

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENERJİ YÖNETİMİ VE TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI**

**FOTOVOLTAİK PANELLERİN YÖNÜNÜN GÜÇ ÜRETİMİNE
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ALİ EMRE ŞAFAK

DENİZLİ, KASIM - 2023

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENERJİ YÖNETİMİ VE TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI**



**FOTOVOLTAİK PANELLERİN YÖNÜNÜN GÜÇ ÜRETİMİNE
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ALİ EMRE ŞAFAK

DENİZLİ, KASIM - 2023

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

ALİ EMRE ŞAFAK

ÖZET

FOTOVOLTAİK PANELLERİN YÖNÜNÜN GÜÇ ÜRETİMİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ALİ EMRE ŞAFAK

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENERJİ YÖNETİMİ VE TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. ŞENGÜL GÜVEN)

DENİZLİ, KASIM - 2023

Teknolojinin hızlı bir gelişim gösterdiği çağımızda, ihtiyaç duyulan enerji miktarında devamlı bir artış söz konusudur. Fosil yakıtların çevreye verdiği olumsuz etkilerden dolayı, elektrik enerjisi üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan güneş enerjisinden elektrik enerjisi elde etme yöntemlerinin başında fotovoltaik (PV) paneller gelmektedir. PV panellerin verimlerinin artırılmasına yönelik pek çok çalışma yapılmaktadır. Panel verimini etkileyen birçok faktör mevcuttur. Bu faktörlerden biri, güneş ışınlarının PV panel yüzeyi ile yaptığı açıdır. Bu açı değeri ne kadar dik olursa PV panelin ürettiği elektrik enerjisi de o kadar yüksek olmaktadır. Bu çalışmada, güneş takip sistemi kullanılmayan panellerde, güneşin doğuşu ve batışı vakitlerinde güneş ışınlarını dik alamayan panellerin enerji üretim kayıpları incelenmiştir. Kuzey Yarım Küre’de sabit olarak güney yönüne konumlandırılan panellerin, güneşin doğuşu ve batışı vakitlerinde güneş ışınlarını dik alması durumunda ürettikleri enerji artışları incelenmiştir. Ölçümlerin bulutsuz hava durumunda gerçekleştirilebilmesi için en uygun günler meteorolojik verilere göre belirlenmiştir. Bu çalışma için, optimum açıda, yönleri doğu, batı ve güney olacak şekilde konumlandırılmış üç panel ile ölçümler yapılmış, ürettikleri enerjiler kıyaslanmıştır. Güneş ışınımının fazla olduğu yöne dönmüş kabul edilen panelin, sabit olarak güney yönüne bakan panele göre yaklaşık %32 ile %25 arası daha fazla enerji üretebileceği görülmüştür. Simülasyon programı ile, tüm yıl için; ışınım değerinin fazla olduğu saat aralığında, fazla olduğu yöne dönmüş ve mevsimsel optimum eğim açısında konumlandırılmış panelin, yıllık optimum eğim açısında, sabit olarak güney yönüne konumlandırılmış panelden yaklaşık %20 daha fazla enerji üretebileceği hesaplanmıştır. Elde edilen ölçüm değerleri ile simülasyon programının ürettiği değerler arasında en fazla %8,6 fark bulunmuştur.

ANAHTAR KELİMELER: PV sistemlerde verim, Güneş takip sistemleri, Enerji kayıpları, Güneş ışınları, Güneş ışını geliş açısı.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF THE ORIENTATION OF PHOTOVOLTAIC PANELS ON POWER GENERATION

MSC THESIS

ALİ EMRE ŞAFAK

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
ENERGY MANAGEMENT AND TECHNOLOGIES

(SUPERVISOR: DOÇ. DR. ŞENGÜL GÜVEN)

DENİZLİ, NOVEMBER 2023

Nowadays, the rapid development of the technology also increases the amount of the energy needed. Due to the negative effects of the fossil fuels on the environment, the use of renewable energy sources in electricity generation is increasing day by day. Photovoltaic (PV) panels are one of the leading methods of obtaining electrical energy from solar energy, which is one of the renewable energy sources. Many studies are carried out to increase the efficiency of PV panels. There are many factors that affect the panel efficiency. One of these factors is the angle that the sun's rays make with the PV panel surface. The steeper this angle value is, the higher the electrical energy produced from the PV panel. In this study, the energy production losses of panels that do not receive the sun's rays perpendicularly at sunrise and sunset times in panels without solar tracking system are analyzed. The energy increases produced by the panels, which are permanently positioned in the southern direction in the Northern Hemisphere, are analyzed when the sun rays are perpendicular at sunrise and sunset times. The most suitable days for the measurements to be carried out in cloudless weather conditions were determined according to the meteorological data. For this study, measurements were made with three panels positioned at the optimum angle, oriented east, west and south, and the energy produced was compared. It is seen that the panel, which is considered to be turned to the direction where solar radiation is high, can produce approximately 32% to 25% more energy than the panel facing the fixed south direction. With the simulation program, it was calculated that for the whole year, the panel positioned at the seasonal optimum tilt angle, facing the direction of maximum radiation value in the hours of maximum radiation value, can produce approximately 20% more energy than the panel positioned at the annual optimum tilt angle, fixedly facing south. The maximum difference between the measured values and the values produced by the simulation program was 8.6%.

KEYWORDS: Yield of PV systems, solar tracking systems, energy losses, Sunlight, Angle of sunlight incidence.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ	x
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür Taraması ve Tezin Kapsamı	3
2. GÜNEŞ ENERJİSİ	7
2.1 Ülkemizde Güneş Enerjisi.....	7
2.2 Güneş Işınları ve Açıları	11
2.2.1 Ana Güneş Açıları.....	12
2.2.1.1 Enlem Açısı.....	13
2.2.1.2 Saat Açısı	13
2.2.1.3 Deklinasyon Açısı	14
2.2.2 Türetilen Güneş Açıları	16
2.2.2.1 Güneş Geliş Açısı.....	16
2.2.2.2 Yüzey Azimut Açısı	17
2.2.2.3 Zenit Açısı.....	17
2.2.2.4 Güneş Yükseklik Açısı	18
2.2.2.5 Güneş Azimut Açısı	19
2.2.2.6 Eğim Açısı	19
2.3 Optimum Açısı.....	20
3. FOTOVOLTAİK YAPI	23
3.1 Fotovoltaik Tarihçesi	23
3.2 Fotovoltaik Hücre Eşdeğer Devresi	24
3.3 Fotovoltaik Hücre Yapısı.....	25
3.4 Fotovoltaik Panel Çeşitleri.....	27
3.4.1 Birinci Nesil Güneş Pilleri.....	28
3.4.2 İkinci Nesil Güneş Pilleri.....	30
3.4.3 Üçüncü Nesil Güneş Pilleri.....	32
3.5 Güneş Pillerinin Karakteristiği.....	35
3.5.1 Verim.....	35
3.5.2 Kısa Devre Akımı.....	36
3.5.3 Açık Devre Gerilimi	36
3.5.4 Maksimum Akım Değeri	37
3.5.5 Maksimum Gerilim Değeri	37
3.5.6 Maksimum Güç Noktası.....	37
3.5.7 Dolum Faktörü	37
3.6 Fotovoltaik Sistemlerde Kayıplar.....	38
3.6.1 Gölgelenme Etkisi	38
3.6.2 Tozlanma Etkisi	41
3.6.3 Panel Sıcaklığı Etkisi.....	42
3.6.3.1 Su ile Soğutma	43

3.6.3.2	Hava ile Soğutma	44
3.6.3.3	Nanoakışkan ile Soğutma	46
3.6.3.4	Faz Değiştiren Malzeme ile Soğutma.....	48
3.6.4	Yansıma Etkisi	49
3.6.5	Kablolama Etkisi	49
3.6.6	İnverter Etkisi.....	50
3.6.7	Uyumsuzluk Etkisi	50
3.6.8	Düşük Işıma	51
3.6.9	Panel Yerleşimi Etkisi	52
3.7	Güneş Takip Sistemleri	53
3.7.1	Pasif Güneş Takip Sistemleri.....	55
3.7.2	Aktif Güneş Takip Sistemleri	56
3.7.3	Manuel Güneş Takip Sistemleri.....	57
3.7.4	Tek Eksenli Güneş Takip Sistemleri	57
3.7.5	Çift Eksenli Güneş Takip Sistemleri	58
3.7.6	Kapalı Çevrim Güneş Takip Sistemleri.....	58
3.7.7	Açık Çevrim Güneş Takip Sistemleri.....	59
3.8	Maksimum Güç Noktası Takibi (MPPT)	59
4.	MATERYAL ve YÖNTEM	61
4.1	Çalışmada Kullanılan Ekipmanlar	61
4.2	Güneş Panelinin Güç-Gerilim Karakteristiğinin Elde Edilmesi.....	63
5.	DENEYSEL SONUÇLAR	66
5.1	Güneş Panelinin Gerilim-Akım Karakteristiğinin Elde Edilmesi	66
5.2	Ölçüm Sonuçları.....	69
5.3	Panellerden Çekilen Enerjinin Hesaplanması ve Elde Edilen Değerlerin Karşılaştırılması.....	79
6.	SONUÇ ve ÖNERİLER	85
7.	KAYNAKLAR	87
8.	ÖZGEÇMİŞ.....	96

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Türkiye güneş enerjisi potansiyeli	9
Şekil 2.2: Türkiye aylık ortalama global radyasyon dağılımı	9
Şekil 2.3: Atmosfer dışına gelen ışınım şiddeti.....	11
Şekil 2.4: Enlem (θ), saat (ω) ve deklinasyon (δ) açısı.....	13
Şekil 2.5: Gün içerisinde saat açısının değişim grafiği.....	14
Şekil 2.6: Yıllık deklinasyon açısı değişim grafiği.....	15
Şekil 2.7: Yılın farklı zamanlarında dünyanın yörüngesi ve deklinasyonu	15
Şekil 2.8: (a) Eğimli bir yüzey için güneş azimut açısı (b) Güneş azimut açısı azimut açısı. (b) Güneş azimut açısını gösteren plan.....	17
Şekil 2.9: Yaz ve kış mevsiminde öğle saatinde θ_z , δ ve θ açısı arasındaki ilişki	18
Şekil 2.10: Zenit açısı ve güneş yükseklik açısı.....	18
Şekil 2.11: Zenit, güneş azimut ve güneş yükseklik açısı.....	19
Şekil 2.12: Yatay düzlemdeki panel eğim açısı.....	19
Şekil 2.13: Sabit güneş panelinin optimum montaj açısı.....	20
Şekil 3.1: Fotovoltaik hücrenin eşdeğer devresi	24
Şekil 3.2: Silikon güneş hücresi	26
Şekil 3.3: Hücre, modül, panel, dizi	26
Şekil 3.4: Güneş pili çeşitlerinin sınıflandırılması	27
Şekil 3.5: Monokristalli PV panel kesiti	29
Şekil 3.6: Polikristal yapısındaki tanecik sınırları	29
Şekil 3.7: Polikristalli PV panel kesiti	30
Şekil 3.8: Işınımın değişimi ile güneş hücresinin, Akım-Gerilim (I-V) karakteristiği.....	35
Şekil 3.9: PV pilin kısa devre akımı	36
Şekil 3.10: PV pilin açık devre gerilimi.....	37
Şekil 3.11: Binanın çatısında kurulmuş PV panellerde gölgelenme etkisi	39
Şekil 3.12: Panel yerleşim ölçüleri	40
Şekil 3.13: Yatay ve dikey mesafenin yıllık üretime etkisi a) yatay mesafe b) dikey mesafe.....	40,41
Şekil 3.14: Temiz ve tozlu panelin zamana bağlı güç grafiği	42
Şekil 3.15: Su ile soğutulan panelin Voltaj-Akım grafiği.....	43
Şekil 3.16: 0-75°C arası modül sıcaklığında ideal Güç-Voltaj grafiği	43
Şekil 3.17: Hava taşınımı ile zamana bağlı verim grafiği.....	46
Şekil 3.18: Isı transfer elemanı alüminyum ve bakır silindirik kanatçıklar	46
Şekil 3.19: Levha kanatçıklar	47
Şekil 3.20: Su soğutmalı, ağırlıkça %0,2 oranındaki Al_2O_3 -su, TiO_2 -su, CuO -su soğutmalı panellerin, soğutmasız panele göre elektriksel verim artışları	47
Şekil 3.21: Güneş radyasyonuna bağlı panel sıcaklığı değişimi	48
Şekil 3.22: Dokuz adet modülün ışınım verimlilikleri.....	52
Şekil 3.23: Yıllık ışınımın eğime bağlılığı.....	53
Şekil 3.24: Işınım kazancının eğim ile değişimi	53
Şekil 3.25: Sabit PV ile Güneş takipli PV sistemin ürettikleri güç (a) açık hava (b) kısmen açık hava (c) bulutlu gökyüzü.....	54

Şekil 3.26: Pasif güneş takip sistemi	55
Şekil 3.27: Aktif güneş takip sistemi genel blok diyagramı	56
Şekil 3.28: Tek eksen güneş takibi çalışma yapısı	57
Şekil 3.29: Çift eksenli güneş takip sisteminin çalışma yapısı	58
Şekil 3.30: Kapalı çevrim kontrol yapısının genel gösterimi	59
Şekil 3.31: Açık çevrim kontrol yapısının genel gösterimi.....	59
Şekil 3.32: PV hücre Akım-Gerilim (I-V) karakteristiği	60
Şekil 3.33: MPPT varken ve MPPT yokken karşılaştırılmış panellerin ürettiği güç farkları.....	60
Şekil 4.1: Çalışmada kullanılan panelin özellikleri	62
Şekil 4.2: Çalışmada kullanılan cihazlar (a)Unit UT89X (b) EKO MS-01 (c) METREL MI 3109	62
Şekil 4.3: Çalışmada kullanılan panel standı	63
Şekil 4.4: Çalışmada kullanılan panelin açı, ışınım ve yüzey sıcaklığı ölçümü	66
Şekil 4.5: Ölçüm çalışmalarının genel fotoğrafı.....	66
Şekil 5.1: Çalışmada kullanılan ölçüm devresi	67
Şekil 5.2: Çalışmada kullanılan panel için Akım-Gerilim grafiği	68
Şekil 5.3: Çalışmada kullanılan panel için Gerilim-Güç grafiği	69
Şekil 5.4: Çalışmada kullanılan panel için Akım-Güç grafiği	69
Şekil 5.5: Azimut 0° ve Azimut -180° yönündeki paneller tarafından üretilen gücün zamana göre değişimi (7 Haziran 2023).....	72
Şekil 5.6: Azimut 0° ve Azimut +180° yönündeki paneller tarafından üretilen gücün zamana göre değişimi (7 Haziran 2023).....	72
Şekil 5.7: Azimut 0° ve Azimut -180° yönündeki paneller tarafından üretilen gücün zamana göre değişimi (3 Eylül 2023).....	75
Şekil 5.8: Azimut 0° ve Azimut +180° yönündeki paneller tarafından üretilen gücün zamana göre değişimi (3 Eylül 2023).....	75
Şekil 5.9: Azimut 0° ve Azimut -180° yönündeki paneller tarafından üretilen gücün zamana göre değişimi (15 Eylül 2023).....	78
Şekil 5.10: Azimut 0° ve Azimut +180° yönündeki paneller tarafından üretilen gücün zamana göre değişimi (15 Eylül 2023).....	78
Şekil 5.11: Sayısal integrasyon yöntemi ile yamuk kuralı grafiği	79

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1: 2011 ve 2021 yılları Türkiye'nin yüzdesel kurulu gücü	7
Tablo 2.2: 2021 yılı Türkiye elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara göre dağılımı	8
Tablo 2.3: Türkiye aylık ortalama güneş enerjisi potansiyeli.	10
Tablo 2.4: Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyelinin bölgelere göre dağılımı .	10
Tablo 2.5: Farklı hava şartları için yaygın ve toplam ışınım miktarları	12
Tablo 2.6: Deklinasyon açısını veren, ayın ortalama günleri	16
Tablo 2.7: Elde edilen ve hesaplanan değerler	22
Tablo 3.1: Hava ile soğutulan PV-T sisteminin değişen çevre sıcaklığında performansı	44
Tablo 3.2: Su ile soğutulan PV-T sisteminin değişen çevre sıcaklığında performansı	45
Tablo 4.1: Aylık deklinasyon açısı değerlerinin hesaplanması	66
Tablo 4.2: Aylık optimum eğim açısının hesaplanması.....	67
Tablo 4.3: Çalışma günleri için güneş pozisyon zamanları	65
Tablo 5.1: Yük direnci değişimi ile panelin akım, gerilim ve güç değerleri.....	67
Tablo 5.2: Azimut -180° ve Azimut 0° yönündeki panellerin ölçümleri (7 Haziran 2023)	70
Tablo 5.3: Azimut $+180^{\circ}$ ve Azimut 0° yönündeki panellerin ölçümleri (7 Haziran 2023)	71
Tablo 5.4: Azimut -180° ve Azimut 0° yönündeki panellerin ölçümleri (3 Eylül 2023)	73
Tablo 5.5: Azimut $+180^{\circ}$ ve Azimut 0° yönündeki panellerin ölçümleri (3 Eylül 2023)	74
Tablo 5.6: Azimut -180° ve Azimut 0° yönündeki panellerin ölçümleri (15 Eylül 2023)	76
Tablo 5.7: Azimut $+180^{\circ}$ ve Azimut 0° yönündeki panellerin ölçümleri (15 Eylül 2023)	77
Tablo 5.8: Ölçüm yapılan günlerin, hesaplanan verileri	83
Tablo 5.9: Simülasyonda kullanılan mevsimsel optimum açı değerleri ve panellerin dönük olduğu yönü gösteren zaman aralığı	84

SEMBOL LİSTESİ

I_{ph}	:	PV hücrenin ürettiği akım
$I_{ph}(Gnom)$:	Standart test koşulları altındaki ışık akımı
I_0	:	Sızıntı akımı
I_D	:	Diyot akımı
I_m	:	Maksimum akım değeri
q	:	Elektronun elektrik yükü
k	:	Boltzman sabiti
K_i	:	Sıcaklık katsayısı
K_T	:	Açıklık indeksi
T_C	:	Panelin hücre sıcaklığı
T_a	:	İstenilen hava sıcaklığı
ΔT	:	Sıcaklık farkı
V_{oc}	:	Açık devre gerilimi
I_{sc}	:	Kısa devre akımı
R_S	:	Diyota bağlı seri direnç
R_p	:	P-N bağlantısının sızıntı akımından kaynaklanan direnç
R_{SH}	:	Şönt direnç
P_{in}	:	Hücreye gelen ışınım gücü
$Gnom$:	Standart test koşulları (STK) içinde kabul edilen ışınım değeri
G	:	Anlık ışınım değeri
\emptyset	:	Enlem açısı
n	:	Yıl içindeki gün sayısı
ω	:	Saat açısı
δ	:	Deklinasyon açısı
Θ	:	Güneş geliş açısı
Θ_Z	:	Zenit açısı
γ	:	Yüzey azimut açısı
α_S	:	Güneş yükseklik açısı
γ_S	:	Güneş azimut açısı
β	:	Panel eğim açısı
β_{opt}	:	Optimum eğim açısı
V_d	:	Paralel diyot üzerindeki gerilim düşümü
V_m	:	Maksimum gerilim değeri
m	:	İdealite faktörü
FF	:	Dolum faktörü
MPP	:	Maksimum güç noktası
$P_{çıkış}$:	Güneş pilinin çıkış gücü
$P_{giriş}$:	Güneş piline uygulanan güneş ışığının gücü
PO	:	Performans oranı
$NOCT$:	Nominal çalışma hücresi sıcaklığı
μ_p	:	Panel gücünün sıcaklık bağımlılık katsayısı
$PV-T$:	Fotovoltaik-Termal

FDM	:	Faz değiştiren malzeme
AM	:	Hava kütlesi katsayısı (güneş spektrumu)
M_p	:	Maksimum güç
η_{STK}	:	Standart test koşullarındaki verim
$\eta_{real(I)}$:	Gerçek verim ışınım cinsinden
$\eta(I)$:	Işınım cinsinden verim
$\eta_{(I_{STK})}$:	Işınım cinsinden standart test koşullarında verim
A_{PV}	:	PV hücre alanı
$P(I)$:	Işınım değerindeki güç çıkışı

ÖNSÖZ

Geçmiş dönemlerden günümüze enerji ihtiyacı, insanlığın temel sorunlarından birisi olmuştur. Günümüzde de yenilenebilir enerji kaynaklarının, enerji gereksinimleri ile birlikte çevreye verilen zarar bakımından diğer enerji kaynakları ile kıyaslandığında, önemi daha iyi anlaşılmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında bulunan güneş enerjisinden, elektrik enerjisi elde etme yönteminde fotovoltaik (PV) güneş panelleri kullanılmaktadır. Elektrik enerjisi üretiminde güneş enerjisi kullanımı son yıllarda artış göstermektedir. Kullanımın artmasına paralel olarak, PV paneller ile elektrik üretiminde verim arttırmaya yönelik çalışmalar hız kazanmıştır. Bu çalışmada, tüm gün boyunca sabit olarak güney yönüne bakan PV panellerin, güneşin doğuşu ve batışı zamanlarında güneş ışınlarını dik açı ile alamamasından kaynaklanan verim düşüklüğü incelenmiştir.

Çalışmamın başından sonuna kadar bilgisi, deneyimi, insani değerleri ve bana verdiği özgüven için değerli danışmanım Doç. Dr. Şengül Güven Hocama sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu yola girmemde beni yönlendiren bana benden çok güvenen aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamda her zaman bana destek olan Denizli İş Adamları Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi öğretmenlerine ve öğrencilerine teşekkür ederim.

1. GİRİŞ

İnsanlık tarihi boyunca ve günümüzde enerji ihtiyacının artması en büyük sorunlardan birisidir. Birçok enerji üretim yöntemi bulunmasına karşın yenilenebilir enerji kaynakları, çevreye verdiği zararın çok düşük olması sebebiyle, önemini daha fazla hissettirmektedir. Güneş enerjisinden elektrik enerjisi elde etme sisteminde, fotovoltaik (PV) güneş panelleri kullanılmaktadır. Elektrik enerjisi üretiminde güneş enerjisi kullanımının son yıllardaki artışı ile birlikte, PV paneller ile elektrik üretiminde verim arttırmaya yönelik çalışmalar da hız kazanmıştır.

Güneş enerjisi üzerindeki çalışmalar çok eski yıllara kadar uzanmaktadır. Fotonların, panel yüzeyine çarpması ile silikon yarı iletken malzemeden elektron hareketinin başlatılması fotovoltaik etki olarak tanımlanabilir. Fotovoltaik pil teknolojisinin gelişiminde başlangıç, 1839 yılında Alexandre Edmond Becquerel'in yaptığı çalışmalar kabul edilmektedir. Bu çalışmaları 1883 yılında, Charles Fritts'in keşfettiği selenyum ve altın maddeleri ile güneş enerjisini, elektrik enerjisine dönüştüren ilk güneş pili takip etmiştir. Üretilen güneş pilinin verimi yaklaşık %1 olmuştur. 1887 yılında ise Heinrich Hertz, fotoelektrik etkiyi ilk olarak gözlemlemiştir. Güneş pilinin, daha fazla elektrik üretmesi için, yoğun görünebilir ışık yerine, ultraviyole ışık altında kalmasının önemli olduğunu göstermiştir. 1905 yılında, Albert Einstein fotoelektrik etki kanununu ortaya koymuş bu çalışması ile 1921 yılında Nobel ödülünü almıştır (Baker 2022). Bu çalışmaların yoğunluk kazanması ise 1970 yıllarındaki petrol krizine denk gelmektedir.

Ülkemiz, coğrafi konumu göz önüne alındığında, yenilenebilir enerjiden elektrik enerjisi üretme potansiyeli oldukça yüksektir. Rüzgâr, güneş, hidroelektrik ve jeotermal enerji kaynakları, diğer ülkeler ile kıyaslandığında oldukça iyi durumdadır. Fakat ülkemiz bu kaynaklardan yeterince faydalanamamaktadır. Maalesef enerji üretimimiz tüketimimizi karşılamamaktadır. Bu sebeple, enerji kaynakları açısından yüksek potansiyele sahip ülkemizde, yenilenebilir enerji kaynakları daha etkin kullanılmalıdır.

Ülkemizde 2011 yılında güneş enerjisi kurulu gücü yok iken 2021 yılındaki güneş enerjisinin, toplam kurulu güce oranı %7,83 ulaştığı ve 2022 yılı sonu içinse bu oran %9,08 olarak gerçekleşmiştir (TEİAŞ 2023).

PV panelden yüksek verim alabilmek için, güneş ışınlarının, panel üzerine dik açı ile gelmesi gerekmektedir. Kuzey yarım kürede genellikle, PV paneller, güney yönüne doğru sabitlenerek elektrik üretimi sağlanır. Bu uygulama, yıllık üretim verilerine bakıldığında doğrudur. Fakat elde edilen enerjinin arttırılabilmesi mümkündür. Panelin eğim açısının aylık veya mevsimsel olarak, optimum eğim açısına ayarlanması verim artışını sağlayacaktır. Denizli için optimum açı hesaplaması çalışmada yer almaktadır. Bunun yanı sıra; panel, optimum açı değeri ayarlanmış olsa da tüm yıl boyunca güneye dönük sabit konumlandırılmışsa, güneşin doğuşu ve batışı vakitlerinde, güneş ışınlarını dik açı ile alamaz. Bu sebeple, elde edilebilecek olan enerji, kaybedilmektedir. Bu çalışmada, optimum açı ile sabitlenmiş üç adet panel ile çalışılmıştır. Panellerin yönleri doğuya, güneye ve batıya bakacak şekildedir. Güneşin doğuşundan, batışına kadar panel üzerine düşen ışınım değeri, panel yüzey sıcaklığı, panelin akım, gerilim değerleri belli aralıklarla ölçülmüştür. Panelin, güneş ışınım değerinin yüksek olduğu yöne bakması ile elde edilebilecek enerji incelenmiştir. PV panel yüzeyine, güneş ışınlarının dik gelebilmesi için, genellikle sürekli güneş takip sistemleri üzerinde çalışmaların yoğunlaştığı görülmüştür. Sürekli güneş takibinin, üretim artışını sağlamanın yanında, enerji tüketimi de göz önünde bulundurulmalıdır. Bu çalışmada güneş takip sistemi, günde üç kez hareket edecek şekilde planlanmıştır. Sabah saatlerinde doğu, öğle saatlerinde güney, akşam saatlerinde batı yönüne ve güneş batımından sonra ertesi gün için doğu yönüne dönmesi düşünülmüştür. Kullanılacak sistem, sürekli güneş takip sistemine göre daha basit ve daha az maliyetli olacak ve daha az enerji tüketecektir.

Bundan sonra yapılacak çalışmalarda, aylık veya mevsimsel optimum açı değerine ayarlanmış panelin; güneş ışınım değerinin fazla olduğu yöne dönebilen sistem ile, sürekli güneş takibi yapan sistemin, ürettiği ve tükettiği enerji miktarları karşılaştırılabilir. Ayrıca panel sıcaklığının artması, panelin ürettiği enerjiyi olumsuz etkilemektedir. Bu çalışmada, güneşe döndürülerek elde edilen verim artışı ile panelin soğutulması sağlanabilir. Bu şekilde daha verimli bir enerji üretimi sağlanabilecektir.

1.1 Literatür Taraması ve Tezin Kapsamı

Öztürk (2017) makalesinde; PV sistemlerin hücre ve modül yapıları, çalışma prensipleri, akım, gerilim, güç özellikleri, verimlilik gibi fotovoltaiik sistemi doğrudan ya da dolaylı olarak etkileyen parametrelerin ayrıntılı olarak anlatmıştır. PV sistemlerinde güneş pili türlerinin verimliliklerini karşılaştırmıştır. Güneş pillerinin verimliliği, amorf silikon bazlı güneş pilleri için %6' dan, çok bağlantılı PV hücreleri için %44,0' a ve bir hibrit paket halinde birleştirilmiş çok sayıda kalıp için %44,4'e kadar değiştiğini bildirmiştir. En popüler kristal silikon PV hücreler için enerji dönüşüm verimliliğinin, yaklaşık %14 ile %19 olduğunu, aynı zamanda güneş enerjisini artırmak için güneş ışınlarına odaklanmak gerektiğini belirtmiştir. Işık yoğunluğunun arttırılmasıyla ışığın ürettiği taşıyıcıların artacağı ve verimin de %15 artacağını belirtmiştir.

Hussein ve diğ. (2004) Kahire'de yaptıkları çalışmada, fotovoltaiik (PV) panelin güney yönüne bakan konumda ve mevsime uygun olarak eğim açısının ayarlanması ile panelin yüzeyine maksimum ışımın düştüğünü belirtmişlerdir. Ayrıca batı yönüne bakan panellerin, doğu yönüne bakan panellere göre daha fazla enerji ürettiğini belirtmişlerdir.

Kacira ve diğ. (2004) Şanlıurfa'da yaptıkları çalışmada, optimum eğim açısında sabit konumlandırılmış panel ile iki eksenli bir güneş takibi yapan panelin ürettikleri enerji sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Optimum eğim açısının yıl boyunca 13° ile 61° arasında değiştiğini ve enlem açısı değeri ile eşit olarak konumlandırılmış panele göre %3,9 daha fazla ışım aldığını belirtmişlerdir. Ayrıca temmuz ayında yaptıkları çalışmada, iki eksenli sistem ile güneşi takip eden panelin, 14° eğim açısıyla sabit olarak güney yönüne bakan panele göre %34,6 daha fazla enerji ürettiğini belirtmişlerdir.

Ulgen (2006) İzmir'de yaptığı çalışmada, optimum eğim açısının, yıl boyunca incelendiğinde 0° ile 61° arasında değerler aldığını belirtmiştir. Ölçümlerini mevsimsel olarak incelediğinde, optimum eğim açısının; kışın $55,7^{\circ}$, ilkbaharda $18,3^{\circ}$, yazın $4,3^{\circ}$, sonbaharda 43° olduğunda daha fazla enerji üretebileceğini belirtmiştir. Tüm yıl boyunca güney yönüne bakan ve eğim açısı değiştirilmeyen paneller için $30,3^{\circ}$ eğim

açısı ile konumlandırılması durumunda, en yüksek enerji üretimini gerçekleştirebileceğini belirtmiştir.

Yigit ve Arslanoglu (2021) yaptıkları çalışmada, güneş enerjisi santrallerinin veriminin artırılması için yapılması gerekenleri incelemişlerdir. Güneş enerjisi santralının, yıllık olarak %10 daha fazla enerji elde edileceğini ortaya koymuşlardır. Ülkemizin farklı bölgeleri için optimum eğim açısı değerlerini incelemiş, optimum eğim açısında, enlem değerine göre, 1° - 2° farklılık olabileceğini belirtmişlerdir. Güneş enerjisi santrallerinde PV panellerin sabit optimum açıda yerleştirildiği ve güneş takip sistemlerinin pahalı olması nedeniyle kullanılmadığı belirtilmiştir. Sadece yaz ve kış mevsimi için, iki optimum açı değerine ayarlanabilecek sistem ile yılda iki kez panellerin eğim açılarının değiştirilmesi durumunda, güneş enerjisi santrallerinde yaklaşık %4 güç üretimi artışı olabileceğini belirtmişlerdir.

Demir ve Özkan (2019) Konya'da yaptıkları çalışmada, panel sıcaklığı artışının ve zenit açı değerinin, PV panellerin verimini oldukça etkilediğini belirtmişlerdir. Dört adet eşdeğer PV panel kullanılmış ve panellerin sıcaklığını değiştirebilmek için panellerin arka yüzeyine alüminyum kanalcıklar yerleştirilmiş ve bu kanallardan su geçişi sağlanmıştır. Farklı açısı ile konumlandırılmış PV paneller ile mevsimsel optimum eğim açısı değerlerine ulaşmışlardır. Elde ettikleri veriler sonucunda, soğutulan panelin, soğutulma işlemi yapılmayan panele göre %11,17 ve zenit açı değeri ile ayarlanan panelin, sabit panele göre %7,49 daha fazla enerji ürettiğini belirtmişlerdir. Panelin soğutulması ve zenit açı değerinin ayarlanması durumunda panellerde yaklaşık %17,47 daha fazla enerji üretilabileceğini belirtmişlerdir.

Dölek ve Arslan (2023) yaptıkları çalışmada PV panel sıcaklığının artması ile, panelin ürettiği enerji düşmektedir. Aynı şartlar altında çalışan iki panel ve panel arkasında soğutma sağlayan sistem kullanmışlardır. Soğutma için kullanılan kütlenin akış hızının, elektriksel ve ısı verime etkilerini incelemişlerdir. Kütle akış hızı yüksek olan PV/T sistemin, panel yüzeyinde ölçülen sıcaklığın %12 daha az, elektriksel veriminin ise yaklaşık %3 daha fazla olduğunu belirtmiştir.

Hafez ve diğ. (2017) PV panellerin optimum eğim açısı ile ilgili çalışmalar yapmıştır. Farklı yarımkürelerde birçok bölgede yapılmış olan optimum eğim açısı ile

ilgili çalışmaları incelemiş ve bu çalışmalar sonucunda elde edilmiş olan eşitlikleri özetlemiştir.

Bakirci (2012) yaptığı çalışmada, ülkemizde, farklı sekiz il için aylık ortalama optimum eğim açısı değerlerini hesaplamış ve ölçümler yapmıştır. Ülkemizde optimum eğim açısının, yıl içerisinde 0° ile 65° arasında değiştiğini belirtmiştir. Farklı iller için optimum eğim açısı değerleri karşılaştırıldığında farkın, haziran ve temmuz ayları için en küçük değerlere ulaştığını belirtmiştir. Ülkemizde optimum eğim açısı değerini tahmin edebilmek için eşitlikler geliştirmiş ve bu eşitlikleri test etmiştir.

Ulgen ve Hepbasli (2003) İzmir’de yaz ve kış mevsimleri için iki ayrı optimum eğim açısı değeri elde etmişlerdir. Bu değerlerin; kış ayları için $\beta_{opt}=\varphi+19$ ve yaz ayları için ise $\beta_{opt}=\varphi-34$ eşitlikleri ile hesaplanabileceğini belirtmişlerdir. Eşitliklerde verilen φ , enlem ve β_{opt} ise optimum eğim açısı değeridir.

Yildirim ve Aktacir (2019) Şanlıurfa’da yaptıkları çalışmada, yıllık ortalama optimum açısı değerini $\beta_{opt}=\varphi-7$ eşitliği ile bulunabileceğini belirtmişlerdir. Optimum açısı değerini; ekim ayından mart ayına kadar $\beta_{opt}=\varphi+19$, nisan ayından eylül ayına kadar $\beta_{opt}=\varphi-28$ eşitlikleri ile bulunabileceğini belirtmişlerdir. Mevsimsel optimum açısı değerleri ile konumlandırılan panelin üzerine düşen ışınım değerinin, yıllık optimum açısı değeri ile konumlandırılan panele göre %2,5 daha fazla olduğu belirtilmiştir.

Kacan ve Ülgen (2012) İzmir’de yaptıkları çalışmada, yatay yüzey üzerine gelen, günlük güneş ışınım değerlerini ölçmüştür. Optimum eğim açısının, zamana bağlı olarak değiştiğini ve değişen değerlerin 0° ile 61° arasında olduğunu tespit etmiştir. Optimum eğim açısının, mevsimsel olarak bakıldığında, kışın $55,7^\circ$, ilkbaharda $18,3^\circ$, sonbaharda 43° ve yazın $4,3^\circ$ olduğunu belirtmişlerdir. Tüm yıl sabit kalacak paneller için yıllık optimum eğim açısının $30,3^\circ$ olmasının, en yüksek enerji üretimi sağlayacağı belirtilmiştir. Optimum eğim açısı hesaplanmasında kullanılan eşitlikler ile elde edilen ölçüm sonuçları karşılaştırılmış, aradaki farkın $2,87^\circ$ ile $5,9^\circ$ arasında değiştiği tespit edilmiştir. Karşılaştırmalarında, 3° ve üzerinde fark olan eşitliklerin kullanılmasının uygun olmadığını belirtmişlerdir.

