

T.C.
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**GÜNEŞ İŞİNİM VERİLERİNİN ANALİTİK YÖNTEMLER
İLE YATAY DÜZLEMENDE EĞİMLİ DÜZLEME
ÇEVİRİLMESİ, DENEYSEL DOĞRULANMASI VE
FOTOVOLTAİK UYGULAMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YASİN YÜCEL

BOLU, OCAK - 2020

T.C.
ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



**GÜNEŞ İŞİNIM VERİLERİNİN ANALİTİK YÖNTEMLER
İLE YATAY DÜZLEMDEN EĞİMLİ DÜZLEME
ÇEVİRİLMESİ, DENEYSEL DOĞRULANMASI VE
FOTOVOLTAİK UYGULAMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YASİN YÜCEL

BOLU, OCAK - 2020

KABUL VE ONAY SAYFASI

YASİN YÜCEL tarafından hazırlanan “GÜNEŞ IŞINIM VERİLERİNİN ANALİTİK YÖNTEMLER İLE YATAY DÜZLEMENDE EĞİMLİ DÜZLEME ÇEVİRİLMESİ, DENEYSEL DOĞRULANMASI VE FOTOVOLTAİK UYGULAMASI” adlı tez çalışması Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda 10/01/2020 tarihinde **BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ Fen Bilimleri Enstitüsü** Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Danışman
Prof. Dr. Ali Naci ÇELİK
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

Üye
Doç. Dr. Ali Etem GÜREL
Düzce Üniversitesi

Üye
Dr. Öğr. Üyesi Kadir GELİŞ
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

İmza

.....

.....

.....

Prof. Dr. Ömer ÖZYURT.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



Aslı'ya ve aileme,

ETİK BEYAN

Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

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

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

YASİN YÜCEL

ÖZET

GÜNEŞ IŞINIM VERİLERİNİN ANALİTİK YÖNTEMLER İLE YATAY DÜZLEMDE EĞİMLİ DÜZLEME ÇEVİRİLMESİ, DENEYSEL DOĞRULANMASI VE FOTOVOLTAİK UYGULAMASI
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. ALİ NACİ ÇELİK)

BOLU, OCAK - 2020

Güneş enerjisi, alternatif enerji kaynakları arasında en verimli ve en kullanışlı olan enerji kaynağı olarak bilinmektedir. Güneş enerjisi fotovoltaik hücreler aracılığı ile elektrik enerjisine dönüştürülür. Bu çalışmada Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Makine Mühendisliğine ait 40°42'52.2"K, 31°31'29.8"D koordinatlarında hali hazırda kurulu bulunan 36 hücreli polikristal tür bir güneş paneli ve sisteminden elde edilen veriler kullanılmıştır. Piranometreler ve veri kaydedici kullanılarak, hazırlanan deney düzeneğinde eğik düzlemdeki ışınım, yatay düzlemdeki ışınım, akım, voltaj hücre sıcaklığı ve çevre sıcaklığı değerleri dakikalık olarak kaydedilmiştir. Bu çalışma ile yatay bir yüzeye gelen güneş ışınım verilerinin iki farklı analitik model kullanılarak eğimli yüzeye çevrilmesi ve analitik modellerden elde edilen sonuçların deneysel sistemden alınan ölçüm değerleri ile karşılaştırılması hedeflenmiştir. Buna ilaveten, eğimli ve yatay yüzeyler üzerine düşen ışınım şiddetlerinin farklı olmasının fotovoltaik panellerden elde edilen güç ve enerji üzerindeki etkisinin nicel olarak incelenmesi amaçlanmıştır.

Eğik düzleme düşen güneş ışınımı izotropik ve anizotropik modeller kullanılarak hesaplanmış ve deney düzeneğinde eğimli yüzeyde ölçülmüş olan ışınım değerleri ile karşılaştırılmıştır. Modellerden hesaplanan ışınım değerleri ile ölçülen ışınım değerleri arasındaki fark R^2 , RMSE ve MBE olmak üzere üç farklı istatistiksel parametre kullanılarak karşılaştırılmıştır. Ayrıca 4 parametrelilik model kullanılarak yılın farklı günlerinde fotovoltaik panelin ürettiği akım-voltaj ve güç-voltaj karakteristikleri hesaplanmıştır. Bu yolla, eğimli yüzeydeki hesaplanan ve ölçülen ışınım verileri ile akım-voltaj ve güç-voltaj değerleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca, eğimli ve yatay olarak konumlandırılmış fotovoltaik panellerden elde edilen güç ve enerjinin mevsimsel olarak değişimi de irdelenmiştir.

ANAHTAR KELİMELELER: Güneş Işınımı, Fotovoltaik Hücre, İzotropik Model, Anizotropik Model, Fotovoltaik Modelleme, I-V Eğrisi, P-V Eğrisi, 4 Parametrelilik Model

ABSTRACT

**CONVERSION OF SOLAR RADIATION DATA FROM HORIZONTAL
TO TILTED SURFACE USING ANALYTICAL METHODS,
EXPERIMENTAL VALIDATION AND PHOTOVOLTAIC
APPLICATION
MSC THESIS
YASİN YÜCEL**

**ABANT IZZET BAYSAL UNIVERSITY GRADUATE SCHOOL OF
NATURAL AND APPLIED SCIENCES
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
(SUPERVISOR: PROF. DR. ALİ NACİ ÇELİK)**

BOLU, JANUARY 2020

Solar energy is known as one of the most productive and sustainable alternative energy sources. Solar energy is converted into electrical energy through photovoltaic cells. In this study, data obtained from the polycrystalline type solar panel with 36 cells and the system already established at coordinates of 40°42'52,2" N, 31°31'29,8" E by the Department of Mechanical Engineering have been used. Thorough the outdoor experimental test facility incorporating pyranometers, sensors and data loggers, the irradiance in inclined surface, the irradiance in horizontal surface, current, voltage and temperature values were collected at 1 minute intervals. The purpose of this study is the conversion of the solar irradiance from the horizontal surface to that on the inclined surface by using two different models and to compare the results to the measured solar irradiance on the inclined surface.

The measured irradiance values on horizontal surface was converted into the inclined surface values through isotropic and anisotropic models, and the converted values were compared with the measured values on the inclined surface. The difference between the measured and calculated values were calculated by using three different statistical parameters, namely R^2 , RMSE and MBE thus the accuracy of the models was comparatively analyzed. Besides, the current-voltage and power-voltage characteristics were obtained for some selected days by using the analytical 4-parameter photovoltaic model. The current-voltage and power-voltage characteristics were then calculated on the inclined surface using the measured and calculated irradiance values and compared to each other. Furthermore, the power and energy values calculated both on the horizontal and inclined surfaces for different seasons were compared to show the seasonal effect of inclination.

KEYWORDS: Solar Irradiance, Photovoltaic Cells, Isotropic Model, Anisotropic Model, Photovoltaic Modelling, I-V Curve, P-V Curve, 4-Parameters

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	v
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	x
KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ	xi
TEŞEKKÜR	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Enerjinin Tarihçesi	1
1.2 Enerji Çeşitleri.....	3
1.3 Dünyada Enerji.....	4
1.4 Türkiye’de Enerji	8
1.5 Türkiye’nin Güneş Enerjisi Potansiyeli	11
2. GÜNEŞ VE TEMEL GÜNEŞ IŞINIM TANIMLARI	14
2.1 Güneş Sabiti	16
2.2 Güneş Işınımını İfade Eden Tanımlar	17
3. GÜNEŞ IŞINIMININ ve FOTOVOLTAİK ENERJİ ÜRETİMİNİN MODELLENMESİ	22
3.1 Literatür Taraması	22
3.2 Eğimli Yüzeye Düşen Işınım Tahmini	28
3.2.1 İzotropik Gökyüzü Modeli.....	29
3.2.2 Anizotropik Gökyüzü Modeli.....	31
3.3 Fotovoltaik Sistemlerin Modellenmesi	33
3.3.1 Güneş Işınımının I-V Eğrisine Etkisi.....	35
3.3.2 Hücre Sıcaklığının I-V Eğrisine Etkisi	36
3.4 4-Parametrelili Model.....	37
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	40
4.1 Eğimli Yüzeye Düşen Işınım Tahmini	43
4.2 4 Parametrelili Model ile Fotovoltaik Sistemlerin Modellenmesi.....	56
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	64
5.1 Öneriler.....	66
6. KAYNAKLAR	67
7. ÖZGEÇMİŞ	73

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1. Yıllara Göre Dünya Birincil Enerji Tüketimi – Mtep	5
Şekil 1.2. Birincil Enerji İçerisinde Kaynakların Yüzde Oranları %.....	6
Şekil 1.3. Dünya’da Yıllara Göre Toplam Yenilenebilir Enerji Kapasitesinin MW Cinsinde Değişimi (IRENA 2019).....	7
Şekil 1.4. Dünya’da Yıllara Göre Toplam Güneş Enerjisi Kapasitesinin MW Cinsinden Değişimi (IRENA 2019)	7
Şekil 1.5. Türkiye Kurulu Gücünün Yıllar İtibariyle Gelişimi (TEİAŞ,2017)...	8
Şekil 1.6. 2017 Yılı İçin Türkiye’de Kurulu Gücün Kaynaklara Göre Yüzdesel Dağılımı (TEİAŞ,2017).....	9
Şekil 1.7. Türkiye’de Yıllara Göre Toplam Yenilenebilir Enerji Kapasitesinin MW Cinsinden Değişimi(IRENA 2019).....	10
Şekil 1.8. Türkiye’de Yıllara Göre Toplam Güneş Enerjisinin Kapasitesinin MW Cinsinden Değişimi (IRENA 2019)	10
Şekil 1.9. Dünya Güneş Enerjisi Atlası	11
Şekil 1.10. Avrupa Güneş Enerjisi Atlası	12
Şekil 1.11. Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası.....	13
Şekil 2.1. Güneşin Yapısı (Duffie ve Beckman 2013).....	15
Şekil 2.2. Güneş Dünya ilişkisi (Duffie ve Beckman 2013).....	16
Şekil 2.3. Difüz ve Direkt Işınım	18
Şekil 2.4. Güneş – Düzlem İlişkisini Gösteren Açılı Tanımlamaları.....	19
Şekil 2.5. Güneş Azimut Açısı.....	20
Şekil 2.6. Eğimli Düzleme ve Yatay Düzleme Düşen Direkt Işınım.....	21
Şekil 3.1. Difüz Işınımın Gökyüzündeki Dağılımı	28
Şekil 3.2. Eğik Yüzeye Gelen Direkt, Difüz ve Yansıyan Işınım.....	32
Şekil 3.3. Basitleştirilmiş Eşdeğer Fotovoltaik Hücre Devresi.....	33
Şekil 3.4. Işınım Şiddeti Değerinin Fotovoltaik Hücrenin Akım ve Gerilim Değerlerine Etkisi.....	35
Şekil 3.5. Sıcaklık Değerinin Fotovoltaik Hücrenin Akım ve Gerilim Değerlerine Etkisi (Duffie ve Beckman, 2013).....	37
Şekil 3.6. 4-Değişkenli Model İçin Eşdeğer Devresi.....	37
Şekil 4.1. Fotovoltaik Deney Düzenegi	41
Şekil 4.2. Fotovoltaik Panel	42
Şekil 4.3. Piranometreler.....	42
Şekil 4.4. Veri Kayıt Cihazı (Data Logger).....	43
Şekil 4.5. 15 Nisan 2018 Eğik Düzlemde Ölçülen Işınım- Zaman Grafiği	45
Şekil 4.6. 15 Temmuz 2018 Eğik Düzlemde Ölçülen Işınım – Zaman Grafiği	46
Şekil 4.7. 15 Ekim 2018 Eğik Düzlemde Ölçülen Işınım – Zaman Grafiği	46
Şekil 4.8. 15 Ocak 2019 Eğik Düzlemde Ölçülen Işınım – Zaman Grafiği	47
Şekil 4.9. İzotropik Model Uygulaması.....	48
Şekil 4.10. Anizotropik Model Uygulaması	48
Şekil 4.11. Gece Ölçümlerinden Arındırılmış İzotropik Model Uygulaması...	49
Şekil 4.12. Gece Ölçümlerinden Arındırılmış Anizotropik Model Uygulaması	50
Şekil 4.13. Temmuz Ayı İzotropik Model Uygulaması.....	51
Şekil 4.14. Temmuz Ayı Anizotropik Model Uygulaması	51
Şekil 4.15. 15 Temmuz 2018 Tarihli Işınım Analizi	52

Şekil 4.16. Ocak Ayı İzotropik Model Uygulaması	54
Şekil 4.17. Ocak Ayı Anizotropik Model Uygulaması.....	54
Şekil 4.18. 15 Ocak 2019 Tarihli Işınım Analizi	55
Şekil 4.19. 28.04.2018 Tarihli İlkbahar Mevsimi için I-V ve P-V Grafiği.....	57
Şekil 4.20. 28.07.2018 Tarihli Yaz Mevsimi için I-V ve P-V Grafiği	58
Şekil 4.21. 28.10.2018 Tarihli Sonbahar Mevsimi için I-V ve P-V Grafiği.....	58
Şekil 4.22. 28.01.2019 Tarihli Kış Mevsimi için I-V ve P-V Grafiği	59
Şekil 4.23. Yatay Düzlemdeki Güç ve Işınım Şiddeti Grafiği (28.01.2019)....	60
Şekil 4.24. Eğik Düzlemdeki Güç ve Işınım Şiddeti Grafiği (28.01.2019).....	61
Şekil 4.25. Anizotropik Model Sonuçlarına Göre Hesaplanmış Güç ve Işınım Şiddeti Grafiği (28.01.2019)	61
Şekil 4.26. Yatay Düzlemdeki Güç ve Işınım Şiddeti Grafiği (28.04.2018)....	62
Şekil 4.27. Eğik Düzlemdeki Güç ve Işınım Şiddeti Grafiği (28.04.2018).....	62
Şekil 4.28. Anizotropik Model Sonuçlarına Göre Hesaplanmış Güç ve Işınım Şiddeti Grafiği (28.04.2018)	63



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1. Dünya Toplam Birincil Enerji Tüketiminin Kaynaklara Göre Dağılımı (%).....	5
Tablo 4.1. Modellerde Kabul Edilen Referans Değerler	40
Tablo 4.2. Temmuz Ayı İçin İstatiksel Yöntemlerden Elde Edilen Sonuçlar ..	53
Tablo 4.3. Temmuz Ayı İçin İstatiksel Yöntemlerden Elde Edilen Sonuçlar ..	56
Tablo 4.4. I-V ve P-V Grafiklerine Göre Maksimum Güç Değerleri	59
Tablo 4.5. İstatiksel Yöntemlerden Elde Edilen Sonuçlar	64

KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ

A_i	: Anizotropi Endeksi
α	: Modifiye Edilmiş Diyot İdealite Faktörü
G	: Işınım
G_{sc}	: Güneş Sabiti
I	: Akım
I_D	: Difüz Işınım
I_L	: Işık Akımı
I_0	: Ters Doyma Akımı
I_{sc}	: Kısa Devre Akımı
I_{mp}	: Maksimum Güç Noktasındaki Akım
k	: Boltzmann Sabiti ($1,381 \times 10^{-23}$ J/K)
Kt	: Günlük Berraklık Göstergesi
Lst	: Yerel Saat için Standart Meridyen
$Lloc$: Mevcut Konum için Standart Meridyen
m	: Hava Kütlesi
μ_{Isc}	: Kısa Devre Akımı Sıcaklık Katsayısı
μ_{Voc}	: Açık Devre Gerilimi Sıcaklık Katsayısı
N_s	: Seri Bağlı Fotovoltaik Hücre Sayısı
η	: Verim
OECD	: Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü
P	: Güç
q	: Elektron Yüğü ($1,602 \times 10^{-19}$ C)
R_b	: Geometrik Faktör
R_s	: Seri Direnç
R_{sh}	: Paralel Direnç
T	: Sıcaklık
V	: Gerilim
V_{oc}	: Açık Devre Gerilimi
V_{mp}	: Maksimum Güç Noktasındaki Gerilim

C	: Coloumb
°C	: Celcius Derece
GW	: Giga-watt
GWh	: Giga-watt saat
J	: Joule
K	: Kelvin
kWp	: Kilo-watt peak
kW	: Kilo-watt
kWh	: Kilo-watt saat
Mtep	: Milyon ton eşdeğer petrol
MW	: Mega-watt
MWh	: Mega-watt saat
W	: Watt
ρ_g	: Yüzey Yansıma Oranı
φ	: Enlem Açısı
δ	: Deklinasyon Açısı
β	: Eğim Açısı
γ	: Yüzey Azimut Açısı
ω	: Saat Açısı
θ	: Geliş Açısı
θ_z	: Doruk Açısı
α_s	: Güneş İrtifa Açısı
γ_s	: Güneş Azimut Açısı

TEŞEKKÜR

Tez çalıőmam boyunca yaptığım bütün çalışmalarda desteklerini esirgemeyen, tecrübesi ve bilgi birikimi ile yol gösteren değerli danışman hocam Prof. Dr. Ali Naci ÇELİK'e teőekkürlerimi sunarım.

Çalışma süresince yanımda olan ve beni motive eden sevgili eőim Aslı Hilal YILMAZ YÜCEL'e minnettarım.

Tez yazım aőamasında yardımcı olan arkadaşlarım Ahmet Erdem UĞUR ve Semih YAVUZKILIÇ'a teşekkür ederim.

Son olarak eğitim hayatımın en baőından beri desteğini esirgemeyen aileme minnettarım.

1. GİRİŞ

Tarih boyunca insanlar ve hayvanlar besin yoluyla alınan enerjiye muhtaç olmuşlardır. Ancak insanlar besin yoluyla alınan enerjiyle kalmayıp farklı enerji kaynakları keşfetmiş, bu kaynakları ısı, mekanik ve elektrik enerjisine çevirmeyi başarmışlardır (Aslan, Yamak 2006).

Enerji, insanoğlunun teknolojik ilerlemesini sürdürebilmesi için en önemli unsur haline gelmiş ve hayatın akışını yönlendirmektedir (Tiwari ve Mishra, 2011). Gelişen teknoloji ve sanayi ile birlikte enerjiye olan ihtiyaç ve bağımlılık günden güne artmaktadır. Nüfus artışı, sanayileşme ve teknolojik gelişmelerle birlikte gün geçtikçe üretim ve tüketim arasındaki makas artmaktadır. Enerji ihtiyacı günümüzde global bir sorun olmaya başlamış ve bu sorunun insanlara yansımaları halen devam etmekte olan savaşlar, işgaller şeklinde olmuştur. Tarih sahnesine insanların ihtiyaçlarını karşılayan bir gereksinim olarak giren enerji, artık uluslararası ilişkileri etkileyen, yönlendiren bir güç haline almıştır (Sayın 2006).

Bilim ve teknolojinin modern toplumların her alanında yer aldığı bir dünyada enerji vazgeçilmez olmaktadır. İnsanoğlu tarihi boyunca enerjiyi ısınma, aydınlanma, madenleri işleyerek kullanılabilir hale getirme, ulaşım, taşıma ve özellikle günümüzde sanayi ve endüstriyel amaçlarla sürekli kullanmıştır. Günümüzde, enerjinin kullanım alanları dört temel başlık altında toplanabilir; endüstri/sanayi, ulaştırma, konut ve iletişim (Fay ve Golomb, 2002). Tüm dünyada ülkelerin ekonomik olarak sürdürülebilirliğini koruyabilmesi için enerji hayati bir rol üstlenmektedir. Bu nedenden dolayı, büyüyen dünya ekonomisi ile birlikte enerji ihtiyacı da artmaktadır (Muzathik vd, 2010).

1.1 Enerjinin Tarihçesi

Endüstri devriminden önce insanoğlu enerji ihtiyacını doğadan ve kas gücüyle karşılıyordu. Odun, rüzgâr, su gibi temel kaynaklar enerji ihtiyacının temelini oluşturuyordu. Ancak kömür ile çalışan buhar makinelerinin keşfi, kullanılan enerji

kaynaklarını değiştirmiş, ayrıca enerji kaynaklarına olan ihtiyacı artırmıştır. Enerji kaynaklarına ulaşım ve enerji kaynaklarının sürdürülebilir bir şekilde kullanımı günümüz dünyasının siyasi haritasının oluşumunda büyük bir paya sahiptir (Soylu ve Türkay, 2005).

Enerjinin tarihsel gelişimine göz attığımızda, karşımıza ilk olarak ateşin keşfi çıkacaktır. Ateşi önceleri hayvanlardan korunmak için kullanan insanoğlu ateşin enerji kapasitesini sonradan fark etmiştir. Sonraki dönemlerde göçebe hayattan yerleşik hayata geçtikçe su gücünü kullanmaya başlamıştır. Ardından gemiler ve yel değirmenlerinde rüzgâr enerjisini kullanarak doğadaki enerjiden faydalanmanın farklı yollarını keşfetmiştir (Karakaş, 2016).

Tarihsel süreçte kömürün keşfi Çin’de gerçekleşmiştir. Avrupa’da ise kömürü ilk bulan ve dış ülkelere de satan ülkeler olarak Hollanda ve İngiltere yer almaktadır. Avrupa’da kömürün bu şekilde ticaretinin yapılması on yedinci yüzyıla denk gelmektedir. Yine bu yüzyılda güneş enerjisinin camla örtülü mekânda yüksek ısı oluşturduğu keşfedilmiş ve ilk seralar mekânı daha iyi ısıtmak ve bitki yetiştirmek amacıyla kullanılmıştır (Yılmaz, 2015).

On sekizinci yüzyıla ulaşıldığında İngiltere’nin kömür ve odunu enerji kaynağı olarak kullandığı görülmektedir. Kömür, buharlı makineler için tercih ediliyordu. Buharlı makinelerin ilki 1712 yılında İngiliz Thomas Newcomen tarafından geliştirilmiş ve madenlere dolan suyu dışarı pompalamak için kullanılmıştır. Bu makine 1776 yılında James Watt tarafından geliştirilmiş ve bir bakıma on dokuzuncu yüzyılda gerçekleşen endüstri devriminin ilk adımları atılmış oldu.

On sekizinci yüzyılın sonlarında İngiltere’de başlayan, Avrupa ve Kuzey Amerika’ya yayılan endüstri devriminden sonra enerji ihtiyacı büyük bir oranda artmıştır. İlk buharlı lokomotif 1804 yılında, ilk buharlı gemi ise 1807 yılında çalışmaya başlamıştır. Bu gelişmeler ülkeleri ucuz enerji arayışına sevk etmiş ve yapılan çalışmalar sonucu sıvı yakıt tüketiminin daha ekonomik olacağı düşüncesi ortaya çıkmıştır. Ayrıca kömüre alternatif olarak hidroelektrik, güneş ve jeotermal gibi yenilenebilir enerji kaynakları gündeme gelmiştir. Güneş ışığının enerji üretebileceği ilk olarak 1839 yılında Edmond Becquerel tarafından fark edilmiştir. İlk kez güneş

enerjisi kullanımı ise 1860 yılında Fransa’da gerçekleşmiştir. Augustin Mouchot adlı bilim adamı parabolik aynalar yardımı ile güneş ışınımını odaklayarak küçük bir buhar makinesi üzerinde çalışmıştır. Jeotermal kaynakların enerji kaynağı olarak ilk defa kullanılması ise on dokuzuncu yüzyılın sonlarında gerçekleşmiştir. Amerika’nın Pensilvanya eyaletinde petrolün bulması ve petrolün yan ürünlerinin kullanımının başlaması, içten yanmalı motorun keşfi, Daimler-Benz’in ilk otomobili yapması, Ford’un otomobilde seri üretime geçmesi, Wright kardeşlerin uçmayı başarması ile petrole ve dolayısıyla enerjiye olan ihtiyaç tüm dünyada hızlı bir artış göstermiştir. Dünyada enerjiye olan ihtiyacın artması aynı zamanda enerji tüketimini de artırmıştır. Fosil yakıtların enerji ihtiyacının karşılanması için günden güne artan tüketimi ile birlikte fosil yakıtların çevreye zararları konuşulmaya başlanmıştır. Fosil yakıtların çevreye zararının konuşulmaya başlanması ve bu zararların etkilerinin gözükmesiyle, insanoğlu enerjide “alternatif” arayışına girdi (Yılmaz, 2015).

Küresel ısınma, suların ve toprağın kirlenmesi, bitki örtüsünün zarar görmesi, asit yağmurları, çölleşme gibi dünya üzerinde oluşan sorunların çoğunluğunun altında fosil yakıtların kullanımı yatmaktadır. Ayrıca fosil yakıtların sonsuz olmadığına farkına varılması ve fosil yakıtların çalışmasına bağımlı bir teknolojik sistemin sürdürülebilir olmaması alternatif enerji kaynak ve sistemleri üzerine olan çalışmaları hızlandırmıştır (Sayın 2006).

1973 yılında dünyada bir petrol krizi gerçekleşmiştir. Petrolün fiyatının iki katına çıkması, ardından 1974 ocak ayında tekrar iki kat yükselmesi insanlara petrolün sonlu bir enerji kaynağı olduğunu ve yeni enerji kaynaklarına yönelmesi gerektiğini hatırlatmıştır. 1980’li yıllar enerji verimliliği stratejilerinin uygulandığı yıllar olarak nitelendirilebilir. Yirmi birinci yüzyıla geldiğimizde ise bölgesel sınırlamalardan bağımsız yenilenebilir enerji kaynaklarının büyük bir ivme kazandığı söylenebilir (Karagöl ve Kavaz, 2017).

1.2 Enerji Çeşitleri

Enerji bir sistemin veya canlının iş yapabilme yeteneği olarak tanımlanmaktadır. Enerji her sistemin çalışması için gereklidir. Enerji kaynakları

doğada bulunma şekillerine göre yenilenemeyen enerji kaynakları ve yenilenebilir enerji kaynakları olmak üzere ikiye ayrılabilir. Kömür, petrol ve doğalgaz yenilenemeyen enerji kaynakları arasında gösterilebilir. Biokütle, rüzgâr, hidrolik, jeotermal ve güneş enerjisi ise yenilenebilir enerji kaynaklarıdır (Panwar vd, 2011).

Yenilenemeyen enerji kaynakları bitki hayvan vb. canlıların milyonlarca yıl alan süreçler sonunda fosilleşmesi ile oluşmuştur. Yenilenebilir enerji kaynakları ise doğada yeniden üretilen ve tükenmeyen kaynaklardan elde edilen enerjilerdir (Smith ve Taylor, 2008).

1.3 Dünyada Enerji

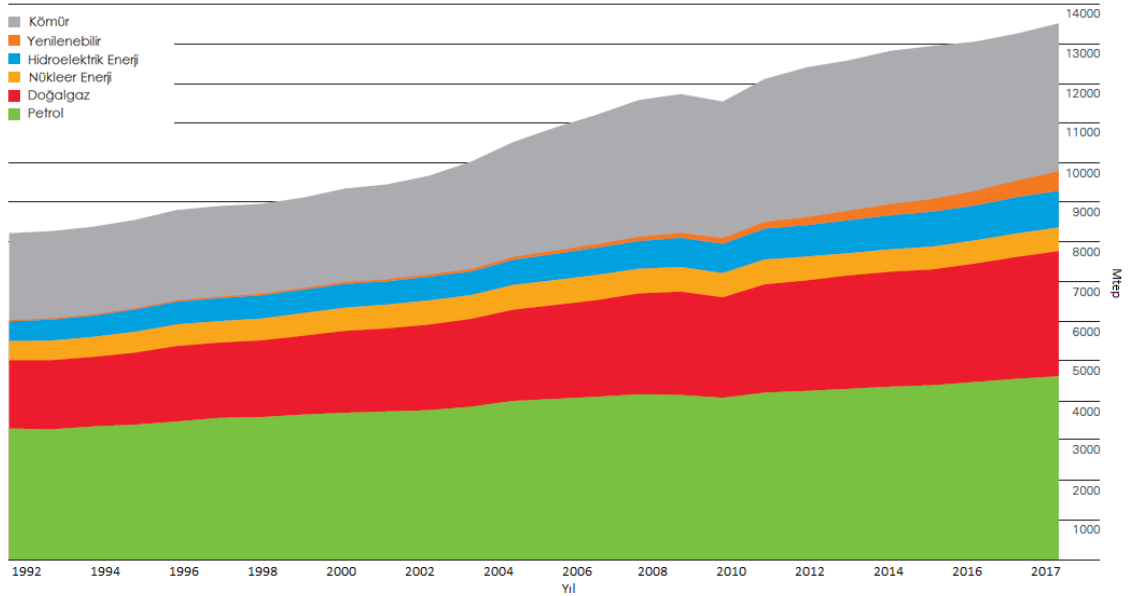
On dokuzuncu yüzyılın sonlarında dünya nüfusu 1,6 milyar iken enerji tüketimi 1000 Mtep olarak gerçekleşmiştir. Aradan geçen 100 sene içerisinde dünya nüfusu 2000 yılına gelindiğinde 3,8 kat artırarak 6 milyar ulaşmıştır. Bu süreçte birincil enerji tüketimi 9,2 kat artarak 9289 Mtep olmuştur. Tüketilen bu enerjinin 8089 Mtep gibi büyük bir kısmı fosil kaynaklardan karşılanırken, geriye kalan 610 Mtep'i hidrolik enerjiden 584 Mtep'i ise nükleer enerjiden karşılanmıştır (Ural, 2006).

