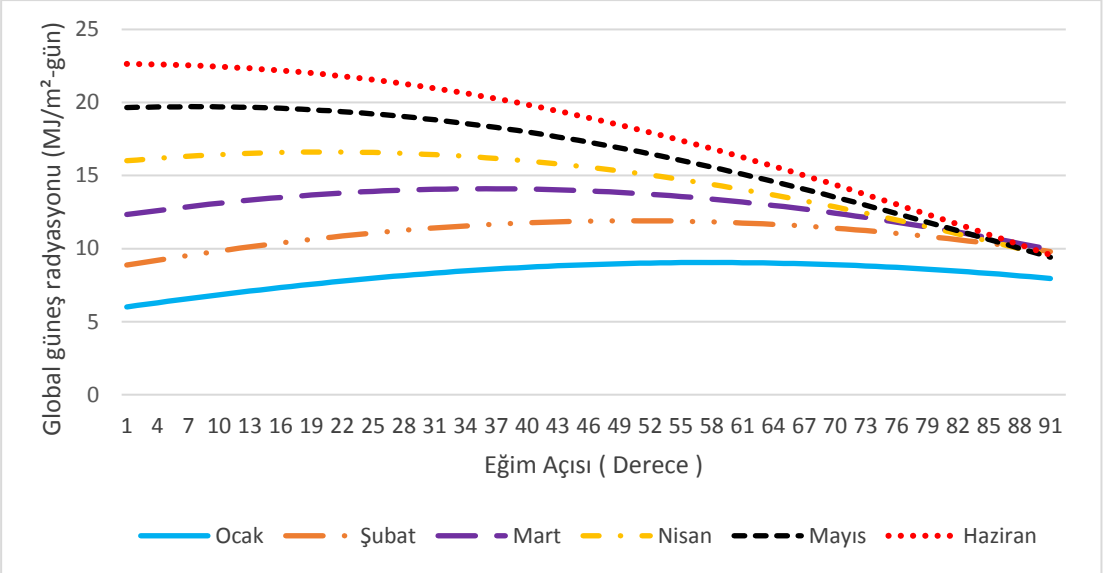
Tablo 4.1. Bingöl ili için aylık ortalama günlük H_0, H ve H_d değerleri

Aylar	H_0 (MJ/m²-gün)	H (MJ/m²-gün)	H_d (MJ/m²-gün)
Ocak	15.9457	6.0026	3.4492
Şubat	20.9247	8.9212	4.6213
Mart	27.9337	12.4460	6.1797
Nisan	34.9306	16.1140	7.7178
Mayıs	39.7644	19.7430	8.6758
Haziran	41.7061	22.7190	8.7481
Temmuz	40.6485	22.5520	8.4066
Ağustos	36.6311	20.3360	7.5539
Eylül	30.2599	16.4500	6.3098
Ekim	22.9557	11.0470	5.0189
Kasım	17.0284	7.2022	3.7608
Aralık	14.4290	5.1129	3.1017

Tablo 4.1'de görüldüğü üzere atmosfer dışından yatay düzleme gelen aylık güneş radyasyon miktarı en fazla 41,7061 MJ/m²-gün ile haziran ayında gerçekleşirken en az ise 14,4290 MJ/m²-gün ile aralık ayında gerçekleşmiştir. Yatay düzleme gelen küresel radyasyon miktarı ise en fazla haziran ayında 22,7190 MJ/m²-gün ve en az aralık ayında 5,1129 MJ/m²-gün olmuştur. Aylık ortalama dağınık radyasyon miktarı ise sırasıyla 8,7481 MJ/m²-gün ve 3,1017 MJ/m²-gün ile haziran ve aralık ayında görülmüştür. Ayrıca yıllık

toplam H_0 miktarı 343,1578 MJ/m²-yıl, H miktarı 168,6459 MJ/m²-yıl ve H_d miktarı 73,5436 MJ/m²-yıl'dır. Bununla birlikte yıllık ortalama H_0, H ve H_d miktarları sırasıyla 28,5964 MJ/m²-yıl, 14,0538 MJ/m²-yıl, 6,1286 MJ/m²-yıl'dır.

Aylık ortalama H_0, H ve H_d radyasyon miktarları elde edildikten sonra farklı eğim açıları kullanılarak aylara bağlı aylık ortalama günlük küresel radyasyon miktarı hesaplanmıştır. Ocak-Haziran ayları için aylık ortalama günlük küresel radyasyon miktarı Şekil 4.4'te verilmiştir.

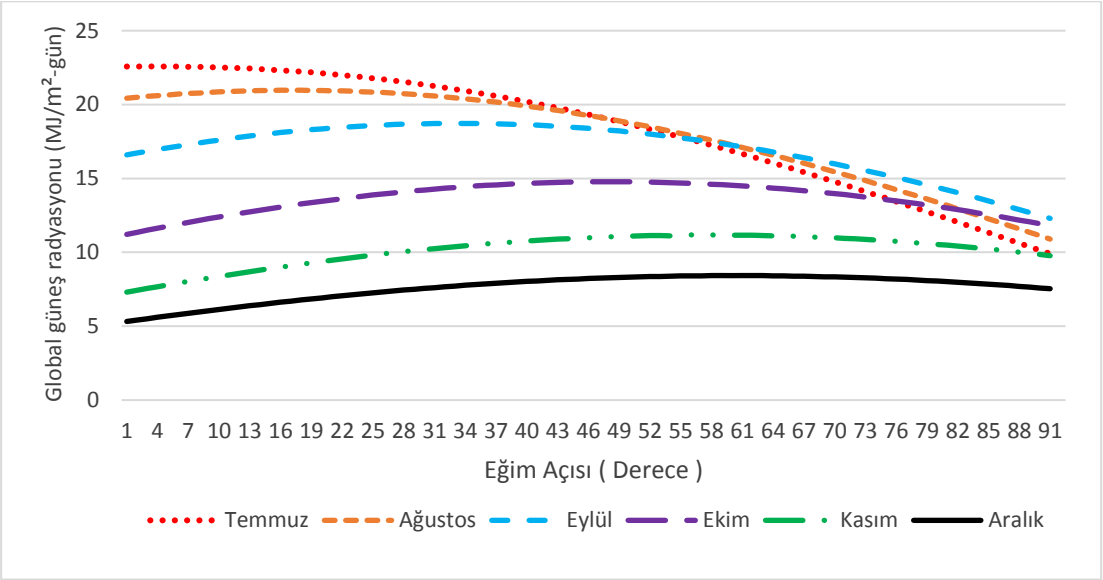


Şekil 4.4. Ocak-haziran ayları arasında farklı eğim açıları için eğik yüzeye gelen günlük küresel radyasyon miktarı (H_T)

Şekil 4.4'te görüldüğü üzere için eğim açısının 0° ile 90° arasında değişimine bağlı olarak eğik yüzeye gelen günlük toplam küresel radyasyon miktarının her bir ay için farklılık gösterdiği görülmüştür. PV panellerin optimum eğim açısının hesabında kullanılan H_T elde edildiğinden Şekil 4.4'ten ocak-haziran ayları için optimum eğim açıları tahmin edilebilir. Ocak-haziran ayları için en düşük H_T miktarı 6,0026 MJ/m²-gün ile ocak ayında en yüksek H_T miktarı ise 22,6401 MJ/m²-gün ile haziran ayında olmuştur. Ayrıca eğim açısı 0° olduğunda ocak ve haziran ayları arasındaki H_T farkı 16,6375 MJ/m²-gün gibi yüksek bir miktardır. Ocak ve haziran ayları için eğim açısının 90° olması durumunda ise H_T farkı 1,6180 MJ/m²-gün gibi düşük bir miktar ile sonuçlanmıştır. Eğim açısının yaz mevsimleri için 0° ile 10° gibi düşük bir açıda olduğu görülürken bu durum kış mevsimi için 45° ile

60° gibi yüksek açı değerlerine ulaşmıştır. Bu durum dünyanın güneşe olan uzaklığı ve sahip olduğu eksen eğikliğinden kaynaklanmaktadır.

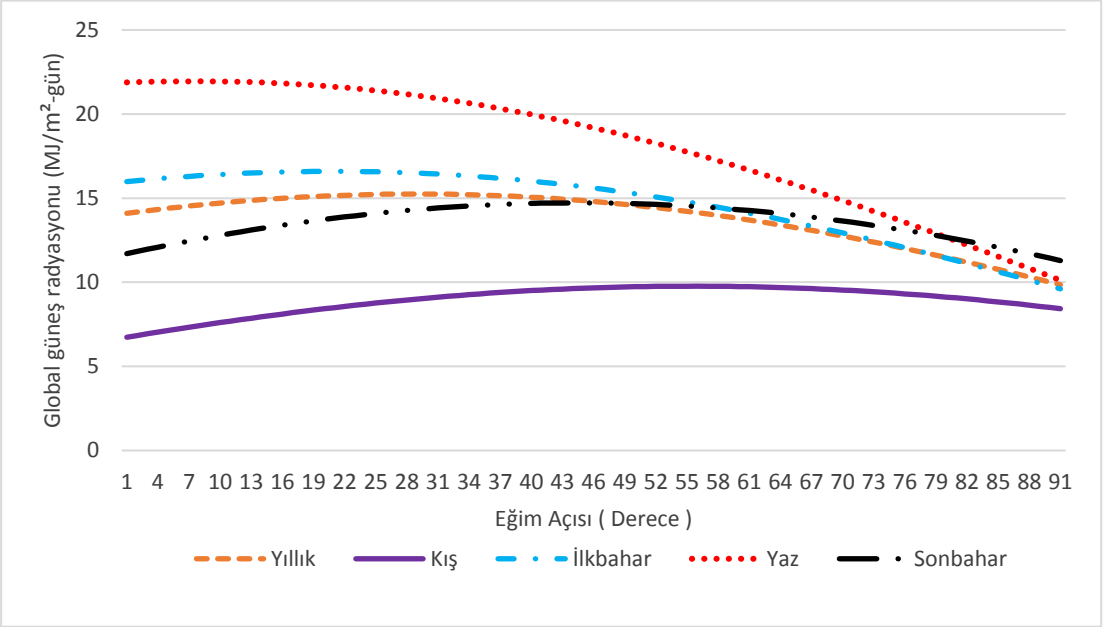
0° ile 90° eğim açıları arasında ocak-haziran ayları için elde edilen H_T miktarından sonra temmuz-aralık ayları için H_T miktarı hesaplanmış ve Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5. Temmuz-aralık ayları arasında farklı eğim açıları için eğik yüzeye gelen günlük küresel radyasyon miktarı (H_T)

Şekil 4.4'te olduğu gibi Şekil 4.5'te de eğim açısının 0° ile 90° arasındaki değişimine bağlı olarak eğik yüzeye gelen H_T miktarının her bir ay için farklılık gösterdiği görülmüştür. Bununla birlikte Şekil 4.5'te temmuz-aralık ayları için tıpkı Şekil 4.4'te olduğu gibi optimum eğim açıları tahmin edilebilmektedir. Temmuz-aralık ayları için en düşük H_T miktarı 5,3212 MJ/m²-gün ile aralık ayında en yüksek H_T miktarı ise 22,5840 MJ/m²-gün ile temmuz ayında gerçekleşmiştir. Eğim açısının 0° olması durumunda temmuz ve aralık ayları arasındaki H_T farkı 17,2559 MJ/m²-gün gibi büyük bir miktardır. Temmuz ve aralık ayları için eğim açısının 90° olması durumunda ise H_T farkının 2,3739 MJ/m²-gün gibi küçük bir miktar olduğu görülmüştür. Ayrıca eğim açısı 0° olduğu durumda haziran ve kasım ayları arasındaki H_T farkı 15,2715 MJ/m²-gün iken 90° olması durumunda 0,1384 MJ/m²-gün'dür. Ek olarak eğim açısının 53° ile 64° arasında olduğu durumda temmuz, ağustos ve eylül ayları arasındaki H_T miktarının azalarak birbirlerine yaklaştığı görülmüştür.

Son olarak 0° ile 90° eğim açıları arasında ilkbahar, yaz, sonbahar ve kış mevsimi ile birlikte yıllık H_T miktarı hesaplanmış ve Şekil 4.6'da elde edilen sonuçlar sunulmuştur.



Şekil 4.6. İlkbahar-kış mevsimleri arasında farklı eğim açıları için eğik yüzeye gelen günlük küresel radyasyon miktarı (H_T)

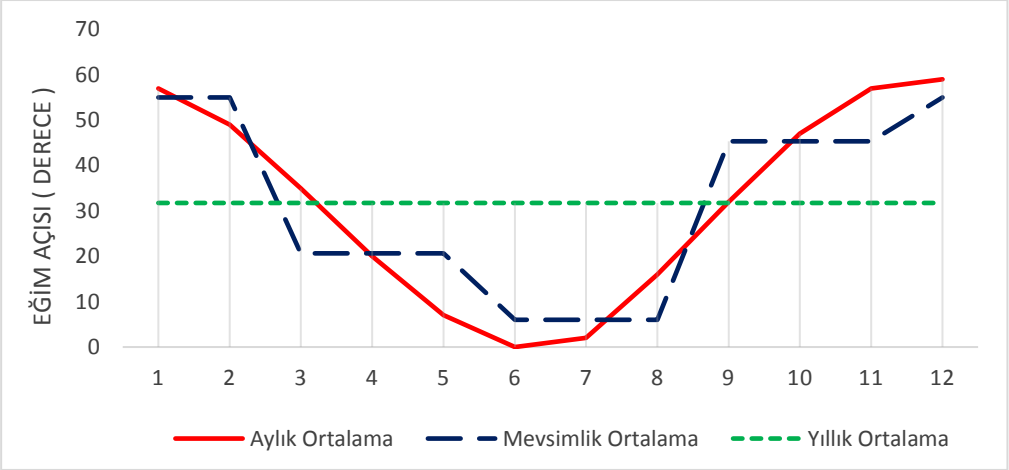
Yıllık, ocak-aralık arasındaki her bir ay ve mevsimler için maksimum H_T miktarına karşılık gelen eğim açısı, optimum eğim açısını belirtir. Maksimum H_T miktarı kış mevsiminde 9,7692 MJ/m²-gün, ilkbahar mevsiminde 16,5958 MJ/m²-gün, yaz mevsiminde 21,9502 MJ/m²-gün ve sonbahar mevsiminde 14,7203 MJ/m²-gün olarak elde edilmiştir. Minimum H_T miktarının ise kış mevsiminde 6,7324 MJ/m²-gün, ilkbahar mevsiminde 9,6083 MJ/m²-gün, yaz mevsiminde 10,1236 MJ/m²-gün ve sonbahar mevsiminde 11,2884 MJ/m²-gün olduğu bulunmuştur. Maksimum ve minimum yıllık H_T miktarı ise sırasıyla 15,2472 MJ/m²-gün ile 9,8579 MJ/m²-gün'dür. Buna göre ilkbahar ve sonbahar mevsimlerine ait H_T nispeten yıllık H_T miktarına yakındır ancak bu durum kış ve yaz mevsimleri için söylenemez. Örneğin yaz mevsimine ait maksimum H_T miktarı ile maksimum yıllık H_T miktarı arasındaki fark, 6,7030 MJ/m²-gün olmakla beraber yaklaşık %44'tür. Kış mevsimine ait minimum H_T miktarı, yaz mevsimine ait minimum yıllık H_T miktarından yaklaşık %32 daha azdır. Sonuç olarak güneşten alınan radyasyon miktarı PV sistemler için oldukça önemlidir. Ek olarak yıllık ve her bir mevsim için ideal bir eğim açısının bulunduğu açık bir şekilde görülmektedir.