Bakırcı (2009) Erzurum’da yaptığı çalışmada, güneş enerjisiyle çalışan sistemler tasarlanırken, sistemin kurulacağı bölgenin güneş ışınım değerlerinin bilinmesinin önemli olduğunu, bu değerlerin bilinmediği yerlerde uygun eşitlikler kullanılarak hesaplanabileceğini belirtmiştir. Çalışmasında, yüzeye gelen anlık global güneş ışınımını, basit bir hesaplama metodu ile belirlemiş ve elde ettiği ölçüm değerleri ile hesapladığı değerleri karşılaştırmıştır. Hesapladığı ve elde ettiği değerlerin arasında büyük farklılıkların olmadığını gözlemlemiştir. Anlık en yüksek ışınımın değerinin tahmin edilebilmesi için basit eşitlikler geliştirmiştir.

Etcı ve Bilhan (2022), güneş enerji potansiyeli yüksek olan Konya’da yaptıkları çalışma ile sabit PV panel ile iki eksenli güneş takibi yapan sistemin enerji analizini, PVSyst yazılım programını kullanarak yapmışlardır. Çalışmanın sonucunda, sabit güneş sistemi 193.7 MWh/yıl, çift eksenli güneş takipli sistem 232.4 MWh/yıl enerji üretmiştir. Çift eksenli sistem, sabit sisteme göre %16,7 daha fazla enerji ürettiğini belirtmişlerdir.

Peng ve diğ. (2017) çalışmasında, PV panellerinin ürettikleri gücü, etkileyen en önemli etkenlerden birisinin panel yüzey sıcaklığı olduğu belirtmiştir. Çalışma, PV panelin farklı güneş radyasyon koşullarında; güç ve verimlilik değerleri karşılaştırılarak yürütülmüştür. Panelin soğutulması ile elde edilecek verim artışı araştırılmıştır. Sonuç olarak, PV panel veriminin, panelin soğutulması ile yaklaşık %47 değerinde artış gösterdiğini tespit etmişlerdir.

Çakır ve Türkay (2023) güneş takip sistemlerinde, maksimum güç noktası takibinde kullanılan iki algoritmanın karşılaştırmasını Matlab/Simulink programı ile yapmışlardır. Çalışmalarında; PV güneş takip sistemleri uygulamalarında sıklıkla kullanılan, Değiştir ve Gözle (Perturb and Observe - P&O) ve Artan İletkenlik (Incremental Conductance - IC) algoritmalarını karşılaştırmışlardır. İki algoritmada yeterli performans sergilediğini, değişen ışığa ve sıcaklık değerleri altında karşılaştırıldığında, artan iletkenlik algoritmasının maksimum güç noktasına daha hızlı ulaştığı ve stabil kaldığını belirtmişlerdir.

2. GÜNEŞ ENERJİSİ

2.1 Ülkemizde Güneş Enerjisi

Türkiye'nin kurulu gücü yıllar itibariyle artış göstermiştir. 1974 yıllarında mevcut kurulu gücü yaklaşık 3792 MW iken, 2022 yılı sonu itibariyle yaklaşık 104000 MW civarındadır (TEİAŞ 2023).

2011 ve 2021 yıllarının Türkiye'nin birincil enerji kaynaklarına göre kurulu güçleri kıyaslandığında, güneş enerjisinde 2011 yılında üretim yok iken 2021 yılında yaklaşık 7816 MW seviyesine yükselmiştir. 2022 yılı sonu itibariyle ise 9425 MW seviyesine yükselmiştir (TEİAŞ 2023).

Tablo 2.1'de Türkiye'nin kurulu gücünün yüzdesel miktarları verilmiştir. Türkiye'nin 2021 yılındaki güneş enerjisinin, toplam kurulu güce oranı incelendiğinde, %7,83 orana ulaştığı görülmektedir (TEİAŞ 2023). 2022 yılı sonu için ise bu oran %9,08 olarak gerçekleşmiştir.

Tablo 2.1: 2011 ve 2021 yılları Türkiye'nin yüzdesel kurulu gücü (TEİAŞ 2023)

	Kömür	Sıvı Yakıtlar	Doğal Gaz	Yenilenebilir + Atık + Atık Isı	Çok Yakıtlı	Hidrolik	Jeotermal	Rüzgar	Güneş	Toplam
2011	12.550,3	1.300,4	13.143,9	125,7	6.810,8	17.137,1	114,2	1.728,7	-	52.911,1
%	23,72	2,46	24,84	0,24	12,87	32,39	0,22	3,27	-	100,00
2021	19.641,5	135,4	21.502,5	2.051,1	4.897,8	31.492,6	1.676,2	10.607,0	7.815,6	99.819,6
%	19,68	0,14	21,54	2,05	4,91	31,55	1,68	10,63	7,83	100,00

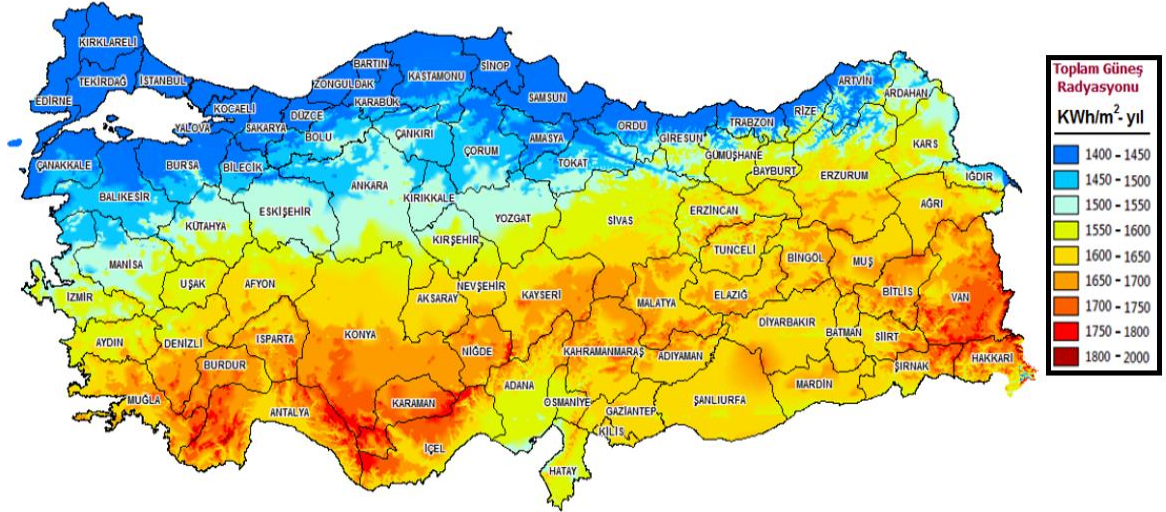
Tablo 2.2'de Türkiye'nin elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara göre dağılımı verilmiştir (TEİAŞ 2023). 2021 yılı için elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara göre oranları incelendiğinde, toplam üretimin %4,17'sinin güneş enerjisinden karşılandığı görülmektedir. Türkiye'nin 2022 yılı sonu toplam üretimin yaklaşık 326 TWh olduğu

ve Türkiye Ulusal Enerji Planı çalışmasının sonuçlarına göre elektrik tüketiminin, 2025 yılında 380,2 TWh, 2030 yılında 455,3 TWh, 2035 yılında ise 510,5 TWh seviyesine ulaşması beklenmektedir. Bu üretimin %34,6'sı kömürden, %22,2'si doğal gazdan, %20,6'sı hidrolik enerjiden, %10,8'i rüzgârdan, %4,7'si güneşten, %3,3'ü jeotermal enerjiden ve %3,7'si diğer kaynaklardan elde edilmiştir (Enerji 2023). Üretim artışı ve yapılan çalışmalardan görülmektedir ki, Türkiye'nin enerji ihtiyacı ve bu ihtiyaca paralel olarak da güneş enerjisine olan ihtiyaç hızla artacaktır.

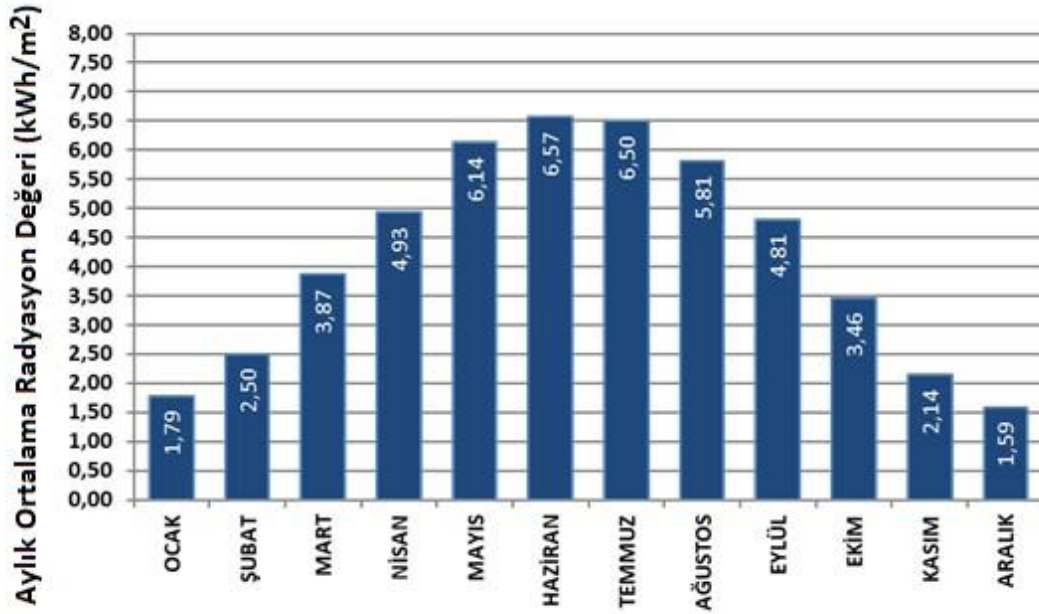
Tablo 2.2: 2021 yılı Türkiye elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara göre dağılımı (TEİAŞ 2023)

KAYNAK	ÜRETİM (GWh)	KATKISI (%)
İthal Kömür	54.948,4	16,42
Taşkömürü + Asfaltit	5.450,3	1,63
Linyit	42.983,3	12,84
Doğal Gaz	111.180,8	33,22
Sıvı Yakıtlar	281,5	0,08
Barajlı	40.746,3	12,17
D.Göl ve Akarsu	15.180,5	4,54
Rüzgar	31.436,7	9,39
Yenilenebilir+Atık+Atık Isı	7.779,1	2,32
Jeotermal	10.793,2	3,22
Güneş	13.942,9	4,17
TOPLAM	334.723,1	100,00

Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlasına (GEPA) göre, ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2741 saat olup, günlük güneşlenme süresi 7,2 saattir. Ortalama yıllık toplam ışıınım değeri 1527,46 kWh/m² olarak hesaplanmıştır. GEPA'da yer alan genel potansiyel görünümü Şekil 2.1'de ve aylık ortalama global radyasyon dağılımı Şekil 2.2'de yer almaktadır (Enerji 2023). Ülkemiz, coğrafi konumu nedeniyle önemli bir güneş enerjisi potansiyeline sahiptir. Ülkemizde güneş enerjisi ve bununla birlikte güneş panellerinden verim artışı ile ilgili yapılan çalışmaların artarak devam edeceği düşünülmektedir.



Şekil 2.1: Türkiye güneş enerjisi potansiyeli (Enerji 2023)



Şekil 2.2: Türkiye aylık ortalama global radyasyon dağılımı (Enerji 2023)

Tablo 2.3'te ülkemizin aylık ortalama güneş enerjisi potansiyeli ve Tablo 2.4'te ülkemizin güneş enerjisi potansiyelinin bölgelere göre dağılımı verilmiştir (Ajder 2011).

Tablo 2.3: Türkiye aylık ortalama güneş enerjisi potansiyeli (Ajder 2011)

AYLAR	AYLIK TOPLAM GÜNEŞ ENERJİSİ		GÜNEŞLENME SÜRESİ (Saat/ay)
	(kcal/cm ² -ay)	(kWh/m ² -ay)	
OCAK	4,45	51,75	103
ŞUBAT	5,44	63,27	115
MART	8,31	96,65	165
NİSAN	10,51	122,23	197
MAYIS	13,23	153,86	273
HAZİRAN	14,51	168,75	325
TEMMUZ	15,08	175,38	365
AĞUSTOS	13,62	158,4	343
EYLÜL	10,6	123,28	280
EKİM	7,73	89,9	214
KASIM	5,23	60,82	157
ARALIK	4,03	46,87	103
TOPLAM	112,74	1311	2640
ORTALAMA	308,0 cal/cm ² -gün	3,6 kWh/m ² -gün	7,2 saat/gün

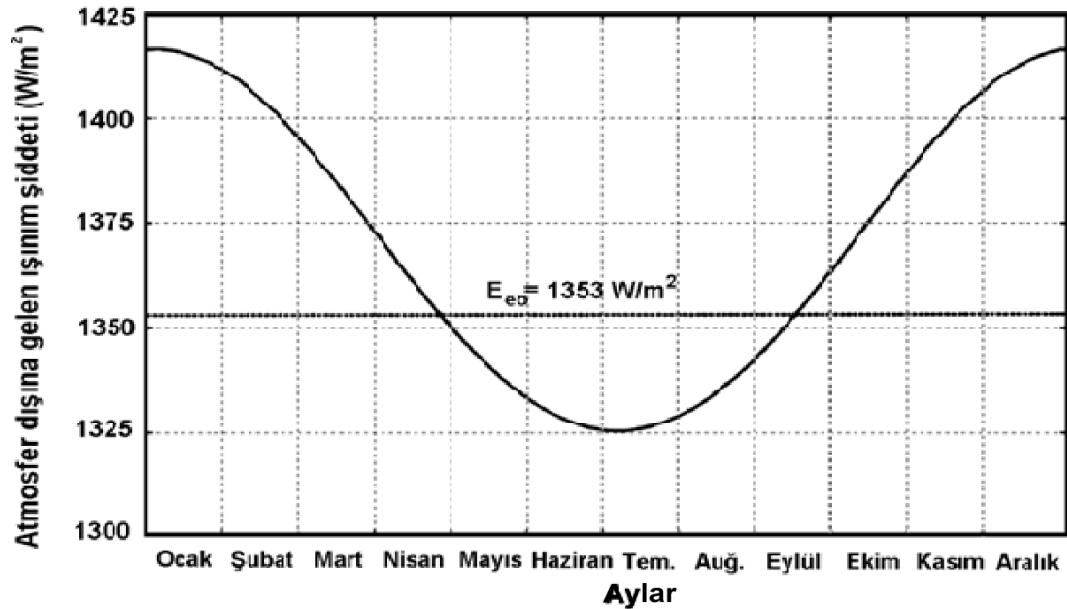
Tablo 2.4: Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyelinin bölgelere göre dağılımı (Ajder 2011)

BÖLGE	TOPLAM GÜNEŞ ENERJİSİ (kWh/m ² -yıl)	GÜNEŞLENME SÜRESİ (Saat/ Yıl)
G.DOĞU ANADOLU	1460	2993
AKDENİZ	1390	2956
DOĞU ANADOLU	1365	2664
İÇ ANADOLU	1314	2628
EGE	1304	2738
MARMARA	1168	2409
KARADENİZ	1120	1971

2.2 Güneş Işınları ve Açıları

Güneş, çok yoğun sıcak gazlardan oluşur. $1,39 \times 10^9$ m çapında bir küredir. Dünyaya olan uzaklığı yaklaşık $1,5 \times 10^{11}$ m'dir. Kendi etrafında dönüşünü bir ayda tamamlar. Güneş ışınlarının dik gelebileceği birim alana, birim zamanda gelen güneş enerjisi 1367 W/m^2 'dir. Güneşin çekirdeğindeki sıcaklık yaklaşık olarak 15 milyon °C'dir. Saniyede yaklaşık 650 milyon ton hidrojen, helyuma dönüşür ve 5 milyon ton maddenin enerjiye dönüşümü gerçekleşir. Ortaya çıkan bu enerjinin çok az bir kısmı dünyamıza ulaşır (Duffie ve Beckman 2013).

Atmosfer dışına ulaşan ışınım miktarı, dünyanın güneş etrafındaki yörüngesi boyunca farklılıklar gösterir. Bunun sebebi güneş ve dünya arasındaki uzaklığın yıl içerisinde 147 milyon km ile 152 milyon km arasında değişmesidir. Bu değişim atmosfer dışına gelen ışınım miktarının da 1325 W/m^2 ile 1420 W/m^2 arasında değişmesine sebep olur. Atmosfer dışına gelen yıllık ortalama güneş ışınımı yaklaşık 1367 W/m^2 'dir. Bu değere güneş sabiti denir (Quaschnig 2005). Atmosfer dışına gelen ışınım miktarının aylara göre değişimi Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



Şekil 2.3: Atmosfer dışına gelen ışınım şiddeti (Quaschnig 2005)

Yeryüzüne ulaşan toplam ışınım, direkt (dolaysız) ve yayılı (dolaylı) ışınım olarak ikiye ayrılır; güneşten doğrudan gelen ışınımına direkt ışınım ismi verilirken,

güneş ışınımının direkt olarak gelmediği, belirli yönü ve doğrultusu bulunmayan, yeryüzüne dağınık olarak ulaşan kısmıdır (Güngül 2018). Hava şartlarının farklı olduğu zamanlar için, toplam ışınım değeri ve toplam ışınım değeri içinde bulunan yaygın ışınımın yüzdeleri Tablo 2.5'te verilmiştir (Batman 2001).

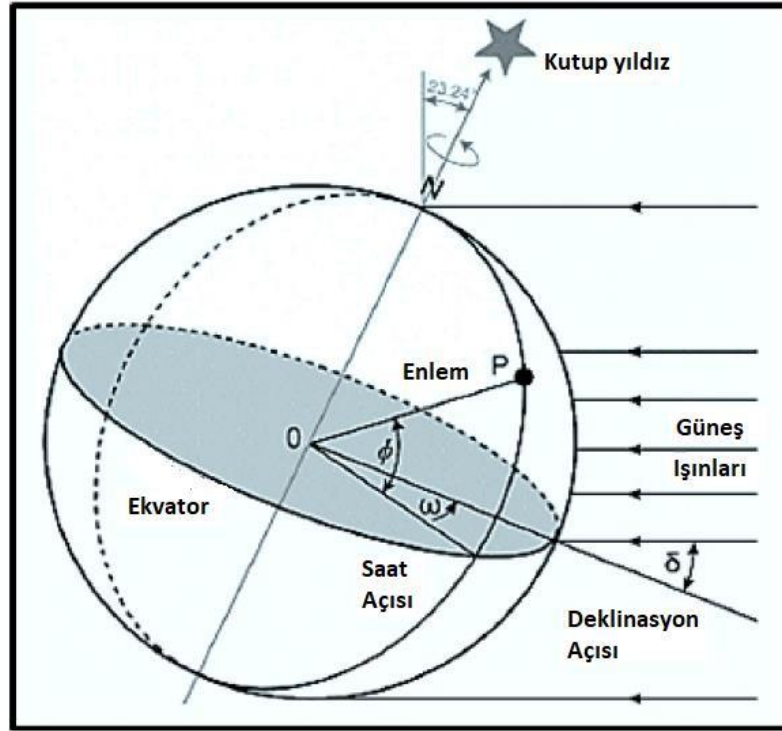
Tablo 2.5: Farklı hava şartları için yaygın ve toplam ışınım miktarları (Batman 2001)

Hava Durumu	Toplam ışınım	Yaygın (Dolaylı) ışınım
Açık	600 - 1000 W/m ²	% 10 - 20
Puslu	200 - 400 W/m ²	% 20 - 80
Tam kapalı	50 - 150 W/m ²	% 80 - 100

Güneşin, yeryüzündeki bir noktaya göre, gökyüzündeki konumunun hesaplanabilmesi için bazı açıların biliniyor olması gerekir. Sabit veya hareket edebilen bir düzlemin yüzeyine gelen güneş ışın miktarı, düzlemin bulunduğu yerin enlem, boylam durumuna ve zaman dilimlerine göre değişmektedir. Düzlemin konumu ve eğimi, düzlemin üzerine düşen güneş ışınım miktarını değiştirir. Düzlem üzerine gelen güneş ışınımının dik açı ile gelmesi için güneşin pozisyonunu belirlenebilir olması gerekir. Güneşin pozisyonunu belirlemede ihtiyaç duyulan açılar ve tanımlar, ana ve türetilen güneş açıları olarak iki ana başlık altında verilmiştir (Yılmaz 2013).

2.2.1 Ana Güneş Açıları

Yeryüzünde bulunan bir noktaya gelen güneş ışınımının doğrultusunu, bulunulan noktanın; enlem açısı (θ), saat açısı (ω) ve deklinasyon (δ) açısı yardımıyla bulunabilir. Bu açılar, ana güneş açıları olarak isimlendirilir. Şekil 2.4'te enlem (θ), saat (ω) ve deklinasyon (δ) açısı görülmektedir.



Şekil 2.4: Enlem (ϕ), saat (ω) ve deklinasyon (δ) açısı (Muslim 2019)

2.2.1.1 Enlem Açısı (ϕ)

Yeryüzündeki bir noktayı, dünya merkezine birleştiren doğru ile ekvator çizgisine uzanan doğru arasındaki açıdır. Ekvator çizgisi başlangıç kabul edilir. Enlem açısı değerleri, ekvator çizgisinden; kuzeye doğru pozitif işaret, güneye doğru ise negatif işaret alır. Bu değer, -90° ile 90° arasında değişir (Altıntaş 2012).

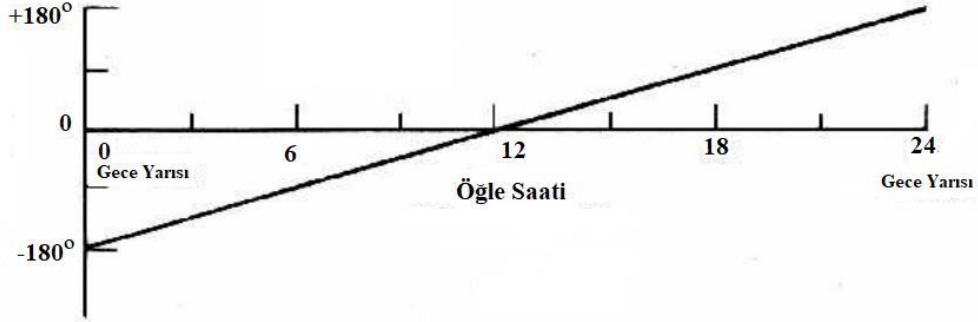
2.2.1.2 Saat Açısı (ω)

Yeryüzündeki bir noktanın boylamı ve güneş ışınlarının, dünya merkezi ile birleşimini sağlayan doğrunun, arasında kalan açıdır (Yerli 2011). Şekil 2.4'te görüldüğü gibi, yeryüzündeki bir noktanın ve güneş ışınlarının geldiği boylamın, ekvator üzerine alınan izdüşümlerini, dünyanın merkezi ile birleştiren doğrultularının arasındaki açı olur. Saat açısı, saat 12:00 başlangıç kabul edilerek ölçülür. Öğleden önceleri eksi, öğleden sonraları artı değerini alır. 1 saat, 15° saat açısına denk gelir. Bunun nedeni, dünyanın güneş etrafındaki tam turunu 360° 'lik açı yaparak

tamamlamasıdır. 360° lik bu açı 24 saate bölündüğünde 15° değerine ulaşılır. Denklem 2.1’de saat açısının hesaplanmasında kullanılan denklem verilmiştir (Altıntaş 2012).

$$w = ((\text{saat} \times 60 + \text{dakika}) - 720) / 4 \quad (2.1)$$

Saat açısının değeri, $+180^\circ$ ile -180° arasındadır. Saat açısının gün içindeki değişimi Şekil 2.5’te gösterilmiştir.

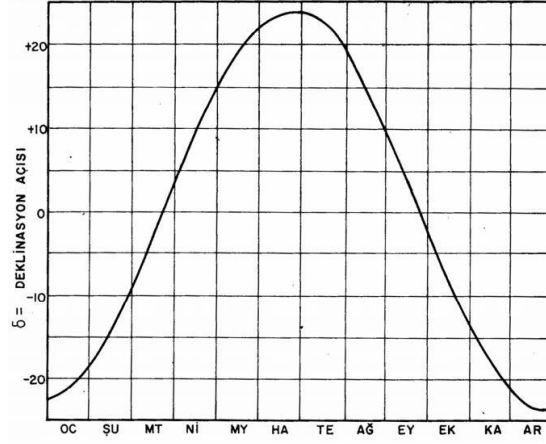


Şekil 2.5: Gün içerisinde saat açısının değişim grafiği (Beckman 1991)

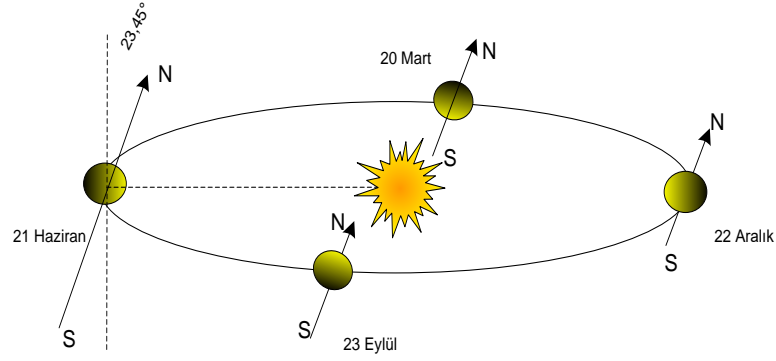
2.2.1.3 Deklinasyon Açısı (δ)

Bu açı dünya yüzeyi ile güneş ışınları arasındaki açı ilişkisi bakımından en önemlilerindedir. Deklinasyon açısı; güneş ışınları ile, ekvator düzlemi arasında kalan açıdır. Yörünge düzleminin normali ile dünyanın dönme eksenini arasında kalan değer $23,45^\circ$ ’dir. Deklinasyon açısının bir yıl içerisindeki değişimi Şekil 2.6’da verilmiştir (Altıntaş 2012).

Gece ile gündüz süresinin eşit olduğu zamanlara ekinoks denir. 20 Mart ilkbahar ekinoksu, 23 Eylül sonbahar ekinoksu olarak adlandırılır, bu tarihlerde güneş ışığı ekvatora paralel olduğu için, deklinasyon açısı sıfırdır. 21 Haziran yaz, 22 Aralık kış gündönümü olarak adlandırılır. Deklinasyon açısının değeri; yaz gündönümünde $23,45^\circ$, kış gündönümünde $-23,45^\circ$ değerini alır. Yılın farklı zamanları için deklinasyon açısı Şekil 2.7’de görülmektedir (Messenger ve Ventre 2010).



Şekil 2.6: Yıllık deklinasyon açısı değişim grafiği (Altıntaş 2012)



Şekil 2.7: Yılın farklı zamanlarında dünyanın yörüngesi ve deklinasyonu (Messenger ve Ventre 2010)

Deklinasyon açısının hesaplanmasında kullanılan, 1969 yılında Cooper tarafından oluşturulan eşitlik Denklem 2.2'de verilmiştir. Başlangıç tarihi 1 Ocak olmak üzere, hesaplamanın yapılacağı güne kadar geçen gün sayısı, n değişkeni olarak isimlendirilmiştir (Cooper, 1969). Yılın istenen herhangi bir günü için deklinasyon değeri hesaplanabilir.

$$\delta = 23,45 * \sin\left(360 \frac{n+284}{365}\right) \quad (2.2)$$

Lunde (1980) deklinasyon açısının hesaplanmasında, Denklem 2.3'ün daha doğru sonuç vereceğini savunmuştur.

$$\delta = 23,45 * \sin\left(360 \frac{n-80}{370}\right) \quad (2.3)$$

Deklinasyon açısı hesabı yapılırken, yılın tüm günleri için hesaplama yapılabilir. Bunun yanı sıra, yılın tüm günleri yerine, aylık ortalama gün değerleri ile de hesaplama yapılabilir. Bu hesaplamanın yapılabilmesi için deklinasyon açısını veren aylık ortalama günlere ihtiyaç duyulur. Deklinasyon açısını veren, ayın ortalama günleri Tablo 2.6’da verilmiştir (Duffie ve Beckman 1991).

Tablo 2.6: Deklinasyon açısını veren, ayın ortalama günleri (Duffie ve Beckman 1991)

AYLAR	Ayın Ortalama Günü	Yılın Günü (n)	Deklinasyon Açısı (δ)
OCAK	17	17	-20,92
ŞUBAT	16	47	-13,29
MART	16	75	-2,42
NİSAN	15	105	9,41
MAYIS	15	135	18,79
HAZİRAN	11	162	23,09
TEMMUZ	17	198	21,18
AĞUSTOS	16	228	13,45
EYLÜL	15	258	2,22
EKİM	15	288	-9,6
KASIM	14	318	-18,91
ARALIK	10	344	-23,05

2.2.2 Türetilen Güneş Açıları

Yeryüzünde bir düzleme gelen güneş ışınım değeri, güneş ışınlarının doğrultusu ile alakalı açılardan faydalanılarak hesaplanabilir. Bu açılara; güneş geliş açısı (Θ), zenit açısı (Θ_z), yüzey azimut açısı (γ), güneş yükseklik açısı (α_s), güneş azimut açısı (γ_s) ve eğim açısı (β) isimleri verilir (Yılmaz 2013).

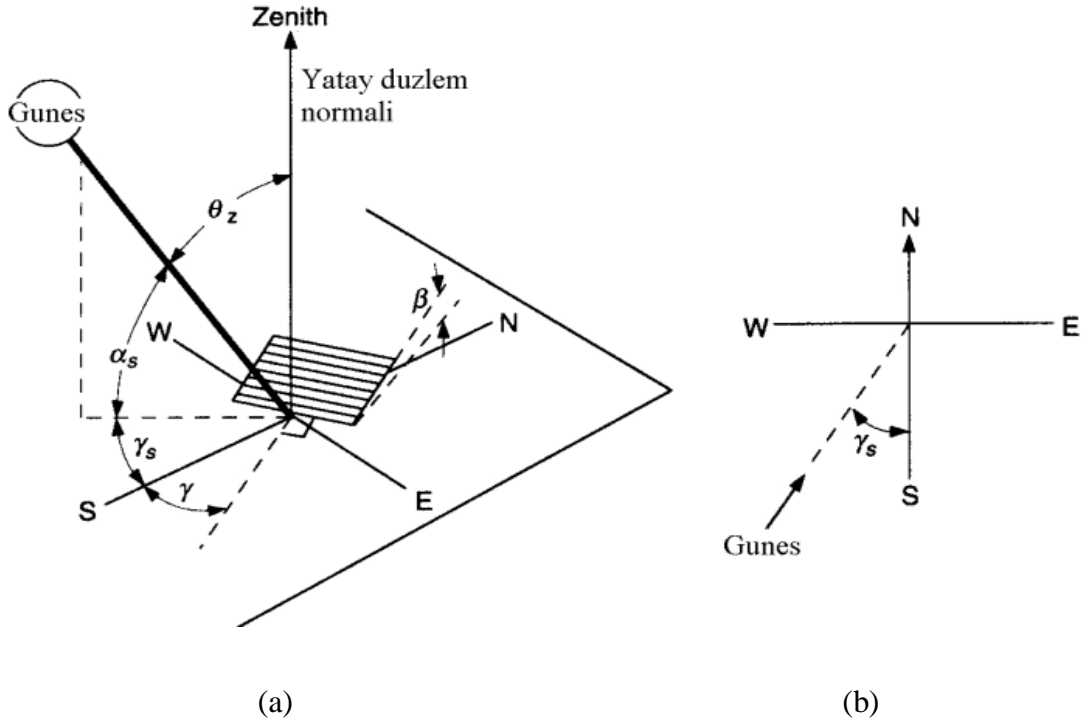
2.2.2.1 Güneş Geliş Açısı (Θ)

Bir yüzeyin normali ile o yüzeye dik olarak gelen güneş ışınının arasında kalan açı, güneş geliş açısıdır. Bu açının değeri Denklem 2.4 ile hesaplanabilir (Şenpınar 2006).

$$\cos\theta = \cos\theta_z \cdot \cos\beta + \sin\theta_z \cdot \sin\beta \cdot \cos(\gamma_s - \gamma) \quad (2.4)$$

2.2.2.2 Yüzey Azimut Açısı (γ)

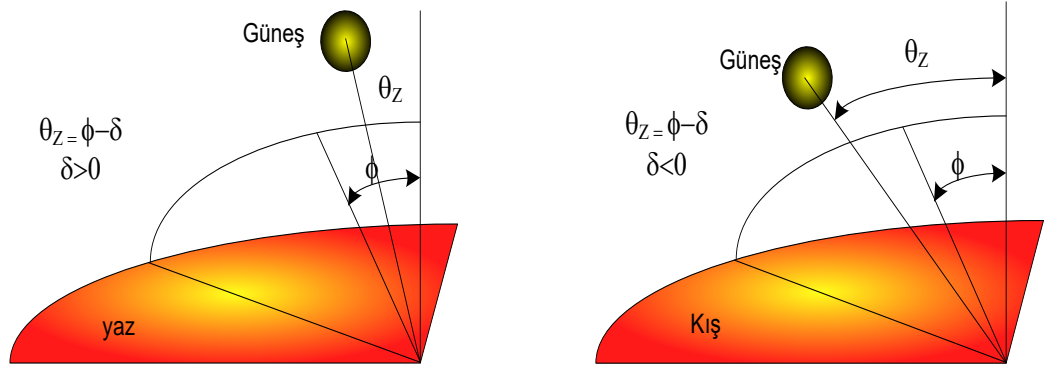
Eğik bir yüzey normalinin, yatay düzlemdeki izdüşümü ile güney doğrultusu arasında kalan açıdır. Güneyden; batıya doğru pozitif, doğuya doğru negatif açı değerleri oluşturur. Yüzey azimut açısının gösterimi Şekil 2.8’de verilmiştir.



Şekil 2.8: (a) Eğimli bir yüzey için güneş azimut açısı (b) Güneş azimut açısı (Duffie ve Beckmann 2013)

2.2.2.3 Zenit Açısı (θ_z)

Güneş ışınlarının, yatay düzlem normalini ile yaptığı açıdır. Zenit açısı, güneşin doğuşu ve batışı anlarında 90° ’dir. Güneş ışınları dik bir açı ile geldiği zaman, zenit açısı 0° olur. Zenit açısının yaz ve kış mevsimindeki değişimi, deklinasyon ve enlem açıları ile birlikte Şekil 2.9’da gösterilmektedir (Duffie ve Beckmann 2013).



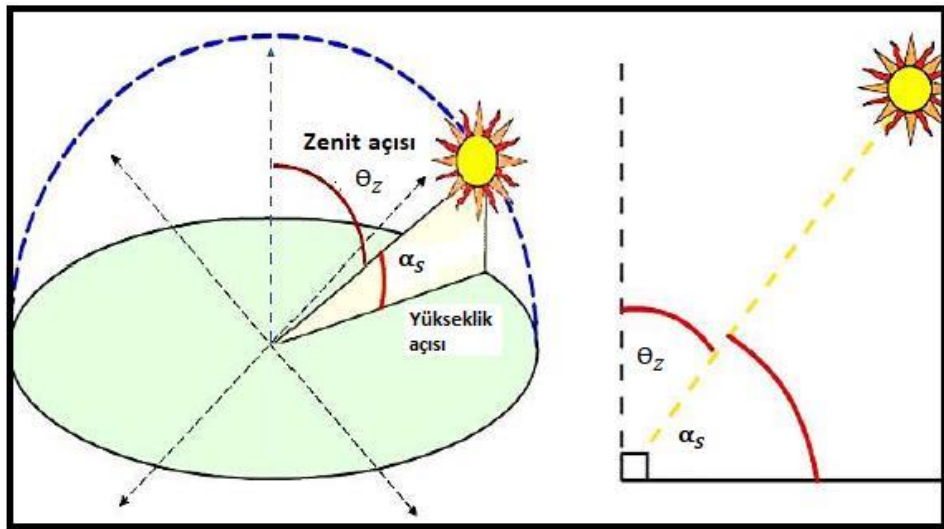
Şekil 2.9: Yaz ve kış mevsiminde öğle saatinde θ_z , δ ve ϕ açısı arasındaki ilişki (Yılmaz 2013)

2.2.2.4 Güneş Yükseklik Açısı (α_s)

Güneş ışınları ile yerel yatay yüzeyin oluşturduğu açıdır. Zenit açısının tümler açısıdır ($\theta_z + \alpha_s = 90^\circ$). Zenit açısı ile güneş yükseklik açısı arasında trigonometrik olarak;

$$\cos\theta_z = \sin\alpha_s$$

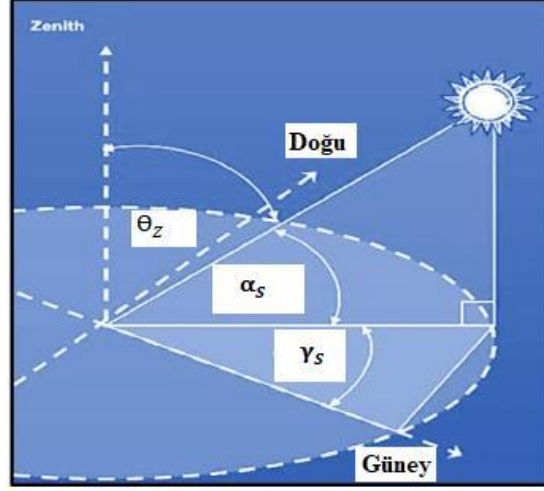
bağıntısı yazılabilir. Zenit açısı, güneş yükseklik açısı ve iki açı arasındaki ilişki Şekil 2.10'da görülmektedir (İlcihan 2019).