Fosil yakıtların tüketiminin yıllara oranla kullanım yüzdesini inceleyecek olursak eğer, 1973 yılında toplam tüketimin %87'sinin fosil yakıtlardan karşılandığı görülmektedir. 2004 yılına gelindiğinde bu oran %88'e çıkmıştır. 2008 yılında değişim göstermemiş ve %88 olarak hesaplanmıştır (İTO, Küresel Petrol Stratejilerinin Jeopolitik Açından Türkiye ve Dünya Üzerine Etkileri, 2006). Dünya toplam birincil enerji tüketiminin kaynaklara göre dağılımı Tablo 1.1 'de gösterilmiştir.

Tablo 1.1 Dünya Toplam Birincil Enerji Tüketiminin Kaynaklara Göre Dağılımı (%)

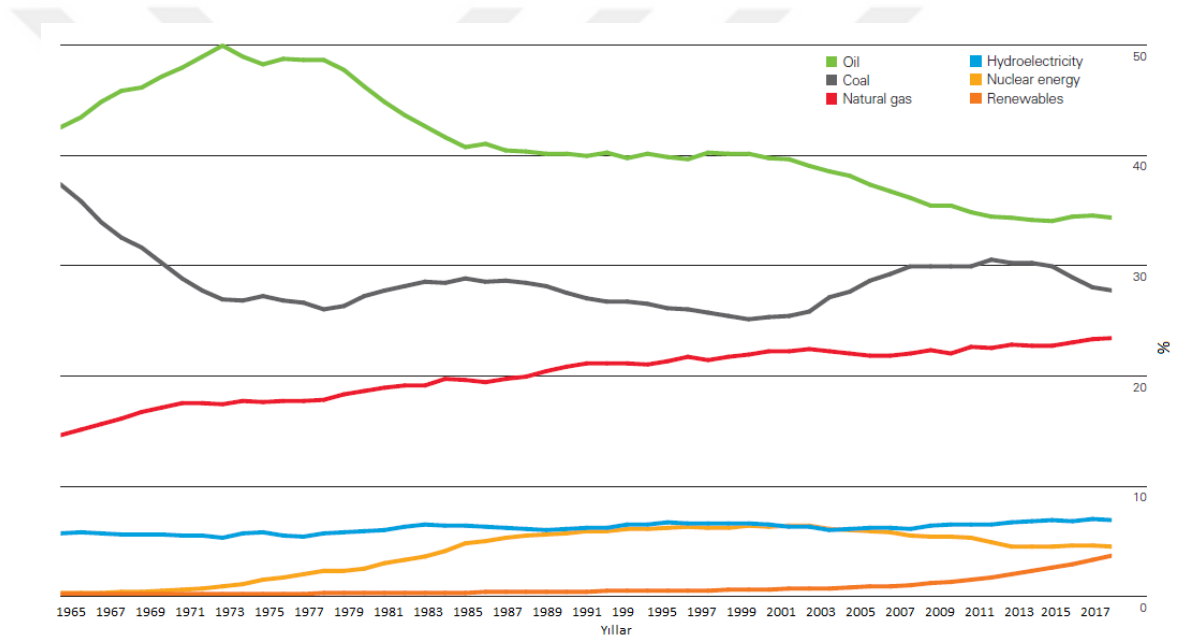
Kaynak	1973	2004	2008
Petrol	53	37	35
Doğalgaz	16	24	24
Kömür	18	27	28
Nükleer	10	6	5
Hidrolik Enerji	2	6	6
Diğer	1	0	1
Yenilenebilir			

Küresel enerji talebi ekonomik büyümeye endeksli bir şekilde 2016 yılında %1,2 ve 2017 yılında %2,2 oranında artış göstermiştir. Son 10 yıllık ortalama artış ise %1,7'dir. Bu büyüme trendi büyük oranda AB ülkeleri, OECD ülkeleri ve gelişmekte olan ülkelere kaynaklanmaktadır. Büyüme Pasifik Asya'da, Orta Doğu'da ve Güney Amerika'da ortalamanın altında, diğer bölgelerde ise ortalamanın üstünde gerçekleşmiştir (BP, 2018). Şekil 1.1'de dünya birincil enerji tüketiminin yıllara göre değişimi verilmiştir.



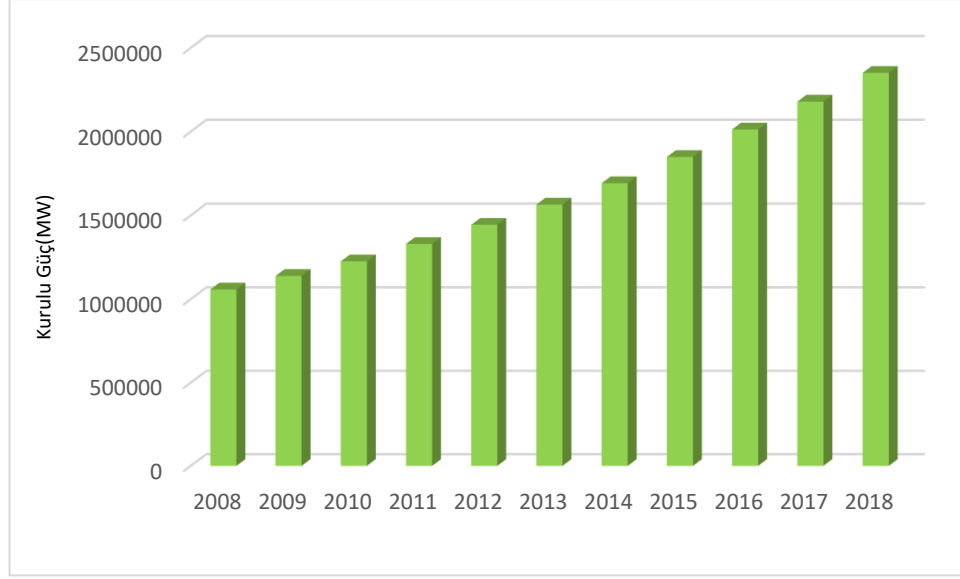
Şekil 1.1. Yıllara Göre Dünya Birincil Enerji Tüketimi – Mtep (BP 2018)

Yukarıdaki grafikte de gösterildiği üzere 2017 yılı itibariyle dünya toplam enerji tüketiminin büyük kısmını petrol, doğalgaz ve kömür oluşturmaktadır. Her ne kadar yenilenebilir enerji payı artış göstermekte olsa da fosil yakıtlar bu alandaki egemenliğini sürdürmektedir. Şekil 2.2 incelendiğinde enerji tüketiminde petrolün tüketim oranı 1973 yılından itibaren düşüş göstermiştir. 1970’li yıllarda yüzde 50’ye dayanan petrol ağırlığı 2000’li yıllarla beraber yüzde 40’ın altına inmiştir. Buna karşın aynı dönemde doğalgaz ve nükleer enerjinin yükseliş eğiliminde olduğu görülmektedir. Yenilenebilir enerjinin bu alandaki payı ise 2000’li yıllarla beraber yükselişe geçmiş bulunmaktadır.



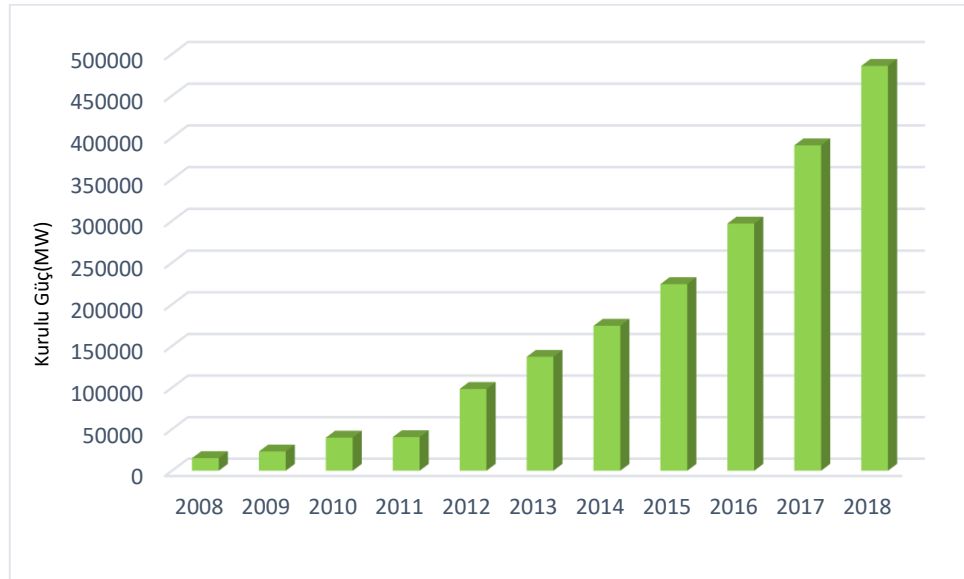
Şekil 1.2. Birincil Enerji İçerisinde Kaynakların Yüzde Oranları % (BP 2018,b)

Dünya genelinde kurulu yenilenebilir enerji kapasitesi, 2018 verilerine göre 2.350.755 MW’a ulaşmıştır (IRENA, 2019). Yenilenebilir enerji 2017 yılında %17’lik bir büyüme gerçekleştirerek 10 yıllık ortalama büyümenin üstünde bir büyüme oranı yakalamıştır (BP, Statistical Review of World Energy 2018). Dünya geneli yenilenebilir enerji kurulu güç grafiği Şekil 1.3’te verilmiştir.



Şekil 1.3. Dünyada Yıllara Göre Toplam Yenilenebilir Enerji Kapasitesinin MW Cinsinde Değişimi (IRENA 2019)

Dünya genelinde 2018 yılı itibariyle 2.350.755 MW'lık Kurulu gücün 1.292.595 MW ile en büyük payı hidroelektrik enerjiye aittir. Hidroelektrik enerjiyi 563.726 MW ile rüzgâr enerjisi, 485.826 MW ile güneş enerjisi takip etmektedir. Dünya'da yıllara göre kurulu güneş enerjisi kapasitesinin grafiği Şekil 1.4'te gösterilmiştir.

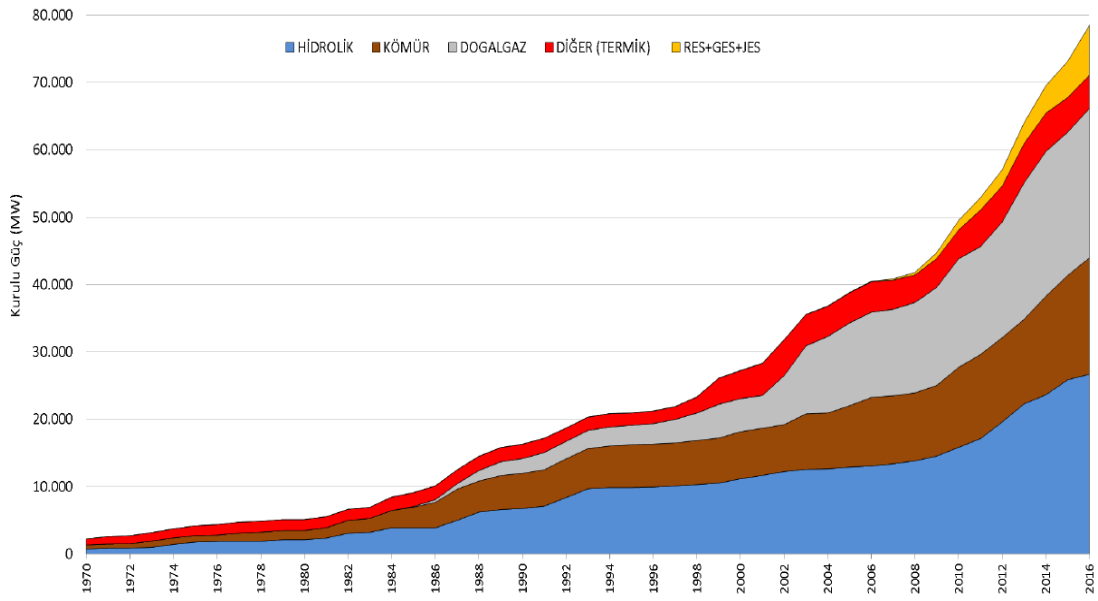


Şekil 1.4. Dünyada Yıllara Göre Toplam Güneş Enerjisi Kapasitesinin MW Cinsinden Değişimi (IRENA 2019)

1.4 Türkiye’de Enerji

2017 yılı sonu itibariyle Türkiye toplam kurulu elektrik gücü 85.200,0 MW’a ulaşmıştır. Bunun 46.926,3 MW’ı termik, 1.063,7 MW’ı jeotermal, 27.273,1 MW’ı hidrolik, 6.516,2 MW’ı rüzgâr ve 3.420,7 MW ise güneş enerjisidir. 2017 yılı sonu itibariyle brüt elektrik enerjisi talebi 249,9 milyar kWh olarak gerçekleşmiştir. (Türkiye Elektrik İletimi Sektör Raporu, 2018).

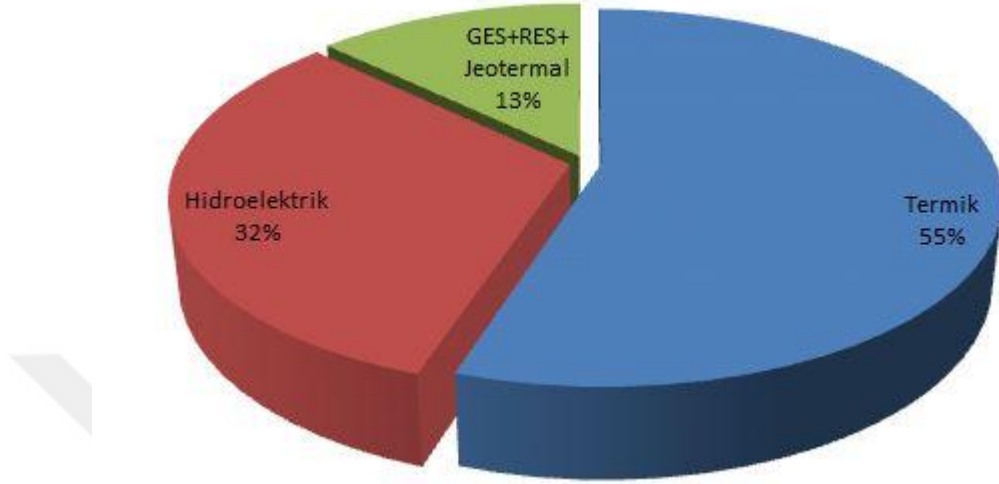
Türkiye’nin brüt elektrik enerjisi tüketimi 2015 yılında %3,3 artarak 265,7 milyar kWh’e 2016 yılında %5,1 artarak 279,3 milyar kWh’e ulaşmıştır. 2017 yılında ise %5,6’lık bir artış değeri yakalayarak 294,9 milyar kWh’e ulaşmıştır. 2017 yılı itibari ile termik santrallerden 210,5 milyar kWh, hidrolik santrallerden 58,4 milyar kWh, rüzgâr santrallerinden 17,9 milyar kWh ve güneş enerjisi santrallerinden 6,0 milyar kWh üretim gerçekleşmiştir (TEİAŞ 10 Yıllık Talep Tahminleri Raporu (2018-2027), 2017). Türkiye’deki Kurulu gücün yıllara göre değişimi Şekil 1.5’te gösterilmiştir.



Şekil 1.5. Türkiye Kurulu Gücünün Yıllar İtibariyle Gelişimi (TEİAŞ,2017)

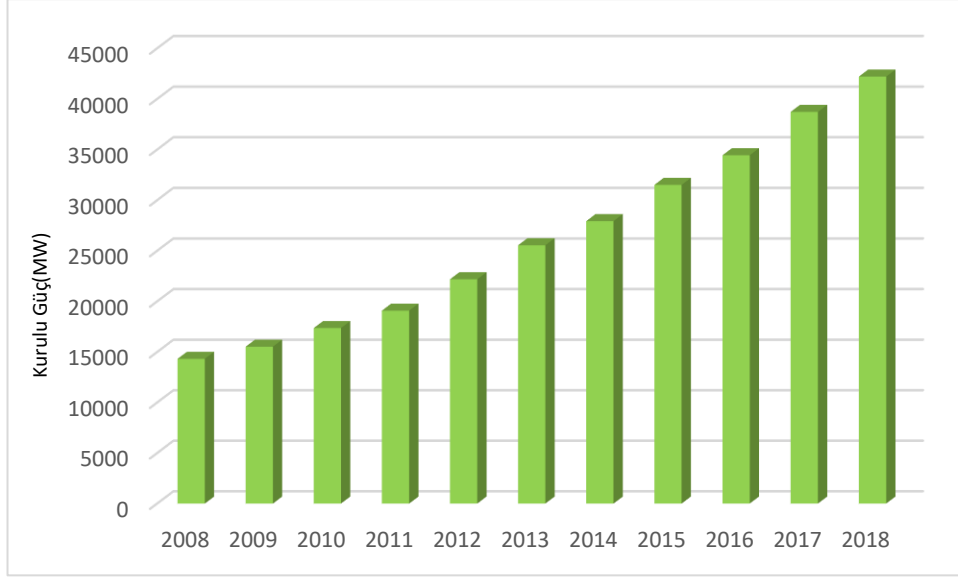
Türkiye’de artan nüfus, ekonomik gelişme, sanayi ve teknolojiye ilerleme ile birlikte enerji talebi her geçen gün artmaktadır (Yılmaz, 2012). Artan bu talebe karşılık olarak kurulu güç de yıldan yıla artış göstermektedir. Kurulu gücün kaynak dağılımına

baktığımızda en yüksek payın termik enerjide olduğunu görmekteyiz. Termik enerjiyi hidrolik enerji ardından rüzgâr, güneş ve jeotermal enerji takip etmektedir. Bu kaynakların yüzdesel dağılımı Şekil 1.6’da verilmektedir.



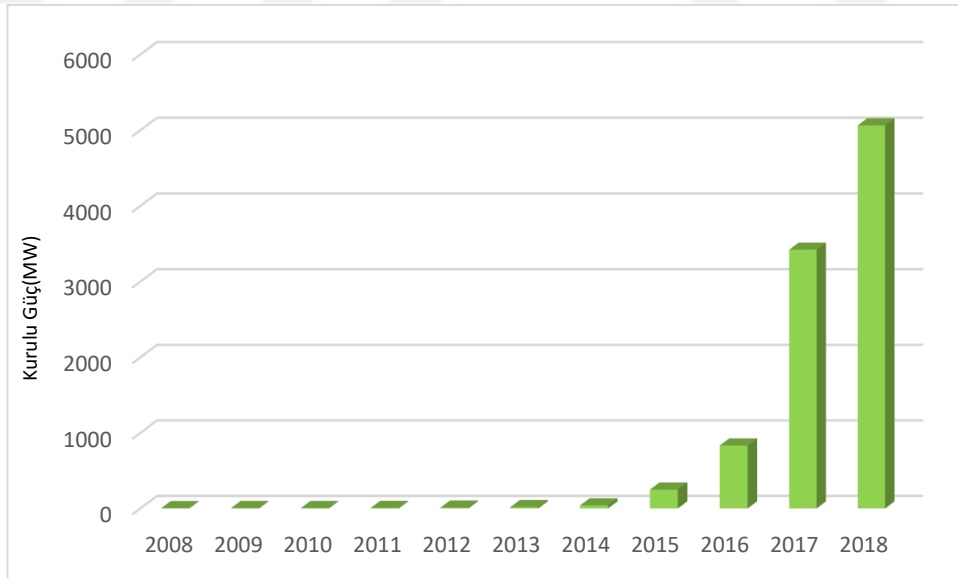
Şekil 1.6. 2017 Yılı İçin Türkiye’de Kurulu Gücün Kaynaklara Göre Yüzdesel Dağılımı (TEİAŞ,2017)

Ülkemiz için 2007 ve 2017 yılları kurulu güç kapasitelerine baktığımızda 2007 yılına oranla yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimin başladığı tespiti yapılabilir. 2008 yılında 14.329 MW olan Türkiye’nin toplam yenilenebilir enerji kapasitesi 2018 yılında 38.725 MW’a çıkmıştır (IRENA, 2019). Türkiye’de yıllara göre toplam yenilenebilir enerji kapasitesinin MW cinsinden değişimi Şekil 1.7’de detaylı olarak verilmiştir.



Şekil 1.7. Türkiye’de Yıllara Göre Toplam Yenilenebilir Enerji Kapasitesinin MW Cinsinden Değişimi (IRENA 2019)

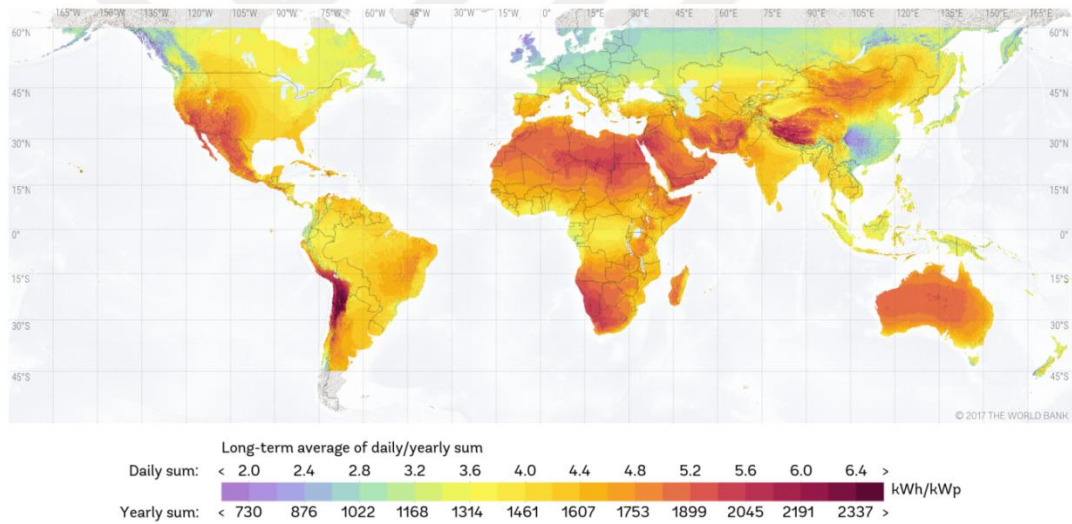
2019 yılı itibari ile Türkiye’de 42.215 MW’lık toplam kurulu yenilenebilir kapasitenin 28.291 MW’ı hidroelektrik, 7.005 MW’lık kısmı rüzgâr enerjisi ve 5.064 MW’lık kısmı ise güneş enerjisidir. Türkiye’de Kurulu güneş enerji kapasitesinin yıllara göre değişim grafiği Şekil 1.8’de gösterilmiştir.



Şekil 1.8. Türkiye’de Yıllara Göre Toplam Güneş Enerjisinin Kapasitesinin MW Cinsinden Değişimi (IRENA 2019)

1.5 Türkiye'nin Güneş Enerjisi Potansiyeli

Dünyada atmosfer dışında güneş enerjisi şiddeti, metrekare başına yaklaşık 1,35 kW değerindedir. Dünyanın tüm yüzeyine gelen yıllık güneş enerjisi ise 0.814×10^{14} Mtep mertebesindedir. Farklı bir bakış açısı ile bir yılda tüm Dünyaya güneşten gelen ışınım miktarı bilinen tüm kömür rezervlerinin 50 katına, petrol rezervlerinin ise 800 katına karşılık gelmektedir (Özgöçmen, 2007). Türkiye coğrafi konumu sebebiyle birçok ülkeye göre yüksek güneş enerjisi potansiyeline sahiptir. Termal güneş enerjisi üretimi ve kullanımı açısından Türkiye Çin, ABD ve Japonya ile birlikte zirveyi paylaşmasına rağmen elektrik üretimi ve kullanımı açısından bakıldığında bu tablonun çok gerisinde kaldığı ve potansiyelini kullanmadığı görülmektedir (Demircan ve Alakavuk, 2008). Şekil 1.9'da dünya güneş enerjisi potansiyeli atlası gösterilmiştir.

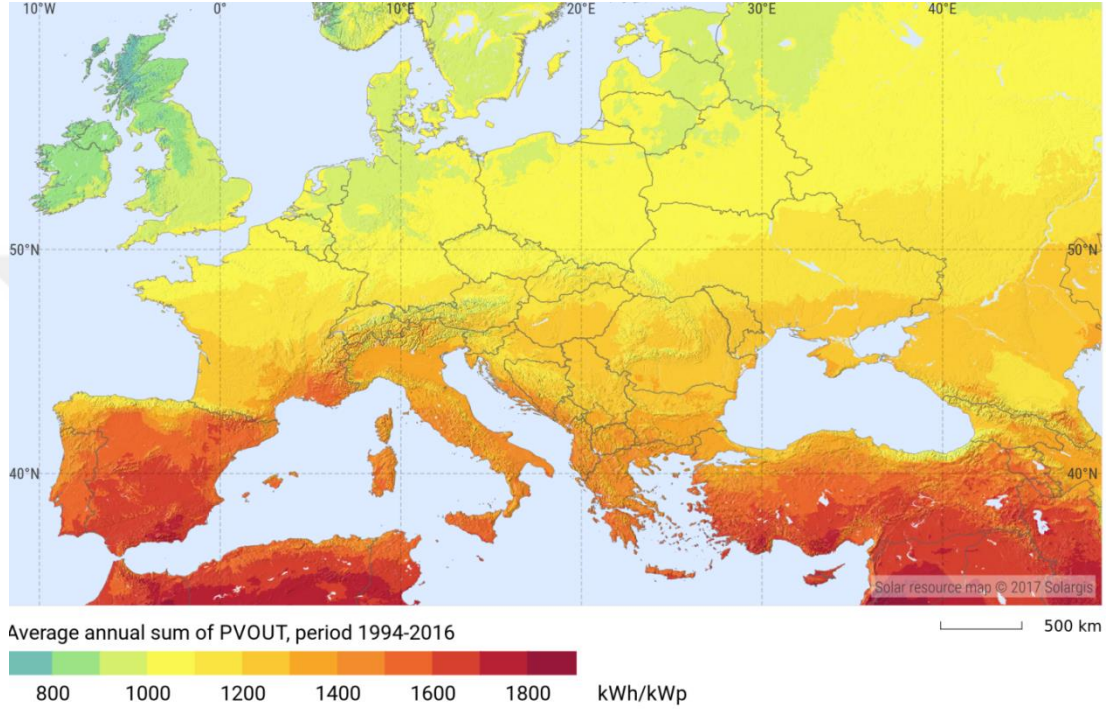


Şekil 1.9. Dünya Güneş Enerjisi Atlası

Dünya enerji atlası incelendiğinde Türkiye dünyada güneş enerjisi potansiyeli açısından en potansiyelli ülkeler arasında gözükmektedir. Atlasta Türkiye ile birlikte Çin, Amerika ve Japonya güneş enerjisi potansiyeli yüksek ülkeler olarak göze çarpmaktadır.

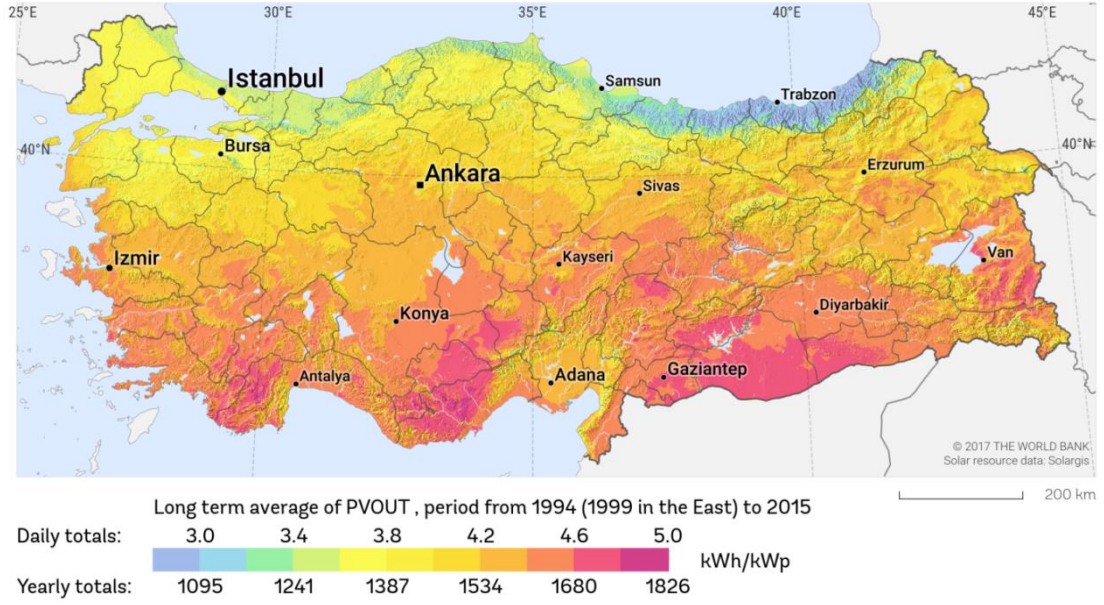
Türkiye güneş enerjisinden yararlanma olanağı bakımında diğer Avrupa ülkelerine göre İspanya ile beraber en potansiyelli ülke olarak göze çarpmaktadır. Diğer bir deyişle Türkiye tükettiği elektrik enerjisi ve fosil enerji kaynaklarınının 10,000

katından fazla güneş enerjisi potansiyeline sahiptir (Gümüş ve Tüzün, 2008). Şekil 1.10'da Avrupa güneş enerjisi atlası gösterilmiştir. Türkiye Avrupa güneş atlasına göre en yüksek potansiyele sahip ülkelerden biri olmasına rağmen, bu potansiyelini kullanamamaktadır. Ülkeler bazında güneş enerjisi santrali kurulu güç sıralaması incelendiğinde Almanya, Fransa, Yunanistan gibi güneş enerjisi potansiyeli daha düşük ülkelerden daha az kurulu güce sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 1.10. Avrupa Güneş Enerjisi Atlası

Meteoroloji Genel Müdürlüğü (DMİ)'nin ölçtüğü güneşlenme süresi ve ışınım değerleri doğrultusunda yapılan çalışmaya göre Türkiye'nin ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2640 saat ortalama toplam ışınım şiddeti ise 1.311 kWh/m^2 olarak hesaplanmıştır (Demircan ve Alakavuk, 2008). Şekil 1.11'de Türkiye'nin güneş enerjisi atlası verilmektedir.