0° ile 90° arasındaki eğim açıları kullanılarak ocak-aralık ayları arasındaki H_T miktarı hesaplandıktan sonra her bir ay için optimum eğim açıları elde edilmiştir. Her bir ay için elde edilen optimum eğim açıları ve H_T miktarı Tablo 4.2'de sunulmuştur.

Tablo 4.2. Bingöl ili için aylara bağlı optimum eğim açıları ve H_T miktarları

Aylar	βopt°	Hopt (MJ/m²-gün)
Ocak	57	9,0442
Şubat	49	11,9025
Mart	35	14,0942
Nisan	20	16,6070
Mayıs	7	19,7092
Haziran	0	22,6401
Temmuz	2	22,5840
Ağustos	16	20,9650
Eylül	32	18,7265
Ekim	47	14,7758
Kasım	57	11,1729
Aralık	59	8,4246

Bingöl ili için en düşük ve en yüksek optimum eğim açısı haziran ve aralık aylarında sırasıyla 0° ve 59°'dir. Bununla birlikte en düşük ve en yüksek ışınım miktarları yine haziran ve aralık aylarında sırasıyla 22,6401 MJ/m²-gün ve 8,4246 MJ/m²-gün olarak elde edilmiştir. H_T miktarı ve bu radyasyon miktarlarına karşılık gelen aylık optimum eğim açıları elde edildikten sonra aylık ortalama, mevsimlik ortalama ve yıllık ortalama optimum eğim açıları hesaplanarak Şekil 4.7'de ve Tablo 4.3'te sunulmuştur.



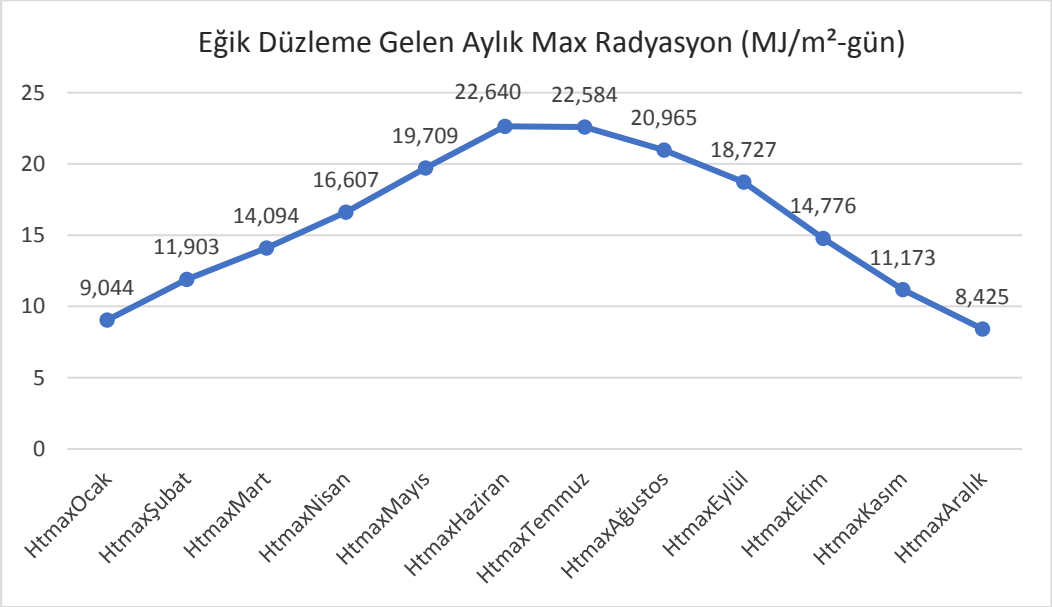
Şekil 4.7. Optimum eğim açılarının aylık, mevsimlik ve yıllık değerleri

Tablo 4.3. Bingöl ili için mevsimlik ve yıllık optimum eğim açıları ve H_T miktarları

Aylar	Mevsimler	Mevsimlik Ortalama		Yıllık Ortalama	
		βopt°	Hopt (MJ/m²-gün)	βopt°	Hopt (MJ/m²-gün)
Aralık	Kış	55	8,3977	31,75	7,7059
Ocak			9,0362		8,4114
Şubat			11,8735		11,4972
Mart	İlkbahar	20,67	13,7133		14,0779
Nisan			16,6070		16,3652
Mayıs			19,4637		18,6724
Haziran	Yaz	6	22,5637		20,7761
Temmuz			22,5732		21,0632
Ağustos			20,7029		20,4701
Eylül	Sonbahar	45,33	18,4393		18,7261
Ekim			14,7593		14,3770
Kasım			10,9619		10,3708

Mevsimlik ortalama ve yıllık ortalama optimum eğim açıları, mevsimlik ve yıllık optimum eğim açısının ortalama değerinin bulunmasıyla hesaplanmıştır. Tablo 4.3'te görüldüğü üzere kış mevsiminde optimum eğim açısı 55°, ilkbahar mevsiminde $20{,}67^{\circ}$, yaz mevsiminde 6° ve sonbahar mevsiminde ise $45{,}33^{\circ}$olarak elde edilmiştir. Yıllık ortalama optimum eğim açısı aritmetik ortalamaya bağlı olarak $31{,}75^{\circ}$ bulunmuştur ve bu sonuç PV panel için yıl boyunca ideal olan eğim açısını ifade etmektedir. PV sistemlerin eğim açıları mevsimlik ortalamaya bağlı olarak uygulanması durumunda, eğim açısının yılda dört kez ayarlanması gerekmektedir. Şekil 4.7'de görüldüğü üzere kış aylarında optimum eğim açısı 49° ile 59° arasında değişim gösterirken bu değerler yaz ayları için 0° ile 16° arasındadır. Optimum eğim açısı değerleri yaz ve kış ayları için büyük bir değişim göstermiştir ve bu durum PV sistemlerin çıkış gücünü doğrudan etkiler. Bu yüzden PV sistemlerin verimliliğinin iyileştirilmesi için optimum eğim açısına ayarlanmaları gerekmektedir.

Materyal ve yöntem kısmında optimum eğim açısının hesabı için literatürde sıklıkla aritmetik ortalamanın kullanıldığı bildirilmiştir. Bu tez çalışmasında aritmetik ortalamaya ek olarak aylık maksimum radyasyon miktarları dikkate alınarak yıllık optimum eğim açısı ikinci bir yöntem olarak hesaplanmıştır. Bu bağlamda denklem (3.31) kullanılarak her bir ay için elde edilen maksimum H_T miktarları Şekil 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.8. Bingöl ili için her bir ayın maksimum H_T miktarları

Daha sonra denklem (3.32) kullanılarak ışınım ağırlıklı yıllık optimum eğim açısının hesabı yapılmış ve aritmetik ortalamaya göre yapılan optimum eğim açısıyla karşılaştırılmıştır. Aritmetik ortalamaya göre optimum eğim açısı;

$$\sum \beta_{Optimum} = \frac{\sum \beta_{Eğim}}{12} = \frac{381}{12} = 31{,}75^{\circ} \text{ olur}$$

Işınım ağırlıklı ortalamaya göre ise optimum eğim açısı;

$$\beta_{Opt} = \frac{\beta_{Ocak} * H_{Tmaxocak}(\beta) + \cdots + \beta_{Aralık} * H_{Tmaxaralık}(\beta)}{H_{Tmax}(\beta)} = 25{,}547^{\circ} \text{ olur}$$

Aritmetik ortalamaya bağlı optimum eğim açısı olan 31,75° için aylık H_T miktarları Tablo 4.4'te sunulmuştur.

Tablo 4.4. Bingöl ili için aritmetik ortalamaya bağlı yıllık optimum eğim açısı ve aylık H_T miktarları

Aylar	βopt°	Hopt (MJ/m²-gün)
Ocak	31.75	8,4114
Şubat	31.75	11,4972
Mart	31.75	14,0779
Nisan	31.75	16,3652
Mayıs	31.75	18,6724
Haziran	31.75	20,7761
Temmuz	31.75	21,0632
Ağustos	31.75	20,4701
Eylül	31.75	18,7261
Ekim	31.75	14,3770
Kasım	31.75	10,3708
Aralık	31.75	7,7059

Aritmetik ortalamaya göre hesaplanan yıllık optimum eğim açısı için en düşük ve en yüksek H_T miktarı aralık ve temmuz aylarında sırasıyla 7,7059 MJ/m²-gün ve 21,0632 MJ/m²-gün olarak bulunmuştur. PV panellerin yıllık optimum eğim açısına ayarlanması durumunda aylık optimum eğim açısına kıyasla kaybedilen H_T miktarı ilerleyen sayfalarda verilecektir. Bir diğer durum olan ışınım ağırlıklı ortalamaya bağlı optimum eğim açısı olan 25,547° için aylık H_T miktarları ise Tablo 4.5'te sunulmuştur.

Tablo 4.5. Bingöl ili için ışınım ağırlıklı ortalamaya bağlı yıllık optimum eğim açısı ve aylık H_T miktarları

Aylar	βopt°	Hopt (MJ/m²-gün)
Ocak	25,547	8,0681
Şubat	25,547	11,1649
Mart	25,547	13,9600
Nisan	25,547	16,5485
Mayıs	25,547	19,1261
Haziran	25,547	21,4177
Temmuz	25,547	21,6547
Ağustos	25,547	20,7891
Eylül	25,547	18,6310
Ekim	25,547	13,9949
Kasım	25,547	9,9344
Aralık	25,547	7,3561

Işınım ağırlıklı ortalamaya göre hesaplanan yıllık optimum eğim açısı 25,547° için en düşük ve en yüksek H_T miktarı aralık ve temmuz aylarında sırasıyla 7,3561 MJ/m²-gün ve

21,6547 MJ/m²-gün olarak elde edilmiştir. Aritmetik ortalamaya göre hesaplanan yıllık optimum eğim açısı ile ışınım ağırlıklı ortalamaya göre hesaplanan yıllık optimum eğim açısına bağlı H_T farkı hesaplanmış ve Tablo 4.6'da sunulmuştur.

Tablo 4.6. Bingöl ili için ışınım ağırlıklı ortalama ile aritmetik ortalamaya bağlı aylık H_T farkı

Aylar	$\beta opt = 31.75^{\circ}$	$\beta opt = 25.547^{\circ}$	Arasındaki ışınım farkı
Ocak	8,4114	8,0681	-0,3433
Şubat	11,4972	11,1649	-0,3323
Mart	14,0779	13,9600	-0,1179
Nisan	16,3652	16,5485	0,1833
Mayıs	18,6724	19,1261	0,4537
Haziran	20,7761	21,4177	0,6416
Temmuz	21,0632	21,6547	0,5915
Ağustos	20,4701	20,7891	0,319
Eylül	18,7261	18,6310	-0,0951
Ekim	14,3770	13,9949	-0,3821
Kasım	10,3708	9,9344	-0,4364
Aralık	7,7059	7,3561	-0,3498
Toplam	182,5133	182,6455	0,1322

Tablo 4.6'da görüldüğü üzere $\beta opt = 25,547°$ olduğu durumda elde edilen toplam H_T miktarı $\beta opt = 31,75°$ olduğu durumdan 0,1322 MJ/m²-gün daha fazladır. Günlük olarak elde edilen bu radyasyon farkı yıllık olarak 48,253 MJ/m²-yıl olarak bulunmuştur. Işınım ağırlıklı ortalamaya bağlı optimum eğim açısı için H_T miktarı, radyasyonun daha fazla olduğu nisan, mayıs, haziran, temmuz ve ağustos aylarında aritmetik ortalamaya göre hesaplanan yıllık optimum eğim açısından daha fazladır. Aritmetik ortalamaya göre hesaplanan yıllık optimum eğim açısı için H_T miktarı ise ocak, şubat, mart, eylül, ekim, kasım ve aralık aylarında ışınım ağırlıklı ortalamaya bağlı optimum eğim açısından daha fazladır. Bingöl için ışınım ağırlıklı ve aritmetik olarak hesaplanan optimum eğim açıları 25° ile 32° arasında olduğu için bu değerler arasındaki eğim açıları incelenmiştir. Ayrıca aradaki ışınım farkını görebilmek için 0°,33°,34°,35°,36° ve 90° için de yıllık ortalama radyasyon miktarı hesaplanmış ve Tablo 4.7'de sunulmuştur.

Tablo 4.7. Bingöl ili için ışınım ağırlıklı ortalama ile aritmetik ortalamaya bağlı eğim açıları ile birlikte farklı bazı eğim açıları için yıllık H_T miktarı

βopt°	Hopt (MJ/m²-gün)
0	168,9307
25	182,5900
25,547	182,6455
26	182,6843
27	182,7420
28	182,7630
29	182,7473
30	182,6947
31	182,6052
31,75	182,5133
32	182,4789
33	182,3157
34	182,1156
35	181,8787
36	181,6050
90	118,3431

Tablo 4.7'de görüldüğü üzere optimum eğim açısının 28° olduğu durumdaki yıllık H_T miktarı, aritmetik ortalamaya, ışınım ağırlıklı ortalamaya ve diğer açı değerlerine kıyasla en yüksek sonucu vermiştir. Optimum eğim açısının 28° olması durumunda aritmetik ortalamaya bağlı optimum eğim açısı için hesaplanan hata oranı %0,136811947403, ışınım ağırlıklı ortalamaya bağlı optimum eğim açısı için ise hata oranı %0,064332272078'dir.

Önceki sayfalarda bahsedilen PV panellerin aritmetik ortalamaya bağlı yıllık optimum eğim açısına ayarlanması durumunda aylık optimum eğim açısına kıyasla kaybedilen H_T miktarı Tablo 4.8'de verilmiştir. Tablo 4.8'de görüldüğü üzere βopt = 31,75° olduğu durumda elde edilen toplam H_T miktarı aylık optimum eğim açısına kıyasla 8,1327 MJ/m²-gün azdır. Günlük olarak elde edilen bu ışınım farkı yıllık olarak 2968,4355 MJ/m²-yıl olarak bulunmuştur. Ayrıca βopt = 57° olduğu durumda, yıllık optimum eğim açısına kıyasla en yüksek H_T kazancı kasım ayında 0,8021 MJ/m²-gün olarak elde edilmiştir. βopt = 32° olduğu durumda, yıllık optimum eğim açısına kıyasla en düşük H_T kazancı ise eylül ayında 0,0004 MJ/m²-gün olarak bulunmuştur.