Şekil 2.10: Zenit açısı ve güneş yükseklik açısı (Muslim 2019)

2.2.2.5 Güneş Azimut Açısı (γ_s)

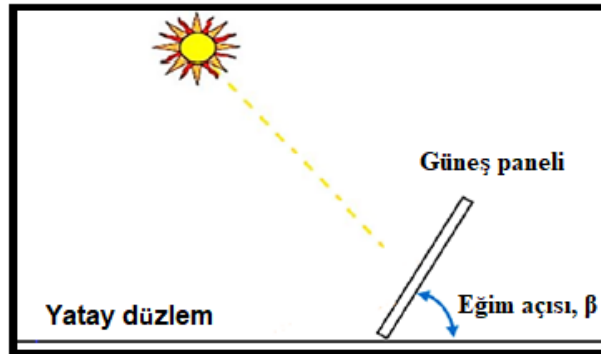
Güneş ışınlarının yatay düzlem üzerindeki izdüşümünün güney doğrultusu ile yaptığı açıdır. Güney başlangıç kabul edilir ve 0° 'dir. Güneyden; batıya doğru pozitif, doğuya doğru negatif değer alır. Bu değer, -180° ile 180° arasında değişir. Güneş azimut açısı, zenit ve güneş yükseklik açısı Şekil 2.11'de gösterilmiştir (İlcihan 2019).



Şekil 2.11: Zenit, güneş azimut ve güneş yükseklik açısı (Muslim 2019)

2.2.2.6 Eğim Açısı (β)

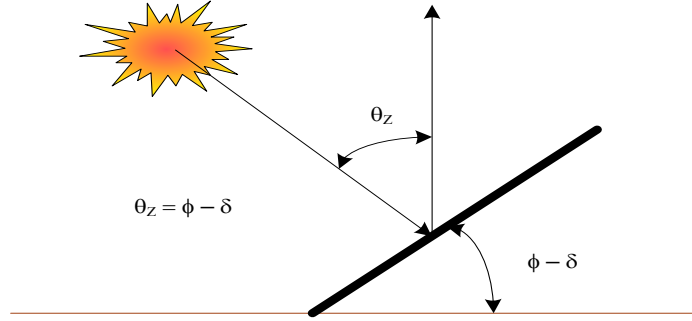
Eğim açısı, panel ile yatay yüzey düzlemi arasında kalan açıdır. Yatay düzlemden 0° ile başlayıp pozitif değerler olarak 90° 'ye kadar değer alır. Eğim açısı Şekil 2.12'de eğim açısı gösterilmiştir.



Şekil 2.12: Yatay düzlemdeki panel eğim açısı (Muslim 2019).

2.3 Optimum Açı

Yıl içerisinde herhangi bir günde güneş enerjisinden optimum performans sağlamak için sabit güneş paneli düzeneğinin Şekil 2.13'teki gibi yatayla $\phi - \delta$ açısına sahip olacak şekilde monte edilmesi gerekmektedir (Messenger ve Ventre 2010). Yapılacak hesaplama ile güneş ışınlarının panele dik olarak gelmesi sağlanmış olacaktır. Denklem 2.2'deki Cooper formülü veya Denklem 2.3'deki Lunde formülü ile istenilen bir gün için deklinasyon açısı hesaplanabilir ve panelin bulunduğu enlem koordinatlarına göre $\phi - \delta$ hesabı yapılarak güneş paneli için belirli aralıklarda optimum açı bulunabilir.



Şekil 2.13: Sabit güneş panelinin optimum montaj açısı (Messenger ve Ventre 2010)

Panellerin optimum açı değerinin belirlenmesinde en kolay yöntemlerden birisi HW metodudur. Bu metottaki hesaplamalar bulutsuz, çevrede engel veya yansıtıcıların olmadığı ideal şartlarda yapılmaktadır. Bu durum panel eğim açısının basit bir şekilde bulunmasını sağlamaktadır. Daha çok sistem tasarımlarında ön analiz yapılırken kullanılan bir yöntem olarak bilinmektedir. Panelin eğim açısını $\beta = \phi - \delta$ denklemi ile ifade eder (Çağlar 2018).

Bazı araştırmacılar, kuzey yarım kürede optimum eğim açısını $\beta_{opt} = \phi \pm 15^\circ$ olarak tanımlamışlardır. Duffie ve Beckman (2013) bu değer $(\phi + 15^\circ) \pm 15^\circ$ arasında olması gerektiğini belirtmiştir. Bazı çalışmalarda optimum eğim açısı için enleme bağlı değişik öneriler getirilmiştir. Chiou (1986) ısıtma sezonunda bu değer $\approx 30^\circ$ ($\beta_{opt} = \phi + 10^\circ$) olduğu sonucuna ulaşmıştır. Elasyed (1989) düzlemsel toplayıcılarda tek ve çift cam uygulamasının optimum eğim ve yüzey azimut açısını etkilemediğini ortaya koymuş, eğim açısındaki $\pm 10^\circ$ değişimin aylık yutulan güneş ışınım değerini %3'ten daha az etkilediğini belirtmiştir.

Tiris ve Tiris (1998), Gebze için optimum eğim açısı değerleri $\beta_{opt.yıllık}=33^\circ$, $\beta_{opt.ilkbahar}=21,3^\circ$, $\beta_{opt.yaz}=6,3^\circ$, $\beta_{opt.sonbahar}=47,4^\circ$, $\beta_{opt.kış}=58^\circ$ olarak bulmuştur. Bari (2000), enlemi $1-7^\circ$ K arasında olan Malezya’da, kurutma ve tuz distilasyonu için kullanılan toplayıcıların optimum eğim açılarını hesaplamış, Haziran-Temmuz döneminde $\beta_{opt}=25^\circ$, Ekim-Ocak döneminde $\beta_{opt}=32^\circ$, Temmuz-Eylül döneminde $\beta_{opt}=15^\circ$ değerlerini bulmuştur. Yakup ve Malik (2001), enlemi $4,9^\circ$ K olan Brunei’de her ayın sabah, öğle ve öğleden sonra periyodunda optimum eğim açılarını elde etmiştir. Lewis (1987), optimum eğim açısı için $\beta_{opt} = \phi \pm 8^\circ$ değerine uygun iki farklı teorik model geliştirmiştir.

İzmir ilinde yatay yüzey üzerine gelen, günlük toplam ve yayılı güneş ışınım değerleri ölçülerek, güneş enerjisi toplayıcılarının optimum eğim açısı, zamana bağlı olarak 0° ile 61° arasında hesaplanmıştır. Kış aylarında optimum eğim açısının $55,7^\circ$, ilkbahar ve sonbahar aylarında $18,3^\circ$ - 43° , yaz aylarında ise $4,3^\circ$ olduğu ortaya konmuştur. Bütün yıl boyunca sabit optimum eğim açısı değeri ise $30,3^\circ$ olarak elde edilmiştir. Ölçülen bu değerler, optimum eğim açısı hesaplama yöntemleriyle karşılaştırılmış ve $2,87^\circ$ ile $5,9^\circ$ arasında değişen sapmalar gözlenmiştir. 3° 'nin üzerinde gözlenen sapmaların elde edildiği eşitliklerin uygun olmadığı sonucuna ulaşılmıştır (Kaçan ve Ülgen 2012).

Tiris ve Tiris (1998) ile Ertekin ve diğ. (2008) çalışmalarında optimum eğim açısının hesaplanması için eşitlikler geliştirmiştir. Tiris ve Tiris $40,75^\circ$ K enlemindeki Gebze bölgesi için eşitlikler geliştirmiş, bunlardan dört tanesi Denklem (2.5-2.8) seçilerek karşılaştırmalarda kullanılmıştır (Tiris ve Tiris 1998). Ayrıca Ertekin ve arkadaşlarının Türkiye geneli için, (ϕ) , (n) parametrelerine bağlı geliştirdikleri Denklem 2.9’da (Ertekin ve diğ. 2008) karşılaştırmalarda kullanılmıştır;

$$\beta_{opt.} = 33,24 - 1,31 (\delta) \quad (2.5)$$

$$\beta_{opt.} = 35,15 - 1,37(\delta) - 0,007(\delta)^2 \quad (2.6)$$

$$\beta_{opt.} = 35,15 - 1,39(\delta) - 0,007(\delta)^2 - 4,26 \times 10^{-5}(\delta)^3 \quad (2.7)$$

$$\beta_{opt.} = 22,09 + 25,79(K_T) - 1,49(\delta) \quad (2.8)$$

$$\beta_{opt.} = 25,521438 + 26,838291\cos(-0,017844\phi + 1,013901n + 7,527742) \quad (2.9)$$

Kaçan ve Ülgen (2012) yaptıkları çalışmada, Denklem 2.5-2.9 her bir eşitlik için optimum eğim açısını hesaplamışlar ve çalışmalarında elde ettikleri değerler ile karşılaştırmışlardır. Çalışma ile ilgili değerler Tablo 2.7’de verilmiştir.

Tablo 2.7: Elde edilen ve hesaplanan değerler (Kaçan ve Ülgen 2012)

AYLAR	Elde edilen Değer	Hesaplanan Değerler									
		Denklem 2.5	Sapma	Denklem 2.6	Sapma	Denklem 2.7	Sapma	Denklem 2.8	Sapma	Denklem 2.9	Sapma
	(°)	(°)	(°)	(°)	(°)	(°)	(°)	(°)	(°)	(°)	(°)
OCAK	58	61	3	61	3	62	4	65	7	50	8
ŞUBAT	48	50	2	52	4	52	4	54	6	41	7
MART	34	36	2	38	4	39	5	39	5	29	5
NİSAN	17	21	4	22	5	22	5	22	5	15	2
MAYIS	4	9	5	7	3	6	2	9	5	4	0
HAZİRAN	0	3	3	0	0	-1	-1	4	4	-1	1
TEMMUZ	1	5	4	3	2	2	1	8	7	2	-1
AĞUSTOS	12	16	4	15	3	15	3	19	7	11	1
EYLÜL	28	30	2	32	4	32	4	35	7	25	3
EKİM	45	46	1	48	3	48	3	51	6	38	7
KASIM	56	58	2	59	3	59	3	63	7	49	7
ARALIK	61	63	2	63	2	64	3	67	6	52	9
Ortalama	30,33	33,21	2,87	33,25	2,91	33,35	3,01	36,24	5,90	26,25	4,09

Tablo 2.7’deki değerler incelendiğinde, en yüksek sapmanın $5,9^\circ$ ile Denklem 2.8’de, en düşük sapmanın $2,87^\circ$ ile Denklem 2.5’te olduğu görülmektedir. Denklem 2.2 ve Denklem 2.3 ile verilen eşitliklerin deklinasyon açısı hesaplanmasında, Denklem 2.5 ile verilen eşitliğin ise PV panelin optimum eğim açısının belirlenmesinde kullanılmasının uygun olduğu görülmüştür.

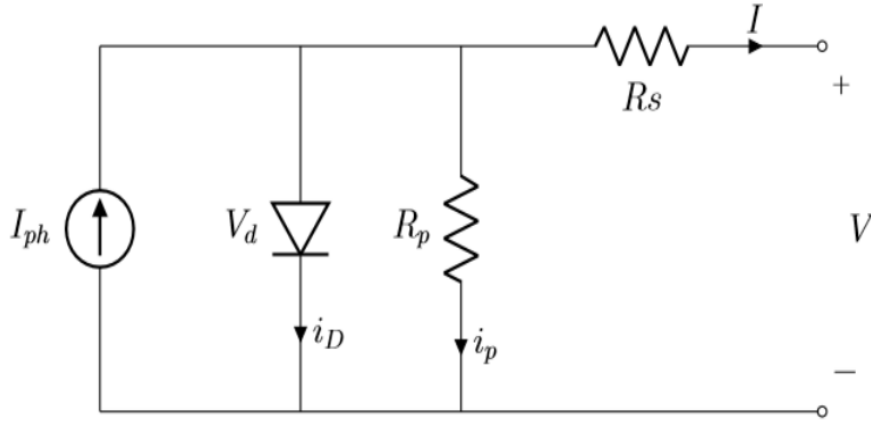
3. FOTOVOLTAİK YAPI

3.1 Fotovoltaik Tarihçesi

Güneş enerjisinde doğrudan elektrik enerjisi üretmeye sağlayan yapılara Fotovoltaik (PV) denilmektedir. Işık anlamına gelen photo, elektriksel gerilimin birimi volt kelimeleri ile oluşturulmuştur. PV tarihsel olarak ilk, Edmond Becquerel tarafından, elektrolit sıvı içerisinde, altın ile kaplı platinyum elektrota, güneş ışınlarının etkisi araştırılırken tespit edilmiştir. 1876 yılında PV özellik, katı bir yarı iletken madde olan selenyum maddesinde ilk defa görülmüştür. Altın ile farklı bir metalin arasına, selenyum koyarak ilk PV panel Charles Fritts tarafından hazırlanmıştır (Baker 2022). Planck'ın, ışığın parçacık yapısı ile ilgili makalesi ile 1900'lü yıllarda çalışmalar hız kazanmıştır. Wilson'un, foton ile katıların özellikleri üzerine yaptığı çalışması yayınlandı. Schottky ve Mott ilk yarı iletken diyotun teorisini 1940'larda geliştirdiler. Bipolar transistörü ise ilk, Brattain, Bardeen ve Schotky birlikte yaptılar (Messenger ve Ventre 2010). PV yapının ilk keşfinden, yaklaşık %1 verimli ilk PV hücrenin geliştirilmesi yaklaşık 50 yıl zaman almıştır. PV yapının, veriminin artırılması için gerçekleşen ilk çalışma 1954 yılında oldu. Silikon maddeden %6 verimle çalışan ilk PV hücre yapısı; Pearson, Chapin ve Fuller tarafından üretilmiştir. PV hücre, Vanquard I Orbitin uydusunda 1958 yılında kullanılmış, Galyum arsenik yapılı PV hücreler ise 1960 yılında üretilmiştir. Galyum arsenik yapılı PV hücreler, silikon yapılı hücrelere göre, verim olarak düşük olmasına rağmen, çok yüksek sıcaklıkta çalışabiliyor olmaları sebebiyle üretimine devam edilmiştir. Bu hücreler, Rus yapımı uzay araçları olan Venera 2 ve Venera 3'te 1965 yılında kullanılmıştır (Bilgin 2006). Daha sonraki yıllarda ve günümüzde de uzaya gönderilen birçok araçta kullanılmıştır. 1970'li yıllarda gerçekleşen petrol krizi sonucunda artan enerji ihtiyacı ile PV yapılar ile ilgili çalışmalar hız kazanmıştır. 1993 yılında %20 verimli ilk PV hücre seri üretimi başladı. Verimin artırılmasına yönelik çalışmalar sonucunda, 2002 yılında %26 verim ile çalışan PV hücre yapısı üretildi. 2009 yılında ise %41,6 verim ile çalışan, PV hücrelerden oluşan panel geliştirildi ve üretilmeye başlandı.

3.2 Fotovoltaik Hücre Eşdeğer Devresi

PV hücre, akım kaynağı gibi davranır. Ürettiği akım (I_{ph}) değeri, üzerine aldığı ışınım ile orantılı olarak değişir. Fotovoltaik hücre üzerine ışık enerjisi düşmediğinde standart bir diyot gibi davranır. İdeal durumlar altında, PV hücrenin eşdeğer devresi paralel şekilde bağlanmış diyot ve akım kaynağı ile kurulabilir. Gerçek durumlar düşünülürse, Şekil 3.1’de gösterildiği gibi seri ve paralel bir direnç eşdeğer devreye eklenmelidir. Seri direnç (R_s) bağlanmasının sebebi, hücre bağlantılarından, p-n eklemesinin derinliğinden ve materyallerin saf olmamasından kaynaklı artan omik yüküdür. R_p direnç bağlantısı ise p-n bağlantısının sızıntı akımı dolayısıyla kaynaklanan bir omik artıştır ve malzeme kalitesi ile ters orantılıdır (İşen ve Koçhan 2020).



Şekil 3.1: Fotovoltaik hücrenin eşdeğer devresi (İşen ve Koçhan 2020)

Şekil 3.1’de verilen eşdeğer devrede, hücrenin üreteceği çıkış akımı (I) için Kirşof akımlar kanunu yardımıyla Denklem 3.1 kurulabilir.

$$I = I_{ph} - i_D - i_p \quad (3.1)$$

Burada I_{ph} , PV panel hücresinin güneş enerjisini, elektrik enerjisine dönüştürme kapasitesi ile ilgilidir. Bu akım, ışınım değeri ile doğru orantılıdır ve Denklem 3.2 ile bulunabilir. Denklemde G_{nom} değişkeni, standart test koşulları (STK) altında ışınım değeridir ve bu değer 1000 W/m^2 olarak kabul edilir. G değeri ise anlık ışınım değeridir. $I_{ph}(G_{nom})$ STK altında ışık akımıdır.

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{nom}} + I_{ph}(G_{nom}) \quad (3.2)$$

I_{SC} , PV hücresinin, STK altında kısa devre akımını, K_i , ışık akımının sıcaklıkla beraber gösterdiği değişimi ifade eden katsayısı ve Δ_T sıcaklık farkını verir.

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{nom}} (I_{SC} + K_i \Delta_T) \quad (3.3)$$

Denklem 3.1’de geçen i_D diyot akımıdır ve Denklem 3.4’te verilen diyot akım denkleminde hesaplanmaktadır (Bellia ve diğ. 2014).

$$I_D = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV_d}{mkT_C}\right) - 1 \right] \quad (3.4)$$

Denklem 3.4’te verilen eşitlik için; I_0 sızıntı akımı, V_d paralel bağlı diyotun üzerinde düşen gerilim, T_c hücre sıcaklığı, q elektron yükü, k Boltzman sabiti, m panelin malzeme seçimi ile ilişkili olan idealite faktörüdür. İdeal diyot karakteristiğine uygunluğu ile bağlantılı olan m değişkeni, ideal durumlar için 1 alınır. Şekil 3.1’deki eşdeğer devrede panel çıkışında çevre akımları yöntemi uygulandığında Denklem 3.5 elde edilmektedir.

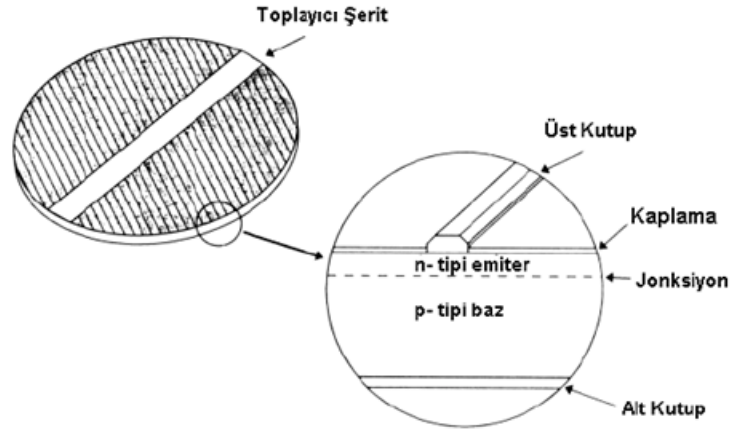
$$V_d = V + I.R_S \quad (3.5)$$

Denklem 3.2, Denklem 3.4 ve Denklem 3.5, Denklem 3.1’de yerine yazıldığında Denklem 3.6 elde edilmektedir.

$$I = \frac{G}{G_{nom}} + I_{ph}(G_{nom}) - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V+IR_S)}{mkT_C}\right) - 1 \right] - \frac{V+IR_S}{R_p} \quad (3.6)$$

3.3 Fotovoltaik Hücre Yapısı

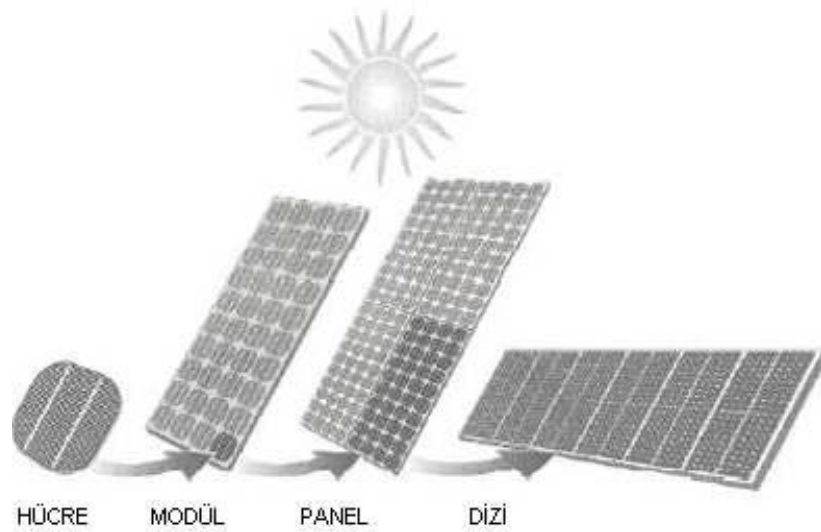
Yarı iletken maddeler; transistör, diyot, tristör, triyak gibi elektronik elemanların üretiminde kullanılır. Fotovoltaik piller ile elektronik elemanlar arasındaki fark, basitçe p ve n tipi malzemelerin birleştiği yüzeylerin büyüklüğüdür. Güneş ışınları, yüzey birleşimleri üzerine düştüğünde oluşan enerjileriyle, yarı iletken malzemenin atomunun son yörüngesinde bulunan serbest elektronlar harekete geçer ve elektrik akımı oluşur. Şekil 3.2’de silikon yapılu güneş hücresinin yapısı gösterilmiştir.



Şekil 3.2: Silikon güneş hücresi (Ajder 2011)

Güneş pilleri fotovoltajik etki prensibine göre çalışır. Bu fotovoltajik ilke güneş radyasyonunun elektrığe dönüştüğü fiziksel durumdur. Güneş ışığı yarı iletken yüzeye çarptığında ve atomun içindeki elektronlar serbest bırakıldığında fotonlar oluşur. Fotonlar, güneş radyasyonu spektrumundaki her dalga boyu için farklı miktarlarda enerjiye sahiptir. Fotonlar güneş hücresinin yüzeyine çarptığında bazıları yansıtılır, bazıları güneş pili tarafından emilir ve bazıları güneş pilinden geçer. Güneş pili tarafından emilen fotonlar elektrik üretir (Salmi ve diğ. 2012).

Tek bir PV hücrenin üretebileceği güç değeri küçüktür, daha yüksek güç değerleri elde etmek için güneş hücrelerini bağlantı şekillerine dikkat ederek bir araya getirmek gereklidir. PV hücreler, birbirine bağlanarak modülleri, modüllerin bağlanması ile paneller ortaya çıkar. PV yapılar Şekil 3.3'te verilmiştir.

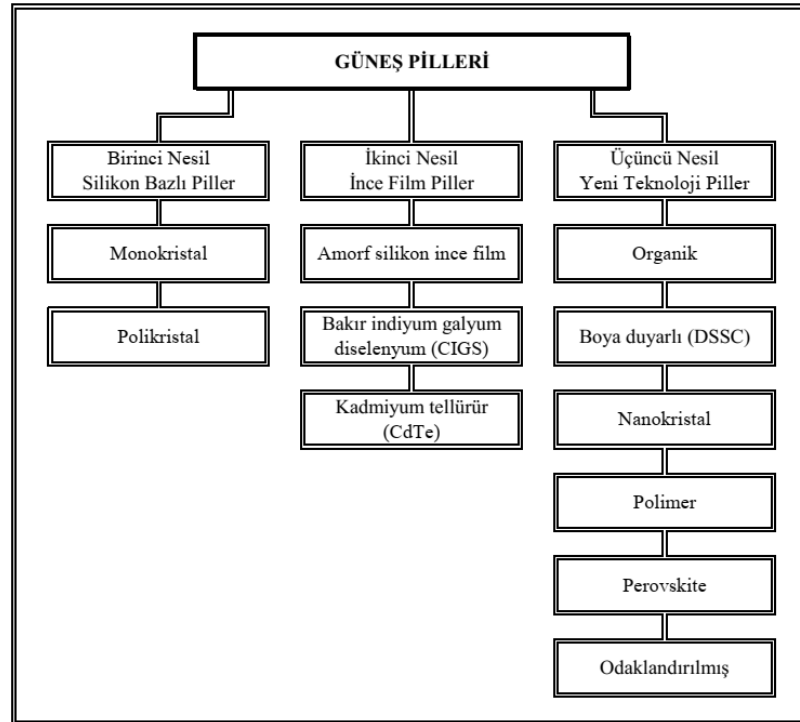


Şekil 3.3: Hücre, modül, panel, dizi (Ajder 2011)

3.4 Fotovoltaik Panel Çeşitleri

İlk PV hücre, güneş ışınlarını %1'den daha az bir verimle elektrik enerjisine dönüştürmeyi gerçekleştirmiştir. Bu gelişmeden sonra, günümüzde kullandığımız özelliklerde, silikon yarı iletken maddeden üretilmiş hücrelerden oluşan PV panellerin üretilmesi yaklaşık 120 yıl sürmüştür. Fotovoltaik hücrelerin verim artışı sağlamaya yönelik çalışmalar hızla devam etmektedir. Verim artırma çalışmaları, hem hücre üretiminde kullanılan malzeme bilimi üzerinde hem de oluşturulan panelin dış ortamı ile alınan önlemler üzerine yoğunlaşmıştır.

Güneş pilli teknolojisi gelişimi, maliyet ve verim çalışmaları sonucunda kullanılan malzeme değişimi ile üç nesil boyunca devam etmiştir. Birinci nesil güneş pillerine genel olarak bakıldığında yüksek verimli olmasının yanında, yüksek maliyeti olan monokristal silikon malzemeden oluşur. İkinci nesil güneş pillerinde maliyetin düşürülmesi ve verimin ise artırılması amaçlanmıştır. İnce film güneş pilleri esnek yapısı sebebiyle kullanım kolaylığı sağlar ve çok katmanlı yapıdan oluşması sebebiyle akım kaybı az olur. Üçüncü nesil güneş pilleri, verimleri oldukça yüksektir (Venkateswari ve Sreejith 2019). Üç nesil şeklinde sınıflandırılmış güneş pillerinin çeşitleri Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4: Güneş pili çeşitlerinin sınıflandırılması

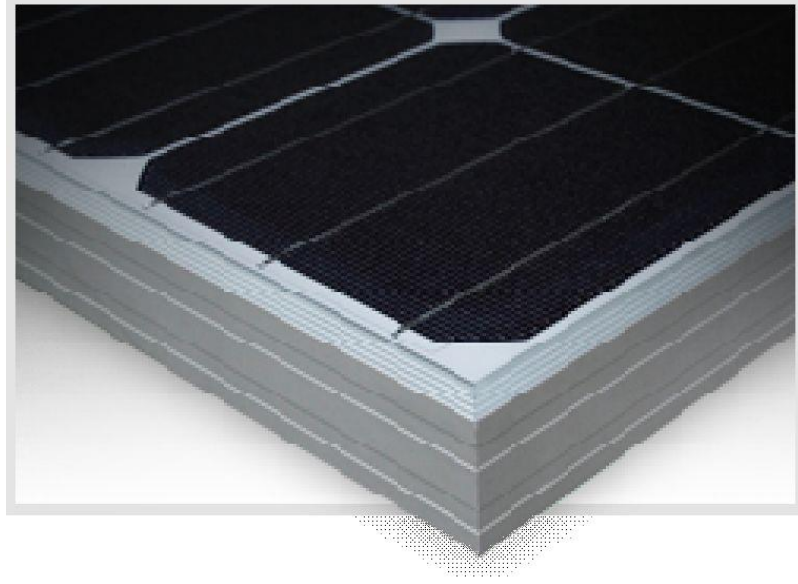
3.4.1 Birinci Nesil Güneş Pilleri

Silisyum elementinden üretilmektedir. Yapısında zehirli madde olmaması ve stabil verimliliğinin yüksek olmasından dolayı, fotovoltaik hücre üretimi için tercih edilen malzemedir. Silikon güneş pilleri; monokristal ve polikristal silikon güneş pilleri olarak iki gruba ayrılır.

Monokristal silikon güneş pilleri:

Monokristal güneş panelleri, uzun ömürlü olmaları sebebiyle yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Üretiminde, tek ve saf silikon kristali kullanıldığı için diğer güneş pilleriyle kıyaslandığında daha değerlidir. Güneş ışınlarını, elektrik enerjisine çevirebilme verimi %14-17,5 arasındadır (Venkateswari ve Sreejith 2019). Monokristal güneş pillerinin üretimleri, diğer güneş pillerine göre teknik olarak daha zordur. Bu üretim zorluğu, güneş pillerinin üretim maliyetlerini arttırmaktadır. Fakat monokristal güneş pilleri, diğer pillere göre veriminin ve dayanıklılığının yüksek olması dolayısıyla, uzun süre kullanımlar için daha uygundur (Bagher ve diğ. 2015).

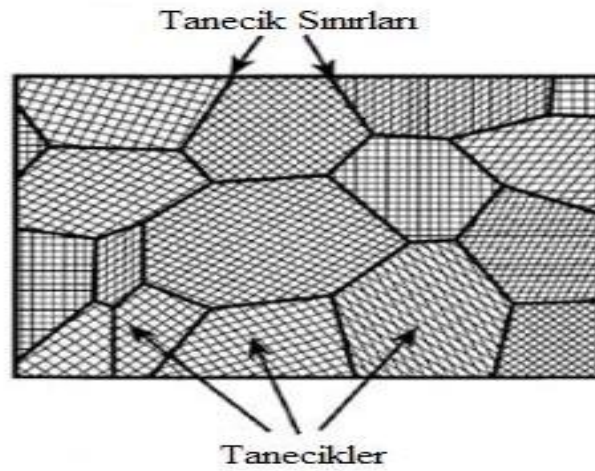
Yeryüzünde en çok kuvars, kum biçimlerinde bulunur. Derece olarak yüksek kuvarsit yatakları yaklaşık %99 katıksız silikat içerir fakat kum, silikon durumuna geçebilme oranı oldukça düşüktür. Endüstriyel kullanımlar için, doğada oldukça yüksek miktarda mevcut olan SiO_2 ve diğer silikatların %98-%99 oranında çok kristalli silikonlara çevrilmesi gerekir. PV hücre üretimlerinde çok kristalli silikon uygun değildir. Bu sebeple çok kristalli duruma çevrilmiş silikon, Czochralski saflaştırma yöntemi ile tek kristalli duruma çevrilir. Çok kristalli silikonun, tek kristalli silikona saflaştırılması pahalı bir yöntem olmasına rağmen, saha şartlarında %15-20 aralığında, laboratuvar şartlarında ise %24'lere varan verim elde etmeleri sebebiyle en tercih edilir durumdadır (Cook 1991). Şekil 3.5'te monokristalli fotovoltaik panelin görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.5: Monokristalli PV panel kesiti (Yılmaz 2013)

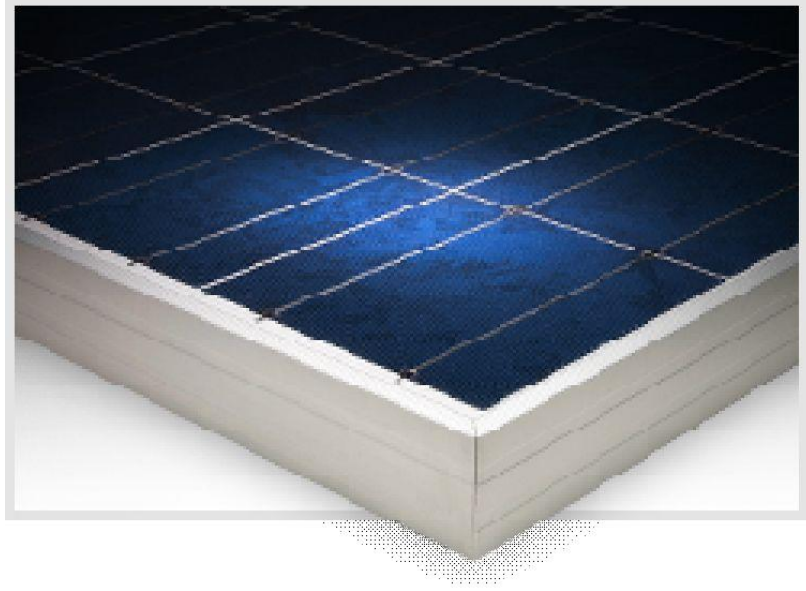
Polikristal silikon güneş pilleri:

Polikristal güneş pillerinin diğer bir adı multikristal güneş pilleridir. Multikristal güneş pilleri üretiminde çok kristalli materyal kullanılır ve bu kristal birçok yönde geliştirilebilir. Multikristal güneş pillerinin, güneş ışınlarını elektrik enerjisine dönüştürebilme verimi %12-14 arasındadır. Polikristal pillerin verimi, monokristal pillere göre düşüktür. Veriminin monokristal pillere göre düşük olmasının nedeni, multikristal yapısı içerisinde bulunan tanecik sınırları olarak isimlendirilen kusurlarının olmasıdır (Venkateswari ve Sreejith 2019). Tanecik sınırları Şekil 3.6’da gösterilmiştir.



Şekil 3.6: Polikristal yapısındaki tanecik sınırları (Bagher ve diğ. 2015)

Polikristal güneş pilleri, üretim maliyetlerinin çok yüksek olmaması sebebiyle en çok tercih edilen ve üretilen güneş pilleridir. Üretiminde silikon kullanılan güneş pilleri arasında %50'den fazla kullanım payını elinde bulundurmaktadır (Bagher ve diğ. 2015). Şekil 3.7'de polikristalli fotovoltaik panelin görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.7: Polikristalli PV panel kesiti (Yılmaz 2013)

3.4.2 İkinci Nesil Güneş Pilleri

İkinci nesil güneş pilleri; cam, metal, plastik tabanın üzerine bir ya da birden fazla fotovoltaik materyal yerleştirilmesi ile üretilen ince film formunda güneş pilleridir. Üretimlerinde; bakır indiyum galyum diselenyum (CIGS), kadmiyum tellürür (CdTe) ve amorf silikon (a-Si) materyaller kullanılır. Kristal silikon güneş pilleri ile karşılaştırıldığında (Venkateswari ve Sreejith 2019) ;

- İnce yapısı sayesinde montaj kolaylığı sağlar ayrıca esnek yüzeylerde kullanma imkânı verir,
- Üretim malzeme maliyetleri daha düşüktür,
- Değişebilen boyutlarda tasarımı mümkündür,

gibi avantajları vardır.

Bakır indiyum galyum diselenyum (CIGS)

Yarıiletken tipi olarak doğrudan bant aralığına sahiptir ve optik emilim katsayısı oldukça yüksektir. Güneş ışığını güçlü bir şekilde emer. Kadmiyum tellürür (CdTe) ince film güneş pili ile kıyaslanırsa, CIGS ince film güneş pillerinin verimi yaklaşık %12 daha yüksektir. Veriminin yüksek olması, üretim maliyetinin düşük olması nedeniyle CIGS ince film güneş pilleri, ikinci nesil ince film güneş pilleri arasında kullanım payı en fazla olanıdır. Bu güneş pilleri, silikon güneş pilleri ile kıyaslandığında ise verimleri düşük kalmaktadır (Venkateswari ve Sreejith 2019).