Şekil 1.11. Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası

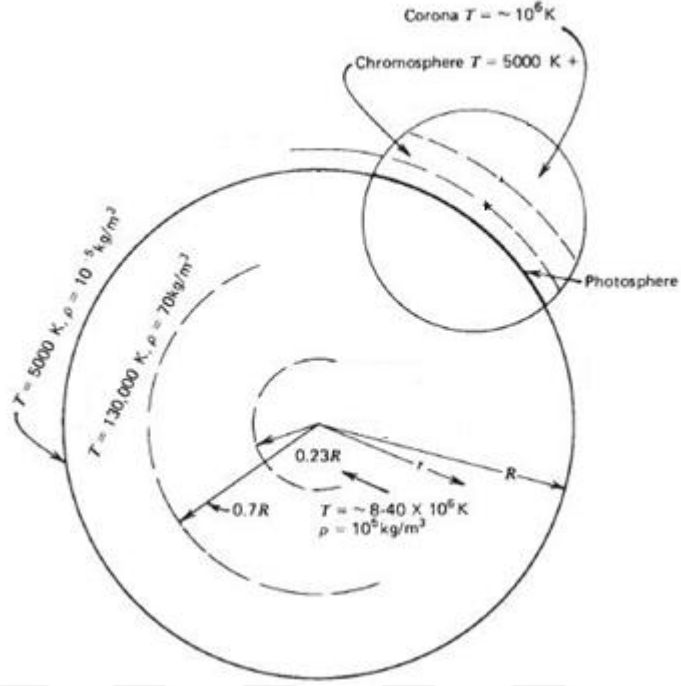
Türkiye'nin güneş enerjisi atlası incelendiğinde, en verimli bölgelerin Güneydoğu Anadolu Bölgesi, Akdeniz Bölgesi ve Ege Bölgesi olduğu görülmektedir. Kuzey kısımlara gidildikçe güneş enerjisi potansiyelinin azaldığı görülmektedir. Elektrik İşleri Etüt İdaresi'nin yapmış olduğu Türkiye güneş enerjisi atlası çalışmasına göre Türkiye'deki güneş enerjisi kapasitesinin 56,000 MW termik santral eşdeğeri olduğu hesaplanmıştır (Gürbüz A, 2009). Ülkemize yılda düşen güneş enerjisi 977×10^{12} kWh kadardır. Bu enerji ise ülkenin elektrik kurulu gücünden üretilen enerjinin 5000 katı kadardır (Kaya, 2006).

2. GÜNEŞ VE TEMEL GÜNEŞ IŞINIM TANIMLARI

Güneş, $1,39 \times 10^9$ metre çapında yoğun sıcak gaz halinde bir madde küresidir. Dünyadan $1,5 \times 10^{11}$ metre uzaklıkta ve çapı dünyanın çapının yaklaşık 110 katı büyüklüğündedir. Güneş her 4 haftada bir kez kendi eksenini etrafında döner. Ancak bu dönüş bir bütün halinde gerçekleşmez. Güneşin ekvator bölgesinin dönüşü 27 gün sürerken kutup bölgelerinin dönüşü 30 gün sürer (Duffie ve Beckman 2013).

Güneş 5777 Kelvin değerinde bir kara cisim sıcaklığına sahiptir. İç bölgelerindeki sıcaklığın 8×10^6 ile 40×10^6 K arasında olduğu hesaplanmaktadır. Yoğunluğunun suyun yaklaşık 100 katı olduğu tahmin edilmektedir. Güneş esasında sürekli bir füzyon reaktörü olarak görülebilir. Güneş çekirdeğinde gerçekleşen bu füzyon reaksiyonu ile 4 hidrojen atomunu 1 helyum atomuna dönüştürür. 4 hidrojen atomu 4,032 birim ağırlıktadır. 1 helyum atomu ise 4,003 birim ağırlıktadır. Gerçekleşen bu füzyon reaksiyonu sonucu 0,029 birim ağırlık Einstein'ın madde-enerji bağıntısına göre enerjiye dönüşmektedir. Güneşte her bir saniyede 564 milyon ton hidrojen, 560 milyon ton helyuma dönüşmektedir. Bu dönüşüm sonucu 4 milyon ton kütle açığa çıkmaktadır. Açığa çıkan 4 milyon ton kütle $3,86 \times 10^{26}$ J enerji olarak ışınım şeklinde uzaya yayılmaktadır (Duffie ve Beckman 2013).

Güneşin şematik yapısı Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Güneş diğer gezegenlerde görülen belirgin katmanların aksine, yoğunluğu değişiklik gösteren gaz katmanlarına sahiptir. Güneşin 0 ila 0,23 güneş yarıçapı kadar olan bölgesi çekirdek olarak adlandırılır. Enerjinin %90'ının bu bölgede üretildiği ve güneş kütesinin %40'ünün bu bölgede olduğu tahmin edilmektedir. Güneşin merkezinden 0,7 güneş yarıçapı kadar uzaklığında sıcaklık yaklaşık 130000 K'e yoğunluk ise 70 kg/m^3 'e düşmektedir. Bu alan ışınım katmanı olarak adlandırılır. 0,7 ila 1 güneş yarıçapı arasındaki bölge konveksiyon katmanı olarak bilinir. Bu bölgede sıcaklık yaklaşık 5000 K ve yoğunluk yaklaşık 10^{-5} kg/m^3 'tür (Thomas 1958).

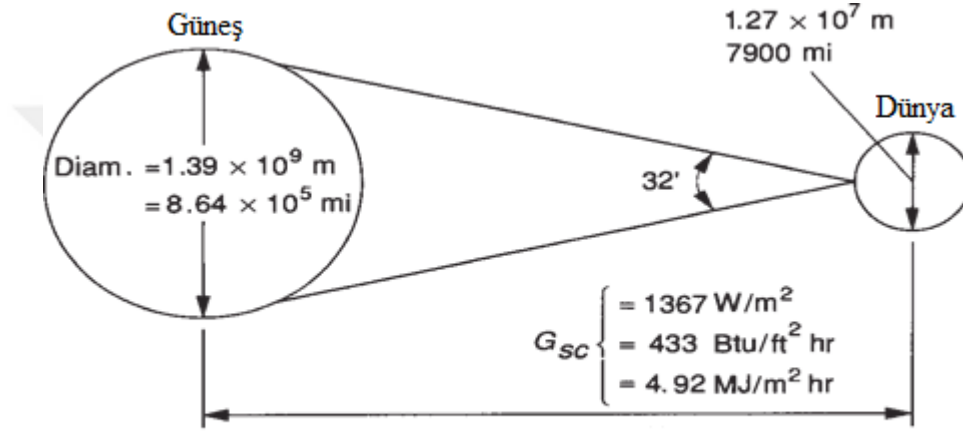


Şekil 2.1. Güneşin Yapısı (Duffie ve Beckman 2013)

Güneşin yüzeyi 1000 ila 3000 km arasında değişen boyutlarda ve birkaç dakikalık hücre ömrüne sahip granül adı verilen düzensiz konveksiyon hücrelerinden oluşur. Güneş yüzeyinde ayrıca konvektif hücrelerle aynı büyüklükte gözenek adı verilen küçük karanlık alanlar ve güneş lekeleri adı verilen daha büyük alanlar bulunur. Konvektif katmanın dış tabakasına fotosfer denir. Fotosfer güneş yüzeyinin başladığı ve optik olarak gözlemleyebildiğimiz yer olarak tanımlanabilir. Esas olarak opaktır, çünkü kendisini oluşturan gazları kuvvetli bir şekilde iyonlaştırabilir ve sürekli bir ışınım spektrumunu emebilir ve yayabilir. Fotosfer çoğu güneş ışınımının kaynağıdır. Fotosfer 5840 K'lik sıcaklığı ile güneşin en soğuk katmanıdır. Fotosferin dışında güneş tutulması sırasında gözlenebilen 10000 km derinliğe sahip kromosfer tabakası bulunur. Bu tabaka fotosferden biraz daha yüksek sıcaklığa ve daha düşük yoğunluğa sahiptir. Kromosferin üstünde güneşin en dış katmanı olarak bilinen korona tabakası bulunur. Korona tabakası çok daha düşük bir yoğunluğa ve çok daha yüksek bir sıcaklığa (10^6 K) sahiptir. Güneş çekirdeğine en uzakta bulunan katman olan koronanın diğer katmanlara göre daha sıcak olması “koronal ışınım sorunu” olarak literatüre girmiştir (Duffie ve Beckman 2013).

2.1 Güneş Sabiti

Şekil 2.2’de güneşin dünya ile olan geometrik ilişkisi şematik olarak gösterilmektedir. Güneş tarafından yayılan ışınım ve onun dünya ile olan uzaysal ilişkisi dünya atmosferinin dışında sabit bir güneş ışınım şiddetine sebep olur. Güneş sabiti (G_{sc}), atmosferin dışında güneş ışınımının yayılma yönüne dik olan herhangi bir alana birim zamanda gelen güneş enerjisi olarak tanımlanır (Duffie ve Beckman 2013).



Şekil 2.2. Güneş Dünya ilişkisi (Duffie ve Beckman 2013)

Roket ve uzay araçlarının kullanımından önce güneş sabiti, güneş ışınımının atmosferi geçtikten sonra dağılan ve emilen bileşenlerinin yer kabuğunda oluşturduğu değerden yola çıkarak hesaplanıyordu. Yüksek dağlardaki karasal ölçümler sonucu yapılan ekstrapolasyonlar, güneş ışınımının atmosferik iletim tahminlerine dayanıyordu. Bu alandaki öncü çalışmalar C.G. Abbot ve çalışma arkadaşları tarafından Smithsonian Enstitüsü’nde yapılmıştır. Bu çalışmalar ve roketler üzerinde yapılan çalışmalar sonucu güneş sabitinin değeri 1954 yılında 1322 W/m^2 olarak hesaplanmıştır (Johnson 1954). İlerleyen yıllarda yüksek irtifa uçaklarının, balonların ve uzay araçlarının mevcudiyeti, dünya atmosferinin çoğunun doğrudan güneş ışınım ölçümlerine imkân sağlamıştır. Devam eden araştırmalar sonucu Dünya Radyasyon Merkezi (The World Radiation Center-WRC) güneş sabitini %1 hata payı ile 1367 W/m^2 olarak kabul etmiştir (Duffie ve Beckman 2013).

2.2 Güneş Işınımını İfade Eden Tanımlar

Hava kütlesi, güneş zamanı gibi bazı tanımlar güneş ışınımını ifade edebilmek için gereklidir.

Hava Kütleli (m): Direkt ışınımın içinden geçtiği hava kütlelerinin, güneşin doruk açısına göre içinden geçeceği kütleyle oranına denir. Örneğin, güneş doruktayken deniz seviyesinde $m=1$ olurken, doruk açısı $\theta_z = 60$ iken $m=2$ olur. Doruk açısının 0° ila 70° arasında olduğu durumlar için;

$$m = \frac{1}{\cos\theta_z} \quad (2.1)$$

olur (Robinson 1966; Kondratyev 1969).

Güneş Zamanı: Güneş zamanı tüm güneş açısı ilişkilerinde kullanılan zamandır. Yerel saat ile denk gelmez. İki adet düzeltme faktörü kullanılarak standart zamanı güneş zamanına dönüştürmek gerekir. Birincisi göz önüne alınan meridyen ile yerel saatin dayandığı meridyen arasındaki farktan dolayı oluşan düzeltmedir. İkinci düzeltme ise dünyanın dönme hızında meydana gelen düzensizlikten dolayı olan düzeltmedir. Güneş zamanı ile standart zaman arasındaki ilişki aşağıdaki denklem ile verilir:

$$\text{Güneş zamanı} - \text{standart zaman} = 4(L_{st} - L_{loc}) + E \quad (2.2)$$

Bu denklemde L_{st} yerel saat dilimi için standart meridyeni ifade ederken, L_{loc} mevcut konumun bulunduğu meridyeni ifade etmektedir. ($0^\circ < L < 360^\circ$) Denklemdeki E zaman denklemi olarak ifade edilir ve aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir (Spencer 1971) :

$$E = 229.2 (0.000075 + 0.001868\cos B - 0.032077\sin B - 0.014615\cos 2B - 0.04089\sin 2B)$$

$$B = (n - 1) \frac{360}{365} \quad (2.3)$$

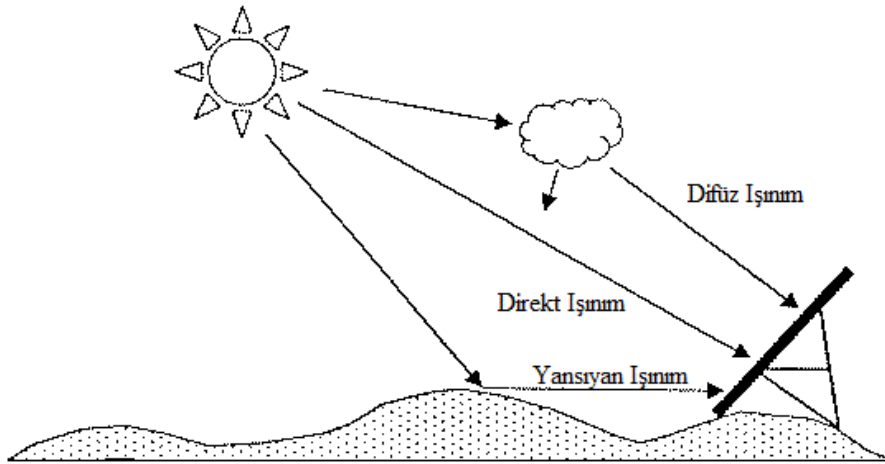
Burada n 1 ocaktan başlamak kaydıyla gün sayısı olarak tanımlanmıştır.
($1 \leq n \leq 365$)

Bu konuyla ilgili diğer önemli başlıklar olan dünyadışı güneş ışınımı, direkt ışınım, difüz ışınım, toplam güneş ışınımı, ışınım, ışınlanma gibi tanımlar şu şekildedir (Duffie ve Beckman 2013) ;

Atmosfer Dışı Güneş Işınımı: Atmosfer tarafından yansıtılmadan önceki ışınım miktarıdır.

Direkt Işınım: Güneşten gelen ışınımın atmosferde engelle karşılaşıp dağılmadan önceki değeridir.

Difüz Işınım: Güneşten gelen ışınımın atmosferden geçerken gökyüzünde bulut, su buharı, toz ve benzeri maddeler tarafından yutulan ve atmosferde dağılmış olan kısmıdır.



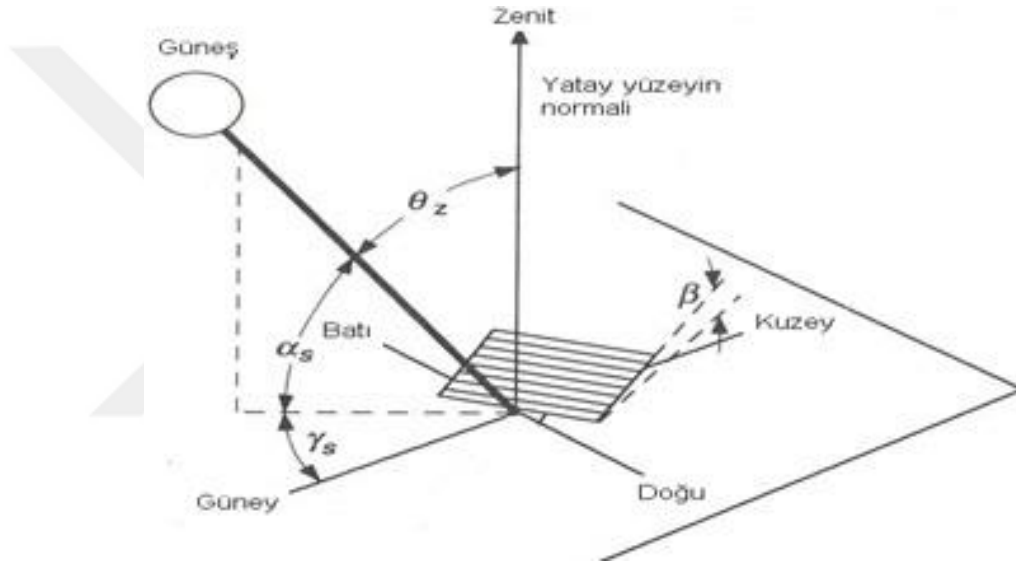
Şekil 2.3. Difüz ve Direkt Işınım

Toplam Güneş Işınımı: Bir yüzeydeki direkt ve difüz ışınımın toplamıdır.

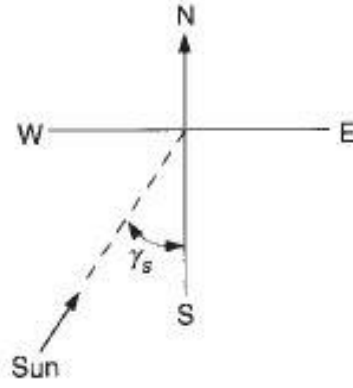
Birim Işınım (W/m^2): Birim zamanda birim alana düşen güneş enerjisi olarak tanımlanır. G sembolü ile ifade edilir.

Güneşlenme (J/m^2): Belli bir alana düşen enerji miktarı olarak tanımlanır. Işınımın zamana göre integrasyonu ile elde edilir. Güneşlenme özellikle güneş ışınımı için kullanılan bir terimdir. Günlük güneşlenme için H sembolü, saatlik güneşlenme için ise I sembolü kullanılır. H ve I sembolleri direkt, difüz veya toplam ışınımı ifade edebilir ve farklı alt indisler ile gösterilirler.

Yönü sabit olan bir düzlem ve gelen direkt güneş ışınımı arasında bir geometrik ilişki bulunur. Yani güneşin o düzleme göre konumu bazı açılar ile tanımlanabilir (Benford ve Bock,1939). Bu açılardan bazıları aşağıda Şekil 2.4 ve Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Güneş – Düzlem İlişkisini Gösteren Açı Tanımlamaları



Şekil 2.5. Güneş Azimut Açısı

Enlem (φ): Dünya üzerindeki söz konusu noktanın ekvator düzleminin merkezi ile yaptığı açıdır. Değeri $-90 \leq \varphi \leq 90$ arasında değişmekte olup kuzey pozitif, güney ise negatif ifade etmektedir.

Deklinasyon (δ): Dünyanın kendi çevresinde dönüşü ve güneşin çevresinde dönüşü sırasında oluşan açıya deklinasyon açısı denir. Değeri $-23.45 \leq \delta \leq 23.45$ arasında değişmekte olup kuzey pozitif güney ise negatif ifade etmektedir.

Deklinasyon değeri Cooper (1969) eşitliği ile bulunabilir;

$$\delta = 23.45 \sin\left(360 \frac{284+n}{365}\right) \quad (2.4)$$

Deklinasyon açısı daha hassas bir şekilde aşağıdaki eşitlik ile de hesaplanabilir (Spencer,1971) ;

$$\delta = \left(\frac{180}{\pi}\right) \left(0.006918 - 0.399912 \cos B + 0.070257 \sin B - 0.006758 \cos 2B + 0.00907 \sin 2B - 0.002697 \cos 3B + 0.00148 \sin 3B\right)$$

$$B = (n - 1) \frac{360}{365} \quad (2.5)$$

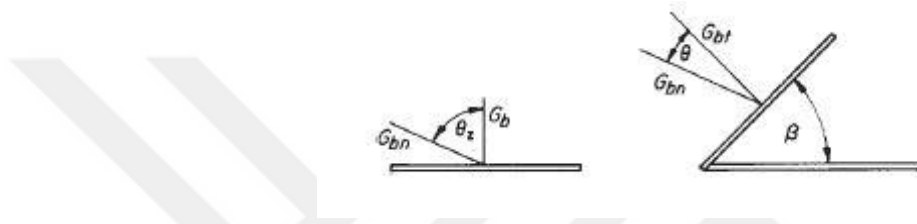
Bu denklemde n gün sayısı olarak tanımlanmıştır ($1 \leq n \leq 365$).

Eğim (β): Yüzey düzlemi ile yatay arasındaki açıdır. Değeri $0 \leq \beta \leq 180$ arasında değişebilir.

Yüzey azimut açısı (γ): Yatay düzlem dikeyinin, yerel boylama göre sapma miktarını gösteren açıdır. Değeri $-180 \leq \gamma \leq 180$ arasında değişmekte olup doğu negatif batı ise pozitif ifade etmektedir.

Saat açısı ω : Yeryüzünün dönmesi nedeniyle yerel meridyenin doğusu veya batısında güneşin açısal yer değiştirmesidir. Her bir saat 15° lik bir açıya denk gelir ve sabah değerleri negatif, öğleden sonra değerleri ise pozitif kabul edilir.

Geliş açısı θ : Yüzeyin normali ile direkt ışınımın geliş doğrultusu arasındaki açıdır. Şekil 2.6'da şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Eğimli Düzleme ve Yatay Düzleme Düşen Direkt Işınım

Doruk açısı (θ_z): Yüzeyin normali ile direkt ışınımın geliş doğrultusu arasındaki açıdır. Düz yüzeylerde geliş açısı ile aynı değeri paylaşırken, eğimli yüzeylerde değişiklik göstermektedir.

Güneş irtifa açısı (α_s): Doruk açısını 90 dereceye tamamlayan bileşendir.

Güneş azimut açısı (γ_s): Direkt ışınımın izdüşümünün yatay düzlemle arasındaki açıdır.

3. GÜNEŞ IŞINIMININ ve FOTOVOLTAİK ENERJİ ÜRETİMİNİN MODELLENMESİ

3.1 Literatür Taraması

Dünyada teknolojik gelişme ve ekonomik büyüme ile birlikte enerji ihtiyacı büyük oranda artmakta ve geleneksel enerji kaynakları bu ihtiyaca cevap veremeyecek duruma gelmektedir (Mejdoul ve Taqi, 2013). Dünyadaki yenilenebilir olmayan enerji kaynakları günden güne azalmaktadır (Hocaoğlu ve Serttaş, 2016). Sürdürülebilir gelişme için yenilenebilir enerji kaynakları büyük önem arz etmektedir. Başka bir deyişle, dünya enerji üretiminin sürdürülebilirliği bağlamında, yenilenebilir enerji teknolojilerinin gelişimi büyük bir öneme sahiptir (Dincer 2000 ; Elliott 2000). Yenilenebilir enerji sadece Türkiye'nin geleceği için değil, Dünyanın geleceği için de önemli bir kaynak olarak kabul edilmektedir. Bunun temel nedeni yenilenebilir enerji kaynaklarının fosil yakıtlarla karşılaştırıldığında, maliyetinin daha düşük olması, sürekli bir enerji kaynağı olması ve çevreye zararının daha az olması gibi birçok avantaja sahip olmasıdır (Ülgen ve Hepbaşlı, 2008). Güneş enerjisi watt başına düşen maliyet nedeniyle yenilenebilir enerji kaynakları arasında en önemli kaynaklardan biridir ve enerji ihtiyacımızı karşılamada kritik öneme sahiptir (Jafarzadeh vd 2013). Güneş enerji sistemlerinin tasarımında güneş ışınımının doğru olarak tahmin edilmesi büyük önem taşımaktadır (Mousavi, SM vd, 2015). Fotovoltaik(PV) bir elektrik santralinden üretilecek güç panel yüzeyine düşen güneş ışınım değeri ile orantılıdır (Akarslan ve Hocaoğlu 2017). Güneş enerji sistemlerinin kurulacağı bölgelerde güneş enerjisinin hassas bir şekilde tahmini önemlidir (Azadeh A. vd 2009). Verilen bir zaman ve konumda güneş ışınım değerinin hesaplanabilmesi bir güneş enerjisi projesi için en temel bilgidir. Belirli bir yerdeki güneş ışınımı şiddeti hakkında doğru bilgiye sahip olmak, projenin teknik ve ekonomik verimi, güneş enerjisi teknolojilerinin geliştirilmesi, tasarımı ve sürdürülebilirliği için önemlidir (Elliott 2000).

Toplam ışınım değerinin ölçülmesi, ölçüm ekipmanı, bakım ve kalibrasyon maliyetleri sebebiyle her zaman mümkün olmamaktadır (Muzathik vd 2011). Bu sebeple, yüksek maliyetli güneş ışınım ölçümleri yapmaktan kaçınmak için çeşitli deneysel (ampirik) yöntemler geliştirilmiştir (Alam MS vd 2005). Dünyanın yüzeyine

gelen güneş ışınımı bölgenin bazı meteorolojik faktörlerinden etkilenir (Poudyal vd 2012). Güneş ışınımını hesaplamak için kullanılan modeller mevcut meteorolojik, coğrafi ve iklimsel verileri içeren parametreleri kullanmaktadır (Kambezidis ve Psiloglou 2008). Bu parametreler arasında güneş zamanı (Bahel vd 1986), hava sıcaklığı (Fletcher 2007), enlem, boylam, yükseklik (Rehman 1998), yağış (Rietveld 1978), bağıl nem (Alnaser 1993) ve bulutluluk (Luiz vd 2005) bulunmaktadır.

Güneş ışınımını hesaplarken kullanılan güneş zamanı, hava sıcaklığı, enlem, boylam, bağıl nem, rüzgâr hızı, ışınım şiddeti miktarı, yağış vb. meteorolojik verilerin fotovoltaiik paneller üzerindeki etkileri çeşitli yöntemler ile irdelenmiştir. Güneş ışınım tahmini çalışmaları literatürde kısa vadeli tahminler, orta vadeli tahminler ve uzun vadeli tahminler olmak üzere üç sınıfta çalışılmıştır. Eğimli düzleme gelen güneş ışınımını tahmin etmek amacıyla deneysel veya teorik birçok model geliştirilmiştir. Çeşitli meteorolojik verileri kullanan bu modeller şunlardır;

- Yapay Sinir Ağları (Artificial Neural Network, YSA)
- Nümerik Yöntemler
- Analitik Yöntemler

Mellit, Benghanem ve Kalogirou (2006) günlük toplam güneş ışınımını tahmin edebilmek için yapay sinir ağlarını (YSA) ve wavelet teoremini kullanmıştır. Bu modelleri belli bir bölgeye ait 19 yıllık meteorolojik verilerden faydalanarak eğitmişler ve geliştirdikleri Wavelet-Network modelini güneş ışınımının tahmini için kullanmışlardır. Sonuçlar geliştirilen modelin R^2 belirleme katsayısına göre % 97 doğrulukla ve % 6'dan az ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) ile ışınım tahmini yapabildiğini göstermiştir. Ayrıca model diğer sinir ağı yapılarıyla karşılaştırıldığında; Wavelet-Network modeli daha az sayıda yapay sinir ağı eğitim verisi gerektirmektedir.

Hiyama, Kouzuma ve Imakubo (1995) fotovoltaiik modülün optimum çalışma noktasını bulabilmek için bir yapay sinir ağı geliştirmiştir. Modülün çıkış gücünün yalıtım, hücre sıcaklığı gibi çevresel faktörlere bağlı olduğunu bu yüzden de maksimum güç değerinin bulunabilmesi için optimum çalışma noktasının bulunması gerektiğini belirtmişlerdir. Geliştirilen yapay sinir ağı modeli, güç tahminini % 99 gibi çok yüksek bir doğrulukla bulmuştur.

Bahgat, Helwa, Ahamd ve Shenawy (2004) bir fotovoltaik modülün maksimum gücünü ve normal çalışma gücünü geliştirdikleri yapay sinir ağı modeli ile tahmin etmişlerdir. Bu geliştirilen model ışınım şiddetini ve fotovoltaik modülün yüzey sıcaklığını girdi olarak kabul ederek fotovoltaik modülün maksimum gücünü ve normal çalışma gücünü büyük bir doğruluk ile tahmin etmiştir.

Hamdy Elminir, Yosry, Azzam ve Farag Younes (2006) Mısır için yetersiz ve eksik olan ışınım değerlerinin tahmini için yapay sinir ağları modeli geliştirmiştir. Yapay sinir ağları 1999 ve 2001 yılları arasında ölçümlenen değerler ile eğitilmiştir. Elde edilen sonuçlar Erbs model ile karşılaştırılmış ve saatlik ve günlük ölçeklerde daha iyi tahmin verileri verdiği görülmüştür.