Tablo 4.8. Bingöl ili için aylık ortalama eğim açıları ve aritmetik ortalamaya bağlı yıllık eğim açısı için H_T farkı

Aylar	Aylık Ortalama		Aritmetik Ortalamaya Bağlı Yıllık Ortalama		Aralarındaki Hopt farkı (MJ/m²-gün)
	βopt°	Hopt (MJ/m²-gün)	βopt°	Hopt (MJ/m²-gün)	
Aralık	59	8,4246	31,75	7,7059	-0,7187
Ocak	57	9,0442		8,4114	-0,6328
Şubat	49	11,9025		11,4972	-0,4053
Mart	35	14,0942		14,0779	-0,0163
Nisan	20	16,6070		16,3652	-0,2418
Mayıs	7	19,7092		18,6724	-1,0368
Haziran	0	22,6401		20,7761	-1,864
Temmuz	2	22,5840		21,0632	-1,5208
Ağustos	16	20,9650		20,4701	-0,4949
Eylül	32	18,7265		18,7261	-0,0004
Ekim	47	14,7758		14,3770	-0,3988
Kasım	57	11,1729		10,3708	-0,8021
Toplam		190,646		182,5133	-8,1327

PV panellerin ışınım ağırlıklı ortalamaya bağlı yıllık optimum eğim açısına ayarlanması durumunda aylık optimum eğim açısına kıyasla kaybedilen H_T miktarı ise Tablo 4.9'da sunulmuştur. Tablo 4.9'da görüldüğü üzere $\beta opt = 25,547°$ olduğu durumda elde edilen toplam H_T miktarı aylık optimum eğim açısına kıyasla 8,0005 MJ/m²-gün azdır. Günlük olarak elde edilen bu ışınım farkı yıllık olarak 2921,825 MJ/m²-yıl olarak bulunmuştur. Ayrıca $\beta opt = 57°$ olması durumunda, aylık optimum eğim açısına kıyasla en yüksek H_T kazancı kasım ayında 1,2385 MJ/m²-gün olarak bulunmuştur. $\beta opt = 20°$ olduğu durumda, yıllık optimum eğim açısına kıyasla en düşük H_T kazancı ise nisan ayında 0,0585 MJ/m²-gün olarak bulunmuştur.

Tablo 4.9. Bingöl ili için aylık ortalama eğim açıları ve ışınım ağırlıklı ortalamaya bağlı yıllık eğim açısı için H_T farkı

Aylar	Aylık Ortalama		Işınım Ağırlıklı Yıllık Ortalama		Aralarındaki Hopt farkı (MJ/m²-gün)
	βopt°	Hopt (MJ/m²-gün)	βopt°	Hopt (MJ/m²-gün)	
Aralık	59	8,4246	25,547	7,3561	-1,0685
Ocak	57	9,0442		8,0681	-0,9761
Şubat	49	11,9025		11,1649	-0,7376
Mart	35	14,0942		13,9600	-0,1342
Nisan	20	16,6070		16,5485	-0,0585
Mayıs	7	19,7092		19,1261	-0,5831
Haziran	0	22,6401		21,4177	-1,2224
Temmuz	2	22,5840		21,6547	-0,9293
Ağustos	16	20,9650		20,7891	-0,1759
Eylül	32	18,7265		18,6310	-0,0955
Ekim	47	14,7758		13,9949	-0,7809
Kasım	57	11,1729		9,9344	-1,2385
Toplam		190,646		182,6455	-8,0005

Son olarak PV panellerin mevsimsel ortalamaya bağlı yıllık optimum eğim açısına ayarlanması durumunda aylık optimum eğim açısına kıyasla kaybedilen H_T miktarı ise Tablo 4.10'da gösterilmiştir. Tablo 4.10'da da görüldüğü üzere optimum eğim açısının mevsimsel olarak ayarlanması durumunda elde edilen toplam H_T miktarı aylık optimum eğim açısına kıyasla 1,5543 MJ/m²-gün azdır. Günlük olarak elde edilen bu ışınım farkı yıllık olarak 567,3195 MJ/m²-yıl olarak bulunmuştur. Buradan da anlaşılacağı üzere PV

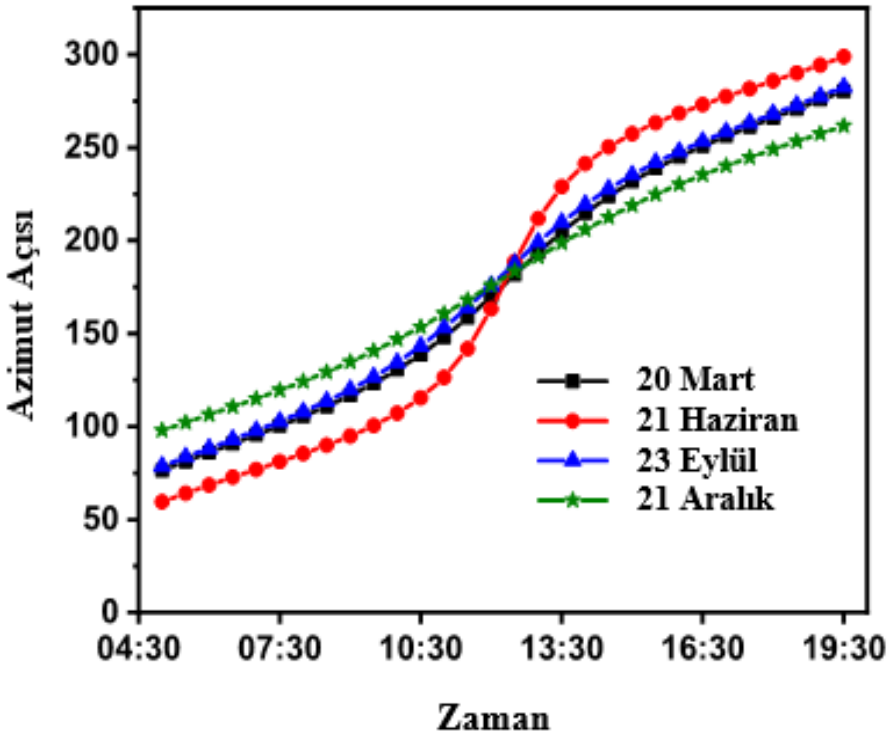
sistemlerin eğim açılarının mevsimsel olarak ayarlanması durumunda elde edilen H_T farkı, ışınım ağırlıklı ve aritmetik ortalamaya bağlı yıllık optimum eğim açılarından daha azdır. Bu nedenle PV panellerin öncelikle aylık optimum eğim açılarına daha sonra yıllık optimum eğim açıları yerine mevsimsel olarak optimum eğim açılarına ayarlanması gerekmektedir. Aylık optimum eğim açılarına göre hesaplanan H_T miktarı mevsimsel olarak ayarlanan eğim açılarına kıyasla tüm aylar için daha fazla H_T miktarı elde etmiştir.

Tablo 4.10. Bingöl ili için aylık ortalama eğim açıları ve mevsimlik ortalamaya bağlı yıllık eğim açıları için H_T farkı

Aylar	Aylık Ortalama		Mevsimlik Ortalama		Aralarındaki Hopt farkı (MJ/m²-gün)
	βopt°	βopt°	βopt°	Hopt (MJ/m²-gün)	
Aralık	59	8,4246	55	8,3977	-0,0269
Ocak	57	9,0442		9,0362	-0,008
Şubat	49	11,9025		11,8735	-0,029
Mart	35	14,0942	20,67	13,7133	-0,3809
Nisan	20	16,6070		16,6070	0
Mayıs	7	19,7092		19,4637	-0,2455
Haziran	0	22,6401	6	22,5637	-0,0764
Temmuz	2	22,5840		22,5732	-0,0108
Ağustos	16	20,9650		20,7029	-0,2621
Eylül	32	18,7265	45,33	18,4393	-0,2872
Ekim	47	14,7758		14,7593	-0,0165
Kasım	57	11,1729		10,9619	-0,211
Toplam		190,646		189,0917	-1,5543

4.2. Azimut Açısının Belirlenmesine Ait Sonuçlar

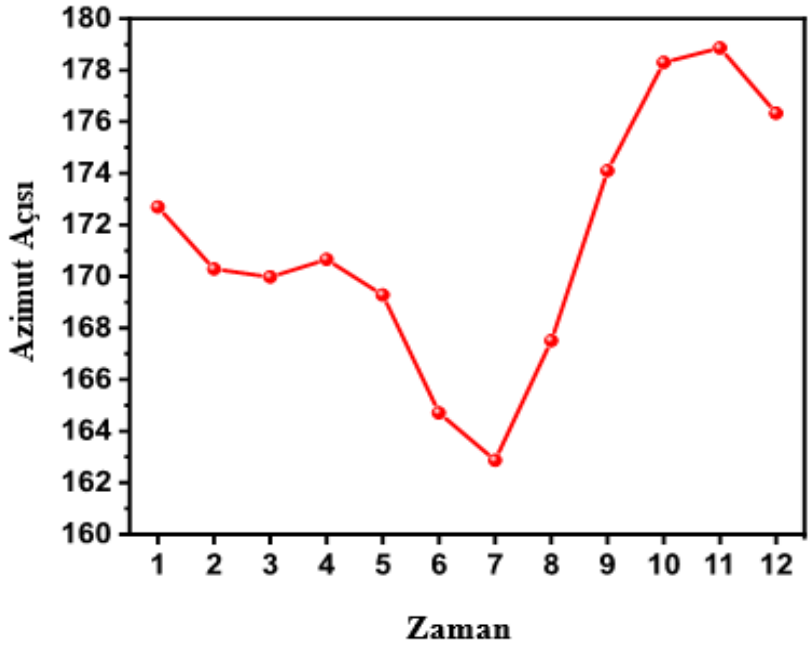
Bingöl ili için optimum eğim açılarının hesaplanmasından sonra bir diğer önemli güneş açısı olan azimut açısı için günlük ve yıllık ortalama hesaplanmıştır. Azimut açısının 20 Mart ve 23 Eylül ekinoks tarihlerinde ve 21 Haziran ve 21 Aralık gün dönümü tarihlerinde günlük değişimi Şekil 4.9'da sunulmuştur.



Şekil 4.9. Azimut açısının gün dönümü ve ekinoks tarihlerindeki değişimi

Şekil 4.9'da da görüldüğü üzere azimut açıları öğleden önce ve öğleden sonra farklılık göstermektedir. En düşük azimut açısı değerleri saat 04:30 ile 13:00 arasında 54,76° ile 21 Haziran tarihinde görülürken en yüksek ise 93,67° ile 21 Aralık tarihinde elde edilmiştir. Saatin 13:30 ile 19:30 arasında olması durumunda ise en düşük azimut açısı değeri 198,75° ile 21 Aralık tarihinde bulunurken en yüksek ise 21 Haziran tarihinde 229,08° olarak bulunmuştur. Gün dönümü tarihlerinde elde edilen bu fark miktarı 21 Haziran tarihinde en uzun gündüzün ve 21 Aralık tarihinde en uzun gecenin yaşanmasından kaynaklanmaktadır. 23 Eylül ve 20 Mart ekinoks tarihleri için azimut açıları arasında küçük farklılıklar görülmektedir. Bunun nedeni ise ekinoks tarihlerinde gece-gündüz eşitliğinin olmasıdır.

Bingöl ili için ekinoks ve gün dönümleri için azimut açı değerleri hesaplandıktan sonra aylık ortalama azimut açısı hesaplanmış ve Şekil 4.10'da sunulmuştur.



Şekil 4.10. Azimut açısının aylara bağlı ortalama değerleri

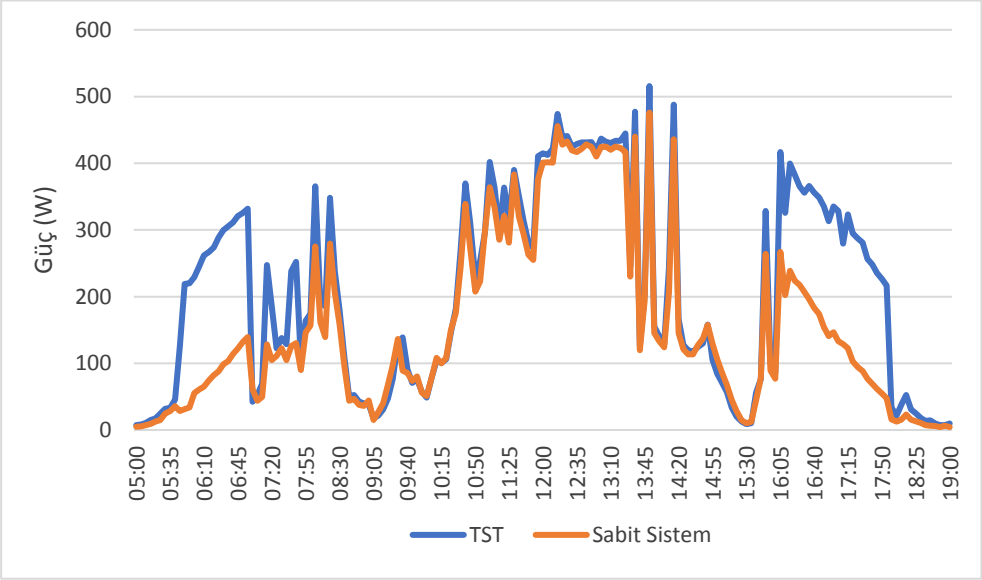
Şekil 4,10'da görüldüğü üzere Bingöl ili için azimut açısının yıl içerisinde 162,87° temmuz ile 178,86° kasım değiştiği görülmektedir. Buna göre yıl içerisindeki azimut açısı değerleri nispeten az değişim göstermektedir.

4.3. TST ve Sabit Güneş Paneline Ait Ölçüm Sonuçları

PV paneller için gerekli olan eğim ve azimut açı değerleri Bingöl ili için elde edilmiştir. Bu açı değerlerine göre TST ve sabit güneş paneli ayarlanmıştır. TST ve sabit güneş paneline ait anlık güç değerleri, 12-15 Mayıs tarihlerinde farklı hava koşulları altında 4 gün boyunca saat 05:00 ile 19:00 arasında 5 dakika aralıklarla ölçülmüş ve EK-C ve EK-D'de sunulmuştur. İlk olarak 12 Mayıs 2022 tarihinde parçalı bulutlu bir gün için TST ve sabit güneş sistemine ait güç üretim miktarları Şekil 4.11'de gösterilmiştir.

Şekil 4.11'e bakıldığında bulutlu saatlerde hem TST hem de sabit güneş sisteminin elektrik üretiminde önemli bir düşüş yaşandığı görülmektedir. TST için elde edilen en yüksek ve en düşük güç miktarı sırasıyla 515,69 Wp ve 7,29 Wp'dir. Bu durum sabit güneş paneli

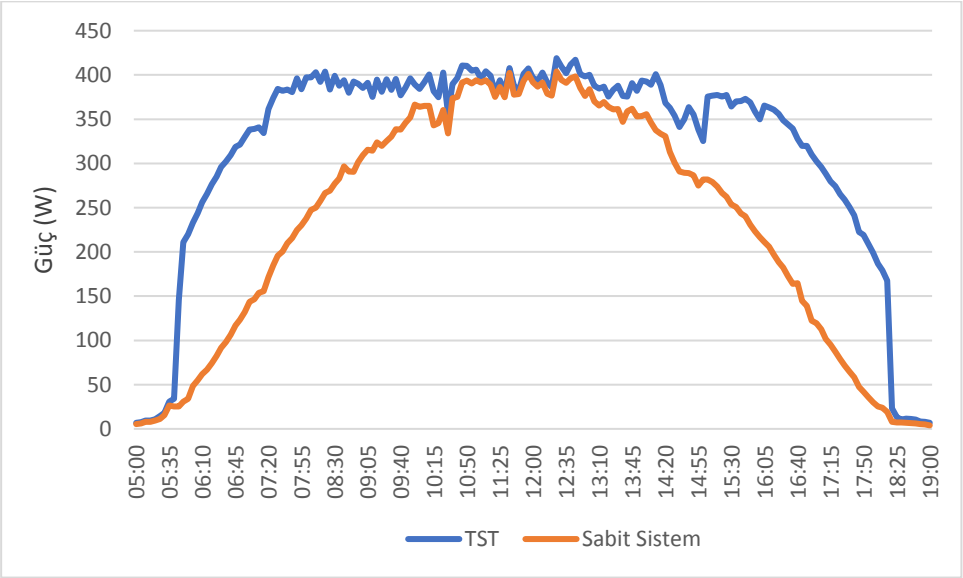
için sırasıyla 475,95 Wp ve 4,40 Wp olarak elde edilmiştir. Ayrıca sabit güneş sisteminin elektrik üretimi TST'den nadiren daha fazladır. Örneğin saat 09:00'da TST 38,49 W elektrik üretirken sabit güneş sistemi 44,44 W üretmiştir. Bu olay genellikle bulutlar güneşin önündeyken, gökyüzünün diğer kısımları bulutsuz olduğunda meydana gelmektedir. Bu zamanlarda TST, güneş ile kendisi arasındaki bulutlar nedeniyle daha az radyasyon alırken sabit güneş sisteminin radyasyonu bulutsuz tarafa baktığı için daha fazladır. TST ile sabit güneş sistemi arasındaki en yüksek ve en düşük elektrik üretim farkı sırasıyla saat 06:35 ile 10:05'te 202,29 W ve 0,13 W olarak gerçekleşmiştir. TST'nin üretmiş olduğu toplam elektrik enerjisi üretimi 2.920,36 kWh, sabit güneş sisteminin ise 2.119,15 kWh'dır, böylece TST, sabit güneş sistemine kıyasla elektrik enerjisi üretimini %32,8 oranında artırmıştır.



