



**TEK VE ÇİFT YÜZLÜ FOTOVOLTAİK PANELLERİN
ENERJİ PERFORMANSININ KARŞILAŞTIRILMASI**

AHMET DURAK

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Uğur AKYOL

2024

T.C.
TEKİRDAĞ NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**TEK VE ÇİFT YÜZLÜ FOTOVOLTAİK PANELLERİN ENERJİ
PERFORMANSININ KARŞILAŞTIRILMASI**

Ahmet DURAK

ORCID: 0000-0001-7550-7795

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ
Danışman: Prof. Dr. Uğur AKYOL

TEMMUZ-2024
Her hakkı saklıdır.

ARAşTIRMA FONU DESTEĞİ BEYANI

Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora Tezi olarak sunulan ve Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tez çalışması; TÜBİTAK tarafından 123M661 numaralı proje ile desteklenmiştir.

Ahmet DURAK

19/07/2024



ÖZET

TEK VE ÇİFT YÜZLÜ FOTOVOLTAİK PANELLERİN ENERJİ PERFORMANSININ KARŞILAŞTIRILMASI

Ahmet DURAK

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Uğur AKYOL

Çift yüzlü güneş panelleri ön yüzeyinden ve albedo etkisi ile arka yüzeyinden aldığı ışıınım ile tek yüzlü güneş panellerinden %20'lere varan oranlarla daha fazla enerji üretebilmektedir. Çift yüzlü güneş panellerin performansını etkileyen birçok faktör vardır. Panel yüksekliği, panel eğim açıları, panel yönelimleri (panel ön yüzeyinin baktığı yön), ışıınım miktarı, panel yüzey sıcaklığı, hava sıcaklığı, nem miktarı, vb. performansı etkileyen faktörlerin başında gelmektedir. Bu çalışmanın amacı Tekirdağ ilinin Çorlu ilçesinde tek ve çift yüzlü fotovoltaik panellerin enerji performansının deneysel olarak karşılaştırılması, meteorolojik verileri giriş olarak yapay sinir ağları ile deneysel verilerin tahmini ve bu fotovoltaik sistemlerin enerji ve ekserji analizinin yapılmasıdır. Çalışmada doğu yöneliminde 2 adet 460 W gücünde çift yüzlü güneş paneli ve güney yöneliminde 1 adet 460 W gücünde tek yüzlü güneş paneli kullanılmıştır. Tek yüzlü panel deneyler boyunca 40°'lik panel eğim açısında sabit bırakılmıştır. Çift yüzlü güneş panellerinin bir tanesi yerden 50 cm diğeri 100 cm yüksekliğe konumlandırılmıştır. Çift yüzlü panellerin eğim açıları Nisan-Mayıs aylarında 30°, Haziran-Temmuz aylarında 40°, Ağustos-Eylül aylarında 50° olarak konumlandırılmış ve toplam 6 ay boyunca enerji üretimleri gözlenmiştir. Işıınım miktarı, hava sıcaklığı ve nemi, rüzgâr hızı ve panel yüzey sıcaklığı sensörler aracılığı ile ölçülmüş ve kayıt altına alınmıştır. Elde edilen veriler karşılaştırmış, enerji ve ekserji analizleri gerçekleştirilmiş, çift yüzlü güneş panelleri için bölgede uygun kurulum şartları tespit edilmiştir. Enerji ve ekserji analizleri ile fotovoltaik panellerin tasarımı ve verimliliğinin artırılmasına yönelik bir yol haritası oluşturulmuştur. Aynı zamanda yapay sinir ağları ile çift yüzlü fotovoltaik panellerin farklı meteorolojik şartlarda enerji üretim miktarının tahminine yönelik üç gizli katmanlı bir model ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Çift Yüzlü Fotovoltaik Panel, Ekserji Analizi, Enerji Analizi, Güneş Enerjisi, Yapay Sinir Ağları

ABSTRACT

COMPARISON OF ENERGY PERFORMANCE BETWEEN MONOFACIAL AND BIFACIAL PHOTOVOLTAIC PANELS

Ahmet DURAK

Department of Mechanical Engineering

PhD Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Uğur AKYOL

Bifacial solar panels can generate up to 20% more energy compared to monofacial panels, utilizing radiation from both their front surface and the albedo effect from their rear surface. Various factors affect the performance of bifacial panels, including panel height, tilt angles, orientations (direction faced by the front surface), irradiance levels, panel surface temperature, ambient temperature, humidity, among others. This study aims to experimentally compare the energy performance of monofacial and bifacial photovoltaic panels in Çorlu district of Tekirdağ province, integrate meteorological data for predictive analysis using artificial neural networks, and conduct energy and exergy analyses of these photovoltaic systems. The study employed two 460 W bifacial panels facing east and one 460 W monofacial panel facing south. The monofacial panel was fixed at a 40° tilt angle throughout the experiments. The bifacial panels were positioned at heights of 50 cm and 100 cm above ground level. Tilt angles of the bifacial panels were set at 30° during April-May, 40° during June-July, and 50° during August-September, and their energy generation was observed over six months. Irradiance, air temperature and humidity, wind speed, and panel surface temperature were measured and recorded using sensors. The gathered data were compared, and energy and exergy analyses were performed to identify optimal installation conditions for bifacial solar panels in the region. The energy and exergy analyses provided insights into enhancing the design and efficiency of photovoltaic panels, offering a roadmap for improvement. Additionally, a three-hidden-layer artificial neural network model was developed to predict energy production of bifacial photovoltaic panels under different meteorological conditions.

Keywords: Bifacial Photovoltaic Panel, Exergy Analysis, Energy Analysis, Solar Energy, Artificial Neural Networks

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
SİMGELER DİZİNİ.....	xiv
KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvii
TEŞEKKÜR.....	xviii
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	9
1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	14
2. FOTOVOLTAİK TEKNOLOJİLER VE SİSTEM BİLEŞENLERİ	15
2.1 Fotovoltaik Hücreler	15
2.1.1 Kristal Silikon Hücreler	16
2.1.1.1 Tek Kristalli Silikon Fotovoltaik Hücreler	16
2.1.1.2 Çok Kristalli Silikon Fotovoltaik Hücreler.....	17
2.1.2 İnce Film Hücreler	18
2.1.2.1 Amorf Silikon (a-Si) Fotovoltaik Hücreler	18
2.1.2.2 Kadmium Telurit (CdTe) Fotovoltaik Hücreler.....	19
2.1.2.3 Bakır İndiyum Galyum Selenur (CIGS) Fotovoltaik Hücreler	20
2.1.3 Diğer Hücreler	20
2.1.3.1 Galyum Arsenit Fotovoltaik Hücreler	20
2.1.3.2 Organik Fotovoltaik Hücreler	21
2.1.3.3 Boya Tabanlı Fotovoltaik Hücreler	22
2.1.3.4 Yoğunlaştırıcı Fotovoltaik Hücreler	23
2.1.3.5 Çok Eklemlili Fotovoltaik Hücreler	23
2.1.3.6 PERC Fotovoltaik Hücreleri	24
2.1.3.7 PERL Fotovoltaik Hücreleri.....	25
2.2 Fotovoltaik Sistem Bileşenleri	26
2.2.1 Güneş Panelleri	26
2.2.2 Maksimum Güç Noktası İzleyicisi (MPPT)	28
2.2.3 İnvertörler	28
2.2.4 Depolama Elemanları.....	29
2.3 Fotovoltaik Sistemler	30

2.3.1 Şebekeye Bağlı Fotovoltaik Sistemler	30
2.3.2 Şebekeden Bağımsız Fotovoltaik Sistemler.....	30
2.3.3 Karma Fotovoltaik Sistemler	31
2.4 Fotovoltaik Sistemlerin Performansına Etki Eden Faktörler	32
2.4.1 Çevresel Faktörler	32
2.4.1.1 Güneş Işınımı	32
2.4.1.2 Fotovoltaik Modül Sıcaklığı.....	33
2.4.1.3 Gölgeleme	34
2.4.1.4 Tozlanma.....	34
2.4.2 Kablo Kayıpları.....	35
2.4.3 İnvertör Kayıpları.....	36
2.4.4 Batarya Kayıpları	36
2.5 Solar Geometrik İfadeler.....	36
2.5.1 Dünya-Güneş Arasındaki Mesafe	37
2.5.2 Saat Açısı	37
2.5.3 Deklinasyon Açısı.....	38
2.5.4 Enlem Açısı.....	38
2.5.5 Zenit Açısı.....	38
2.5.6 Geliş Açısı.....	39
2.5.7 Eğim Açısı	39
2.5.8 Güneş Azimut Açısı.....	40
2.5.9 Yüzey Azimut Açısı.....	41
2.5.10 Hava Kütlesi	41
2.6 Meteorolojik Verilerin Panel Verimine Etkisi	42
2.6.1 Güneş Işınımı	42
2.6.2 Hava Sıcaklığı.....	44
2.6.3 Nem.....	45
2.6.4 Rüzgâr Hızı ve Yönü	46
2.7 Çift Yüzlü Fotovoltaik Teknolojisi	47
2.7.1 Çift Yüzlü Fotovoltaik Hücrelerin Yapısı.....	48
2.7.2 Çift Yüzlü Fotovoltaik Hücrelerin Çeşitleri	48
2.7.2.1 Heteroeklem Fotovoltaik Hücreler	48
2.7.2.2 N-PERT Fotovoltaik Hücreler	49
2.7.2.3 P-PERT Fotovoltaik Hücreler	49
2.7.2.4 P-PERC+ Fotovoltaik Hücreler	50

2.7.3 Işınım	51
2.7.3.1 Yansıma Kayıpları	53
2.7.3.2 Direkt Işınım	53
2.7.3.3 Yayılan Işınım	54
2.7.3.4 Yansıyan Işınım.....	56
2.7.3.5 İzotropik Yansıyan Yaygın Işınım	56
2.7.3.6 Direkt Yansıyan ve Güneş Çevresi Yaygın Işınım	58
2.7.4 Albedo.....	61
2.7.5 Panel Yüksekliği	62
2.7.6 Paneller Arası Mesafe	62
3. MATERYAL VE YÖNTEM	64
3.1 Deney Düzeneği Sistem Donanımları.....	64
3.1.1 Fotovoltaik Paneller	64
3.1.2 Mikro invertör	64
3.1.3 Veri Kayıt Cihazı	65
3.1.4 Solar Kablolar	66
3.1.5 Konnektörler	66
3.1.6 Işınım Sensörü	67
3.1.7 Hava Sıcaklık Sensörü	68
3.1.8 Nem Sensörü.....	68
3.1.9 Rüzgâr Hızı Sensörü	69
3.1.10 Rüzgâr Yönü Sensörü.....	70
3.1.11 Panel Yüzey Sıcaklık Sensörü.....	71
3.2 Yöntem.....	72
3.2.1 Deney Düzeneğinin Kurulumu	72
3.2.2 Yapay Sinir Ağları	77
3.2.3 Termodinamik Analiz	82
3.2.3.1 Enerji Analizi	82
3.2.3.2 Ekserji Analizi.....	84
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	86
4.1 Meteorolojik Ölçümler.....	86
4.2 Fotovoltaik Panellerin Enerji Üretimleri	92
4.3 Fotovoltaik Panellerin Yapay Sinir Ağları ile Modellenmesi.....	101
4.4 Fotovoltaik Panellerin Enerji ve Ekserji Analizleri	106
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	116

KAYNAKLAR.....	119
EK-1 YSA EĞİTİM KODLARI.....	135
TEZDEN ÜRETİLMİŞ ESERLER.....	145
ÖZGEÇMİŞ	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Fotovoltaik hücre çeşitleri	16
Çizelge 3.1. Aydınlanma katsayıları	56
Çizelge 3.2. Farklı yüzeylerin ortalama albedo değerleri.....	61
Çizelge 4.1. Güneş panellerinin özellikleri	64
Çizelge 4.2. Işınım sensörünün teknik özellikleri	67
Çizelge 4.3. Sıcaklık sensörü teknik özellikleri	68
Çizelge 4.4. Nem sensörü teknik özellikleri.....	69
Çizelge 4.5. Rüzgâr hız sensörünün teknik özellikleri	70
Çizelge 4.6. Rüzgâr yön sensörü teknik özellikleri	71
Çizelge 4.7. Panel yüzey sıcaklık sensörünün teknik özellikleri.....	72
Çizelge 4.8. Eğitim algoritmalarının konfigürasyonları.....	81
Çizelge 4.9. YSA sınır koşulları.....	82

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Dünyada yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretiminin sınıflandırılması (EIA, 2021).....	3
Şekil 1.2. Küresel elektrik üretiminin sınıflandırılması (EIA, 2021)	4
Şekil 1.3. Enerji tüketiminden açığa çıkan toplam karbondioksit emisyon değerleri (EIA, 2021)	4
Şekil 1.4. Dünya’da fosil enerji tüketimi (Roper, 2012).	5
Şekil 1.5. Dünyada yenilenebilir enerji kullanan bazı ülkeler (REN21, 2022).	6
Şekil 1.6. Türkiye’de elektrik enerjisi üretiminde yenilenebilir ve fosil enerji kaynaklarının karşılaştırılması (EIA, 2021)	7
Şekil 1.7. Türkiye’nin karbondioksit emisyon miktarının yıllara göre değişimi (EIA, 2021) ...	7
Şekil 1.8. Türkiye yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik miktarının değişimi (EIA, 2021).....	8
Şekil 1.9. Türkiye yıllık toplam güneş radyasyonu miktarı (EİGM, 2023).....	8
Şekil 2.1. a) PV hücrenin çalışma ilkesi b) PV hücrenin yapısı (Öztürk, 2017)	15
Şekil 2.2. Tek kristalli silikon fotovoltaik hücre yapısı (C. P. Liu, Chang ve Chuang, 2014).	17
Şekil 2.3. Tek kristalli ve çok kristalli fotovoltaik hücre görünüşü (Saga, 2010).....	17
Şekil 2.4. Tek kristalli ve çok kristalli fotovoltaik hücrelerin imalat süreçleri (Saga, 2010)...	18
Şekil 2.5. Amorf silikon fotovoltaik hücrenin yapısı (L. M. Fraas, 2014).....	18
Şekil 2.6. Kadmium telurit (CdTe) fotovoltaik hücre (Metzger ve diğerleri, 2019)	19
Şekil 2.7. CIGS fotovoltaik hücre (Ahmad ve diğerleri, 2021).....	20
Şekil 2.8. GaAs fotovoltaik hücre (Papež, Dallaev, Kaspar, ve diğerleri, 2021)	21
Şekil 2.9. Organik fotovoltaik hücrenin yapısı (Jayaseelan ve diğerleri, 2022).....	22
Şekil 2.10. Boyaya duyarlı fotovoltaik hücre yapısı (Jayaseelan ve diğerleri, 2022)	22
Şekil 2.11. Yoğunlaştırıcı fotovoltaik hücreler (Bagher ve diğerleri, 2015).....	23
Şekil 2.12. Çok eklemli fotovoltaik hücre yapısı (Bagher ve diğerleri, 2015).....	24
Şekil 2.13. (a) Silikon fotovoltaik hücre (b) pasifleştirilmiş yayıcı ve arka hücre (DS New Energy, 2019)	25

Şekil 2.14. (a) PERC (b) PERL fotovoltaiik hücre yapısı (Gangopadhyay, Jana ve Das, 2013)	25
Şekil 2.15. Fotovoltaiik dizi bileşenleri (Djalab, Bessous, Rezaoui ve Merzouk, 2018)	26
Şekil 2.16. Tek kristalli ve çok kristalli fotovoltaiik panel (Anonim, 2020)	26
Şekil 2.17. Tek kristalli yarım hücre ve çok kristalli yarım hücre (Anonim, 2019)	27
Şekil 2.18. Hibrit Pv-T fotovoltaiik panel (Anonim, 2022)	27
Şekil 2.19. Çift yüzölü güneş paneli (Durusoy, Ozden ve Akinoglu, 2020)	27
Şekil 2.20. Fotovoltaiik hücrelerin güç-gerilim eğrisi (Kalogirou, 2009)	28
Şekil 2.21. Şebekeye bağıli fotovoltaiik sistem yapısı (Aden solar, 2021)	30
Şekil 2.22. Şebekeden bağımsız fotovoltaiik sistem yapısı (S. Green, 2021)	31
Şekil 2.23. Karma fotovoltaiik sistem yapısı (Turgut, 2020)	31
Şekil 2.24. Solar radyasyon ve fotovoltaiik modölün karşılaştırılması (Pradhan ve Panda, 2017)	33
Şekil 2.25. Modöl sıcaklığının verim üzerindeki etkisi (Meral ve Dinçer, 2011)	34
Şekil 2.26. Dünyanın Güneş etrafındaki eliptik yörüngesindeki hareketi (Messenger ve Ventre, 2004)	37
Şekil 2.27. Deklinasyon açısının gösterimi	38
Şekil 2.28. Zenit açısı	39
Şekil 2.29. Geliş açısı	39
Şekil 2.30. Eğim açısı	40
Şekil 2.31. Güneş azimut açısı	40
Şekil 2.32. Yüzey azimut açısı	41
Şekil 2.33. Heteroeklem fotovoltaiik hücrenin ön ve arka yüzeyi (Kopecek ve Libal, 2018)	48
Şekil 2.34. n-PERT fotovoltaiik hücrenin yapısı (Kopecek ve Libal, 2018)	49
Şekil 2.35. p-PERT fotovoltaiik hücrenin yapısı (Kopecek ve Libal, 2018)	50
Şekil 2.36. p-PERC+ fotovoltaiik hücrenin yapısı (Kopecek ve Libal, 2018)	50
Şekil 2.37. Güneş ışın bileşenleri	51

Şekil 2.38. Fotovoltaik panel açıları	52
Şekil 2.39. Yerden yansıyan yaygın izotropik ışınların kendini gölgelemesi	57
Şekil 2.40. Yerden yansıyan direkt ışınların ve Güneş çevresi yaygın ışınların kendini gölgelemesi.....	58
Şekil 2.41. Gölgelemiş zeminin (A1) panelin arka yüzeyine (A2) kadar olan görüş faktörünün çizimi (Sun ve diğerleri, 2018).....	59
Şekil 2.42. Kurulum yüksekliğinin enerji üretimine etkisi (Modules, 2016).....	62
Şekil 2.43. Sıralar arası mesafenin hesaplanması (Arizona Solar Center, 2021)	63
Şekil 2.44. Paneller arası mesafenin çift yüzölçümüne etkisi (Shoukry ve diğerleri, 2016)	63
Şekil 3.1. 1500 W gücüne sahip mikro invertör	65
Şekil 3.2. 2000 W gücüne sahip mikro invertör	65
Şekil 3.3. Veri kayıt cihazı	66
Şekil 3.4. Solar kablo.....	66
Şekil 3.5. Mc4 tip konnektör	66
Şekil 3.6. Işınım sensörü (Seven Sensör, 2020)	67
Şekil 3.7. Hava sıcaklık sensörü (Seven Sensör, 2020)	68
Şekil 3.8. Nem sensörü (Seven Sensör, 2020).....	69
Şekil 3.9. Rüzgâr hız sensörü (Seven Sensör, 2020).....	70
Şekil 3.10. Rüzgâr yön sensörü (Seven Sensör, 2020).....	71
Şekil 3.11. Panel yüzey sıcaklık sensörü (Seven Sensör, 2020).....	72
Şekil 3.12. Fotovoltaik paneller için kullanılan profiller.....	73
Şekil 3.13. Profillerin zemine sabitlenmesi için kullanılan lamalar	73
Şekil 3.14. Profiller ile lamaların birleştirilmesi	73
Şekil 3.15. Fotovoltaik panel düzeneğinin kurulması	74
Şekil 3.16. Deney düzeneği	76
Şekil 3.17. Meteoroloji istasyonu, mikro invertör ve veri kayıt cihazı	77
Şekil 3.18. Nöronun matematiksel olarak ifadesi.....	78

Şekil 3.19. İleri beslemeli geri yayımlı YSA mimarisi	78
Şekil 3.20. Yapay sinir ağ mimarisi	80
Şekil 3.21. Eğitilmiş yapay sinir ağ mimarisi.....	81
Şekil 3.22. Ağ eğitiminde (a) en yüksek korelasyon katsayısı ve (b) en düşük MSE değeri ...	81
Şekil 4.1. Saatlik ortalama ışıınım değerlerinin aylara göre değişimi.....	87
Şekil 4.2. Saatlik ortalama rüzgâr hızı değerlerinin aylara göre değişimi.....	87
Şekil 4.3. Saatlik ortalama nem değerlerinin aylara göre değişimi	88
Şekil 4.4. Saatlik ortalama sıcaklık değerlerinin aylara göre değişimi	89
Şekil 4.5. Nisan ayının saatlik ortalama panel yüzey sıcaklıklarının karşılaştırılması.....	90
Şekil 4.6. Mayıs ayının saatlik ortalama panel yüzey sıcaklıklarının karşılaştırılması	90
Şekil 4.7. Haziran ayının saatlik ortalama panel yüzey sıcaklıklarının karşılaştırılması	91
Şekil 4.8. Temmuz ayının saatlik ortalama panel yüzey sıcaklıklarının karşılaştırılması.....	91
Şekil 4.9. Ağustos ayının saatlik ortalama panel yüzey sıcaklıklarının karşılaştırılması.....	92
Şekil 4.10. Eylül ayının saatlik ortalama panel yüzey sıcaklıklarının karşılaştırılması	92
Şekil 4.11. Nisan ayı panellerin günlük toplam üretilen enerji ve günlük ortalama ışıınım miktarı	93
Şekil 4.12. Nisan ayı panellerin toplam enerji üretimleri.....	94
Şekil 4.13. Mayıs ayı panellerin günlük toplam üretilen enerji ve günlük ortalama ışıınım miktarı	95
Şekil 4.14. Mayıs ayı panellerin toplam enerji üretimleri	95
Şekil 4.15. Haziran ayı panellerin günlük toplam üretilen enerji ve günlük ortalama ışıınım miktarı.....	96
Şekil 4.16. Haziran ayı panellerin toplam enerji üretimleri	96
Şekil 4.17. Temmuz ayı panellerin günlük toplam üretilen enerji ve günlük ortalama ışıınım miktarı.....	97
Şekil 4.18. Temmuz ayı panellerin toplam enerji üretimleri	98
Şekil 4.19. Ağustos ayı panellerin günlük toplam üretilen enerji ve günlük ortalama ışıınım miktarı.....	99