Amit Kumar Yadav ve Chandel (2013) literatürde güneş ışınımı tahmini için uygun yöntemleri belirlemek ve araştırma boşluklarını tanımlamak için yapay sinir ağı bazlı teknikleri gözden geçirmiştir. Çalışma yapay sinir ağı tekniklerinin geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında ışınım şiddetini daha doğru tahmin ettiğini göstermiştir. Yapay sinir ağı modellerinin tahmin doğruluğunun giriş parametresi kombinasyonlarına, eğitim algoritmasına ve mimari konfigürasyonlarına bağlı olduğu bulunmuştur.

Federico-Vladimir, Miguel-Angel, Maria-Pilar ve Maria-Teresa (2016) Yapay sinir ağlarının kısa vadeli güneş enerjisi tahminlerinde kullanılması için yeni bir metot önermiştir. Bu metot sıcaklık, nem, basınç ve rüzgâr gibi değişkenlerin 900 farklı değerine dayanmaktadır. Araştırmacılar yapay sinir ağının farklı mimarilerini ve parametreleri kullanarak hangisinin daha iyi kısa vadeli güneş enerjisi tahmininde bulunduğunu belirlemek için deneyler yapmışlardır. Yapılan çalışmaların sonucunda % 20'den daha az nRMSE hata payına sahip yapay sinir ağı modeli oluşturulmuştur.

Yukarıda ifade edildiği üzere güneş ışınımı ve fotovoltaik modellemede kullanılan diğer bir yaklaşımda analitik ve nümerik yöntemlerdir. Yıllar boyunca güneş ışınımı tahmini için birçok analitik ve nümerik model önerilmiştir. Bu doğrultuda Liu ve Jordan, Hay, Klucher, Heywood, Klein ve diğerleri farklı matematiksel modeller üzerinde çalışmalar yapmıştır (Pandey ve Katiyar, 2014).

Bu çalışmada yatay düzleme gelen ışınım değerinin eğimli düzleme çevrilmesi ve eğimli düzlem için hesaplanan ışınım değeri ile eğimli düzlemde ölçülen ışınım değerinin izotropik model ve anizotropik model ile hesaplanması izotropik modelin ve anizotropik modelin saatlik ölçümler referans alınarak bir yıllık süreçte ve mevsimlik süreçlerde doğruluklarının karşılaştırılması amaçlanmıştır.

İzotropik ve anizotropik modeller eğik bir yüzey üzerindeki güneş ışınımını tahmin etmeye yarayan matematiksel modellerdir. İzotropik modeller sıcak ve kurak yerler için daha iyi sonuçlar vermektedir (Al-Sulaiman ve Ismail 1997). Liu ve Jordan, Hottel ve Woertz, Jimenz ve Castro, Badescu ve Koronaki birçok izotropik model geliştirmiştir. İzotropik modellerin doğruluğunu arttırmak amacıyla bazı araştırmacılar anizotropik modeller üzerine çalışmalar yapmıştır. Anizotropik modellere dayanan güneş ışınımı tahminleri izotropik modellere kıyasla daha doğru sonuçlar vermiştir. Hay ve Davies, Klucher, HDKR (Hay-Davies-Klucher-Reindl), Temps ve Coulson, Perez anizotropik model geliştiren araştırmacılardan bazılarıdır (Sandhya vd 2014).

Liu ve Jordan (1962) eğimli yüzeye gelen ışınımı hesaplamak için güneş ışınımının üç temel bileşene dayalı olduğu izotropik bir model sunmuşlardır. Bu modele göre güneş ışınımı direkt ışınım, yayılı ışınım ve yansıyan ışınım olmak üzere üç temel bileşen olarak tanımlanmıştır.

J.E. Hay (1978) eğimli bir yüzeye gelen güneş ışınımının hesaplanmasında pratik yaklaşımlar sunmuştur. Farklı zaman ölçeklerinde (saatlik, günlük veya daha uzun) direkt, yayılı ve yansıyan ışınılara farklı yaklaşımlarla çok sayıda model kategorisi oluşturmuştur. Bu farklı modellerin performanslarına göre üstün modeller belirlenmiştir.

Klucher (1979) güneş ışınımının izotropik ve anizotropik gökyüzü yaklaşımlarını kullanarak eğik düzlemlerde ışınım tahminini doğrulamak için deneysel bir çalışma yapmıştır. Piranometreler kullanılarak saatlik ışınım değerleri 6 ay boyunca toplanmıştır. Yatay düzlemdeki ölçülmüş ışınım değerleri eğik yüzeydeki ışınım değerini öngörmek için modellerde kullanılmıştır ve hesaplanan ve ölçülen değerler modellerin geçerliliğini test etmek için kullanılmıştır. Liu-Jordan modeli bulutlu (kapalı) gökyüzü koşullarında iyi sonuç vermiş olup, açık hava ve hafif bulutlu gökyüzü koşulları altındaki sonuçları beklentilerin altında kalmıştır. Temps ve

Coulson (1977) tarafından geliştirilen anizotropik model ise açık gökyüzü için iyi bir sonuç vermiş olup bulutlu günler için beklenen tahmin değerlerini vermemiştir. Klucher (1979)'in yaptığı çalışmada 6 aylık süre boyunca ölçülen değerler ve hesaplanan değerler yüksek uyuma göstermektedir.

Klein (1977) yatay düzleme gelen günlük güneş ışınımının aylık ortalama verilerini kullanmıştır. Liu ve Jordan her ay için ortalama günlük ışınım değeri hesaplama modeli geliştirmiştir. Klein yaptığı çalışması ile bu modeli deneysel ölçümlerle doğrulamış ve daha geniş bir veri seti için aylık ortalama ışınım hesaplanmasını sağlayacak model geliştirmiştir.

Bakırcı (2009), Türkiye'nin farklı bölgelerindeki iller için yatay düzlemdeki aylık ortalama günlük güneş ışınımını tahmin etmek için yedi farklı ampirik model kullanarak bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada Türkiye'nin illeri için gerekli olan günlük güneş ışınımı ve güneş ışığı verileri Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden alınmıştır. Bakırcı çalışmasında modellerin performanslarını karşılaştırmak için bazı istatistiksel test yöntemleri kullanılmıştır. Bu test yöntemleri, MBE(ortalama sapma hatası) , MABE(ortalama mutlak yanlışlık hatası), MRE(ortalama bağıl hata), RMSE(kök ortalama kare hatası) ve korelasyon katsayısıdır.

Muzathik, Ibrahim, Samo ve Wan Nik (2010) küresel güneş ışınımının yatay ve eğimli yüzeylerde hesaplanabilmesi için deneysel model seçmişlerdir. Saatlik güneş ışınımı değerleri 2004 – 2007 yılları arasında çalışma alanı için toplanmış ve bu toplanan değerler, seçilen modeller kullanılarak eğimli bir yüzeydeki güneş ışınımını hesaplamak için kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre Bakırcı tarafından geliştirilen doğrusal üstel modele dayanan yeni bir model geliştirilmiştir.

Pandey ve Katiyar (2013) eğimli yüzeyler için saatlik güneş ışınımının değişimini incelemiştir. Hindistan'ın Uttar Pradesh bölgesinde güney yönlü eğimli bir yüzey ve bir yatay yüzey üzerine gelen güneş ışınım değerleri ölçülmüştür. Ölçülen eğimli yüzey güneş ışınım değerleri, yatay düzlem verilerinden circumsolar model kullanılarak tahmin edilen sonuçlar, Liu ve Jordan tarafından önerilen izotropik model ve Klucher ve Hay tarafından sunulan iki farklı izotropik model ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçların analiz ve karşılaştırılması için istatistiksel hata testleri

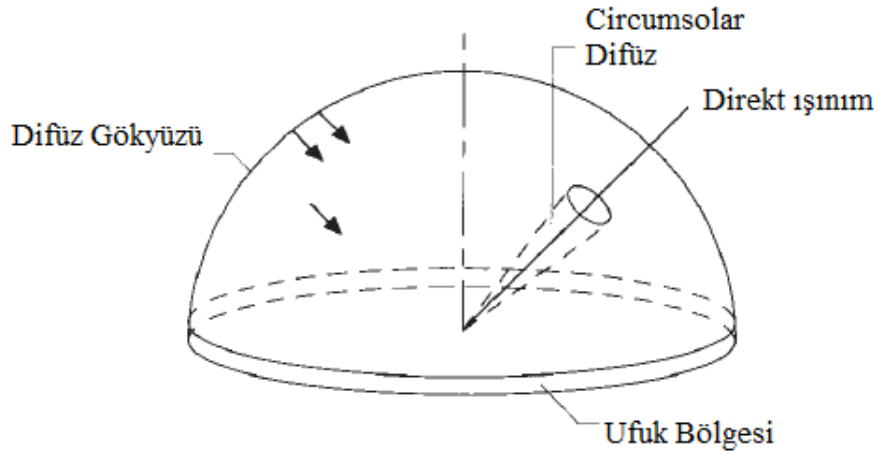
kullanılmıştır. Modellerin karşılaştırmalı analizi, tüm eğimli yüzeyler için izotropik modelin daha iyi sonuçlar verdiğini ortaya koymaktadır.

Mghouchi, Chham, Krikiz, Ajzoul ve Bouardi (2016) Fas, Tetuan'da ölçülmüş olan verileri kullanarak güney yönüne dönük eğimli bir yüzeyde alınan günlük toplam güneş ışıınımı yoğunluğunu tahmin etmek için literatürde denenmiş beş modeli kullanmışlardır. Daha önce yapılan deneylerin aksine bu modellerin doğruluğunu çeşitli açılar için test edip, bu modellerin performanslarını günden güne değerlendirmişlerdir. Yapılan analizlerin sonucuna göre seçilen modellerin aynı doğrulukla çalışmadığı ortaya konmuştur. Farklı açılarda eğimli yüzeylere düşen güneş ışıınımı şiddeti ile yatay yüzeye düşen güneş ışıınımı şiddeti arasında deneysel bir ilişki geliştirilmiştir. İstatiksel analizlere göre El Mghouchi modelinin tüm açılar için (0 dereceden 90 dereceye kadar) diğer modellerle karşılaştırıldığında daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir.

Housmans, Ipe ve Bertrand (2017) yaptıkları çalışmada güneş ışıınımını yatay düzlemden eğik düzleme çeviren birçok model olduğunu belirtmiş ve eğik düzleme düşen güneş ışıınımını yatay düzleme çeviren yeni bir model üzerine çalışmışlardır. Güneş ışıınımının eğik düzlemden yatay düzleme çevrilmesi için yapılan çalışmalar Belçika Kraliyet Meteoroloji Enstitüsü'nün ışıınım kulesinin çatısında kaydedilen 6 aylık ölçümlere dayanarak incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucu güneş ışıınımının eğik düzlemden yatay düzleme çevrilmesi multi-piranometre yaklaşımı ile geliştirilmiştir. Bu geliştirilen modele göre eğimli düzlemde üç adet piranometre ile ölçümler yapılmaktadır. Multi-piranometre yöntemi sonuçlarına göre güneş ışıınımının yatay düzlemden eğimli düzleme çevrilmesinin daha doğru sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

3.2 Eğimli Yüze Düşen Işınım Tahmini

Sadece yatay bir yüzeydeki toplam ışınım bilindiğinde, eğimli yüzeye düşen güneş ışınımının hesaplanması direkt ve difüz bileşenlere dair yapılan kabullere dayanır (Hay, 1985). Açık gökyüzü verileri difüz ışınım modelinin üç ayrı parçası olarak gösterilir. Birincisi yani izotropik parça gökyüzünün tamamından etkilenir. Circumsolar difüz olarak adlandırılan ikinci parça ise direkt ışınımın etrafındaki görece olarak yoğun olan bölgedir. Horizon brightening yani difüz ışınımın üçüncü ve son parçası ise ufka yakın olarak yoğunlaşmıştır ve açık havalarda belirgindir. Şekil 3.1.1’de difüz ışınımın söz konusu bu üç bileşeni şematik olarak gösterilmiştir (Perez vd 1988).



Şekil 3.1. Difüz Işınımın Gökyüzündeki Dağılımı

Eğimli bir düzleme gelen anlık güneş ışınım miktarını bilmek veya tahmin edebilmek güneş enerji sistemleri için çok önemlidir. Bu hesaplamayı yapabilmek için birçok model geliştirilmiş olup çalışmanın bu bölümünde izotropik gökyüzü ve anizotropik gökyüzü modelleri incelenip, bu modellerden elde edilen veriler daha önce ölçülmüş olan değerlerle karşılaştırılacaktır.

3.2.1 İzotropik Gökyüzü Modeli

Hottel ve Woertz' e (1942) göre difüz ışınım ve yansıyan ışınımın kombinasyonunu izotropik olarak tanımlayabiliriz. Bu varsayıma göre eğimli yüzeye düşen gökyüzünden yayılan difüz ışınım ve yeryüzünden yansıyan ışınım yönden bağımsız olarak tüm yönlerden eşit olarak geldiği kabul edilir. Bu modele göre eğimli yüzeye gelen toplam ışınım miktarı ise direkt ışınımın ve difüz ışınımın toplamı olarak ifade edilir. Bu yaklaşım tüm ışınımı direkt ışınım olarak ele almıştır. Ancak daha iyi yöntemler mevcuttur. Liu ve Jordan (1963) izotropik difüz modeli adında daha gelişmiş bir model sunmuştur. Sunulan bu modele göre eğimli yüzeye gelen ışınım üç ayrı bileşen olarak ele alınmıştır: direkt, izotropik difüz ve yansıyan güneş ışınımı. Gökyüzü izotropik olarak ele alındığı için difüz ışınımın circumsolar ve horizon-brightening bileşenleri göz ardı edilir ve 0 olarak kabul edilir. Saatlik eğimli yüzeye düşen toplam ışınım miktarı (I_t) aşağıdaki bağıntı ile verilmektedir;

$$I_t = I_b R_b + I_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (3.1.)$$

Burada;

I_b = Direkt ışınım

R_b = Geometri faktörü

I_d = Difüz ışınım

ρ_g = Yüzey yansımaya oranı

I = Yatay düzleme gelen saatlik toplam güneş ışınımı (W/m^2)

β = Eğim

Yatay bir düzlemdeki olası ışınım değerini bulabilmek için yukarıdaki denklemin çözülebilmesi gerekmektedir, bununla birlikte bu denklemden değerleri bulabilmek için aşağıda eşitlikleri verilen değişkenleri kullanmak gereklidir.

K_t günlük berraklık indeksi olarak tanımlanabilir. Saatlik toplam ışınımın saatlik atmosfer dışı ışınım oranına eşittir (Erbs vd 1982). Aşağıdaki bağıntı ile ifade edilmiştir;

$$K_t = \frac{I}{I_0} \quad (3.2.)$$

I değeri yatay düzleme gelen saatlik toplam güneş ışınımı olarak tanımlanmıştır. Yatay düzlemde ölçülmüş ışınım değeri her saat için değerlendirilip formülde kullanılacaktır. I_0 yatay düzleme gelen saatlik atmosfer dışı güneş ışınımı olarak tanımlanır ve aşağıdaki bağıntı ile ifade edilmiştir (Talebizadeh 2011);

$$I_0 = \frac{12 \times 3600}{\pi} G_{sc} (1 + 0.33 \cos \frac{360n}{365}) \times [\cos \varphi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180} \sin \varphi \sin \delta] \quad (3.3.)$$

Burada,

G_{sc} = Güneş sabiti olarak tanımlanır ve atmosfer dışında birim alana düşen ışınım şiddetidir. (1367 W/m²)

n = Gün sayısı

δ = Deklinasyon açısı (°) (2.1.1)

φ = Enlem açısı (°) (Bolu ili için 40° 43' 57'') (2.1.2)

ω_1, ω_2 = Güneşin doğu ve batısındaki saat açılarıdır (2.1.3)

Direkt ışınım değerini bulabilmek için direkt ışınımın toplam güneş ışınımına oranının bilinmesi gerekmektedir. Erbs ve diğerleri (1982) Amerika Birleşik Devletleri'nde dört ayrı noktada ölçümlendiği verilere göre aşağıdaki bağıntıya ulaşmışlardır;

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1.0 - 0.09k_t & k_t \leq 0.22 \\ 0.951 - 0.01604k_t + 4.388k_t^2 - 16.638k_t^3 + 12.336k_t^4 & 0.22 < k_t \leq 0.8 \\ 0.165 & k_t > 0.8 \end{cases} \quad (3.4)$$

Bu denklem vasıtasıyla daha önce hesaplanan K_t değeri ve I değeri kullanılarak I_d yani difüz ışınım değeri hesaplanabilir.

Yatay yüzeye gelen direkt ışınım değeri (I_b) ise toplam günlük ışınım ile difüz ışınımın farkı alınarak hesaplanabilir.

$$I_b = (I - I_d) \quad (3.5.)$$

Geometri faktörünü (R_b) değerini hesaplamak için geliş açısı ile doruk açısının birbirlerine oranı kullanılır (Duffie ve Beckman 2013);

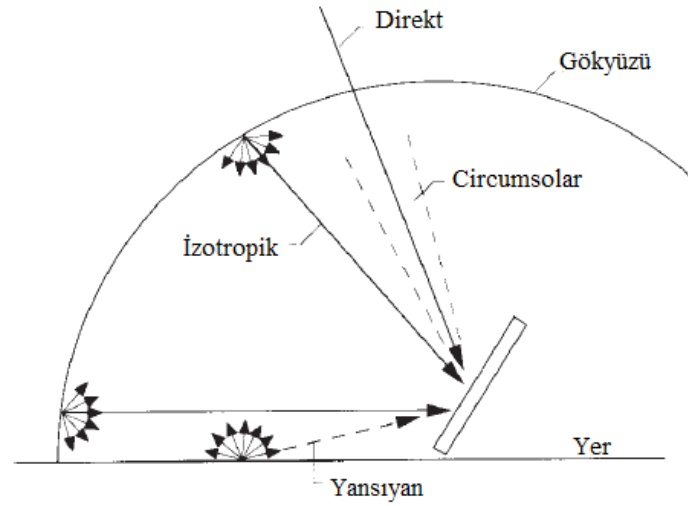
$$R_b = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} \quad (3.6.)$$

Hottel ve Woertz (1942) ise bu bağıntıyı daha özel durumlar için geliştirmiş ve aşağıdaki denklemi ifade etmişlerdir;

$$R_b = \frac{\cos(\varphi-\beta)\cos\delta\cos\omega + \sin(\varphi-\beta)\sin\delta}{\cos\varphi\cos\delta\cos\omega + \sin\varphi\sin\delta} \quad (3.7.)$$

3.2.2 Anizotropik Gökyüzü Modeli

İzotropik difüz model görece olarak anlaşılması kolaydır ve gelenekseldir, bu sebeple eğik yüzeylerde ışınım hesaplamasını kolaylaştırır. Ancak difüz ışınımının circumsolar ve horizon – brightening bileşenlerini hesaba katmaz. Difüz ışınımı sadece izotropik parçasını dikkate alarak hesaplamalarını yapar. Circumsolar ve horizon – brightening bileşenlerini hesaba katarak daha iyi sonuçlara ulaşmayı hedefleyen çalışmalarda olmuştur. Hay ve Davies (1980) difüz ışınımının dağılımını circumsolar ve izotropik olarak iki parça halinde ele almıştır. Horizon- brightening bileşenini dikkate almamıştır. Reindel vd (1990) Hay ve Davies'in modeline horizon-brightening bileşenini ekleyerek hesaplamaları yapmıştır. Reindel vd (1990) Klucher (1979) tarafından önerilen modeli geliştirmiştir. Hay ve Davies modelini temel alıp horizon-brightening bileşenini de ekleyerek HDKR adını verdikleri modeli geliştirmişlerdir. Skartveit ve Olseth (1986) yatay düzleme düşen direkt ışınım ve difüz ışınımın bütün bileşenlerini kullanarak eğik düzleme düşen ışınımın bulunacağı bir metot geliştirmiştir. Perez vd (1990) difüz ışınımının hem circumsolar hem de horizontal-brightening bileşenlerini göz önüne alan bir model önermiştir.



Şekil 3.2. Eğik Yüzeyle Gelen Direkt, Difüz ve Yansıyan Işınım

Mevcut tez çalışmasında Hay and Davies modeli kullanılarak hesaplamalar yapılacaktır. Hay and Davies modeli difüz ışınımı iki parça olarak (izotropik, circumsolar) ele almakta ve toplam ışınım miktarını bu varsayıma göre hesaplamaktadır. Hay and Davies modelinde saatlik eğik yüze düşen toplam ışınım miktarı (I_t) aşağıdaki bağıntı ile ifade edilmiştir;

$$I_t = (I_b + I_d A_i) R_b + I_d (1 - A_i) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (3.8.)$$

Yukarıdaki denklem çözülürken ihtiyaç duyulan parametreler Denklem 3.2. 3.3. 3.4. 3.5. 3.6. ve 3.7.'de ve bölüm 3.2.1'de İzotropik Gökyüzü Modeli bölümünde açıklanmıştır.

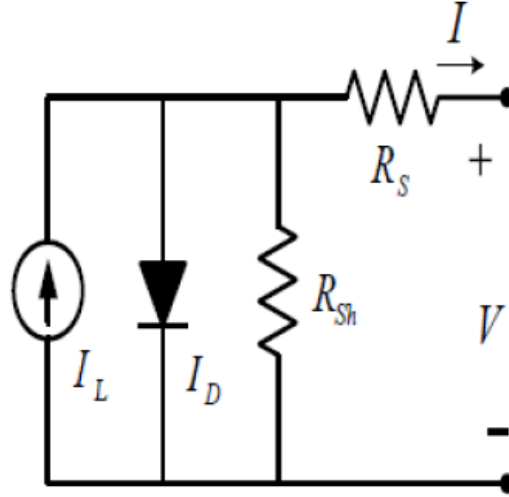
Direkt ışınım için atmosferin geçirgenliğinin fonksiyonu olan anizotropi endeksi (A_i) ise aşağıdaki bağıntı ile tanımlanmaktadır (Duffie ve Beckman 2013).

$$A_i = \frac{I_b}{I_0} \quad (3.9.)$$

3.3 Fotovoltaik Sistemlerin Modellenmesi

Fotovoltaik sistemlerin çalışması ve sistemden elde edilecek gücün öngörülmesi hücrelerin farklı ışınım seviyeleri ve farklı sıcaklık altındaki gerilim-akım ilişkisine dayanmaktadır. Güvenilir bir fotovoltaik sistem tasarımı için verimli bir model kullanmak önemlidir. Fotovoltaik hücrelerin modellenmesinde çalışma koşullarında ölçülen I-V eğrisi ile uyum gösteren modelleri kullanmak temel amaçtır. Basit modellerden, hücrelerde meydana gelen fiziksel işlemlerin detaylarını yansıtan geliştirilmiş modellere kadar birçok hücre modeli geliştirilmiştir (Duffie ve Beckman, 2013).

Bu modellerden en çok kullanılanı ve en yaygın olanı eşdeğer elektrik devresinin matematiksel modelidir. Doğrusal ve doğrusal olmayan bileşenlerden oluşan bu yaklaşımın elektrik devresi Şekil 5.1’de gösterildiği gibidir (Weikong vd 2004).



Şekil 3.3. Basitleştirilmiş Eşdeğer Fotovoltaik Hücre Devresi (Rahim vd 2013)

Eşdeğer elektrik devresi modeli Matlab, PSpice, Visual Basic, C gibi programlama dilleri ile uygulama çalışması yapma imkânı sağlamaktadır ve bu uygulama büyük bir avantaj sağlamaktadır.

Basitleştirilmiş eşdeğer fotovotaik hücre devresinin matematiksel ifadesi aşağıdaki denklem ile verilmiştir.

$$I = I_L - I_D = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{V+I R_S}{a}\right) \right] - \frac{V+I R_S}{R_{SH}} \quad (3.10.)$$

Burada;

I = Yük Akımı (A)

I_L = Işık Akımı (A)

I_0 = Ters Doyma Akımı (A)

V = Gerilim(V)

a = Modifiye Edilmiş Diyot İdealite Faktörü (V)

R_S = Seri Direnç (ohm)

R_{Sh} = Paralel Direnç (ohm)

Yukarıdaki denklemde belirtilen tüm parametreler absorbe edilen güneş ışınımının ve hücre sıcaklığının bir fonksiyonudur. Modifiye edilmiş diyot idealite faktörü (a), fiziksel sabitlerin ve diyot idealite faktörü ile ilişkili olarak aşağıdaki bağıntı ile ifade edilebilir.

$$a = \frac{nkTN_s}{q} \quad (3.11.)$$

Denklem 3.11’de verilen eşitlikte n ile sembolize edilmiş olan diyot idealite faktörü ideal diyotlarda 1 olarak kabul edilir. Gerçek tip diyotlarda ise 1 ile 2 arasında bir değer alır. k Boltzman sabitidir. Değeri $1,381 \times 10^{-23}$ J/K’dir. T ile sembolize edilen değer mutlak sıcaklığı ifade eder. Birimi kelvindir. N_s ile gösterilen değer seri bağlı hücre sayısını ifade ederken q elektron yükü olarak ifade edilmiştir. Değeri $1,602 \times 10^{-19}$ coloumb olarak kabul görmüştür (Duffie ve Beckman, 2013).

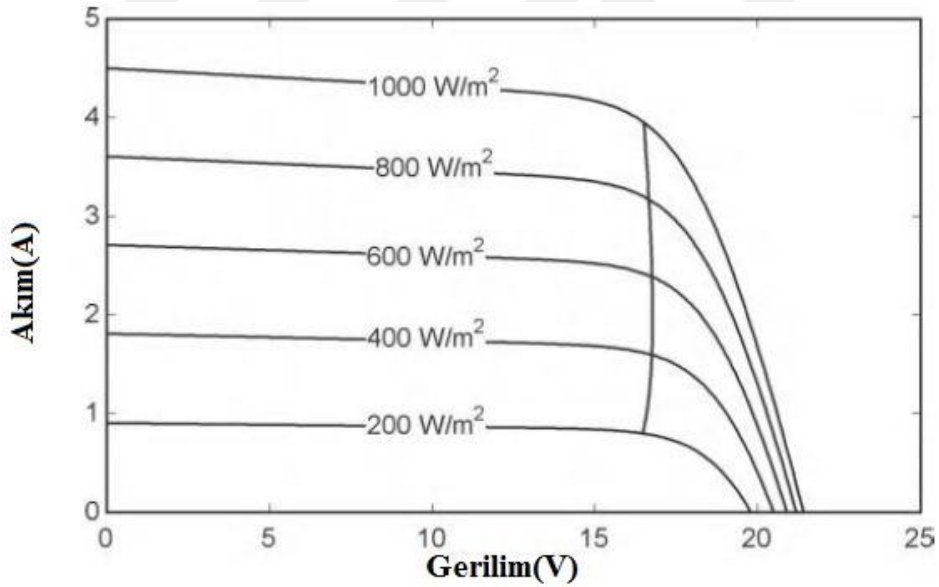
Eşdeğer fotovoltaik hücre devresinin matematiksel modelinin çözülebilmesi için bazı denklem parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Denklem parametrelerini belirleyebilmenin en pratik yöntem panel üreticilerinin hücre için sunmuş olduğu değerleri ve bilgileri kullanmaktır. Bunun yanında denklemler türetilirken kısa devre akımı, açık devre gerilimi ve maksimum güç noktasındaki akım ve gerilim değerleri gibi kritik değerler kullanılmalıdır (Yamarhita vd 2002).

Çeşitli araştırmalar sonucu ortaya konan farklı yaklaşımları olan birçok fotovoltaik hücre modelleme yöntemleri mevcuttur ve bu yöntemler çok az benzerlik gösterir.

Fotovoltaik hücrelerin matematiksel modellemesini genel bir ifade ile açıklamak gerekirse hücrenin akım ve gerilim değerleri arasındaki ilişkiyi hücre üzerine düşen ışınım şiddeti ve hücrenin yüzey sıcaklığı ile açıklayan bir model olarak tanımlayabiliriz.

3.3.1 Güneş Işınımının I-V Eğrisine Etkisi

Güneşten gelen ışınım değerinin artması ile fotovoltaik hücre üzerinde bulunan yarı iletken maddeden daha fazla elektron kopma olayı yaşanır. Bu artış ise panelin ürettiği akım miktarında artışa sebep olur. Akım ve gerilimin ilişkisini veren grafik Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Işınım Şiddeti Değerinin Fotovoltaik Hücrenin Akım ve Gerilim Değerlerine Etkisi (Duffie ve Beckman, 2013)

Şekil 3.4'te ışınım miktarının değişimi ile akım (I_L) ve gerilim değerlerinin değişimi gösterilmektedir.