Şekil 4.11. Parçalı bulutlu bir gün için TST ve sabit sistemden elde edilen güç miktarları

13 Mayıs 2022 tarihinde güneşli bir gün için TST ve sabit güneş sistemine ait güç üretim miktarları Şekil 4.12'de gösterilmiştir. Şekil 4.12'de görüldüğü üzere öğle saatlerinde TST ve sabit güneş sisteminin ürettiği güç miktarları birbirine çok yakın olmakla birlikte öğle öncesi ve sonrası arasında önemli farklılıklar bulunmaktadır. Öğleden önce, sabit sistem panelleri güneye, TST panelleri doğuya bakmaktadır. Güneş ışığı panellere dik açıyla çarptığı için TST'nin elektrik üretimi yüksektir. Öğle saatlerinde panellerin eğim ve azimut açıları aynı olduğu için her iki güneş sisteminin elektrik üretimi birbirine çok yakındır.

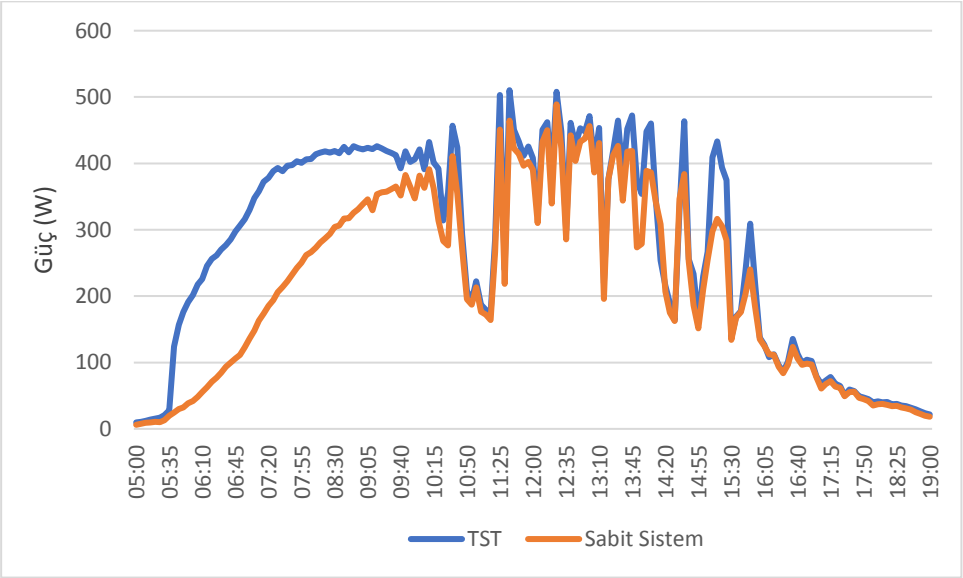
Öğle saatlerinde TST'nin üretmiş olduğu elektrik üretimi sabit güneş sistemine göre biraz daha yüksektir. Bu durum TST'nin yüksek duruşu nedeniyle yerden yansıyan ısıdan daha az etkilenmesinden kaynaklanmaktadır. Öğleden sonra, öğleden önce olduğu gibi, TST, sabit güneş sisteminin aksine güneşi takip etmeye devam ettiği için önemli ölçüde daha fazla elektrik üretimine sahiptir. TST için elde edilen en yüksek ve en düşük güç miktarı sırasıyla 418,96 Wp ve 6,87 Wp'dir. Bu durum sabit güneş paneli için sırasıyla 403,97 Wp ve 3,94 Wp olarak elde edilmiştir. TST ve sabit güneş sisteminin maksimum güç kapasitesi 500 Wp olmasına rağmen her iki güneş enerjisi sistemi de maksimum 400-420 Wp üretti. Üretilen maksimum gücün nominal değerlerden düşük olması, PV panel performansını olumsuz etkileyen yüksek hava sıcaklığından kaynaklanmaktadır. TST ile sabit güneş sistemi arasındaki en yüksek ve en düşük elektrik üretim farkı sırasıyla saat 06:30 ile 05:10'da 204,54 W ve 1,39 W olarak gerçekleşmiştir. Güneşli günün sonunda, TST ve sabit güneş sistemi sırasıyla 4.474,45 kWh ve 3.236,35 kWh elektrik üretti. Bu sonuç, TST'nin sabit güneş sistemine göre %38,26 daha fazla elektrik enerjisi ürettiğini göstermektedir.



Şekil 4.12. Güneşli bir gün için TST ve sabit sistemden elde edilen güç miktarları

14 Mayıs 2022 tarihinde parçalı bulutlu bir gün için TST ve sabit güneş sistemine ait güç üretim miktarları Şekil 4.13'te gösterilmiştir. Şekil 4.13'e bakıldığında öğleden önce güneşli saatlerde yüksek elektrik üretimi elde edilirken bulutlu saatlerde hem TST hem de sabit güneş sisteminin elektrik üretiminde önemli bir düşüş yaşandığı görülmektedir. TST

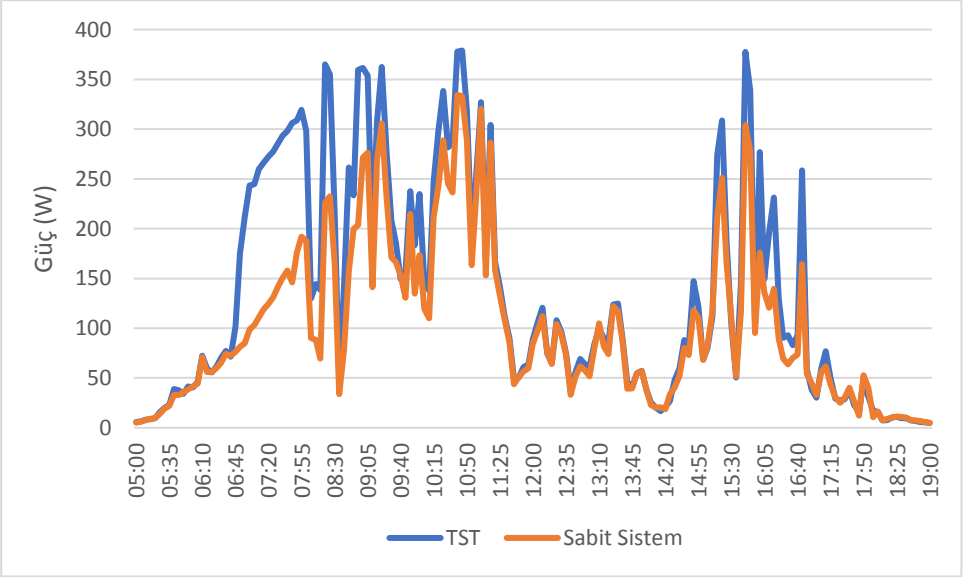
için elde edilen en yüksek ve en düşük güç miktarı sırasıyla 510,37 Wp ve 9,75 Wp'dir. Bu durum sabit güneş paneli için sırasıyla 488,96 Wp ve 6,15 Wp olarak elde edilmiştir. İlginç bir sonuç olarak, önceki sonuçlarda gösterilen güneşli bir günde elde edilen maksimum güç 418,96 Wp'ye kıyasla bulutlu günlerde 510,37 Wp'ye yükseliyor. Bu sonuç, bulutlu günlerde hava sıcaklığının güneşli güne göre daha düşük olmasıyla açıklanabilir. Ayrıca sabit güneş sisteminin elektrik üretimi TST'den nadiren daha fazladır. Örneğin saat 16:10'da TST 108,17 W elektrik üretirken sabit güneş sistemi 112,17 W üretmiştir. Bu olay tıpkı 12 Mayıs günündeki gibi bulutlar güneşin önündeyken, gökyüzünün diğer kısımları bulutsuz olduğunda meydana gelmektedir. Bu zamanlarda TST, güneş ile kendisi arasındaki bulutlar nedeniyle daha az radyasyon alırken sabit güneş sisteminin radyasyonu bulutsuz tarafa baktığı için daha fazladır. TST ile sabit güneş sistemi arasındaki en yüksek ve en düşük elektrik üretim farkı sırasıyla saat 07:05 ile 13:20'de 199,97 Wp ve 0,05 Wp olarak gerçekleşmiştir. TST'nin üretmiş olduğu toplam elektrik enerjisi üretimi 3.839,36 kWh, sabit güneş sisteminin ise 3.051,48 kWh'dır, böylece TST, sabit güneş sistemine kıyasla elektrik enerjisi üretimini %25,82 oranında artırmıştır.



Şekil 4.13. Kısmi bulutlu bir gün için TST ve sabit sistemden elde edilen güç miktarları

Son olarak 15 Mayıs 2022 tarihinde çok bulutlu bir gün için TST ve sabit güneş sistemine ait güç üretim miktarları ölçülmüş ve Şekil 4.14'te gösterilmiştir. Şekil 4.14'te görüldüğü üzere sabah saatleri, öğle saatleri ve akşam saatlerinde yoğun bulutlanma olduğundan hem TST hem de sabit güneş sisteminin elektrik üretiminde önemli bir düşüş olmuştur. Hava

çok bulutlu olduğunda, doğrudan radyasyon zayıftır ve PV paneller, dağınık radyasyonla elektrik üretir. Bu nedenle bulutlu havalarda her iki güneş sisteminin elektrik üretimi birbirine yakındır. TST için elde edilen en yüksek ve en düşük güç miktarı sırasıyla 378,92 Wp ve 4,86 Wp'dir. Bu durum sabit güneş paneli için sırasıyla 334,32 Wp ve 4,86 Wp olarak elde edilmiştir. Güneşli bir güne kıyasla TST ve sabit güneş sisteminin üretmiş olduğu maksimum güç değerleri sırasıyla %10,56 ve %20,83 oranında azalmıştır. Ayrıca sabit güneş sisteminin elektrik üretimi TST'den nadiren daha fazladır. Örneğin saat 17:55'te TST 31,031 W elektrik üretirken sabit güneş sistemi 40,13 W üretmiştir. Bu olay tıpkı daha önceki günlerdeki gibi bulutlar güneşin önündeyken, gökyüzünün diğer kısımları bulutsuz olduğunda meydana gelmektedir. Bu zamanlarda TST, güneş ile kendisi arasındaki bulutlar nedeniyle daha az radyasyon alırken sabit güneş sisteminin radyasyonu bulutsuz tarafa baktığı için daha fazladır. TST ile sabit güneş sistemi arasındaki en yüksek ve en düşük elektrik üretim farkı sırasıyla saat 07:45 ile 13:55'te 160,04 Wp ve 0,33 Wp olarak gerçekleşmiştir. TST'nin üretmiş olduğu toplam elektrik enerjisi üretimi 1.864,73 kWh, sabit güneş sisteminin ise 1.447,25 kWh'dır, böylece TST, sabit güneş sistemine kıyasla elektrik enerjisi üretimini %28,85 oranında artırmıştır. Bu sonuç, TST'nin çok bulutlu günlerde bile önemli ölçüde daha fazla elektrik enerjisi ürettiğini ortaya koymaktadır. Bulutların miktarına bağlı olarak TST'nin sabit bir güneş sistemine göre %25 ile %38 arasında daha fazla enerji ürettiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.14. Çok bulutlu bir gün için TST ve sabit sistemden elde edilen güç miktarları

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında tek motorlu çift eksenli TST tasarlanmış ve uygulanmıştır. Türk solar takipçi olarak adlandırılan bu sistem, tek eksende hareket etmesine rağmen asimetrik yapısı nedeniyle güneşi çift eksende takip etme kabiliyetine sahiptir. Tasarlanan TST ve sabit güneş sistemi maksimum 500 Wp kapasiteye sahiptir. Bingöl ilinde TST ve sabit güneş sistemi için optimum eğim açıları elde edilmiş ve bu optimum eğim açılarının aylık, mevsimlik ve yıllık değişimi incelenmiştir. Ayrıca aritmetik ortalamaya ve ışınım ağırlıklı ortalamaya göre yıllık optimum eğim açıları elde edilmiştir. Hesaplanan eğim açıları ve azimut açıları kullanılarak TST ve sabit güneş paneli ayarlanmıştır. TST'nin performansını analiz etmek için farklı hava koşulları altında sabit güneş paneline kıyasla enerji hasatları karşılaştırılmıştır. Bu çalışma, TST'nin yüksek enerji verimliliği, basit yapısı ve düşük maliyeti gibi çeşitli avantajları nedeniyle sabit güneş sistemlerinin yerini alma potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir. Ek olarak TST, kolay taşınma ve uygulanma gibi özellikleri sayesinde bina çatıları, tarımsal sulama ve güneş enerjisi santralleri gibi çeşitli alanlarda kullanılabilir. Gelecek çalışmalarda, konum ve zaman bilgilerine bağlı olarak sensörsüz TST tasarlanarak sensörlü TST ile karşılaştırılması hedeflenmektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler şeklinde verilmiştir.

- Bulutlu saatlerde hem TST hem de sabit güneş sisteminin elektrik üretiminde önemli bir düşüş görülmüştür.
- Günün belirli saatlerinde bulutlar güneşin önündeyken, gökyüzünün diğer kısımları bulutsuz olduğunda sabit güneş sisteminin elektrik üretimi TST'den nadiren daha fazladır. Bu zamanlarda TST, güneş ile kendisi arasındaki bulutlar nedeniyle daha az radyasyon alırken sabit güneş sisteminin radyasyonu bulutsuz tarafa baktığı için daha fazladır.
- Öğle saatlerinde TST'nin üretmiş olduğu elektrik üretimi sabit güneş sistemine göre biraz yüksektir. Bu durum TST'nin yüksek duruşu nedeniyle yerden yansıyan ısıdan daha az etkilenmesinden kaynaklanmaktadır.
- Güneşli günlerde TST ve sabit güneş sisteminin maksimum güç kapasitesi 500 Wp olmasına rağmen her iki güneş enerjisi sistemi de maksimum 400-420 Wp üretime

sahiptir. Üretilen maksimum gücün nominal değerlerden düşük olması, PV panel performansını olumsuz etkileyen yüksek hava sıcaklığından kaynaklanmaktadır.