Kadmiyum tellürür (CdTe)

CdTe yarıiletken ince filmler, 1,45 eV yasak bant aralığı (optik bant aralığı) ve $5,1 \times 10^5 \text{cm}^{-1}$ foton soğurma katsayısı değerlerine sahip olması sebebiyle, güneş hücresi üretim malzemesi bakımından çok ilgi çekicidir (Wang ve diğ. 2015). CdTe materyalinin p tipi bir yarıiletkendir. Bu sebeple yaklaşık 140 nm kalınlıktadır. Güneşten gelen fotonların büyük kısmı 1,2 eV ile 2,0 eV yasak bant aralığındadır. CdTe materyalinin, yaklaşık 1,45 eV yasak enerji bant aralığında olduğu düşünüldüğünde güneş ışınlarını elektrik enerjisine dönüştüren güneş pilleri arasında önemli soğurucu materyal olabileceği görülmektedir (Peksöz 2016). Optik bant aralığı ve yüksek ışık emilim kapasitesi ile CdTe ince film güneş pilleri %9 ile %11 arası verim sağlar (Venkateswari ve Sreejith 2019).

Amorf silikon (a-Si)

Silikon materyalinin kristal olamayan çeşididir. Üretiminde toksik ağır metaller kullanılmadığından dolayı çevreye daha duyarlıdır. Üretim maliyetleri diğer güneş pillerinin üretim maliyetleri ile kıyaslandığında oldukça düşüktür. Bu sebeple hızlı gelişim göstermesi beklenmektedir. Yapısı çok ince olması, farklı şekillerde ve ölçülerde üretilebilmesi ve saydam yapıda olması sebebiyle farklı kullanım alanları için avantajlıdır. Günümüzde yaşam alanları üzerinde güneş pilleri ile enerji üretiminin gerekliliği artmaktadır. Bina cephe kaplaması, çatı uygulamaları gibi birçok alanda kullanımı artacaktır. Amorf silikon güneş pillerinin verimleri ise henüz yeterli değildir. Verimlilik kapasiteleri %5 ile %7 arasındadır.

3.4.3 Üçüncü Nesil Güneş Pilleri

Üçüncü nesil güneş pillerinin yapımında organik materyaller kullanılır. Bu organik malzemeler; boyalar, pigmentler, iletken polimerler ve sıvı kristaller gibi nanomateryallerdir. Üretim maliyetlerinin çok düşük, çevreye duyarlı olması sebebiyle kullanımı hızlı artacaktır.

Organik güneş pilleri

Organik güneş pilleri, üretim materyali olarak içerisinde organik polimerler veya moleküller bulunur. Bu organik materyaller ışığı emme ve elektrik enerjisine çevirme kapasitesine sahiptir. Organik güneş pillerinin, diğer bir ismi plastik güneş pilleridir. Hafif ve esnek yapıda olması, üretiminin kolay ve ekonomik olması avantajlarıdır (Venkateswari ve Sreejith 2019). Aynı zamanda şeffaf yapıda olması bu güneş pillerini farklı kullanım alanları bakımından daha avantajlı konuma getirir.

Boya duyarlı güneş pilleri (DSSC)

Boya duyarlı güneş pilleri (DSSC), İsviçre’de Federal Teknoloji Enstitüsü’nde 1991 yılında Gratzel ve Regan tarafından %7 verim ile keşfedilmiştir. Bu pillerin diğer bir ismi Gratzel pildir. Bu güneş pillerinin diğerlerinden farkı iki elektrot arasındaki birleşim yüzeyinde organik boya materyali kullanımınıdır. Bu materyaller; indolinler, porfirinler, kumarinler, ftalosiyeninler, polipiridiller, trifenilaminler, perilenler ve konjüge polimerler gibi boya sınıflarındandır. Bu materyaller arasında en yüksek verim ise Gratzel pillerinde kullanılan rutenyum polipiridil ve türevleridir. Boya duyarlı güneş pili, üretim maliyeti düşük olmasına rağmen optik bant aralığının çok geniş olması, güneş absorbe özelliğinin düşük olması sebebiyle kullanım oranı düşüktür. Verimleri ve kararlılıkları oldukça düşüktür (Bagher ve diğ. 2015).

Nanokristal güneş pilleri

Nanokristal güneş pilleri, silikon veya çeşitli organik materyal ile oluşturulan yüzeye, nanokristal malzeme kaplanması ile oluşturulur. Nanokristal güneş hücreleri, kimyasal, elektriksel ve optiksel verileri göz önüne alındığında enerji üretimine oldukça elverişlidir. Güneş ışınlarını, enerjiye dönüştürme verimi, silikon bazlı pillerin

yaklaşık %10 üzerindedir. Hafif, esnek ve saydam yapı özellikleri nedeniyle mimari uygulamalarda kullanımı artmaktadır. Bunlara rağmen, nanometrik boyutlarda çalışmanın özel yöntemler gerektirmesi sebebiyle ilk yatırım maliyetleri oldukça yüksektir.

Polimer güneş pilleri

Polimer güneş pillerinde, güneş ışınlarını absorbe edebilen elektron alıcı ve verici polimer tabakalardan oluşur. Alan J. Heeger, Alan MacDiarmid ve Hideki Shirakawa iletken polimerler alanı çalışmaları ile iletken özellikteki polimerleri keşfetmişler ve bu çalışmaları ile 2000 yılında Nobel Kimya Ödülü almışlardır. Esnek, sağlam, saydam, hafif, kolay şekil verilebilir yapısı yanında üretim maliyetlerinin de düşük olması avantajlarındandır. Bunun yanında verimi %15 seviyelerine ulaşabilmiştir. Veriminin düşük olması sebebiyle kullanım oranı diğer pillerin gerisinde kalmıştır.

Perovskite güneş pilleri

Diğer güneş pillerine göre kullanım oranını arttırabilmesi için; diğer pil teknolojilerinin maliyetinin düşük, veriminin ve kararlılığının yüksek olması gerekir (Song ve diğ. 2016).

Perovskite güneş pilleri, PV sistemlerin teknolojik gelişmeleri göz önüne alındığında, hızlı gelişen güneş pili teknolojilerinden biridir. Perovskite güneş pili teknolojisi ilk olarak 2012 yılında keşfedilmesine rağmen çok kısa sürede %19'un üzerinde güneş ışınlarını elektriksel güce dönüştürme verimine ulaşmıştır. Perovskite oksit minerallerden olup kristal yapısı ABX₃ mineralidir (Bagher ve diğ. 2015).

NREL (2023) verileri incelendiğinde, perovskite güneş hücreleri verimleri yaklaşık %25 seviyelerindedir. Silikon yapıları fotovoltaik hücreler ile perovskite güneş hücreleri önlü arkalı olarak kullanılması ile verimleri yaklaşık %33 seviyesine çıkarılabilmektedir. Perovskite malzemeler; güneş ışınımı absorbe oranının, verimlerinin ve ömürlerinin yüksek, üretim maliyetlerinin düşük olması sebebiyle

güneş pili üretiminde önemli bir konumdadır. Üretiminde kullanılan kurşun malzemesinin çevreye verebileceği zarar dolayısıyla dikkat edilmelidir.

Odaklandırılmış güneş pilleri

Güneş ışığını, lensler ve eğimli aynalar ile multi jonksiyon güneş pilleri üzerine yüksek ışınım düşürmek amacıyla yapılan odaklama işlemidir. Ayrıca bu sistemlerde güneş takip ve soğutma sistemleri kullanılarak verim artışı sağlanabilmektedir. Tüm bu verim artış işlemlerinin uygulanması sonucunda, verim %41'den fazla seviyeye çıkabilmektedir (Bagher ve diğ. 2015). NREL (2023) verileri incelendiğinde 2022 yılı sonu için bu değer %47,6 seviyesine yükseldiği görülmektedir.

Diğer güneş pilleri

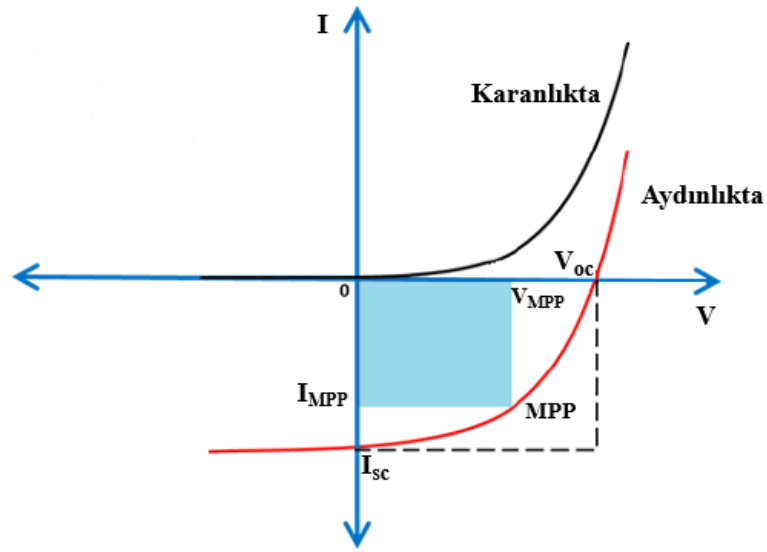
Atomlarının kararlı bir kristal yapıya sahip olmadığı, amorf maddesinden üretilen amorf güneş pilleri yaklaşık %14 verim ile çalışabilmektedir.

Galyum ve arsenit elementlerinden oluşturulan GaAs güneş pilleri sıcaklık dirençleri oldukça yüksektir. Silikon yapılu hücreler, hücre sıcaklığının yükselmesi ile performansları düşer ve enerji üretmez duruma gelir. GaAs piller ise bu durumdan daha az etkilenir. Düşük ışınım değerlerinde, silikon yapılu pillere göre daha duyarlıdır. Verimleri yaklaşık %30 seviyesindedir. Avantajları özelliklerinin fazla olmasına rağmen, üretim maliyetinin yüksek olması ve arsenik malzemesinin zehirleyici olması sebebiyle kullanım oranı düşük kalmıştır. Araştırma çalışmalarının en çok yoğunlaştığı güneş pilleri arasındadır.

Çoklu birleşim noktası ile çeşitli maddelerin katmanlı bir şekilde kullanılması ile oluşturulan PV hücre yapıları ile yüksek verimler alınmaktadır. NREL (2023) verilerine bakıldığında 2022 yılı sonu itibarıyla en yüksek verimde çalışan PV hücrelerin bu tipte ve odaklandırılmış özellikte olduğu görülmektedir. Günlük verimleri laboratuvar şartlarında yaklaşık %50 seviyesine çıkartılmıştır.

3.5 Güneş Pillerinin Karakteristiği

Akım-gerilim (I-V) eğrisi, güneş pillerinin çalışma karakteristiğinin yanı sıra açık devre gerilimi (V_{oc}), kısa devre akımı (I_{sc}), dolum faktörü (FF) ve maksimum güç noktası (MPP) gibi bilgilere ulaşmamızı sağlar. Güneş ışınlarının değişimine göre güneş hücrelerinin I-V karakteristik eğrisi Şekil 3.8’de verilmiştir. Şekilde oluşan küçük dikdörtgenin ile büyük dikdörtgenin oranlanması ile dolum faktörü bulunur (Liu ve diğ. 2001).



Şekil 3.8: Işınımın değişimi ile güneş hücresinin, Akım-Gerilim (I-V) karakteristiği (Karuthedath 2015)

3.5.1 Verim

PV panelin, güneş ışınlarını elektriksel güce dönüştürebilme oranına verim (η) olarak ifade edilir. Panelin güç çıkışı ile, panele ulaşan güneş ışınlarının oranlanmasıdır. Verim için kullanılan eşitlik Denklem 3.7’de verilmiştir (Liu ve diğ. 2001).

$$\eta = \frac{P_{çıkış}}{P_{giriş}} = \frac{I_{sc} \times V_{oc} \times FF}{P_{giriş}} \times 100 \quad (3.7)$$

Denklem 3.7’de verilen değişkenler;

$P_{\text{çıkış}} = PV$ panelin çıkış gücü (W),

$P_{\text{giriş}} = PV$ panele uygulanan güneş ışınım gücü (W),

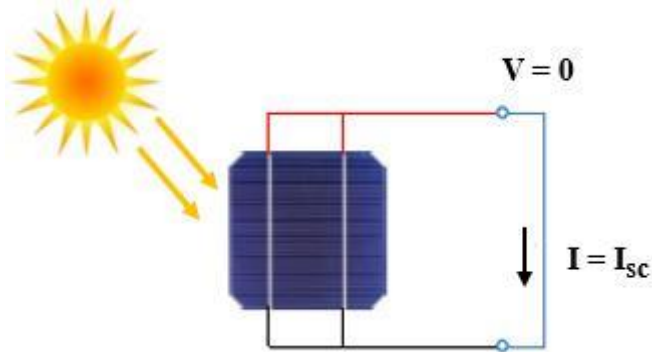
$I_{sc} = PV$ panelin çıkışlarının kısa devre olması durumundaki akımı (A),

$V_{oc} = PV$ panelin çıkışlarının açık devre olması durumundaki gerilimi (V),

FF = Dolum faktörü, olarak açıklanabilir.

3.5.2 Kısa Devre Akımı (I_{sc})

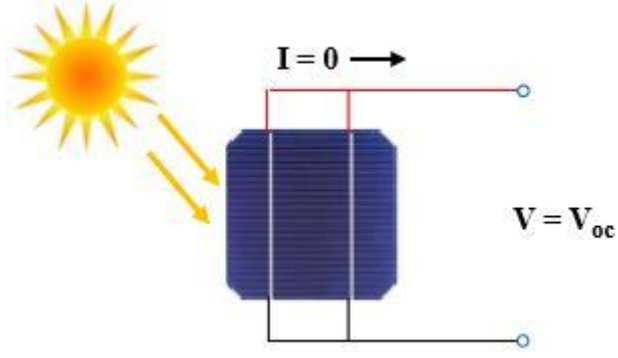
PV panelin pozitif çıkışı ile negatif çıkışı arasında omik yükü sıfır olacak şekilde bağlantı yapılmasıdır. Omik yükün sıfır olması teorik bir yaklaşımdır. Sıfıra en yakın omik yük ile bağlanması durumunda elektron akışı ile birlikte akım değeri oluşacaktır. Kısa devre akımı Şekil 3.9’da verilmiştir. Ampermetre ile, DC Amper kademesinde, çıkış uçlarına seri bağlanarak yaklaşık değeri ölçülebilir.



Şekil 3.9: PV pilin kısa devre akımı (Aydın 2022)

3.5.3 Açık Devre Gerilimi (V_{oc})

PV panelin çıkışları arasında herhangi bir yük bağlanmaksızın oluşan gerilim farkını ifade eder. Açık devre voltajı Şekil 3.10’da verilmiştir. Voltmetre ile, DC Volt kademesinde, çıkış uçlarına paralel bağlanarak yaklaşık değeri ölçülebilir.



Şekil 3.10: PV pilin açık devre gerilimi (Aydın 2022)

3.5.4 Maksimum Akım Değeri (I_m)

Fotovoltaik panelin bir yüke bağlanmış halde ulaşabildiği en yüksek akım değerini ifade eder.

3.5.5 Maksimum Gerilim Değeri (V_m)

Fotovoltaik panelin bir yüke bağlanmış halde ulaşabildiği en yüksek gerilim değerini ifade eder.

3.5.6 Maksimum Güç Noktası (P_m)

Fotovoltaik panelin bir yüke bağlanmış halde elde edilen en büyük gerilim ve akım değerlerinin çarpımına eşittir.

3.5.7 Dolum Faktörü (FF)

Güneş pillerinin materyal kalitesi ile doğrudan bağlıdır. Dolum faktörü değeri organik güneş pilleri için yaklaşık 0,55-0,7'dir. Dolum faktörü, Şekil 3.8'de gösterildiği gibi açık devre gerilimi, kısa devre akımı, maksimum gerilim ve akım değerleri ile ilişkilidir (Kietzke 2007). Dolum faktörü Denklem 3.8 ile ifade edilir (Yerli 2011).

$$FF = \frac{V_m \times I_m}{V_{OC} \times I_{SC}} = \frac{P_m}{V_{OC} \times I_{SC}} \quad (3.8)$$

Denklem 3.8’de verilen değişkenler; V_m =maksimum gerilim değeri (V), I_m =maksimum akım değeri (A), P_m =maksimum güç değeri (W) olarak açıklanabilir. Dolum faktörü 1 ve 0 arasında değerler alır. Bu değerin; 1’e yakın olması verimi iyi yönde etkileyecektir (Kietzke 2007).

3.6 Fotovoltaik Sistemlerde Kayıplar

Bir PV sistemin performans oranı (PO), STK şartlarında sisteminin çıkış gücünün, sistemde üretilmesi gereken güç değerine oranlanmasıdır (Özçelik ve Yılmaz 2012).

$$PO = \frac{\text{Elde edilen enerji}}{\text{Güneş ışınımı} \times \text{Panel alanı} \times \text{Hücre verimi}} \quad (3.9)$$

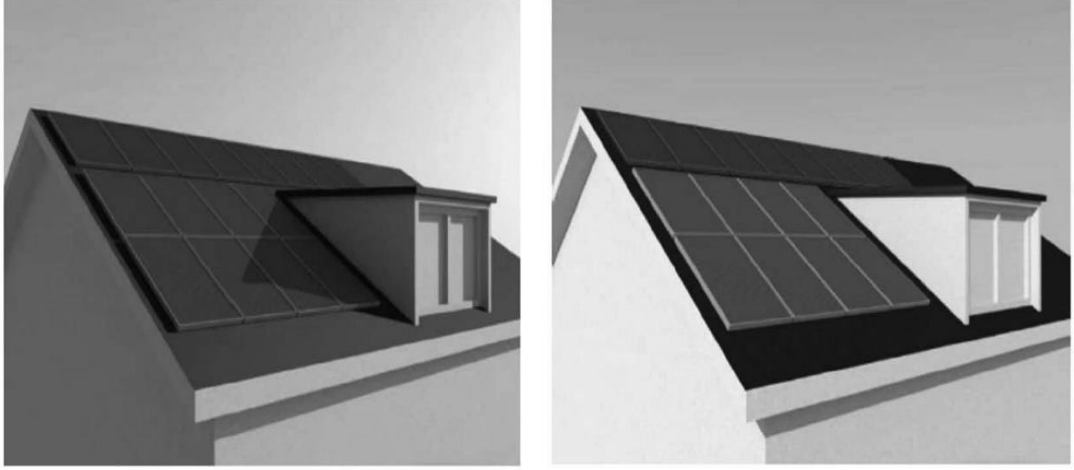
Bir PV sistemin, Performans Oranının yüksek olması istenir ve sistemdeki kayıpların minimal düzeye çekilmesi ile gerçekleştirilir (Özçelik ve Yılmaz 2012).

3.6.1 Gölgeleme Etkisi

Gölgeleme etkisi, güneş panelinin gölgede kalan kısmıyla, güneş ışınımını tam alabilen kısmı arasındaki güneş enerjisinden elde edilen enerji farkıdır. Güneş paneli hücrelerinin üzerine, güneş ışınlarının tam olarak alması verimini doğrudan etkiler. Gölgeleme oluşması durumunda, güneş ışınlarını tam alamayan hücrelerdeki güç üretimi düşecektir.

Nijer’de yapılmış olan bir çalışmada 25W gücünde bir güneş paneli, dört aylık sürede bulutlu günlerde elde edilen elektriksel enerjinin ortalaması alınmış ve maksimum elde edilmesi gereken verime oranlanmıştır. Sonuç olarak %25 kayıp elde edilmiştir (Bonkaney ve diğ. 2017).

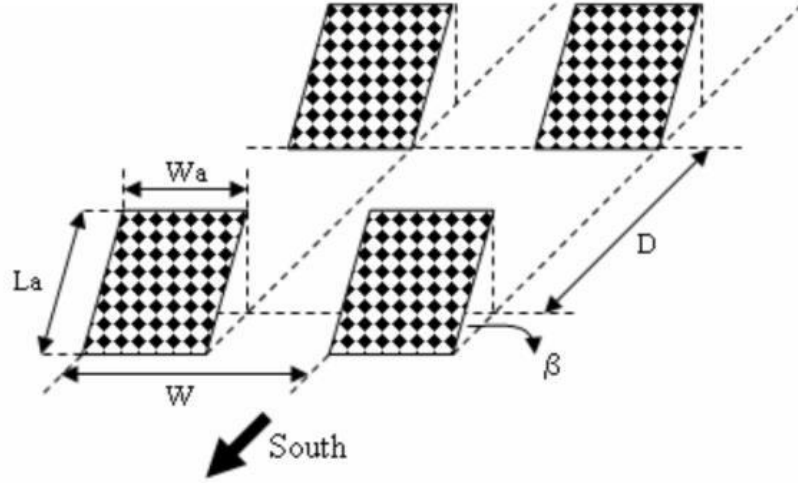
İki çeşit gölgelenme etkisinden söz edilebilir. Gölgeleme etkisi, çevre şartlarına bağlı olabildiği gibi belli bir düzende dizilen panellerden güneşin açısına bağlı olarak panel veya panellerin diğer panel veya panelleri gölgede bırakması ile de gerçekleşebilmektedir. Güneşin konumunun sürekli değişmesi ile gölgelerin yönleri ve boyutları da değişmektedir (Hernanz ve Campayo 2012). Şekil 3.11’de gölgelenme için örnek verilmiştir.



Şekil 3.11: Binanın çatısında kurulmuş PV panellerde gölgelenme etkisi
(Pandiarajan ve Ramabadran 2012)

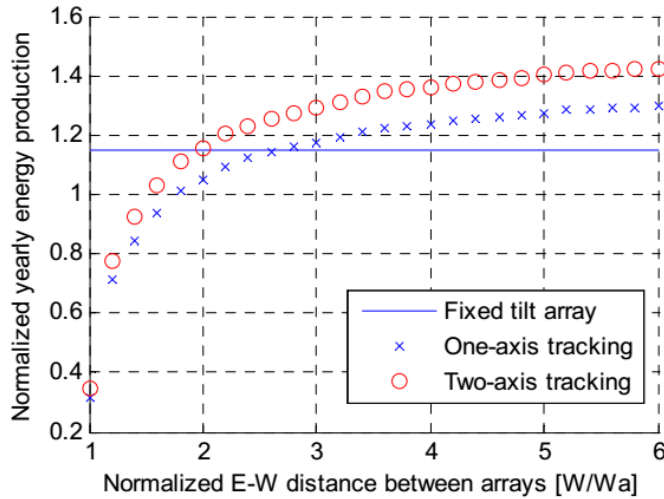
PV sistemler ışınım miktarı ile orantılı enerji elde ederler. Her güneş panelinin en verimli çalıştığı durum, maksimum güç noktasına ulaşması ile gerçekleşir. Birden fazla PV panel kullanılan bir sistem için, panellerden herhangi birisinde gölgelenme oluşması, sistem üzerinde birden fazla maksimum çalışma noktası oluşturur. Bu durum hem gölgelenme oluşan panelin verimini hem de sistemde oluşacak uyumsuzluk sebebiyle sistemin verimini düşürür.

Güneş enerjisi santrallerinde; belirli bir alana, mümkün olan en fazla sayıda PV panelin, yan yana ve/veya arka arkaya dizilerek, birbirleri üzerinde gölgelenme etkisi oluşturmayacak şekilde veya en az oluşturacak şekilde yerleştirilmesi istenir. Bu durum Şekil 3.12’de gösterildiği gibidir.

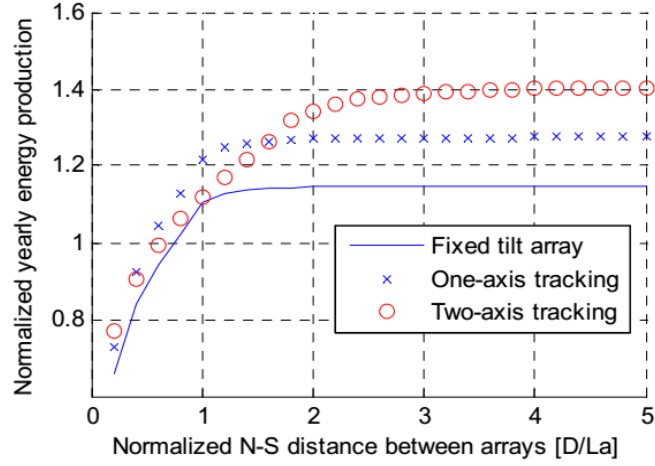


Şekil 3.12: Panel yerleşim ölçüleri (Boztepe ve diğ. 2008)

Boztepe ve diğ. (2008) yaptıkları çalışmada, üç farklı sistem için ölçümler yapmış ve ölçümleri analiz etmiştir. Bu sistemlerden birisi; sabit eğim açısında ve sabit olarak güneye bakmaktadır. İkincisi; tek eksenle güneşi takip edebilmektedir. Üçüncüsü; çift eksenle güneşi takip edebilmektedir. Tüm yıl boyunca optimum sabit eğimde ve güneye sabit olarak konumlandırılan sistemler için arka arkaya gelen panellerin, en yakın noktalarının mesafesinin artırılması belli bir noktaya kadar, güç üretimini arttırmıştır. Üç sistem için, yatay ve dikey mesafenin, yıllık enerji üretimine etkisi Şekil 3.13'te verilmiştir (Boztepe 2017).



(a)



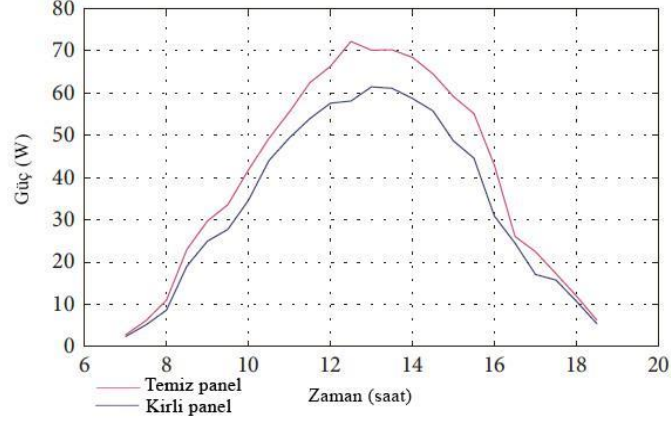
(b)

Şekil 3.13: Yatay ve dikey mesafenin yıllık üretime etkisi a) yatay mesafe b) dikey mesafe (Boztepe ve diğ. 2008)

3.6.2 Tozlanma Etkisi

Güneş panellerinin yüzeyleri zamanla tozlanabilmekte, kış mevsimlerinde karla kaplanabilmektedir. Böyle durumlarda güneşten gelen ışınlar, hücrelere tam ulaşmamakta ve enerji üretimini azaltmaktadır. Az yağış alan yerlerde kurulan güneş enerji sistemlerinde panellerin yüzeyleri daha çok tozlanır. Tozlanma durumuna bağlı olarak verim kaybı yaklaşık %14'tür (Rustemli ve Dincer 2011). Panel yüzeylerinin periyodik olarak temizlenmesi bu kayıpları azaltır. Güneş Enerji Santrallerinde su ile yüzey temizliği yapmak her zaman mümkün olmayabilir. Panellerin eğim açısı 16°'den daha fazlaysa, yağmur suyu yardımıyla panel yüzeyinin tozdan temizlendiği ve panelin yüzey kirliliğiyle verimindeki düşüş %6 olarak kabul edilebilir. Panellerin eğim açısı 16°'den daha küçükse veya bölgeye düşen yağış az veya uzun aralıklı ise tozlanmadan dolayı panel verimindeki düşüş artacaktır (Kai ve diğ. 2014).

Nijer'de haziran ayında yapılan bir çalışmada, iki adet fotovoltaik panelden biri periyodik olarak temizlenmiş, diğeri ise temizlenmemiştir. Yirmi üç gün sonunda; temizlenen panelin, temizlenmeyen panele göre yaklaşık %10 oranında daha fazla güç ürettiği Şekil 3.14'te gösterilmiştir (Bonkaney ve diğ. 2017).



Şekil 3.14: Temiz ve tozlu panelin zamana bağlı güç grafiği (Bonkaney ve diğ. 2017)

3.6.3 Panel Sıcaklığı Etkisi

Bir PV panelin yaklaşık hücre sıcaklığı (T_c), istenilen bir hava sıcaklığı (T_a) ve ışınım (G) değeri için NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) kullanılarak hesaplanabilir. PV panellerde, NOCT değeri 42-52°C arasında değişir. PV panelin hücre sıcaklığının hesaplanması Denklem 3.10'da verilmiştir (Boztepe 2017).

$$T_c = T_a + \frac{NOCT-20}{0,8} \times G \text{ (kW/m}^2\text{)} \quad (3.10)$$

Bulunan sıcaklık değeri, panel gücünün sıcaklığa bağımlılık katsayısı (μ_p) ve standart test koşullarındaki panelin en yüksek çıkış gücü ($P_{m,STK}$) kullanılarak panelin hücre sıcaklığına bağlı en yüksek güç değeri ($P_m(T_c)$) Denklem 3.11 ile hesaplanabilir. μ_p değeri 0,38 ile 0,45 %/K arasında değiştiği kabul edilir (Boztepe 2017).

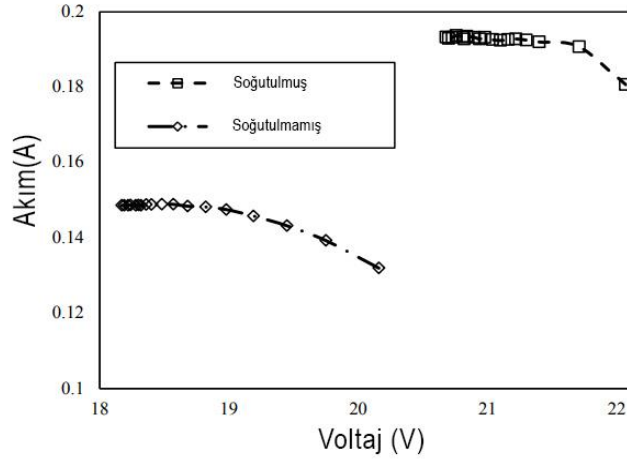
$$P_m(T_c) = P_{m,STK} \times [1 - \mu_p (T_c - 25)] \quad (3.11)$$

PV panellerde, 10°C'lik sıcaklık farkı, yaklaşık olarak %5 oranında güç üretiminde değişikliğe sebep olur. Panel seçimi yapılırken NOCT sıcaklığı, sıcaklığa bağımlılık katsayısı ile birlikte değerlendirilmeli ve sıcaklıktan en az etkilenenler seçilmelidir (Boztepe 2017). Yüze sıcaklığının 40°C aştığında verimde önemli

düşüşler meydana gelir. Oluşan kayıpları azaltmak için panelin soğutulması farklı şekillerde yapılmaktadır.

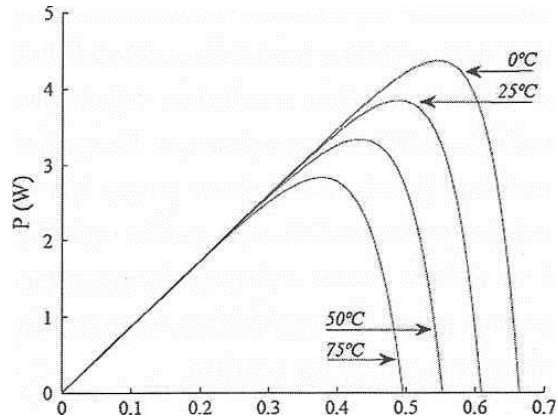
3.6.3.1 Su ile Soğutma

PV panelin, su yardımıyla yüzey sıcaklığının düşürülmesi ile gerçekleştirilir. Birleşik Krallık'ta yapılmış olan çalışmada iki adet fotovoltaik panelden, bir tanesi su ile soğutulmuş, diğeri ise soğutulma işlemi yapılmamıştır. Çalışmada incelenen iki panelin Voltaj-Akım grafiği Şekil 3.15'te gösterilmiştir (Peng ve diğ. 2017).



Şekil 3.15: Su ile soğutulan panelin Voltaj-Akım grafiği (Peng ve diğ. 2017)

Bir PV modülün 0-75°C sıcaklık aralığında farklı modül sıcaklık değerleri için ideal Güç-Voltaj karakteristiği Şekil 3.16'da verilmiştir (Moharram ve diğ. 2013).



Şekil 3.16: 0-75°C arası modül sıcaklığında ideal Güç-Voltaj grafiği (Moharram ve diğ. 2013)

3.6.3.2 Hava ile soğutma

Hava ile soğutma; pasif ve zorlanmış taşınım olarak iki şekilde gerçekleştirilebilir.

Pasif taşınım ile soğutma yönteminde, PV güneş paneli doğal ısı taşınım yöntemi ile soğutulur. Panelin alt yüzeyine, kanatçık ismi verilen, yüksek ısıl iletkenliğe sahip materyaller yerleştirilir. Soğutma için enerji harcanmaz. Soğutma verimi daha düşüktür (Bilen ve diğ. 2021).

Zorlanmış taşınım ile soğutma yönteminde; hava, bir fan yardımıyla panelin alt yüzeyine dağıtılır. Fanın çalışması ile enerji tüketir ve bu tüketilen enerji miktarı kabul edilebilir seviyede olmalıdır (Bilen ve diğ. 2021).

Su ve hava ile soğutulan iki PV-T panelin, sabit 500 W/m^2 güneş enerjisi altında 0°C 'den 30°C 'ye kadar ortam sıcaklığının arttırılması ile performansı incelenmiştir. Hava ile soğutulan sistemin verileri Tablo 3.1'de, su ile soğutulan sistemin verileri Tablo 3.2'de verilmiştir (Atız 2022).

Tablo 3.1: Hava ile soğutulan PV-T sisteminin değişen çevre sıcaklığında performansı (Atız 2022)

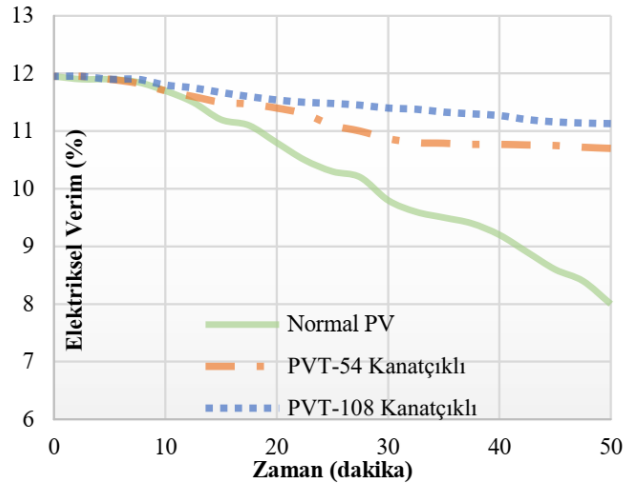
Çevre Sıcaklığı ($^\circ\text{C}$)	Enerji Verimi (%)	Ekserji Verimi (%)	Yüzey Sıcaklığı ($^\circ\text{C}$)	Çıkış Sıcaklığı ($^\circ\text{C}$)	Üretilen Elektrik (kJ)
0	35,20	17,77	31,08	18,45	141,7
3	35,21	17,57	34,08	21,64	139,7
6	35,21	17,37	37,08	24,82	137,8
9	35,21	17,17	40,08	28,00	135,8
12	35,22	16,96	43,08	31,19	133,8
15	35,22	16,76	46,08	34,37	131,9
18	35,22	16,55	49,08	37,56	129,9
21	35,23	16,35	52,08	40,74	127,9
24	35,23	16,14	55,08	43,92	126,0
27	35,23	15,94	58,08	47,11	124,0
30	35,24	15,73	61,08	50,29	122,0

Tablo 3.2: Su ile soğutulan PV-T sisteminin değişen çevre sıcaklığında performansı (Atız 2022)

Çevre Sıcaklığı (°C)	Enerji Verimi (%)	Ekserji Verimi (%)	Yüzey Sıcaklığı (°C)	Çıkış Sıcaklığı (°C)	Üretilen Elektrik (kJ)
0	59,64	18,9	12,41	9,439	153,6
3	59,44	18,68	15,41	12,44	151,6
6	59,24	18,45	18,41	15,44	149,7
9	59,03	18,23	21,41	18,44	147,7
12	58,83	18,01	24,41	21,44	145,7
15	58,63	17,78	27,41	24,44	143,8
18	58,43	17,56	30,41	27,44	141,8
21	58,22	17,34	33,41	30,44	139,8
24	58,02	17,12	36,41	33,44	137,9
27	57,82	16,89	39,41	36,44	135,9
30	57,62	16,67	42,41	39,44	133,9

Tablo 3.1 ve Tablo 3.2 incelendiğinde PV-T sistemin yüzey sıcaklık değerinin, su ile soğutmada, hava ile soğutmaya göre daha düşük olduğu görülmekte ve bu durum elektriksel enerji üretimini arttırmaktadır.