Fotovoltaik hücreden elde edilen akım (I_L) değeri aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir.

$$I_L = \frac{G}{G_{ref}} [I_{Lref} + \mu_{Isc}(T_c + T_{Cref})] \quad (3.12.)$$

Burada;

I_{Lref} = Işık Akımı Referans Değeri

G = Işınım Şiddeti (W/m^2)

G_{ref} = Işınım Şiddeti Referans Değeri (W/m^2)

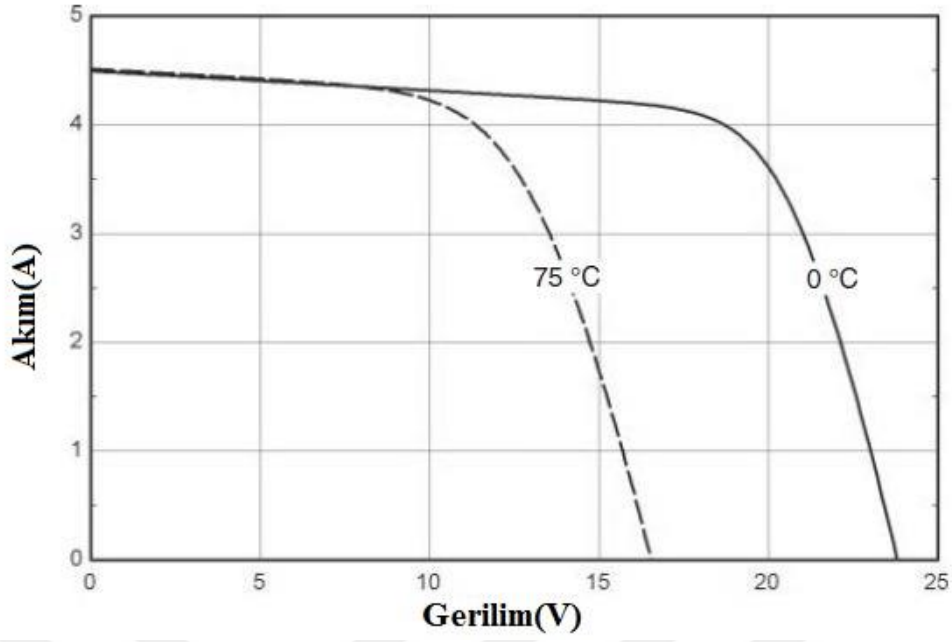
μ_{Isc} = Kısa Devre Akımının Sıcaklık Katsayısı (A/K)

T_c = Fotovoltaik Hücre Sıcaklığı (K)

T_{Cref} = Fotovoltaik Hücre Referans Sıcaklığı (K)

3.3.2 Hücre Sıcaklığının I-V Eğrisine Etkisi

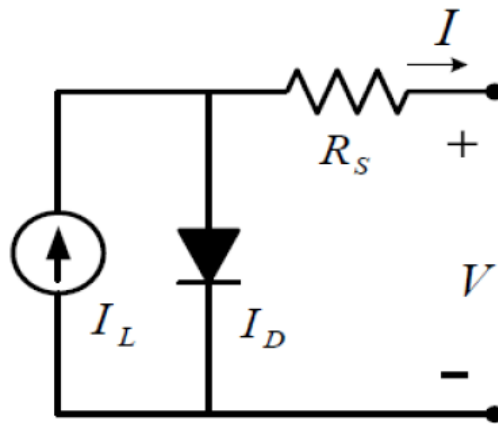
Güneşten gelen ışınım, hücrelerin üzerindeki sıcaklığı önemli derecede etkilemektedir. Değişen sıcaklık değeri ise hücrenin akım ve gerilim değerlerine etki etmektedir. Sıcaklık değerinin artması fotovoltaik hücrenin ürettiği akım miktarında çok az bir artışa sebep olmaktadır. Gerilim değerinde ise önemli miktarda düşüşe sebep olmaktadır. Bu değişimler ise elde edilen güç değerinde düşüş meydana gelmesine sebep olmaktadır. Sıcaklık değişiminin akım-gerilim değerlerindeki değişime etkisi Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Sıcaklık Değerinin Fotovoltaik Hücrenin Akım ve Gerilim Değerlerine Etkisi (Duffie ve Beckman, 2013)

Bu tezde literatürde kullanılan modeller arasından en temel olarak konuyu ele alan 4-parametrelili model kullanılarak bir fotovoltaik panelin I-V eğrisi hesaplanacak ve deneysel ölçüm değerleri ile karşılaştırılacaktır.

3.4 4-Parametrelili Model



Şekil 3. 6. 4-Parametrelili Model İçin Eşdeğer Devresi.

4-parametrelili model hesaplamalarında denklem 3.1’de verilen bağıntıda bulunan R_{Sh} değeri ihmal edilir. Böylece Şekil 3.6’da verilen basit eşdeğer elektrik devresinin I-V eğri denklemi aşağıda verildiği gibi olur (Celik and Acikgoz, 2007):

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{V+IR_S}{\alpha}\right) - 1 \right] \quad (3.13.)$$

Fotovoltaik panelden elde edilecek güç aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır:

$$P = IV \quad (3.14.)$$

Fotovoltaik hücrenin güç değerinin bulunmasıyla bu değer kullanılarak hücrenin verimi hesaplanabilir:

$$\eta = \frac{P}{G \times A} \times 100 \quad (3.15.)$$

Yukarıdaki I-V denkleminin çözülebilmesi için öncelikle I_L , I_0 , R_S ve α değişkenlerinin referans ışınım ve sıcaklık değerlerine göre nasıl değiştiğinin incelenmesi gerekmektedir. Bu dört değişkenin denklemleri aşağıda gösterildiği gibidir (Celik and Acikgoz, 2007):

$$I_L = \left(\frac{G}{G_{ref}}\right) [I_{L,ref} + \mu_{I,sc}(T_c - T_{c,ref})] \quad (3.16.)$$

$$I_0 = I_{0,ref} \left(\frac{T_c}{T_{c,ref}}\right)^3 \exp\left[\left(\frac{qN_s}{\alpha}\right) \left(1 - \frac{T_{c,ref}}{T_c}\right)\right] \quad (3.17.)$$

$$R_S = R_{S,ref} \quad (3.18.)$$

$$\alpha = \alpha_{ref} \frac{T_c}{T_{c,ref}} \quad (3.19.)$$

Yukarıdaki denklemlerde ifade edilen değişkenler farklı koşullarda değişiklik göstermektedir. Bu nedenle parametrelerin verilen bir durumda değerleri hesaplanırken öncelikle referans koşullarına karşılık gelen değerlerin hesaplanması gerekmektedir. Bu referans değerler aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanmaktadır:

$$I_{L,ref} = I_{sc,ref} \quad (3.20.)$$

$$\alpha_{ref} = \frac{\mu_{V,oc} T_{c,ref} - V_{oc,ref} + qN_s}{\frac{T_{c,ref} \mu_{I,sc}}{I_{L,ref}} - 3} \quad (3.21.)$$

$$I_{0,ref} = \frac{I_{L,ref}}{\exp\left(\frac{V_{oc,ref}}{\alpha_{ref}}\right) - 1} \quad (3.22.)$$

$$R_{s,ref} = \frac{\alpha_{ref} \ln\left(1 - \frac{I_{mp,ref}}{I_{L,ref}}\right) - V_{mp,ref} + V_{oc,ref}}{I_{mp,ref}} \quad (3.23.)$$

Bu referans değerlerin hesaplanmasında gerekli olan $\mu_{I,sc}$ ve $\mu_{V,oc}$ katsayıları kullanılan panel için 0,001325 A/K ve -0,0775 V/K olarak kabul edilmiş ve hesaplamalarda bu değerler kullanılmıştır. Yukarıdaki denklemler ile değişkenler hesaplanıp I-V grafiğini oluşturmak için denklem 3.13 kullanılmıştır. Elde edilen I-V grafiği ölçülen değerlerle karşılaştırılıp modelin doğruluğu sınanmıştır. Ayrıca elde edilen I-V grafiğine göre denklem 3.14 kullanılarak güç değeri bulunmuş ve maksimum güç noktası belirlenmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde Bölüm 3'te verilen izotropik ve anizotropik modeller çözümlenerek deney düzeneğinden elde edilen ölçülmüş değerler ile model sonuçları karşılaştırılacaktır. Ayrıca fotovoltaik eşdeğer elektrik devre modellerinden 4-parametrelili model kullanılarak elde edilen I-V grafikleri 4 ayrı mevsim için hesaplanacak ve ölçülmüş değerler ile karşılaştırılacaktır.

İzotropik model, anizotropik model ve 4 parametrelili model kullanılırken bazı değerler deney düzeneğinde bulunan güneş paneli etiketinden bazı değerler ise belirli kaynaklardan referans olarak alınmış ve kullanılmıştır. Bu kullanılan referans değerler Tablo 4.1'de gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Modellerde Kabul Edilen Referans Değerler

	Kabul Edilen Değerler	Kaynak
G_{ref}	1000 W/m ²	Kullanılan Güneş Paneli Etiketi
$T_{c,ref}$	273,15 K	Kullanılan Güneş Paneli Etiketi
$I_{sc,ref}$	8,75 A	Kullanılan Güneş Paneli Etiketi
$V_{oc,ref}$	20,09 V	Kullanılan Güneş Paneli Etiketi
$I_{mp,ref}$	8,18 A	Kullanılan Güneş Paneli Etiketi
$V_{mp,ref}$	15,92 A	Kullanılan Güneş Paneli Etiketi
$P_{mp,ref}$	130,18 W	Kullanılan Güneş Paneli Etiketi
N_s	36	Kullanılan Güneş Paneli Etiketi
μ_{Voc}	-0,0775 V/K	(Duffie and Beckman, 2013)
μ_{Isc}	0,001325 A/K	(Duffie and Beckman, 2013)
E_q	1,124 eV	(Streetman and Banerjee, 2016)
k	$1,38065 \times 10^{-23}$ J/K	(Beckwith, 2016)
q	$1,60222 \times 10^{-19}$ C	(Taylor vd., 2007)

Deney düzeneği Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Gölköy Kampüsü Mühendislik Fakültesi çatısına kurulmuştur. Solargis.com sitesinden alınan verilere göre üniversitenin bulunduğu bölgenin konumu 40°42'50"K, 31°30'52"D olarak hesaplamalarda kullanılmıştır. Kurulan deney düzeneğinde fotovoltaik panelin yönü, yüzey azimut açısı minimum olacak şekilde mekanik ve elektronik pusula ile

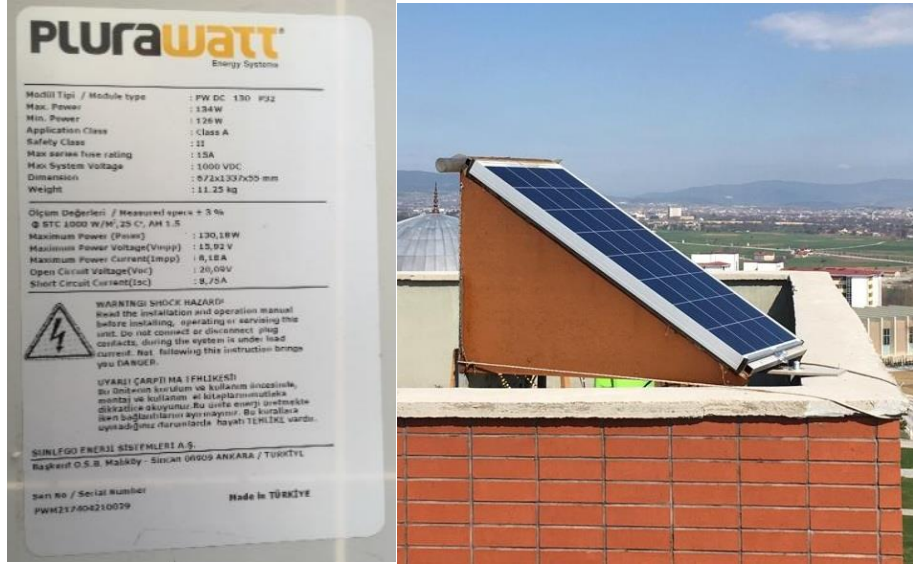
belirlenmiştir. Fotovoltaik panelin eğim açısı Bolu ilinin enlemine eşit olacak şekilde 34° olarak belirlenmiştir. Kurulan deney düzeneği Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Fotovoltaik Deney Düzeneği

Deney düzeneğinde bulunan cihazlar;

- 1- Plurawatt PW DC 130 P32 Fotovoltaik Panel (Şekil 4.2)
- 2- Eko ML-01 Piranometre (Şekil 4.3)
- 3- Hioki LR8431-20 Veri Kayıt Cihazı (Data Logger)(Şekil 4.4)
- 4- Hioki 3284 Pens Ampermetre
- 5- Provista ISC3020 Şarj Regülatörü
- 6- Derby 12V 60Ah Jel Akü



Şekil 4.2.Fotovoltaik Panel



Şekil 4.3.Piranometreler



Şekil 4.4. Veri Kayıt Cihazı (Data Logger)

Deney düzeneği 7 gün 24 saat boyunca aktif olarak veri toplamaktadır. Bu verileri dakikalık ölçümler olarak kayıt altına alınmaktadır. Sistemde bulunan piranometreler ile biri yatay, diğeri panel ile aynı eğimde iki farklı anlık güneş ışınımı şiddeti ölçümü yapılmaktadır. Ayrıca biri atmosfer sıcaklığı diğeri PV panel sıcaklığı olmak üzere iki adet sıcaklık ve panelin gerilim ve akım değerleri ölçülmektedir. Bu altı veri dakikalık olarak ölçülmekte ve kayıt altına alınmaktadır.

4.1 Eğimli Yüze Düşen Işınım Tahmini

Bu bölümde; izotropik ve anizotropik algoritmalar ile yatay düzlemdeki ışınım verileri kullanılarak eğik düzlemdeki ışınım verileri hesaplanmıştır. İzotropik model kullanılarak eğimli düzlemdeki ışınım şiddetini hesaplayabilmek için Denklem 3.1

kullanılmıştır. Bu denklemde bilinmeyenleri bulabilmek için Denklem 3.2 kullanılarak K_t , Denklem 3.3 kullanılarak I_0 , Denklem 3.4 ve 3.5 kullanılarak I_d ve I_b değerleri, Denklem 3.7 kullanılarak ise R_b değeri elde edilmiştir. Bu denklemleri çözümlenerek I_t değerini bulabilmek için gerekli parametreleri elde edilmiştir. K_t , I_d , I_b ve R_b değerleri hesaplanırken deklinasyon değeri Denklem 2.4 ve Denklem 2.5 kullanılarak hesaplanmış, diğer değişkenlerden olan coğrafi konum Bolu ilinin enlemi konumu gereği 40° , β panel eğim açısı 34° , G_{sc} birim sürede alınan enerji 1367 W/m^2 , n gün sayısı ise 28 Mayıs tarihinden itibaren gün sayısı olarak hesaplamalarda kullanılmıştır.

Deney düzeneğinde ölçümü yapılan değerler Bolu ili için dakikalık ışıyım verileri olarak kayıt altına alınmaktadır. Bu çalışmada amaç yatay düzlem verilerini kullanarak eğik düzleme çevrilen ışıyım verilerini eğik düzlemde ölçümü yapılan ışıyım verileri ile karşılaştırmaktır. Bu ışıyım değerlerini hesaplariken dakikalık veriler saatlik ortalama olarak hesaplanarak saatlik veriler olarak değerlendirilmiştir. Bu nedenle dakikalık değerler, saatlik ortalama değerler olarak yeniden düzenlenmiştir. Bu şekilde, 28 Mayıs 2018 tarihinden başlamak üzere 19 Mayıs 2019 tarihine kadar yaklaşık bir yıllık saatlik ortalama ışıyım şiddeti verileri elde edilmiştir.

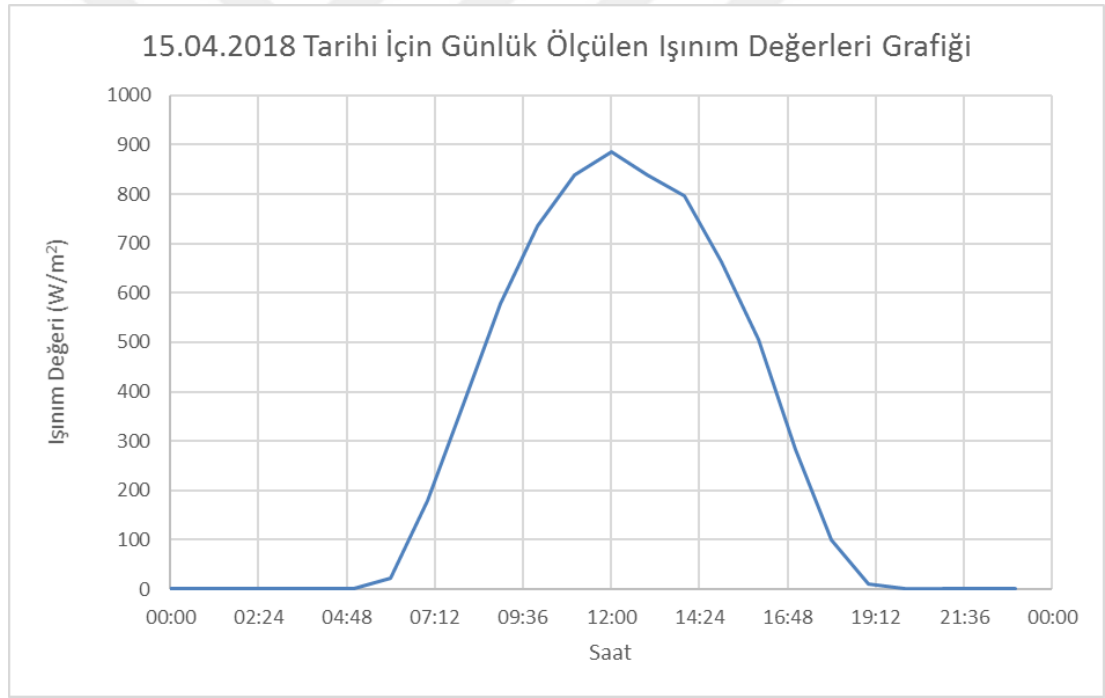
28 Mayıs 2018 tarihindeki veriler yerel saat ile saat 10.00'dan itibaren hesaplanmıştır. Ancak 10.00 yerel saat olarak değerlendirildiğinden ω_1 ve ω_2 saat açısı değerlerini hesaplariken yerel saat değerleri güneş zamanına çevrilmiştir. Denklem 2.2 ve Denklem 2.3 kullanılarak güneş saati farkı hesaplanmış ve bu değerler saat açısı değerlerine eklenmesiyle güneş saati değerleri elde edilmiştir. Sonuç olarak deneysel verilerin başlangıç saati 28 Mayıs 2018 10.49 olarak hesaba katılmıştır.

Anizotropik model için hesaplamalar yapılırken ise Denklem 3.8 kullanılmıştır. Anizotropik modelde kullanılan değişkenler izotropik model ile aynıdır. İki model arasındaki fark Denklem 3.8'in içerisinde bulunan anizotropi endeksidir. Anizotropi endeksi Denklem 3.9'da gösterildiği gibi hesaplanarak Denklem 3.8'de kullanılarak anizotropik model ile eğimli yüzeydeki ışıyım hesabı yapılmıştır. İzotropik modeldeki hesaplamalarda kullanılan diğer parametreler aynı şekilde anizotropik modelde de kullanılmıştır.

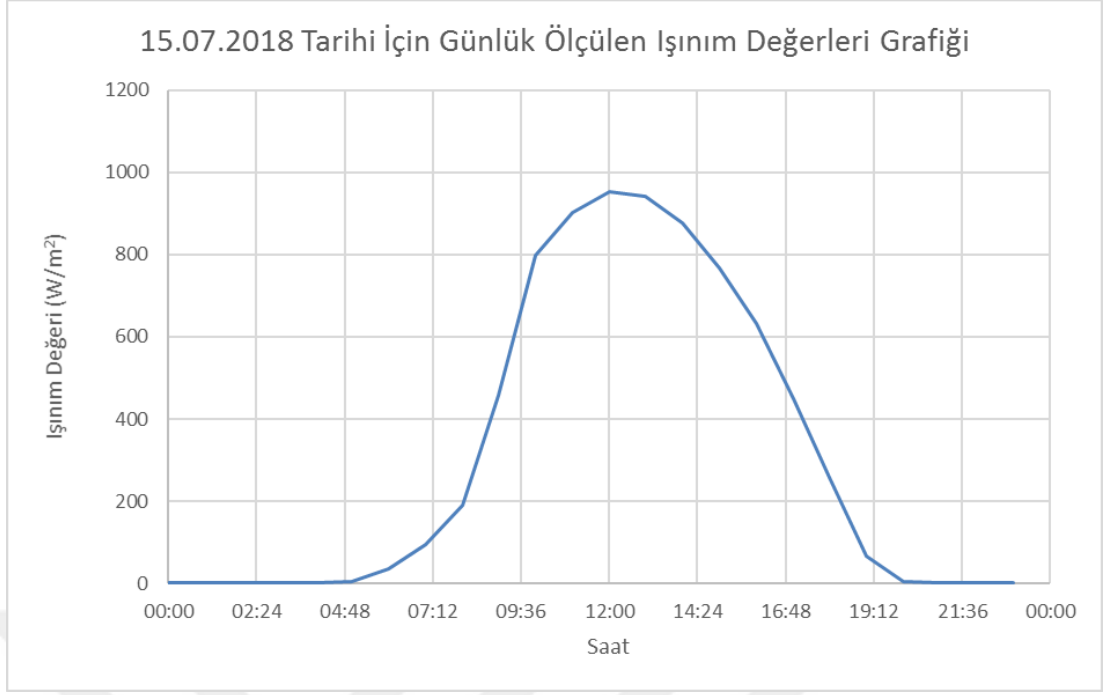
Sonuç olarak izotropik ve anizotropik model kullanılarak yaklaşık 1 yıllık süreç boyunca her saat için hesaplanmış ışıyım şiddeti değeri elde edilmiştir. Deney

düzeneğimizdeki iki ayrı piranometre ile yatay düzlemdeki ışınım şiddeti ve eğik düzlemdeki ışınım şiddeti elde edilmişti. İzotropik ve anizotropik modeller kullanılarak yatay düzlemdeki ışınım değerinden eğik düzlemdeki ışınım şiddetinin deneysel sonuçları elde edilmiştir.

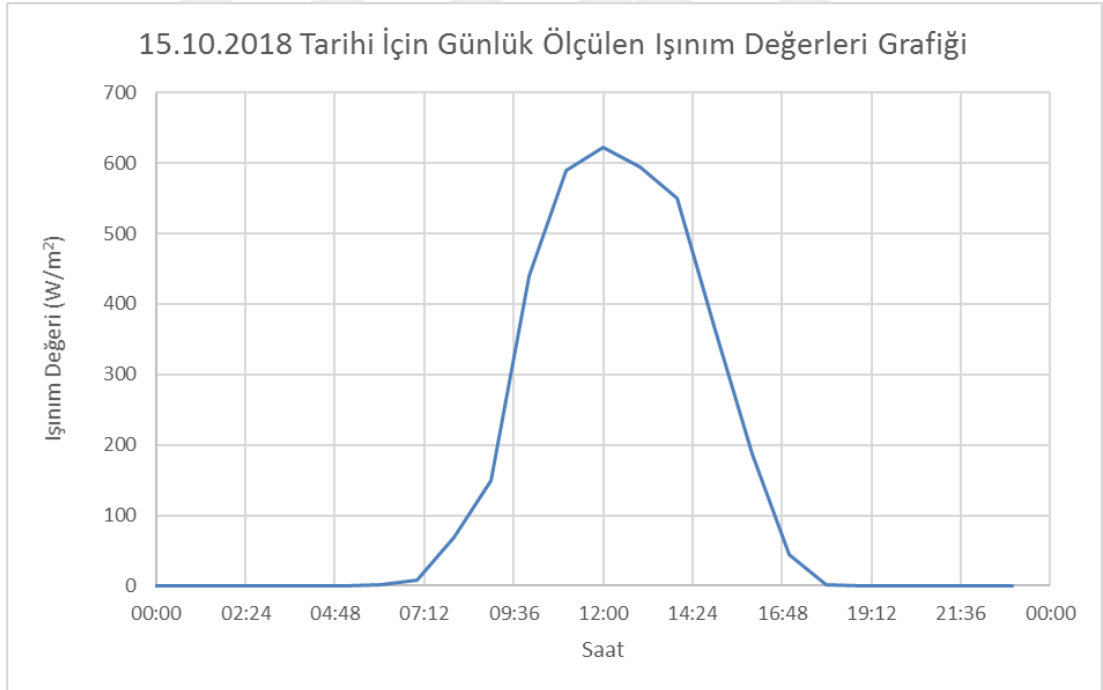
Şekil 4.5, Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de deney düzeneğimizde yaptığımız 1 yıllık ölçümler kapsamında 15 Nisan 2018, 15 Temmuz 2018, 15 Ekim 2018 ve 15 Ocak 2019 tarihleri referans alınarak günlük ışınım şiddetinin değişimi gösterilmiştir. Böylece her mevsim için seçilen günlerde ışınım şiddetleri karşılaştırılarak hangi mevsimlerde daha yüksek ışınım şiddetinin elde edilebileceğinin bulunması amaçlanmıştır.



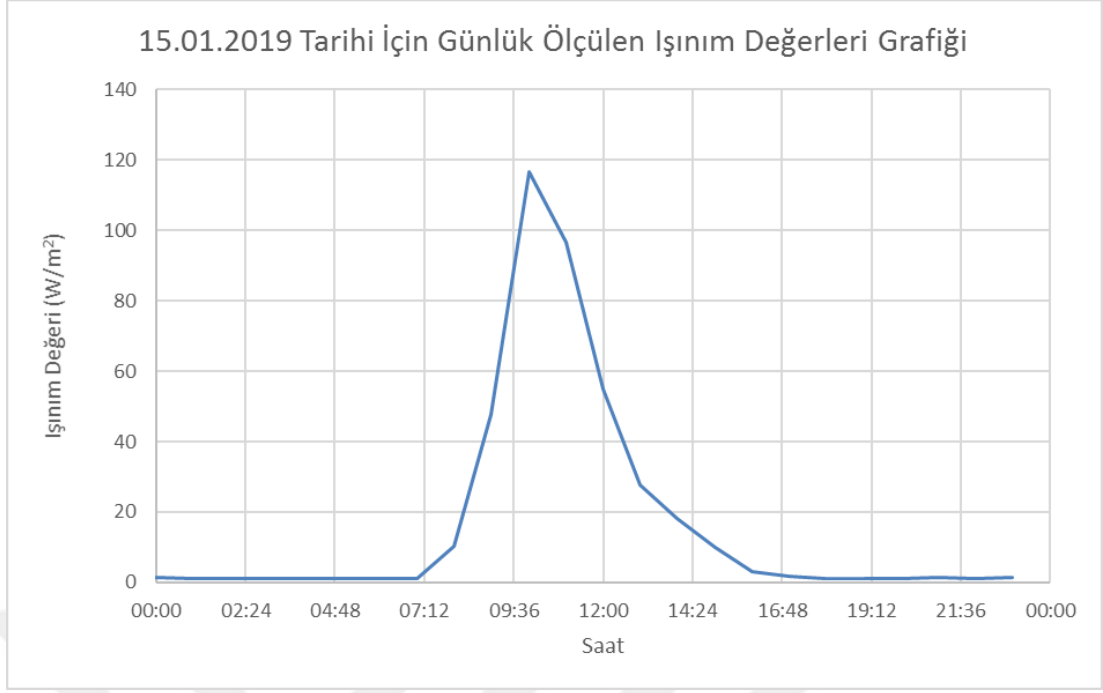
Şekil 4.5. 15 Nisan 2018 Eğik Düzlemde Ölçülen Işınım- Zaman Grafiği



Şekil 4. 6. 15 Temmuz 2018 Eğik Düzlemde Ölçülen Işınım – Zaman Grafiği



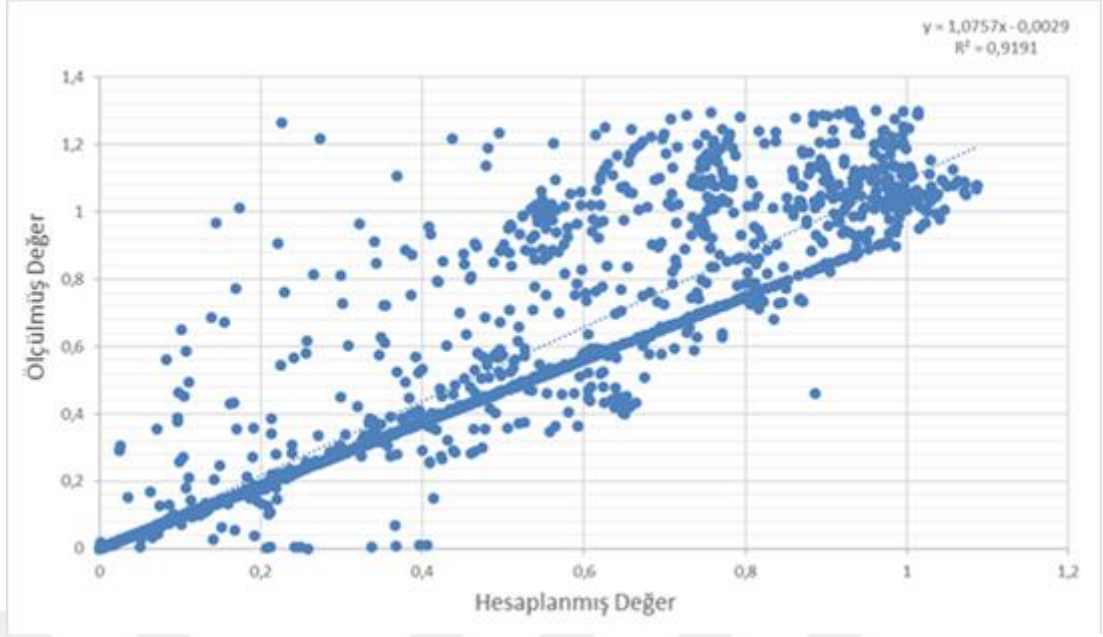
Şekil 4.7. 15 Ekim 2018 Eğik Düzlemde Ölçülen Işınım – Zaman Grafiği



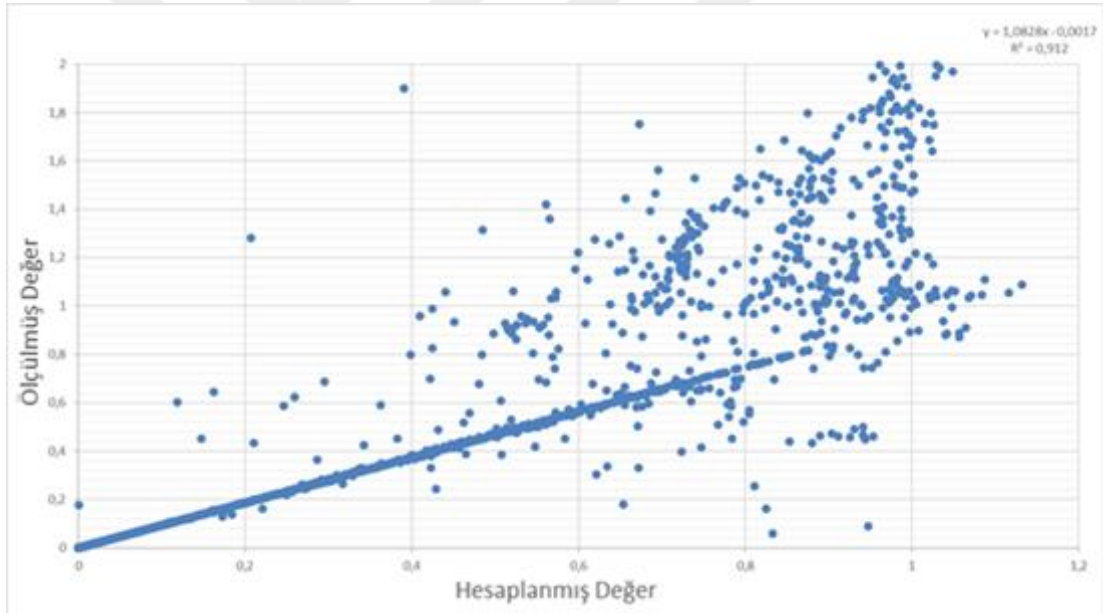
Şekil 4.8. 15 Ocak 2019 Eğik Düzlemde Ölçülen Işınım – Zaman Grafiği

Grafikler karşılaştırıldığında ışınım şiddetinin nisan ve temmuz aylarında daha yüksek değerler aldığı görülmektedir. Nisan ve temmuz aylarında 1000 W/m^2 'ye ulaşan ışınım şiddetinin ekim ayında 600 W/m^2 , ocak ayında ise daha da düşerek 100 W/m^2 civarında olduğu görülmektedir. Ayrıca Ekim ayında güneşlenme süresi ve ışınım şiddeti Ocak ayına oranla daha yüksektir bu fark grafiklerde de gözmektedir. Grafiklerde görülen bu değişimler ışınım şiddetinin mevsimsel ve o gün için söz konusu bulutluluk oranı ile olan ilişkisi olarak değerlendirilmektedir.