- Güneşli bir güne kıyasla TST ve sabit güneş sisteminin üretmiş olduğu maksimum güç değerleri parçalı bulutlu bir gün için %10 ile %20 arasında azalmıştır.
- Bulutlu günler için TST, sabit güneş sistemine kıyasla elektrik enerjisi üretimini %25 ile %32 arasında artırmıştır. Sonuç olarak TST parçalı ve çok bulutlu günlerde bile elektrik enerjisi üretimini önemli ölçüde artırmıştır. Havanın tamamen güneşli olması durumunda ise TST, sabit güneş paneline kıyasla enerji verimliliğini %38 oranında artırmıştır.
- Havanın çok bulutlu olması durumunda doğrudan radyasyon zayıftır, böylece PV paneller, dağınık radyasyonla elektrik üretirler. Bu nedenle bulutlu havalarda her TST ve sabit güneş sisteminin elektrik üretimleri birbirlerine yakındır.
- Optimum eğim açısı en az 0° ile haziran ayında elde edilmiştir. Bu açı değerine karşılık gelen toplam güneş radyasyon miktarı ise 22,6401 MJ/m²-gün'dür. En fazla optimum eğim açısı ise aralık ayında 59°'dir. Bu açı değerine karşılık gelen toplam güneş radyasyon miktarı ise 8,4246 MJ/m²-gün olarak bulunmuştur.
- Ortalama optimum eğim açısı yaz mevsiminde 6° sonbahar mevsiminde 45,33°, kış mevsiminde 55° ve ilkbahar mevsiminde 20,67° elde edilmiştir.
- Güney yönüne bakan PV paneller için Bingöl ili yıllık ortalama optimum eğim açısı aritmetik ortalamaya göre 31,75° olarak bulunmuştur.
- Işınım ağırlıklı optimum eğim açısı hesabında ise Bingöl ili için optimum eğim açısı 25,547° olarak elde edilmiştir.
- Aritmetik ortalamaya göre elde edilen ve optimum eğim açısıyla hesaplanan H_T ocak, şubat, mart, eylül, ekim, kasım ve aralık aylarında ışınım ağırlıklı optimum eğim açısıyla hesaplanan H_T'den daha fazladır. Bu durum nisan, mayıs, haziran, temmuz ve ağustos aylarında ise tam tersidir.
- Işınım ağırlıklı optimum eğim açısıyla hesaplanan H_T'nin yıllık ortalaması, aritmetik ortalamaya göre bulunan optimum eğim açısıyla hesaplanan H_T'nin yıllık ortalamasından daha fazladır.
- βopt = 25,547° olduğu durumda elde edilen toplam H_T miktarı βopt = 31,75° olduğu durumdan 0,1322 MJ/m²-gün daha fazladır. Bu fark yıllık olarak Bingöl için 48,253 MJ/m²-yıl olarak elde edilmiştir.

- Aritmetik ortalamaya ve ışınım ağırlıklı ortalamaya göre hata oranı sırasıyla %0,136811947403 ve %0,064332272078'dir.
- $\beta opt = 31,75°$ ve $\beta opt = 25,547°$ olduğu durumda elde edilen H_T miktarı $\beta opt = 28°$ olduğu durumdaki H_T miktarından daha azdır.
- Eğim açısının 0°, 25°, 25,547°, 26°, 27°, 28°, 29°, 30°, 31°, 31,75°, 32°, 33°, 34°, 35°, 36° ve 90° olduğu durumlarda, H_T'nin yıllık ortalama değerlerine bakıldığında optimum panel eğiminin 28° olduğu bulunmuştur.
- PV sistemlerin eğim açılarının mevsimsel olarak ayarlanması durumunda elde edilen H_T farkı, ışınım ağırlıklı ve aritmetik ortalamaya bağlı yıllık optimum eğim açılarından daha azdır. Bu nedenle PV panellerin öncelikle aylık optimum eğim açılarına daha sonra yıllık optimum eğim açıları yerine mevsimsel olarak optimum eğim açılarına ayarlanması gerekmektedir.
- 21 Haziran tarihinde en uzun gündüzün ve 21 Aralık tarihinde en uzun gecenin yaşanmasından dolayı azimut açıları arasındaki fark büyüktür. 23 Eylül ve 20 Mart ekinoks tarihlerinde ise gece-gündüz eşitliğinin olması nedeniyle azimut açıları arasında küçük farklılıklar görülmektedir.

KAYNAKLAR

Abdelghani-Idrissi, M. A., Khalfallaoui, S., Seguin, D., Vernières-Hassimi, L., & Leveneur, S. (2018). Solar tracker for enhancement of the thermal efficiency of solar water heating system. Renewable Energy, 119, 79–94. https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2017.11.072

Ajder, A. (2011). Fotovoltaik güneş enerjisi sistemleri için optimum eğim açısının hesaplanması. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Akbar, H. S., Siddiq, A. I., & Aziz, M. W. (2017). Microcontroller Based Dual Axis Sun Tracking System for Maximum Solar Energy Generation. American Journal of Energy Research, 5(1), 23–27. https://doi.org/10.12691/ajer-5-1-3

Aksungur, K. M., Kurban, M., Filik, Ü. B., Üniversitesi, A., Fakültesi, M., Elektronik, E., & Bölümü, M. (2013). Türkiye'nin Farklı Bölgelerindeki Güneş Işınım Verilerinin Analizi ve Değerlendirilmesi. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu ve Sergisi.

Altıntaş, B. (2012). Güneş enerjisi destekli ısı depolama sisteminin termodinamik modeli ve endüstriyel uygulamaları. Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü.

Amir Abas, M., Hilmi Fadzil S, M., Kadir, S. A., & Khusairy Azim, A. (2010). Improved structure of solar tracker with microcontroller based control. Proceedings - 2010 2nd International Conference on Advances in Computing, Control and Telecommunication Technologies, ACT 2010, 55–59. https://doi.org/10.1109/ACT.2010.28

Aydın, M. (2020). Türkiye koşullarında güneş panelleri için optimum sabit ve ayarlanabilir açıların belirlenmesi üzerine bir araştırma. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Bahrami, A., Okoye, C. O., & Atikol, U. (2016). The effect of latitude on the performance of different solar trackers in Europe and Africa. Applied Energy, 177, 896–906. https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2016.05.103

Bakirci, K. (2012). General models for optimum tilt angles of solar panels: Turkey case study. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(8), 6149–6159. https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.07.009

Banerjee, A., Majumder, A., Banerjee, A., Sarkar, S., & Bosu, D. (2015). Harnessing Non Conventional Solar Energy through Conventional Thermal Power Sytems. 2015 International Conference and Workshop on Computing and Communication (IEMCON).

Barbosa de Melo, K., Kitayama da Silva, M., Lucas de Souza Silva, J., Costa, T. S., & Villalva, M. G. (2022). Study of energy improvement with the insertion of bifacial modules and solar trackers in photovoltaic installations in Brazil. Renewable Energy Focus, 41, 179–187. https://doi.org/10.1016/J.REF.2022.02.005

Bawa, D., & Patil, C. Y. (2013). Fuzzy control based solar tracker using Arduino Uno. International Journal of Engineering Science and Innovative Technology, 2(12).

Bhakta, S., & Mukherjee, V. (2017). Techno-economic viability analysis of fixed-tilt and two axis tracking stand-alone photovoltaic power system for Indian bio-climatic classification zones. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 9(1). https://doi.org/10.1063/1.4976119

Çağlar, A. (2018). Farklı Derece-Gün Bölgelerindeki Şehirler İçin Optimum Eğim Açısının Belirlenmesi. Süleyman Demirel University Journal of Natural and Applied Sciences, 22(2), 849–854. https://doi.org/10.19113/sdufbed.94899

Dal, A. R. (2021). Güneş Enerji Panellerindeki Optimum Eğim Açısının Verime Etkisinin İncelenmesi Investigation of the Effect of Optimum Tilt Angle on Yield in Solar Energy Panels. BSEU Journal of Science Araştırma Makalesi-Research Article, 8(1), 241–250. https://doi.org/10.35193/bseufbd.878795

Dale, S. (2020). BP Energy Outlook 2020. https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2020-presentation-slides.pdf

Duffie, J. A., Beckman, W. A., & Blair, N. (2020). Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind. https://books.google.com.tr/books?hl=tr&lr=&id=4vXPDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR11&dq=Solar+Engineering+of+Thermal+Processes&ots=kwrASVmBIQ&sig=xqHdY5GdB-0oi4g3oLsGVsRjRAM&redir_esc=y#v=onepage&q=Solar Engineering of Thermal Processes&f=false

Eldin, S. A. S., Abd-Elhady, M. S., & Kandil, H. A. (2016). Feasibility of solar tracking systems for PV panels in hot and cold regions. Renewable Energy, 85, 228–233. https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.06.051

European Commission. (n.d.). Solar energy. Retrieved May 31, 2022, from https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/solar-energy_en

Fathabadi, H. (2016). Comparative study between two novel sensorless and sensor based dual-axis solar trackers. Solar Energy, 138, 67–76. https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2016.09.009

Gündoğdu, K., Kabadayı, H. S., & Öztürk, A. (2016). Fotovoltaik Paneller İçin Güneş Takip Edebilen Basit Ve Ekonomik Bir Sistem Tasarımı. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 4(2). https://dergipark.org.tr/tr/pub/dubited/258408

Hammad, B., Al-Sardeah, A., Al-Abed, M., Nijmeh, S., & Al-Ghandoor, A. (2017). Performance and economic comparison of fixed and tracking photovoltaic systems in Jordan. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 80, 827–839. https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.05.241

Hammoumi, A. El, & Ghzizal, A. El. (2018). A simple and low- - cost active dual- - axis solar tracker. Wiley Online Library, August(March), 1–14. https://doi.org/10.1002/ese3.236

HIOKI. (n.d.). HIOKI PW3198 Power Quality Analyzer. Retrieved June 8, 2022, from https://www.hioki.com/global/products/pqa/power-quality/id_5824

İlcihan, Z. (2019). Koordinat tabanlı güneş takip sistemi tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Bitlis Eren Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Ilse, K. K., Figgis, B. W., Naumann, V., Hagendorf, C., & Bagdahn, J. (2018). Fundamentals of soiling processes on photovoltaic modules. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 98, 239–254. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.015

IRENA. (2022). Renewable Capacity Statistics 2022. International Renewable Energy Agency. https://www.irena.org/publications/2022/Apr/Renewable-Capacity-Statistics-2022

Jaganmohan, M. (2022). Renewable energy in Turkey - statistics & facts. STATİSTA. https://www.statista.com/statistics/878801/total-renewable-capacity-in-turkey/

Jain, P., & Kaur, T. (2015). Optimization of solar PV system and analysis of tilt angle. E-Energy 2015 - Proceedings of the 2015 ACM 6th International Conference on Future Energy Systems, 277–282. https://doi.org/10.1145/2768510.2768517

K.Stefan. (2018). Solar Electric Power Generation Introduction. In University of Leeds (Issue October).

Karafil, A., Ozbay, H., Kesler, M., & Parmaksiz, H. (2015). Calculation of Optimum Fixed Tilt Angle of PV Panels Depending on Solar Angles and Comparison of the Results with Experimental Study Conducted in Summer in Bilecik, Turkey. 2015 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO).

Kaur, T., Mahajan, S., Verma, S., Priyanka, & Gambhir, J. (2017). Arduino based low cost active dual axis solar tracker. 1st IEEE International Conference on Power Electronics,

Intelligent Control and Energy Systems, ICPEICES 2016, 1–5. https://doi.org/10.1109/ICPEICES.2016.7853398

Klein, S. A. (1977). Calculation of Monthly Average Insolation on Tilted Surfaces. 19, 325–329.

Kuttybay, N., Saymbetov, A., Mekhilef, S., Nurgaliyev, M., Tukymbekov, D., Dosymbetova, G., Meiirkhanov, A., & Svanbayev, Y. (2020). Optimized Single-Axis Schedule Solar Tracker in Different Weather Conditions. Energies 2020, Vol. 13, Page 5226, 13(19), 5226. https://doi.org/10.3390/EN13195226

Liu, B, Jordan, R. (1962). Daily insolation on surfaces tilted towards equator. Osti.Gov. https://www.osti.gov/biblio/5047843

Makhija, S., Khatwani, A., Khan, M. F., Goel, V., & Roja, M. M. (2017). Design & implementation of an automated dual-axis solar tracker with data-logging. Proceedings of the International Conference on Inventive Systems and Control, ICISC 2017. https://doi.org/10.1109/ICISC.2017.8068708

Messenger, R. A., & Abtahi, A. (2018). Photovoltaic Systems Engineering. Photovoltaic Systems Engineering. https://doi.org/10.1201/9781315218397

Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (n.d.). Global Güneş Radyasyonu. Retrieved June 24, 2022, from https://www.mgm.gov.tr/kurumici/radyasyon_iller.aspx?il=bingol

Mishra, J., Thakur, R., & Deep, A. (2017). Arduino based Dual Axis Smart Solar Tracker. International Journal of Advanced Engineering, 3(5). https://doi.org/10.24001/ijaems.3.5.20

Morón, C., Ferrández, D., Saiz, P., Vega, G., & Díaz, J. P. (2017). New Prototype of Photovoltaic Solar Tracker Based on Arduino. Energies 2017, Vol. 10, Page 1298, 10(9), 1298. https://doi.org/10.3390/EN10091298

Muslim, H. N. (2019). Solar Tilt Angle Optimization of PV Systems for Different Case Studies. https://doi.org/10.4108/eai.13-7-2018.157038

NOAA. (2018). General Solar Position Calculations NOAA Global Monitoring Division. https://gml.noaa.gov/grad/solcalc/solareqns.pdf

Ofluoglu, S. (2018). Güneş Kontrolü: Güneş Kırıcı ve Rafları. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/328875739

Panwar, N. L., Kaushik, S. C., & Kothari, S. (2011). Role of renewable energy sources in

environmental protection: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15(3), 1513–1524. https://doi.org/10.1016/J.RSER.2010.11.037

Quesada, G., Guillon, L., Rousse, D. R., Mehrtash, M., Dutil, Y., & Paradis, P. L. (2015). Tracking strategy for photovoltaic solar systems in high latitudes. Energy Conversion and Management, 103, 147–156. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.06.041

Rosyadah, M. (Marhani), Kusumanto, R. (RD), & Dewi, T. (Tresna). (2022). Smart optimization of PV panel output using Fuzzy Logic Controller based solar tracker. SINERGI, 26(1), 73–80. https://doi.org/10.22441/SINERGI.2022.1.010

S, A., Razali, A. N., & Misrun, M. I. (2021). Effective and Low-Cost Arduino based Dual-Axis Solar Tracker. Journal of Physics: Conference Series. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1878/1/012049

S Deepthi, A Ponni, R Ranjitha, R. D. (2013). Comparison of efficiencies of single-axis tracking system and dual-axis tracking system with fixed mount. International Journal of Engineering Science and Innovative Technology, 2, 425–430.