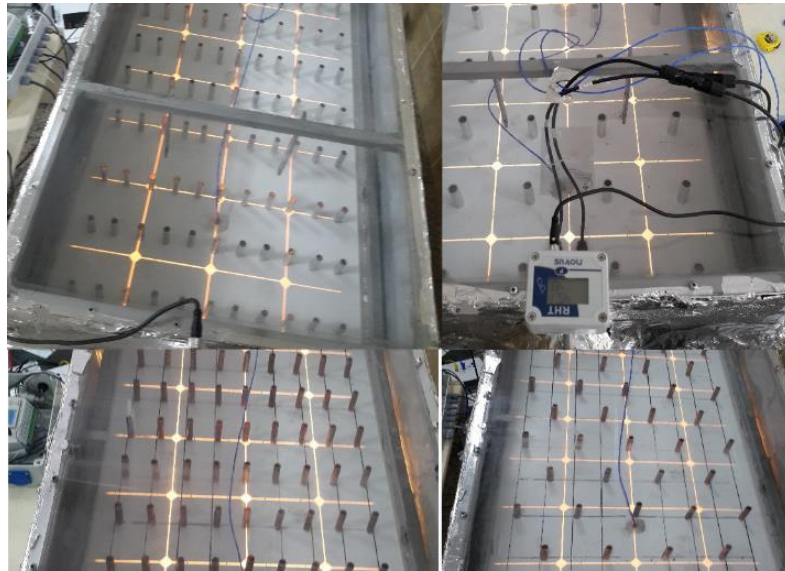
Ömeroğlu (2018) yaptığı çalışmada, fotovoltaik panelde herhangi bir soğutma işlemi yapmadan gerçekleştirdiği deneyde, panelin ürettiği elektriksel verimin zamanla düştüğü tespit etmiştir. Panel sıcaklığının yükselmesinin bir sonucu olarak, panelin elektriksel verimi yaklaşık %4 aşağıya düşmektedir. PV panelin ısı artışını azaltmak için, fotovoltaik panellerden birisinin arkasına 108 adet, diğerinin arkasına 54 adet bakır kanatçıklar yerleştirmiş, paneller bu şekilde zorlanmış taşınım maruz bırakılmıştır. Şekil 3.17’de görüldüğü gibi kanatçık eklenmiş panellerin, kanatçık eklenmemiş panele göre, elektriksel verimdeki düşüşü azalttığı görülmektedir. PV panellerin elektriksel verimleri yaklaşık olarak; 108 adet bakır kanatçık eklediği sistemin %11, 54 adet bakır kanatçık eklediği sistemin %10,7, kanatçık kullanmadığı sistemin elektriksel verimi ise %8 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 3.17: Hava taşımını ile zamana bağlı verim grafiği (Ömeroğlu 2018)

3.6.3.3 Nanoakışkan ile Soğutma

Nanoakışkan, çapları 1 ile 100 nm arasında değişen akışkan ile karıştırılarak ısı transferi ile termal performansı artıran materyallerdir. Bu karışımın, fotovoltaik panelin arka yüzeyinde dolaştırılması ile verim artışı sağlanır (Wong and O. De Leon 2010).



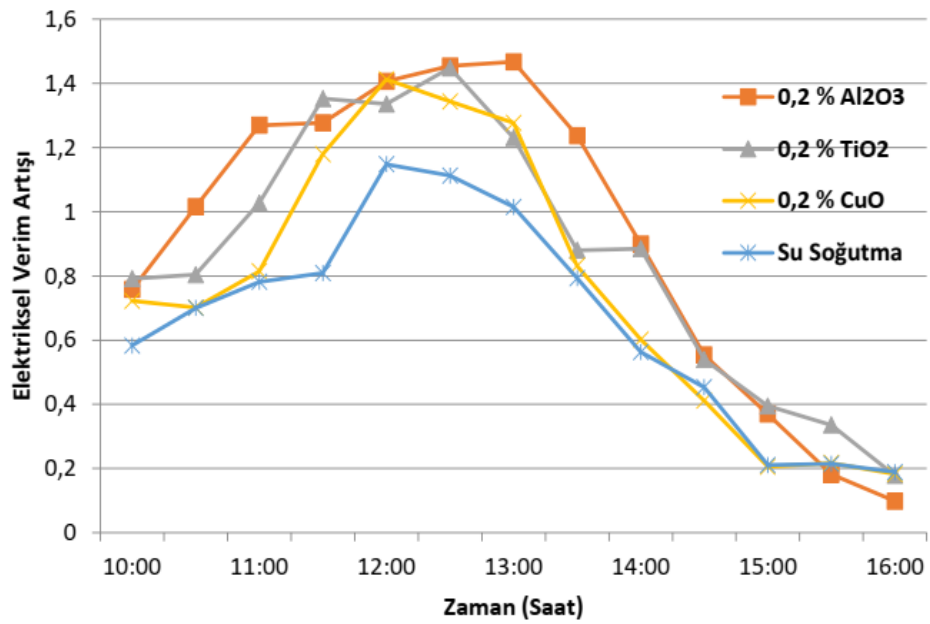
Şekil 3.18: Isı transfer elemanı alüminyum ve bakır silindirik kanatçıklar (Ömeroğlu ve Öner 2018)

Isı transfer elemanı olarak Şekil 3.18’de gösterildiği gibi alüminyum veya bakır silindirik kanatçıklar kullanılabildiği gibi Şekil 3.19’da gösterildiği gibi Levha kanatçıklarda kullanılabilir.



Şekil 3.19: Levha kanatçıklar (Aydın 2022)

Aydın (2022) yaptığı çalışmada; levha kanatçıklı bir panelde, sabit bir debide, su soğutmalı sistem ile ağırlıkça %0,2 oranında hazırlanan Al_2O_3 -su, TiO_2 -su, CuO -su nanoakışkanlı karışımlarla soğutmanın, kanatçiksız panele göre elektriksel verim artışlarını incelemiş ve çalışma sonucunda elde ettiği değerler Şekil 3.20’de verilmiştir. Ağırlıkça; %0,2 oranında hazırlanan karışım ile yapılan çalışmada, elektriksel verim artışının; Al_2O_3 -su, TiO_2 -su, , CuO -su nanoakışkan soğutmalı panellerin, su soğutmalı panele göre daha yüksek olduğu görülmüştür (Aydın 2022).



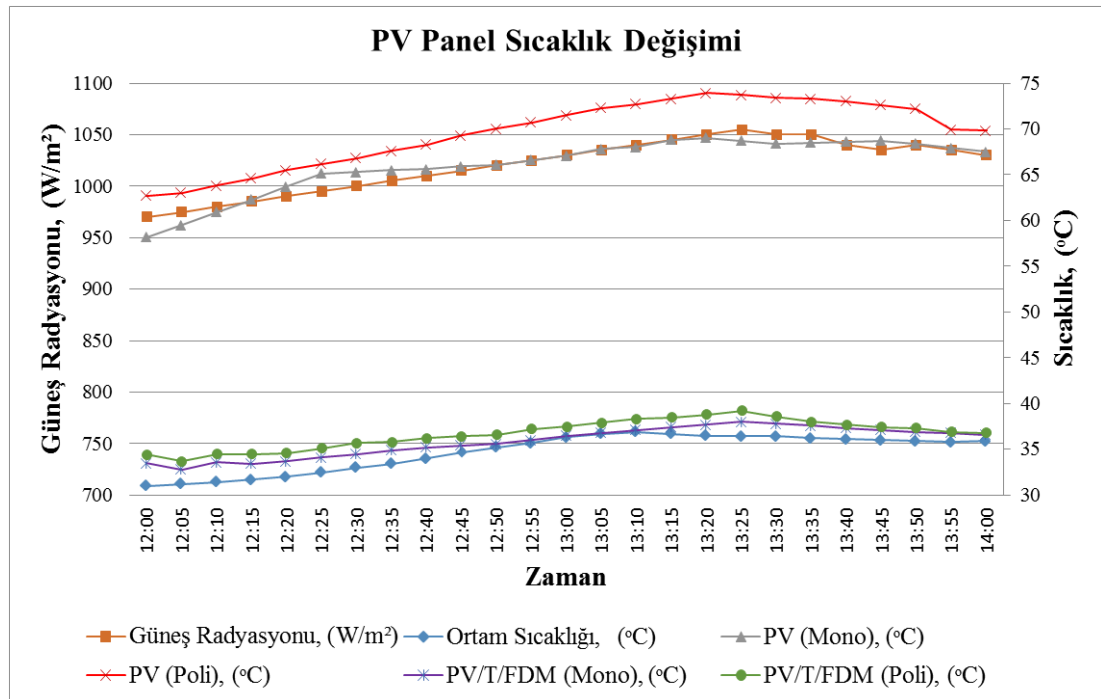
Şekil 3.20: Su soğutmalı, ağırlıkça %0,2 oranındaki Al_2O_3 -su, TiO_2 -su, CuO -su soğutmalı panellerin, soğutmasız panele göre elektriksel verim artışı (Aydın 2022)

3.6.3.4 Faz Değiştiren Malzeme (FDM) ile Soğutma

FDM'ler ısıtılırsa iç enerjileri artış gösterir, ısıtılmaya devam edilirse iç enerjileri de faz değişim sıcaklığına kadar yükselmeye devam eder. Faz değişim sıcaklığına ulaşıldığında faz değişimi gerçekleşir. Faz değişimi esnasında maddenin sıcaklığı sabit kalır, gizli ısı ise depo edilir (Kayabaşı ve Kaya 2022).

Stritih (2016) tarafından yapılan bir çalışmada, fotovoltaik paneli faz değiştiren malzeme kullanarak soğutulması sonucu, soğutma işlemi yapılmayan panele göre ortalama %1,1 ile %2,8 arasında verim artışı olduğu görülmüştür. Fotovoltaik panelin alt yüzeyine monte edilen faz değiştiren malzeme bölgeye göre değişen erime sıcaklığına ulaştığında, yüzeydeki sıcaklığı gizli ısı olarak depo eder ve panelin soğutulmasını sağlayarak verim artışını sağlar.

Işınım miktarı ve modül sıcaklıkları, çevresel şartlar nedeniyle sürekli değişmektedir. Bu değişim Şekil 3.21'de verilmiştir. Güneş ışınım değerleri, 12:00-14:00 arasında 970-1055 W/m² aralığındadır. Işınım miktarına bağlı olarak farklı tiplerde modüllerin yüzey sıcaklıkları 33 °C ile 74 °C aralığında değişmektedir (Kayabaşı ve Kaya 2022).



Şekil 3.21: Güneş radyasyonuna bağlı panel sıcaklığı değişimi (Kayabaşı ve Kaya 2022)

3.6.4 Yansıma Etkisi

PV panel yüzeyine düşen güneş ışınlarının tamamı hücreler tarafından emilemez ve bir kısmı panel yüzeyinden geri yansır. Bu şekilde oluşan kayıplara yansıma kayıpları denir. Yüzeğe ulaşan güneş ışını genellikle üç optik hareketi gerçekleştirir (Deniz 2013):

- Yansıma: güneş ışını cismin yüzeyinden döner.
- İletim: güneş ışını cismin içine girer.
- Emilme: güneş ışını cismin içine girer ve yakalanır; bu durumda güneş ışınları, elektriksel enerjiye dönüştürülür.

Yansımanın azaltılması verim artışını sağlar. Yansımanın azaltılması için PV panel yüzeyleri farklı katmanlardan üretilir. PV panel yüzey kaplama camları, güneş ışınlarının emilimini en üst değere ve yansımasını en alt değere getirmek için tasarlanmış temperli yapıdadır. Hücrelerin üretilmesinde de ışığın yansımasını azaltacak kaplama malzemesi kullanılır. Genellikle PV paneller, gelen güneş ışınlarının yaklaşık %4'ünü yansır (Deniz 2013).

3.6.5 Kablolama Etkisi

PV sistemlerin farklı kısımları için doğru ve alternatif akım uyumlu kablolar kullanılır. Kablolarda endüktif direnç oluşumuna bağlı kayıplar oluşur. Güneş enerji sistemi tasarlanırken kablo boyutlarının seçimi, kayıpların azaltılması bakımından önemlidir. Kablo boyutları belirlenirken, kablonun akım taşıma dayanıklılığı ve kablo üzerinde meydana gelebilecek gerilim düşümleri dikkate alınır (Taghvaei ve diğ. 2013).

Elektrik tesisatlarında olduğu gibi PV sistem tesisatlarında da kablo kesiti belirlenmesinde, çalışma gerilimi, gerilim düşümü, akım taşıma kapasitesi ve kısa devre hesapları dikkat edilmesi gereken parametrelerdir. PV sistemlerde iletken kesitleri, güç kaybı %1'den daha düşük olacak şekilde hesaplanır (Boztepe 2017).

3.6.6 İverter Etkisi

İverter etkisi kayıpları hesaplanırken, inverterin standby konumundaki enerji tüketimi ilave edilerek, inverter verim eğrisi ile hesaplanır. İverterdeki doğru akımdan, alternatif akıma dönüştürülme kayıpları, güç katmanı topolojisinin tipine ve inverter içerisinde kullanılan yarı iletken malzemelere bağlıdır (Koutroulis ve Blaabjerg 2011). Genel olarak PV inverter verimi, her 150 V doğru akım giriş geriliminde %0,3-%1 oranlarında düşer. Ayrıca düşük ışıyım ve yüksek giriş gerilimlerinde, kontrol ünitesinin güç tüketimi ve anahtarlama kayıpları dolayısıyla verim %5'e kadar düşebilir (Giesler 2010). Günümüzde üretilen transformatör kullanılmayan inverterlerin nominal doğru akım giriş gerilimlerinde, maksimum verimleri %98 mertebelerindedir.

3.6.7 Uyumsuzluk Etkisi

PV paneller seri bağlanmış hücrelerden meydana gelir. PV sistemde uygun gerilim seviyesine ulaşmak için, çok sayıda PV panel seri bağlanır, bu durum çok daha fazla sayıda hücrenin seri bağlanmasını gerektirir. Uyumsuzluk kayıplarının en alt seviyede olması için, tüm hücrelerin maksimum güç noktasının, mümkün olduğunca yakın olması gerekir. Bu durum panellerin, farklı çalışma şartlarında bulunması ve üretim toleransları sebebiyle gerçekleşmez ve uyumsuzluk kaybı oluşur (Boztepe 2017).

Kaushikaa ve Rai (2007) yaptığı çalışmada, uyumsuzluk kayıplarının panellerde yaşlanma oluşmamışken yaklaşık %2, panellerde yaşlanma oluşması ile %12'lere kadar çıkabileceğini belirtmiştir. Üretim toleransları, dize içindeki modüllerin yaşlanması, hava koşullarından dolayı modüllerin zarar görmesi, gölgelenme ve ışıyım farkları uyumsuzluk kaybına neden olan önemli etkenlerdendir (Kaushikaa ve Rai 2007).

PV modüller, inverter girişinde istenilen gerilim ve akım değerini ayarlamak için birbirleri ile seri ve/veya paralel şekilde bağlanırlar. Bu şekilde bağlanan bir sistemin toplam gücü, sistemde kullanılan panellerin tek tek güçlerinin toplamından daha düşüktür. Modüller arasında oluşturulan seri ve/veya paralel bağlantılar,

inverterler tarafından doğru yönetilmelidir. Birbirlerine bağlanan modüllerin, güç toleransları arasındaki farklar, uyumsuzluk kayıplarını değiştirir.

Herrmann (2005) uyumsuzluk kayıplarının, modüllerin üretim toleransı ve ön sıralama işlemi yapılmasıyla bağlantısını incelemiştir. Her birinde 150 Watt'lık 14 modül bulunan 8 diziden oluşan bir PV dizisinde uyumsuzluk kayıplarını incelemiştir. Ön sıralama işlemi yapılmadığında, modül üretim toleranslarının artması ile uyumsuzluk kaybı artmakta ve yaklaşık %5 seviyesine ulaşmaktadır. Ön sıralama işlemleri yapılması durumunda, modül üretim toleranslarının artması uyumsuzluk kayıplarını çok fazla arttırmamıştır.

3.6.8 Düşük Işıma Etkisi

Standart Test Koşullarında (STK) ışınım değeri $1000 W/m^2$ 'dir. Bu değerden daha düşük ışımandan dolayı PV modül güç çıkışlarında görülen kayıplardır.

Yatırımcılar veya tasarımcılar, kuracakları sistemde kullanmak istedikleri güneş hücresinin teknik özelliklerini araştırırken, ürünlerle ilgili katalogları inceleyip üretim teknik özelliklerinden faydalanırlar. Burada önem teşkil eden değişkenler: PV hücresinden elde edilen çıkış gücünün değeri (Maksimum Güç, M_p), Standart Test Koşullarındaki verim (η_{STK}) ve PV hücresinin Standart Test Koşullarındaki oranla daha az ışımaya şartlarındaki diğer değişkenleridir (Faranda ve Leva 2008). STK gerçek hayatta sürekli gerçekleşen şartlar olmaması bakımından düşük ışınım karakteristikleri bir sistemin performansı için oldukça önemlidir. İzafi ışınımına bağlı verim, hücre sıcaklığının ($T_{modül}=25 \text{ }^\circ\text{C}$) ve spektrumun (A.M. 1,5) STK'da sabit tutulduğu durumlarda ışınımın değiştirilmesi ile elde edilir (Deniz 2013). Genel formülü:

$$\eta_{reel(I)} = \frac{\eta(I)}{\eta_{(I_{STK})}} \quad (3.12)$$

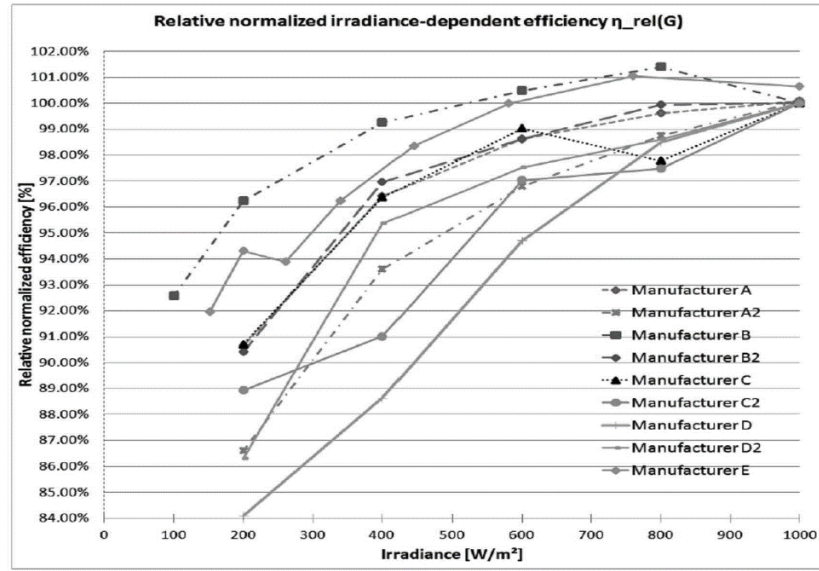
$$\eta(I) = \frac{P(I)}{I \times A_{PV}} \quad (3.13)$$

A_{PV} = PV hücre alanı, I = Işınım ve $P(I)$: I ışınım değerindeki güç çıkışıdır.

I yerine I_{STK} konulursa STK'daki değer elde edilir. A_{PV} bütün modüller için aynı değerde olmasından dolayı Denklem 3.12'de birbirini götürür ve denklem düzenlendiğinde;

$$\eta_{rel(I)} = \frac{P(I)/I}{P(I_{STK})/I_{STK}} = \frac{P(I)}{I \times \eta(I_{STK})} \quad (3.14)$$

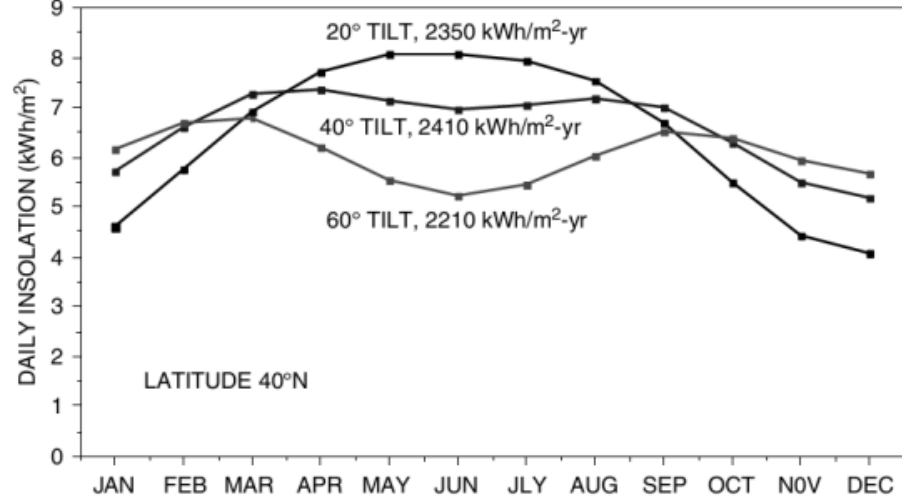
Herteleer (2011), yaptığı çalışmada 30 modül üreticisine 121 adet panel kataloğu incelemiştir. İncelediği kataloglardan sadece 71 tanesinde düşük ışınım performansına ait verileri bulabilmiştir. Verilerine ulaşabildiği modüllerden 9 tanesinin düşük ışınım performans eğrileri Şekil 3.22'de görülebilir (Herteleer 2011).



Şekil 3.22: Dokuz adet modülün ışınım verimlilikleri (Herteleer 2011)

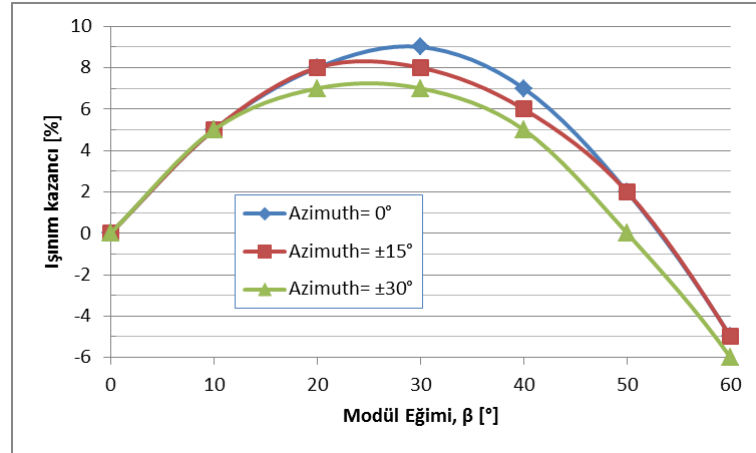
3.6.9 Panel Yerleşimi Etkisi

Güneş radyasyonu, panelin yüzeyine ne kadar yüksek oranda düşürülebilirse elektrik üretimi de o kadar çok olacaktır. Bu durum dikkate alındığında panel yerleşimi, PV sistemin verim artırma çalışmalarında en önemli konulardandır. Panel doğrultusunun, panel yüzeyinin güneyi gösterdiği, azimut açısının sıfıra yakın olduğu durumda gelen güneş radyasyonu en yüksek seviyelere ulaşabilir. Şekil 3.23'te bir PV panelin farklı eğim açılarında yüzeyine düşen güneş radyasyonunun yıllık değişimi verilmiştir. Eğim yükseldikçe yaz aylarında ışınım azalırken, kış aylarında artmaktadır (Masters 2013).



Şekil 3.23: Yıllık ışınımın eğime bağlılığı (Masters 2013)

Eğim açısı yaklaşık 30° olarak konumlandırılmış panelin, yatay bir panele göre yıllık yaklaşık %9 enerji kazancı sağlayabileceği Şekil 3.24’de görülmektedir. Aynı zamanda panelin azimut 0° olarak konumlandırılması en yüksek üretimin olduğu durumdur (Boztepe 2002).

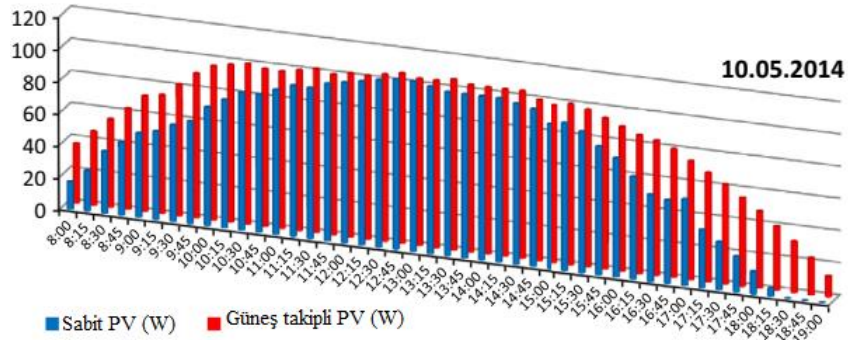


Şekil 3.24: Işınım kazancının eğim ile değişimi (Boztepe 2002)

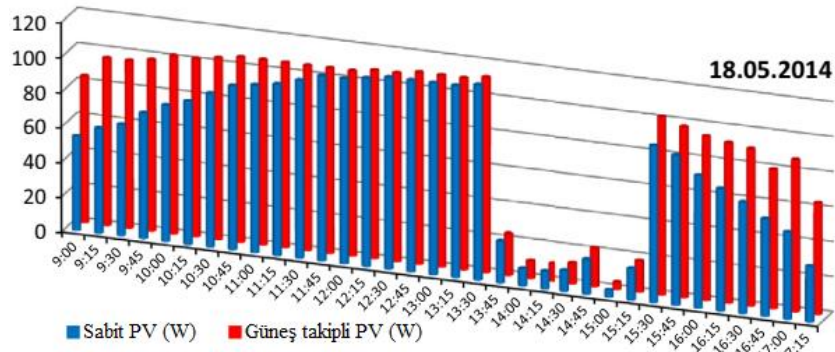
3.7 Güneş Takip Sistemleri

Güneş takip sistemleri kullanılmasıyla, PV sistemlerin verimleri artmakta ve verim artışı ile birlikte elektrik üretimi de artmaktadır. Güneş takip özellikli PV sistemlerde sağlanan verim artışı sebebiyle, sabit sistemlere nazaran oldukça kazanç sağlanmaktadır.

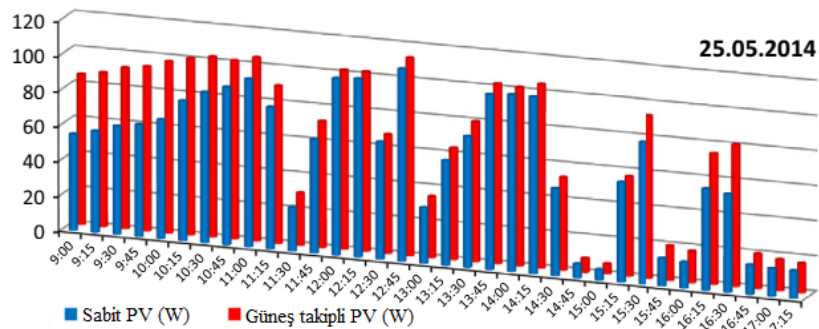
Lazoraiu ve diğ. (2015), iki adet fotovoltaik panel kullanarak yaptıkları çalışmada, panellerden bir tanesini güneş takip sistemli, diğerini ise sabit olarak gözlemlemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda güneş takipli sistemin, sabit eksenli sisteme göre %12 ile %20 arası bir verim artışı olduğunu göstermişlerdir. Çalışma; üç ayrı günde, farklı hava şartlarında, 15 dakikalık aralıklarla, panellerin ürettikleri güç değerlerini ölçmüşlerdir. Ölçüm sonuçları Şekil 3.25'te verilmiştir.



(a)



(b)



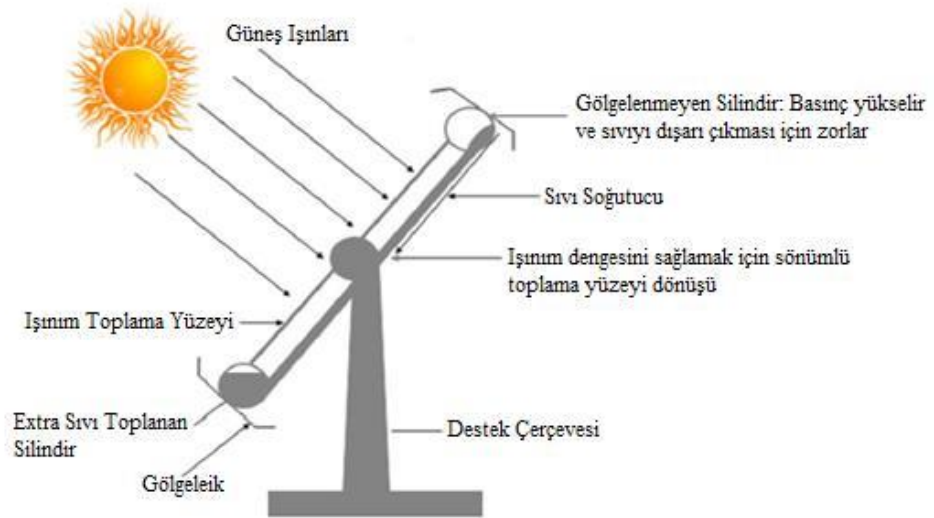
(c)

Şekil 3.25: Sabit PV ile Güneş takipli PV sistemin ürettikleri güç (a)açık hava (b)kısmen açık hava (c)bulutlu gökyüzü (Lazoraiu ve diğ. 2015)

Güneş takip sistemlerinin sabit sistemlere göre verim olarak avantajları olduğu gibi bazı dezavantajları da vardır. PV sistemde, güneş takip sistemi kullanılması; takip sisteminin tüketim gideri, kullanılacak ekipman için bakım ve tamir maliyeti getirecektir. Güneş takip sistemi, güneşe göre yanlış açıya odaklanırsa sistemin tekrardan doğru açıyı bulana kadar geçen sürede üretim kaybı oluşacaktır. Ayrıca güneş takip sistemlerinin farklı hava koşullarında hatalı odaklanma eğilimi oluşmaktadır.

3.7.1 Pasif Güneş Takip Sistemleri

Pasif güneş takip sistemleri, basit yapıdadır ve güneş takibinde motor, kontrol üniteleri veya sensör kullanmazlar. Kullanımı ve çalışma mantığı kolaydır. Panel yüzeyinin eşit miktarda aydınlanması ile dengelenmesi prensibine dayanır. Panel yüzeyinin alt ve üst kısmında bulunan silindirlere aydınlanma miktarı farkı oluştuğunda dengesizlik oluşur. Sistem içerisinde bulunan akışkan gaz, güneş ışınlarını fazla aldığı tarafta daha fazla ısınır ve bu tarafta bulunan gaz genişler, diğer tarafa doğru akmaya başlar. Denge durumunun bozulması ile gaz ve sıvının, yer değiştirmesi ile yerçekimi kuvveti ile birlikte panel yüzeyi güneşe doğru, aydınlanma dengesi oluşuncaya kadar konum değiştirir (Nsengiyumva ve diğ. 2018). Şekil 3.26'da pasif güneş takip sisteminin yapısı gösterilmiştir.



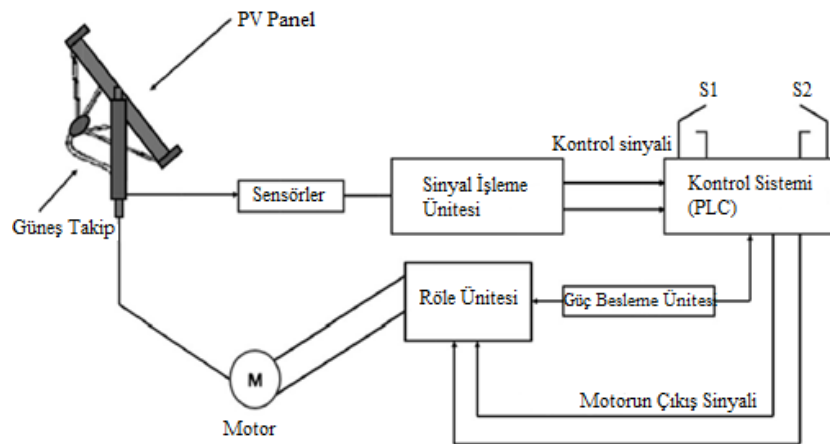
Şekil 3.26: Pasif güneş takip sistemi (Nsengiyumva ve diğ. 2018)

Pasif güneş takip sisteminde, sistem üzerinde enerji tüketen ekipman bulunmaması önemli bir avantajdır. Bu sebeple aktif güneş takip sistemlerine göre kurulumu kolay ve daha az maliyetlidir, aynı zamanda kullanımı sırasında bakım maliyeti de daha az olmaktadır (Nadia ve diğ. 2018). Pasif güneş takip sistemlerinin, genellikle doğu-batı yönünde izleme yapar, bu sebeple aktif güneş takip sistemlerine göre daha az enerji üretimi gerçekleşir. Soğuk bölgelerde kullanımı, sistem içerisinde kullanılan malzemenin yapısı dolayısıyla tercih edilmemektedir (Nsengiyumva ve diğ. 2018).

3.7.2 Aktif Güneş Takip Sistemleri

Aktif güneş takip sistemlerinde, PV panel yüzeyinin güneşi izleyebilmesi için motor, kontrol üniteleri ve sensör gibi donanımlara ihtiyaç duyulur. Bu tip sistemlerde sensörler yardımı ile güneşin konumu belirlenir. Sensörler arasında oluşan ışık yoğunluğu farkına bağlı olarak kontrol ünitelerine sinyal gönderilir. Kontrol üniteleri, oluşan ışık yoğunluğu farkını dengeleme mantığı ile elektrik motorlarını harekete geçirir. Sensörler arasındaki ışık yoğunluğu dengelenene kadar süreç devam eder, dengelenme sağlandığında panel yüzeyi güneş ışınları ile dik konuma getirilmiş olur (Hafez ve diğ. 2018).

Aktif güneş takip sistemleri, genellikle Şekil 3.27’de görülen blok şemasına uygun şekilde tasarlanır (Nsengiyumva ve diğ. 2018).



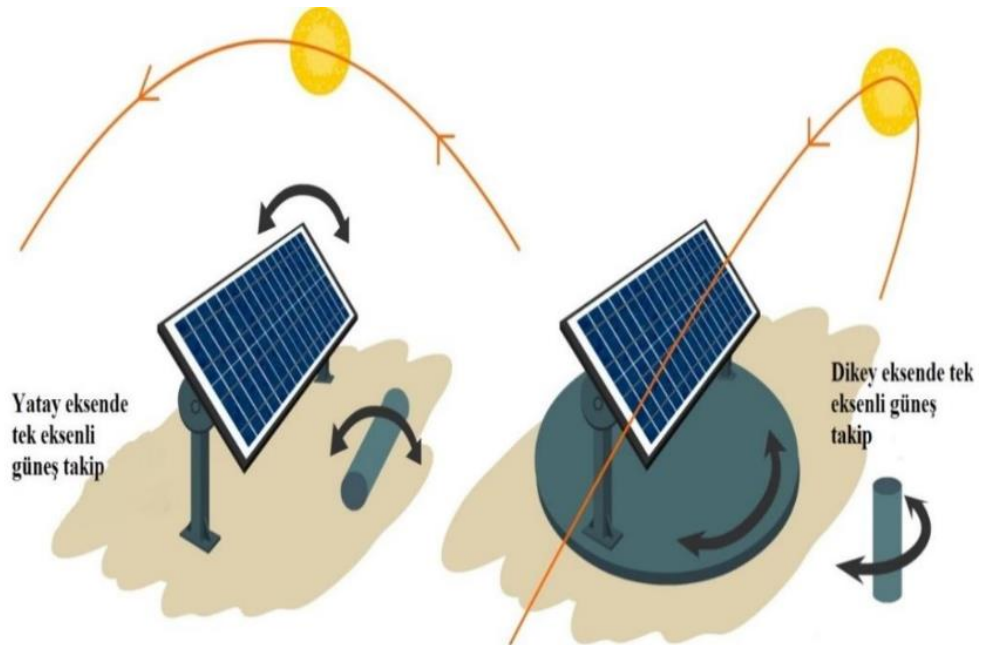
Şekil 3.27: Aktif güneş takip sistemi genel blok diyagramı (Nsengiyumva ve diğ. 2018)

3.7.3 Manuel Güneş Takip Sistemleri

Fotovoltaik sistemin, eğim açısının mekanik dişliler yardımı veya manuel olarak konumlandırılması ile güneşin pozisyonu izlenir. Basit yapıda olması, kurulumunun ve bakım maliyetinin daha ekonomik olması, güneş takibi için sürekli tüketim gerçekleştiriyor olması avantajları arasındadır.