Şekil 4.20. Ağustos ayı panellerin toplam enerji üretimleri	99
Şekil 4.21. Eylül ayı panellerin günlük toplam üretilen enerji ve günlük ortalama ışıyım miktarı	100
Şekil 4.22. Eylül ayı panellerin toplam enerji üretimleri	101
Şekil 4.23. 15 Mayıs 1 m yükseklikteki panel gücünün deneysel ve tahminsel karşılaştırılması	102
Şekil 4.24. 15 Mayıs 0,5 m yükseklikteki panel gücünün deneysel ve tahminsel karşılaştırılması	102
Şekil 4.25. 15 Temmuz 1 m yükseklikteki panel gücünün deneysel ve tahminsel karşılaştırılması.....	103
Şekil 4.26. 15 Temmuz 0,5 m yükseklikteki panel gücünün deneysel ve tahminsel karşılaştırılması.....	104
Şekil 4.27. 15 Eylül 1 m yükseklikteki panel gücünün deneysel ve tahminsel karşılaştırılması	105
Şekil 4.28. 15 Eylül 0,5 m yükseklikteki panel gücünün deneysel ve tahminsel karşılaştırılması	105
Şekil 4.29. 24 Nisan tarihinde çift yüzölü ve tek yüzölü panellerin enerji verimliliklerinin değışimi	107
Şekil 4.30. 24 Nisan tarihinde çift yüzölü ve tek yüzölü panellerin ekserji verimliliklerinin değışimi	107
Şekil 4.31. 2 Mayıs tarihinde çift yüzölü ve tek yüzölü panellerin enerji verimliliklerinin değışimi	108
Şekil 4.32. 2 Mayıs tarihinde çift yüzölü ve tek yüzölü panellerin ekserji verimliliklerinin değışimi	109
Şekil 4.33. 7 Haziran tarihinde çift yüzölü ve tek yüzölü panellerin enerji verimliliklerinin değışimi	110
Şekil 4.34. 7 Haziran tarihinde çift yüzölü ve tek yüzölü panellerin ekserji verimliliklerinin değışimi	110
Şekil 4.35. 17 Temmuz tarihinde çift yüzölü ve tek yüzölü panellerin enerji verimliliklerinin değışimi	111
Şekil 4.36. 17 Temmuz tarihinde çift yüzölü ve tek yüzölü panellerin ekserji verimliliklerinin değışimi	112

Şekil 4.37. 4 Ağustos tarihinde çift yüzlü ve tek yüzlü panellerin enerji verimliliklerinin değişimi	113
Şekil 4.38. 4 Ağustos tarihinde çift yüzlü ve tek yüzlü panellerin ekserji verimliliklerinin değişimi	113
Şekil 4.39. 14 Eylül tarihinde çift yüzlü ve tek yüzlü panellerin enerji verimliliklerinin değişimi	114
Şekil 4.40. 14 Eylül tarihinde çift yüzlü ve tek yüzlü panellerin ekserji verimliliklerinin değişimi	115



SİMGELER DİZİNİ

P_{loss}	Güç kaybı
$I_{Dckablo}$	Dc kablo akımı
r_{DC}	Dc kablonun direnci
V_{DC}	Kablo uçları arasındaki voltaj
n_g	Gün numarası
Δ	Deklinasyon açısı
$\emptyset$	Enlem açısı
θ_z	Zenit açısı
θ	Geliş açısı
β	Eğim açısı
γ_s	Güneş azimut açısı
γ	Yüzey azimut açısı
m	Hava kütlesi
G_t	Toplam Güneş radyasyonu
G_h	Doğrudan Güneş radyasyonu
G_{dh}	Dağınık Güneş radyasyonu
P_{DC}	Fotovoltaik panelin dc güç çıkışı
G_t	Fotovoltaik panele gelen toplam ışıınım
T_{mod}	Hücre sıcaklığı
P_{STC}	Fotovoltaik panelin standart test koşulları altındaki güç çıkışı
G_{STC}	Standart test koşullarındaki (1000W/m ²) toplam ışıınım miktarı
η_{rel}	Anlık verim
η_{sys}	Sistem verimi
G'	Standart test koşullarında normalleştirilmiş ışıınım
T'	Standart test koşullarında normalleştirilmiş sıcaklık
T_{amb}	Ortam sıcaklığı
T_c	Fotovoltaik hücre sıcaklığı
T_a	Çevre sıcaklığı
T_{NOCT}	Standart test koşullarında normalleştirilmiş fotovoltaik hücrenin sıcaklığı
I	Anlık güneş ışıınımı
R	Pearson korelasyon katsayısı

W	Watt
V	Volt
P	Güç
v	Rüzgâr hızı
f_B	Çift yüzlülük faktörü
I_{direkt}	Direkt ışıınım
$I_{yayılan}$	Yayılan ışıınım
$I_{yansıyan}$	Yansıyan ışıının
$I_{yayılan,izo}$	İzotropik ışıınım
$I_{yayılan,gun}$	Güneş çevresindeki yayılan ışıınım
$I_{yayılan,yat}$	Ufuk aydınlanmasındaki yatay yayılan ışıınım
I_{KYI}	Küresel yayılan yatay ışıınım
I_{DNI}	Direkt normal ışıınım
I_{YYI}	Yayılan yatay ışıınım
$I_{yay,izo}$	İzotropik ışıınım
ε	Açıklık parametresi
Δ	Parlaklık parametresi
$f_{11}, f_{12}, \dots, f_{23}$	Parlaklık katsayıları
ρ	Albedo katsayısı
η_{fv}	Fotovoltaik panelin verimi
$En_{ç,fv}$	Fotovoltaik panelin ürettiği enerji miktarı
$En_{g,fv}$	Panele giren enerji miktarı
A_{fv}	Fotovoltaik panelin yüzey alanı
V_{adv}	Açık devre voltajı
I_{kda}	Kısa devre akımı
$\dot{Q}_t$	Termal enerji
P_{max}	Maksimum çıkış gücü
FF	Doldurma faktörü
h_{fv}	Fotovoltaik panel ile atmosfer arasındaki taşınım ve ışıınım ısı transfer katsayısı
V'_{adv}	Atmosferik şartlara göre değişen devre voltajı
I'_{kda}	Atmosferik şartlara göre değişen kısa devre akımı

$T_{fv,stk}$	Standart test koşullarında fotovoltaiik panelin sıcaklığa bağlı voltaj değişim katsayısı
$\eta_{max,ev}$	Maksimum elektrik enerjisi verimliliği
ψ_{fv}	Ekserji verimliliği
$\dot{E}x_{\text{çıkış}}$	Çıkış ekserjisi
$\dot{E}x_{\text{giriş}}$	Giriş ekserjisi
$T_{güneş}$	Güneş sıcaklığı



KISALTMALAR DİZİNİ

DSSC	Boyaya duyarlı fotovoltaiik hücreler
CPV	Yoğunlaştırıcı fotovoltaiik hücre
LCPV	Düşük yoğunluklu fotovoltaiik panel
HCPV	Yüksek yoğunluklu fotovoltaiik panel
PERC	Pasifleştirilmiş yayıcı ve arka hücre
PERL	Pasifleştirilmiş yayıcı ve arka yerel bölge
MPPT	Maksimum güç noktası izleyicileri
SAM	Sıralar arası mesafe
YSA	Yapay sinir ağları
MSE	Ortalama hataların karesi
LS	Logaritmik sigmoid aktivasyon fonksiyonu
TH	Tanjant hiperbolik aktivasyon fonksiyonu
PV	Fotovoltaiik panel
mA	Miliamper
SiNx	Silikon nitrit
SiO ₂	Silikon oksit
TCO	Şeffaf iletken oksit
TiO ₂	Titanyum oksit
a-Si	Amorf silikon
p-Si	Çok kristalli silikon
m-Si	Tek kristalli silikon
CdTe	Kadmiyum tellürit
ZnTe	Çinko tellürit
CIGS	Bakır indiyum galyum selenur
GaAs	Galyum arsenit
Ag	Gümüş

TEŞEKKÜR

Doktora tez danışmanlığımı üstlenerek beni bu konuya yönlendiren, çalışmalarım boyunca değerli görüş ve katkılarıyla yol gösteren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Uğur AKYOL'a,

Değerli fikirleri ve katkılarıyla doktora sürecimde hiçbir desteği esirgemeyen sayın Prof. Dr. Reşat MUTLU'ya, sayın Doç. Dr. Soner ÇELEN'e, sayın Doç. Dr. Sencer Süreyya KARABEYOĞLU'na ve sayın Dr. Öğr. Üyesi Tuğrul AKYOL'a,

Çalışmama sağladıkları maddi manevi destek için ArGesim Makine - Seven Sensör firmasına ve değerli çalışanlarına,

Her ihtiyacım olduğunda gerek teknik yardım gerekse bilgilerini esirgemeyen Trakya Solar firması sayın Uğur BİLİR'e ve Bahar Enerji firması sayın Özgür BAHARLI'ya,

Yapmış olduğu pozitif yaklaşımlar ile oluşan tüm zorlukları aşmama yardımcı olan, gösterdiği sabır ve özenle bir an olsun beni yalnız bırakmayan sevgili eşim Mehtap DURAK'a teşekkür ediyorum.

Bu çalışmamı canıma can katan, en karamsar anlarımda bile bir gülüşü ile dünyamı renklendiren canım kızım Gökçe'me armağan ediyorum...

Ahmet DURAK

Öğretim Görevlisi

1. GİRİŞ

Enerji, insanoğlu var olduğundan bu yana en büyük ihtiyaçlardan biri haline gelmiştir. Enerjinin neredeyse tamamı geçtiğimiz yüzyıllarda fosil kökenli yakıtlardan karşılanmaktaydı. Ancak günümüzde teknolojinin gelişmesinin yanında artan enerji ihtiyacını karşılayabilecek fosil yakıtlar azalmaya ve çevreye zarar vermeye başlamıştır (Gündoğdu, Öztürk ve Kabadayı, 2016). Birçok ülke tarafından imzalanan Montreal ve Kyoto Protokolleri temiz çevre ve yaşanabilir gelecek adına önemli aşamalardır (Karaağaç, Oğul ve Bardak, 2020). Bu protokoller fosil yakıtlardan uzaklaşarak yenilenebilir ve çevreci enerji kaynaklarını ilgi çekici hale gelmesine yardımcı olmuştur.

Doğal kaynaklardan elde edilen yenilenebilir enerji türleri güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, hidrolik enerji, jeotermal enerji ve biyokütle enerjisidir. Fosil kaynaklardan elde edilen yakıtların neden olduğu olumsuz etkilerin azaltılmasına bir alternatif olarak öne çıkan yenilenebilir enerji kullanımı birçok avantaja sahiptir. Yenilenebilir enerji kaynakları sürekli olarak mevcut olduklarından tükenme risklerinin olmaması ilk avantajıdır. İkinci olarak bu kaynaklar neredeyse her ülke lokasyonunda oldukları için dışa bağımlılığı azaltır ve enerji tedarikini güvence altına alır. Son olarak ise çevreci olduklarından sera gazı emisyonlarına neden olmamakta ve kirliliği azaltarak etki etmektedir (Demirgil ve Birol, 2020).

Güneş enerjisi, üzerine birçok araştırma yapılan yenilenebilir enerji türlerinin başında gelmektedir. Güneş enerjisi, bu enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülebilmesi için kullanılan güneş modülleri ve sistem elemanları araştırmacıların oldukça ilgisini çeken konulardır (Karabaş ve Mengi, 2019). Güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretebilmek için güneş panelleri kullanılmaktadır. Bu paneller bir dizi güneş pilinin bir araya getirilmesi ile oluşmaktadır. Güneş panelleri üzerine gelen güneş ışınımını soğurarak elektrik enerjisi üretir (Yalılı Kılıç, Dönmez ve Adalı, 2021).

Ülkemizde de birçok güneş enerji santrali kurulmuştur ve büyük ölçüde de kurulmaya devam edecektir. Aynı zamanda ülkemizde yerli güneş hücresi 2019 yılında üretilmeye başlamıştır (Arslanoğlu, Yiğit ve Eker, 2019). Bu da dışa bağımlı olan enerji sektörü ve güneş paneli üretiminin yerlileştirilmesi adına büyük önem arz etmektedir.

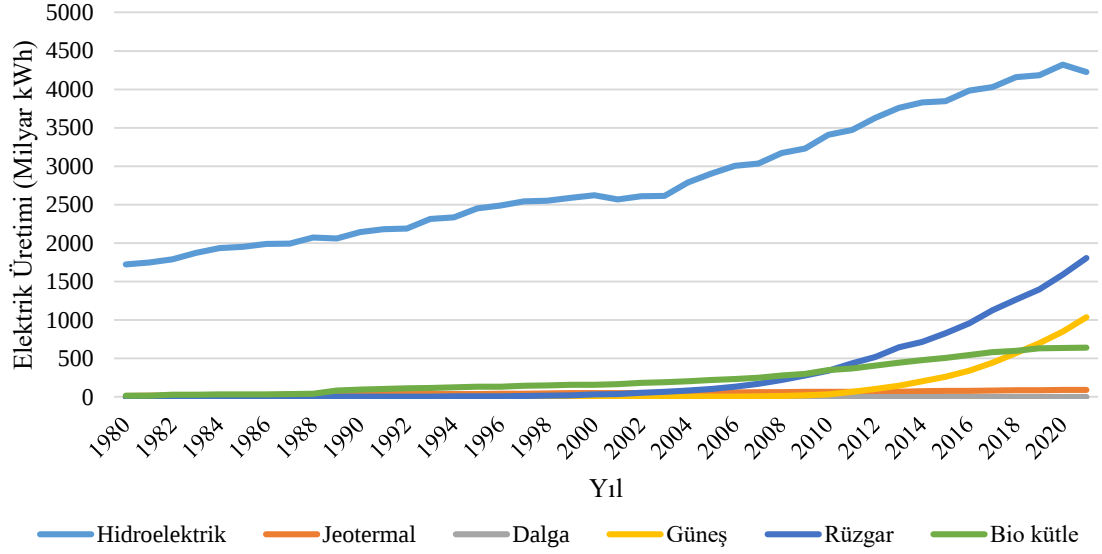
İş yapabilme yeteneği olarak da tanımlanan enerjiye talep gün geçtikçe artmaktadır. Günümüzde enerjiye olan talep hızla artmaktadır. Son 30 yılda (1990-2020), dünya çapında enerji tüketimi %59,63 oranında önemli bir artışa ulaşmıştır. Fosil yakıtlar ise 2020 yılında

dünya çapında üretilen enerjinin %79,94 oranında pay sahibidir (International Energy Agency (IEA), 2023). Enerji üretim sektöründe fosil yakıtların kullanımı, karbondioksit emisyonlarının yaklaşık %75'ine neden olmaktadır. Bu da sera gazı emisyonlarının yanı sıra küresel ısınmaya katkıda bulunmaktadır (Manish, Pillai ve Banerjee, 2006).

Fosil yakıtların çevre ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerinin üstesinden gelmek için birçok ülke artan enerji taleplerini sürdürülebilir, çevreci ve yenilenebilir alternatif enerji kaynaklarına yöneltmiştir. Güneş, insanlığın tüm enerji ihtiyacını karşılayabilecek, çevreye en az olumsuz etkisi olan ve en iyi yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir (Solangi, Islam, Saidur, Rahim ve Fayaz, 2011). Güneşten gelen enerji elektriğe dönüştürülebilir veya doğrudan kullanılabilir (Hayat, Ali, Monyake, Alagha ve Ahmed, 2019).

İklim değişikliği ve geleneksel fosil yakıtların tükenmesi ile ilgili endişeler arttıkça, ülkeler artan güç ihtiyaçlarını karşılamak için giderek daha fazla yenilenebilir enerjiye yönelmektedirler. 2016 yılında 176 ülkenin katılımıyla imzalanan Paris İklim Antlaşması'na göre ortalama küresel sıcaklık artışının sanayi öncesi seviyelere göre 2°C'nin altında hatta mümkün olduğunca 1,5°C civarında tutulmasına karar verilmiş ve 2050 yılı sonrasında öncelikle gelişmiş ülkelerin sıfır emisyon konumuna gelmeleri istenmiştir (UNFCCC, 2021).

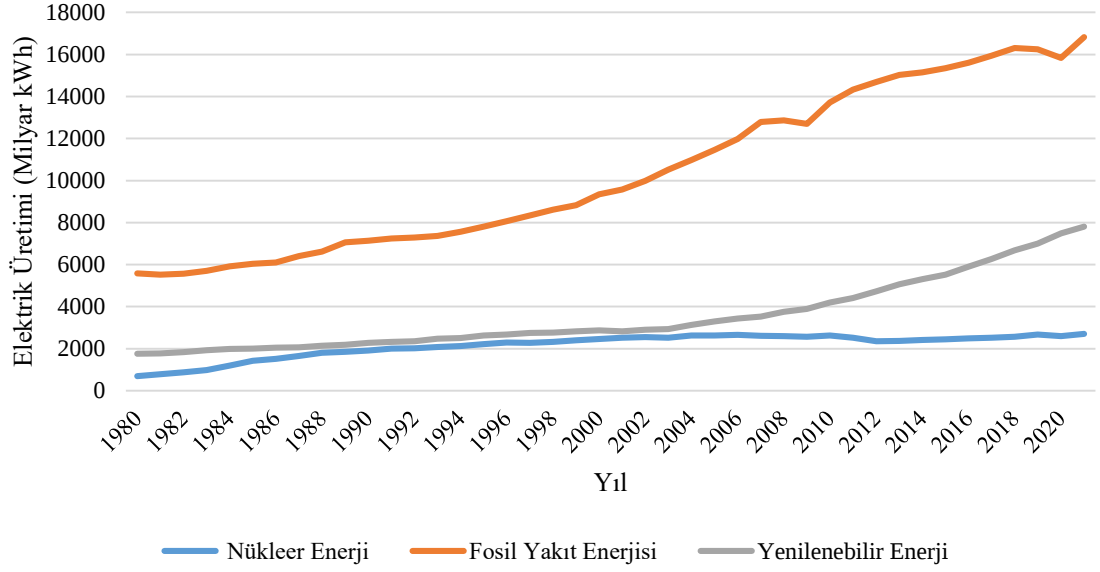
Şekil 1.1'de küresel alanda elektrik üretimi için kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarının yıllar içerisinde değişim miktarları verilmektedir. Güneş, rüzgâr, biyokütle, hidroelektrik ve gelgit enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları CO₂ içermeyen enerji kaynaklarıdır (Schnitzer, Brunner ve Gwehenberger, 2007). Yenilenebilir enerji kullanımının avantajlarının bilinmesine rağmen, bu enerji kaynakları 2006 yılında dünya enerji talebinin yalnızca yaklaşık %1,5'ine katkıda bulunmuştur. Bu eğilimin 2030 yılında %1,8'e kadar yükseleceği tahmin edilmektedir (Mekhilef, Saidur ve Safari, 2011).



Şekil 1.1. Dünyada yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretiminin sınıflandırılması (EIA, 2021)

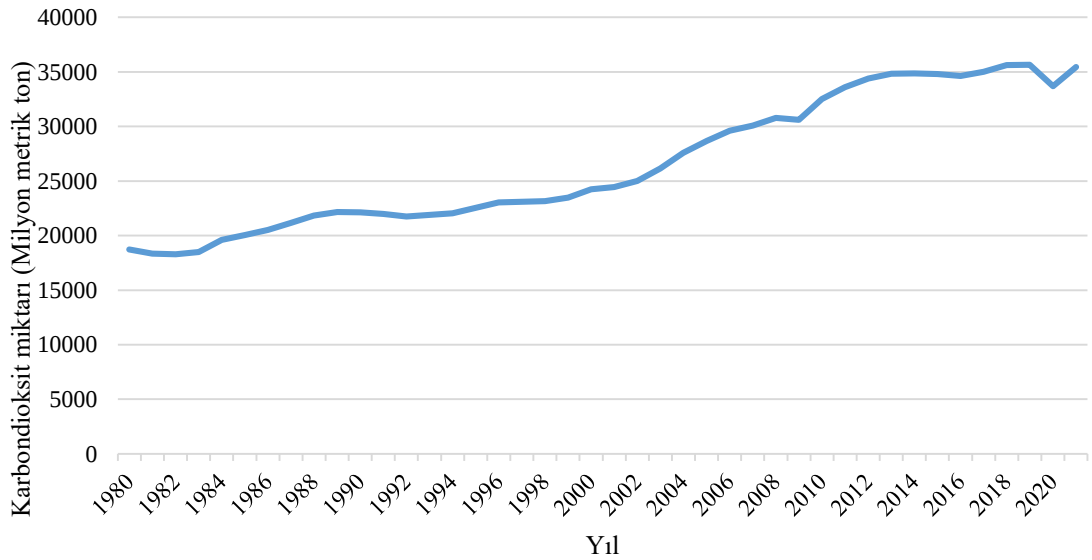
Yenilenebilir enerjiye dayalı sistemlerin endüstrilerde uygulanmasıyla sera gazı emisyonları önemli ölçüde azaltılabilir. Bu nedenle geleneksel enerji kaynaklarının yenilenebilir enerji kaynaklarına kaydırılması ve yeni teknolojilerin geliştirilip sanayide uygulanması gerekmektedir (Kannan ve Vakeesan, 2016). Güneş enerjisi tüm yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde endüstrilerde uygulanabilecek en umut verici seçenek olarak görülmektedir. Bol, bedava, temiz, çevreye fiziksel kirlilik ve işitsel kirlilik yaratmayan bir enerji çeşididir.