Saeedi, M., & Effatnejad, R. (2021). A new design of dual-axis solar tracking system with ldr sensors by using the wheatstone bridge circuit. IEEE Sensors Journal, 21(13), 14915–14922. https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3072876

Safaraliev, M. K., Odinaev, I. N., Ahyoev, J. S., Rasulzoda, K. N., & Otashbekov, R. A. (2020). Energy Potential Estimation of the Region's Solar Radiation Using a Solar Tracker. Applied Solar Energy (English Translation of Geliotekhnika), 56(4), 270–275. https://doi.org/10.3103/S0003701X20040118/FIGURES/7

Sawant, A., Bondre, D., Joshi, A., Tambavekar, P., & Deshmukh, A. (2019). Design and analysis of automated dual axis solar tracker based on light sensors. Proceedings of the International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud), I-SMAC 2018, 454–459. https://doi.org/10.1109/I-SMAC.2018.8653779

Saymbetov, A., Mekhilef, S., Kuttybay, N., Nurgaliyev, M., Tukymbekov, D., Meiirkhanov, A., Dosymbetova, G., & Svanbayev, Y. (2021). Dual-axis schedule tracker with an adaptive algorithm for a strong scattering of sunbeam. Solar Energy, 224, 285–297. https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2021.06.024

Sidek, M. H. M., Azis, N., Hasan, W. Z. W., Ab Kadir, M. Z. A., Shafie, S., & Radzi, M. A. M. (2017). Automated positioning dual-axis solar tracking system with precision elevation and azimuth angle control. Energy, 124, 160–170. https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2017.02.001

Sinha, S., & Chandel, S. S. (2016). Analysis of fixed tilt and sun tracking photovoltaic–

micro wind based hybrid power systems. Energy Conversion and Management, 115, 265–275. https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2016.02.056

Sipani, J. P., Patel, R. H., Upadhyaya, T., & Desai, A. (2018). Wireless sensor network for monitoring & control of environmental factors using Arduino. International Journal of Interactive Mobile Technologies, 12(2), 15–26. https://doi.org/10.3991/ijim.v12i2.7415
Solargis. (2022). Global Solar Atlas. https://globalsolaratlas.info/map?c=13.752725,-41.132813,2

Syafii, Nazir, R., Kamshory, & Hadi, M. (2015). Improve dual axis solar tracker algorithm based on sunrise and sunset position. Journal of Electrical Systems, 11(4), 397–406.

Talavera, D. L., Muñoz-Cerón, E., Ferrer-Rodríguez, J. P., & Pérez-Higueras, P. J. (2019). Assessment of cost-competitiveness and profitability of fixed and tracking photovoltaic systems: The case of five specific sites. Renewable Energy, 134, 902–913. https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.11.091

Taşova, M. (2018). Türkiye' nin Güneş Enerjisi Parametre Değerleri Ve Güneş enerjisinden Faydalanma Olanakları. İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi, 7(3).

Tchakounté, H., Claude Bertin, N. F., & Kamta, M. (2022). Optimization of the Performance of a Photovoltaic Module by an Intelligent Solar Tracker. 1st International Conference on Engineering Sciences and Development.

TEİAŞ. (2021). Aylık Elektrik Üretim-Tüketim Raporları. https://www.teias.gov.tr/aylik-elektrik-uretim-tuketim-raporlari

TEİAŞ. (2022). Kaynaklara ve Kuruluşlara Göre Kurulu Güç. https://www.gensed.org/basin/teias-2022-nisan-ayi-kurulu-guc-raporunu-yayinladi

Tharamuttam, J. K., & Ng, A. K. (2017). Design and Development of an Automatic Solar Tracker. Energy Procedia, 143, 629–634. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.738

Vaziri Rad, M. A., Toopshekan, A., Rahdan, P., Kasaeian, A., & Mahian, O. (2020). A comprehensive study of techno-economic and environmental features of different solar tracking systems for residential photovoltaic installations. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 129, 109923. https://doi.org/10.1016/J.RSER.2020.109923

Xi, C. T. Y., Daud, M. Z., Muda, W. M. W., & Jusoh, M. A. (2017). Development of microcontroller-based solar tracking system using LDR sensor. Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering, 9(2–7), 71–75.

Yao, Y., Hu, Y., Gao, S., Yang, G., & Du, J. (2014). A multipurpose dual-axis solar tracker with two tracking strategies. Renewable Energy, 72, 88–98.

https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.07.002

Yilmaz, S., Riza Ozcalik, H., Dogmus, O., Dincer, F., Akgol, O., & Karaaslan, M. (2015). Design of two axes sun tracking controller with analytically solar radiation calculations. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 43, 997–1005. https://doi.org/10.1016/J.RSER.2014.11.090

Yılmaz, G. (2018). Türkiye'deki güneş panellerinin optimum eğim açılarının analizi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Yılmaz, M. (2013). Güneş Takip Sistemi ile Güneş Enerjisinden Elektrik Enerjisi Elde Etme Yöntemleri ve Optimum Verimin Belirlenmesi. Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

EKLER

EK A.

TST'nin doğu-batı yönelimindeki hareketini sağlayan Ardunio UNO yazılımı

```
const int motor1Pin = 5;
const int motor2Pin = 6;
int LDRPin = A0;
int LDRPin1 = A1;

void setup()
{ pinMode(motor1Pin, OUTPUT);
pinMode(motor2Pin, OUTPUT);
Serial.begin(9600);  }

void loop()
{ int isik_degeri1 = analogRead(LDRPin);
int isik_degeri2 = analogRead(LDRPin1);
int fark=isik_degeri1-isik_degeri2;
Serial.println(isik_degeri1);
Serial.println(isik_degeri2);
Serial.print("Fark :");
Serial.println(fark);
delay(500);  }

if(fark > 5)
{ digitalWrite(motor1Pin, LOW);
digitalWrite(motor2Pin, HIGH);
delay(500); }

else if(fark < -5)
```

```
{digitalWrite(motor1Pin, HIGH);
 digitalWrite(motor2Pin, LOW);
 delay(500); }

else
{ digitalWrite(motor1Pin, LOW);
 digitalWrite(motor2Pin, LOW);
 delay(10000); } } }
```

EK B.

Bingöl ilinde PV sistemlerin optimum eğiminin hesabı için kullanılan MATLAB yazılımı

```
clc;
clear all;

% Meteoroloji aylık ortalama radyasyon 3.6 kWh/m²  = Türkiye'nin günlük radyasyonu
ocak=3.6*2.147;
subat=3.6*2.534;
mart=3.6*4.133;
nisan=3.6*5.063;
mayis=3.6*6.409;
haziran=3.6*7.681;
temmuz=3.6*7.499;
agustos=3.6*6.497;
eylul=3.6*5.481;
ekim=3.6*3.747;
kasim=3.6*2.575;
aralik=3.6*1.596;

Enlem=38.88;        % Enlem
Gunler=1:1:365;     % Günler
Gsc=1367;           % Güneş sabiti
```

```
% Deklinasyon, ws, N ve H0 hesabı
for i=1:365
 deklinasyon(i)=23.45*sind((360*(Gunler(i)+284)/365));
 ws(i)=acosd(-tand(Enlem)*tand(deklinasyon(i)));
 N(i) = (2/15)*(acosd(-tand(Enlem)*tand(deklinasyon(i))));
H0(i)=((24/pi)*Gsc*3600*(1+(0.033*cosd(360*Gunler(i)/365)))*(cosd(Enlem)*cosd(de
klinasyon(i))*sind(ws(i))+(2*pi*ws(i)/360)*sind(Enlem)*sind(deklinasyon(i))));
end

% Yatay bir yüzeyde aylık ortalama günlük atmosfer dışı radyasyon
OrtH0=zeros(12,1);
OrtH0(1)=sum(H0(1:31))/31;
OrtH0(2)=sum(H0(32:59))/28;
OrtH0(3)=sum(H0(60:90))/31;
OrtH0(4)=sum(H0(91:120))/30;
OrtH0(5)=sum(H0(121:151))/31;
OrtH0(6)=sum(H0(152:181))/30;
OrtH0(7)=sum(H0(182:212))/31;
OrtH0(8)=sum(H0(213:243))/31;
OrtH0(9)=sum(H0(244:273))/30;
OrtH0(10)=sum(H0(274:304))/31;
OrtH0(11)=sum(H0(305:334))/30;
OrtH0(12)=sum(H0(335:365))/31;
OrtH0Yearly=sum(OrtH0)/12;

% Aylık ortalama gün uzunluğu
OrtN=zeros(12,1);
OrtN(1)=sum(N(1:31))/31;
OrtN(2)=sum(N(32:59))/28;
OrtN(3)=sum(N(60:90))/31;
OrtN(4)=sum(N(91:120))/30;
OrtN(5)=sum(N(121:151))/31;
OrtN(6)=sum(N(152:181))/30;
```

```
OrtN(7)=sum(N(182:212))/31;
OrtN(8)=sum(N(213:243))/31;
OrtN(9)=sum(N(244:273))/30;
OrtN(10)=sum(N(274:304))/31;
OrtN(11)=sum(N(305:334))/30;
OrtN(12)=sum(N(335:365))/31;
OrtNYearly=sum(OrtN)/12;

% Aylık ortalama günlük güneşlenme süresi
m=zeros(365,1);
m(1:31)=3.3;
m(32:60)=4.4;
m(61:91)=4.9;
m(92:121)=5.5;
m(122:152)=7.0;
m(153:182)=9.1;
m(183:213)=9.4;
m(214:245)=9.0;
m(246:274)=8.1;
m(275:305)=6.0;
m(306:335)=4.4;
m(336:365)=3.1;

for i=1:365 % İzafi güneşlenme süresi m/N hesabı
   izafiG(i) = (m(i)/N(i));
end

% Ortalama İzafi güneşlenme süresi m/N hesabı
izafiGort(1)=sum(izafiG(1:31))/31;
 izafiGort(2)=sum(izafiG(32:60))/29;
 izafiGort(3)=sum(izafiG(61:91))/31;
 izafiGort(4)=sum(izafiG(92:121))/30;
 izafiGort(5)=sum(izafiG(122:152))/31;
```

```
 izafiGort(6)=sum(izafiG(153:182))/30;
 izafiGort(7)=sum(izafiG(183:213))/31;
 izafiGort(8)=sum(izafiG(214:244))/31;
 izafiGort(9)=sum(izafiG(245:274))/30;
 izafiGort(10)=sum(izafiG(275:305))/31;
 izafiGort(11)=sum(izafiG(306:335))/30;
 izafiGort(12)=sum(izafiG(336:365))/31;
izafiGortYearly=sum(izafiGort)/12;

for i=1:365  % Türkiye için a ve b katsayıları deklinasyon açısı, rakım ve enlem açısına bağlı olarak belirlenmiştir
 a(i)=0.103+(0.000017*1125)+(0.198*cosd(Enlem-deklinasyon(i)));
 b(i)=0.533-(0.165*cosd(Enlem-deklinasyon(i)));
end

for i=1:365 % yatay yüzeye gelen aylık ortalama günlük güneş ışınımı miktarı
    H(i)=H0(i)*(a(i)+b(i)*izafiG(i));
end

 % yatay düzleme gelen aylık ortalama günlük güneş ışınımının aylık ortalaması
OrtH=zeros(12,1);
OrtH(1)=sum(H(1:31))/31;
OrtH(2)=sum(H(32:60))/29;
OrtH(3)=sum(H(61:91))/31;
OrtH(4)=sum(H(92:121))/30;
OrtH(5)=sum(H(122:152))/31;
OrtH(6)=sum(H(153:182))/30;
OrtH(7)=sum(H(183:213))/31;
OrtH(8)=sum(H(214:244))/31;
OrtH(9)=sum(H(245:274))/30;
OrtH(10)=sum(H(275:305))/31;
OrtH(11)=sum(H(306:335))/30;
OrtH(12)=sum(H(336:365))/31;
```

```
OrtHYillik=sum(OrtH)/12;

Kt=H./H0;       % KT = Aylık ortalama günlük açıklık indeksidir ( Berraklık İndeksi )

% Aylık ortalama günlük yayılmış radyasyon
Hd=H.*(1-1.13*Kt);
OrtHd=zeros(12,1);
OrtHd(1)=sum(Hd(1:31))/31;
OrtHd(2)=sum(Hd(32:59))/28;
OrtHd(3)=sum(Hd(60:90))/31;
OrtHd(4)=sum(Hd(91:120))/30;
OrtHd(5)=sum(Hd(121:151))/31;
OrtHd(6)=sum(Hd(152:181))/30;
OrtHd(7)=sum(Hd(182:212))/31;
OrtHd(8)=sum(Hd(213:243))/31;
OrtHd(9)=sum(Hd(244:273))/30;
OrtHd(10)=sum(Hd(274:304))/31;
OrtHd(11)=sum(Hd(305:334))/30;
OrtHd(12)=sum(Hd(335:365))/31;
OrtHdYillik=sum(OrtHd)/12;

for i=1:12 % OrtH0, OrtH ve OrtHd değerlerine bağlı olarak 12x3 lük matris
 Grafik1(i,1)=OrtH0(i);
 Grafik1(i,2)=OrtH(i);
 Grafik1(i,3)=OrtHd(i);
end

figure(1)
bar(Grafik1);
xlabel('Aylar');
ylabel('Global Güneş Radyasyonu (MJ/m²-day)');
%legend({'Atmosfer dışından gelen radyasyon','Global Radyasyon','Dağınık
Radyasyon'},'Location','south','Orientation','horizontal');
```

```
legend({'Atmosfer dışından gelen radyasyon','Global Radyasyon','Dağınık Radyasyon'});
% Ocak-Haziran küresel güneş radyasyon grafiği
% Eğim açısı
e=1;
beta=0:e:90; % wsun = Hesaplama yapılan ayın ortalama gününde eğik düzlem için güneş ışınlarının eğik yüzey üzerine ilk düşüş saat açısı
for i=1:365
 wsun1(i)=acosd(-tand(Enlem)*tand(deklinasyon(i)));
end
for j=1:90/e+1
for i=1:365
 wsun2(i,j)=acosd(-tand(Enlem-beta(j))*tand(deklinasyon(i)));
end
end
for j=1:90/e+1
 for i=1:365
 wsun(i,j)=min(wsun1(i),wsun2(i,j));
 end
end

for j=1:90/e+1 % Rb = Eğik düzlem üzerine gelen direkt güneş ışınımının yatay düzlem üzerine gelen ışınım miktarına oranı
    for i=1:365
     Rb(i,j)=((cosd(Enlem-beta(j))*cosd(deklinasyon(i))*sind(wsun(i,j)))...
 +((pi/180)*wsun(i,j)*sind(Enlem-beta(j))*sind(deklinasyon(i))))...
 /((cosd(Enlem)*cosd(deklinasyon(i))*sind(wsun(i,j)))...
 +((pi/180)*wsun(i,j)*sind(Enlem)*sind(deklinasyon(i))));
 end
end

ro=0.2; % ro = yerin yansıtma oranı
for j=1:90/e+1
 for i=1:365 % Ht = Eğik düzleme gelen toplam radyasyonun hesabı
```

```
 Ht(i,j)=(H(i)*(1-Hd(i)/H(i))*Rb(i,j))+(Hd(i)*((1+cosd(beta(j)))/2))+(H(i)*ro*((1-
cosd(beta(j)))/2));
 end
end

for j=1:90/e+1 % OrtHt = Eğik düzleme gelen aylık ortalama günlük global güneş ışınımı
OrtHt(1,j)=sum(Ht(1:31,j))/31;
OrtHt(2,j)=sum(Ht(32:59,j))/28;
OrtHt(3,j)=sum(Ht(60:90,j))/31;
OrtHt(4,j)=sum(Ht(91:120,j))/30;
OrtHt(5,j)=sum(Ht(121:151,j))/31;
OrtHt(6,j)=sum(Ht(152:181,j))/30;
OrtHt(7,j)=sum(Ht(182:212,j))/31;
OrtHt(8,j)=sum(Ht(213:243,j))/31;
OrtHt(9,j)=sum(Ht(244:273,j))/30;
OrtHt(10,j)=sum(Ht(274:304,j))/31;
OrtHt(11,j)=sum(Ht(305:334,j))/30;
OrtHt(12,j)=sum(Ht(335:365,j))/31;

% Eğik düzleme gelen mevsimlik ortalama günlük global güneş ışınımı
OrtHtkiş(j)=(OrtHt(12,j)+OrtHt(1,j)+OrtHt(2,j))/3;
OrtHtilkbahar(j)=(OrtHt(3,j)+OrtHt(4,j)+OrtHt(5,j))/3;
OrtHtyaz(j)=(OrtHt(6,j)+OrtHt(7,j)+OrtHt(8,j))/3;
OrtHtsonbahar(j)=(OrtHt(9,j)+OrtHt(10,j)+OrtHt(11,j))/3;
OrtHtyillik(j)=sum(Ht(1:365,j))/365;
end

figure(2) % Farklı eğim açıları için eğimli yüzeye düşen günlük global güneş ışınım
değerleri (HT) (Ocak-Haziran)
plot(beta,OrtHt(1,:),'-r');
hold on
plot(beta,OrtHt(2,:),'.k');
plot(beta,OrtHt(3,:),'--g');
```

```
plot(beta,OrtHt(4,:),'-.m');
plot(beta,OrtHt(5,:),'*y');
plot(beta,OrtHt(6,:),'-b');
xlabel('Eğim açısı');
ylabel('Global güneş radyasyonu (MJ/m²-gün)');
legend({'Ocak','Şubat','Mart','Nisan','Mayıs','Haziran'});

figure(3) % Farklı eğim açıları için eğimli yüzeye düşen günlük global güneş ışınım değerleri (HT) (Temmuz-Aralık)
plot(beta,OrtHt(7,:),'-r');
hold on
plot(beta,OrtHt(8,:),'.k');
plot(beta,OrtHt(9,:),'--g');
plot(beta,OrtHt(10,:),'-.m');
plot(beta,OrtHt(11,:),'*y');
plot(beta,OrtHt(12,:),'-b');
xlabel('Eğim açısı');
ylabel('Küresel güneş radyasyonu (MJ/m²-gün)');
legend({'Temmuz','Ağustos','Eylül','Ekim','Kasım','Aralık'});

% Hopt = Aylık ortalama günlük global güneş ışınımının Optimum değeri (MJ/m²-gün)
% betaopt = Aylara bağlı Optimum Eğim açısı değerleri
for i=1:12
 [Hopt(i), idx(i)]=max(OrtHt(i,:));
 betaopt(i)=-1+idx(i);
end

% Mevsimlere bağlı Optimum Eğim açısı değerleri
kiş=(betaopt(12)+betaopt(1)+betaopt(2))/3;
ilkbahar=(betaopt(3)+betaopt(4)+betaopt(5))/3;
yaz=(betaopt(6)+betaopt(7)+betaopt(8))/3;
sonbahar=(betaopt(9)+betaopt(10)+betaopt(11))/3;
mevsimlik(1)=kiş; mevsimlik (2)=kiş; mevsimlik (3)=ilkbahar; mevsimlik (4)=ilkbahar;
```

```
mevsimlik (5)=ilkbahar; mevsimlik (6)=yaz;
mevsimlik(7)=yaz;mevsimlik(8)=yaz;mevsimlik (9)=sonbahar; mevsimlik (10)=sonbahar;
mevsimlik(11)=sonbahar; mevsimlik (12)=kiş;

% Yıllık bazda Optimum Eğim Açısı değeri
Yillik=sum(betaopt(:))/12;

for i=1:12 % 12 ay için Yıllık bazda Optimum Eğim Açısı değerleri
 Yillikk(i)=Yillik;
end
figure(4)
plot(1:12,betaopt,'.-');
hold on
plot(1:12,mevsimlik ,'-');
plot(1:12,Yillikk,'-');
xlabel('Aylar');
ylabel('Eğim Açısı');
legend({'Optimum','Mevsimlik ortalama','Yıllık ortalama'});

for i=1:12 %betaopt, mevsimlik ve yıllık değerlerine bağlı olarak 12x3 lük matris
 Grafik4(i,1)=betaopt(i);
 Grafik4(i,2)=mevsimlik(i);
 Grafik4(i,3)=Yillikk(i);
end

Hoptmevsimlik(1)=OrtHt(1,floor(kiş));
Hoptmevsimlik(2)=OrtHt(2,floor(kiş));
Hoptmevsimlik(3)=OrtHt(3,floor(ilkbahar));
Hoptmevsimlik(4)=OrtHt(4,floor(ilkbahar));
Hoptmevsimlik(5)=OrtHt(5,floor(ilkbahar));
Hoptmevsimlik(6)=OrtHt(6,floor(yaz));
Hoptmevsimlik(7)=OrtHt(7,floor(yaz));
Hoptmevsimlik(8)=OrtHt(8,floor(yaz));
```

```
Hoptmevsimlik(9)=OrtHt(9,floor(sonbahar));
Hoptmevsimlik(10)=OrtHt(10,floor(sonbahar));
Hoptmevsimlik(11)=OrtHt(11,floor(sonbahar));
Hoptmevsimlik(12)=OrtHt(12,floor(kiş));
HYillik=sum(Hoptmevsimlik);

for i=1:12
    Grafik2(i,1)=Hopt(i);
 Grafik2(i,2)=Hoptmevsimlik(i);
 Grafik2(i,3)=OrtHt(i,floor(Yillik));
end
figure(5)
bar(Grafik2);
xlabel('Aylar');
ylabel('Global güneş radyasyonu (MJ/m^2-gün)');
legend({'Optimum','Mevsimlik ortalama','Yıllık ortalama'});
for i=1:12 %Hopt, mevsimlik ve yıllık değerlerine bağlı olarak 12x3 lük matris
 Grafik5(i,1)=betaopt(i);
 Grafik5(i,2)=mevsimlik(i);
 Grafik5(i,3)=Yillikk(i);
end
figure(6)
plot(beta,OrtHtyillik,'-');
hold on
plot(beta,OrtHtkiş,'-.');
plot(beta,OrtHtilkbahar,'.');
plot(beta,OrtHtyaz,'*');
plot(beta,OrtHtsonbahar,'-');
xlabel('Eğim açısı');
ylabel('Küresel güneş radyasyonu (MJ/m^2-gün)');
legend({'Yıllık','Kış','İlkbahar','Yaz','Sonbahar'});
```