3.7.4 Tek Eksenli Güneş Takip Sistemleri

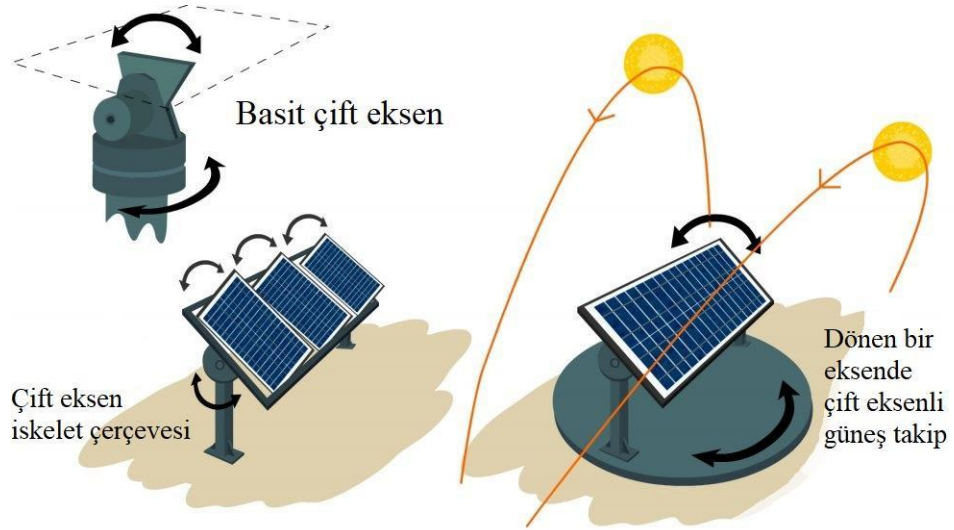
Tek eksenli güneş takip sistemlerinde güneş panelleri, yatay veya dikey yönde tek bir eksende güneşi takip etmektedirler. PV sistem kurulurken, kurulacak yerin özellikleri göz önüne alınarak yatay veya dikey yönde sabit eksen seçilir. Diğer eksen boyunca tek eksenli güneş takip yaptırılır. Tek eksenli güneş takip sistemi çift eksenli güneş takip sistemlerine göre daha basit yapılardır ve çift eksenli güneş takip sistemlerine göre elektrik üretimleri daha düşüktür. Şekil 3.28’de dikey ve yatay tek eksenli güneş takibi çalışma yapısı gösterilmiştir.



Şekil 3.28: Tek eksen güneş takibi çalışma yapısı (Sarawak 2023)

3.7.5 Çift Eksenli Güneş Takip Sistemleri

Çift eksenli güneş takip sistemleri, güneşin pozisyonunu hem yatay yönde hem de dikey yönde takip eden sistemlerdir. Eksenlerden biri ile panelin eğim açısı kontrol edilirken, diğer eksenin hareketi ile azimut açısının kontrolü yapılmaktadır. Güneşin pozisyonunu çift eksende izleyen sistemin çalışma yapısı Şekil 3.29'da gösterilmiştir.

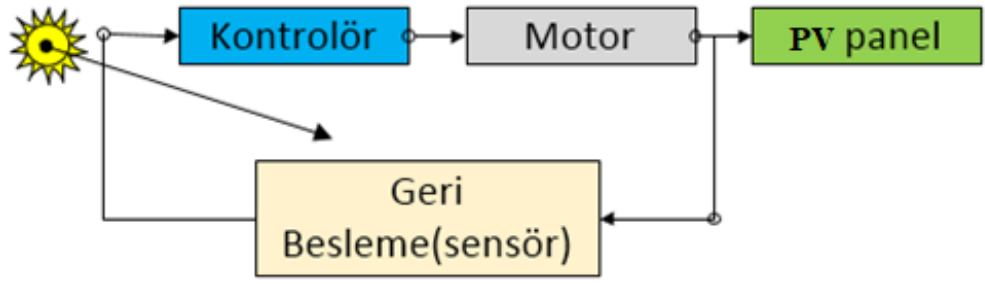


Şekil 3.29: Çift eksenli güneş takip sisteminin çalışma yapısı (Sarawak 2023)

Çift eksenli güneşin konumunu takip edebilen sistemlerin enerji üretim verimliliği; yıl boyu sabit sistemlere göre yaklaşık %30-40, tek eksenli güneşin konumunu takip edebilen sistemlere göre yaklaşık %7-15 daha fazladır (Alıcı 2021).

3.7.6 Kapalı Çevrim Güneş Takip Sistemleri

Kapalı çevrim güneş takip sistemleri, geri dönüt prensibi ile kontrol ilkesine dayanır. Güneşin konumu sensörler tarafından sürekli tespit edilir. Sensörler sürekli kontrol ünitesine bilgi verir. Kontrol ünitesi, sensörlerden gelen bilgilere göre panelin hizalamasına karşılık gelen değer aralığına kadar motorlara hareket verir. Panel istenen konuma geldiğinde bilgi almaya devam eder. Süreç sürekli olarak tekrarlanır (Nsengiyumva ve diğ. 2018). Şekil 3.30'da kapalı çevrim kontrol yapısının genel gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.30: Kapalı çevrim kontrol yapısının genel gösterimi (Menak 2018)

3.7.7 Açık Çevrim Güneş Takip Sistemleri

Dünyada herhangi bir zamanda güneşin pozisyonu hesaplanabilmektedir. Güneşin konumu ile ilgili herhangi bir algılayıcıya gerek duyulmadan algoritma ile takip edilebilmektedir. Kurulan algorithmada çıkış bilgisinin giriş bilgisine geri döndürülmesine gerek olmadığı için sistem açık çevrim mantığı ile çalışır. Sisteme anlık geri dönüt verilmediği için oluşabilecek farklı durumlara (örneğin rüzgâr, bulutlanma, gölgelenme) kendiliğinden adapte olamayacaktır (Atız 2022). Şekil 3.31’de açık çevrim kontrol yapısının genel gösterimi verilmiştir.

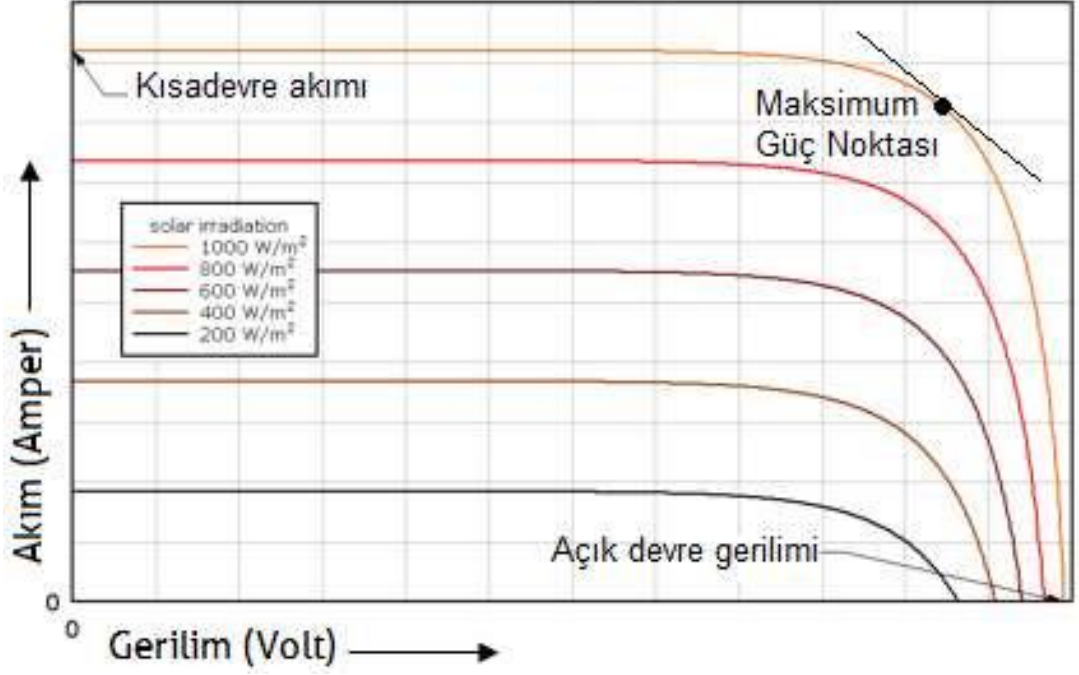


Şekil 3.31: Açık çevrim kontrol yapısının genel gösterimi (Menak 2018)

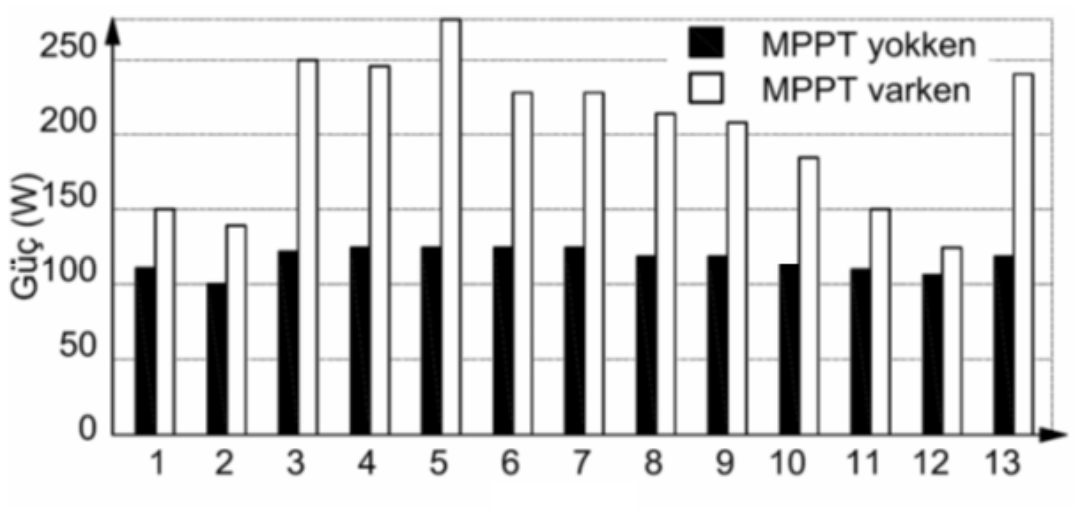
3.8 Maksimum Güç Noktası Takibi (MPPT-Maximum Power Point Tracking)

Maksimum güç noktası takibi (MPPT) tekniği, PV hücrenin üretebildiği enerjinin en yüksek olduğu noktayı yakalamayı hedefleyen bir denetim yapısıdır. PV sistemde MPPT noktasının oluşumunu gösteren grafik Şekil 3.32’de gösterilmiştir. Maksimum güç noktası; hücrenin sıcaklığı, ışımaya miktarı, güneş panelinin eğim açısı, güneş panelinin yaşlanması, tozlanma, gölgelenmesi gibi birçok değişkenle ilişkilidir. Maksimum güç üretiminin oluştuğu noktayı yakalayabilmek için, denetim yöntemine

bağlı olarak güneş paneli değişkenlerini değerlendirir ve güç dönüştürücüsünün parametrelerini değiştirir. Maksimum güç noktası takibi ile üretilen enerji herhangi bir denetimleme yapısı bulunmayan sisteme göre yaklaşık %45 daha fazla enerji üretir (Özdemir 2007). MPPT varken ve MPPT yokken karşılaştırılmış panellerin ürettikleri güç farklarını gösteren veriler Şekil 3.33'te verilmiştir.



Şekil 3.32: PV hücre Akım-Gerilim (I-V) karakteristiği (Kurak ve diğ. 2016)



Şekil 3.33: MPPT varken ve MPPT yokken karşılaştırılmış panellerin ürettiği güç farkları (Panwar ve Saini 2012)

4. MATERYAL ve YÖNTEM

Çalışmada kullanılan sistemin tasarımı, yapım aşaması ve ölçüm çalışmaları Denizli ili İş Adamları Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesinde gerçekleştirilmiştir. Ölçüm çalışmalarının yapıldığı yer; 37,80° enlem, 29° boylam noktasındadır ve 624 m rakım değerine sahiptir. Üç adet fotovoltaik panel, üç adet panel standı, altı adet 10 ohm 100W reosta ve dört adet multimetre kullanılmıştır. Ölçümler, gökyüzünün bulutsuz, gölgelenmenin olmadığı dört ayrı günde yapılmıştır. İlk ölçüm panelin; MPPT noktasını ve en yüksek güç değerini sağladığı omik yükü tespit etmek için 6 Haziran 2023 tarihinde yapılmıştır. Diğer üç ölçüm sırasıyla 7 Haziran 2023, 3 Eylül 2023, 15 Eylül 2023 tarihlerinde yapılmıştır. Bu çalışmalarda; PV panellerden, bir tanesi doğu yönüne (azimut -180°), bir tanesi güney yönüne (azimut 0°), bir tanesi batı yönüne (azimut +180°) sabit bakacak şekilde yerleştirilmiştir. Güneşin doğuşundan, güneşin dik olarak geldiği zamana kadar, azimut açısı 0° olacak şekilde ve optimum eğim açısında sabitlenmiş panelin ve aynı anda azimut açısı -180° olacak şekilde ve optimum eğim açısında sabitlenmiş diğer panelin akım, gerilim, panel sıcaklık ve güneş ışınım değerleri 15 dakika aralıklarla ölçülmüştür. Daha sonra güneşin dik olarak geldiği zamandan, güneşin batışına kadar, azimut açısı 0° olacak şekilde ve optimum eğim açısında sabitlenmiş panelin ve aynı anda azimut açısı +180° olacak şekilde ve optimum eğim açısında sabitlenmiş diğer panelin akım, gerilim, panel sıcaklık ve güneş ışınım değerleri 15 dakika aralıklarla ölçülmüştür. Aynı tarihler için Pvsyst programı ile simülasyon gerçekleştirilmiş olup, ölçümler ile simülasyon arasındaki fark karşılaştırılmıştır. Aradaki farkın makul düzeyde olması sebebiyle, tüm yıl için optimum açığa ayarlanmış sabit şekilde güneye yönlendirilmiş panel ile, mevsimsel optimum açığa ayarlanmış ve ışınımın fazla olduğu yöne (sabah doğu, öğle güney, akşam batı) döndüğü düşünülen sistem simüle edilerek, ürettikleri enerji karşılaştırılmıştır.

4.1 Çalışmada Kullanılan Ekipmanlar

Çalışmada, etiket bilgileri Şekil 4.1’de verilen aynı özellikte üç adet LEXRON LXR-325M 325 Wp PV panel, yük olarak 12,14 Ω değerine ayarlanmış reosta, akım ve gerilim ölçümleri için Unit UT89X Çok Fonksiyonlu True RMS Dijital Multimetre,

panel eğim açısını, panel sıcaklığını, ışınım miktarını ölçmek için EKO MS-01 Solarmeter cihazı kullanılmıştır. Ayrıca cihazların ölçüm doğruluklarını test etmek için METREL MI 3109 cihazı ile de ölçümler yapılmış ve ölçüm farkları %0,5 değerini geçmemiştir. Çalışmada kullanılan ölçüm cihazları Şekil 4.2’de verilmiştir.

Ürün Kodu	LXR-325M
Marka	LEXRON
Sertifikalar	CE, IEC
Elektriksel Özellikler	
Güç	325W
Hücre Sayısı	60
Açık Devre Voltajı (Voc)	37,60V
Maks. Voltaj (Vmp)	31.40V
Kısa Devre Akımı (Isc)	10.18A
Maks. Akım (Imp)	9.87A
Maks. Sistem Voltajı	1000V
Mekanik Özellikler	
Modül Ölçüleri (mm)	1640*990*35
Ağırlık	19kg
Standart Test Koşulları:	
Am=1.5, E=1000W/m ² , Tc=25°C	

Şekil 4.1: Çalışmada kullanılan panelin özellikleri



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.2: Çalışmada kullanılan cihazlar (a)Unit UT89X (b) EKO MS-01 (c) METREL MI 3109

Panellerin optimum açiya ayarlanabilmesi için, panellerin altına Şekil 4.3'te gösterilen stantlar oluşturuldu. Stantların üzerine paneller monte edilerek çalışmalar yapıldı.



Şekil 4.3: Çalışmada kullanılan panel standı

4.2 Panellerin Optimum Açı Değerinin Belirlenmesi

Malezya'daki bir çalışmada beş farklı bölge için PV panellerin aylık ve mevsimlik optimum eğim açı değerlerini belirlemişlerdir. Optimum eğim açı değerlerinin; aylık konumlandırılması ile yaklaşık %6,13, mevsimsel olarak konumlandırılması ile yaklaşık %5,85 verim artışı tespit etmişlerdir (Khatib ve diğ. 2015).

Optimum eğim açısının hesaplanması ile ilgili literatürde birçok çalışma mevcut olup bu çalışmaların sonucunda da eşitlikler geliştirilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda eşitlikler geliştirilmiş ve bu eşitlikler incelendiğinde, çalışmalarda elde edilmiş değerlere en yakın denklemin, Denklem 2.5 olduğu görülmüştür. Bu çalışmada da optimum açı değerinin hesaplanmasında Denklem 2.5 kullanılmıştır. Optimum eğim açısı hesabında kullanılan deklinasyon açısı değerleri için Denklem 2.2'de verilen Cooper denklemi ile Denklem 2.3'te verilen Lunde denklemi kullanılmış ve

bulunan sonuçlar Tablo 4.1’de verilmiştir. Her iki denklemin birbirine yakın sonuçlar verdiği görülmektedir.

Bu çalışmada, Denklem 2.5’te verilen formülle optimum açı değerinin hesaplanmasında kullanılmak üzere, Lunde denklemi ile hesaplanan deklinasyon açı değerleri kullanılmıştır. Optimum açı değeri için, Hottel & Woertz metodu ve Denklem 2.5’te verilen formül için ayrı ayrı iki hesaplama yapılmıştır. Hottel & Woertz metodu, $\beta = \phi - \delta$ formülü ile belirlenmektedir. Çalışmaların yapıldığı alan, Denizli ili $37^{\circ}12' - 38^{\circ}12'$ kuzey paralelleri arasında yer alır. Bu çalışmada kullanılan hesaplamalarda enlem değeri olarak 38° kullanılmıştır. Optimum açı için hesaplanan değerler Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.1: Aylık deklinasyon açısı değerlerinin hesaplanması

Aylar	Yılın kaçınıcı günü	Cooper Denklemi ile Deklinasyon açısı (°) Denklem 2.2	Lunde denklemi ile Deklinasyon açısı (°) Denklem 2.3	Yılın kaçınıcı günü	Cooper Denklemi ile Deklinasyon açısı (°) Denklem 2.2	Lunde denklemi ile Deklinasyon açısı (°) Denklem 2.3
Ocak	1	-23,01	-22,84	18	-20,92	-20,37
Şubat	32	-17,52	-17,07	47	-13,29	-12,46
Mart	60	-8,29	-7,81	75	-2,42	-1,99
Nisan	91	4,02	4,35	105	9,41	9,66
Mayıs	121	14,90	15,04	135	18,79	18,85
Haziran	152	22,04	22,04	162	23,09	23,08
Temmuz	182	23,12	23,15	198	21,18	21,29
Ağustos	213	17,91	18,12	228	13,45	13,78
Eylül	244	7,72	8,19	258	2,22	2,78
Ekim	274	-4,22	-3,57	288	-9,60	-8,93
Kasım	305	-15,36	-14,73	318	-18,91	-18,37
Aralık	335	-22,11	-21,76	344	-23,05	-22,84

Tablo 4.2: Aylık optimum eğim açısının hesaplanması

Yılın kaçınıcı günü	Cooper Denklemi ile Deklinasyon açısı (°) Denklem 2.2	Lunde denklemi ile Deklinasyon açısı (°) Denklem 2.3	H&W Metodu ile Optimum açı değeri	Denklem 2.5 ile Optimum açı değeri
1	-23,01	-22,84	60,84	59,05
32	-17,52	-17,07	55,07	52,53
60	-8,29	-7,81	45,81	42,07
91	4,02	4,35	33,65	28,32
121	14,90	15,04	22,96	16,25
152	22,04	22,04	15,96	8,33
182	23,12	23,15	14,85	7,09
213	17,91	18,12	19,88	12,77
244	7,72	8,19	29,81	23,99
274	-4,22	-3,57	41,57	37,27
305	-15,36	-14,73	52,73	49,89
335	-22,11	-21,76	59,76	57,83

Ölçümlerin yapıldığı günler için; güneşin; doğuş, batış, ortada olduğu zamanı ve gündüz süreleri Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.3: Çalışma günleri için güneş pozisyon zamanları

Tarih	Ayarlanan panel eğim açısı	Güneş doğuş zamanı	Güneş batış zamanı	Güneşin ortada olduğu zaman	Gündüz süresi
7 Haziran 2023	18°	05:42	20:23	13:03	14 saat 41 dakika
3 Eylül 2023	36°	06:34	19:33	13:04	12 saat 59 dakika
15 Eylül 2023	36°	06:45	19:12	12:58	12 saat 27 dakika

Çalışmanın yapıldığı tüm günlerde deney düzenekleri, güneşin doğuş saatinden en az 10 dakika önce ölçüme hazır hale getirilmiş ve güneşin batış saatinden en az 10 dakika sonra ölçüm tamamlanmıştır. Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te ölçüm çalışmaları sırasında çekilmiş fotoğraflar görülmektedir.



Şekil 4.4: Çalışmada kullanılan panelin açısı, ışınım ve yüzey sıcaklığı ölçümü

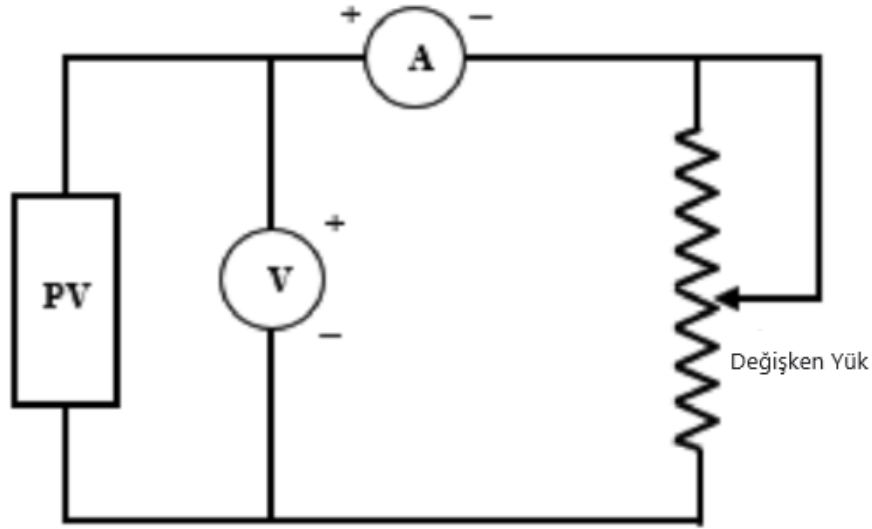


Şekil 4.5: Ölçüm çalışmalarının genel fotoğrafı

5. DENEYSEL SONUÇLAR

5.1 Güneş Panelinin Gerilim-Akım Karakteristiğinin Elde Edilmesi

Deneyleerde kullanılacak olan güneş panellerinin P-V(Güç-Gerilim) ve I-V(Akım-Gerilim) karakteristiği elde edilmiş ve aralarında büyük farklar olmadığı görülmüştür. Bu amaçla Şekil 5.1’de verilmiş olan deney düzeneği 6 Haziran 2023 tarihinde kurulmuş ve ölçümler yapılmıştır. Çalışma; bulutlanmanın olmadığı, yaklaşık 900 W/m^2 radyasyon düzeyi, yaklaşık 25°C panel yüzey sıcaklığı şartlarında 100 W ’lık ayarlı reostanın direnç değerinin sıfırdan başlayarak 23Ω değerine kadar kademeli olarak arttırılması ile gerçekleştirilmiştir. Her direnç artım değeri için yük üzerinden akan akım değeri ve yük üzerine düşen gerilim değerleri Tablo 5.1’de verilmiştir.

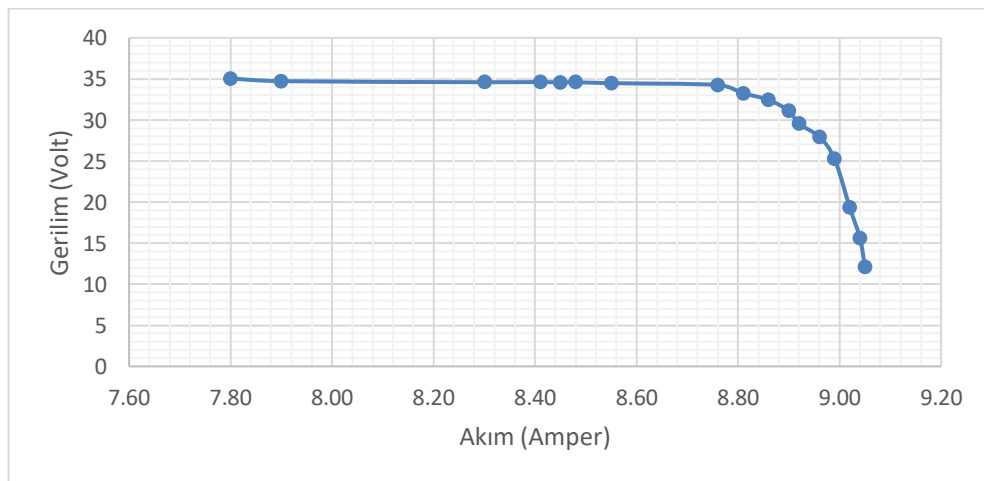


Şekil 5.1: Çalışmada kullanılan ölçüm devresi

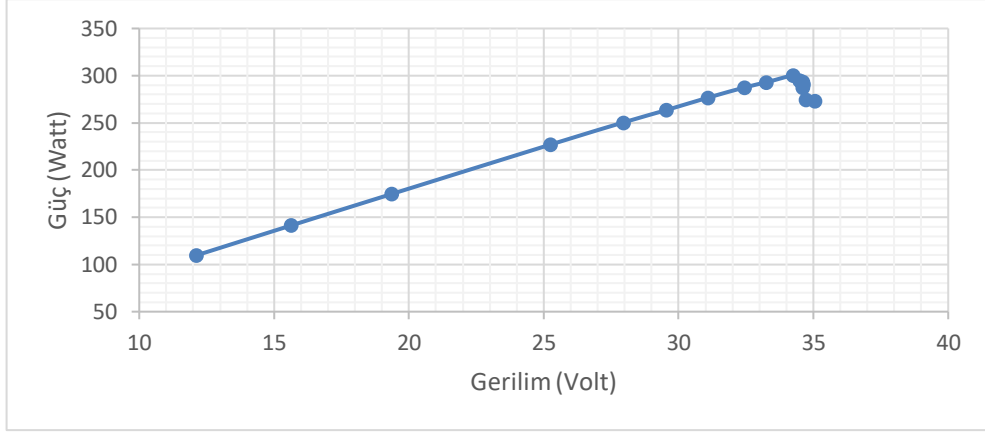
Ölçülen değerler sonucunda, çalışmada kullanılan PV panellerin; Akım-Gerilim (I-V) grafiği Şekil 5.2’de, Gerilim-Güç (V-P) grafiği Şekil 5.3’te, Akım-Güç (I-P) grafiği ise Şekil 5.4’te verilmiştir. Tablodaki değerler incelendiğinde çalışmada kullanılan PV panel için, maksimum akım çektiği yük direnç değerinin $12,14 \Omega$ olduğu görülmektedir. Yapılan çalışmalarda bu yük direnci değeri kullanılmıştır.

Tablo 5.1: Yük direnci değişimi ile panelin akım, gerilim ve güç değerleri

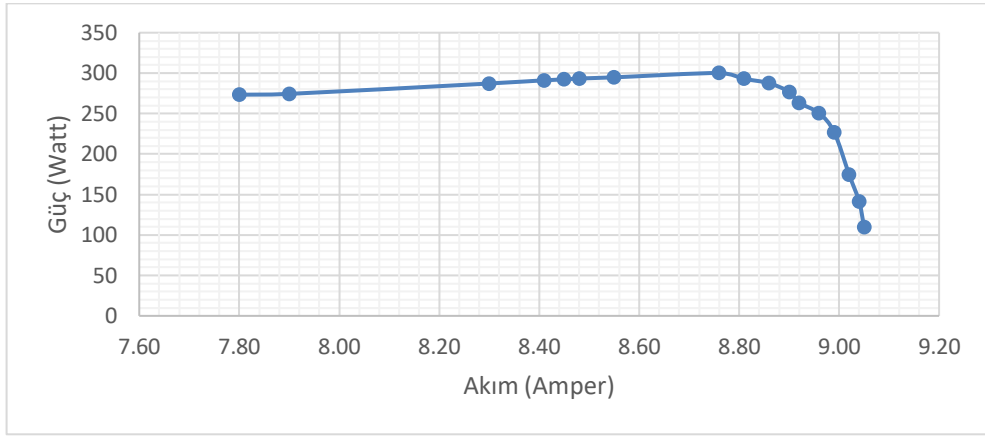
Ölçüm No	Direnç (R)	Akım (A)	Gerilim (V)	Güç (W)
	Ω	Amper	Volt	Watt
1	1,14	9,05	12,12	109,69
2	2,40	9,04	15,63	141,30
3	3,31	9,02	19,36	174,63
4	4,64	8,99	25,26	227,09
5	5,66	8,96	27,95	250,43
6	7,56	8,92	29,54	263,50
7	8,44	8,90	31,10	276,79
8	10,25	8,86	32,45	287,51
9	10,87	8,81	33,26	293,02
10	12,14	8,76	34,26	300,12
11	13,07	8,55	34,48	294,80
12	13,98	8,48	34,60	293,41
13	15,14	8,45	34,58	292,20
14	16,40	8,41	34,62	291,15
15	18,28	8,30	34,60	287,18
16	21,55	7,90	34,73	274,37
17	23,19	7,80	35,05	273,39



Şekil 5.2: Çalışmada kullanılan panel için Akım-Gerilim grafiği



Şekil 5.3: Çalışmada kullanılan panel için Gerilim-Güç grafiği



Şekil 5.4: Çalışmada kullanılan panel için Akım-Güç grafiği

5.2 Ölçüm Sonuçları

Güneşin doğuşundan, orta noktaya gelene kadarki sürede; bir panel doğuya (azimut -180°) bakacak şekilde, diğer panel güneye (azimut 0°) bakacak şekilde Haziran'da yapılan ölçüm için 18° , Eylül'de yapılan ölçümler için 36° eğim açısında yerleştirilmiştir. 15 dakikalık aralıklarla; gerilim, akım, panel sıcaklığı, ışınım miktarı ölçümleri yapıp kaydedilmiştir. Ölçüm sonuçları; 7 Haziran 2023 için Tablo 5.2'de, 3 Eylül 2023 için Tablo 5.4'te, 15 Eylül 2023 için Tablo 5.6'da verilmiştir. Daha sonra çalışmaya ara verilmeden güneşin orta noktada olduğu zamandan, batışına kadarki geçen sürede; bir panel batıya (azimut $+180^\circ$) bakacak şekilde, diğer panel güneye (azimut 0°) bakacak şekilde Haziran'da yapılan ölçüm için 18° , Eylül'de yapılan ölçümler için 36° eğim açısında yerleştirilmiş ve yine 15 dakikalık aralıklarla; gerilim, akım, panel sıcaklığı, ışınım miktarı ölçümleri yapıp kaydedilmiştir. Ölçüm sonuçları; 7 Haziran 2023 için Tablo 5.3'te, 3 Eylül 2023 için Tablo 5.5'te, 15 Eylül 2023 için Tablo 5.7'de verilmiştir.

Tablo 5.2: Azimut -180° ve Azimut 0° yönündeki panellerin ölçümleri (7 Haziran 2023)

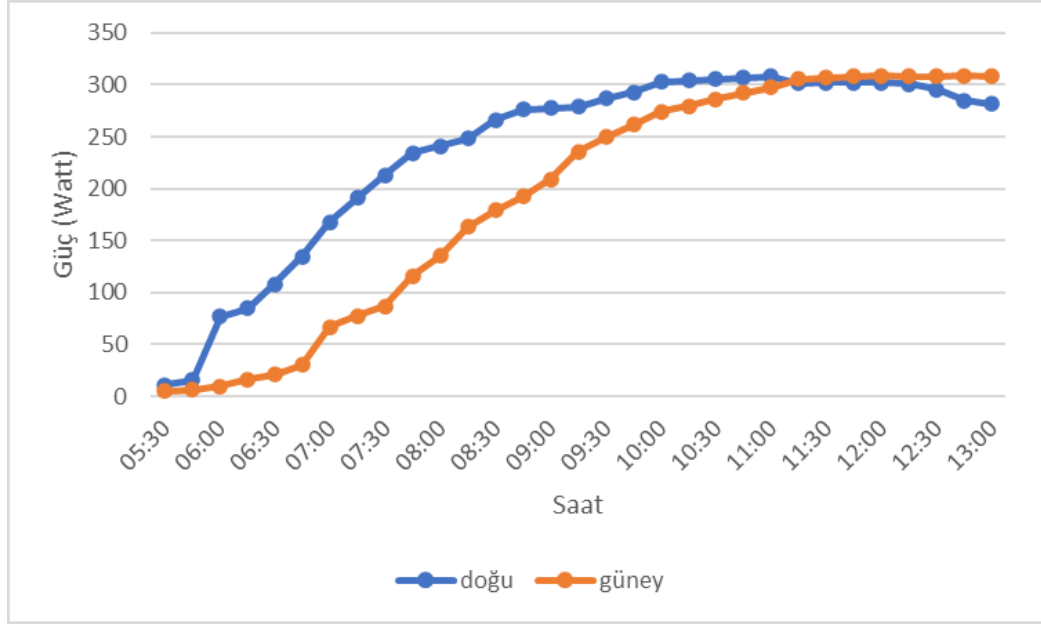
SAAT	Doğu yönüne bakan panel					Güney Yönüne bakan panel				
	Panel Sıcaklığı	Işınım	Gerilim	Akım	Güç	Panel Sıcaklığı	Işınım	Gerilim	Akım	Güç
	°C	W/m ²	Volt	Amper	Watt	°C	W/m ²	Volt	Amper	Watt
05:30	18	<100	31,41	0,35	10,99	18	<100	31,04	0,15	4,66
05:45	18	<100	31,94	0,48	15,33	18	<100	31,07	0,21	6,52
06:00	21	240	34,64	2,21	76,55	18	<100	32,44	0,29	9,41
06:15	23	261	34,51	2,45	84,55	19	<100	32,6	0,49	15,97
06:30	25	331	34,16	3,17	108,29	19	<100	32,88	0,63	20,71
06:45	27	426	33,94	3,97	134,74	20	112	33,01	0,91	30,04
07:00	30	498	33,78	4,96	167,55	21	201	34,03	1,97	67,04
07:15	31	585	33,55	5,69	190,90	23	241	34,07	2,27	77,34
07:30	33	650	33,19	6,43	213,41	25	288	33,85	2,57	86,99
07:45	34	702	32,88	7,13	234,43	27	365	33,49	3,46	115,88
08:00	36	750	32,67	7,37	240,78	30	406	33,86	3,99	135,10
08:15	37	778	32,43	7,66	248,41	32	475	33,74	4,84	163,30
08:30	38	833	32,12	8,29	266,27	35	557	32,57	5,51	179,46
08:45	40	864	31,97	8,65	276,54	37	597	32,66	5,9	192,69
09:00	42	871	31,79	8,73	277,53	38	650	32,79	6,38	209,20
09:15	43	890	31,68	8,81	279,10	39	705	32,85	7,18	235,86
09:30	44	912	31,66	9,06	286,84	42	770	32,42	7,7	249,63
09:45	45	937	31,37	9,34	293,00	45	824	32,04	8,16	261,45
10:00	46	954	31,11	9,73	302,70	46	860	31,87	8,61	274,40
10:15	47	966	31,13	9,78	304,45	47	885	31,66	8,83	279,56
10:30	48	970	31,19	9,8	305,66	49	919	31,63	9,04	285,94
10:45	49	968	31,26	9,82	306,97	51	932	31,42	9,29	291,89
11:00	50	1020	31,29	9,84	307,89	52	960	30,8	9,66	297,53
11:15	51	1004	30,58	9,86	301,52	53	978	31,15	9,8	305,27
11:30	52	1002	30,54	9,9	302,35	54	998	31,28	9,81	306,86
11:45	53	1000	30,47	9,91	301,96	55	1007	31,35	9,82	307,86
12:00	53	998	30,43	9,92	301,87	56	1033	31,43	9,83	308,96
12:15	54	989	30,48	9,86	300,53	56	1014	31,22	9,87	308,14
12:30	53	946	30,56	9,66	295,21	56	1014	31,18	9,89	308,37
12:45	53	932	30,65	9,3	285,05	57	1015	31,1	9,92	308,51
13:00	52	917	30,72	9,16	281,40	57	1037	31,09	9,91	308,10

Haziran ayında yapılan çalışma incelendiğinde; Güneşin doğuşundan itibaren, Saat 11:15'e kadar doğu yönüne bakan panelin, güneye bakan panele göre daha fazla güç ürettiği görülmektedir. Güneş ışınım değerlerine dikkat edildiğinde, Saat 11:45'e kadar doğuya bakan panelin, güneye bakan panele göre daha fazla güneş ışınım değerine sahip olduğu görülmektedir. Ölçüm sonuçları incelendiğinde panel sıcaklığının, enerji üretimini etkilediği görülmektedir. Sabit olarak güney yönüne ve doğu yönüne bakan PV panellerin grafiksel gösterimi Şekil 5.5'te verilmiştir.