Dünyanın enerji talebi önemli ölçüde artmaktadır. Dünya çapında bu enerji talebini karşılamak için birçok kaynak kullanılmaktadır. Şekil 1.2’de, dünya elektrik taleplerini karşılamak amacıyla elektrik üretmek için kullanılan çeşitli kaynak türleri ve oranları verilmiştir.



Şekil 1.2. Küresel elektrik üretiminin sınıflandırılması (EIA, 2021)

Küresel elektriğin yaklaşık %77,9'u pahalı olup özellikle karbondioksit üretimi yoluyla çevre kirliliğine neden olan fosil yakıtlardan ve nükleer kaynaklardan üretilmektedir. Geri kalan yaklaşık %0,7'si ise güneş enerjisinden karşılanmaktadır (REN21, 2022). Şekil 1.3, enerji tüketiminden kaynaklanan toplam karbondioksit emisyonunu göstermektedir.

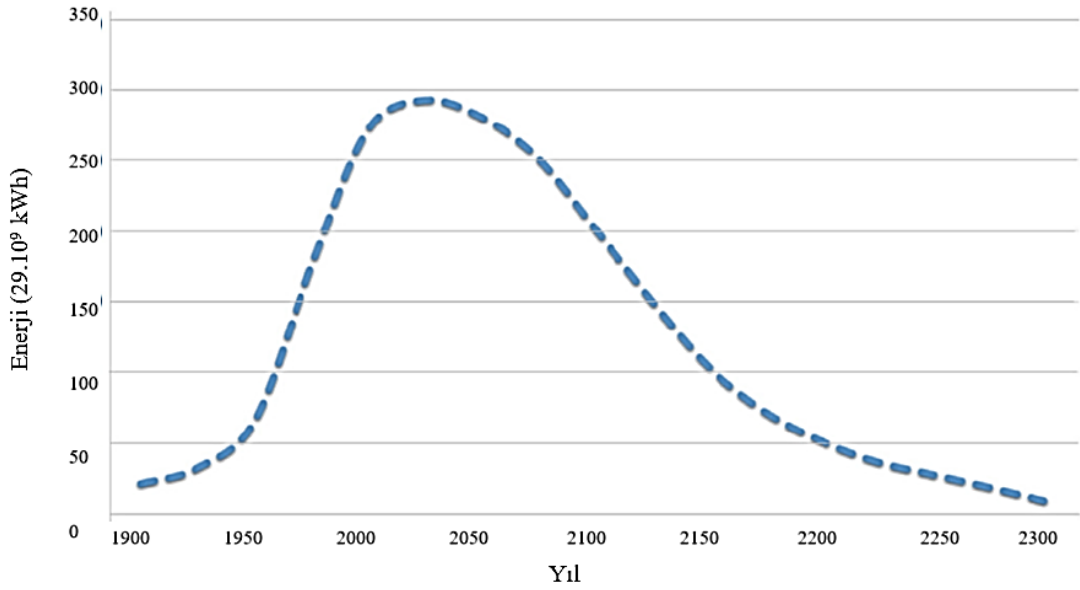


Şekil 1.3. Enerji tüketiminden açığa çıkan toplam karbondioksit emisyon değerleri (EIA, 2021)

Dünyada 2021 yılında yaklaşık 35463 milyon metrik ton karbondioksit üretilmiştir (EIA, 2021). Bu emisyon değerleri iklim değişikliği, küresel ısınma gibi durumlara sebep

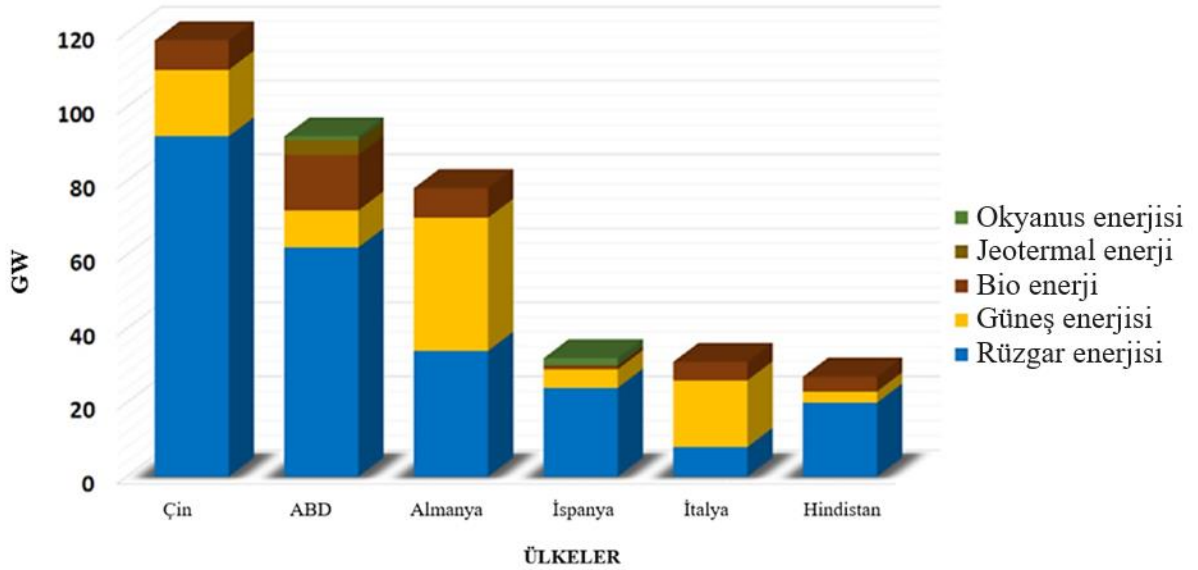
olmaktadır. Bu durum buzulların erimesi ve deniz seviyesinin yükselmesine neden olarak çevresel sorunlara yol açmaktadır.

Çevre kirliliği ve fosil yakıt kaynaklarının tükeniyor olması nedeniyle, daha iyi üretim için yenilenebilir enerji kaynaklarının büyümesi gerekmektedir. Şekil 1.4'te dünyadaki fosil yakıt enerji durumunu gösterilmektedir. Enerji kaynaklarının 2300 yılından sonra artık kullanılamayacağı açıkça görülmektedir (Roper, 2012). Bu nedenle yenilenebilir kaynakların kullanımının artırılmasına yönelik birçok adım atılmaktadır.



Şekil 1.4. Dünya'da fosil enerji tüketimi (Roper, 2012).

Birçok ülke, enerji üretimi için harcanan maliyetten tasarruf etmek için yenilenebilir enerji kullanmaktadır. Enerji üretiminde yenilenebilir enerji kullanan ülkelerin başında Çin, Amerika Birleşik Devletleri, Almanya, İspanya, İtalya ve Hindistan gibi ülkeler gelmektedir. Şekil 1.5'te, bu ülkelerin 2013 yılındaki yenilenebilir enerji kapasitesi verilmiştir. Almanya, diğerler ülkelerin yanı sıra, enerji üretimi için güneş enerjisi kullanan lider ülkedir (REN21, 2022).

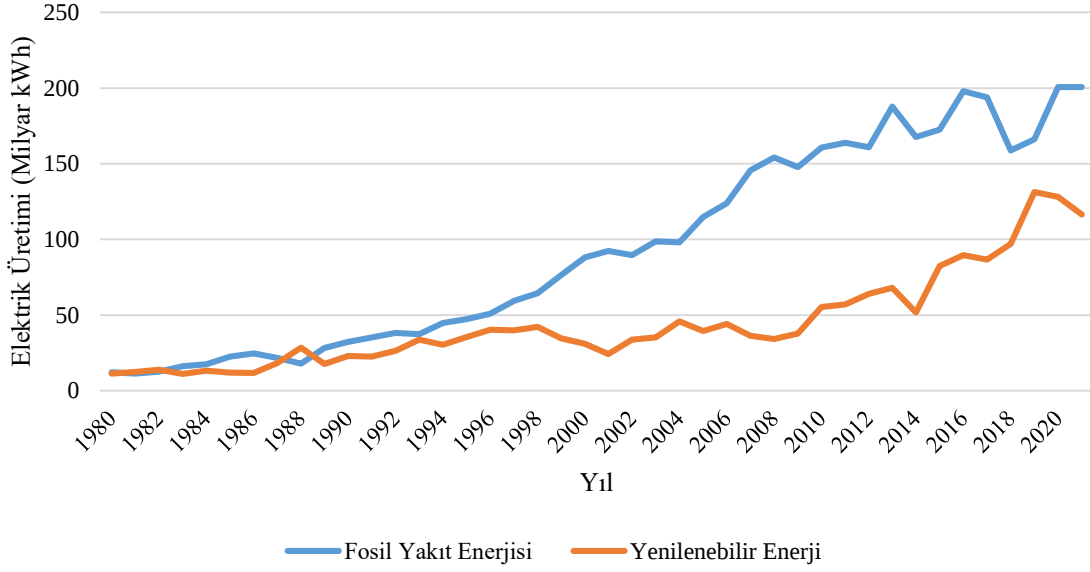


Şekil 1.5. Dünyada yenilenebilir enerji kullanan bazı ülkeler (REN21, 2022).

Türkiye son yıllarda özellikle enerji alanında sürdürülebilir ve yenilenebilir kaynaklara yönelik önemli girişimlerde bulunmuştur. Ülkenin gerek coğrafi gerekse jeopolitik konumu sayesinde neredeyse tüm yenilenebilir enerji kaynaklarına ulaşım imkânı bulunmaktadır.

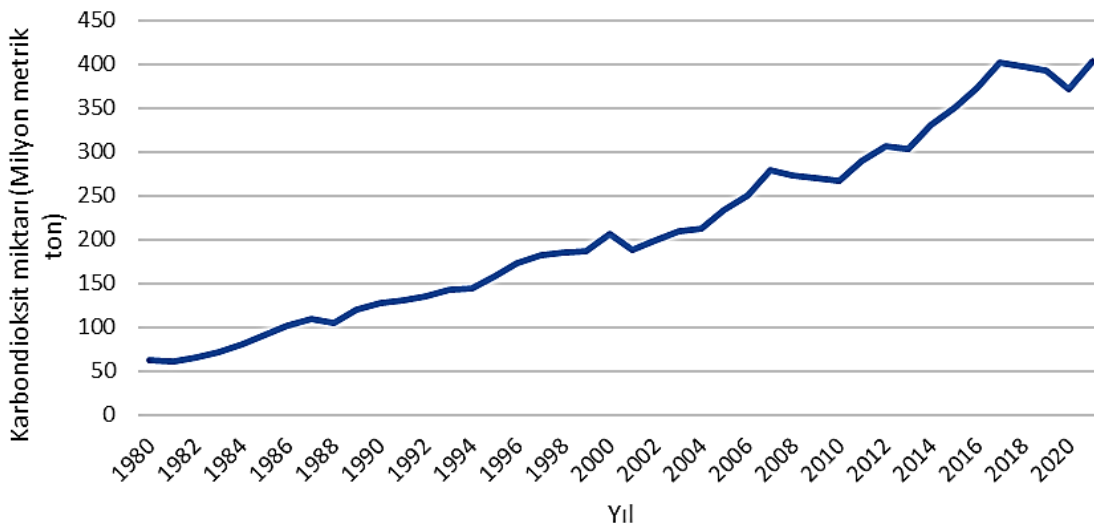
Ege ve Marmara bölgelerinin yüksek rüzgâr potansiyeli, Güneydoğu Anadolu bölgesinin yüksek güneşlenme süreleri ve miktarları, coğrafyanın neredeyse tamamının birçok nehir ve akarsulara sahip olması, tarım ve ormancılık faaliyetlerinin Karadeniz, Ege, Akdeniz ve Marmara bölgelerinde yoğun gerçekleşmesi ve son olarak Kuzey Anadolu Fay Hattı çevresinde bulunan jeotermal sular birçok yenilenebilir enerji üretiminin gerçekleşmesine uygun olanaklar sağlamaktadır. Özellikle rüzgâr, güneş, hidroelektrik ve jeotermal enerji potansiyeli bakımından Çoğu Avrupa Birliği ülkelerinden yüksek fakat bu kaynaklardan yararlanma oranına göre çok daha düşük seviyelerdedir (Gül, 2019).

2009 yılından sonra elektrik enerjisi üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının gittikçe arttığı gözlenmiştir. Şekil 1.6'da Türkiye'de elektrik enerjisi üretiminde yenilenebilir ve fosil enerji kaynakları karşılaştırılmıştır.



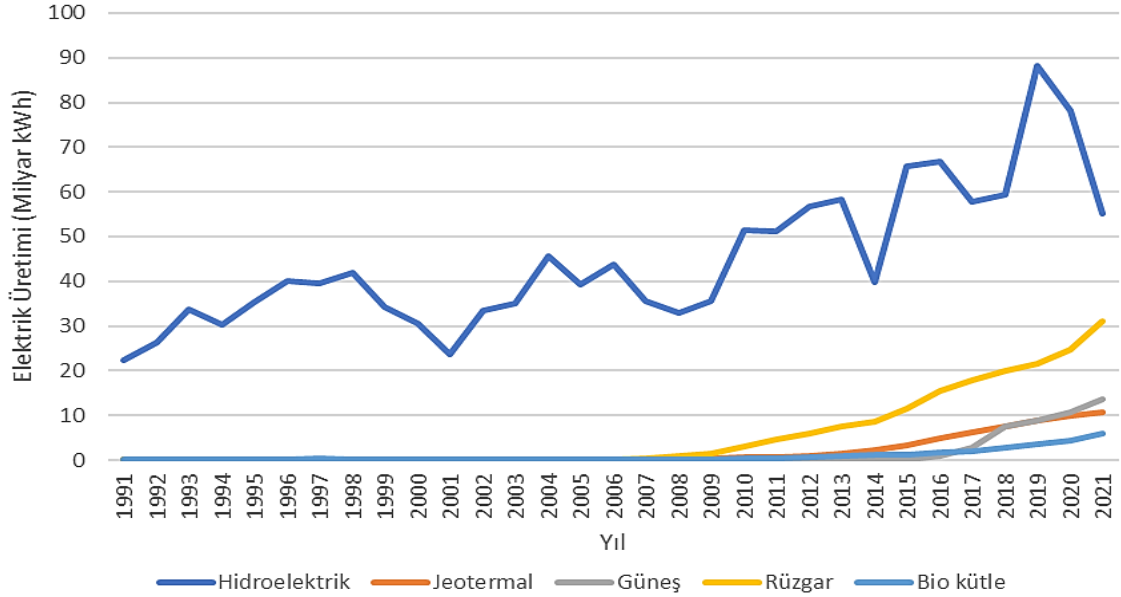
Şekil 1.6. Türkiye’de elektrik enerjisi üretiminde yenilenebilir ve fosil enerji kaynaklarının karşılaştırılması (EIA, 2021)

Elektrik enerjisi üretiminde fosil yakıtların üstünlüğü göze çarpsa da kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarının gözle görülür şekilde artması oldukça önemlidir. Sürdürülebilir çevre ve emisyonuz gelecek bizler ve bizden sonra gelecek nesiller için çok önemlidir. Özellikle artan karbondioksit emisyonlarını azaltmak ciddi önem arz etmektedir. Şekil 1.7, Türkiye’nin karbondioksit emisyon miktarının yıllara göre değişimi gösterilmiştir. Bu grafiğe göre yenilenebilir enerjinin kullanım miktarının arttığı yıllarda karbondioksit emisyonlarının azaldığını görebiliriz.



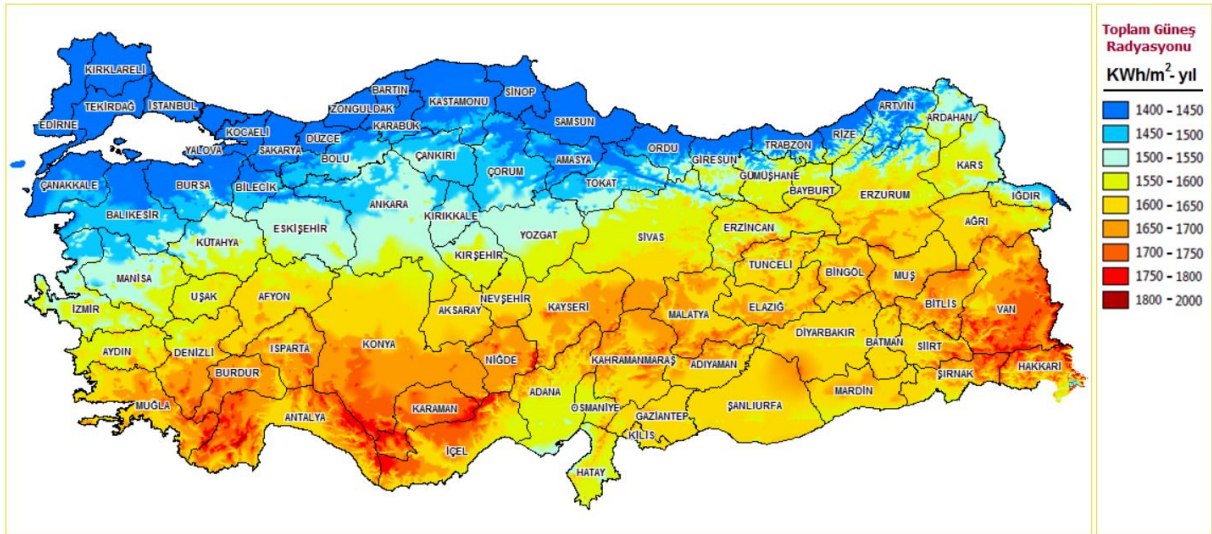
Şekil 1.7. Türkiye’nin karbondioksit emisyon miktarının yıllara göre değişimi (EIA, 2021)

Türkiye’de son yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üretilmesine yönelik ciddi yatırımlar yapılmıştır. Bu yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik enerjisine yönelik Şekil 1.8’de bir karşılaştırma verilmiştir.



Şekil 1.8. Türkiye yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik miktarının değişimi (EIA, 2021)

Türkiye 36°-42° Kuzey enlemleri ve 26°-45° Doğu meridyenleri arasında olan yüksek güneşlenme potansiyeline sahip ülkeler arasındadır. Şekil 1.9’da görülen Türkiye güneş enerjisi haritasına göre yıllık ortalama radyasyon miktarı görülmektedir.



Şekil 1.9. Türkiye yıllık toplam güneş radyasyonu miktarı (EİGM, 2023)

1.1 Literatür Özeti

Alam vd. (2023) Heriot-Watt Üniversitesi'nde gerçekleştirilen testlere dayanarak çift yüzlü ve tek yüzlü bir fotovoltaik (PV) sistemin performansını analiz etmiş ve karşılaştırmıştır. Modül performansı farklı zemin yansıtıcı yüzeylerde incelenmiştir: beton, beyaz kiremit, toprak ve beyaz çakıl taşları. Arka taraf ışınlı ve çift yüzlü enerji kazanımları detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, yıllık arka ışınlı kazancı analizi, en yüksek kazanç aralığının beyaz çakıl taşları ve beyaz kiremit zemin yüzeylerinde (%30'dan fazla kazanç) olduğunu, en düşük kazanç aralığının ise toprak yüzeyinde (%5–%10 aralığında) ve beton için %20 olduğunu ortaya koymuştur. Yapılan analiz, zemini yansıtan yüzeyin ne olursa olsun, çift yüzlü enerji kazancının %30'dan fazla olma olasılığının düşük olduğunu göstermiştir. Karşılaştırma sonuçları, Birleşik Krallık'taki farklı konumlar için PVSyst'te gerçekleştirilen simülasyon çıktılarının, dünya genelinde bildirilen çift yüzlü kazançlarla tutarlılık gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Islam vd. (2022) yaptıkları çalışmada panel eğimleri sırasıyla 0°, 20° ve 30° olan çift yüzlü güneş panellerinde kirlenmenin teknik ve ekonomik analizini yapmışlardır. Dhaka'da yaptıkları bu çalışmada 0°, 20° ve 30° eğimde bulunan çift yüzlü güneş panellerinin ön yüzeylerinde kirlenme oranları sırasıyla %1,058, %0,753 ve %0,687 olarak gözlemlemiş ve panellerin sırasıyla 5, 5 ve 6 günde bir kez yapıldığını aktarmışlardır. Bu panellerin temizlenmesi içinse aylık ortalama %5,5-%8 oranında ek maliyete sebep olduklarını belirtmişlerdir.

10 kW gücünde bir solar sistem simülasyonu hazırlayan Perera ve Wen (2019) çift yüzlü güneş panelleri ile tek yüzlü güneş panellerini farklı albedo ve panel eğim açısında karşılaştırmışlardır. Bu simülasyonda karşılaştırdıkları albedo değerleri 0,30 ve 0,80, panel eğim açısı değerleri olarak ise 30° ve 15° olarak kullanılmıştır. Yapılan simülasyon sonuçlarına göre çift yüzlü güneş panellerinin tek yüzlü güneş panellerinden daha fazla enerji ürettiğini ortaya koymuşlardır. Aynı zamanda çift yüzlü güneş panelleri için albedo oranının %40 üzerinde olması durumunda 15° eğimde en iyi performans göstereceğini, tek yüzlü güneş panellerinin ise 0,40 albedo değerinin altında ve 15° eğimde daha iyi performans göstereceğini öne sürmüşlerdir.