Deney düzeneğinden elde edilen veriler, ışınım şiddetinin yatay düzlemdeki ve eğik düzlemdeki ölçülmüş değerlerini bir yıllık süreç için dakikalık veriler olarak sunulmaktadır. Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da eğik düzlemdeki hesaplanmış saatlik ışınım değerleri ile eğik düzlemdeki ölçülmüş saatlik ışınım değerleri bir yıllık bir süreç ve iki farklı model için x-y dağılım grafiğinde gösterilmiştir.



Şekil 4.9. İzotropik Model Uygulaması

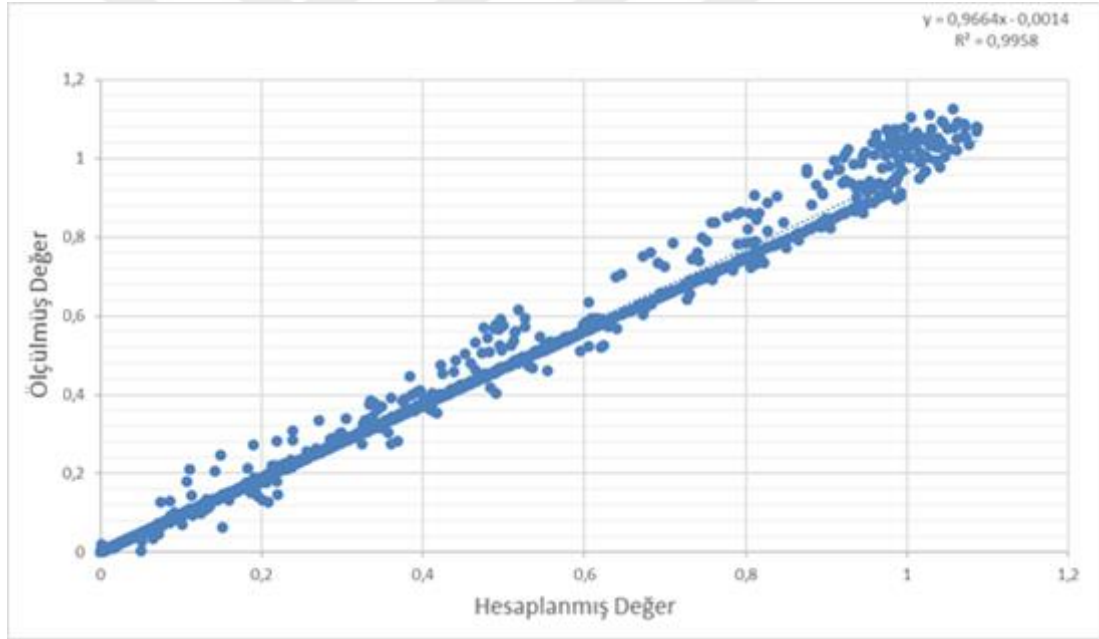


Şekil 4.10. Anizotropik Model Uygulaması

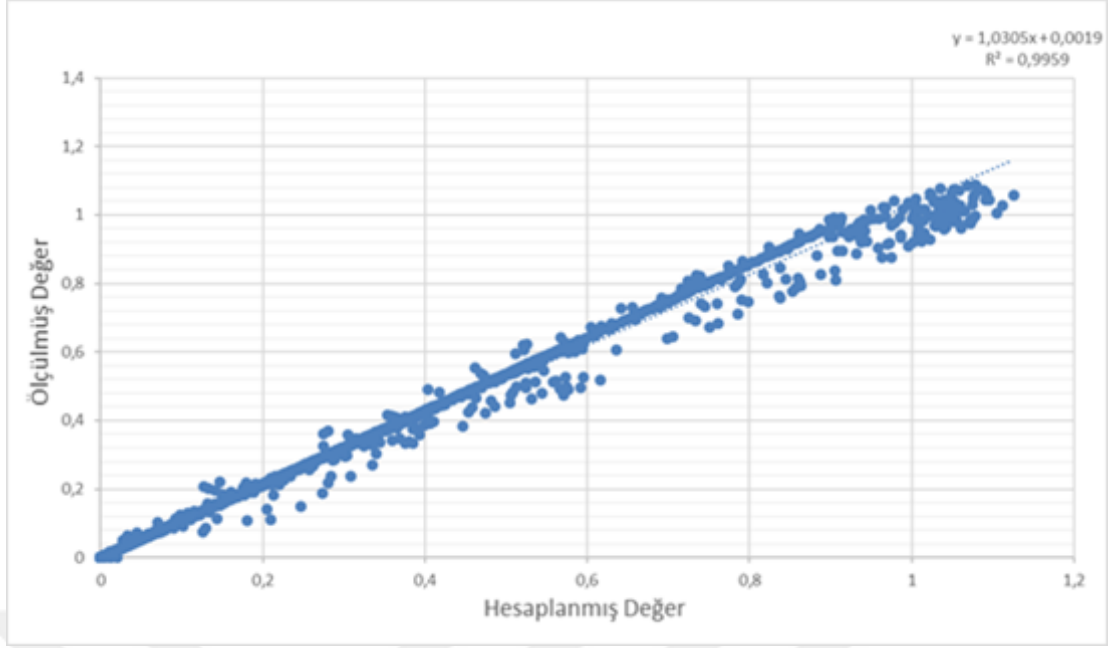
Şekil 4.9 ve Şekil 4.10 eğik düzlemde ölçülen ışınım şiddeti ile; izotropik ve anizotropik modeller kullanılarak yatay düzlemde eğik düzleme çevrilen ışınım şiddetinin karşılaştırılmalarını sunmaktadır. Modellerden elde edilen sonuçlar belirleme katsayısı kullanılarak kıyaslandığında anizotropik modelin teorik olarak daha gelişmiş bir model olmasına rağmen, izotropik modelin daha doğru sonuca yol açtığı görülmektedir. Anizotropik modelin belirleme katsayısı 0,9120 iken izotropik

modelin belirleme katsayısı 0,9191 olarak hesaplanmıştır. Belirleme katsayısı 0 ile 1 arasında değer almaktadır ve belirleme katsayısının 1'e yaklaşması modelin doğruluk derecesini artırmaktadır. Grafikler incelendiğinde ölçülen ışınım şiddeti ile hesaplanan ışınım şiddeti verilerinin bazı noktalarda örtüşmediği görülmektedir. Grafiklerde ki bu dağılım modelin doğruluğunu olumsuz yönde etkilemektedir. Güneşin doğuş ve batış zamanlarında ki güneş ışınımının panele paralel geldiği limit durumun modellerin doğruluğunu etkilediği düşünülmektedir.

Modellerin daha doğru sonuçlar vermesi için gece ışınım şiddeti değerleri ve güneşin doğuş ve batış zaman dilimlerini kapsayan ölçümler çıkartılarak model hesaplamaları iki farklı model için yapılmış ve sonuçlar Şekil 4.11'de x y dağılım grafiğinde gösterilmiştir.



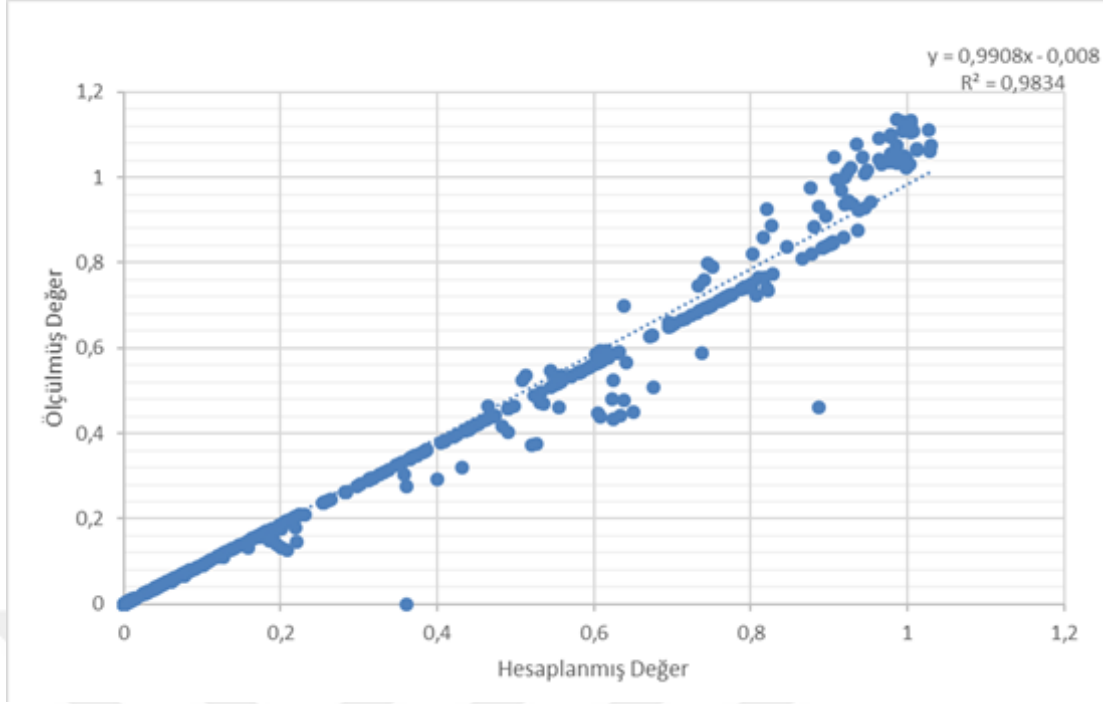
Şekil 4.11. Gece Ölçümlerinden Arındırılmış İzotropik Model Uygulaması



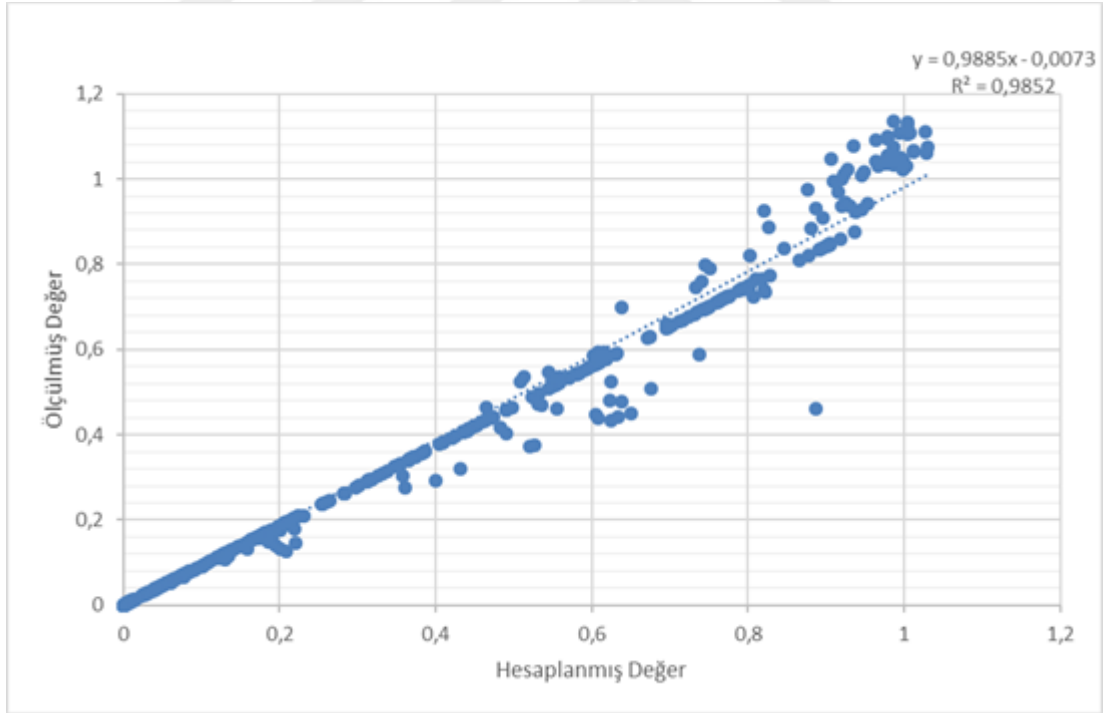
Şekil 4.12. Gece Ölçümlerinden Arındırılmış Anizotropik Model Uygulaması

Şekil 4.11 ve Şekil 4.12 incelendiğinde izotropik modelin belirleme katsayısı 0,9958 iken anizotropik modelin belirleme katsayısı 0,9959 olarak hesaplanmıştır. Anizotropik modelin ışınım şiddetinin elektrik enerjisi üretme kapasitesi olduğu aralıklarda izotropik modele göre daha doğru sonuçlar verdiği görülmektedir.

Modellerin karşılaştırmaları bir yıl referans alınarak yapıldığında anizotropik modelin izotropik modele göre daha doğru sonuca yol açtığı görülmüştür. Modellerin doğruluğunun daha fazla irdelenmesi ve sıcaklık değerinin modeller üstündeki etkisinin daha net anlaşılabilmesi için temmuz 2018 ve ocak 2019 tarihleri için modellerin bir aylık karşılaştırılması yapılmıştır.

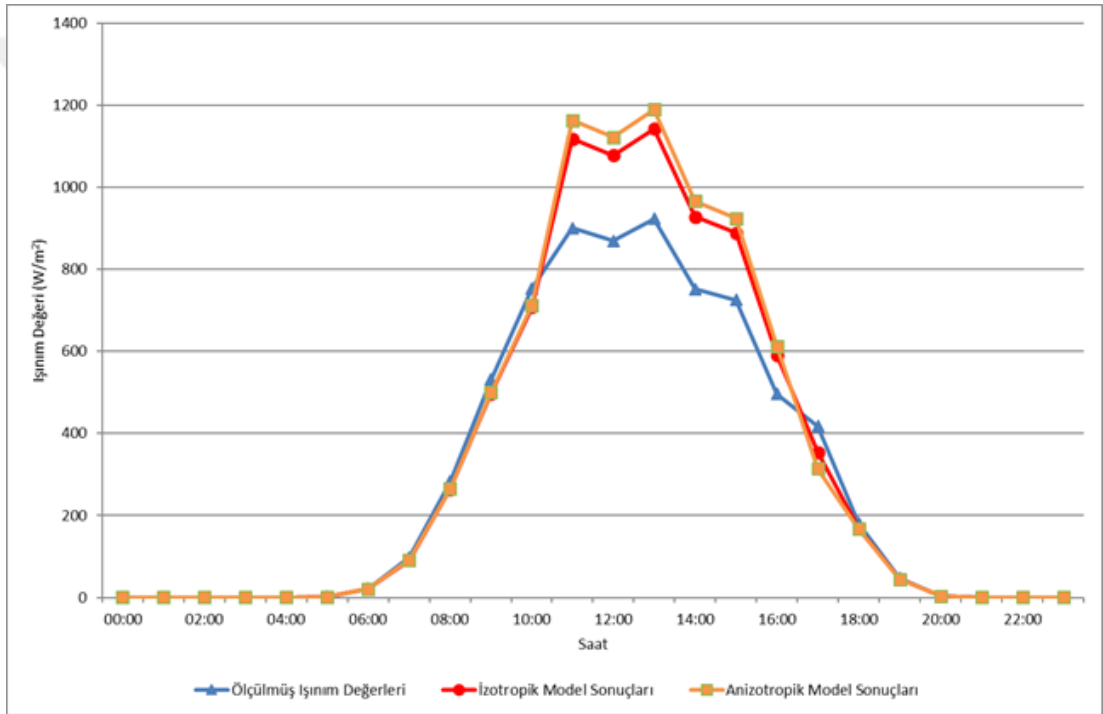


Şekil 4.13. Temmuz Ayı İzotropik Model Uygulaması



Şekil 4.14. Temmuz Ayı Anizotropik Model Uygulaması

Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te izotropik ve anizotropik modellerin 2018 yılı temmuz ayı için karşılaştırmaları gösterilmiştir. İzotropik modelin belirleme katsayısı 0,9834 iken anizotropik modelin belirleme katsayısı 0,9852 olarak hesaplanmıştır. Anizotropik modelin izotropik modele göre daha doğru sonuç verdiği görülmüştür. Modellerin yıllık ışıınım şiddeti uygulamasında belirleme katsayısı 0,9959 ve 0,9958 iken temmuz ayı belirleme katsayısının daha düşük doğruluk oranı verdiği görülmüştür. Bu nedenle Şekil 4.15'te 2018 Temmuz ayının 15. günü için Işıınım Şiddeti – Zaman grafiği oluşturulmuş ve bu grafik üzerinde izotropik model ile hesaplanmış ışıınım şiddeti, anizotropik model ile hesaplanmış ışıınım şiddeti ve eğik düzlemde ölçülmüş ışıınım şiddeti karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.15. 15 Temmuz 2018 Tarihli Işıınım Analizi

Şekil 4.15'te görüldüğü üzere ışıınım şiddetinin artmasının model hesaplamaları ile ölçülmüş değerler arasındaki korelasyonu negatif olarak etkilediği sonucu çıkarılabilir. Bunun sebebi olarak denklemlerde difüz ve direkt ışıınım değerlerinin elde edilmesinin metodolojisi düşünülebilir. Modellerin sonuçlarının ölçülmüş değerlerle olan farkının gelen ışıınımın difüz ve direkt bileşenlerinin dağılımından dolayı olduğu düşünülmektedir. Bu farkın düzlemdeki toplam ışıınım değerini difüz ve direkt bileşenlere ayırırken kullanılan berraklık endeksi ve geometrik

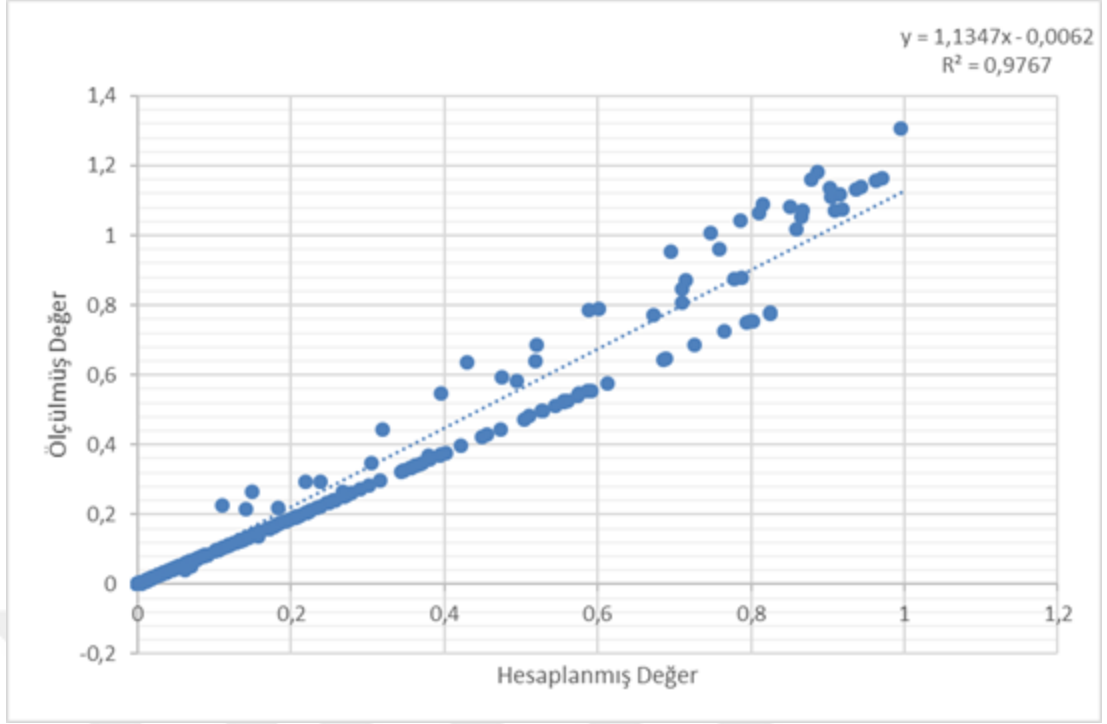
faktör bileşenlerinin toplam ışınımına olan etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Modellerin daha detaylı karşılaştırılması ve hata analiz tespitlerinin yapılabilmesi için, izotropik ve anizotropik modeller belirleme katsayısı (R^2), kök kareler karesi (Root Mean Squared Error, RMSE) ve ortalama tahmin hatası (Mean Bias Error, MBE) istatistiksel parametreleri kullanılarak karşılaştırılmış ve sonuçlar Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2. Temmuz Ayı İçin İstatistiksel Yöntemlerden Elde Edilen Sonuçlar

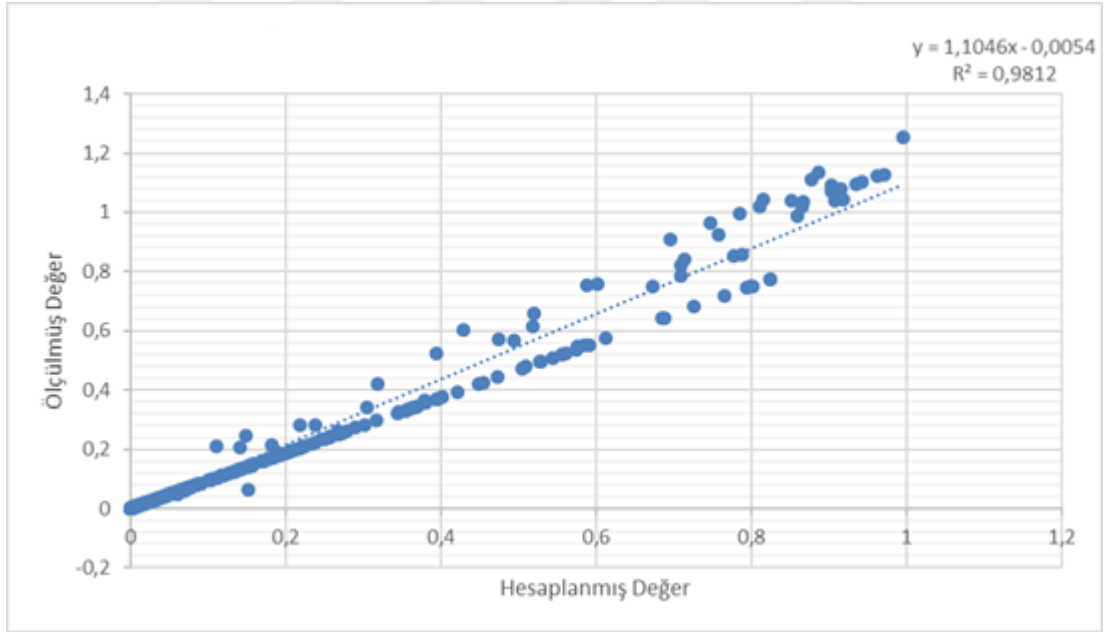
	R^2	RMSE	MBE
İzotropik Model	0,9834	0,044573	0,010389
Anizotropik Model	0,9852	0,042098	0,00987

Tablo 4.2’de Temmuz ayı için yapılan istatistiksel analiz sonuçları incelendiğinde bütün hata oranları için anizotropik modelin daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. MBE’nin 0’a yakın olması modelin doğruluğunun daha yüksek olduğunu göstermektedir. Eksi değer alması model tahminlerinin ölçülen değerden düşük olduğunu, artı değer alması ise model tahminlerinin ölçülen değerden daha yüksek sonuç verdiğini göstermektedir. Temmuz ayı model sonuçlarına bakıldığında her iki model için de MSE değerinin pozitif çıktığı görülmektedir. Bu sonuç Şekil 4.15’te ki ışınım analizi ile uyusmaktadır.

Işınım değerlerinin daha düşük olduğu bir ay olan ocak ayı için hesaplanmış olan model karşılaştırmaları Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de gösterilmiştir.



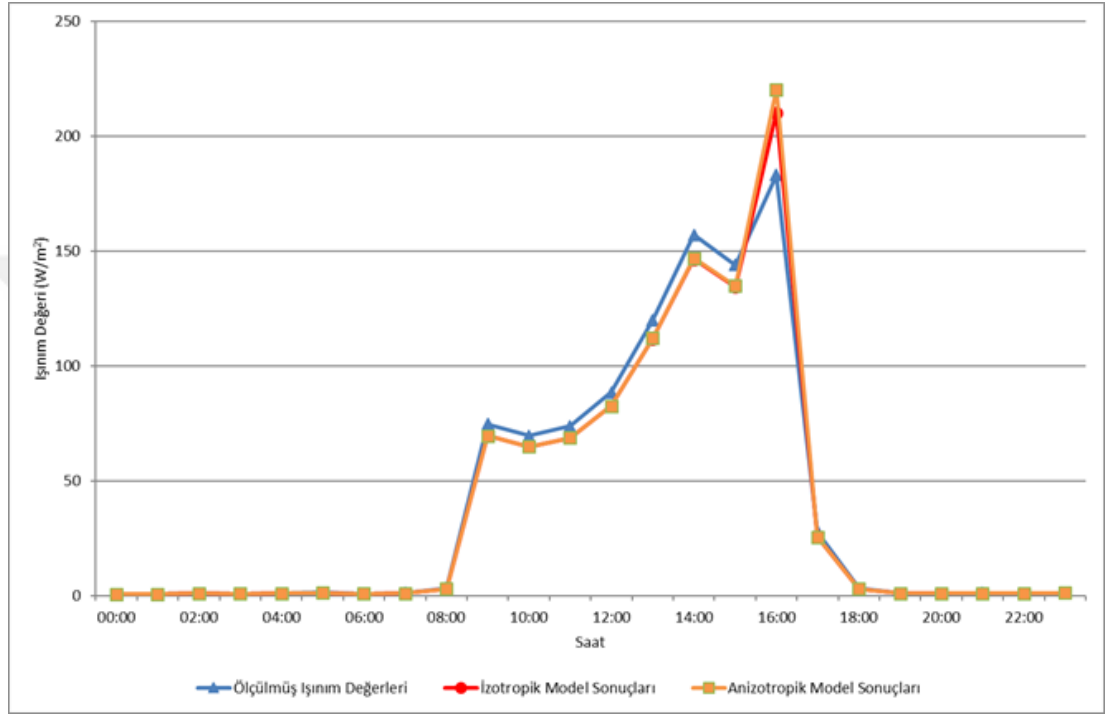
Şekil 4.16. Ocak Ayı İzotropik Model Uygulaması



Şekil 4.17. Ocak Ayı Anizotropik Model Uygulaması

İzotropik ve anizotropik modellerin 2019 yılı ocak ayı için karşılaştırmaları incelendiğinde anizotropik modelin belirleme katsayısının 0,9812, izotropik modelin belirleme katsayısının ise 0,9762 olduğu görülmektedir. Bu veri seti için de yine

anizotropik modelin izotropik modele göre daha yüksek bir doğruluk oranı ile sonuç ürettiği görülmüştür. Bu ay için, belirleme katsayısının hem yıllık değerden hem de temmuz ayı değerinden daha düşük çıktığı görülmüştür. Bu düşüşün nedeninin irdelenmesi amacıyla 2019 Ocak ayının 15. günü için Işınım Şiddeti – Zaman grafiği çizilmiş ve bu grafik üzerinde izotropik ve anizotropik modeller ile hesaplanmış ışınım şiddetleri ile ölçülmüş ışınım şiddetleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.18. 15 Ocak 2019 Tarihli Işınım Analizi

Ocak ayı Işınım Şiddeti – Zaman grafiği göz önüne alındığında ışınım şiddetinin artmasının korelasyonu negatif etkilediği belirlenmişti. Ocak ayı Işınım Şiddeti – Zaman grafiğinde ise ışınım şiddeti düşük değerlerde seyrettiğinde ölçülmüş ışınım değerleri ile modellerin sonuçları arasındaki korelasyonun yüksek olduğu görülmektedir. Ocak ayı belirleme katsayısının yıllık belirleme katsayısının altında olmasının nedeni ise; ışınım şiddetinin göreceli olarak düşük olması ve daha önce yapılan benzer tespitte paralel olarak toplam ışınımın difüz ve direkt bileşenlerine ayrılması noktasında berraklık endeksi ve geometri faktörüne olan bağlılık olarak değerlendirilebilir. Mevcut çalışmada incelenen izotropik ve anizotropik modellerin daha detaylı analizi için, söz konusu modeller R^2 , RMSE ve MBE istatistiksel parametreleri yardımıyla karşılaştırılmış ve sonuçlar Tablo 4.3’de verilmiştir.