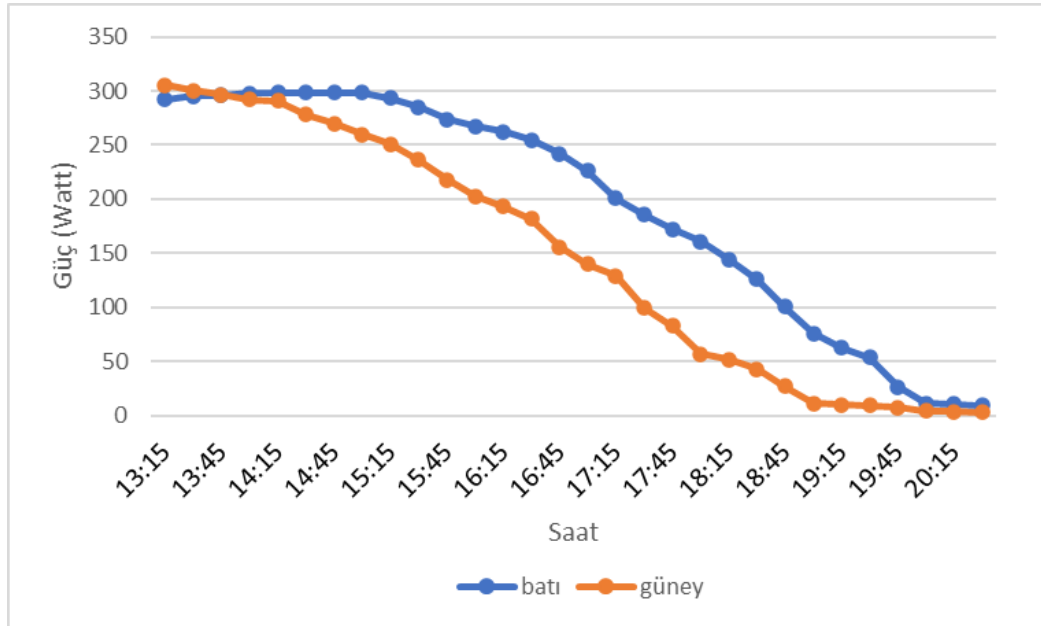
Tablo 5.3: Azimut +180° ve Azimut 0° yönündeki panellerin ölçümleri (7 Haziran 2023)

SAAT	Batı yönüne bakan panel					Güney Yönüne bakan panel				
	Panel Sıcaklığı	Işınım	Gerilim	Akım	Güç	Panel Sıcaklığı	Işınım	Gerilim	Akım	Güç
	°C	W/m ²	Volt	Amper	Watt	°C	W/m ²	Volt	Amper	Watt
13:15	52	995	30,21	9,66	291,83	57	1016	30,94	9,87	305,38
13:30	53	998	30,18	9,78	295,16	57	1014	30,82	9,74	300,19
13:45	54	1007	30,12	9,83	296,08	57	1012	30,53	9,71	296,45
14:00	56	1012	30,06	9,90	297,59	56	978	30,31	9,64	292,19
14:15	57	1008	30,14	9,89	298,08	56	965	30,44	9,56	291,01
14:30	56	1001	30,21	9,87	298,17	55	934	30,55	9,11	278,31
14:45	56	992	30,24	9,86	298,17	54	890	30,75	8,77	269,68
15:00	55	980	30,29	9,86	298,66	52	821	30,87	8,42	259,93
15:15	55	956	30,45	9,64	293,54	51	809	31,14	8,05	250,68
15:30	54	921	30,55	9,33	285,03	49	789	31,39	7,53	236,37
15:45	54	897	30,66	8,92	273,49	48	698	31,46	6,92	217,70
16:00	53	876	30,86	8,66	267,25	47	685	31,65	6,41	202,88
16:15	52	835	30,94	8,47	262,06	47	680	31,77	6,09	193,48
16:30	51	795	31,18	8,17	254,74	46	621	32,04	5,67	181,67
16:45	49	756	31,33	7,72	241,87	46	546	32,31	4,83	156,06
17:00	47	720	31,56	7,16	225,97	45	451	32,70	4,28	139,96
17:15	45	684	31,66	6,34	200,72	41	403	32,74	3,95	129,32
17:30	44	634	31,89	5,81	185,28	39	346	32,85	3,02	99,21
17:45	42	587	32,24	5,34	172,16	36	289	32,96	2,51	82,73
18:00	40	505	32,68	4,93	161,11	30	234	33,19	1,71	56,75
18:15	37	469	32,77	4,41	144,52	29	198	32,77	1,58	51,78
18:30	34	409	32,91	3,82	125,72	28	135	32,21	1,33	42,84
18:45	32	337	33,12	3,04	100,68	27	105	31,61	0,86	27,18
19:00	31	270	33,42	2,27	75,86	26	<100	31,12	0,36	11,20
19:15	30	246	33,21	1,88	62,43	25	<100	31,03	0,33	10,24
19:30	29	204	32,82	1,63	53,50	25	<100	31,01	0,30	9,30
19:45	28	<100	31,62	0,83	26,24	24	<100	31,00	0,25	7,75
20:00	27	<100	31,14	0,36	11,21	24	<100	30,98	0,15	4,65
20:15	26	<100	31,12	0,34	10,58	23	<100	30,99	0,12	3,72
20:30	23	<100	31,10	0,30	9,33	21	<100	30,97	0,10	3,10

Haziran'da yapılan çalışma incelendiğinde; Saat 13:45'ten sonra güneşin batışına kadarki sürede, batı yönüne bakan panelin, güney yönüne bakan panele göre daha fazla güç ürettiği görülmektedir. Güneş ışınım değerlerine dikkat edildiğinde ise Saat 13:45'ten sonra batı yönüne bakan panelin, güney yönüne bakan panele göre daha fazla güneş ışınım değerine sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca panel sıcaklığındaki artışın enerji üretimini etkilediği görülmektedir. Sabit olarak güney yönüne ve batı yönüne bakan PV panellerin güç değerlerinin zamana göre değişimi Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



Şekil 5.5: Azimut 0° ve Azimut -180° yönündeki paneller tarafından üretilen gücün zamana göre değişimi (7 Haziran 2023)



Şekil 5.6: Azimut 0° ve Azimut $+180^\circ$ yönündeki paneller tarafından üretilen gücün zamana göre değişimi (7 Haziran 2023)

Tablo 5.4: Azimut -180° ve Azimut 0° yönündeki panellerin ölçümleri (3 Eylül 2023)

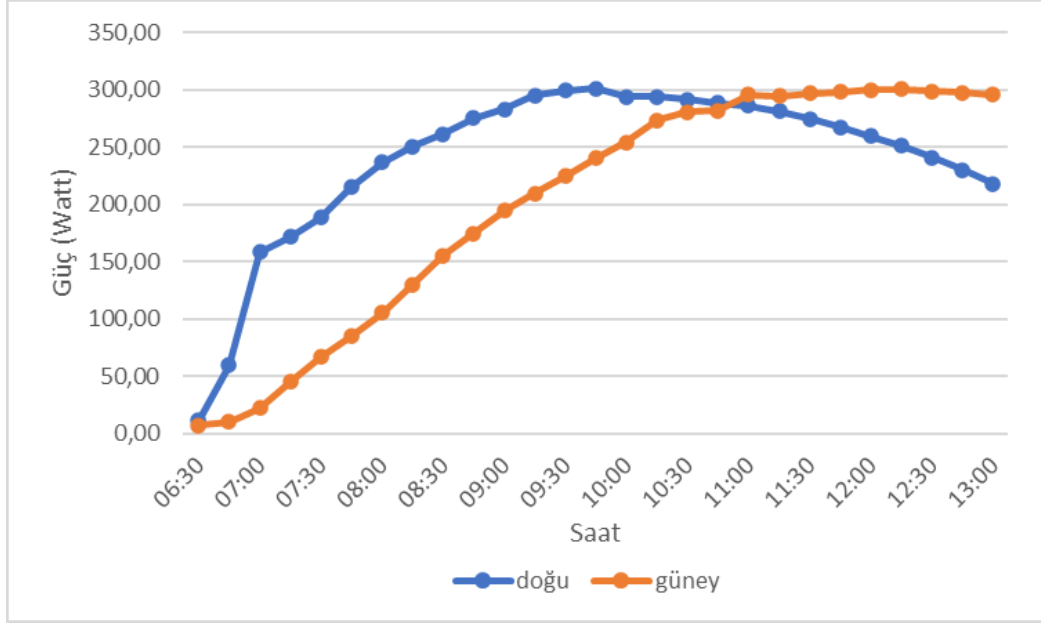
SAAT	Doğu yönüne bakan panel					Güney Yönüne bakan panel				
	Panel Sıcaklığı	Işınım	Gerilim	Akım	Güç	Panel Sıcaklığı	Işınım	Gerilim	Akım	Güç
	°C	W/m ²	Volt	Amper	Watt	°C	W/m ²	Volt	Amper	Watt
06:30	24	<100	31,03	0,37	11,48	23	<100	31,01	0,23	7,13
06:45	29	235	33,44	1,77	59,19	24	<100	31,45	0,31	9,75
07:00	35	489	33,28	4,76	158,41	24	104	32,93	0,67	22,06
07:15	37	527	33,05	5,2	171,86	26	159	33	1,37	45,21
07:30	39	581	32,59	5,78	188,37	28	220	33,8	1,98	66,92
07:45	42	659	32,81	6,56	215,23	30	284	33,17	2,56	84,92
08:00	46	758	31,67	7,47	236,57	33	355	33,26	3,17	105,43
08:15	48	778	32,43	7,73	250,68	35	411	32,98	3,94	129,94
08:30	50	833	32,12	8,14	261,46	37	475	32,65	4,75	155,09
08:45	51	864	31,97	8,61	275,26	41	541	32,38	5,39	174,53
09:00	53	917	30,69	9,23	283,27	44	610	32,03	6,08	194,74
09:15	55	924	31,68	9,31	294,94	46	667	31,68	6,62	209,72
09:30	56	940	31,56	9,48	299,19	49	728	31,32	7,17	224,56
09:45	57	954	31,27	9,63	301,13	52	790	30,94	7,76	240,09
10:00	58	980	29,91	9,83	294,02	54	860	30,57	8,31	254,04
10:15	58	986	29,82	9,85	293,73	56	892	31,3	8,73	273,25
10:30	59	977	29,76	9,8	291,65	58	928	31,03	9,04	280,51
10:45	59	965	29,72	9,71	288,58	60	963	29,75	9,47	281,73
11:00	60	956	29,69	9,64	286,21	61	1001	29,48	10,04	295,98
11:15	61	935	29,73	9,46	281,25	63	1020	29,29	10,05	294,36
11:30	60	913	29,8	9,21	274,46	65	1037	29,42	10,09	296,85
11:45	60	891	29,87	8,95	267,34	66	1054	29,57	10,09	298,36
12:00	59	869	29,93	8,68	259,79	66	1076	29,73	10,09	299,98
12:15	58	831	30,04	8,36	251,13	67	1078	29,77	10,09	300,38
12:30	57	790	30,16	7,98	240,68	67	1079	29,58	10,1	298,76
12:45	57	747	30,29	7,59	229,90	67	1080	29,41	10,11	297,34
13:00	56	704	30,42	7,16	217,81	68	1081	29,29	10,1	295,83

3 Eylül’de yapılan çalışma incelendiğinde; Saat 11:15’e kadar doğu yönüne bakan panelin, güneye bakan panele göre daha fazla güç ürettiği görülmektedir. Güneş ışınım değerlerine dikkat edildiğinde, Saat 11:00’e kadar doğuya bakan panelin, güneye bakan panele göre daha fazla güneş ışınım değerine sahip olduğu görülmektedir. Ölçüm sonuçları incelendiğinde panel sıcaklığının, enerji üretimini etkilediği görülmektedir. Sabit olarak güney yönüne ve doğu yönüne bakan PV panellerin grafiksel gösterimi Şekil 5.7’de verilmiştir.

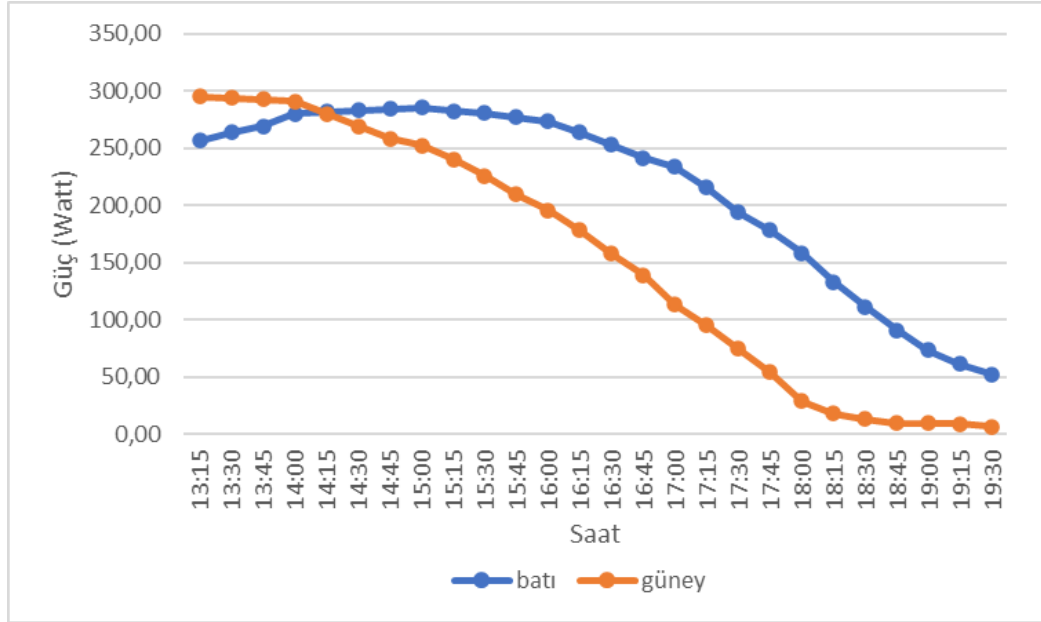
Tablo 5.5: Azimut +180° ve Azimut 0° yönündeki panellerin ölçümleri (3 Eylül 2023)

SAAT	Batı yönüne bakan panel					Güney Yönüne bakan panel				
	Panel Sıcaklığı	Işınım	Gerilim	Akım	Güç	Panel Sıcaklığı	Işınım	Gerilim	Akım	Güç
	°C	W/m ²	Volt	Amper	Watt	°C	W/m ²	Volt	Amper	Watt
13:15	58	860	30,01	8,56	256,89	68	1082	29,17	10,13	295,49
13:30	59	884	29,76	8,88	264,27	67	1064	29,11	10,11	294,30
13:45	62	910	29,5	9,13	269,34	67	1032	29,04	10,09	293,01
14:00	64	963	29,26	9,58	280,31	65	1014	28,91	10,08	291,41
14:15	64	971	29,2	9,65	281,78	64	975	29,08	9,63	280,04
14:30	64	980	29,12	9,73	283,34	62	930	29,26	9,21	269,48
14:45	65	989	29,04	9,8	284,59	61	883	29,45	8,77	258,28
15:00	65	996	28,99	9,86	285,84	60	847	29,64	8,52	252,53
15:15	66	1002	29,05	9,74	282,95	58	801	29,84	8,05	240,21
15:30	66	992	29,15	9,63	280,71	56	754	30,05	7,53	226,28
15:45	65	967	29,21	9,5	277,50	55	708	30,27	6,92	209,47
16:00	64	941	29,26	9,36	273,87	54	667	30,55	6,41	195,83
16:15	63	904	29,48	8,96	264,14	56	603	30,81	5,79	178,39
16:30	61	860	29,61	8,54	252,87	54	535	31,1	5,07	157,68
16:45	60	826	29,77	8,12	241,73	50	470	31,36	4,43	138,92
17:00	58	774	30,16	7,76	234,04	45	400	31,7	3,58	113,49
17:15	56	714	30,46	7,09	215,96	41	338	31,74	3	95,22
17:30	54	654	30,78	6,31	194,22	39	270	31,65	2,36	74,69
17:45	51	597	31,06	5,74	178,28	37	205	31,56	1,71	53,97
18:00	48	540	31,48	5,03	158,34	36	135	31,49	0,91	28,66
18:15	45	479	31,67	4,21	133,33	39	101	31,42	0,58	18,22
18:30	42	401	31,75	3,52	111,76	34	<100	31,33	0,43	13,47
18:45	38	317	32,02	2,84	90,94	30	<100	31,25	0,31	9,69
19:00	35	250	32,32	2,27	73,37	27	<100	31,14	0,3	9,34
19:15	31	126	32,71	1,88	61,49	25	<100	31,03	0,28	8,69
19:30	28	<100	32,12	1,63	52,36	24	<100	31,01	0,22	6,82

3 Eylül’de yapılan çalışma incelendiğinde; Saat 14:15’ten sonra güneşin batışına kadarki sürede, batı yönüne bakan panelin, güney yönüne bakan panele göre daha fazla güç ürettiği görülmektedir. Güneş ışınım değerlerine dikkat edildiğinde ise Saat 14:15’ten sonra batı yönüne bakan panelin, güney yönüne bakan panele göre daha fazla güneş ışınım değerine sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca panel sıcaklığındaki artışın enerji üretimini etkilediği görülmektedir. Sabit olarak güney yönüne ve batı yönüne bakan PV panellerin güç değerlerinin zamana göre değişimi Şekil 5.8’de gösterilmiştir.



Şekil 5.7: Azimut 0° ve Azimut -180° yönündeki paneller tarafından üretilen gücün zamana göre değişimi (3 Eylül 2023)



Şekil 5.8: Azimut 0° ve Azimut $+180^\circ$ yönündeki paneller tarafından üretilen gücün zamana göre değişimi (3 Eylül 2023)

Tablo 5.6: Azimut -180° ve Azimut 0° yönündeki panellerin ölçümleri (15 Eylül 2023)

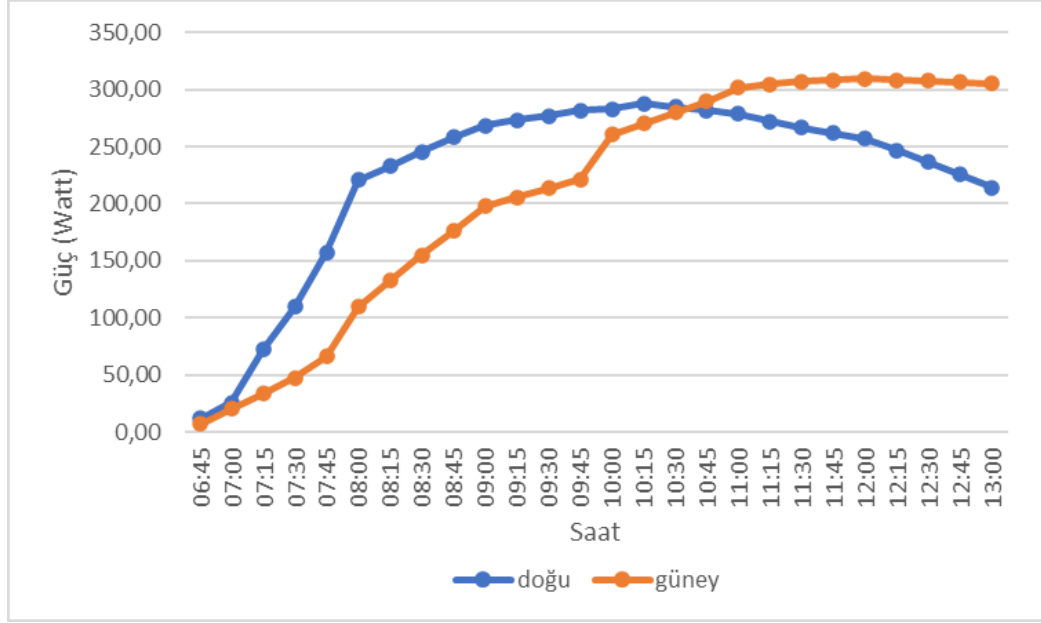
SAAT	Doğu yönüne bakan panel					Güney Yönüne bakan panel				
	Panel Sıcaklığı	Işınım	Gerilim	Akım	Güç	Panel Sıcaklığı	Işınım	Gerilim	Akım	Güç
	°C	W/m ²	Volt	Amper	Watt	°C	W/m ²	Volt	Amper	Watt
06:45	26	<100	33,13	0,37	12,26	23	<100	33,01	0,23	7,59
07:00	30	335	33,74	0,77	25,98	25	<100	33,45	0,61	20,40
07:15	33	429	33,54	2,16	72,45	24	156	33,53	1,01	33,87
07:30	36	517	33,28	3,3	109,82	26	212	33,58	1,43	48,02
07:45	38	599	32,93	4,78	157,41	28	270	33,63	1,98	66,59
08:00	40	690	32,61	6,76	220,44	30	324	33,67	3,26	109,76
08:15	41	738	32,4	7,19	232,96	33	398	33,36	3,97	132,44
08:30	42	778	32,19	7,63	245,61	35	471	33,08	4,69	155,15
08:45	44	810	31,92	8,08	257,91	37	549	32,75	5,38	176,20
09:00	46	854	31,55	8,51	268,49	41	621	32,48	6,09	197,80
09:15	47	870	31,39	8,7	273,09	43	675	32,18	6,39	205,63
09:30	49	888	31,24	8,87	277,10	45	632	31,86	6,71	213,78
09:45	51	908	31,09	9,05	281,36	47	686	31,55	7,02	221,48
10:00	53	924	30,97	9,13	282,76	49	840	31,14	8,36	260,33
10:15	54	940	30,85	9,32	287,52	51	876	30,9	8,75	270,38
10:30	54	946	30,74	9,25	284,35	53	912	30,65	9,13	279,83
10:45	55	935	30,63	9,19	281,49	55	949	30,32	9,54	289,25
11:00	55	915	30,52	9,13	278,65	58	998	30,15	10,01	301,80
11:15	54	900	30,44	8,94	272,13	59	1012	30,36	10,03	304,51
11:30	53	883	30,54	8,72	266,31	60	1025	30,57	10,05	307,23
11:45	52	865	30,65	8,53	261,44	61	1037	30,76	10,01	307,91
12:00	52	851	30,77	8,35	256,93	61	1056	30,97	9,98	309,08
12:15	51	816	30,84	8	246,72	62	1055	30,83	10	308,30
12:30	51	778	30,91	7,64	236,15	62	1052	30,68	10,02	307,41
12:45	50	733	31,01	7,27	225,44	63	1050	30,55	10,03	306,42
13:00	50	707	31,09	6,89	214,21	63	1048	30,41	10,04	305,32

15 Eylül’de yapılan çalışma incelendiğinde; Saat 10:45’e kadar doğu yönüne bakan panelin, güneye bakan panele göre daha fazla güç ürettiği görülmektedir. Güneş ışınım değerlerine dikkat edildiğinde, Saat 10:30’a kadar doğuya bakan panelin, güneye bakan panele göre daha fazla güneş ışınım değerine sahip olduğu görülmektedir. Ölçüm sonuçları incelendiğinde panel sıcaklığının, enerji üretimini etkilediği görülmektedir. Sabit olarak güney yönüne ve doğu yönüne bakan PV panellerin grafiksel gösterimi Şekil 5.9’da verilmiştir.

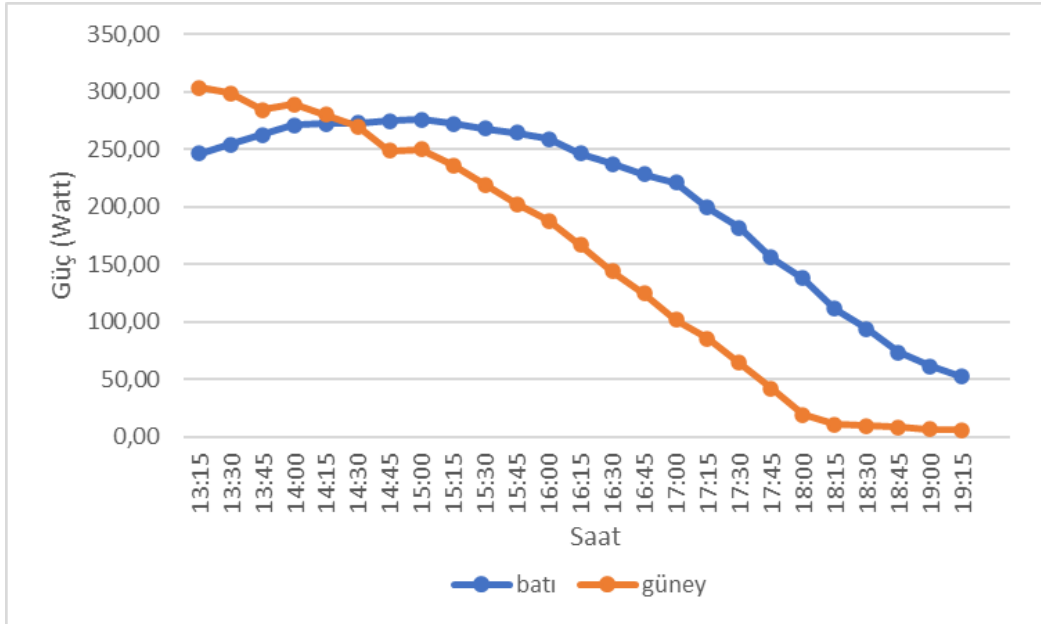
Tablo 5.7: Azimut -180° ve Azimut 0° yönündeki panellerin ölçümleri (15 Eylül 2023)

SAAT	Batı yönüne bakan panel					Güney Yönüne bakan panel				
	Panel Sıcaklığı	Işınım	Gerilim	Akım	Güç	Panel Sıcaklığı	Işınım	Gerilim	Akım	Güç
	°C	W/m ²	Volt	Amper	Watt	°C	W/m ²	Volt	Amper	Watt
13:15	52	815	30,76	8,01	246,39	62	1044	30,37	10,01	304,00
13:30	54	840	30,52	8,34	254,54	62	1024	30,04	9,96	299,20
13:45	56	869	30,26	8,68	262,66	61	1003	28,71	9,9	284,23
14:00	58	901	30,12	9,01	271,38	60	985	29,45	9,83	289,49
14:15	58	907	30,05	9,06	272,25	59	947	29,66	9,45	280,29
14:30	58	914	29,98	9,11	273,12	57	912	29,88	9,03	269,82
14:45	59	921	29,91	9,18	274,57	56	872	29,12	8,54	248,68
15:00	59	928	29,85	9,24	275,81	55	831	30,34	8,25	250,31
15:15	58	937	29,94	9,09	272,15	54	774	30,56	7,74	236,53
15:30	58	911	30,03	8,94	268,47	52	728	30,78	7,12	219,15
15:45	57	889	30,13	8,78	264,54	50	667	31,08	6,51	202,33
16:00	56	865	30,28	8,56	259,20	48	607	31,41	5,98	187,83
16:15	55	820	30,01	8,21	246,38	46	536	31,63	5,28	167,01
16:30	53	783	30,36	7,82	237,42	44	468	31,86	4,53	144,33
16:45	52	748	30,74	7,43	228,40	42	402	32,08	3,88	124,47
17:00	50	710	31,16	7,09	220,92	39	348	32,34	3,15	101,87
17:15	48	645	31,38	6,35	199,26	36	290	32,26	2,66	85,81
17:30	46	565	31,76	5,74	182,30	34	216	32,17	2,01	64,66
17:45	44	510	31,08	5,03	156,33	32	144	32,09	1,31	42,04
18:00	41	429	32,37	4,26	137,90	30	104	32	0,6	19,20
18:15	38	356	32,65	3,42	111,66	28	<100	31,89	0,33	10,52
18:30	35	275	33,02	2,84	93,78	26	<100	31,76	0,31	9,85
18:45	32	189	32,32	2,27	73,37	25	<100	31,64	0,27	8,54
19:00	29	<100	32,71	1,88	61,49	24	<100	31,33	0,21	6,58
19:15	26	<100	32,12	1,63	52,36	23	<100	31,01	0,2	6,20

15 Eylül'de yapılan çalışma incelendiğinde; Saat 14:30'dan sonra güneşin batışına kadarki sürede, batı yönüne bakan panelin, güney yönüne bakan panele göre daha fazla güç ürettiği görülmektedir. Güneş ışınım değerlerine dikkat edildiğinde ise Saat 14:30'dan sonra batı yönüne bakan panelin, güney yönüne bakan panele göre daha fazla güneş ışınım değerine sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca panel sıcaklığındaki artışın enerji üretimini etkilediği görülmektedir. Sabit olarak güney yönüne ve batı yönüne bakan PV panellerin güç değerlerinin zamana göre değişimi Şekil 5.10'da gösterilmiştir.



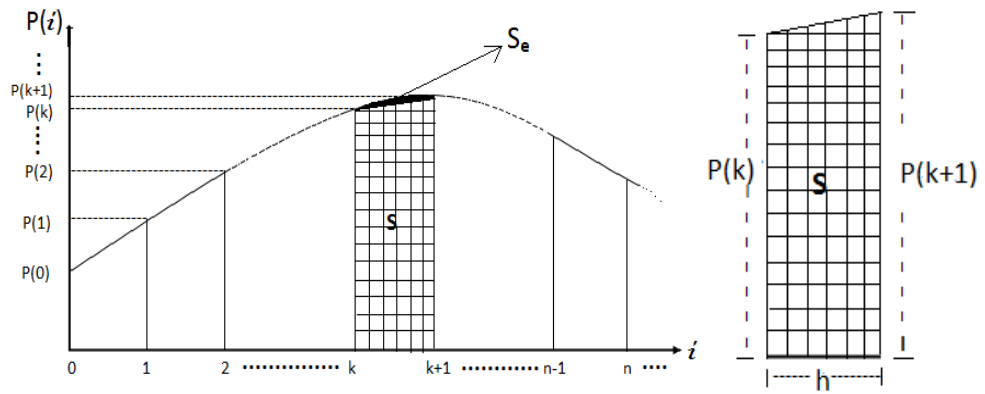
Şekil 5.9: Azimut 0° ve Azimut -180° yönündeki paneller tarafından üretilen gücün zamana göre değişimi (15 Eylül 2023)



Şekil 5.10: Azimut 0° ve Azimut -180° yönündeki paneller tarafından üretilen gücün zamana göre değişimi (15 Eylül 2023)

5.3 Panellerden Çekilen Enerjinin Hesaplanması ve Elde Edilen Değerlerin Karşılaştırılması

Panellerin ürettiği güç değerleri, Tablo 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 ve 5.7 ile verilen ölçüm değerleri kullanılarak, dikdörtgen veya yamuk kuralı ile sayısal integrasyon yöntemi ile gerçekleştirilebilir. Şekil 5.11’de sayısal integrasyon yöntemi ile yamuk kuralı gösterilmiştir. İntegral alma işleminin yaklaşık ifadesi Denklem 5.1’de verilmiştir (Bükün 2017).



Şekil 5.11: Sayısal integrasyon yöntemi ile yamuk kuralı grafiği (Bükün 2017)

$$S_T = S + S_e$$

S_T =Toplam Alan

S_e =Yaklaşık Alan

$$S \cong \left[\frac{P[k]+P[k+1]}{2} \right] \cdot h \quad (5.1)$$

Denklem 5.1’de iki ölçüm aralığında verilen formülü, tüm ölçüm değerleri için uyarladığımızda Denklem 5.2’deki formüle ulaşabiliriz.

$$W \cong \sum_{i=1}^{n-1} \frac{(P_i+(P_{i+1}))}{2} \times h \cong \frac{h}{2} \sum_{i=1}^{n-1} (P_i + (P_i + 1)) \quad (5.2)$$

n ölçüm değerlerini, h ise saat cinsinden ölçüm aralığını göstermektedir. Denklem 5.2’deki formül ve Tablo 4.5’deki güç ölçüm verileri kullanılarak Saat 05:30-13:00 arası, sabit güneşe ve doğuya bakan panellerden çekilen yaklaşık enerji

miktarı Watt.saat (Wh) cinsinden, Denklem 5.3 ve Denklem 5.4 ile hesaplanabilir. Ölçümler 15 dakikalık aralıklarla yapılmıştır. 15 dakikanın saat karşılığı değeri 0,25'tir. 7 Haziran 2023 tarihinde yapılan ölçüm sonuçları için hesaplama açıkça gösterilmiştir. Diğer günler için yapılan ölçüm değerlerinin hesaplaması aynı şekilde yapılmış, sonuç değerleri gösterilmiştir.

$$W(\text{doğu}) \cong \frac{0,25}{2} \sum_{i=1}^{31} (P_i + (P_i + 1)) = 1789,14 \text{ Wh} \quad (5.3)$$

$$W(\text{güney}) \cong \frac{0,25}{2} \sum_{i=1}^{31} (P_i + (P_i + 1)) = 1449,07 \text{ Wh} \quad (5.4)$$

Denklem 5.3 ve Denklem 5.4'ten elde edilen enerji toplamı, sırasıyla hareket ettirmeksizin doğu ve güney yönlerine bakan panellerden 7,5 saat süre boyunca elde edilen enerji toplamlarıdır. Bu enerji toplamlarını 7,5 saate bölersek her bir panelin gün boyunca bir saatte üretmiş oldukları ortalama enerji miktarını Watt/Saat (W/h) cinsinden ifade edebiliriz.

$$W(\text{doğu}) \cong \frac{1789,14}{7,5} = 238,55 \text{ W/h} \quad (5.5)$$

$$W(\text{güney}) \cong \frac{1449,07}{7,5} = 193,21 \text{ W/h} \quad (5.6)$$

Denklem 5.5 ve Denklem 5.6'daki değerler göz önüne alındığında, sabit şekilde doğuya bakan panelin, sabit şekilde güneye bakan panele göre elde edilen günlük ortalama enerji artışı Denklem 5.7 ile hesaplanmıştır.

$$\frac{W(\text{doğu}) - W(\text{güney})}{W(\text{güney})} \times 100 = \frac{238,55 - 193,21}{193,21} \times 100 \cong \%23,47 \quad (5.7)$$

Denklem 5.7'den elde edilen sonuca bakıldığında; güneşin doğuşundan, orta noktaya geldiği zamana kadar sabit olarak doğuya bakan panel, sabit olarak güneye bakan PV panele göre %23,47 daha fazla enerji üretmiştir. Bu ölçümlerin ekinoks zamanından yaza kayan dilimde yapılması bu sonucu almamızı sağlamıştır. Farklı zamanlarda güneşin doğuşundan batışına kadar izlediği yolun eğimine bağlı olarak PV panelin daha farklı verim değerleri verebileceği tahmin edilebilir.