Çift yüzlü güneş panellerinin arka yüzeyine yansıtacak dağınık ışınlı miktarının ve albedo miktarının gölgelenme etkisinden dolayı panel yüksekliğinin önemli bir faktör olduğunu

Salum vd. (2022) önermiştir. Bağdat bölgesinde kurulan deney düzeneğinde çift yüzölü güneş pillerinin optimum yükseklik ve eğim açısını araştırmak için çalışma yapmışlardır. Deneyler 2020 kasım ayında birkaç günlük periyotlar halinde yapılmıştır. Panel yüksekliklerini sırasıyla 100 cm, 120 cm, 140 cm ve 160 cm olarak, panel eğim açılarını da her yükseklik için 0°, 12°, 30°, 49° ve 70° değerinde almışlardır. Panelin en çok artış gösterdiği yüksekliğin 100 cm'den 200 cm değerine çıktığında gerçekleştiğini 140 cm ve 160 cm değerlerinde ise denge eğiliminde olduğunu gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak kasım ayında Bağdat bölgesinde en yüksek verimin 120 cm yükseklikte ve 49° panel eğim açısında elde edildiğini belirtmişlerdir.

Reagan & Kurtz (2022) yaptıkları çalışmada Merced, CA'dan alınan hava durumu verileri ile çift yüzölü güneş panellerini reflektörlü ve reflektörsüz olarak kullandıkları bir model oluşturmuşlardır. Panel eğim açısının bölgede 20° değerinde, panel yönünü hem güney hem de doğu yöneliminde, panel montajını da dikey olarak kullanmışlardır. Yıllık üretimlerini verimlerinin reflektörlü panel için %117 ve reflektörsüz panel için ise %87 olarak bulmuşlardır. Houston, Denver ve Miami bölgelerinden alınan hava verileri ile deneyleri tekrarlamışlar ve reflektörlü panellerin %112 - %121 arasında, reflektörsüz panellerin ise %82 ile %94 arasında sonuçlar almışlardır. Güneye bakan dikey panellerin yaz dışı aylarda daha iyi performansa sahip olduğunu doğuya bakan panellerin ise reflektör olmadan dahi daha iyi performans gösterdiklerini kayda değer bulmuşlardır.

Ateşböceği algoritması kullanarak iki yüzölü bir güneş paneli modülünün arka yüzeyinden toplanabilecek ekstra enerji verimini hesaplamak için Fajuke & Raji (2022) bir model oluşturmuşlardır. Model Nijerya bölgesinde farklı albedo ve panel montaj yükseklik değerine sahip dikey konumlu güney- kuzey ve dikey konumlu doğu-batı olmak üzere iki yönelime tabi tutulmuştur. Simülasyon sonucu en yüksek ekstra enerji veriminin 25° panel eğimi, 1m panel montaj yüksekliğinde, 2,5 m sıra aralığında ve doğu-batı yöneliminde elde edildiğini göstermişlerdir. Bu veriler ışığında maksimum albedo ve optimum panel montaj yüksekliği seçiminin %5 ile %45 arasında ekstra enerji verimi sağlayabileceğini belirtmişlerdir.

Desai vd. (2022) çatı üstüne konulan çift yüzölü güneş panelleri ile tek yüzölü güneş panellerini karşılaştırmış ve analiz etmişlerdir. Hindistan'da bir kentsel konumda çatı üstüne kurulan 5 kW büyüklüğünde bir deney düzeneğinde çift yüzölü güneş panellerinin %10'dan fazla ekstra enerji ürettiklerini belirtmişlerdir. Bunun sebebinin bölgede bulunan çatıların genellikle beyaz ve gri kiremit olması ve bununda yüksek albedo değerini getirdiğini açıklamışlardır. Ancak çift yüzölü güneş panellerinin başlangıç maliyetinin tek yüzölü klasik güneş panellerinden

%2 ile %13 daha fazla olmasının bir dezavantaj olduğunu ancak 25 yıllık bir dönemde çift yüzölçümlü panellerin bu durumu dengelediği ve avantaja geçebileceğini belirtmişlerdir. Son olarak çift yüzölçümlü güneş panellerinin bölgede en iyi performans gösterdikleri açının 15° ile 20° olmasının yeterli olduğunu öne sürmüşlerdir.

Gana bölgesinde çalışma yapan Grommes vd. (2023) çift yüzölçümlü güneş panellerin bölgede yaygın halde bulunan kırmızı toprağın enerji üretimine etkisini simüle etmişlerdir. Gana’da üç farklı bölgeden alınan kırmızı toprağın albedo değeri 0,175 ile 0,335 arasında ölçülmüştür. Gerçekleştirilen simülasyon sonucuna göre çift yüzölçümlü güneş panelleri tek yüzölçümlü güneş panellerden yaklaşık %19,8 daha verimli olduğu ve yılda birim alan için 508,8 kWh/m² enerji yoğunluğu elde edebileceği sonucuna varmışlardır.

Ghenai vd. (2022) yaptıkları çalışmada güneş panellerinin enerji üretimini arttırmak, çift yüzölçümlü güneş panellerinin çatı teknolojilerine entegre edilmesi, arz ve talep dengesini sağlamak amacıyla elektrik üretimini önceden tahmin edilebilmesi için bir model oluşturmayı amaçlamışlardır. Yüzey albedosu 0,2-0,8 aralığında olan bir bina çatısına çift yüzölçümlü güneş panelleri konumlandırmışlardır. Yıllık enerji üretimlerinde ilk olarak 0,2 albedo değerini 0,5’e daha sonra da 0,8 değerine çıkmasının çift yüzölçümlü güneş paneli enerji üretiminin sırasıyla %7,75 ve 14,96 oranında artacağını gözlemlemişlerdir. Aylık enerji üretiminde ise bu değerler %10,87 ve %21,54’e yükselmiştir. Elde edilen veriler kullanılarak bir yapay sinir ağı mimarisi oluşturmuşlardır. Yapay sinir ağı modelinin test sonuçlarına göre korelasyon katsayısı 0,99145 ile 0,99382 arasında değişmiştir. Oluşturulan yapay sinir ağı modelinin deneysel sonuçları çok iyi tahmin ettiğini ve gelecekte bu modelin endüstrinin güç üretiminde, bina işletmelerinin talep ve enerji ihtiyaçlarını tahmin etmede yardımcı olacağını belirtmişlerdir.

Albedo, panel eğim açısı ve panel yüksekliği parametrelerin çift yüzölçümlü güneş panellerinde enerji üretim performansına etkilerinin incelenmesi, optimum çalışma koşullarının belirlenmesi, yıllık enerji verimi ve çift yüzölçümlü kazancı için yeni korelasyonlar geliştirmeyi amaçlayan Ghenai vd. (2021) bir simülasyon oluşturmuştur. Bu simülasyonda üç temel kurulum parametresi olan albedo (%0,10, %0,50, %0,90), panel eğim açısı (15° , 25° , 35°) ve panel yüksekliği (0.5 m, 1 m, 1.5 m) incelenmiştir. Oluşturulan modele göre çift yüzölçümlü güneş panelinin %0,90 albedo, 35° panel eğim açısı ve 1,5 m panel yüksekliğinin günlük enerji üretiminin ortalama %35,68’e ulaşabileceğini hesaplamışlardır. Çift yüzölçümlü ve tek yüzölçümlü güneş panellerinin mayıs ayında enerji üretimleri sırasıyla 192,4 kWh ve 160,6 kWh değerine

ulaştığını ve maksimum çift yüzlülük kazanımının %21,93 olarak temmuz ayında oluştuğunu rapor ettiler.

Muehleisen vd. (2021) endüstriyel binaların düz çatılarına kurulan çift yüzlü güneş panellerinin verimini arttırmak için etkili bir yol sunmuşlardır. Çift yüzlü güneş panelleri çatı sistemlerinin etkisini değerlendirmek ve derecelendirmek amacıyla test modülleri de dahil olmak üzere 20 modül içeren küçük bir tesis kurmuştur. Enerji çıkışını optimize edebilmek için beyaz boyalı düz bir çatıya da çift yüzlü güneş modülü destek ve karşılaştırma amacıyla yerleştirilmiştir. Doğu-batı yönlerine konumlandırılan modüllerin verim ve güç optimizasyonu için bir izleme portalı ile veriler bir yıl boyunca toplanmış ve analiz edilmiştir. Şeffaf bir arka yüzeye sahip çift yüzlü modüller, yine çift yüzlü ancak siyah arka yüzeye sahip modüle kıyasla doğu yönünde %17, batı yönünde ise %15 daha fazla enerji üretmişlerdir. Bir yıllık işletme sonunda yosun büyümesi ve kirlilik nedeniyle albedo kaybı ortaya çıkmış ve doğu yönünde %7 batı yönünde ise %5'lik bir fayda sağladığını tespit etmişlerdir.

Gu vd. (2020) Çift yüzlü güneş modülü için optik, elektriksel ve termal bir model geliştirmişlerdir. Modelde modülün ön ve arka yüzeylerin ışıyım miktarlarını optik model aracılığı ile hücre sıcaklıklarını termal model aracılığı ile ve güç çıkışlarını elektriksel model aracılığı ile elde etmişlerdir. Modelin doğrulaması yapıldıktan sonra günlük ve yıllık performans tahminleri yapılması için kullanılmıştır. Bu tahminlere göre çift yüzlü güneş modüllerinin bulutlu ve güneşli günler için sırasıyla %28,21 ve %25,58 kazançları olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca düşük ışıma altında çift yüzlü güneş panellerinin daha fazla kazanç sağladığını belirtmişlerdir. Son olarak Hong Kong ve Şangay için yıllık %22'nin üzerinde kazanç sağladığını sunmuşlardır.

Yaptıkları çalışmada ışık şiddetinin artırılması ve tek eksenli yatay izleyici sisteminin çift yüzlü güneş panelleri verimliliğine etkisini incelemek için Wang vd. (2022) bir model oluşturmuşlardır. Oluşturulan model hem teorik matematiksel hesaplamalar hem de deneysel bir prototip düzenek ile doğrulanmıştır. 37,5° enlem bölgesinde sabit ve yansıtıcı güneş panellerinin yıllık ortalama %17, tek eksenli yatay izleyici ve yansıtıcı güneş panellerin ise %30 daha fazla enerji ürettiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca sabit yansıtıcı deney düzeneği panel açıları 3 set (10°, 20° ve 30°) halinde yapılmıştır. 2021 Ağustos ayında günlük güç üretim değerleri sırasıyla %8,2, %13 ve %18, 2021 Eylül ayında ise %7, %8,7 ve %13,7 olarak bulunmuştur. Elde edilen deneysel sonuçların teorik hesaplamalar ile uyuştuğunu belirtmişlerdir.

Mikofski vd. (2019) çift yüzölü güneş panellerinin sağladığı fırsatları ele almak için bir model geliştirmiş ve bunu da bir fotovoltaiik sisteme entegre etmişlerdir. Bu model sayesinde çift yüzölü güneş panellerinin arka yüzeye gelen ışınlm tahmin edilebilecek, ön yüzeye gelen ışınlm ile birleştirilip toplam çıkış gücü öngörölebilecektir. Bunun için geliştirilen modelde eğim açıları 20° ila 40° arasında değişen çift yüzölü güneş panelleri simöle edilerek bir karşılaştırma yapılmıştır. Panel eğim açısının artmasıyla çift yüzölölük kazanımının %10 değerinde arttığını gözlemlemişlerdir. Çift yüzölü sistemler için maksimum verimlilik için 30° panel eğimi, tek yüzölü güneş panelleri için bu değerin 25° olmasının avantaj sağladığını sunmuşlardır.

Ürdün bölgesinde yaptıkları çalışmada Ayadi vd. (2021) çift yüzölü güneş panellerini üç farklı tek yüzölü güneş paneli (half-cut, mono-perc ve polikristal) ile karşılaştırmışlardır. Deney düzeneği Ürdün Üniversitesi Mühendislik Fakölte binasının çatısına, güneye yönelimli ve 30° panel eğim açısında kurulmuştur. Akım, gerilim, hücre ve ortam sıcaklıkları, panellerin ön ve arka yüzeyine gelen ışınlm miktarı beş hafta boyunca ölçmüşlerdir. Güneş paneli için yapılan sıcaklık ölçömlerinde, ölçölen sıcaklıkların modöl yüzeyinde bulunan sensör konumundan etkilenmediğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca çift yüzölü güneş panelleri sıcaklığının diğer modöllerin sıcaklıklarıyla benzer olduğunu tespit etmişlerdir. Ekim ve kasım aylarında beş haftalık bir süre için yapılan gözleme göre çift yüzölü güneş panellerinin half-cut, mono-perc ve polikristal güneş panellerine kıyasla sırasıyla %9,9, %13,1 ve %24,9 daha fazla enerji ürettiğini belirtmişlerdir.

Gu vd. (Gu ve diğerleri, 2021) yaptıkları çalışmada çift yüzölü güneş panellerinin performansını tahmin etmek için benzer yapıda çift yüzölü ve tek yüzölü güneş modöllerini kullanmışlardır. Ayrıca aynı koşullar altında çift yüzölü ve tek yüzölü modöllerin günlük elektriksel ve termal performanslarını ölçerek karşılaştırmışlardır. Sonuçlara bakıldığında çift yüzölü güneş modöllerinin tek yüzölü güneş modöllerine kıyasla güneşli ve bulutlu günlerde sırasıyla %13,08 ve %16,54 kazanç getirmiştir. Çift yüzölü güneş modöllerinin özellikle düşük ışınlm altında açık bir avantaja sahip olduğunu göstermişlerdir. Termal performansa bakıldığında çift yüzölü hücrelerin sıcaklığı yüksek ışımda tek yüzölü hücrelerden daha düşüktür. Çift yüzölü modöllerin günlük kazançları %12,94 ile %16,94 arasında değişmiş, haftalık ortalama %14,54 değerine ulaştığını sunmuşlardır.

1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmanın amacı, Tekirdağ ilinin Çorlu ilçesinde (enlem:41,159° K, boylam:27,8052° D) tek ve çift yüzlü fotovoltaik panellerin panel eğim açıları, panel yükseklikleri ve meteorolojik verilere bağlı olarak enerji performansının deneysel olarak karşılaştırılmasını yapmaktır. Ayrıca çift yüzlü fotovoltaik panellerin fiziksel yerleşim parametrelerini ve meteorolojik verileri giriş alarak oluşturulan yapay sinir ağı modeli ile panel enerji üretimini tahmin edilmesi ve fotovoltaik panellerin enerji ve ekserji analizinin yapılmasıdır.

Yapılan çalışmada kullanılan paneller, sırasıyla 30°, 40° ve 50°'lik farklı eğim açılarında ve yerden 50 cm ile 100 cm yüksekliğe konumlandırılmıştır. Doğu yöneline bakan çift yüzlü güneş panellerinin güç üretimi gözlenmiş ve enerji üretim miktarları bu güç değerinden hesaplanmıştır. 40° panel eğim açısında ve güney yöneline karşılaştırma referansı olarak yerleştirilen tek yüzlü panelin ürettiği güç ölçülerek enerji üretimi hesaplanmıştır. Ardından tek ve çift yüzlü fotovoltaik panellerin enerji performansı birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Yapılan deneylerde meteorolojik verilerin (güneş ışıyım miktarı, hava sıcaklığı, hava nemi, rüzgâr hızı ve yönü) çift yüzlü güneş panel performansına etkileri de detaylı bir şekilde incelenmiştir. Çalışmada tek yüzlü ve çift yüzlü panellerin enerji ve ekserji analizleri yapılarak fotovoltaik sistemin performansı ve enerji dönüşümünün verimliliği değerlendirilmiştir. Deneylerden alınan meteorolojik veriler ile fiziksel parametreler giriş ve üretilen panel enerjisi çıkış olarak alınarak oluşturulan yapay sinir ağı modeli panel enerji üretiminin tahmin edilmesinde kullanılmıştır.

2. FOTOVOLTAİK TEKNOLOJİLER VE SİSTEM BİLEŞENLERİ

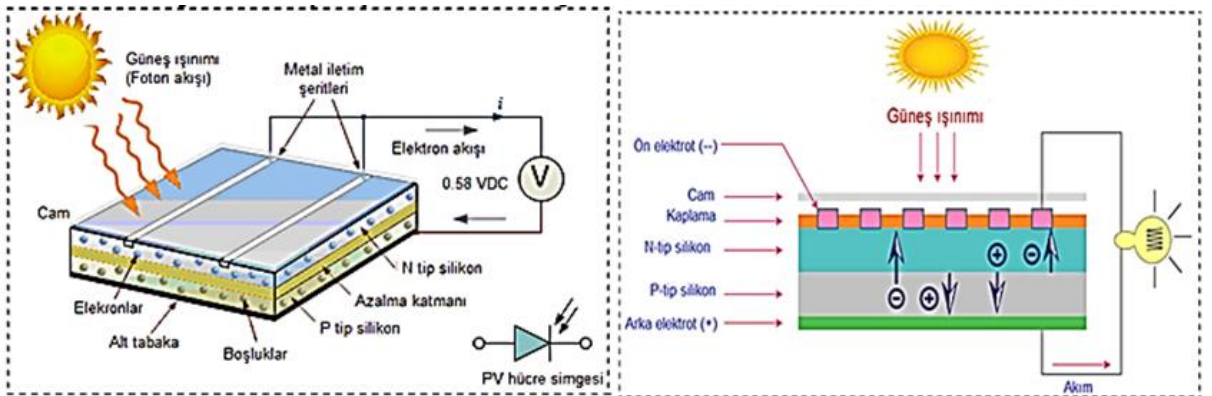
Fotovoltaik (PV) kelime anlamı olarak ışık anlamına gelen “photo” ve elektrik anlamına gelen “voltaic” terimlerinden türetilmiştir. Fotovoltaik teknolojinin temelinde birbirine oldukça yakınlaştırılmış iki yarı iletkenin maruz kaldığı güneş ışınları sonrası aralarında elektrik akımı oluşması prensibine dayanmaktadır (Taşkın, 2018).

Temiz ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olan fotovoltaik teknolojisi günümüzde ve gelecekte önemli bir potansiyele sahiptir. Fotovoltaik sistemler fotovoltaik hücreler, güneş panelleri, invertörler gibi birçok elemanın bir araya gelmesiyle oluşmaktadır.

2.1 Fotovoltaik Hücreler

Fotovoltaik hücreler, üzerine gelen güneş ışınlarını doğrudan elektrik ve ısı enerjisine dönüştüren temel bileşenlerdir. Genellikle yarı iletken malzemelerin ince tabakalar haline getirilmesi ile oluşmaktadır.

Yarı iletken maddelerin güneş pili olarak kullanılabilmesi için içerisine negatif (n) ve pozitif (p) tipi maddeler eklenmesi gerekmektedir (Şekil 2.1) (Taşkın, 2018). Güneş ışığından gelen fotonlar elektronların n tipinden p tipine doğru akmasını sağlar. Bu olay yük dengesi oluşana kadar devam eder. Bu şekilde bir elektrik alanı oluşmaktadır.



Şekil 2.1. a) PV hücrenin çalışma ilkesi

b) PV hücrenin yapısı (Öztürk, 2017)

Fotovoltaik hücreler hakkında geçmişten günümüze kadar birçok araştırma ve geliştirme yapılmıştır. Bu kapsamda gerek kullanım alanı gerek maliyete göre birçok çeşidi bulunmaktadır. Çizelge 2.1’de fotovoltaik hücre tiplerine ait tabloda gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Fotovoltaik hücre çeşitleri

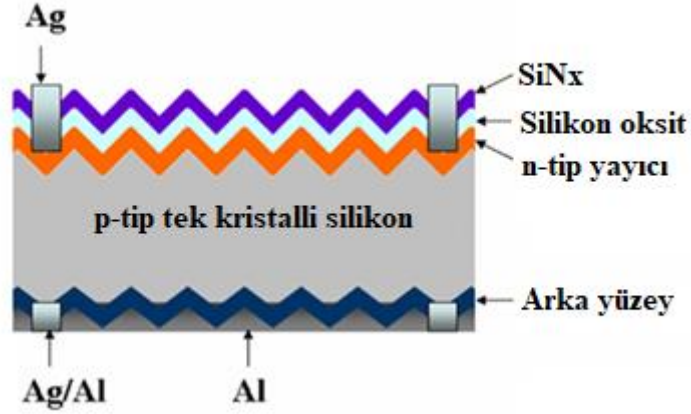
Fotovoltaik Hücreler	Kristal Silikon Hücreler	Tek Kristalli Silikon Fotovoltaik Hücreler
		Çok Kristalli Silikon Fotovoltaik Hücreler
	İnce Film Hücreler	Amorf Silikon (a-Si) Fotovoltaik Hücreler
		Kadmium Telurit (CdTe) Fotovoltaik Hücreler
		Bakır İndiyum Galyum Diselenur (CIGS) Fotovoltaik Hücreler
	Diğer Hücreler	Galyum Arsenit (GaAs) Fotovoltaik Hücreler
		Organik Fotovoltaik Hücreler
		Boyaya Duyarlı Fotovoltaik Hücreler
		Yoğunlaştırıcı Fotovoltaik Hücreler
		Çok Eklemlili Fotovoltaik Hücreler
		PERC Fotovoltaik Hücreleri
		PERL Fotovoltaik Hücreleri
		Çift Yüzlü Fotovoltaik Hücreler

2.1.1 Kristal Silikon Hücreler

2.1.1.1 Tek Kristalli Silikon Fotovoltaik Hücreler

Birinci nesil fotovoltaik hücre teknolojilerinin üretimi silikon malzemeye dayanmaktadır. Silikon, güneş enerjisinden yararlanmak için en uygun 1,1 eV bant aralığına sahip ve dünyada bol miktarda bulunan malzemelerden biridir (Sundaram, Benson ve Mallick, 2016).