Tablo 4.3. Ocak Ayı İçin İstatistiksel Yöntemlerden Elde Edilen Sonuçlar

	R²	RMSE	MBE
İzotropik Model Uygulaması	0,9767	0,045791	-0,00671
Anizotropik Model Uygulaması	0,9812	0,03824	-0,00670

Tablo 4.3'te Ocak ayı için yapılan istatistiksel hata analiz sonuçları incelendiğinde bütün hata oranları için anizotropik modelin daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Ayrıca MSE'nin 0'dan küçük olduğu ve dolayısıyla da bu modelden elde edilen tahminlerin ölçülen değerlerden küçük olduğu görülmektedir. Bu sonuç Şekil 4.18'de yapılan ışınım analizi ile uyushmaktadır.

Sonuç olarak; izotropik ve anizotropik modeller karşılaştırıldığında; anizotropik modelin, belirleme katsayısı, kök kareler karesi ve ortalama tahmin hatası istatistiksel parametreleri dikkate alındığında daha doğru sonuçlar verdiği tespit edilmektedir. Yıllık veri seti referans alındığında ise öngörülmedik bir şekilde izotropik modelden daha doğru sonuçların elde edildiği görülmüştür. Bunun üzerine aylık olarak ışınım şiddetinin arttığı zaman dilimleri belirlenmiş ve güneşin doğuş ve batış zamanındaki ışınım değerleri ihmal edilerek model hesaplamaları yeniden yapılmıştır. Bu geliştirilmiş veriler ile yapılan model tahminlerinde anizotropik modelin izotropik modele göre daha doğru sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

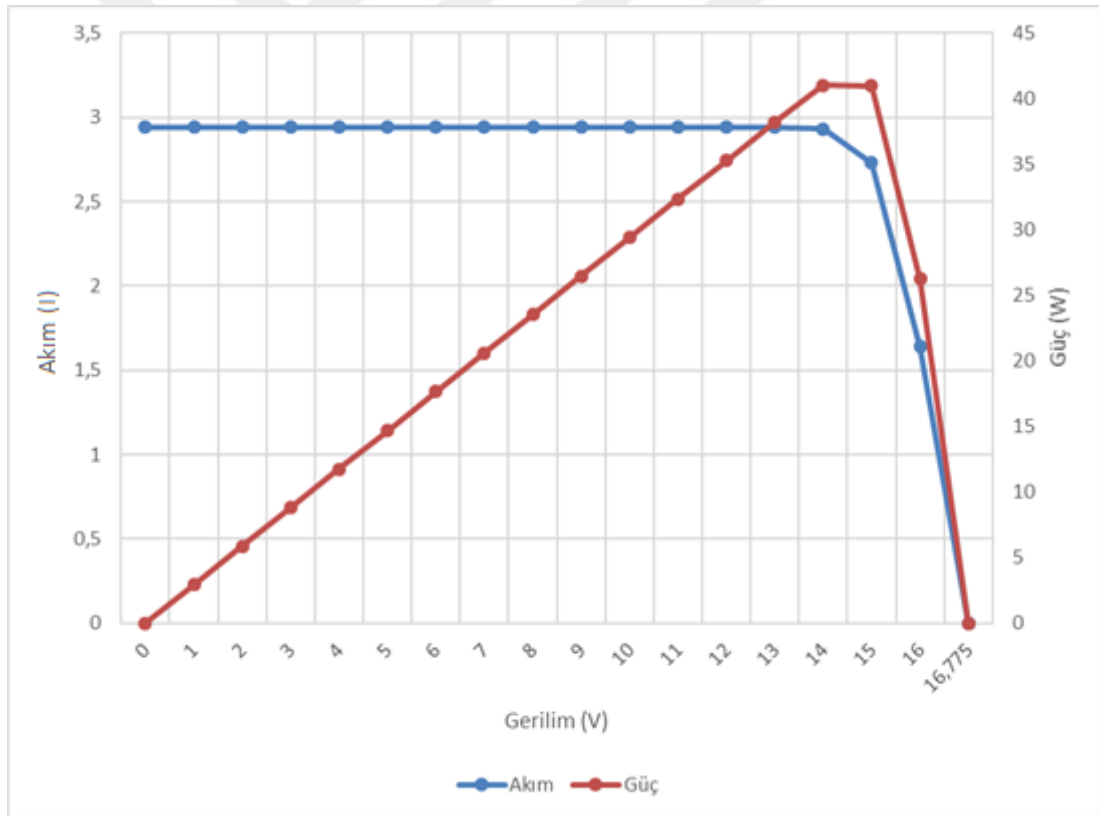
4.2 4-Parametrelili Model ile Fotovoltaik Sistemlerin Modellenmesi

Bu bölümde 4-parametrelili model kullanılarak deney düzeneğinden ölçülen değerlerden 4 farklı mevsim için akım-voltaj grafiği çizilmiş ve güç değerleri hesaplanarak hangi mevsimde fotovoltaik panelin daha yüksek güç değeri elde ettiğinin analizi yapılmıştır.

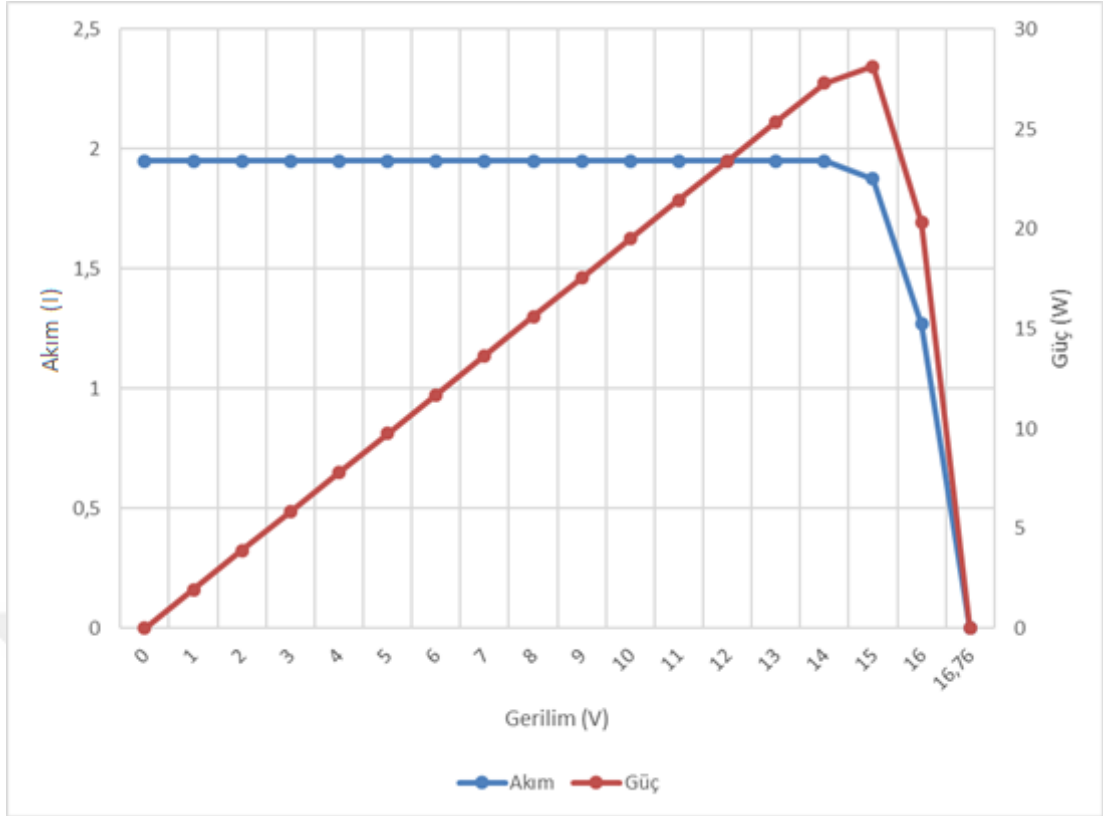
Bu analiz için 28.04.2018, 28.07.2018, 28.10.2018 ve 28.01.2019 tarihlerinde aynı saat aralığında ölçülmüş değerler göz önüne alınmıştır. Ardından Denklem 3.13 çözümlenerek her voltaj değerine karşılık gelen akım değeri hesaplanmıştır.

Denklem 3.13'ü çözümlmek için gerekli olan I_L , I_0 , R_s ve α değerleri Denklem 3.16, Denklem 3.17, Denklem 3.18 ve Denklem 3.19 kullanılarak hesaplanmıştır. Denklem 3.20, Denklem 3.21, Denklem 3.22 ve Denklem 3.23 kullanılarak referans değerler hesaplanmıştır. Ayrıca denklemlerin çözülebilmesi için gerekli olan sabit değerler Bölüm 3.4'te açıklandığı gibi kullanılan panelin katalog verilerinden alınmıştır.

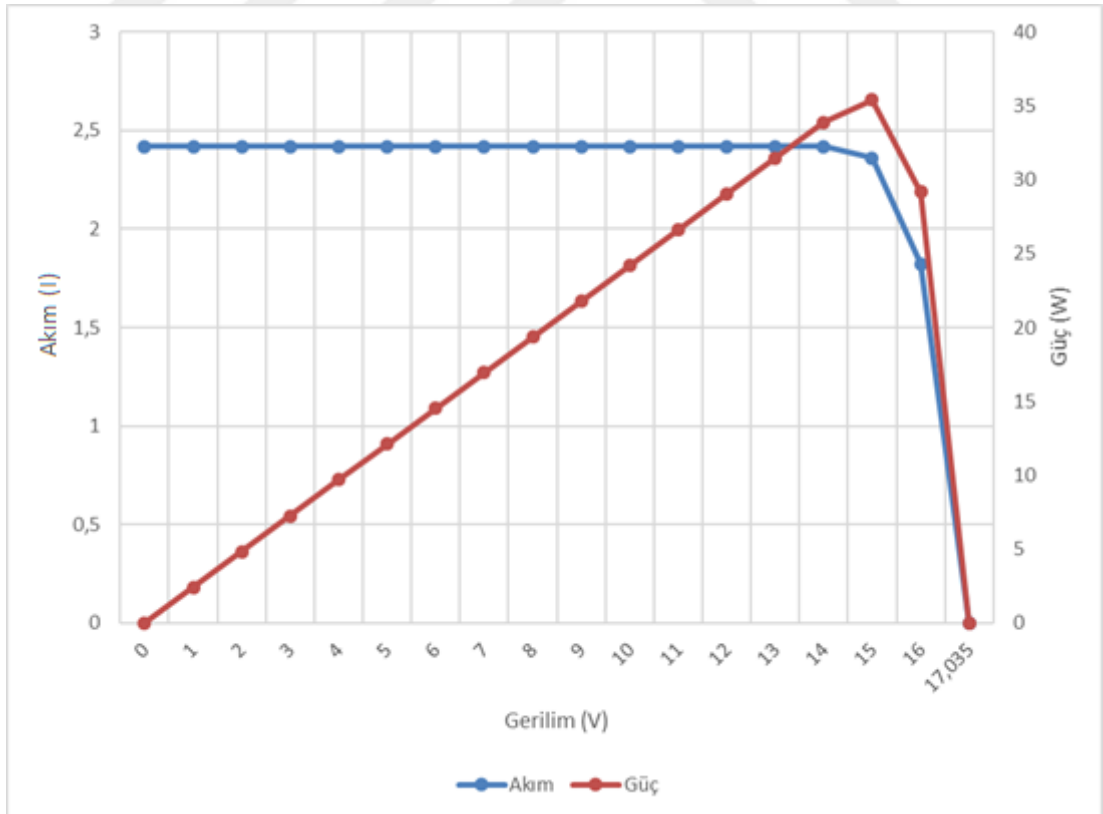
Bu sonuçlar denklem 3.13'te yerine konularak I-V grafiğinin çizilebilmesi için gerekli olan her voltaj değerine karşılık gelen akım değerleri bulunmuştur. Yapılan hesaplamalar ocak, nisan, temmuz ve ekim aylarından belli bir gün ve o günlerde yerel saate göre saat 10.00 referans kullanılarak yapılmıştır. Denklem 3.14 kullanılarak güç değeri bulunmuş ve maksimum güç noktası belirlenmiştir. Tüm bu değerler aşağıdaki grafiklerde gösterilmiştir.



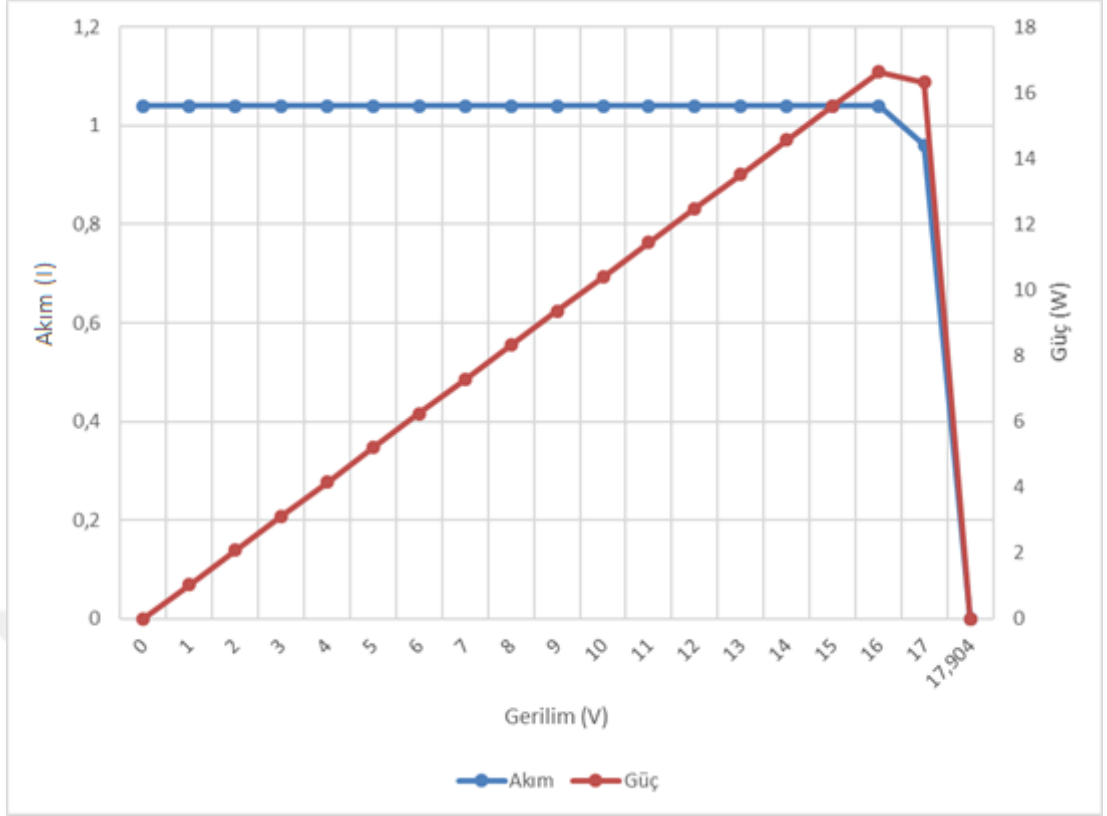
Şekil 4.19. 28.04.2018 Tarihli İlkbahar Mevsimi için I-V ve P-V Grafiği



Şekil 4.20. 28.07.2018 Tarihli Yaz Mevsimi için I-V ve P-V Grafiği



Şekil 4.21. 28.10.2018 Tarihli Sonbahar Mevsimi için I-V ve P-V Grafiği



Şekil 4.22. 28.01.2019 Tarihli Kış Mevsimi için I-V ve P-V Grafiği

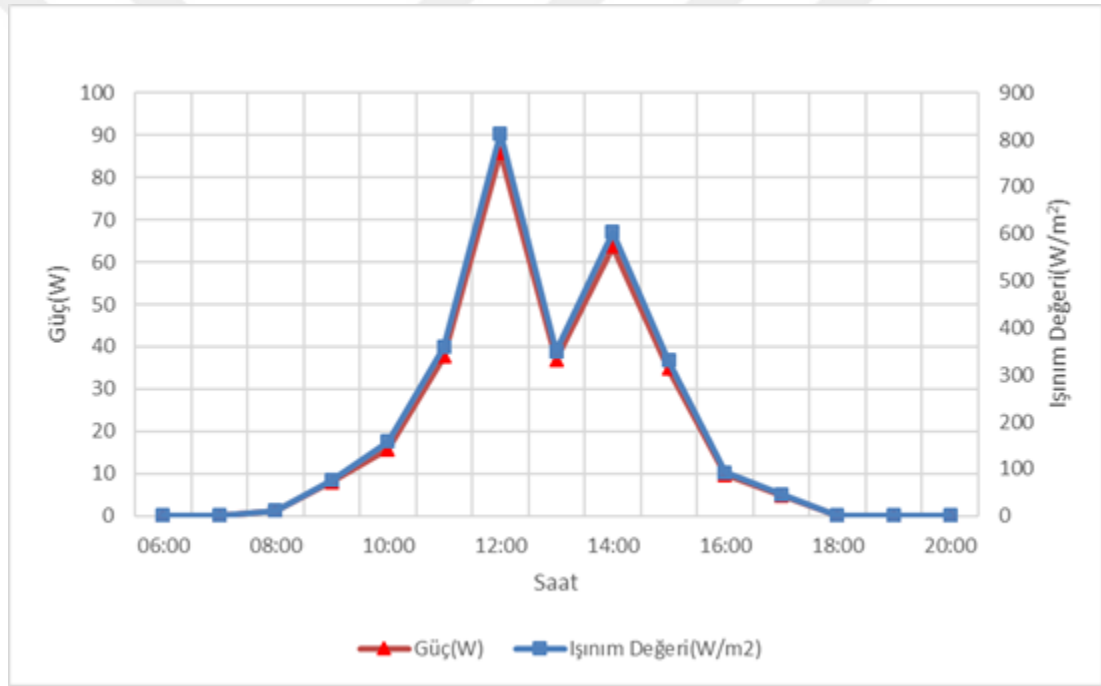
Nisan 2018, Temmuz 2018, Ekim 2018 ve Ocak 2019 tarihleri için çizilen P-V ve I-V grafikleri Şekil 4.19, Şekil 4.20, Şekil 4.21 ve Şekil 4.22'de gösterilmiştir. Güç değerlerinin maksimum olduğu noktalar, ışınım ve sıcaklık değerleri Tablo 4.2.'de gösterilmiştir.

Tablo 4.4. I-V ve P-V Grafiklerine Göre Maksimum Güç Değerleri

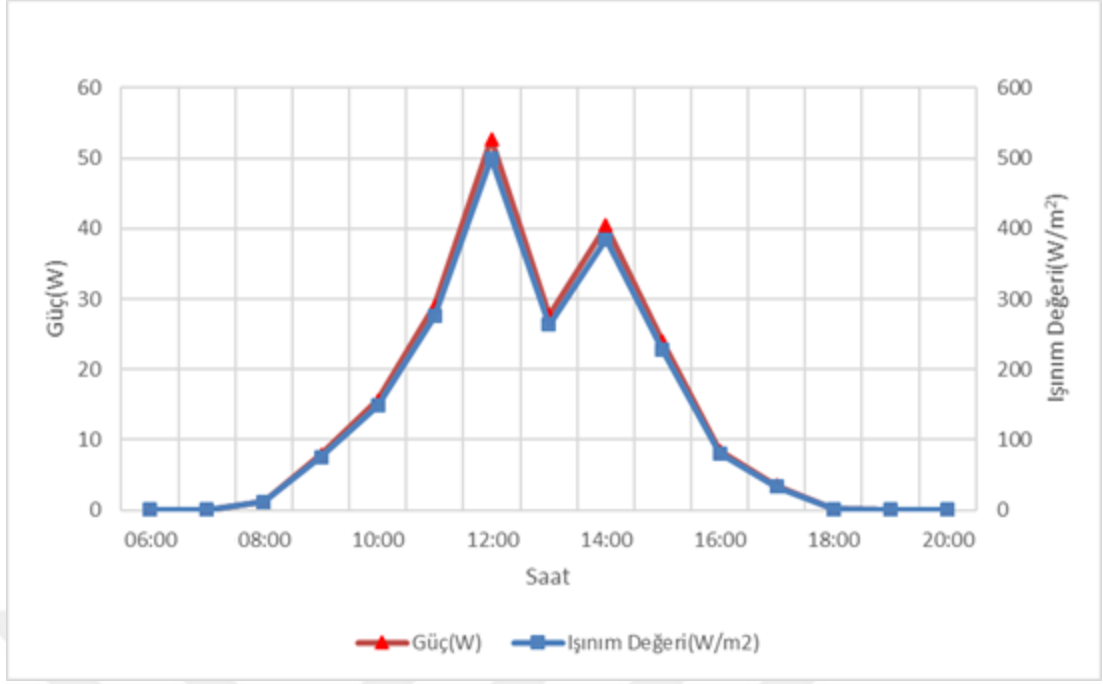
	G (W/m²)	T_{cell} (K)	P_m (W)
28.04.2018	334	327,5	41,02
28.07.2018	221	323,7	28,125
28.10.2018	275	318,6	35,4
28.01.2019	119	295	16,64

Tabloda görüldüğü üzere en yüksek güç değeri 28.04.2018 ve 28.10.2018 tarihlerinde elde edilmiştir. Işınım şiddeti verileri karşılaştırıldığında yüksek ışınım değeri olan günlerde daha yüksek güç değeri elde edildiği görülmektedir.

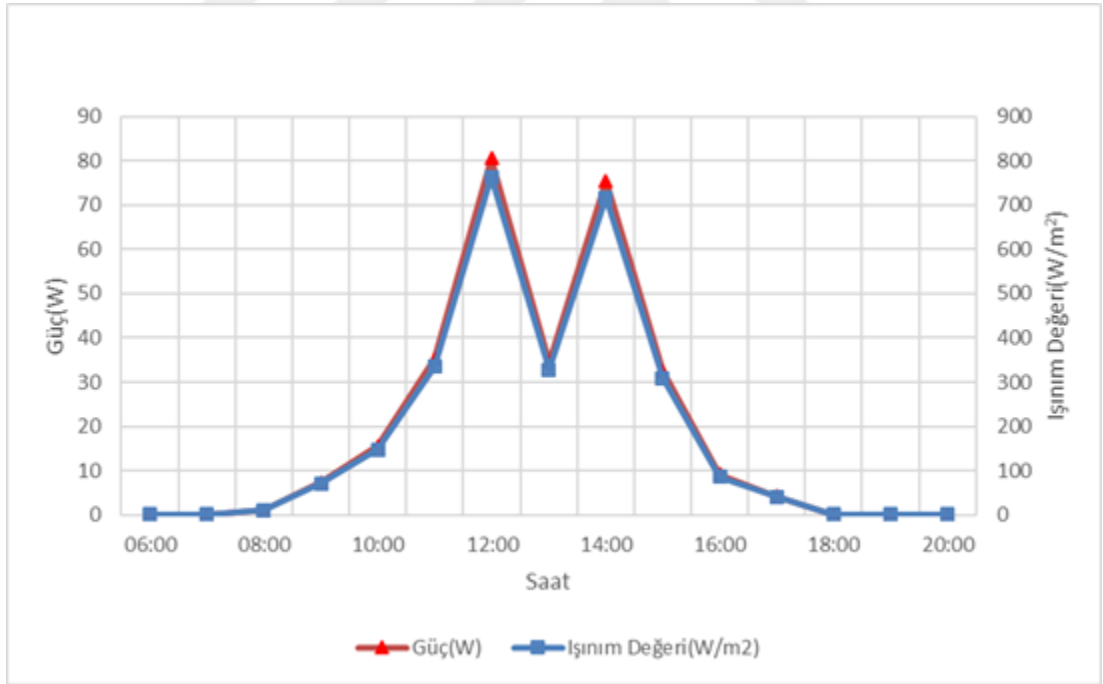
Güç ile ışınım şiddeti ilişkisini daha detaylı inceleyebilmek için ışınım şiddeti ve güç değerlerinin en yüksek ve en düşük olduğu günler olan 28.04.2018 ve 28.01.2019 tarihleri için günlük ışınım şiddeti ve güç grafikleri çizilmiştir. Günlük ışınım şiddeti ve güç grafikleri yatay düzlemdeki ışınım şiddeti, eğik düzlemdeki ışınım şiddeti ve anizotropik model ile hesaplanmış eğik düzlemdeki ışınım şiddeti olmak üzere üç farklı durum için hesaplanmıştır.