Aynı hesaplamaları Denklem 5.2 ve Tablo 4.6'daki güç ölçüm verileri kullanılarak Saat 13:15-20:30 arası, sabit güneye ve batıya bakan panellerden çekilen yaklaşık enerji miktarları, Denklem 5.8 ve Denklem 5.9 yardımı ile hesaplanabilir.

$$W(batı) \cong \frac{0,25}{2} \sum_{i=1}^{30} (P_i + (P_i + 1)) = 1416,61 \text{ Wh} \quad (5.8)$$

$$W(güney) \cong \frac{0,25}{2} \sum_{i=1}^{30} (P_i + (P_i + 1)) = 1064,37 \text{ Wh} \quad (5.9)$$

Denklem 5.8 ve Denklem 5.9'dan elde edilen enerji değerleri, sırasıyla hareket ettirmeksizin batı ve güney yönlerine bakan panellerden 7,25 saat süre boyunca elde edilen enerji toplamlarıdır. Bu enerji toplamları, 7,25 saate bölünerek, her bir panelin gün boyunca bir saatte üretmiş oldukları ortalama enerji miktarı W/h olarak ifade edilir.

$$W(batı) \cong \frac{1416,61}{7,25} = 195,39 \text{ W/h} \quad (5.10)$$

$$W(güney) \cong \frac{1064,37}{7,25} = 146,81 \text{ W/h} \quad (5.11)$$

Denklem 5.10 ve Denklem 5.11'deki değerler göz önüne alındığında, sabit şekilde batıya bakan panelin, güneye bakan panele göre elde edilen günlük ortalama enerji artışı Denklem 5.12 ile hesaplanmıştır.

$$\frac{W(batı)-W(güney)}{W(güney)} \times 100 = \frac{195,39-146,81}{146,81} \times 100 \cong \%33,09 \quad (5.12)$$

Denklem 5.12'deki sonuca bakarak; güneşin tam orta noktaya geldiği zamandan, güneşin batışına kadarki zaman diliminde, sabit olarak batıya bakan panel, sabit olarak güneye bakan panele göre %33,09 daha fazla enerji üretmiştir. Bu ölçümlerin ekinoks zamanından yaza kayan dilimde yapılması bu sonucu almamızı sağlamıştır. Farklı zamanlarda güneşin doğuşundan ve batışına kadar izlediği yolun eğimine bağlı olarak daha farklı verim değerleri verebileceği tahmin edilebilir.

Güneş ışınım değerleri göz önüne alınarak;

- Sabah saatlerinde, doğu yönüne bakan panelin, güney yönüne bakan panelden daha fazla ışınım değeri aldığı anlarda, panelin doğu yönüne;

- Öğleden sonra, batı yönüne bakan panelin, güney yönüne bakan panelden daha fazla ışınım değeri aldığı anlarda, panelin batı yönüne;
- Öğle saatlerinde, güneye bakan panelin, doğuya ve batıya bakan panellerden daha fazla ışınım değeri aldığı anlarda, panelin güney yönüne baktığı düşünüldüğünde;

sabit olarak güney yönüne bakan panele oranla ne kadar verim artışı olacağı irdelenmiştir.

Çalışmanın yapıldığı günler, Saat 11:45'e kadar doğu yönüne bakan panel, Saat 13:45'ten sonra batıya bakan panel, güney yönüne bakan panele göre daha fazla ışınım değeri almıştır. Saat 11:30'a kadar panelin doğu yönüne, Saat 11:45'ten 13:45'e kadar güney yönüne, Saat 13:45'ten sonra batı yönüne baktığı düşünülerek Denklem 5.2 yardımıyla ürettikleri enerji hesaplanmıştır.

$$W(\text{toplam}) \cong \frac{0,25}{2} \sum_{i=1}^{60} (P_i + (P_i + 1)) = 3303,13 \text{ Wh} \quad (5.13)$$

Doğu, güney ve batı yönlerine sırasıyla bakan panelin ürettiği toplam enerji Denklem 5.13 ile verilmiştir. Çalışmanın yapıldığı tüm gün boyunca güney yönüne sabit olarak bakan panelin ürettiği toplam enerji Denklem 5.14 ile verilmiştir.

$$W(\text{sabitgüney}) \cong \frac{0,25}{2} \sum_{i=1}^{60} (P_i + (P_i + 1)) = 2590,12 \text{ Wh} \quad (5.14)$$

Denklem 5.13 ve Denklem 5.14 ile bulunan toplam enerji miktarları W/h cinsinden hesaplanmak istenirse; çalışmanın yapıldığı toplam süre 15 saat olduğuna göre;

$$W(\text{toplam}) \cong \frac{3303,13}{15} = 220,21 \text{ W/h} \quad (5.15)$$

$$W(\text{sabitgüney}) \cong \frac{2590,12}{15} = 172,67 \text{ W/h} \quad (5.16)$$

olarak bulunur. Bulunan bu değerler göz önüne alındığında, güneş ışınım değerinin fazla olduğu yöne bakan panelin, sabit olarak gün boyu güney yönüne bakan panele göre elde edilen günlük ortalama enerji artışının;

$$\frac{W(\text{toplama})-W(\text{sabitgüney})}{W(\text{sabitgüney})} \times 100 = \frac{220,21-172,67}{172,67} \times 100 \cong \%27,53 \quad (5.17)$$

olduğu görülür. Bu sonuç, güneş ışınım değerinin fazla olduğu yöne (sırasıyla doğu, güney, batı) bakan panelin, sabit olarak gün boyu güney yönüne bakan panele göre yaklaşık olarak %27,53 daha fazla enerji üretebileceğini göstermektedir. Diğer tarihlerde yapılan iki çalışmanın verileri Tablo 5.8'de verilmiştir.

Tablo 5.8: Ölçüm yapılan günlerin, hesaplanan verileri

Çalışmanın Yapıldığı Tarih	Sabah-Öğle			Öğle-Akşam			Işınmıma bağlı		
	W (doğu)	W (güney)	Fazla Güç oranı	W (batı)	W (güney)	Fazla Güç oranı	W (toplama)	W (sabitgüney)	Fazla Güç oranı
	W/h	W/h	%	W/h	W/h	%	W/h	W/h	%
7.06.2023	238,55	193,21	23,47	195,39	146,81	33,09	220,21	172,67	27,53
3.09.2023	244,96	203,31	20,49	217,18	154,5	40,57	240,52	181,62	32,43
15.09.2023	241,23	211,6	14,00	210,3	154,49	36,13	232,96	186,05	25,21

Sabahtan, öğleye kadar olan süre için; doğu yönüne bakan paneller 244,96 W/h ve 241,23 W/h, aynı anlarda güney yönüne bakan paneller 203,31 W/h ve 211,60 W/h güç üretim değerine ulaşmıştır. Doğu yönüne bakan panellerin, güney yönüne bakan panellere göre fazladan ürettikleri güç oranı %20,49 ve %14 olarak hesaplanmıştır.

Öğleden, akşama kadar olan süre için; batı yönüne bakan paneller 217,18 W/h ve 210,3 W/h, aynı anlarda güney yönüne bakan paneller 154,5 W/h ve 154,49 W/h güç üretim değerine ulaşmıştır. Batı yönüne bakan panellerin, güney yönüne bakan panellere göre fazladan ürettikleri güç oranı %40,57 ve %36,13 olarak hesaplanmıştır.

Gün içerisindeki ışınım değerinin fazla olduğu yöne (sırasıyla doğu, güney, batı) bakan panelin, sabit olarak gün boyu güney yönüne bakan panele göre yaklaşık olarak %32,43 ve %25,21 daha fazla enerji üretebileceğini göstermektedir.

Çalışmanın yapıldığı üç gün için değerlendirme yapıldığında, gün içerisindeki ışınım değerinin fazla olduğu yöne (sırasıyla doğu, güney, batı) bakan panelin, sabit olarak güney yönüne bakan panele göre yaklaşık %25 ile %32 arasında daha fazla enerji üretebileceği görülmektedir. Yapılan çalışmalar PVsyst programı ile simüle edildiğinde, ölçüm verileri ile simülasyon verilerinin en fazla %8,7 oranında farklılık göstermiştir.

Tüm yıl için; Tablo 5.9’da gösterildiği gibi, mevsimsel optimum açı değerine ayarlanmış ve ışınım değerinin fazla olduğu yöne (sırasıyla doğu, güney, batı) bakan panelin ürettikleri güç değerleri ile tüm yıl 33° optimum açı değerine sabitlenmiş ve güney yönüne sabit olarak konumlandırılmış panelin ürettiği güç değerleri PVsyst programı ile simüle edilip karşılaştırılmıştır. Mevsimsel ve yıllık optimum açı değerleri Tablo 4.2 ve Tablo 4.3’deki hesaplanmış değerler kullanılarak belirlenmiştir. Işınım değerinin fazla olduğu saat aralığı için simülasyon programında doğu, güney ve batı yönlerine konumlandırılan panellerin üzerlerine aldıkları ışınım miktarları kıyaslanmıştır ve bu çalışmada kabul edilen saat aralığı Tablo 5.9’da verilmiştir.

Tablo 5.9: Simülasyonda kullanılan mevsimsel optimum açı değerleri ve panellerin dönük olduğu yönü gösteren zaman aralığı

Mevsim	Ay	Mevsimsel Optimum Açısı	Doğuya dönük olma zaman aralığı	Güneye dönük olma zaman aralığı	Batıya dönük olma zaman aralığı
Kış	Aralık	57°	19:00 - 09:59	10:00 - 15:59	16:00-18:59
	Ocak	57°	19:00 - 09:59	10:00 - 15:59	16:00-18:59
	Şubat	57°	19:00 - 09:59	10:00 - 15:59	16:00-18:59
İlkbahar	Mart	30°	20:00 - 10:59	11:00 - 14:59	15:00-19:59
	Nisan	30°	20:00 - 10:59	11:00 - 14:59	15:00-19:59
	Mayıs	30°	20:00 - 10:59	11:00 - 14:59	15:00-19:59
Yaz	Haziran	10°	22:00 - 11:59	12:00 - 13:59	14:00-21:59
	Temmuz	10°	22:00 - 11:59	12:00 - 13:59	14:00-21:59
	Ağustos	10°	22:00 - 11:59	12:00 - 13:59	14:00-21:59
Sonbahar	Eylül	36°	20:00 - 10:59	11:00 - 14:59	15:00-19:59
	Ekim	36°	20:00 - 10:59	11:00 - 14:59	15:00-19:59
	Kasım	36°	20:00 - 10:59	11:00 - 14:59	15:00-19:59

Çalışmanın sonucunda tüm yıl sabit olarak güney yönüne 33° açı değeri ile konumlandırılmış olan panelin ürettiği toplam güç 1265889,79 Wh, saatlik ortalaması ise 149,92 W/h olarak hesaplanmıştır. Mevsimsel optimum açısında ayarlanan ve gün içerisinde ışınım değerinin fazla olduğu zaman aralığında, fazla ışınım alan yöne konumlandırılmış panelin ürettiği toplam güç 1544371,96 Wh, saatlik ortalaması ise 178,95 W/h olarak hesaplanmıştır. Saatlik ortalamalar üzerinden değerlendirildiğinde mevsimsel optimum açığa ayarlanan ve ışınım değerinin fazla olduğu zaman aralığında o yöne dönen panelin, yıllık optimum açısı ile tüm yıl sabit güney yönüne konumlandırılmış panele göre %19,37 daha fazla güç üretebildiği hesaplanmıştır. Ölçülen değer ile simülasyon değerleri arasında maksimum ±%8,7 fark olduğu göz önünde bulundurulmalıdır.

6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada üç adet 325 W monokristal PV panel kullanılmıştır. İlk ölçüm 6 Haziran 2023'te MPPT değerine ulaşılan yük değerini belirlemek ve paneller arasında ulaşılabilen MPPT değerleri arasındaki farkın kıyaslanabilmesi için yapılmıştır. Panellerin MPPT noktasına ulaşabildikleri yük değerinde ürettikleri güç değerleri arasındaki fark %2'den daha az olduğu tespit edilmiştir. 7 Haziran 2023, 3 Eylül 2023 ve 15 Eylül 2023 tarihlerinde üç ölçüm çalışması yapılmıştır. Bu günlerde yapılan çalışmalarda; Panellerden birisi doğu (azimut -180°), diğer panel güney (azimut 0°), bir diğer panel ise batı (azimut $+180^{\circ}$) yönüne bakacak şekilde Tablo 4.4'te belirtilmiş olan eğim açısında yerleştirilmiştir. Güneşin doğuşundan, orta noktaya gelene kadar geçen sürede; doğuya ve güneye bakan panellerin, 15 dakikalık aralıklarla; gerilim, akım, panel sıcaklığı, ışınım miktarı ölçümleri yapıp kaydedilmiştir. Çalışmaya ara verilmeden, güneşin orta noktada olduğu zamandan, batışına kadar geçen sürede; batıya ve güneye bakan panellerin, 15 dakikalık aralıklarla; gerilim, akım, panel sıcaklığı, ışınım miktarı ölçümleri yapıp kaydedilmiştir. Güneşin doğuşundan, orta noktaya gelene kadar geçen süre için ölçüm sonuçlarına bakıldığında doğu yönüne bakan panel, güney yönüne bakan panele göre yaklaşık %14 ile %23 arasında daha fazla enerji üretebildiği tespit edilmiştir. Güneşin orta noktada olduğu zamandan, batışına kadar geçen süre için ölçüm sonuçlarına bakıldığında ise batı yönüne bakan panelin, güney yönüne bakan panele göre yaklaşık %33 ile %40 arasında daha fazla enerji üretebildiği tespit edilmiştir.

Çalışmada ayrıca, güneş ışınım değerleri dikkate alınarak, sabit olarak doğu, güney ve batı yönüne bakan panellerden, hangi yöne bakan panel daha fazla güneş ışınımı alıyorsa, o panelin ürettiği enerji hesaba katılarak, sabit olarak tüm gün güney yönüne bakan panelin ürettiği enerjiye göre verim artışı incelenmiştir. PV panel; güneş ışınım değerleri dikkate alınarak, sabah saatlerinde doğu, öğle saatlerinde güney, akşam saatlerinde batı yönlerine bakacak şekilde döndürülmüş olsaydı, sabit olarak tüm gün güney yönüne bakan panele göre yaklaşık %25 ile %32 arasında daha fazla enerji üretimi gerçekleştirebileceği hesaplanmıştır. Ölçüm sonuçları hesaplanan ve PVsyst programı ile simülasyon sonucunda elde edilen güç değerleri kıyaslandığında en yüksek fark %8,7 olarak hesaplanmıştır.

Simülasyon programı ile mevsimsel optimum açığa ayarlandığı ve ışıyım değeriinin fazla olduğu zaman aralığında o yöne döndüğü düşünölen panel ile yıllık optimum açığa ayarlandığı ve tüm yıl sabit güney yönüne konumlandırıldığı düşünölen panele göre %19,37 daha fazla güç üretebildiğı hesaplanmıştır.

Ayrıca yapılan çalışmada, panel sıcaklıkları yaklaşık olarak 25°C'nin üzerine çıkıldıkça, enerji üretiminde düşüşler olduğı tespit edilmiştir. Optimum eğim açısı ayarlanması ve güneş ışıyımının fazla olduğı yöne döndürölen PV panel ile elde edilen verim artışı, PV panel soğutulmasında kullanılarak hem verim artışını hem de panelin daha uzun ömürlü çalışmasını sağlayacaktır.

Dünya'nın yörüngesindeki hareketi ve eksen eğikliği düşünöldüğünde güneşin gökyüzündeki görünür konumu zamanla değışmektedir. Güneş, ekinoks zamanı olan 21 Mart ve 23 Eylül tarihlerinde tam olarak doğudan doğup, batıdan batmaktadır. 21 Haziran ve 21 Aralık tarihinde bulunduğı enleme bağılı olarak güneş, en uzak noktadan doğar ve batar. Güneşin doğuşu ile batışı arasında izlediğı yol, tarihsel olarak bakıldığında değıştiğine göre, dönen panelin, sabit panele göre verim değeriinin değışkenlik göstermesi beklenen bir durumdur.

Sürekli bir güneş takip sisteminde, PV paneli güneş yönüne döndürmek için sürekli bir enerji tüketimi gerçekleşmektedir. Bu tüketim elde edilmek istenen verimi düşürür. Ayrıca sistemin daha karmaşık olması sebebiyle bakım ve arıza giderleri olacaktır. Güneş ışıyım değeriileri dikkate alınarak, daha fazla güneş ışıyımını alan yöne döndürölerek üretim yapılırsa, kuzey yarım küre için, doğu yönü ile güne başlayıp, güney ve batı yönleri ile günü tamamlayıp, bir sonraki gün için doğu yönüne tekrar döndüröldüğü düşünöldüğünde, günde sadece üç kere döndürme işlemi gerçekleşecek ve sürekli takip ve döndürme işlemi için harcanan enerji çok daha düşük olacaktır.

Bundan sonra yapılacak çalışmalarda, bu çalışmada düşünölen güneş takibi ile sürekli olarak güneş takibi yapan bir sistemin, üretim ve tüketim verileri ölçölüp, verimleri kıyaslanabilir. Ayrıca bu çalışmada yapıldığı gibi, tüm aylar için optimum eğim açıları hesaplanıp, ayda bir kere optimum eğim açısına ayarlanan panel ile, tüm yıl sabit eğim açısındaki panelin ürettikleri güçler ölçölüp, verimleri karşılaştırılabilir.

7. KAYNAKLAR

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

Alıcı, H., "Designing and performance analysis of solar tracker system: a case study of Çukurova region", Adana Alparslan Türkeş Science And Technology University Graduate School Of Natural And Applied Sciences, Master of Science, s. 43, Adana, (2021).

Altıntaş, B., "Güneş Enerjisi Destekli Depolama Sisteminin Termodinamik Modeli ve Endüstriyel Uygulamaları". Yüksek Lisans Tezi, Gebze İleri teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze, (2012).

Atız, A., "Hava ve su ile soğutulan PV-T'nin dört farklı koşul için enerji ve ekserji analizi", *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 1000(1000), 0-0,(2022).

Aydın, A., "Monokristalin yapıları PV/T sistemde kolektif soğutma uygulaması ve nanoakışkan kullanımının PV panel verimine etkilerinin deneysel ve matematiksel analizi", Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Batman, (2022).

Bagher, A.M., Vahid, M.M.A. and Mohsen, M., "Types of Solar Cells and Application", *American Journal of Optics and Photonics*, SciencePG, 3(5):94-113 pp., (2015).

Baker, A., "A History of Solar Cell: How Technology Has Evolved", <https://www.solarpowerauthority.com/a-history-of-solar-cells/> (31.10.2022)

Bakırcı, K., "Yatay Yüzeğe Gelen Anlık Global Güneş Işınımının Tahmini İçin Basit Bir Hesaplama Metodu." *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 29(2), 53-58, (2009).

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

Bari, S., "Optimum slope angle and orientation of solar collectors for different periods of possible utilization", *Energy Conversation and Management*, Cilt 41, 855-860, (2000).

Batman, M.A., “Elektrik üretimi için güneş pillerinin kullanımında verimi artırıcı yeni bir yöntem”, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora tezi, İstanbul, (2001).

Beckman, W.A. ve Duffie, J.A., “Solar Engineering of Termal Processes”. A ileyInterscience Publication, Canada, (1991).

Bellia, H., Youcef, R., ve Fatima, M., “A detailed modeling of photovoltaic module using MATLAB”. NRIAG journal of astronomy and geophysics, 3(1), 53-61, (2014).

Bilen, K., Işık, B., Gezer, S., ve Kıyık, F., “Hava soğutmalı fotovoltaiik panellerde kanatçık tipinin soğutmaya etkisinin teorik olarak incelenmesi”. Politeknik Dergisi, 1-1, (2021).

Bilgin, Z., “Güneş Takip Sistemi Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi”. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2006).

Bonkaney, A., Madougou, S., and Adamou, R., “Impacts of Cloud Cover and Dust on the Performance of Photovoltaic Module in Niamey,” Journal of Renewable Energy, Vol. 2017, Article ID 9107502, 8 pages, (2017).

Boztepe, M., “Fotovoltaiik güç sistemlerinde verimliliği etkileyen parametreler” . EMO İzmir Şubesi Aylık Bülteni, 321, 13-17, (2017).

Boztepe, M., “İzmir (Bornova) Koşullarında Şebekeye Bağlı bir Fotovoltaiik Sistemin Tasarımı ve Denenmesi”, Doktora Tezi, (2002).

Boztepe, M., Cetin, E., Deniz, E. ve Colak, M., “Evaluation of Sun Tracking in Photovoltaic Arrays Using Shading Analysis,” %1 içinde 5th International Symposium on Electrical and Computer Systems, Lefke, Turkish Republic of North Cyprus, November 27-28, (2008).

Bükün, N., “Siirt yöresi için tek eksenli güneş takip sistemli güneş panellerinin enerji verimliliğinin incelenmesi”. Yüksek Lisans Tezi, Siirt University, Fen Bilimleri Enstitüsü, Siirt, 35-36, (2017).

Chiou, J.P., El-Naggar, M.M., “Optimum slope for solar insolation on flat surface tilted toward the equator in heating season”, Solar Energy, Cilt 36, No 5, 471-478, (1986).

Cook, G., “Photovoltaic Fundamentals”. Solar Energy Research Institute, (1991).

Cooper, P.I., “The Absorption of Solar Radiation in Solar Stills”, Solar Energy, 12,(3). Messenger Roger, Ventre Jerry, 2000, Photo-voltaic Systems Engineering, CRC Pres LLC, Florida, 385p, (1969)

Çağlar, A., “Farklı Derece-Gün Bölgelerindeki Şehirler İçin Optimum Eğim Açısının Belirlenmesi”, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 22(2), 849-854, (2018).

Çakır, M., ve Türkay, Y., “Maksimum Güç Noktası Takibinde Kullanılan Değişir Gözle ve Artan İletkenlik Algoritmalarının Karşılaştırmalı Analizi” In International Conference on Trends in Advanced Research ,Vol. 1, pp. 193-98, (2023).

Delplanque, E., “Case study: impact of photovoltaic modules”, www.asunenergy.com, (31.10.2022)

Demir, H.B., ve Ozkan, A.O., “Fotovoltaik Panellerde Sıcaklık ve Zenit Açısının Panel Güç Üretimine Etkisi”, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, c.1, s.1, (2019).

Deniz, E., “Güneş enerjisi santrallerinde kayıplar”, (2013).

Dölek, S., ve Arslan, G., “Soğutma Debisinin Fotovoltaik Isıl Sistem Verimine Etkisi”, International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches, 7(6), 206-213, (2023).

Duffie A.J., Beckmann A.W., “Solar Engineering and Thermal Process”, Fourth Edition, 2013 John Wiley and Sons, Inc. Published 2013, (2013).

Elsayed, M.M., “Optimum orientation of absorber plates”, Solar Energy, Cilt 42, 89- 102, (1989).

Enerji, “T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı bilgi merkezi [online]” <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-gunes> (28.03.2023)

Ertekin, C., Evrendilek, F., Kulcu, R., “Modeling spatio-temporal dynamics of optimum tilt angles for solar collectors in Turkey”, Sensors, Cilt 8, 2913-2931, (2008).

Etcı, A., ve Bilhan, A., “PVSyst ile Konya ilinde sabit ve çift Eksenli Güneş Takip Sisteminin modellenmesi”, Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (32), 142-147, (2022).

Faranda, R., Leva, S., “Energy comparison of MGNT techniques for PV Systems”, Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, Pittsburgh, 1-6,(2008).

Giesler, B., “String vs. Central inverters: Dimension of the inverter”, Photon’s 1st PV Inverter Conference, Stuttgart, Germany, pp. 1-23, (April 2010).

Grunow, P., Preiss, A., Koch, S. ve Krauter, S., “Yield and Spectral Effects of A-Si Modules”, Proceedings of the 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, pp. 2846-2829, ISBN 3-936338-25-6, Hamburg, Germany, (September 2009)

Gunerhan, H., ve Hepbasli, A., “Determination of the optimum tilt angle of solar collectors for building applications”, Building and Environment 42: 779–783, (2007).

Güngül, M., Bayraç, H. N. ve Güllü, M., “Türkiye’de Konutlarda Güneş Enerjisinden Elektrik Üretiminin TOPSIS Yöntemiyle Analizi”. Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi, 1(3), 133-144, (2018).

Hafez, A. Z., Soliman, A., El-Metwally, K. A., and Ismail, I. M., “Tilt and azimuth angles in solar energy applications—A review”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 77, 147-168. doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.131, (2017).

Hafez, A.Z., Yousef, A.M. ve Harag, N.M., ”Solar Tracking Systems: Technologies and trackers drive types – A review”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 91:754-782 pp, (2018).

Henze, N., Sahan B., Koirala, B., “Study on MPP Mismatch losses in Photovoltaic Applications”, 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 21.-25.09.2009, Hamburg.

Hernanz J.A.R. ve Campayo J.J., “Two Photovoltaic Cell Simulation Models in MATLAB/Simulink”,(IJTPE Journal ISSN 2077-3528) International Journal on “Technical and Physical Problems of Engineering”pp;45-47, (2012).

Herrmann, W., “Mismatchverluste bei Verschaltung von Solarmodulen - Ertragsgewinn durch Vorsortierung?”,Tagungsband des 20. Symposiums Photovoltaische Solarenergie, Hrsg. OTTIKolleg, (2005).

Herteleer, B., “Berekenen en dimensioneren van autonome fofovoltaische installaties voor kantoren in Afrika [Calculating and sizing of autonomous photovoltaic systems for offices in Africa],” Master’s thesis, Catholic University College Ghent, (2011).

Hussein, H.M.S., Ahmad G.E., ve El-Ghetany, H.H., “Performance evaluation of photovoltaic modules at different tilt angles and orientations”, Energy Conversion and Management 45: 2441–2452, (2004).

İlcihan, Z., “Koordinat Tabanlı Güneş Takip Sistemi Tasarımı”, Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Bitlis, (2019).

İşen, E. ve Koçhan, Ö., “Fotovoltaik panelin tek diyotlu modellenmesi”, Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi , 2 (1) , 1-10 . DOI: 10.46387/bjesr.633273, (2020).

Kacan, E., ve Ulgen, K., ”Güneş enerjisi toplayıcılarında eğim ve yönlendirmenin yararlanabilirliğe etkisi”, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, Vol 27, No 4, 837-846, (2012).

Kacira, M., Simsek, M., Babur, Y., Demirkol, S., “Determining optimum tilt angles and orientations of photovoltaic panels in Sanliurfa”, Turkey, Renewable Energy 29: 1265–1275, (2004).

Kai C., Shulin T.,Yuhua C., “An Improved MGNT Controller for Photovoltaic System Under Partial Shading Condition.”, IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol.5, No.3,978-985, (July 2014).

Kamanga, B., Mlatho, J. S. P., Mikeka, C. ve Kamunda, C., “Optimum Tilt Angle for Photovoltaic Solar Panels in Zomba District, Malawi,” Journal of Solar Energy, vol. 2014, Article ID 132950, 9 pages,(2014).

Karuthedath, S., “Tracing degradation effects in organic solar cells, PhD thesis, IMDEA Nanociencia Madrid,” (2015).

Kaushikaa, N., ve Rai, A. K., “An investigation of mismatch losses in solar photovoltaic cell networks”, Energy, no. 32, pp. 755-759, (2007).

Kayabaşı, R., ve Kaya, M., ”Fotovoltaik modüllerde faz değıştiren madde kullanımı ve verimlerine etkisi”, Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 8(2), 262-278, (2020).

Khatib T., Mohamed A., Mahmoud M., ve Sopian K., ”Optimization of the Tilt Angle of Solar Panels for Malaysia”, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 37 (6), 606-61, (2015).

Kılıç, A.ve Öztürk A., ”Güneş Enerjisi” KİPAŞ Dağıtımçılık Çağaloğlu İstanbul, (1983).

Kietzke, T., “Recent advances in organic solar cells,” *Adv. Optoelectron.*, vol. 2007, (2007).

Koutroulis, E., Blaabjerg, F., “Methods for the Optimal Design of Grid-Connected PV Inverters”, International Journal Of Renewable Energy Research, IJRER, Vol.1, No.2, pp.54-64 ,(2011).

Kroon, J. M., Bakker, N. J., Smit, H. J. P., Liska, P., Thampi, K. R., Wang, P. ve Tulloch, G. E., ”Nanocrystalline dye-sensitized solar cells

having maximum performance”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 15(1), 1-18, (2007).

Kurak, E., Erdemir, V., ve Dursun, B., “PV sistemin için maksimum güç noktası izleyicisi tasarımı ve uygulaması”, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4(2), 581-592, (2016).

Lazaroiu C.G., Longo M., Roscia M., Pagano M., “Comparative analysis of fixed and sun tracking low power PV systems considering energy consumption”, *Energy Conversion and Management*, 92, pp.143-148, (2015).

Lewis, G., “Optimum tilt of solar collectors”, *Solar and Wind Technology*, Cilt 4, No 3, 407-410, (1987).

Liu, J., Shi, Y., and Yang, Y., “Solvation-induced morphology effects on the performance of polymer-based photovoltaic devices,” *Adv. Funct. Mater.*, vol. 11, no. 6, pp. 420–424, (2001).

Masters, G. M., “Renewable and efficient electric power systems”. John Wiley & Sons, (2013).

Menak, R., “Çift eksenli güneş takip sistemi tasarımı ve modellenmesi” (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü), (2018).

Messenger R.A. and Ventre J., “Photovoltaic Systems Engineering”, The CRC Press LLC., New York, 528p, (2010)

Moharram, K.A., Abd-Elhady, M.S., Kandil, H.A. ve El-Sherif, H., ”Enhancing the performance of photovoltaic panels by water cooling”, *Ain Shams Engineering Journal*; 4, 869–877, (2013).

Muslim, H.N., “Solar Tilt Angle Optimization of PV System for Different Case Studies. *EAI Endorsed Transactions on Energy*” Web, 7: e7, (2019).

Nadia, A. R., Isa, N. A. M., ve Desa, M. K. M., ”Advances in solar photovoltaic tracking systems” A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 82, 2548-2569, (2018).

Nsengiyumva, W., Chen, S.G., Hu, L. and Chen, X., “Recent advancements and challenges in Solar Tracking Systems” A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81:250-279 pp, (2018).

Ömeroğlu, G., “Fotovoltaik-Termal (PV/T) sistemin sayısal (CFD) ve deneysel analizi”, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30(1), 161-167, (2018).

Ömeroğlu, G., ve Öner, İ.V., “Fotovoltaik termal (pvt) sistemlerinde farklı tip kanatçıklar kullanılarak optimum çalışma sıcaklığının tayini”. *Dicle*

Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 9(1), 177-183, (2018).

Özçelik, M.A ve Yılmaz A.S., "PV Sistemlerde Farklı Işınım Seviyelerinde Verimliliğin Artırılması" ELECO Elektrik, Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu Oturum P5, Bildiri numarası 201, s:1-2, Bursa,(2012).

Özdemir, Ş., "Fotovoltaik sistemler için mikrodenetleyicili en yüksek güç noktasını izleyen bir konvertörün gerçekleştirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2007).

Öztürk, H.H., "Güneş Enerjisinden Fotovoltaik Yöntemle Elektrik Üretiminde Güç Dönüşüm Verimi ve Etkili Etmenler", V. Elektrik Tesisat Ulusal Kongre ve Sergisi Bildirileri, 1:1-14, (2017).

Pandiarajan, N. ve Ramabadrana, R., "Application of circuit model for Photovoltaic Energy Conversion System", Hindawi Publishing Corporation International Journal of Photoenergy Volume, pp:4- 5 ID 410401, (2012).

Panwar, S. ve Saini, R.P., "Development and Simulation of Solar Photovoltaic model using MATLAB/simulink and its parameter extraction", (ICCCE 2012) International Conference on Computing and Control Engineering, pp 2-5, 12 & 13 (April 2012).

Peksöz, A., "Güneş pili uygulamaları için CdTe yarıiletken ince filmlerin elektrodepozisyon yöntemiyle üretilmesi", Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, Cilt 21, Sayı 2,(2016).

Peng, Z., Herfatmanesh, M. R., ve Liu, Y., "Cooled solar PV panels for output energy efficiency optimisation", Energy conversion and management, 150, 949-955, (2017).

Quaschnig, V., "Understanding Renewable Energy Systems", Earthscan London, (2005).

Rustemli, S. ve Dincer, F., "Modeling of Photovoltaic Panel and Examining Effects of Temperature in MATLAB/Simulink", Elektronika Ir Elektrotehnika (Journal of Electronics and *Electrical Engineering*), 3(109), pp. 35 – 40, (March 2011).

Salmi, T., Bouzguenda, M., Gastli, A., Masmoudi, A., "MATLAB/simulink based modelling of solar photovoltaic cell research unit on renewable energies and electric vehicles", International Journal Of Renewabe Energy Research, Sultan Qaboos University, Sultanate of Oman 2:214-218, (2012).

Sarawak, G., “Going Solar Chapter 11: Know Your Solar PV Panel Mounts and Supports”, <https://greensarawak.com/things-to-know-before-goingsolar/going-solar-chapter-11-know-your-solar-pv-panels-mounts-and-supports/> (Erişim Tarihi: 25 Ocak 2023)

Song, Z., Wathage, S. C., Phillips, A. B. and Heben, M. J., “Pathways toward high-performance perovskite solar cells: review of recent advances in organometal halide perovskites for photovoltaic applications” *J. Photonics Energy*, vol. 6, no. 2, p. 22001, (2016).

Strith, U., “Increasing the efficiency of PV panel with the use of PCM”, *Renewable Energy*, 97, 671-679, (2016).

Şenpınar, A., "Güneş açılarına bağlı olarak optimum sabit güneş paneli açısının hesaplanması", *Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi* 4.2 (2006): 36-41.

Taghvaei, M.H., Radzi, M.A.M., Moosavin, S. M., Hizam, H., Marhaban, M. H., “A current and future study on non-isolated DC-DC converters for photovoltaic applications”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 17, 216-227, (2013).

TEİAŞ, “Türkiye Elektrik İletim A.Ő. elektrik üretim iletim verileri [online]”, <https://www.teias.gov.tr/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri>, (25.03.2023)

Thomas, R., Fordham, M., “Photovoltaics and Architecture”, Spon Press, London and Newyork, (2001).

Tiris, M., Tiris, C., “Optimum collector slope and model evaluation: case study for Gebze, Turkey”, *Energy Conversation and Management*, Cilt 39, No 3, 167- 72,(1998).

Ulgen, K. ve Hepbasli, A., “Comparison of the diffuse fraction of daily and monthly global radiation for Izmir, Turkey”, *Energy Sources*, 25, 637–649, (2003).

Ulgen, K., “Optimum Tilt Angle for Solar Collectors”, *Energy Sources*, Part A, 28: 1171–1180, (2006).

Venkateswari, R. ve Sreejith, S., “Factors influencing the efficiency of photovoltaic system”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101:376-394 pp, (2019).

Wang, J., Li, Q., Mu, Y., Li, S., Yang, L., Lv, P., Su, S., Liu, T., Fu, W., Yang, H., “Fabrication of CdTe thin films grown by the two-step

electrodeposition technique on Ni foils, Journal of Alloys and Compounds”, 636, 97-101. doi: 10.1016/j.jallcom.2015.02.094, (2015).

Wong, K. V. and Leon, O. De., “Applications of nanofluids: current and future,” Advances in Mechanical Engineering, vol. 2, Article ID 519659, (2010).

Yakup, M.A., Malik, A.Q., “Optimum tilt angle and orientation for solar collector in Brunei Darussalam”, Renewable Energy, Cilt 24, No 2, 223-234, (2001).

Yerli, B., “İstanbul iklim şartlarında meteorolojik parametrelerin PV (fotovoltaik) elektrik üretimi üzerindeki etkilerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.”, (2011).

Yıldırım, E ve Aktacir, M.A., “Binaya entegre fotovoltaik sistemlerde azimut ve eğim açısı etkilerinin incelenmesi”, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 34(2), 609-620, (2019).

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

Yiğit, A. ve Arslanoğlu, N., “Anlık ışınım şiddeti ve çevresel faktörlere bağlı optimum PV panel açısı, verim, güç üretiminin incelenmesi”, Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 26 (1), 301-314. DOI: 10.17482/uumfd.824582, (2021).

Zorlu, K.N., Saday, A., Sarıtaş, İ., “Adaptif Bulanık Mantık Kontrolü İle Maksimum Güç Noktası İzleyici Tasarımı Ve Gerçeklemesi” Selcuk University Journal of Engineering Sciences, 18 (3), 229-240, (2019).