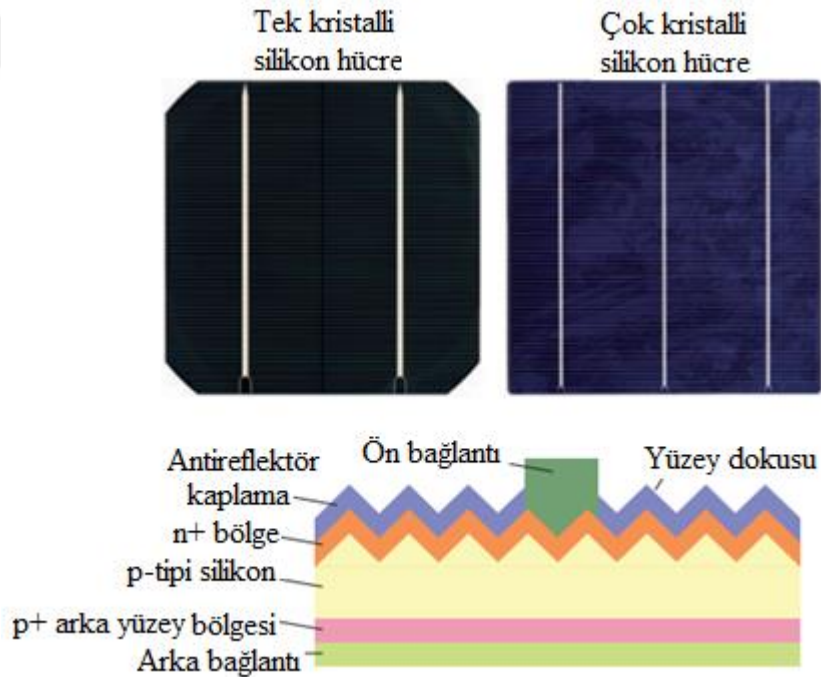
Tek kristalli hücrelerin üretiminde ilk olarak kristalin silisyum külçe üretilir. Bu külçesi daha sonra boyutu 0,3 mm'den küçük levhalar halinde boyutlandırılır. Silikon ile birleştirilen bu levhalar tam aydınlatma koşulları altında 0,55 V, 35 mA akım üretebilen genel fotovoltaik hücrenin yapısını oluşturur (Kumar ve diğerleri, 2020). Bu hücreler genellikle piramit yapısına benzeyen özel dokulu bir yüzeye sahiptir. Modül üretilirken bu hücreler iletken kontaklarla seri ve paralel konfigürasyonlarda düzenlenir (Parida, Iniyani ve Goic, 2011). Şekil 2.2' de tek kristalli silikon fotovoltaik hücre yapısı görülmektedir.



Şekil 2.2. Tek kristalli silikon fotovoltaik hücre yapısı (C. P. Liu, Chang ve Chuang, 2014)

2.1.1.2 Çok Kristalli Silikon Fotovoltaik Hücreler

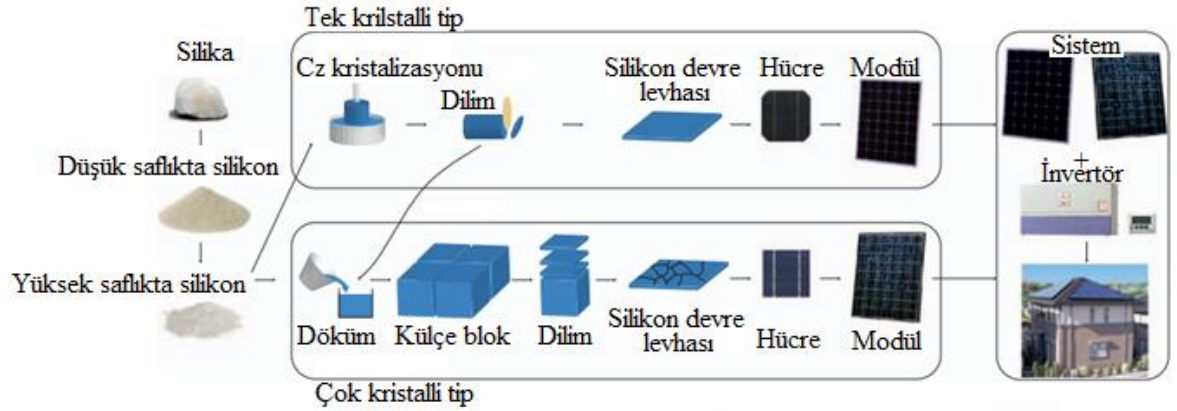
Yapısal olarak birbirine benzeyen tek kristalli ve çok kristalli fotovoltaik hücrelerin en önemli farkı kullanılan silikondur. Tek kristalli fotovoltaik hücrelerde silikon tek parça ve homojen olarak kullanılmaktadır. Şekil 2.3'te görüldüğü gibi çok kristalli fotovoltaik hücrelerde ise silikon parçacıkları yüzeye yayılmış heterojen bir görüntü sunmaktadır.



Şekil 2.3. Tek kristalli ve çok kristalli fotovoltaik hücre görünüşü (Saga, 2010)

Diğer farklar ise imalat yöntemleridir. Tek kristalli fotovoltaik hücrelerde silikon silindirik şeklinde bloklar haline getirilip ardından levha formlarına dönüştürülürken, çok kristalli

fotovoltaik hücrelerde bulunan silikon ilk olarak sıvı formda dökülür ve ardından bloklar haline getirilerek levha formuna dönüştürülür (Şekil 2.4).

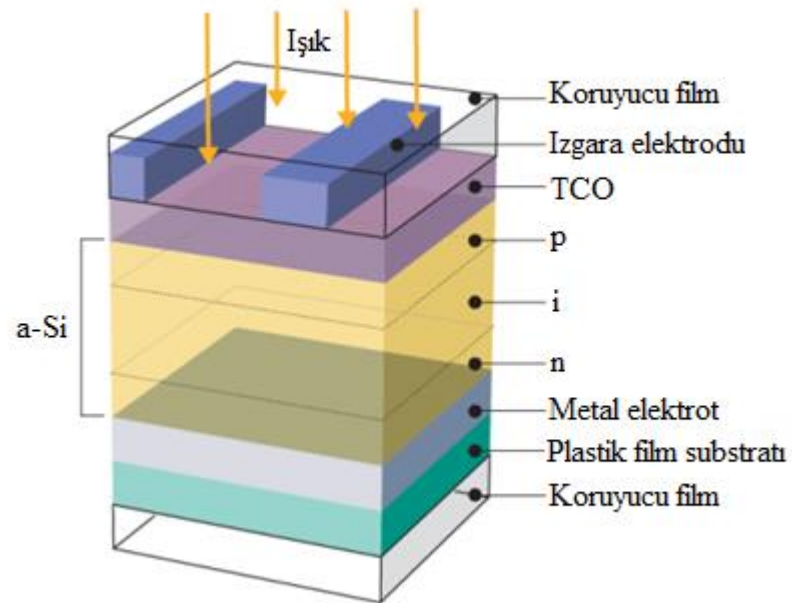


Şekil 2.4. Tek kristalli ve çok kristalli fotovoltaik hücrelerin imalat süreçleri (Saga, 2010)

2.1.2 İnce Film Hücreler

2.1.2.1 Amorf Silikon (a-Si) Fotovoltaik Hücreler

Amorf silikon (a-Si), silikonun kristal olmayan formudur. Şekil 2.5'te amorf silikon fotovoltaik hücrenin yapısı verilmiştir. Amorf silikon fotovoltaik hücreler, cam veya metal gibi bir alt tabaka malzemesi üzerine ince bir silikon malzeme tabakasının (yaklaşık 1 mikrometre kalınlığında) buharla biriktirilmesiyle oluşturulur (Bagher, Vahid ve Mohsen, 2015).



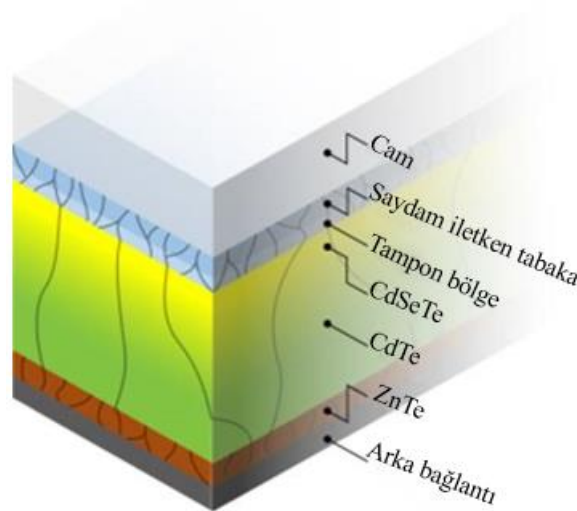
Şekil 2.5. Amorf silikon fotovoltaik hücrenin yapısı (L. M. Fraas, 2014)

Amorf silikon fotovoltaik hücreler hesap makinesi, saat, vb. gibi düşük güç ihtiyacı olan cihazlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Amorf hücrelerin verimleri kristal silikon hücrelerden daha düşük olmasına rağmen daha az enerji ve düşük maliyetle üretilmektedirler (Kaplan, 2005). Aynı zamanda kristal silikon fotovoltaik hücrelere karşı en büyük avantajı geniş yüzeylerde ve ince tabaka halinde üretilbilmesidir. En temel enerji kaynağımız olan güneşten daha çok fayda sağlayabilmek için geniş yüzeylere ihtiyaç vardır. Bu kapsamda amorf silikon fotovoltaik hücreler gelecekte büyük önem kazanacağı düşünülmektedir.

2.1.2.2 Kadmium Telurit (CdTe) Fotovoltaik Hücreler

Bu fotovoltaik hücreler Şekil 2.6'da gösterildiği gibi yarı iletken ana katmanda kadmiyum tellür malzemesinden oluşmaktadır (V. Fthenakis ve Kim, 2010). Kadmiyum tellür fotovoltaik güneş hücreleri, silikon fotovoltaik hücrelere göre daha az maliyetli olan ince film teknolojisidir. Kadmiyum tellür fotovoltaik hücreler yüksek soğurma katsayısı ve daha geniş bant aralığı gibi avantajları nedeniyle endüstriyel ve araştırma amaçlı olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır (Ahmad, Naqvi ve Jaffri, 2021). Yaşam döngüsü bazında bu fotovoltaik hücreler, güneş enerjisi teknolojileri arasında en düşük karbon ayak izine, en düşük su kullanımına ve en kısa enerji geri ödeme süresine sahiptir (Wild-Scholten, 2013).

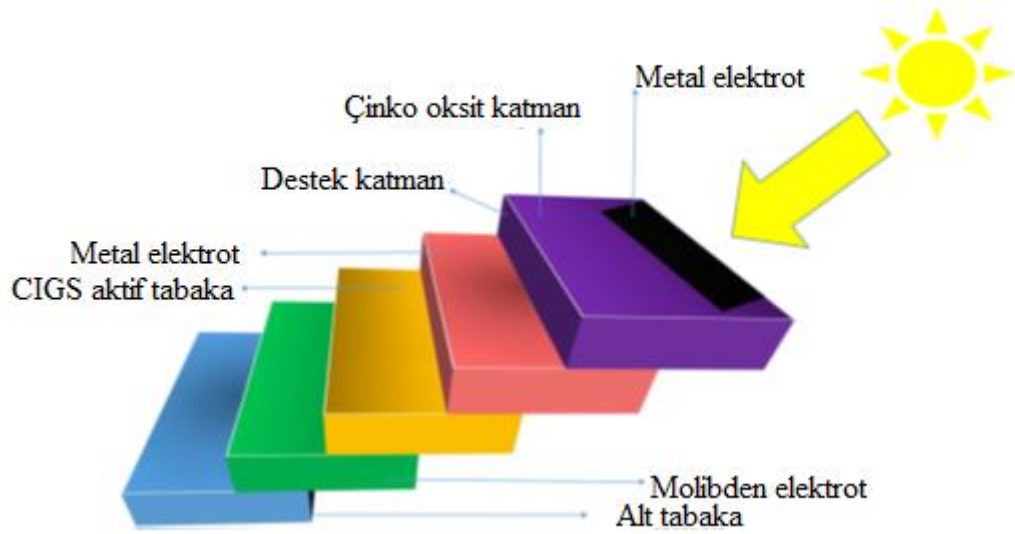
Kadmiyum toksit etkisi yüksek olan bir elementtir. Ancak kadmiyum tellürün toksit etkisi daha düşük olduğu bilinmektedir. Bu durum kadmiyum tellür fotovoltaik hücrelerin kullanım ömrü sonunda geri dönüştürülmesi çevresel sorun olarak düşünülebilir (Fthenakis, 2004).



Şekil 2.6. Kadmium telurit (CdTe) fotovoltaik hücre (Metzger ve diğerleri, 2019)

2.1.2.3 Bakır İndiyum Galyum Selenür (CIGS) Fotovoltaik Hücreler

CIGS fotovoltaik hücreler bakır, indiyum, galyum ve selenitten oluşan güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürmek için kullanılan ince film katmanlı hücrelerdir (Chu ve Chu, 1993). İnce birkaç tabakanın biriktirilmesiyle üretilirler (Şekil 2.7) (Bagher ve diğerleri, 2015). Bu hücreler yüksek emme katsayısına sahiptir. Bu nedenle güneş ışığını güçlü bir şekilde absorbe etmek için ön ve arka yüzeyine birer elektrot konumlandırılır (Bronzoni ve diğerleri, 2018). CIGS hücre verimliliği ve stabilitesi kristal silisyum fotovoltaik hücreler ile karşılaştırılabilir düzeydedir (Ramanujam ve diğerleri, 2020). CIGS fotovoltaik hücreler düşük sıcaklık kullanıldığında %20,8'lik bir verimlilik gözlemlenmiştir (Carron ve diğerleri, 2019). Son zamanlarda CIGS tipi güneş pillerinin uzayda kullanımı araştırılmış ve bu tür hücrelerin uzay uygulamaları için büyük bir potansiyele sahip olduğu bulunmuştur (Dabbabi, Ben Nasr ve Turki Kamoun, 2019).



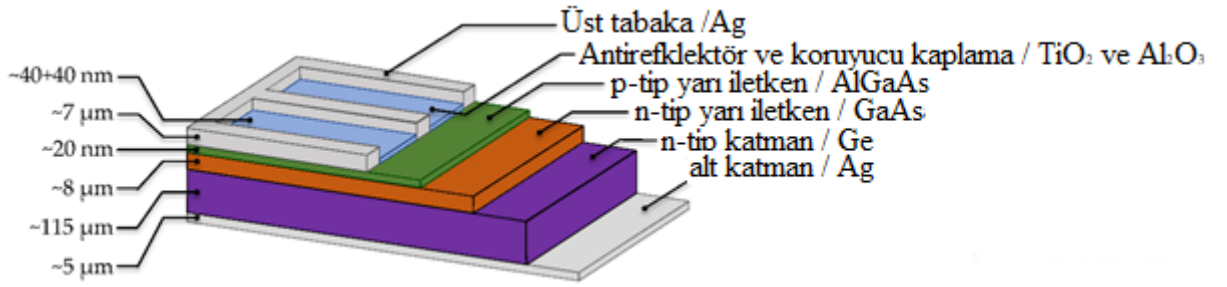
Şekil 2.7. CIGS fotovoltaik hücre (Ahmad ve diğerleri, 2021)

2.1.3 Diğer Hücreler

2.1.3.1 Galyum Arsenit Fotovoltaik Hücreler

Galyum arsenit (GaAs) fotovoltaik hücreler galyum ve arsenik gibi iki temel elementten oluşmaktadır (Şekil 2.8). Birleştirildiklerinde yüksek elektron hareketliliğine sahip bir yarı iletken haline gelmektedir (Moss ve Ledwith, 1987). Günümüzde silikon bazlı fotovoltaik hücrelerin yerini galyum arsenit fotovoltaik hücreler almaya başlamıştır. GaAs hücreler 1,42

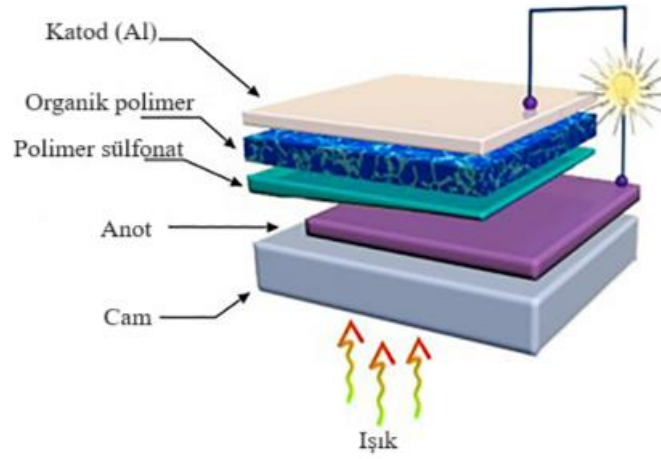
eV bant genişliğine, silikon hücrelerden daha yüksek emme katsayısına sahiptir (Suhandi, Tayubi ve Samsudin, 2020). GaAs fotovoltaiik hücreler diğer hücrelere kıyasla zorlu koşullara karşı dayanıklılıkları daha yüksektir (Papež, Dallaev, Tălu ve Kaštyl, 2021). Yüksek ışınlm altında galyum arsenit fotovoltaiik hücrelerin silikon hücelere kıyasla %30 gibi daha yüksek verim sağladıkları gözlenmiştir (M. A. Green ve diğerleri, 2019). Ancak bu hücreler silikon hücelerden daha nadir ve maliyetli olduğundan galyum ve arsenit elementleri daha az miktarlarda kullanılmaktadır (Eyderman ve John, 2016).



Şekil 2.8. GaAs fotovoltaiik hücre (Papež, Dallaev, Kaspar, ve diğerleri, 2021)

2.1.3.2 Organik Fotovoltaiik Hücreler

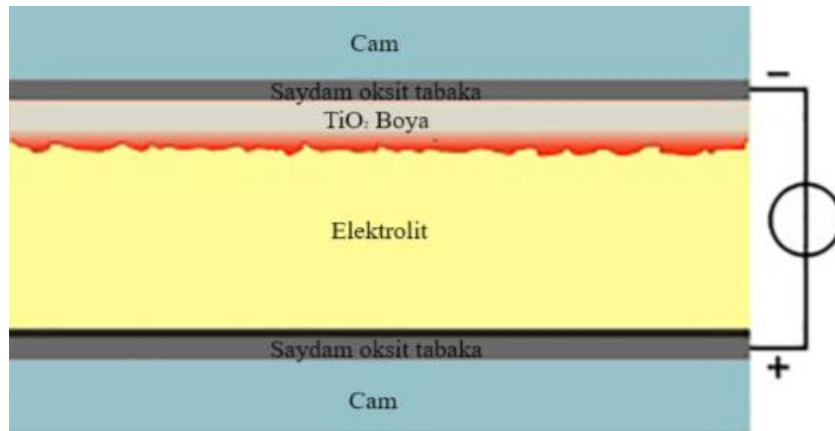
Organik fotovoltaiik hücreler literatürde polimer fotovoltaiik hücreler şeklinde de ifade edilmektedir. Üretim aşamalarında kullanılan yarı iletken madde nedeniyle silikon fotovoltaiik hücelerden farklılık göstermektedirler (T. Kim ve diğerleri, 2020). Organik fotovoltaiik hücelere ince tabakalar halinde uygulanan karbon bazlı bileşiklerden oluşmaktadırlar. Organik ve silikon fotovoltaiik hücelere arasındaki en büyük fark budur (Hoppe ve Sariciftci, 2004). Organik fotovoltaiik panellerin performansı büyük ölçüde aktif katmanların yapısına bağlıdır (Ahmad ve diğerleri, 2021). Fakat bu organik hücelere verimi silikon fotovoltaiik hücelere veriminden nispeten düşüktür. Bu durumun temel nedeni organik yarı iletkenlerin yük taşıma kapasitesi ve hızının düşük olmasıdır (Mandoc, Koster ve Blom, 2007). Şekil 2.9’da organik fotovoltaiik hücrenin yapısı görülmektedir.



Şekil 2.9. Organik fotovoltaiik hücrenin yapısı (Jayaseelan ve diğerleri, 2022)

2.1.3.3 Boya Tabanlı Fotovoltaiik Hücreler

Boyaya duyarlı fotovoltaiik hücrelerince film sınıfına ait ışığı soğuran boya ile kaplanmış hücrelerdir. Kullanılan boya güneşten gelen ışığı absorbe edebilen titanyum dioksit barındırmaktadır. Geleneksel silikon fotovoltaiik hücreler ile karşılaştırıldığında ucuz malzeme ve düşük üretim maaliyetleri önemli bir avantajdır. Bu hücreler yaygın olarak rulo baskı yöntemi ile üretilir (Rehman, Aslam ve Khan, 2014). Boyaya duyarlı fotovoltaiik hücreler (DSSC) titanyum oksit gibi çevreye zararsız ve bol miktarda bulunabilen malzemelerden üretilir. Bu malzemelerin kirlenme eğilimi düşük ve ortam sıcaklığında işlenebilir olması da önemli bir avantajdır (Gong, Sumathy, Qiao ve Zhou, 2017). Boyaya duyarlı fotovoltaiik hücreler iki şeffaf iletken olan oksit cam arasına sıkıştırılmış yarı iletken anot katmanı, boya duyarlaştırıcı ve elektrolitin bir araya getirilmesi ile oluşturulur (Şekil 2.10) (Jamalullail, Smohamad, Nnorizan ve Mahmed, 2018).



Şekil 2.10. Boyaya duyarlı fotovoltaiik hücre yapısı (Jayaseelan ve diğerleri, 2022)

2.1.3.4 Yoğunlaştırıcı Fotovoltaik Hücreler

Yoğunlaştırıcı fotovoltaik hücre (CPV) teknolojisinin temel amacı, maksimum miktarda güneş ışığını küçük bir yüzeye odaklamaktır (Pérez-Higueras, Ferrer-Rodríguez, Almonacid ve Fernández, 2018). Geleneksel fotovoltaik sistemlerin aksine, güneş ışığını fotovoltaik hücrelere odaklamak için Şekil 2.11’de gösterildiği gibi lensler ve kavisli aynalar kullanır (Fernández, Ferrer-Rodríguez, Almonacid ve Pérez-Higueras, 2017). Yoğunlaştırıcı fotovoltaik hücre sistemi, geleneksel fotovoltaik teknolojisiyle benzer çalışma yapısına sahiptir. Yoğunlaştırıcı fotovoltaik hücreler düşük yoğunluklu (LCPV) ve yüksek yoğunluklu (HCPV) gibi farklı tasarımlarda kullanılabilmektedirler (Bagher ve diğerleri, 2015). Yoğunlaştırıcı fotovoltaik (CPV), güneş enerjisinin maliyetini azaltmak ve büyük ölçekli uygulama için en umut verici araştırma yollarından biri olarak değerlendirilmektedir (Talavera, Ferrer-Rodríguez, Pérez-Higueras, Terrados ve Fernández, 2016).