EK C.

Tablo 4.11. Bingöl ili için 12 Mayıs 2022 ve 13 Mayıs 2022 tarihlerinde TST ve sabit güneş sistemine ait güç değerleri

12 Mayıs 2022 Perşembe			13 Mayıs 2022 Cuma		
Saat	TST (W)	Sabit Sistem (W)	Saat	TST (W)	Sabit Sistem (W)
05:00	7,4685	4,985	05:00	6,9706	5,4835
05:05	8,4762	5,4923	05:05	7,479	5,9916
05:10	10,6457	7,5452	05:10	9,5251	8,1256
05:15	15	9,5133	05:15	9,5	8,0112
05:20	17,528	12,5425	05:20	11,0176	9,5323
05:25	24,5882	15,078	05:25	14,5522	11,0572
05:30	31,72	24,84	05:30	18,2	15,66
05:35	33,3647	28,57	05:35	30,7501	26,26
05:40	45,9672	35,48	05:40	33,9221	25,37
05:45	125,9714	28,424	05:45	145,9714	25,3232
05:50	219,0794	31,242	05:50	211,0794	30,7213
05:55	220,0308	33,943	05:55	220,0308	33,943
06:00	229,2441	55,3433	06:00	233,1552	48,6576
06:05	245,179	60,8622	06:05	243,6806	54,9436
06:10	261,9247	65,1527	06:10	256,2529	61,7572
06:15	266,8753	74,7668	06:15	265,5962	66,9634
06:20	273,6714	82,3987	06:20	276,448	74,2921
06:25	288,4539	88,1546	06:25	285,2605	82,6275
06:30	299,7861	98,5565	06:30	296,0416	91,4944
06:35	305,4138	103,1174	06:35	302,064	98,2011
06:40	311,081	113,8675	06:40	309,4	106,4405
06:45	320,5682	122,1495	06:45	318,8502	116,7025
06:50	325,3764	131,9711	06:50	321,4296	123,2074
06:55	331,782	139,3164	06:55	330,048	131,9884
07:00	42,5208	61,1262	07:00	338,334	143,77
07:05	52,6536	43,7722	07:05	339,066	146,5747
07:10	69,278	49,7859	07:10	340,9392	153,6394
07:15	247,41	128,3	07:15	334,422	155,6525
07:20	185,76	104,64	07:20	361,5248	171,6304
07:25	122,368	111,155	07:25	374,0785	184,912

Tablo 4.11. (Devam): Bingöl ili için 12 Mayıs 2022 ve 13 Mayıs 2022 tarihlerinde TST ve sabit güneş sistemine ait güç değerleri

07:30	138,065	122,508	07:30	384,285	195,8565
07:35	128,6624	104,9953	07:35	381,99	200,356
07:40	238,4235	125,8219	07:40	383,3596	209,7248
07:45	251,9064	130,107	07:45	380,4972	215,6578
07:50	103,6431	89,9204	07:50	396,1423	224,6566
07:55	163,944	146,785	07:55	383,9045	230,058
08:00	174,592	156,5464	08:00	397,38	237,7009
08:05	365,33	274,996	08:05	397,4262	247,575
08:10	189,2229	161,2796	08:10	402,8571	250,106
08:15	186,1242	139,2061	08:15	392,1264	257,7716
08:20	348,075	279,316	08:20	403,7155	266,4848
08:25	238,112	205,952	08:25	383,6559	269,008
08:30	179,0937	158,2837	08:30	399,2329	277,0549
08:35	108,5968	95,5752	08:35	387,849	282,8308
08:40	49,3728	43,9042	08:40	393,9072	296,6336
08:45	52,4888	46,6336	08:45	379,748	290,78
08:50	42,16	37,658	08:50	392,496	290,358
08:55	39,7686	36,2304	08:55	390,156	301,4281
09:00	38,493	44,442	09:00	385,2198	309,255
09:05	17,311	14,823	09:05	391,1952	315,3474
09:10	21,7756	27,1975	09:10	375,1104	314,3515
09:15	30,8636	39,808	09:15	394,6472	323,838
09:20	47,3196	67,878	09:20	381,1016	319,7824
09:25	76,455	97,3336	09:25	394,93	325,2412
09:30	130,3694	136,3655	09:30	383,1595	330,292
09:35	139,0382	88,8673	09:35	395,4118	338,546
09:40	90,7375	85,4205	09:40	377,055	338,185
09:45	70,7057	73,7022	09:45	385,7028	346,0524
09:50	76,1313	80,0885	09:50	396,0796	351,968
09:55	57,0984	55,9933	09:55	389,1958	366,39
10:00	48,6875	51,16	10:00	384,3342	363,8439
10:05	77,655	77,52	10:05	391,9225	364,908
10:10	104,54	108,0333	10:10	400,5168	365,2229
10:15	100,5312	99,8166	10:15	381,5976	343,0362
10:20	106,2924	108,2118	10:20	374,9568	345,455
10:25	147,2	150,3744	10:25	402,5108	360,1668

Tablo 4.11. (Devam): Bingöl ili için 12 Mayıs 2022 ve 13 Mayıs 2022 tarihlerinde TST ve sabit güneş sistemine ait güç değerleri

10:30	181,401	175,4836	10:30	356,4333	333,9418
10:35	269,2249	244,08	10:35	389,5708	373,616
10:40	369,5964	338,982	10:40	396,378	375,2507
10:45	310,7808	272,72	10:45	410,5968	391,28
10:50	227,7754	207,5271	10:50	410,2846	393,515
10:55	253,376	222,675	10:55	405,0144	390,328
11:00	296,5152	297,716	11:00	405,8451	394,148
11:05	401,955	364,0308	11:05	395,9248	391,385
11:10	363,402	334,3899	11:10	404,0673	394,0088
11:15	298,08	285,3363	11:15	398,958	388,8875
11:20	363,4008	321,4115	11:20	379,9824	375,136
11:25	315,027	280,764	11:25	393,851	386,2497
11:30	389,9124	383,0112	11:30	380,5202	374,7398
11:35	351	320,333	11:35	407,7282	402,2284
11:40	313,2895	293,5016	11:40	387,94	377,752
11:45	280,757	262,8384	11:45	382,0734	378,345
11:50	272,9954	255,099	11:50	401,3997	393,3935
11:55	410,3812	376,2018	11:55	407,36	401,2144
12:00	414,789	401,1425	12:00	397,047	391,955
12:05	412,3252	401,632	12:05	393,24	386,5831
12:10	421,6416	400,915	12:10	402,7232	391,544
12:15	474,0827	455,7164	12:15	391,3386	378,94
12:20	439,3478	428,0314	12:20	386,211	376,8
12:25	440,9349	432,7067	12:25	418,965	403,9717
12:30	424,4956	419,3384	12:30	409,5784	394,466
12:35	428,823	416,5802	12:35	401,8129	391,1855
12:40	430,944	421,572	12:40	411,879	396,2576
12:45	431,1552	428,5082	12:45	417,1825	398,219
12:50	431,5608	424,6524	12:50	400,9425	385,4175
12:55	419,328	409,8956	12:55	398,395	376,395
13:00	437,157	424,651	13:00	400,065	383,96
13:05	432,278	425,1316	13:05	387,8636	370,0415
13:10	430,4128	420,3264	13:10	384,665	365,5244
13:15	433,7806	424,7648	13:15	386,7584	369,248
13:20	433,4688	422,9528	13:20	375,5142	363,9095
13:25	444,3732	416,7548	13:25	383,097	361,2171

Tablo 4.11. (Devam): Bingöl ili için 12 Mayıs 2022 ve 13 Mayıs 2022 tarihlerinde TST ve sabit güneş sistemine ait güç değerleri

13:30	245,456	229,9279	13:30	387,9475	361,5358
13:35	477,0064	439,9712	13:35	376,4124	346,8125
13:40	126,5667	119,8172	13:40	375,4556	358,7387
13:45	202,56	194,205	13:45	390,6369	361,7357
13:50	515,697	475,952	13:50	381,9399	353,243
13:55	155,1732	145,4244	13:55	393,558	353,3528
14:00	141,243	133,5081	14:00	392,667	355,668
14:05	128,52	123,8328	14:05	389,088	346,2204
14:10	243,8	206,736	14:10	400,81	337,7285
14:15	487,6848	435,998	14:15	388,436	333,518
14:20	166,6027	145,7274	14:20	368,299	330,776
14:25	127,2436	121,1592	14:25	362,7987	313,03
14:30	119,784	113,2728	14:30	353,92	300,558
14:35	117,5104	113,5995	14:35	341,1345	290,7243
14:40	124,6833	126,9016	14:40	349,8128	289,5265
14:45	129,775	136,884	14:45	363,4524	289,1622
14:50	157,98	157,65	14:50	355,136	286,52
14:55	105,16	129,1254	14:55	338,435	275,122
15:00	83,936	105,7268	15:00	325,256	281,7584
15:05	70,5915	85,5588	15:05	375,6129	281,9041
15:10	56,7781	67,522	15:10	376,5071	278,9111
15:15	33,5725	45,3552	15:15	377,3704	273,718
15:20	20,256	28,3024	15:20	375,408	266,5684
15:25	12,6375	14,6305	15:25	377,3966	262,3147
15:30	9,0054	10,3782	15:30	364,353	253,7491
15:35	10,026	12,0024	15:35	370,254	250,7987
15:40	55,781	44,4928	15:40	370,3302	243,5328
15:45	76,4817	78,052	15:45	373,0428	240,3424
15:50	328,5828	263,9133	15:50	369,1145	230,869
15:55	100,3705	89,6211	15:55	358,618	223,2117
16:00	85,8376	76,8957	16:00	349,7972	216,7652
16:05	416,9886	267,24	16:05	365,3928	211,15
16:10	325,3645	202,0126	16:10	363,1773	205,8832
16:15	399,7251	238,5046	16:15	360,7733	196,7499
16:20	382,8465	223,9821	16:20	355,8313	188,354
16:25	365,501	217,36	16:25	348,5984	182,4174