Şekil 4.23. Yatay Düzlemdeki Güç ve Işınım Şiddeti Grafiği (28.01.2019)



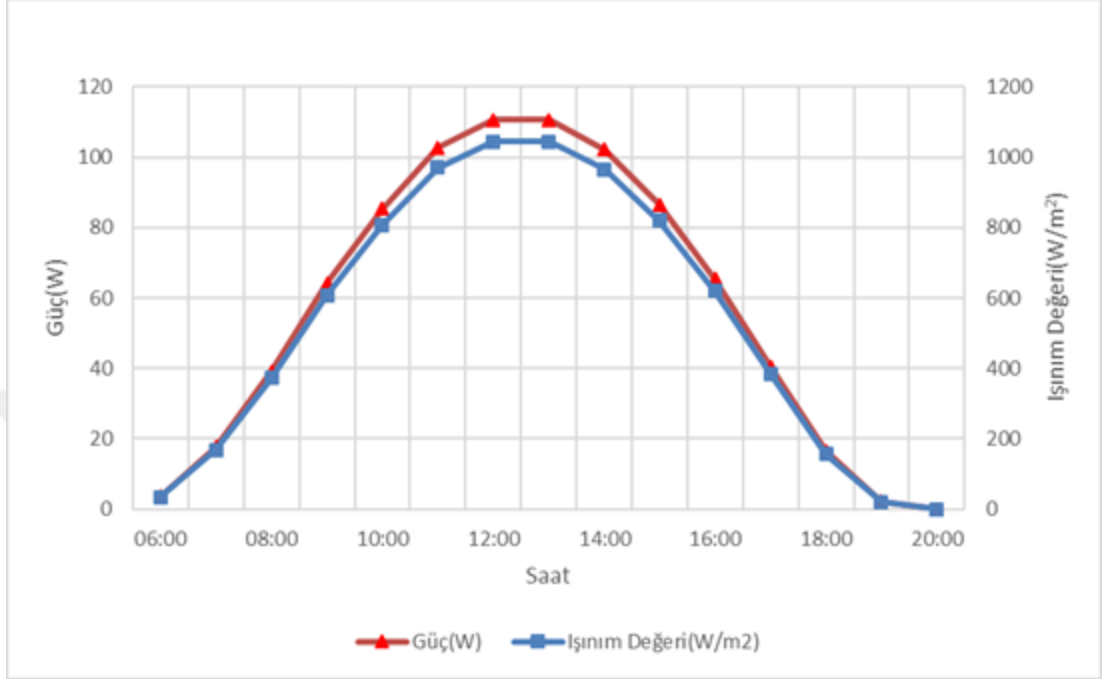
Şekil 4.24. Eğik Düzlemdeki Güç ve Işınım Şiddeti Grafiği (28.01.2019)



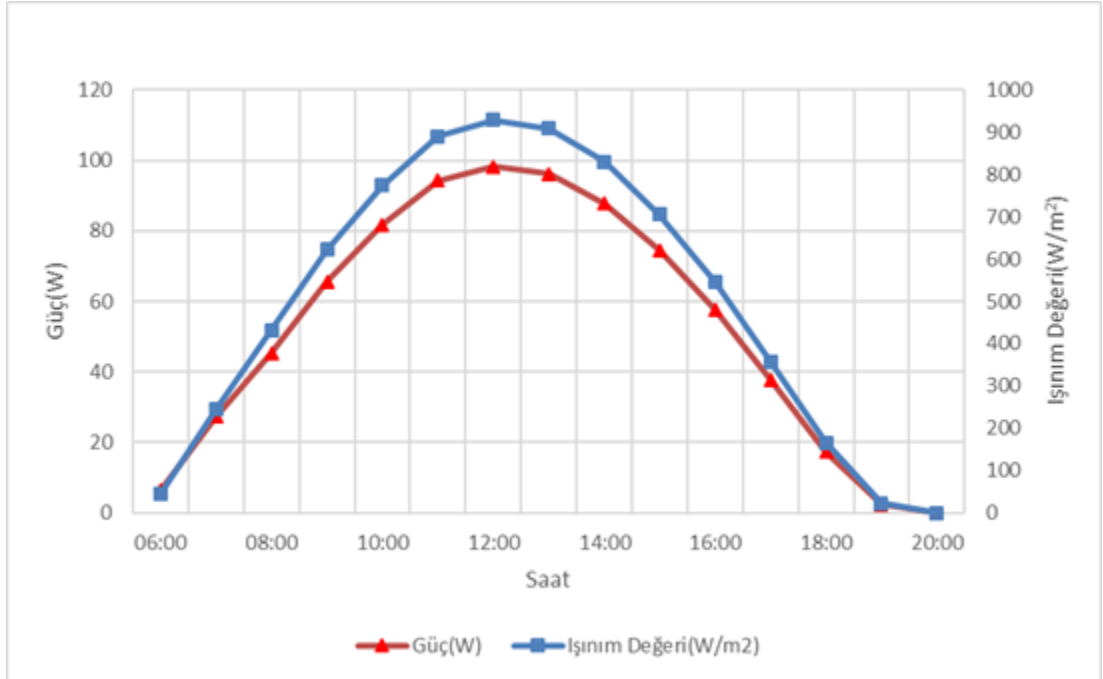
Şekil 4.25. Anizotropik Model Sonuçlarına Göre Hesaplanmış Güç ve Işınım Şiddeti Grafiği (28.01.2019)

Şekil 4.23, Şekil 4.24 ve Şekil 4.25'te 28 Ocak 2019 günü için saatlik olarak güç ve ışı nım şiddeti grafikleri karşılaştırılmıştır. Işınım şiddeti ve güç değerleri arasındaki korelasyon hem yatay düzlem hem eğik düzlem hem de anizotropik model

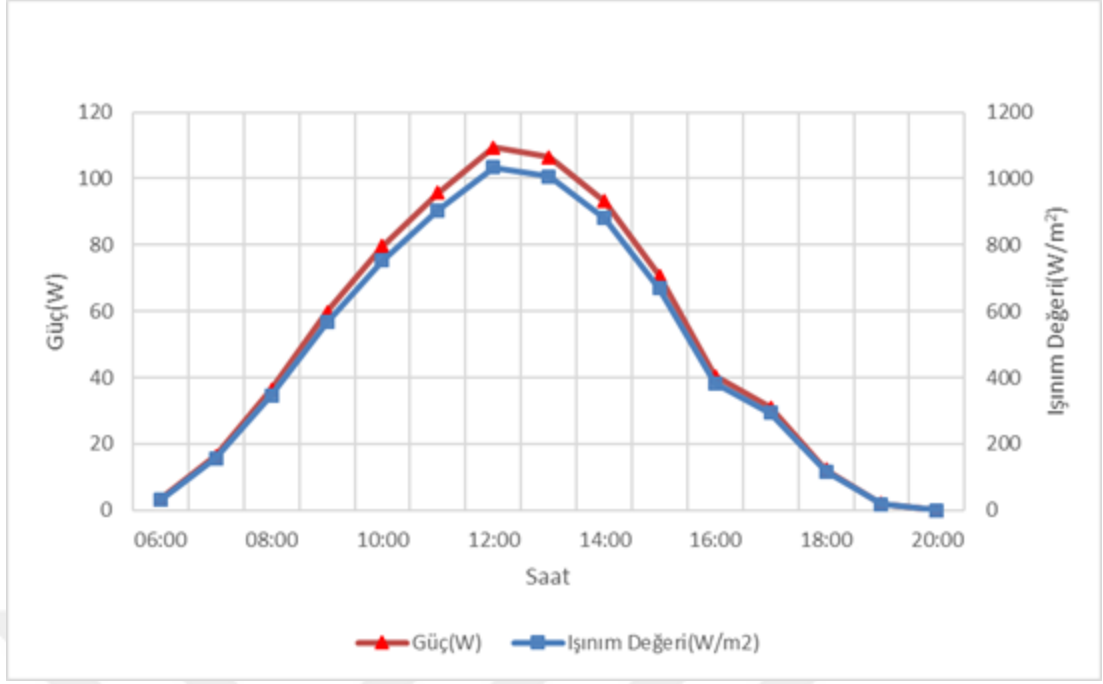
için çizilen grafiklerde görülmektedir. Işınım şiddeti arttıkça fotovoltaik panelden elde edilen güç değerinin arttığı görülmektedir.



Şekil 4.26. Yatay Düzlemdeki Güç ve Işınım Şiddeti Grafiği (28.04.2018)



Şekil 4.27. Eğik Düzlemdeki Güç ve Işınım Şiddeti Grafiği (28.04.2018)



Şekil 4.28. Anizotropik Model Sonuçlarına Göre Hesaplanmış Güç ve Işınım Şiddeti Grafiği (28.04.2018)

Şekil 4.26, Şekil 4.27 ve Şekil 4.28’de 28 Ocak 2019 günü için saatlik olarak güç ve ışınım şiddeti grafikleri karşılaştırılmıştır. Yatay düzlemde ölçülen ışınım şiddetine göre hesaplanan güç değeri ve anizotropik model tahminine göre hesaplanan güç değeri ile ışınım şiddetleri arasındaki korelasyonların daha yüksek olduğu, eğik düzlemde ölçülen ışınım şiddetine göre hesaplanan güç değeri ile ışınım şiddeti korelasyonunun ise düşük olduğu görülmektedir.

Yüksek ışınım değeri olan zaman aralıklarında yatay düzlemde bulunan fotovoltaik panelin, eğimli düzlemde olan fotovoltaik panele göre daha fazla güç üretebileceği görülmüştür. Işınım şiddetinin düşük olduğu zaman aralıklarında ise yatay düzlemde fotovoltaik panelden üretilen güç ile eğik düzlemde fotovoltaik panelden üretilen gücün aynı ışınım şiddeti miktarı oranınca değiştiği görülmüştür. Fotovoltaik panelin konumunun düşük ışınım şiddeti olan günlerde elde edilecek güce etkisinin daha az olduğu, ışınım şiddeti arttıkça panelin konumunun öneminin arttığı görülmüştür.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, bir yıllık süreç boyunca fotovoltaik sistem deney düzeneğinde; yatay düzlemdeki ışınım şiddeti, atmosfer sıcaklığı, fotovoltaik panel sıcaklığı, akım ve gerilim olmak üzere 6 parametrenin ölçümleri yapılmış ve dakikalık veriler olarak veri kayıt cihazı (data logger) aracılığıyla kayıt altına alınmıştır. Bu veriler doğrultusunda, literatürde mevcut olan izotropik ve anizotropik modeller kullanılarak eğimli bir yüzeydeki saatlik ışınım şiddetinin tahmininin yapılması amaçlanmıştır. Toplam bir yıllık süreç için yapılan model uygulamaları için hangi modelin daha doğru sonuçlar üreteceği çalışmanın temel araştırma sorusu olarak belirlenmiştir. İzotropik ve anizotropik modellerden elde edilen sonuçlar bir yıllık süreç ve farklı iki ay için üç farklı istatistiksel yöntem ile karşılaştırılmış ve sonuçlar Tablo 4.4'te gösterilmiştir.

Tablo 4. 5. İstatistiksel Yöntemlerden Elde Edilen Sonuçlar

	R²	RMSE	MBE
Yıllık İzotropik Model	0,9958	0,086408	0,026529
Yıllık Anizotropik Model	0,9959	0,016751	0,007361
Temmuz Ayı İzotropik Model	0,9834	0,044573	0,021992
Temmuz Ayı Anizotropik Model	0,9852	0,042098	0,021304
Ocak Ayı İzotropik Model	0,9767	0,045791	0,013663
Ocak Ayı Anizotropik Model	0,9812	0,03824	0,012099

Modelleri karşılaştırmak için öncelikle elimizde bulunan dakikalık 1 yıllık ölçülmüş verilerden saatlik ortalama veriler elde edilmiştir. Yatay düzlemde ölçülen saatlik ortalama ışınım şiddeti referans alınarak izotropik model ve anizotropik model için eğik düzleme düşen ışınım tahmini gerçekleştirilmiştir. Bu yolla elde edilen eğik düzleme düşen güneş ışınımı şiddeti ile eğik düzlemde ölçülen güneş ışınımı şiddeti izotropik ve anizotropik modeller kullanılarak karşılaştırılmıştır. Model tahmini karşılaştırmaları belirleme katsayısı (R^2), kök kareler karesi (Root Mean Squared Error, RMSE) ve ortalama tahmin hatası (Mean Bias Error, MBE) istatistiksel

parametreler kullanılarak yapılmıştır. Buna göre; izotropik model için belirleme katsayısı 0,9191, anizotropik model için belirleme katsayısı 0,912 olarak elde edilmiştir. Ancak birinci aşamada ışınım tahminleri yapılırken güneş doğuş ve batışındaki limit değerler çıkarılmadan güneş doğuş ve batışındaki limit değerlerde dahil olmak üzere analizler gerçekleştirilmiş ve bu nedenle de hata payları göreceli olarak yüksek bulunmuştur. Ancak, ışınım değerlerinin çok düşük olduğu ve enerji üretimine olan katkının çok sınırlı olduğu veriler üzerinden gerçekleştirilen analizin geçerliliği sorgulanarak güneş doğuş ve batışındaki limit değerlerin elimine edilebileceği değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda, güneşin doğuş ve batışındaki limit değerler hesaba katılmadan model tahminleri yeniden yapılmıştır. Bu durum için yapılan karşılaştırmalarda izotropik modelin belirleme katsayısı 0,9958, anizotropik modelin belirleme katsayısı ise 0,9959 olarak bulunmuştur. Bu şekilde, anizotropik modelin izotropik modele göre daha doğru sonuçlar ürettiği görülmüştür.

Ayrıca, izotropik ve anizotropik modeller ile temmuz ve ocak ayları için aylık ve günlük ışınım hesaplamaları yapılmış ve karşılaştırılmıştır. Şekil 4.15 ve Şekil 4.17 incelendiğinde; ışınım şiddetinin düşük olduğu noktalarda hem izotropik modelin hem de anizotropik modelin yüksek doğruluk oranı ile sonuçlar verdiği görülmektedir. Işınım şiddeti arttıkça modellerin doğruluğu azalmaktadır. Modellerin yüksek ışınım şiddetinde doğruluğunun azalmasının, güneş ışınımının difüz ve direkt bileşenlerinin dağılımındaki farkın modeller ile yeterince doğru bir şekilde korele edilemediği savıyla açıklanabileceği değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada ayrıca 4-parametrelilik model kullanılarak 28.04.2018, 28.07.2018, 28.10.2018 ve 28.01.2019 tarihleri için P-V ve I-V grafikleri çizilmiş ve bu tarihlerdeki maksimum güç noktaları tespit edilmiştir. Yapılan bu çalışma sonucunda Tablo 4.4'te gösterildiği üzere; ışınım şiddetinin fotovoltaik panelden elde edilebilecek güç üzerindeki etkisi eğimli/eğimsiz yüzeyler üzerine gelen ışınımın farklı olması ve gücün eğimli yüzey üzerine gelen tahmin edilen ışınım ile hesaplanması bağlamında incelenmiştir.

Bu tez çalışmasında söz konusu veri seti için aşağıdaki ana sonuçlara ulaşılmıştır;

1. Anizotropik model izotropik modelle kıyaslandığında R^2 , RMSE ve MBE metotlarına göre daha doğru sonuçlar vermektedir.
2. Işınım şiddetinin artması modellerde doğruluğu azaltmaktadır. Bunun temel nedeni, eğimli yüzeye düşen ışınım hesaplanırken güneş ışınımının difüz ve direkt bileşenlerinin yeterince doğru bir şekilde korele edilememesi olarak değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, güneş ışınımının direkt ve difüz bileşenlerin dağılımının doğru bir şekilde hesaplanmasının modellerin doğruluklarını direkt olarak etkilediği görülmüştür.
3. Işınım şiddetinin fotovoltaik panelden elde edilebilecek güç üzerindeki etkisi; eğimli/eğimsiz yüzeyler üzerine gelen ışınımın farklı olması ve gücün eğimli yüzey üzerine gelen tahmin edilen ışınım ile hesaplanması bağlamında nicel olarak gösterilmiştir.

5.1 Öneriler

Bu çalışma ile gerçekleştirilen analizlerin temelinde güneş ışınımı ve dolayısıyla da güneş ışınım verilerinin ölçümü yatmaktadır. Bu bağlamda, yatay ve eğik düzlemde gerçekleştirilen ışınım ölçümlerinin sağlıklı bir şekilde yapılması büyük önem arz etmektedir. Bu doğrultuda, kurulu bulunan piranometrelerin entegrasyonunun doğru bir şekilde yapılması önemlidir.

Deney düzeneği dış etmenlere açık olduğundan, çevresel faktörler ve oluşabilecek olumsuz hava koşulları göz önünde bulundurulmalıdır.

Bu tezde gerçekleştirilen analizler yapılırken daha doğru sonuçlara ulaşabilmek adına güneşin doğuş ve batışındaki limit güneş ışınım değerleri göz ardı edilmiştir. Literatürde güneşin doğuş ve batışındaki limit güneş ışınım değerleri üzerine yoğunlaşan modeller bulunmaktadır. İzotropik ve anizotropik modellerle birlikte bu modellerin de göz önüne alınmasının model tahminlerinin doğruluğunu geliştirebileceği düşünülmektedir. Ayrıca model uygulamalarının daha kısa periyotlarda yapılarak, bu periyotlardaki model sonuçlarının irdelenmesinin, modellerin çalışmasına sıcaklık, ışınım şiddeti ve bulutluluk oranı gibi parametrelerin etkisini daha detaylı göstereceği düşünülmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Akarslan E, Hoccoğlu FO (2017) “A Novel based on Similarity for Hourly Solar Irradiance Forecasting.”, *Renewable Energy*, 112:337-346.
- Alam MS, Saha SK, Chowdhury MAK, Saifuzzaman M, Rahman M (2005) “Simulation of Solar Radiation System”, *American Journal of Applied Sciences*, 2: 751 – 758.
- Alnaser WE (1993) “New Model to Estimate the Solar Global Irradiation Using Astronomical and Meteorological Parameters.”, *Renewable Energy* 3:175-7.
- Al-Sulaiman FA ve Ismail B (1997) “Estimation of monthly average daily and hourly solar radiation impinging on a sloped surface using the isotropic sky model for Dhahran, Saudi arabia.”, *Renewable Energy*, 11(2):257-262.
- Azadeh A, MAghsoudi A, Sohrabkhani S (2009) “An Integrated Artificial Neural Networks Approach for Predicting Global Solar Radiation.”, *Energy Convers Manage* 50: 1497-505.
- Bahel V, Srinivasan R ve Bakhsh H (1986) “Solar Radiation for Dhahran , Saudi Arabia” *Energy*,11:985-9.
- Bahgat ABG, Helwa NH, Ahamd GE ve El Shenawy ET (2004) “Estimation of the maximum power and normal operating power of a photovoltaic module by neural networks”, *Renewable Energy*, 29:443-457.
- Bakırcı K (2009) “Correlations for estimation of daily global solar radiation with hours of bright sunshine in Turkey”, *Energy*, Elsevier, 34:485-501.
- Benford F ve Bock JE (1939) “A Time Analysis of Sunshine”, *Transactions of the American Illumination Engineering*, 34:200.
- British Petrol, a (BP) (2018) *BP Statistical Review of World Energy*, Yayın No: 67, Londra.
- British Petrol, b (BP) (2018) *BP Energy Outlook*, Yayın No: 2018 Edition, Londra.
- Celik AN ve Acikgoz N (2007) “Modelling and experimental verification of the operating current of mono-crystalline photovoltaic modules using four-and five-parameter models”, *Applied energy*, 84: 1-15.
- Cooper PI (1969) “The Absorption of Radiation in Solar Stills”, *Solar Energy*, 12:333-346
- Demircan N ve Alakavuk Z “Fotovoltaik Prensibiyle Güneş Enerjisinden Elektrik Üretimi”, VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, 17-19 Aralık 2008, İstanbul.
- Dincer I (2000) “Renewable energy and sustainable development: a crucial review.”, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 4:157–75.
- Duffie JA, ve Beckman WA, *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley & Sons, Inc., 2013, Hoboken, New Jersey.

- Elliot D (2000) "Renewable Energy and Sustainable Future", *Futures* 32:261-74.
- Elminir HK, Yosry AA ve Younes FI (2006) "Prediction of hourly and daily diffuse fraction using neural network, as compared to linear regression models", *Energy*, 32(8):1513-1523.
- Erbs DG, Klein SA ve Duffie A (1982) "Estimation of the Diffuse Radiation Fraction for Hourly, Daily, and Monthly-Average Global Radiation", *Solar Energy* 28:293.
- Fay JA ve Golomb DS (2002) *Energy and The Environment*, Oxford University Press, New York.
- Federico-Vladimir G, Miguel-Angel M, Maria-Pilar M ve Maria-Teresa M (2016) "Forecasting short-term solar irradiance based on artificial neural networks and data from neighboring meteorological stations", *Solar Energy*, 134:119-131.
- Fletcher AL (2007) "Estimating Daily Solar Radiation in New Zealand Using Air Temperatures.", *New Zealand Journal of Crop Horticultural Science*, 35:147-57.
- Hay EJ (1985) "Estimating Solar Irradiance on Inclined Surfaces : A Review and Assessment of Methodologies", *Solar Energy* 3:203-240.
- Hay EJ "Calculation of the solar radiation incident on inclined surfaces." In *Proceedings first Canadian Solar Radiation Data Workshop*, Toronto, Kanada, 1978.
- Fletcher AL, Moot DJ (2010) "Estimating daily solar radiation in New Zealand using air temperatures", *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 35:147-157.
- Hay EJ ve Davies JA (1980) "Calculation of the Solar Radiation Incident on an Inclined Surface", *Proceeding of the First Canadian Solar Radiation Data Workshop*, Toronto, Kanada 1980.
- Hiyama T, Kouzuma S ve Imakubo T (1995) "Identification of optimal operating point of PV modules using neural network for real time maximum power tracking control", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 10:360-367.
- Hottel HC, Woertz BB (1942) "Performance of Flat-Plate Solar Heat Collectors.", *American Society of Mechanical Engineers* 64:91.
- Housmans C, Ipe A ve Bertrand C (2017) "Tilt to horizontal global solar irradiance conversion: An evaluation at high tilt angles and different orientations", *Renewable Energy*, 113:1529-1538.
- Gümüş B ve Tüzün M "Kentlerde Enerji Verimliliği, Van İlinin Enerji Üretim Potansiyeli ve Elektrik Enerjisi Problemleri", *Van Kent Sempozyumu*, 1-3 Ekim 2009, Van.

- Gürbüz A (2009) “Enerji Piyasası İçerisinde Yenilenebilir (Temiz) Enerji Kaynaklarının Yeri Ve Önemi”, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyum (Iats’09), 13-15 Mayıs 2009, Karabük, Türkiye.
- Hocaoglu FO ve Serttas F (2016)“A novel hybrid (Mycielski-Markov) model for hourly solar radiation forecasting.”, Renewable Energy, 108, 635-643.
- International Energy Agency (2017),World Energy Outlook, Paris.
- International Renewable Energy Agency, (IRENA) (2019) Renewable Capacity Statistics 2019, Abu Dabi.
- İTO (2006) Küresel Petrol Stratejilerinin Jeopolitik Açından Türkiye ve Dünya Üzerine Etkileri, İstanbul Ticaret Odası, İstanbul.
- Jafarzadeh S, Fadali MS, Evrenosoglu CY (2013) “Solar Power Prediction Using Interval type-2 TSK Modelling”, IEEE Transactions on Sustainable Energy4:333-339
- Johnson FS (1954) “The Solar Constant ”, Journal of Meteorology 11:431.
- Kambezidis HD ve Psiloglou BE (2008) “The Meteorological Radiation Model (MRM): Advancements and Applications”, Modeling Solar Radiation at the Earth’s Surface, 357-392.
- Karakaş Eİ (2016) İnsan Kaynakları Gözünden Sanayi 4.0, <https://www.hrpicke.com/insan-kaynaklari-gozunden-sanayi-4-0/>,21 Aralık 2018.
- Kaya D (2006) Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Potansiyeli ve Çevresel Etkilerinin Karşılaştırılması, TÜBİTAK-Marmara Araştırma Merkezi, Ankara.
- Kinloch D, Parmelee J, Wicks F, Becker M ve Yerazunis S (1982) “Impacts of solar heating options upon electric power systems”, IEEE Transactions Power Apparatus and Sysems, PAS-101: 1271-1280.
- Klein SA, Beckman WA ve Duffie JA (1977) “Solar heating design, by the f-chart method”, ASA STI/Recon Technical,214.
- Klucher TM (1979) “Evaluating Models to Predict Insolation on Tilted Surfaces”, Solar Energy 23:111.
- Kondratyev KY (1969), Radiation in the Atmosphere, New York.
- Liu BYH, ve Jordan RC (1963) “The Long Term Average Performance of Flat-Plate Solar Energy Collectors”, Solar Energy 7:53.
- Liu B and Jordan R (1961) “Daily insolation on surfaces tilted towards equator.” , ASHRAE Journal, 10.
- Luiz FZ, Lourdes R, Jesus P (2005) “Artificial Intelligence Techniques Applied to Hourly Global Irradiance Estimation From Satellite-Derived Cloud Index.” , Energy 30:1685-97.

- Mejdoul R ve Taqi M (2013)“The mean hourly global radiation prediction models investigation in two different climate regions in morocco”, I International Journal of Renewable Energy Research,2(4):608-617.
- Mellit A, Benghanem M ve Kalogirou SA (2006) “An adaptive wavelet-network model for forecasting daily total solar-radiation”, Applied Energy, 83:705-722.
- Mghouchi YE, Chham E, Krikiz MS, Ajzoul T ve Bouardi AE (2016) “On the prediction of the daily global solar radiation intensity on south-facing plane surfaces inclined at varying angles”, Energy Conversion and Management, 120:397-411.
- Mousavi SM, Mostafavi ES, Jaafari A, Jaafari A, veHosseinpour F (2015)“Using measured daily meteorological parameters to predict daily solar radiation.” Measurement, 76, 148-155.
- Muzathik AM, Ibrahim MZ, Samo K ve Wan Nik WMN (2010) “Hourly Global Solar Radiation Estimates on a Horizontal Plane”, Journal of Physical Science, 21(2):51-66.
- Muzathik A, Ibrahim MZ, Samo K, ve Wan Nik WMW (2011). “Estimation of Global Solar Irradiation on Horizontal and Inclined Surfaces based on the Horizontal Measurements.” Energy, 36(2), 812-818.
- Olseth JA ve Skaerveit A (1987) “A Probability Density Model for Hourly Total and Beam Irradiance on Arbitrarily Oriented Planes”, Solar Energy 339:343.
- Özgöçmen A (2007) Electricity Generation Using Solar Cells, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Pandey C, ve Katiyar A (2013) “A Review of Solar Radiation Models”, Journal of Renewable Energy, 2013:11.
- Pandey C, ve Katiyar A (2014), “Hourly solar radiation on inclined surfaces.” Sustainable Energy Technologies and Assessments, 6, 86-92.
- Panwar NL, Kaushikb C ve Surendra Kotharia (2011), “Role of renewable energy sources in environmental protection: A review”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier 15(3): 1513-1524.
- Perez R, Ineichen P, Seals R, Michalsky J Ve Stewart R (1990) “Modelling Daylight Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance”, Solar Energy 44:271.
- Perez R, Stewart R, Seals R ve Guertin T “The Development and Verification of the Perez Diffuse Radiation Model”, Sandia National Laboratories Contractor Report SAND88-7030, Ekim 1988.
- Pick M, Simon P (1973) “Solar activity and its forecast”, Proceedings of the IEEE, 61:1303-1306.
- Poudyal KN, Bhattarai BK, Sapkota B ve Kjeldstad B (2012) “Estimation of global solar radiation using clearness index and cloud transmittance factor at trans-himalayan region in nepal.”, Energy and power engineering, 4(06):415-421.

- Rahim NA, Ping HW ve Selvaraj J (2013) "Photovoltaic module modeling using Simulink/Matlab", *Procedia Environmental Sciences*, 17: 537-546.
- Rehman S (1998) "Solar Radiation over Saudi Arabia and Comparisons with Empirical Models.", *Energy* 23:1077-1082.
- Reindl DT, Beckman WA ve Duffie JA (1990) "Evaluation of Hourly Tilted Surface Radiation Models", *Solar Energy* 45:9.
- Robinson N (1966), *Solar Radiation*, United States.
- Rietveld MR (1978) "A New Method for Estimating the Regression Coefficients in the Formula Relating Solar Radiation to Sunshine.", *Agricultural Meteorology* 19:243-252.
- Sandhya S, Starbell RN ve Wessley GJJ (2014) "Modeling and analysis of latitude-based solar radiation models suitable for indian cities.", *Journal of Basic and Applied Engineering Research*, 1(9):120-123.
- Sayın S (2006) *Yenilenebilir Enerjinin Ülkemiz Yapı Sektöründe Kullanımının Önemi ve Yapılarda Güneş Enerjisinden Yararlanma Olanakları*, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Smith ZA ve Taylor KD (2008) *Renewable and Alternative Energy Resources*, Santa Barbara, California.
- Spencer JW (1971) "Fourier Series Representation of the Position of the Sun", *Search*, 2(5)-172.
- Soylu A ve Türkay M (2005) "Yenilenebilir Enerji Kaynaklarına Geçiş Sürecinin Planlanmasında Doğrusal En İyi İyileme Tekniğinin Kullanılması", 3. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, 19-21 Eylül 2005, İstanbul.
- Talebizadeh P, Mehrabian MA, ve Abdolzadeh M (2011) "Prediction of the optimum slope and surface azimuth angles using the genetic algorithm.", *Energy and Buildings*, 43: 2998-3005.
- Thomas RN, "Features of the Solar Spectrum as Imposed by the Physics of the Sun", *Transactions of the Conference on Use of Solar Energy*, 1958, Tucson Arizona.
- Türkiye Elektrik İletim A.Ş, a (TEİAŞ) (2018) *Türkiye Elektrik İletimi Sektör Raporu*, Ankara.
- Türkiye Elektrik İletim A.Ş, b (TEİAŞ) (2017) *10 Yıllık Talep Tahminleri Raporu(2018-2027)*, Ankara.
- Tiwari GN ve Mishra RK (2011) *Advanced Renewable Energy Sources*, RSC Publishing, Cambridge.
- Ural E (2006) *Türkiye'nin Yenilenebilir Enerji Kaynakları*, Türk Çevre Vakfı Yayını, Ankara.
- Ülgen K, Hepbaşlı A (2008) "Diffuse solar radiation estimation models for Turkey's big cities.", *Energy Conversion and Management*, 50:149-156.

- Yamak T ve Aslan N (2006) “ Türkiye’nin Enerji Sorununun Alternatif Enerji Kaynakları Açısından Değerlendirilmesi”, Hacettepe Sosyal ve Beşeri Bilimler Dergisi, 11: 53-75.
- Yadav AK ve Chandel SS (2013) “Solar radiation prediction using Artificial Neural Network techniques: A review”, Renewable and Sustainable Energy Review, 33:772-781.
- Yamarhita H., Tamahashi K., Michihim M., Tsuyoshi A., Amako K., ve Park M. (2002) “A novel Simulation technique of the PV generation system using red weather conditions”, Proceedings Power Conversion Conference, V01.2: 839-444.
- Yılmaz DD (2015) Yenilenebilir Enerji Kaynağı Olarak Rüzgar ve Hidroelektrik Enerji Üretiminde Birim Maliyetlerin Karşılaştırmalı Analizi ve Türkiye Uygulaması, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- Weidong X, Dunford WG, ve Capel A, "A novel modeling method for photovoltaic cells." Power Electronics Specialists Conference 2004 IEEE 35th Annual, 2004, pp. 1950-1956 Vol.3.
- Willrich M (1975), Energy and the World Politics, The Free Press, New York.
- World Energy Council (2018) World Energy Issues Monitor, World Energy Council, Londra.

7. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı :Yasin YÜCEL

Doğum Yeri ve Tarihi : Bolu-1992

Lisans Üniversite :Yıldız Teknik Üniversitesi

Elektronik posta : ysn2y1c@gmail.com

İletişim Adresi :Abant İzzet Baysal Üniversitesi