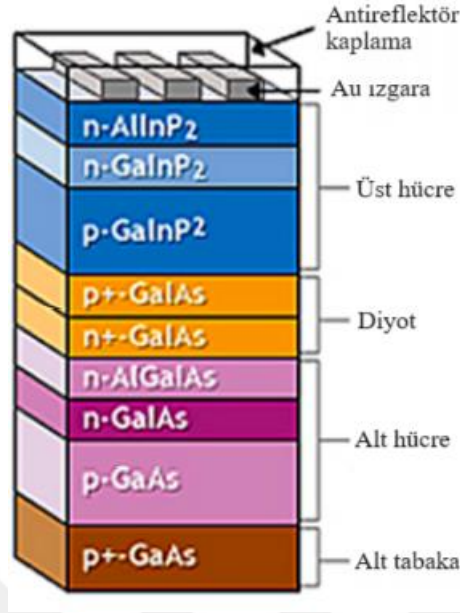
Şekil 2.11. Yoğunlaştırıcı fotovoltaik hücreler (Bagher ve diğerleri, 2015)

2.1.3.5 Çok Eklemlili Fotovoltaik Hücreler

Çok eklemlili fotovoltaik hücreler literatürde diğer bir ifade ile tandem fotovoltaik hücreler olarak bilinmektedir. Bu hücreler farklı yarı iletken malzemelere ve çoklu p-n bağlantılara sahiptir. Farklı p-n bağlantılara sahip levhalar farklı ışık dalga boylarını yakalayarak verimliliğinin artmasını sağlamaktır (Bagher ve diğerleri, 2015).

Tandem fotovoltaik hücreler daha çok yoğunlaştırıcı fotovoltaik hücrelerde kullanılmaktadır. Böylece hücre maliyeti azalırken verimliliğinin artması sağlanmaktadır (Swanson, 2000). Çok bağlantılı fotovoltaik hücrelerin, 1000 W/m^2 değerinde ışınlam miktarında yaklaşık %40'lık verimlilikleri yoğunlaştırılmış fotovoltaik hücrelerde

kullanılmasının uygun olduğu kanıtlanmıştır (Guter ve diğerleri, 2009). Şekil 2.12’de çok eklemlı fotovoltaik hücre yapısı görölmektedir.

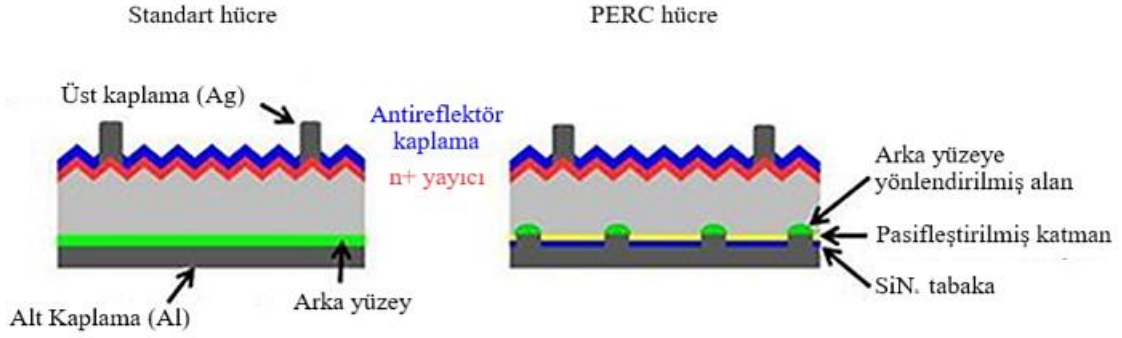


Şekil 2.12. Çok eklemlı fotovoltaik hücre yapısı (Bagher ve diğerleri, 2015)

2.1.3.6 PERC Fotovoltaik Hücreleri

Pasifleştirilmiş yayıcı ve arka hücre (PERC) olarak adlandırılan bu fotovoltaik hücrelerin yapısı klasik silikon fotovoltaik hücreler ile benzerdir. Aralarındaki fark silikon hücrelerin arka yüzeyine eklenen bir yansıtıcı katman sayesinde arka yüzeye gelen güneş fotonlarını n-tipi ve p-tipi bağlantı noktalarına geri göndererek daha fazla enerji üretilmesini amaçlamaktadır (L. Fraas ve Partain, 2010).

PERC modülünün dış ortam performansı hava sıcaklığı, nem miktarı, ışıınım gibi çevresel parametrelerden etkilendiği gözlenmiştir (Cañete, Carretero ve Sidrach-de-Cardona, 2014). Pelaez ve diğerleri (2019) çift yüzölü PERC fotovoltaik modüllerin laboratuvar test sonuçlarının gerçek sonuçlardan farklı olabileceğini öne sürmüştür. Şekil 2.13’te silikon fotovoltaik hücre ile pasifleştirilmiş yayıcı ve arka hücrenin tasarımı verilmiştir.

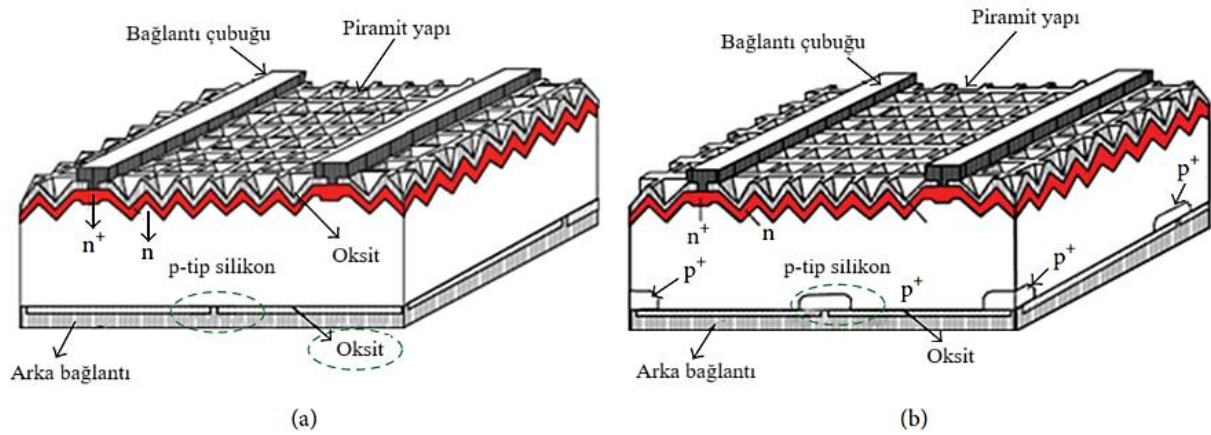


Şekil 2.13. (a) Silikon fotovoltaik hücre (b) pasifleştirilmiş yayıcı ve arka hücre (DS New Energy, 2019)

2.1.3.7 PERL Fotovoltaik Hücreleri

Pasifleştirilmiş yayıcı ve arka yerel (PERL) hücre, PERC fotovoltaik sisteminin geliştirilmesiyle ortaya çıkmıştır. Her iki yapı birbirine benzer tasarıma sahiptir. Şekil 2.14'te PERC ve PERL tasarımları gösterilmiştir. PERL hücresinin PERC hücresi arasındaki temel farklar şu şekilde belirtilmiştir:

- 1- PERL hücresinin arka yüzeyinde bulunan alüminyum temas noktalarının altına bor yalıtımı uygulanmış ve temas direnci azaltılmış,
- 2- PERL hücresinde ön yüzeyde elektronların serbest hareketinin tıkanmasını önlemek için farklı bir bağlantı eklenmiş,
- 3- PERC hücrenin arka yüzeyindeki temas noktaları arasındaki mesafe PERL hücrede 2 mm'den 0,25 mm'ye düşürülmüş ve yan yüzey direnci azaltılmıştır (L. Fraas ve Partain, 2010).

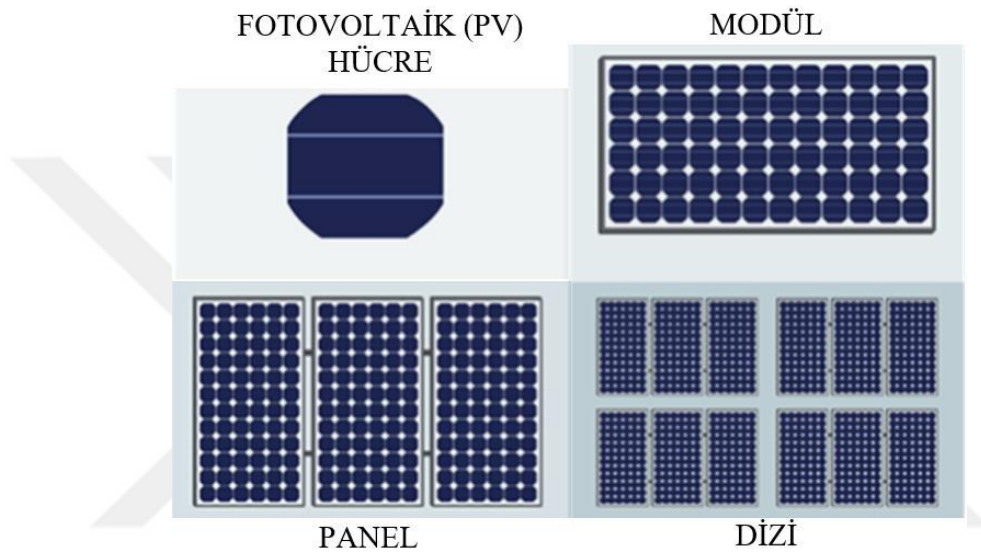


Şekil 2.14. (a) PERC (b) PERL fotovoltaik hücre yapısı (Gangopadhyay, Jana ve Das, 2013)

2.2 Fotovoltaik Sistem Bileşenleri

2.2.1 Güneş Panelleri

Birden fazla fotovoltaik hücrenin seri, paralel veya seri-paralel şekilde bir araya gelmesi ile modüller, birden fazla modülün bir araya gelmesi ile paneller ve birden fazla panelin bir araya gelmesi ile fotovoltaik diziler oluşmaktadır (Şekil 2.15).



Şekil 2.15. Fotovoltaik dizi bileşenleri (Djalab, Bessous, Rezaoui ve Merzouk, 2018)

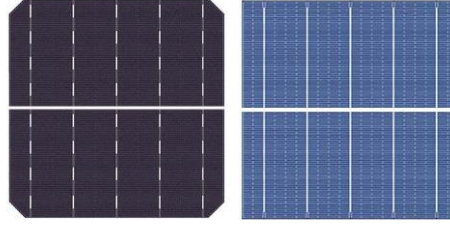
Fotovoltaik paneller yapı itibarı ile tek kristalli, çok kristalli, esnek, yarım kesim, hibrit ve çift yüzlü olmak üzere çeşitlendirilmektedir. Tek kristalli ve çok kristalli paneller sektörde oldukça sık kullanılmaktadır (Şekil 2.16).



Şekil 2.16. Tek kristalli ve çok kristalli fotovoltaik panel (Anonim, 2020)

Ancak günümüz teknolojilerinde yarım kesim fotovoltaik panellerin kullanım alanı oldukça artmıştır. Bu panellerin en büyük avantajı yarım kesim olmasından dolayı sıcaklık ve

tozlanmada etkilenecek hücre alanı azaltılmış ve enerji üretim kaybı oldukça düşük seviyelere gelmiştir (Şekil 2.17).



Şekil 2.17. Tek kristalli yarım hücre ve çok kristalli yarım hücre (Anonim, 2019)

Hibrit fotovoltaiik paneller ise hem sıcak su üretimi hem de elektrik enerjisi üretimi sağlamaktadır (Şekil 2.18).



Şekil 2.18. Hibrit Pv-T fotovoltaiik panel (Anonim, 2022)

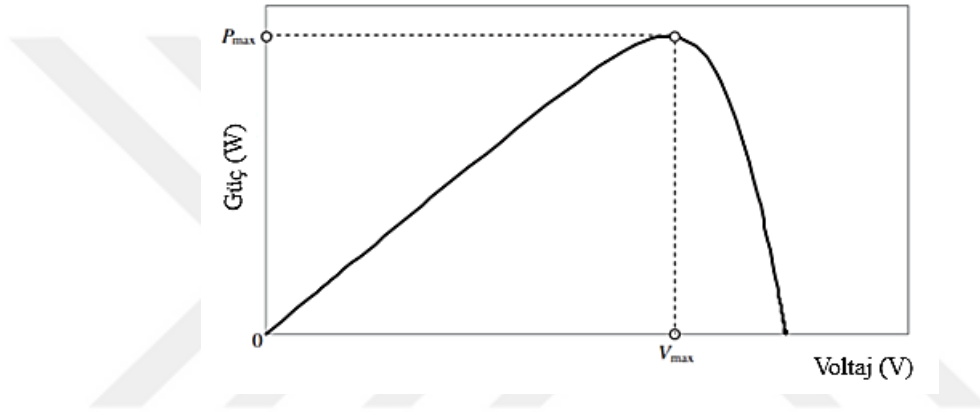
Çift yüzlü güneş panelleri ise klasik panellerin alt yüzeyinde bulunan koruyucu tabaka yerine şeffaf ve yansıtıcı özelliği olan plakalar konumlandırılmış ve böylece arka yüzeyden gelebilecek enerji üretiminin kaybolmasının önüne geçilmiştir (Şekil 2.19).



Şekil 2.19. Çift yüzlü güneş paneli (Durusoy, Ozden ve Akinoglu, 2020)

2.2.2 Maksimum Güç Noktası İzleyicisi (MPPT)

Fotovoltaik hücreler, akım ve gerilim değerlerinin maksimum güç çıkış sağladığı bir çalışma noktasına sahiptir. Bir fotovoltaik hücrede akım ve gerilim arasında ilişki vardır. Şekil 2.20’de gösterildiği gibi güç voltaj eğrisi üzerinde maksimum güç noktası olarak adlandırılan optimum bir çalışma noktası vardır. Maksimum güç noktası izleyicileri bu noktayı aramak için bir tür kontrol devresi kullanır ve hücreden mevcut maksimum gücün çıkmasına olanak sağlar. Maksimum güç noktası izleyicileri bir fotovoltaik sistemden maksimum gücü çekecek şekilde fotovoltaik sistemin çalışma noktasını (akımını ve gerilimini) belirlemektedir (Kalogirou, 2009).



Şekil 2.20. Fotovoltaik hücrelerin güç-gerilim eğrisi (Kalogirou, 2009)

2.2.3 İnvertörler

İnvertörün temelde görevi doğru akımı alternatif akım formuna çevirmektir. Ancak gelişen teknolojiler farklı invertör türlerinin de ortaya çıkmasını sağlamıştır. İnvertörler günümüzde altı çeşide ayrılmıştır. Basit invertörler, merkezi invertörler, dizi invertörleri, güç optimizierli dizi invertörler, mikro (akıllı) invertörler ve hibrit invertörler olarak sınıflandırılmıştır.

Basit invertörler sadece doğru akımı alternatif akıma çevirmektedir. Bu yüzden invertöre ilave olarak şarj regülatörü veya mppt devresi kullanılmalıdır. Merkezi invertörler yüksek kapasiteli şebekeye bağlı sistemlerde kullanılır. Fotovoltaik sistemdeki tüm paneller bir invertöre bağlanır. Maaliyet ve kurulum açısından kullanıma uygundur. Ancak bakımları zordur ve sistemdeki panellerden birinin arızalanması, kirlenmesi ya da üzerine gölge düşmesi bile tüm sistemin enerjisini düşürmektedir. Dizi invertörler daha düşük kapasiteli şebekeye bağlı sistemlerde kullanılır. Bakımları kolaydır. Dizideki herhangi bir panelin dış etkenlerden

etkilenmesi durumunda tüm sistemin üretimi etkilenmektedir. Son olarak bu invertörler çok sayıda olacağı için yeterli alana ihtiyaçları vardır. Dizi invertörler doğru akımı alternatif akıma çevirirken, mppt işlemini de yapmaktadır. Mikro (akıllı) invertörler de şebekeye bağlı sistemlerde kullanılır. Genelde birden fazla girişi olan bu invertörlerin her girişine bir panel gelecek şekilde bağlantı yapılır. Bu mikro invertörlerin çıkışı birbirine paralel bağlanmış olabilir. Genellikle küçük sistemlerde kullanılan bu paneller maliyetli olarak değerlendirilmektedir. Hibrit invertörler hem güneş panellerini hem de aküleri enerji kaynağı olarak kullanabilir. Hatta aynı anda her ikisini de kullanabilmektedirler. Bu invertörler güneş panelleri yetersiz kaldığı durumlarda şebekeden aldığı elektrik ile aküleri şarj edebilmektedir (Shukir, 2022).

2.2.4 Depolama Elemanları

Aküler, fotovoltaik panellerin ürettiği enerjiyi depolar ve ihtiyaç olduğunda kullanılmasını sağlar. Aküler hızlı bir şekilde boşalabilir ve şarj kaynağının kendi başına üretebileceğinden daha fazla akım verebilir, böylece pompalar veya motorlar aküler sayesinde belirli periyotlarda çalıştırılabilir (Meral ve Dinçer, 2011). Aküler bireysel fotovoltaik sistemlerde enerji üretiminin yeterli olduğu zamanlarda elektrik enerjisini depolamak için kullanılır (Rathore, Panwar, Yettou ve Gama, 2021).

Fotovoltaik sistemlerde akülerin temel işlevleri şunlardır (Pradhan, Ali ve Behera, 2012);

a) Enerji depolama: Fotovoltaik sistemin ürettiği elektrik enerjisini depolar ve bu enerjiyi gerektiğinde iletir.

b) Gerilimi dengeleme: Fotovoltaik sistemlerde gerili dalgalanmalarını bastırır ve elektrik enerjisini kullanan cihazların bu dalgalanmalardan zarar görmesini engeller.

Akü imalatında farklı kimyasallar birleştirilebilir. Bazı birleşimler düşük maliyetli ancak düşük güce sahip olabilirken bazıları ise büyük maliyet ve büyük güç depolayabilir. Günümüzde mevcut olan ana akü türleri arasında kurşun-asit, nikel kadmiyum, nikel hidrit ve lityum bulunmaktadır (Anonim, 2010).

2.3 Fotovoltaik Sistemler

Fotovoltaik sistemler kullanım yeri ve türüne göre farklı şekillerde tasarlanmaktadır. Elektrik üretimi, tarımsal sulama, sıcak su, konut aydınlatmaları gibi birçok kullanım alanı bulunmaktadır. Elektrik üretiminde ise üç ana gruptan oluşmaktadır. Bunlar şebekeye bağlı sistemler, şebekeden bağımsız sistemler ve karma sistemlerdir.

2.3.1 Şebekeye Bağlı Fotovoltaik Sistemler

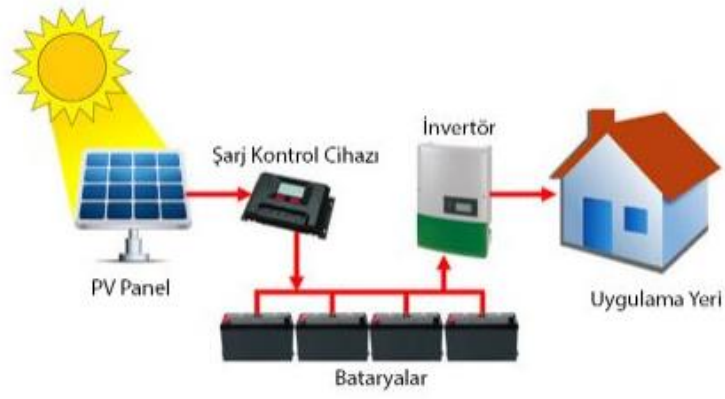
Bu sistem türü literatürde On-Grid sistemler olarak sıkça karşımıza çıkmaktadır. Şekil 2.21’de görüldüğü gibi bu sistemlerde güneş panellerinden üretilen güç bir invertör yardımıyla şebekeye gönderilmektedir. Fotovoltaik sistemin ürettiği güç evin yükünün ihtiyacından fazla ise yapılan anlaşmalara göre elektrik dağıtım firmalarına (şebekeye) satılabilmektedir. Fotovoltaik sistemin ürettiği güç evin yükünden daha az ise, ihtiyaç duyulan güç şebekeden çekilmektedir. Bu sistemin en büyük avantajı enerjiyi depolamaya ihtiyaç duymamasıdır. Dezavantajı ise şebeke olmadığında kendini kapatabilmesidir.