Tablo 4.11. (Devam): Bingöl ili için 12 Mayıs 2022 ve 13 Mayıs 2022 tarihlerinde TST ve sabit güneş sistemine ait güç değerleri

16:30	355,7393	206,882	16:30	344,1528	172,4735
16:35	365,722	195,9968	16:35	339,2	164,0554
16:40	356,1597	183,312	16:40	327,6648	164,666
16:45	348,5013	173,8549	16:45	319,866	144,82
16:50	335,4	154,1785	16:50	319,6935	138,784
16:55	313,2302	140,6014	16:55	310,03	122,406
17:00	335,265	146,4185	17:00	302,3518	119,516
17:05	328,4736	133,0606	17:05	295,974	112,5864
17:10	279,416	128,8986	17:10	288,4146	101,52
17:15	323,3286	122,476	17:15	279,7804	95,272
17:20	294,7989	102,8115	17:20	274,1928	87,355
17:25	286,96	94,288	17:25	265,3761	78,9698
17:30	280,899	88,4696	17:30	258,937	71,5842
17:35	256,2615	76,9803	17:35	250,8415	64,873
17:40	248,262	69,087	17:40	241,3488	58,1528
17:45	235,106	61,5807	17:45	222,6609	47,4958
17:50	226,7018	55,0472	17:50	219,3072	41,8432
17:55	216,6171	47,4736	17:55	209,09	35,815
18:00	33,7348	15,8368	18:00	198,9295	30,1942
18:05	21,534	12,719	18:05	186,76	25,267
18:10	38,1997	15,376	18:10	179,095	23,851
18:15	52,4866	23,184	18:15	167,6856	19,2538
18:20	31,0062	15,4783	18:20	23,0598	8,0352
18:25	25,06	12,9012	18:25	13,2626	7,392
18:30	18,3409	10,7661	18:30	10,3551	7,41
18:35	13,72	7,3455	18:35	11,7672	6,8754
18:40	14,604	6,3349	18:40	11,2746	6,3817
18:45	9,89	5,742	18:45	10,416	6,2052
18:50	7,3395	4,401	18:50	8,2994	5,3779
18:55	7,293	6,3193	18:55	7,8352	4,904
19:00	9,796	4,4976	19:00	6,8768	3,9488

EK D.

Tablo 4.12. Bingöl ili için 14 Mayıs 2022 ve 15 Mayıs 2022 tarihlerinde TST ve sabit güneş sistemine ait güç değerleri

14 Mayıs 2022 Cumartesi			13 Mayıs 2022 Pazar		
Saat	TST (W)	Sabit Sistem (W)	Saat	TST (W)	Sabit Sistem (W)
05:00	9,7589	6,1536	05:00	5,7965	5,135
05:05	10,7934	7,8793	05:05	6,4763	5,9973
05:10	12,3145	8,9751	05:10	8,1237	7,7631
05:15	13,769	9,4596	05:15	8,5734	8,931
05:20	15,6431	10,7369	05:20	9,6497	9,7694
05:25	17,0567	10,1589	05:25	15,6743	14,1367
05:30	20,9737	13,0679	05:30	20,0649	19,3794
05:35	28,0469	19,7964	05:35	22,7397	21,7413
05:40	123,7933	24,6433	05:40	38,9734	33,0478
05:45	156,7941	29,9765	05:45	37,7615	32,6794
05:50	175,978	32,5649	05:50	34,1135	35,7695
05:55	190,9682	38,7374	05:55	41,347	38,7136
06:00	201,6497	41,7576	06:00	40,3794	41,3873
06:05	217,3463	48,1537	06:05	45,868	44,276
06:10	225,9419	55,3345	06:10	72,3783	71,1789
06:15	245,7481	62,743	06:15	59,3789	56,107
06:20	256,064	70,8799	06:20	55,678	55,9784
06:25	261,3479	77,1465	06:25	61,7637	60,0467
06:30	269,9711	84,4379	06:30	69,9789	65,1379
06:35	276,7796	93,5786	06:35	77,0535	74,3691
06:40	285,5547	99,764	06:40	71,468	72,378
06:45	297,649	106,3469	06:45	101,4761	76,2732
06:50	306,4581	111,2474	06:50	175,2783	81,3794
06:55	315,9764	123,023	06:55	211,7911	85,0271
07:00	330,1782	136,0301	07:00	243,474	98,6704
07:05	347,686	148,3118	07:05	244,7218	103,234
07:10	357,8454	162,8635	07:10	259,7	110,795
07:15	372,5872	173,8156	07:15	266,4095	119,053
07:20	378,2772	185,4492	07:20	272,2125	124,554
07:25	388,1472	194,112	07:25	277,42	131,2634

Tablo 4.12. (Devam): Bingöl ili için 14 Mayıs 2022 ve 15 Mayıs 2022 tarihlerinde TST ve sabit güneş sistemine ait güç değerleri

07:30	393,1572	205,7834	07:30	285,2094	141,0995
07:35	388,3825	213,925	07:35	293,15	150,4683
07:40	396,7317	222,6016	07:40	298,035	157,9775
07:45	397,6078	232,3612	07:45	306,02	145,976
07:50	403,4654	242,8635	07:50	308,7084	176,087
07:55	400,959	250,6064	07:55	319,2582	192,0448
08:00	405,972	261,786	08:00	298,4664	187,6776
08:05	406,83	266,4798	08:05	130,048	89,95
08:10	413,712	273,2184	08:10	144,5044	88,553
08:15	416,0835	280,621	08:15	138,72	69,4688
08:20	418,1354	286,8648	08:20	365,0703	226,1136
08:25	416,1688	294,021	08:25	355,1108	232,5806
08:30	418,8872	304,192	08:30	213,8639	164,6436
08:35	415,4535	306,3621	08:35	46,0276	33,6005
08:40	425,1456	317,1672	08:40	141,3808	77,7784
08:45	416,9572	317,4948	08:45	261,5858	157,2944
08:50	426,1692	325,4316	08:50	233,3772	199,8064
08:55	422,9466	331,02	08:55	359,5872	203,5908
09:00	421,1044	338,4245	09:00	361,4473	271,41
09:05	423,776	345,7446	09:05	353,589	276,3008
09:10	421,4224	329,3901	09:10	184,4436	141,0555
09:15	425,8772	353,4561	09:15	307,2999	268,9272
09:20	422,5851	356,5944	09:20	362,538	305,6976
09:25	418,5126	357,4675	09:25	276,7193	231,4724
09:30	415,8287	361,534	09:30	208,0125	171,1476
09:35	412,2164	365,3577	09:35	186,186	166,5711
09:40	392,4557	351,8066	09:40	149,27	153,172
09:45	418,1945	382,7344	09:45	156,0075	130,5814
09:50	402,48	364,5699	09:50	237,69	214,721
09:55	406,3638	347,1936	09:55	183,2655	134,664
10:00	421,1529	381,7686	10:00	234,608	173,44
10:05	391,16	363,44	10:05	145,6985	119,416
10:10	432,0825	391,294	10:10	137,6385	110,0145
10:15	401,4	362,8023	10:15	247,032	211,4
10:20	392,232	314,2375	10:20	298,65	243,18
10:25	314,028	283,0284	10:25	338,1375	288,906

Tablo 4.12. (Devam): Bingöl ili için 14 Mayıs 2022 ve 15 Mayıs 2022 tarihlerinde TST ve sabit güneş sistemine ait güç değerleri

10:30	355,55	276,451	10:30	281,7234	245,2995
10:35	457,002	411,1134	10:35	286,2	236,205
10:40	424,1587	354,4905	10:40	378	334,323
10:45	293,5296	271,656	10:45	378,924	333,3
10:50	208,0689	195,4638	10:50	318,42	288,3528
10:55	193,452	186,945	10:55	188,145	163,2
11:00	222,5684	213,0864	11:00	252,9738	233,1832
11:05	187,2507	176,392	11:05	326,8863	320,249
11:10	179,55	172,0895	11:10	169,585	153,008
11:15	173,944	163,84	11:15	304,095	286,3928
11:20	285,4008	265,584	11:20	166,8027	158,6406
11:25	503,3275	451,184	11:25	141,6855	132,6894
11:30	239,9216	218,3188	11:30	111,6031	108,423
11:35	510,3776	464,52	11:35	89,8188	85,4535
11:40	450,729	422,4528	11:40	49,2672	43,724
11:45	433,3184	414,4	11:45	50,3818	51,0642
11:50	411,424	396,7632	11:50	61,0886	56,571
11:55	425,6611	402,4735	11:55	63,3058	59,823
12:00	408,07	390,664	12:00	89,182	84,6377
12:05	325,369	310,25	12:05	105,82	97,888
12:10	450,5105	432,8852	12:10	120,6804	112,3812
12:15	462	450,125	12:15	74,7475	75,9402
12:20	380,94	339,738	12:20	64,9097	64,0375
12:25	508,0185	488,9675	12:25	108,0976	104,14
12:30	448,186	422,346	12:30	96,534	93,6
12:35	298,965	285,5716	12:35	74,16	72,6855
12:40	460,971	442,225	12:40	37,4366	32,955
12:45	427,482	403,6	12:45	55,5028	51,07
12:50	452,749	432,623	12:50	69,12	61,728
12:55	448,3164	437,3248	12:55	63,612	57,6016
13:00	471,441	456,436	13:00	61,5	51,8534
13:05	402,1971	386,3288	13:05	83,997	79,5906
13:10	453,2811	430,716	13:10	99,351	104,9
13:15	219,555	195,7284	13:15	90,1503	81,4476
13:20	376,105	376,047	13:20	86,1872	73,7974
13:25	419,484	412,3308	13:25	123,9264	122,13

Tablo 4.12. (Devam): Bingöl ili için 14 Mayıs 2022 ve 15 Mayıs 2022 tarihlerinde TST ve sabit güneş sistemine ait güç değerleri

13:30	464,3254	426,2568	13:30	124,785	117,128
13:35	379,3605	343,7544	13:35	86,984	84,5411
13:40	452,0439	417,817	13:40	45,7905	39,1172
13:45	472,2432	418,6208	13:45	40,872	39,4471
13:50	374,1344	273,5104	13:50	54,6006	54,7384
13:55	354,2242	279,0012	13:55	57,2316	56,892
14:00	448,2972	389,0484	14:00	37,9102	38,0434
14:05	460,2255	386,6274	14:05	25,355	22,869
14:10	346,5364	342,1648	14:10	20,208	20,252
14:15	253,836	308,175	14:15	16,6155	20,6845
14:20	215,7012	207,1566	14:20	20,88	18,51
14:25	189,4596	175,3368	14:25	26,7332	33,3564
14:30	163,5438	162,656	14:30	47,842	40,368
14:35	329,072	346,4336	14:35	59,5546	52,1077
14:40	463,536	383,9892	14:40	88,1672	80,106
14:45	255,6432	252,327	14:45	81,7808	73,1226
14:50	233,7082	186,321	14:50	147,412	117,92
14:55	162,4667	151,3809	14:55	121,728	111,0056
15:00	229,6409	209,8	15:00	68,544	68,1615
15:05	266,667	254,7455	15:05	80,752	83,391
15:10	409,2262	297,7032	15:10	111,936	117,001
15:15	433,0053	316,5891	15:15	274,0981	211,32
15:20	393,5914	305,3517	15:20	308,5875	251,275
15:25	374,809	284,364	15:25	188,1609	166,0866
15:30	137,3428	134,196	15:30	104,2835	109,6715
15:35	169,2047	167,6618	15:35	50,49	51,6936
15:40	177,6348	176,0088	15:40	144,536	116,2575
15:45	237,0288	202,6114	15:45	377,5482	304,013
15:50	309,2082	240,345	15:50	338,8035	278,5397
15:55	221,1768	184,8653	15:55	104,42	95,2588
16:00	137,4783	135,2346	16:00	276,935	175,86
16:05	126,8406	124,754	16:05	149,352	135,877
16:10	108,177	112,1766	16:10	196,08	120,628
16:15	112,4366	111,3619	16:15	231,1983	139,6395
16:20	96,045	93,4435	16:20	130,254	89,5825
16:25	86	83,9664	16:25	90,3056	69,4575

Tablo 4.12. (Devam): Bingöl ili için 14 Mayıs 2022 ve 15 Mayıs 2022 tarihlerinde TST ve sabit güneş sistemine ait güç değerleri

16:30	101,2424	96,8281	16:30	93,0304	63,7812
16:35	135,3408	123,6141	16:35	83,1105	70,2367
16:40	112,9856	106,3651	16:40	92,8382	73,6272
16:45	99,4456	96,3595	16:45	258,475	164,1628
16:50	104,3184	98,2222	16:50	58,482	53,9595
16:55	102,1836	97,1746	16:55	38,1975	44,5996
17:00	79,1264	77,562	17:00	30,082	32,7294
17:05	67,4152	60,9465	17:05	59,5179	56,056
17:10	72,6934	67,6872	17:10	76,95	61,704
17:15	77,9819	72,007	17:15	49,9898	43,452
17:20	68,1438	63,6416	17:20	29,3306	30,408
17:25	64,8319	61,8375	17:25	27,195	24,948
17:30	50,337	49,33	17:30	28,7052	30,282
17:35	59,232	55,272	17:35	37,9544	40,032
17:40	56,7755	55,7429	17:40	22,41	25,948
17:45	49,22	46,7305	17:45	16,2	12,28
17:50	47,2128	44,7356	17:50	47,6805	52,836
17:55	44,6719	42,2002	17:55	31,031	40,136
18:00	40,04	35,35	18:00	17,0345	10,7028
18:05	41,65	37,2096	18:05	15,7504	16,2723
18:10	40,1554	37,6838	18:10	7,3635	7,3785
18:15	40,6368	36,2156	18:15	7,8512	8,8488
18:20	37,164	34,209	18:20	10,2921	10,3152
18:25	37,6222	34,6693	18:25	10,7866	11,2999
18:30	35,1144	32,175	18:30	9,798	10,7976
18:35	34,062	31,1232	18:35	9,796	10,3047
18:40	32,0232	29,094	18:40	7,3395	7,8432
18:45	29,4813	25,116	18:45	6,8418	7,3425
18:50	26,5375	22,654	18:50	5,85	6,8334
18:55	23,5837	19,721	18:55	5,3548	5,8476
19:00	21,6045	18,5484	19:00	4,862	4,866