Şekil 2.21. Şebekeye bağlı fotovoltaik sistem yapısı (Aden solar, 2021)

2.3.2 Şebekeden Bağımsız Fotovoltaik Sistemler

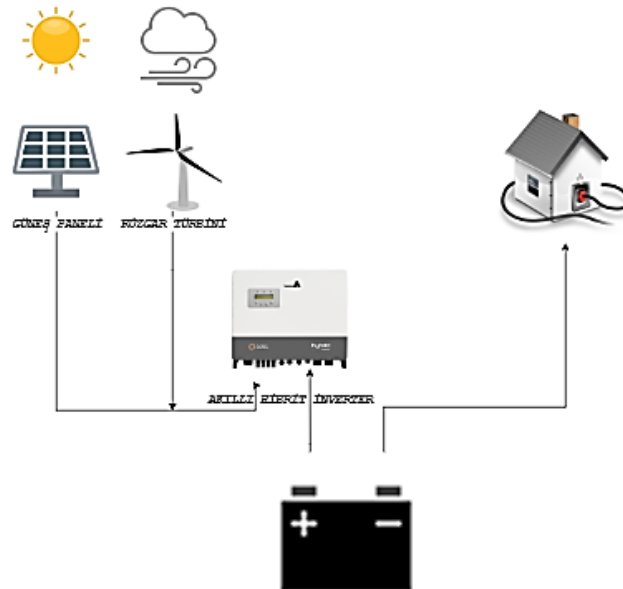
Bu fotovoltaik sistem türleri Off-Grid olarak karşımıza çıkabilmektedir. Bu tür sistemlerin herhangi bir şebekeye ihtiyacı yoktur. Güneş panellerinin ürettiği enerji akü ya da pillerde depolanarak güneşin olmadığı zamanlarda ya da gölgelenmenin maksimum olduğu anlarda da kullanılabilir. Şekil 2.22’de şebekeden bağımsız fotovoltaik sistem yapısı görülmektedir.



Şekil 2.22. Şebekeden bağımsız fotovoltaik sistem yapısı (S. Green, 2021)

2.3.3 Karma Fotovoltaik Sistemler

İki farklı sistemin bir araya getirilerek oluşturulan bu sistemlere karma veya hibrit sistemler denilmektedir. Bu sistemlerde güneş enerjisine ek olarak başka bir fosil ya da yenilenebilir enerji kaynağı kullanılmaktadır. İklim koşulları ve mevcut şartlar uygun olması halinde ilk olarak güneş panelleri aracılığı ile üretilen enerji aküler yardımıyla depolanır ve şartlar uygunsa aynı zamanda kullanılabilir. Eğer iklim şartları uygun değilse diğer enerji üretim sistemi devreye girerek akülerin doldurulmasını sağlar. Bu şekilde kesintisiz bir enerji kaynağı meydana gelmiş olur. Şekil 2.23'te güneş ve rüzgâr destekli karma fotovoltaik sistemin yapısı görülmektedir.



Şekil 2.23. Karma fotovoltaik sistem yapısı (Turgut, 2020)

2.4 Fotovoltaik Sistemlerin Performansına Etki Eden Faktörler

Fotovoltaik sistemlerde üretilen güç miktarını çeşitli faktörler etkilemektedir. Çevresel faktörler, fotovoltaik sistem faktörleri, tozlanma vb. gibi faktörler bu alanda incelenecektir.

2.4.1 Çevresel Faktörler

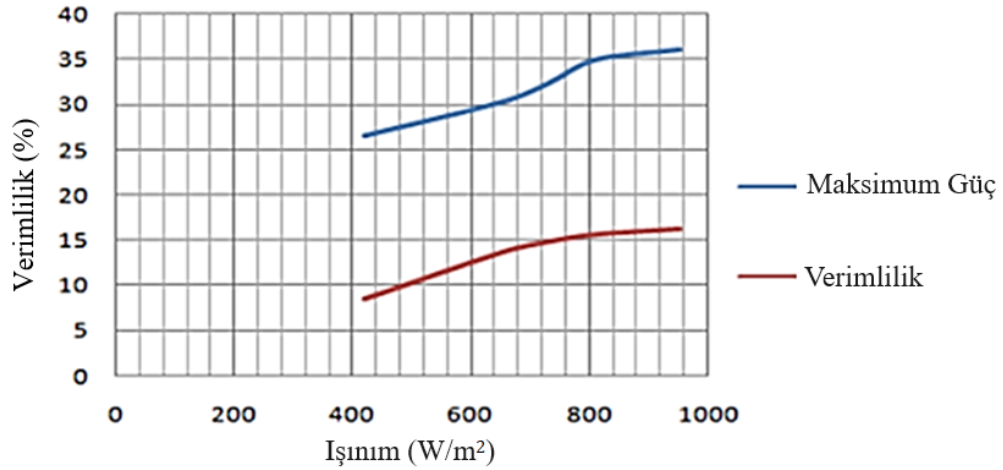
Bu bölümde güneş ışınımı, sıcaklık, gölgelenme ve tozlanma fotovoltaik sistemlerin performansına etki eden çevresel faktörler olarak ele alınmıştır.

2.4.1.1 Güneş Işınımı

Güneşten birim alana gelen güç miktarı ışınım olarak adlandırılmaktadır (Jayakumar ve Un. Escap, 2009). Bir fotovoltaik sistemde üretilen enerji doğrudan güneşten gelen ışınım miktarına bağlıdır ve bu durum lokasyon ile ilgilidir (King, Boyson ve Kratochvil, 2002; Mondol, Yohanis ve Norton, 2007). Işınım miktarı ise hava durumuna yani yağış miktarı, bulutluluk, iklimsel faktörlere göre değişmektedir. Güneşten gelen ışınım ile panel düzlemi arasındaki açı olan azimut açısı güneşin hareketi nedeniyle gün içerisinde değişmektedir (Jayakumar ve Un. Escap, 2009). Güneş ışınımı doğrudan, dağınık ve yansıyan ışınımlardan oluşmaktadır.

Fotovoltaik panellerde ışınım panel konumuna göre değişir. Maksimum güneş ışınımı fotovoltaik panel üzerine dik yönde olduğunda gerçekleşmektedir (Mondol ve diğerleri, 2007). Güneşten gelen ışınım miktarı arttıkça fotovoltaik panelden elde edilecek güç miktarı da artmaktadır (Gardas, Tendolkar, Bhai ve Polytechnic, 2012).

Solar radyasyonun hücre verimliliğine ait görsel Şekil 2.24'te verilmiştir.



Şekil 2.24. Solar radyasyon ve fotovoltaik modülün karşılaştırılması (Pradhan ve Panda, 2017)

2.4.1.2 Fotovoltaik Modül Sıcaklığı

Klasik fotovoltaik hücre üzerine gelen ışıınının %20'den daha az olan kısmını elektrik enerjisine dönüştürürken, geri kalan kısmını ise ısı enerjisine dönüştürür (Fouad, Shihata ve Morgan, 2017). Fotovoltaik modülün sıcaklığının artması güneş radyasyonuna ve ortam sıcaklığına bağlıdır (Abd-Elhady, Fouad ve Khalil, 2016; Moharram, Abd-Elhady, Kandil ve El-Sherif, 2013). Modül sıcaklığı, sistemin enerji üretim miktarını ve verimini büyük ölçüde etkileyen parametrelerden biridir. Fotovoltaik hücrenin voltaj değeri, çalışma sıcaklığındaki her 1°C artışa yaklaşık olarak 2,2 mV azalma göstermektedir ve bu da fotovoltaik kristal hücre için verimliliğinin %0,5 düşmesi anlamına gelmektedir (Meral ve Dinçer, 2011; Tripanagnostopoulos, Bazilian, Zoulia ve Battisti, 2002).

Fotovoltaik kristal hücreler için standart olan sıcaklık azaltma faktörü %89 olarak bilinmektedir. Örneğin 100 W güce sahip bir fotovoltaik kristal hücre, pratik çalışma koşullarında 89 W güç üretebilecektir (Division, Engineering ve Regional Economic Research, 2001).

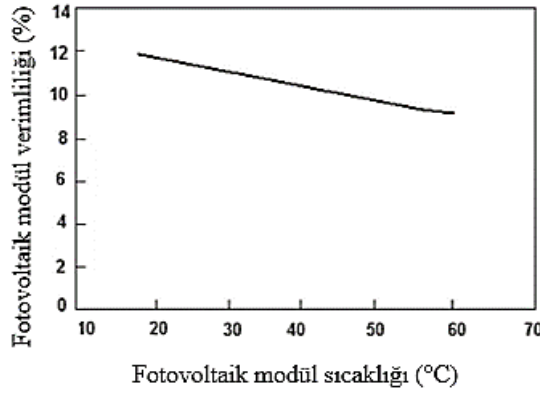
Literatürde fotovoltaik hücre sıcaklığının ortam sıcaklığı, rüzgâr hızı, ışıının miktarı, modülün cam yüzey geçirgenliği ve plakaların yapısı gibi değişkenler tarafından etkilendiği aktarılmaktadır.

Bir fotovoltaik modül tarafından üretilen elektrik gücünün maksimum değeri Denklem 2.1'de verilmiştir (Skoplaki, Boudouvis ve Palyvos, 2008):

$$P_m = V_m \cdot I_m = (FF) \cdot V_{oc} \cdot I_{sc} \quad (2.1)$$

Bu denklemde P_m fotovoltaik modülün ürettiği maksimum gücü, FF doldurma faktörünü, V_m maksimum çalışma noktası gerilimini, I_m maksimum çalışma noktası akımını, V_{oc} açık devre voltajını ve I_{sc} kısa devre gerilimini tanımlamaktadır.

Sıcaklığın modül verimliliği üzerindeki etkisi Şekil 2.25'te gösterilmektedir.



Şekil 2.25. Modül sıcaklığının verim üzerindeki etkisi (Meral ve Dinçer, 2011)

2.4.1.3 Gölgeleme

Bir fotovoltaik panelde tek bir hücre üzerinde oluşan kısmi gölgeleme bile, tüm hücreleri ve dolayısıyla tüm panelin enerji üretimini önemli ölçüde azaltabilir (Vidyanandan, 2017). Fotovoltaik hücrelerde meydana gelen gölgeleme, hücrelerin birbirine seri olarak bağlanmasından dolayı panelin tamamını etkilemektedir. Yapılan bir çalışmada bir güneş panelinin sadece %2'lik alanın gölgelemesi durumunda panelin performans kaybının %70 civarına indiği gözlenmiştir (Quaschnig ve Hanitsch, 1996). Viitanen (2015) yaptığı çalışmada bir fotovoltaik modülün %5-10'luk kısmının gölgelemesi durumunda güç akışının %80 oranında azaldığını belirtmiştir.

2.4.1.4 Tozlanma

Fotovoltaik sistemlerde enerji üretime daha fazla odaklanılmasından dolayı tozlanma etkisi çok fazla araştırılmamıştır. Son yıllarda literatürde oldukça yer edinmeye başlayan tozlanma etkisinin enerji üretimine ciddi anlamda etki ettiği gözlenmiştir. Tozlanma ya da kirlenme nedeniyle güneş ışığının bir kısmı fotovoltaik modüllere gelmeden bloke edilmektedir. Panel üzerine ulaşamayan güneş ışınımından dolayı enerji üretiminde ciddi

miktarda kayıplar ortaya çıkmaktadır. Rahoma, Hassan, HK ve Fathy (2005) havada bulunan toz konsantrasyonun fotovoltaik panellerin performansı üzerindeki etkisini araştırmış ve panel verimliliğinde 1 aylık toza maruz kalmada panel veriminin %33,5, 6 aylık toza maruz kalma süresinin ise %65,8 oranında bir azalma saptamıştır. Zaihidee, Mekhilef, Seyedmahmoudian ve Horan (2016) yaptığı çalışmada panel üzerinde 20 g/m² toz birikimini panel verimliliğini %15-21 oranında düşürdüğünü gözlemlemiştir. Fotovoltaik sistemlerde panel eğim açısının düşük olmasının toz birikiminin tropik bölgelerde diğer bölgelere kıyasla endişe verici olduğu Kern ve Harris (1975) tarafından belirtilmiştir.

2.4.2 Kablo Kayıpları

Fotovoltaik sistemlerde kablolar çevre koşulları, gerilim ve akım koşullarına dayanıklı olmalıdır. Fotovoltaik sistemlerin tasarlanmasında kabloların seçimi önemli bir aşamadır. Seri ya da paralel bağlanan fotovoltaik paneller doğru akım kabloları aracılığı ile invertöre bağlanmaktadır. İletkenin akım taşıma kapasitesi ve gerilim bu seçimde önemli yer etmektedir (Tur, Colak ve Bayindir, 2018). Kablo seçiminde dikkate alınması gereken en önemli faktör iletken tel türüdür. Teller iletim, yalıtım ve esneklik açısından farklılık gösterebilir. Fotovoltaik sistemlerde en yaygın kullanılan tel türü bakırdır (Alhmoud, 2023). Fotovoltaik sistem ile akü veya invertöre bağlantı için büyük kabloların kullanılması kayıpları azaltır ancak maliyeti arttırmaktadır (Ross, 2005). Fotovoltaik sistemlerde kablolardan kaynaklanan kayıplar maksimum %3 sınırını geçmemelidir. Korozyon ve aşırı ısınma kablolarda meydana gelen kayıplardan bazılarıdır. Kablolarda meydana gelen güç kayıpları Denklem 2.2 ve Denklem 2.3'te verilmiştir (Narasimhan, 2020).

$$P_{loss}(t) = 2 \cdot I_{DCkablo}^2 \cdot r_{DC} \quad (2.2)$$

$$P_{loss}(t) = 2 \cdot \left(\frac{P_{DCkablo}(t)}{V_{DC}} \right)^2 \cdot r_{DC} \quad (2.3)$$

Burada P_{loss} kabloda oluşan güç kaybı (W), $I_{DCkablo}$ dc kablo akımı (A), r_{DC} kablunun dc direnci (Ω) ve V_{DC} kablo uçları arasındaki gerilimdir (V).

2.4.3 İnvörtör Kayıpları

İnvörtörler, fotovoltaiik sistemlerde üretilen doğru akımı alternatif akıma çeviren cihazlardır. Fotovoltaiik sistemlerde kullanılan klasik invörtörlerde giriş DC gerilimi değıştiğinde verim %0,3- %1 aralığında azalma gösterebilmektedir. Ayrıca düşük radyasyon ya da yüksek voltaj girişlerinde kullandıkları güç tüketimi ve anahtarlanma kayıpları nedeniyle verim %5 civarında düşmektedir (Geisler, 2010). İnvörtörler şebekeye bağılı veya bağımsız, tek fazlı veya üç fazlı olarak sınıflandırılır. Günümüzde en sık kullanılan invörtör türü ise şebeke desteğine sahip akıllı invörtörlerdir (Mahmoud ve diğlerleri, 2023).

2.4.4 Batarya Kayıpları

Depolama elemanları, fotovoltaiik sistemlerde kullanıldığında yüksek sıcaklığa maruz kalmadığı ve hava akışının uygun olduğı alanlara yerleştirilmelidir (Garcia, Gago, Bayo ve Montes, 2007). Akülerde verimlilik, mevcut kapasitenin nominal kapasiteye bölünmesiyle elde edilen şarj durumuna ve şarj/deşarj akımına bağılıdır (Kalogirou, 2009). Pilin şarj/deşarj döngülerinin yanı sıra sıcaklık ve diğler parametreler de pilin 3 ile 5 yıl arasında değışen kullanım ömrünü etkileyen önemli faktörlerdir. PV akülerin en büyük dezavantajı, normal araba akülerine kıyasla yüksek maliyetleridir ancak daha uzun ömürlüdürler ve bu da bakım maliyetlerini düşürür (Meral ve Dinçer, 2011).

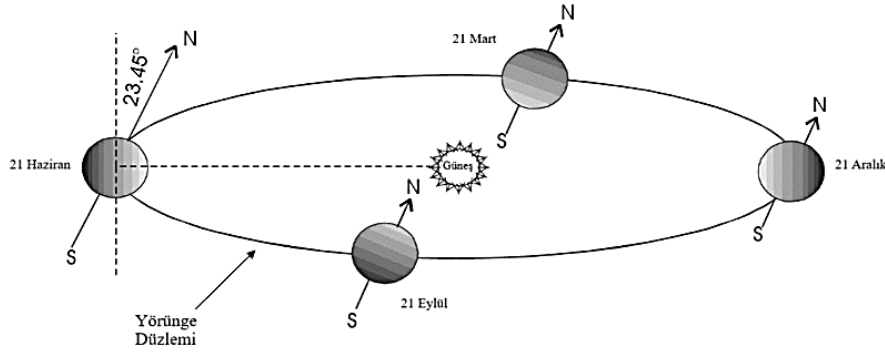
2.5 Solar Geometrik İfadeler

Güneş samanyolu galaksisinde bulunan tüm gezegenlerin temel enerji kaynağıdır. Yüzey sıcaklığının 5500°C olduğı bilinmektedir. Güneşin ürettiğı ısı enerjisi gezegenimize ışınlım ve taşınlım yolu ile geçiş yapabilmektedir. Dış atmosferde metrekaireye düşen güneş ışınlım miktarı 1367 W/m²'dir. Güneşten gelen ışınlr yeryüzüne gelmeden bir kısmı atmosfer ve bulutlar tarafından emilip geri yansıtılmaktadır (Karafil, Ozbay, Kesler ve Parmaksız, 2015).

Güneşin gökyüzündeki konumu, Dünya'nın kendi eksenini etrafında dönüşü, Güneş etrafındaki dönüşü, eksen eğimlerinin yıl boyunca değışimi yıl boyunca farklılık göstermektedir (Gezgin, 2023). Güneşin gökyüzündeki konumunun bilinmesi, yüzeye düşen güneş ışınlım miktarını, güneş ısı kazanımını, fotovoltaiik panellerin doğru konumlandırılması, gölgelenmenin önlenmesi ve birçok faktörü hesaplamak için gereklidir (Kalogirou, 2009). Bu faktörlerin hesaplanabilmesi için gerekli açılar ve matematiksel hesaplamalar başlıklar halinde verilmiştir.

2.5.1 Dünya-Güneş Arasındaki Mesafe

Dünya, güneş etrafında eliptik bir yörüngede hareket etmektedir. Bir tur dönüşünü 365,25 günde tamamlamaktadır (Şekil 2.26). Dünya ile Güneş arasındaki uzaklık şu bağıntıyla bulunur.



Şekil 2.26. Dünyanın Güneş etrafındaki eliptik yörüngesindeki hareketi (Messenger ve Ventre, 2004)

$$d_1 = 1,5 \times \left\{ 1 + 0,017 \cdot \sin \left[\frac{360 \cdot (n_g - 93)}{365} \right] \right\} \quad (2.4)$$

n_g : Gün numarası (1 Ocaktan itibaren kaçınıcı gün olduğu)

2.5.2 Saat Açısı

Saat açısı (h), bulunan lokasyonun boylamı ile güneş ışınlarının geldiği boylam arasında kalan açıdır. Bu açı öğle saatinde sıfır olarak kabul edilir. Saat açısı öğleden önce negatif (-), öğleden sonra pozitif (+) olarak alınır.

Dünya 360°'lik dönüşü 24 saatte tamamladığından $360^\circ/24 = 15^\circ$, 15°'lik boylam 1 saate eşdeğer kabul edilirse (Duffie ve Beckman, 2013);

$$h = (\text{yerel zaman} - 12) \cdot 15^\circ \quad (2.5)$$

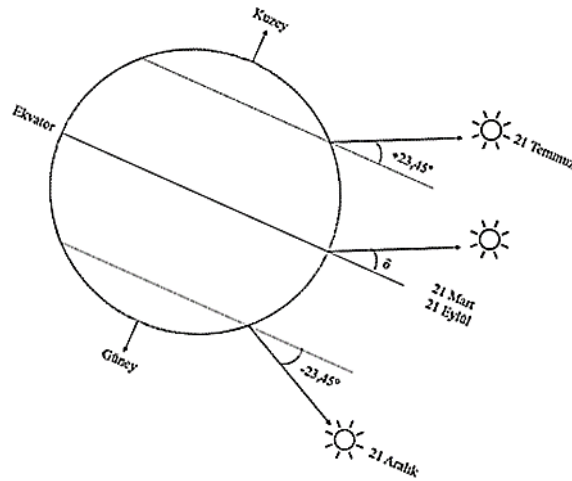
2.5.3 Deklinasyon Açısı

Deklinasyon açısı (δ), ekvator düzlemi ile Güneş'ten yeryüzüne gelen ışınlar arasındaki açıdır. Dünya'nın dönme eksenini her zaman $23,45^\circ$ 'lik açıyla eğimlidir. Bir yıl boyunca kuzey bölge pozitif olmak üzere $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$ arasında değişmektedir (Şekil 2.27).

Deklinasyon açısının hesaplanmasında genellikle Cooper denklemi kullanılmaktadır (Duffie ve Beckman, 2013);

$$\delta = 23,45 \cdot \sin \left(360 \cdot \frac{284 + n}{365} \right) \quad (2.6)$$

Bu eşitlikte n değeri 1 Ocak günü başlangıç kabul edilerek hangi gün olduğunu ifade eder.



Şekil 2.27. Deklinasyon açısının gösterimi

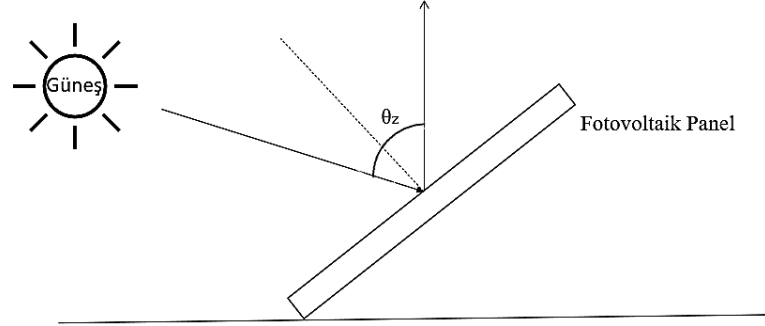
2.5.4 Enlem Açısı

Enlem, kuzey ya da güney yarımkürede bulunan herhangi bir noktanın ekvator çizgisine olan mesafesinin açısal karşılığıdır. Enlem açısı (ϕ), ekvator çizgisinin 0° olarak kabul edildiği -90° ile $+90^\circ$ arasında değer almaktadır.

2.5.5 Zenit Açısı

Zenit açısı (θ_z), bir yüzeyin dik normali ile güneş ışınlarının arasında kalan açıdır. 0° ile 90° arasında değişmektedir. Aynı zamanda güneş yükseklik açısının tümler açısıdır (Şekil

2.28). Zenit açısının fotovoltaik panellerin enerji üretimine direkt olarak etkisi bulunmaktadır (Özkan ve Demir, 2019).



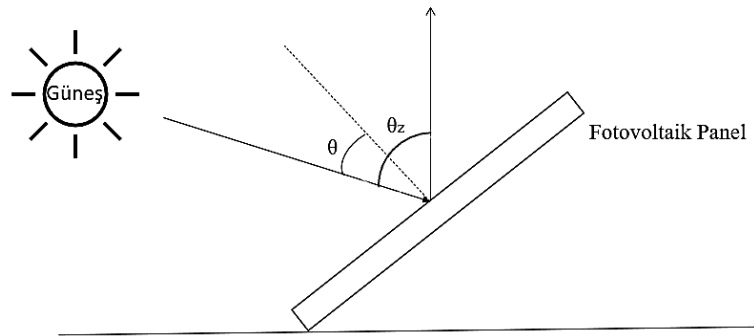
Şekil 2.28. Zenit açısı

2.5.6 Geliş Açısı

Geliş açısı (θ), bir yüzeyin normali ile gelen güneş ışınımı arasındaki açı olarak ifade edilir. Aşağıdaki denklemden geliş açısı hesaplanabilir (Şekil 2.29).

$$\cos\theta = \cos\theta_z \cdot \cos\beta + \sin\theta_z \cdot \sin\beta \cdot \cos(\gamma_s - \gamma) \quad (2.7)$$

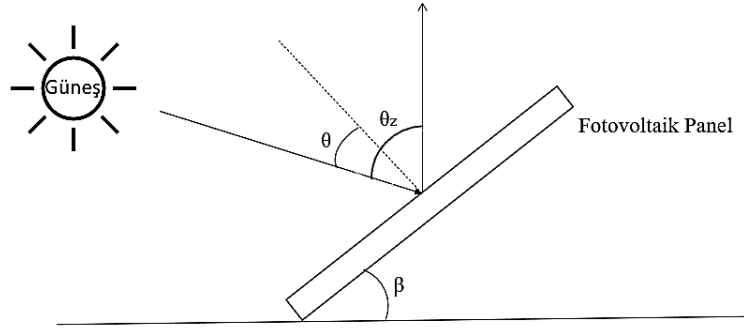
Bu denklemden, panel eğim açısı β , yüzey azimut açısı γ ve Güneş azimut açısı γ_s ile gösterilmektedir.



Şekil 2.29. Geliş açısı

2.5.7 Eğim Açısı

Eğim açısı (β), bir yüzeyin düzlemi ile yatay düzlem arasındaki açı olarak adlandırılır (Şekil 2.30). Eğim açısı 0° ile 180° arasında değişmektedir.

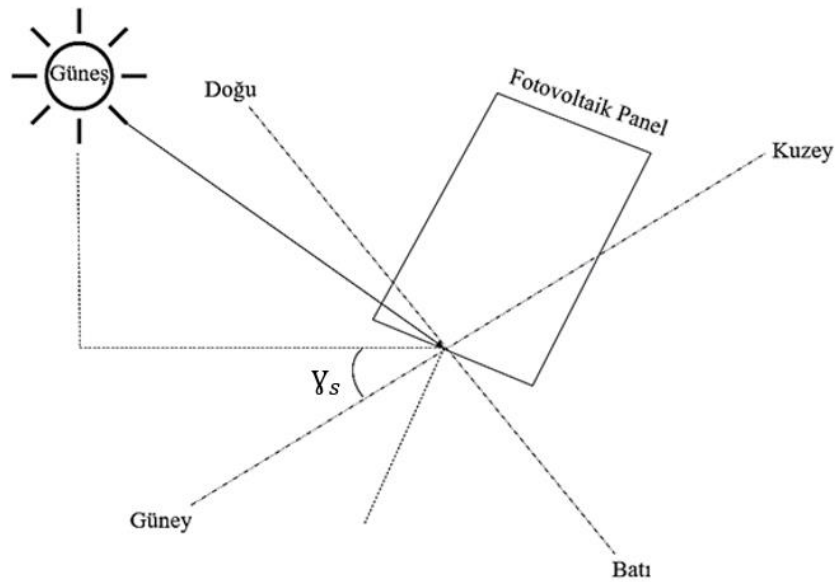


Şekil 2.30. Eğim açısı

2.5.8 Güneş Azimut Açısı

Güneş azimut açısı (γ_s), güneş ışınlarının yatay düzleme iz düşümlerinin kuzey yarım kürede ise güney doğrultusu ile, güney yarım kürede ise kuzey doğrultusu ile yaptığı açıdır (Şekil 2.31). Bu açı güneyden doğuya doğru gidildikçe negatif, batıya doğru gidildikçe pozitif değer alır. Aşağıdaki formülden hesaplanabilir (Karafil ve diğerleri, 2015).

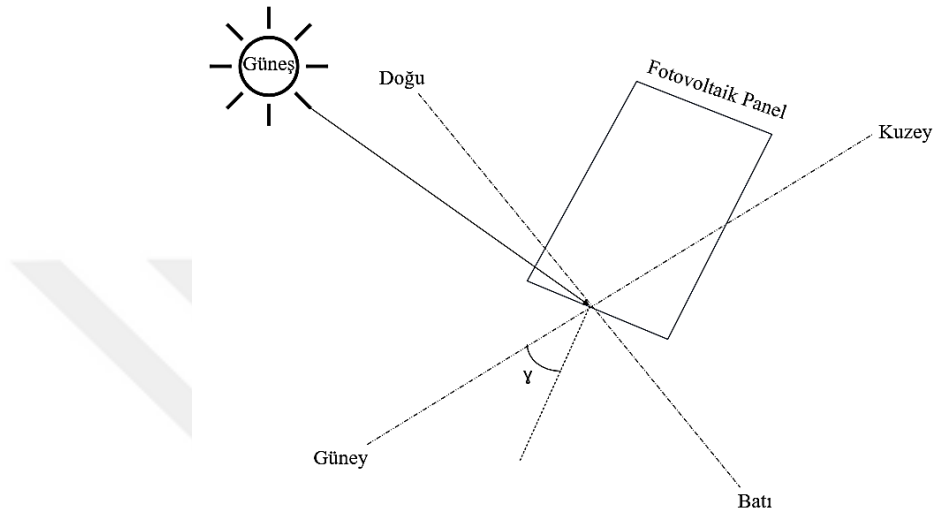
$$\gamma_s = \cos^{-1} \cdot \left[\frac{(\sin(\alpha) \cdot \sin(\delta) - \sin(\theta))}{\cos(\alpha) \cdot \cos(\delta)} \right] \quad (2.8)$$



Şekil 2.31. Güneş azimut açısı

2.5.9 Yüzey Azimut Açısı

Yüzey azimut açısı (γ), yeryüzünde bir yüzeye ait normalin yatayda izdüşümü ile güney yönü arasındaki açı olarak tanımlanır (Şekil 2.32). -180° ile $+180^\circ$ arasında değişir. Normale ait iz düşümünün doğuya gelmesi durumunda pozitif, batıya gelmesi durumunda negatif, güneye gelmesi durumunda ise 0° dir.



Şekil 2.32. Yüzey azimut açısı

2.5.10 Hava Kütlesi

Atmosfere ulaşan güneş ışınımının gücü zayıflamaktadır. Bunun ana nedeni kat ettiği mesafe ve geçtiği ortamlarda bulunma süresine bağlıdır. Güneş radyasyonu hesaplamalarında güneş zirve noktasındayken, deniz seviyesine ulaşmak için kat edilen mesafe olarak tanımlanmaktadır. Hava kütle katsayısı, dünyanın eliptik formu dikkate alınmaksızın zenit açısı (θ_z) ile ilgilidir ve aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır (Kalogirou, 2009)

$$m = \frac{AB}{BC} = \frac{1}{\cos \theta_z} \quad (2.9)$$

Deniz seviyesinde güneş tepe noktasındayken, yani $\theta_z=0$ iken Hava kütle katsayısı $m=1$ 'dir. $\theta_z=60^\circ$ olduğunda ise Hava kütle katsayısı, $m=2$ 'dir.

2.6 Meteorolojik Verilerin Panel Verimine Etkisi

Fotovoltaik panellerin enerji üretiminde meteorolojik şartlar oldukça önemlidir. Güneş ışınlamı, hava sıcaklığı ve nemi, rüzgâr hızı ve yönü fotovoltaik panellerin verimine etki eden başlıca meteorolojik parametrelerdir.

2.6.1 Güneş Işınımı

Güneş ışınlamı bulutluluk ve atmosferdeki nemin bir fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır. Çünkü Dünya atmosferine giren güneş ışınları atmosferik gazlar, aerosoller ve bulutlar tarafından saçılır (Calabrò, 2013). Klasik fotovoltaik sistemlerde güç çıkışı, panelin aktif yüzeyine gelen güneş ışınlamı miktarına bağlıdır. Işınım doğrudan ve dağınık olarak ikiye ayrılır (Garrison, 1985).

Doğrudan gelen ışınlam miktarı büyük ölçüde fotovoltaik panelin Güneş geliş açısına bağlıdır. Dağınık ışınlam ise gökyüzünün açık veya bulutlu olduğu durumların birleştirilmesiyle hesaplanabilir. Eğik bir yüzeye gelen toplam ışınlam doğrudan ve dağınık ışın yoğunluğunun toplanmasıyla hesaplanabilir (Laveyne, Bozalakov, Van Eetvelde ve Vandeveld, 2020).

$$G_t = \frac{(G_h - G_{dh})}{\cos\theta_z} \cdot \cos\theta + G_{dh} \cdot \left[\frac{1 + \cos\beta}{2} \right] \cdot \left[1 + F \cdot \sin^3 \frac{\beta}{2} \right] \cdot [1 + F \cdot \cos^2\theta \cdot \sin^3\theta_z] \quad (2.10)$$

$$F = 1 - \left(\frac{G_{dh}}{G_h} \right)^2 \quad (2.11)$$

Denklemden G_t , toplam Güneş radyasyonu; G_h , doğrudan Güneş radyasyonu, G_{dh} , dağınık Güneş radyasyonu, F değeri kapalı havalarda yayılan ışınlamın modellenmesinde kullanılan bir parametreyi temsil etmektedir. Havanın nem oranının düşük ve açık olması durumunda ise F değeri 0 olmaktadır.

Fotovoltaik panellerde Kratochvil, Boyson ve King (2004) tarafından geliştirilen denklemde güç çıkışı hücre sıcaklığının ve toplam ışınlamının bilinmesiyle hesaplanabilir (Huld, Gottschalg, Beyer ve Topič, 2010).

$$P_{DC}(G_t, T_{mod}) = P_{STC} \frac{G_t}{G_{STC}} \eta_{rel} \cdot (G', T') \cdot \eta_{sys} \quad (2.12)$$

Bu denklemde P_{DC} , fotovoltaik panelin toplam ışınlam (G_t) ve hücre sıcaklığındaki (T_{mod}) güç çıkışıdır. P_{STC} , fotovoltaik panelin standart test koşulları altındaki güç çıkışını, G_{STC} standart test koşullarındaki (1000 W/m^2) toplam ışınlam miktarını temsil etmektedir. η_{rel} , anlık verim, η_{sys} ise sistem verimidir. G', T' , değerleri standart test koşullarındaki Güneş ışınlamı ve hava sıcaklığıdır.

$$G' = \frac{G_t}{G_{STC}} \quad (2.13)$$

$$T' = T_{mod} - T_{mod,STC} \quad (2.14)$$

$$\eta_{rel}(G', T') = 1 + k_1 \cdot \ln G' + k_2 \cdot (\ln G')^2 + T' \cdot (k_3 + k_4 \cdot \ln G' + k_5 \cdot (\ln G')^2) + k_6 \cdot T'^2 \quad (2.15)$$

Denklemde k_1 den k_6 'ya olan katsayılar ampirik olarak belirlenir. Modül sıcaklığı şu şekilde tahmin edilmektedir (Huld ve diğerleri, 2010).

$$T_{mod} = T_{amb} + c_t \cdot G_t \quad (2.16)$$

Ortam sıcaklığı T_{amb} olarak tanımlanmaktadır. c_t , ise fotovoltaik modülün kendiliğinden ısınması olarak tanımlanır ve panelin montaj konumuyla alakalıdır. Çatıya entegre sistemlerde $c_t=0,02^\circ \text{ cm}^2/\text{W}$, bağımsız kurulumlarda ise $c_t=0,056^\circ \text{ cm}^2/\text{W}$ olarak belirlenmiştir (Lorenz, Scheidsteger, Hurka, Heinemann ve Kurz, 2011).

Rüzgâr hızı ve yönü modül sıcaklığı hesaplanmasına dahil edilmemektedir, çünkü model doğruluğunu tespit edemediğinden hesaplamaları karmaşık hale getirdiği kabul edilir (Lorenz ve diğerleri, 2011).

2.6.2 Hava Sıcaklığı

Fotovoltaik güneş panelleri güneş ışınlarının yalnızca çok küçük bir kısmını elektriğe çevrilir, geri kalanını ise ısı enerjisine dönüştürür. Bu ısı enerjisinden dolayı fotovoltaik hücrelerin ve panelin sıcaklığı artar ve elektriksel verimleri düşer (Rahman, Hasanuzzaman ve Abd Rahim, 2017). Fotovoltaik modül sıcaklığı arttıkça hücrelerin bant aralığı azalır ve uzun dalga boylu fotonların emilmesine engel olur. Bu da akım ve voltajın azalmasına yol açar (Meyer ve van Dyk, 2004). Fotovoltaik hücrelerin verimliliği 31°C sıcaklıkta %9,7, 36°C sıcaklıkta ise %12'ye ulaştığını ancak bu sıcaklık değerinin yükselmesiyle verimin düşmeye başladığı gözlenmiştir (Rajput, Sastry ve Tiwari, 2017). Literatürde maksimum fotovoltaik panel verimliliği 25°C ortam sıcaklığında rapor edilmiştir. Ancak Garg ve J.B. (2016) Hindistan'ın batısında maksimum verimliliği 40°C ortam sıcaklığında tespit etmişlerdir.

Fotovoltaik hücreler ve fotovoltaik panel yüzey sıcaklığı ile ilgili birçok çalışma yapılmış birçok farklı bağıntılar verilmiştir.

Arslanoglu, Yigit ve Eker (2020), şu bağıntıyı öne sürmüşlerdir;

$$T_c = T_a + (T_{NOCT} - 20) \cdot \frac{I}{800} \quad (2.17)$$

Burada T_c ; fotovoltaik hücre sıcaklığı (°C), T_a ; çevre sıcaklığı (°C), T_{NOCT} ; fotovoltaik hücrenin normal koşullar altında çalışma sıcaklığıdır ve 45°C olarak kabul edilmiştir. I ; anlık güneş ışıdır (W/m²). Fotovoltaik panel verimi η (%) şu şekilde verilir (Arslanoglu ve diğerleri, 2020);

$$\eta = -0,05 \cdot T_c + 12,757 \quad (2.18)$$

Hücre sıcaklığı için verilen diğer denklem ise;

$$T_c = T_a + \omega \cdot \left(\frac{0,32}{8,91 + 2 \cdot \nu} \right) \cdot I \quad (2.19)$$

şeklindedir. v , rüzgâr hızı olarak tanımlanmaktadır (m/s). ω , arazi üzerindeki kurulum için 1, çatı kurulumu için 1,2, eğimli çatıda 1,8 ve cephe kaplaması durumunda 2,4 olarak alınan bir katsayıdır.

Fotovoltaik hücrelerin oluşturduğu panel yüzey sıcaklığı için Akhsassi ve diğerleri (2018) şu denklemi ifade etmiştir;

$$T_m = T_a + I \cdot e^{(a+bv)} \quad (2.20)$$

Bu denklemde $a=-3,56$, $b=-0,075$ olarak alınmaktadır ve böylece

$$T_m = T_c \cdot \frac{I}{I_0} \cdot \Delta T_0 \quad (2.21)$$

olur. Bu eşitlikte $I_0=1000 \text{ W/m}^2$, $\Delta T_0=3$ olarak alınabilir (Akhsassi ve diğerleri, 2018).

Fotovoltaik modül sıcaklığına bağlı olarak fotovoltaik panel verimi şu şekilde ifade edilebilir (Akhsassi ve diğerleri, 2018);

$$\eta_{pv} = \eta_{STC} \cdot [1 + \beta_{Pmp} \cdot (T_m - T_{ref})] \cdot \left[1 + \gamma_{Pmp} \cdot \ln \frac{I}{I_0}\right] \quad (2.22)$$

Bu denklemde tek kristalli silikon güneş panelleri için standart test koşullarında modül verimliliği $\eta_{STC} = 0,181$, $T_{ref} = 25^\circ\text{C}$, güç sıcaklık katsayısı $\beta_{Pmp} = -0,39$ olarak alınabilir. Boyutsuz bir katsayı olan γ_{Pmp} tek kristalli silikon hücreler için 0,03-0,12 aralığında değişmektedir.

2.6.3 Nem

Düşük bağıl nem miktarında fotovoltaik panellerin verimliliğinde artış gözlenmektedir Gwandu ve Creasey (1995), yüksek nem miktarının güneş ışınım seviyesini etkilediğini, havada asılı bulunan su buharı damlacıklarının güneş ışınlarının kırılmasına veya yansımaya neden olarak panel verimliliğinin azalmasına neden olduğunu belirtmiştir. Nem, sadece güneş ışınlarını engellemekle kalmaz aynı zamanda fotovoltaik hücrelerde korozyona ve renk değişimine etki ederek verimlerinin azalmasına da neden olabilmektedir (Ndiaye ve diğerleri,

2013). Nem aynı zamanda havada bulunan toz parçacıklarının fotovoltaiik panele yapılarak çıkış gücünün azalmasına da sebep olmaktadır (Piliougine ve diğerleri, 2013). Literatürde havadaki nemin fotovoltaiik panel verimine etkileri konusunda çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Katkar, Shinde ve Patil (2011) fotovoltaiik hücrenin %60 nem değerinde verimi %9,7 iken, %48 nem değerinde panel veriminin %12,04'e yükseldiğini belirtmiştir. Ramli ve diğerleri (2016) yağmurlu koşullar altında %76,3 bağıl nemde fotovoltaiik panelin çıkış gücünün %40 oranında azaldığını, bulutlu havada %60,5 nem değerinde ise çıkış gücünde %45 oranında azalma olduğunu belirtmiştir.

2.6.4 Rüzgâr Hızı ve Yönü

Rüzgâr hızı ve yönü fotovoltaiik sistemlerin performansı üzerine olumlu ya da olumsuz etkileri olabilmektedir. Esas olarak rüzgâr hızı ve yönü, fotovoltaiik panel yüzey yapısının ve tozlanmanın bir fonksiyonudur (S. A. M. Said, Hassan, Walwil ve Al-Aqeeli, 2018).

Rüzgâr toz parçacıklarının fotovoltaiik panel yüzeyinden uzaklaştırarak toz birikimini azaltabilir (Assi, 2008). Mısır'da 2 hafta boyunca tozlanmaya maruz bırakılan fotovoltaiik panelin rüzgârın esmesi nedeniyle belirli eğim açılarında panel üzerindeki tozlanma oranında azalma meydana geldiği görülmüştür (Hegazy, 2001). Diğer yandan rüzgâr, toz ve kum parçacıklarını atmosfere aktararak yayarak olumsuz etkide oluşturabilir. Rüzgâr hızının artması daha fazla toz birikmesine neden olabilmektedir (Mekhilef, Saidur ve Kamalisarvestani, 2012)

Rüzgâr fotovoltaiik modülden yayılan konvektif ısı transferini arttırabilir, bunun sonucu olarak panel yüzey sıcaklığı düşer ve verimin korunmasına yardımcı olur (Mazon, Kaiser, Zamora, García-Cascales ve Vera-García, 2011; Tian, Wang, Ren ve Zhu, 2007). Örneğin Suudi Arabistan'da rüzgâr hızının 2,8 m/s'den 5,3 m/s'ye çıkması modül sıcaklığının 10°C azalmasını sağlamıştır (S. Said, Al-Aqeeli ve Walwil, 2015).

Fotovoltaiik panellerde rüzgâr hızı ve yönünün performansa etkilerinin araştırıldığı bir çalışmada, rüzgâr hızı fotovoltaiik hücre sıcaklığının, ortam sıcaklığına göre artmasına son derece duyarlı olduğu, rüzgâr yönünün ise daha az duyarlı olduğu bulunmuştur (Griffith, Rathod ve Paskalski, 1981).

Rüzgâr hızının etkisi, fotovoltaiik panelin tasarımına göre farklılık göstermektedir. 10 m/s rüzgâr hızında yivli cam kapakla üretilmiş modül, düz cam kapağa göre 3,5°C daha soğuk olduğu gösterilmiştir (Doble ve diğerleri, 2010).

2.7 Çift Yüzlü Fotovoltaik Teknolojisi

Fotovoltaik hücreler Dünya’da en hızlı büyüyen yenilenebilir enerji kaynaklarından biri haline gelmiştir. Tek yüzlü fotovoltaik hücrelerin yüzeyine gelen Güneş ışınları ile elektrik enerjisi üretme prensibine dayanmaktadır. Fotovoltaik teknolojilerin verimliliğini ve maliyet etkinliğinin artırılması, ürün maliyetlerinin azaltılması ve devlet destekleriyle gelişen bir süreçtir (Tyagi, Rahim, Rahim ve Selvaraj, 2013).

Standart hücrelerde, yüzeye gelen ve ilk girişte emilemeyen ışınlar, arka yüzeyden yansıtılarak tekrar hücre içerisinden geçer ve emilirler. Çift yüzlü fotovoltaik hücrelerde ise arka yüzeyin olmaması nedeniyle elektronların tekrar geri hareket etme imkânı yoktur. Ancak bu kaybı arka yüzeyden albedo etkisi ve yaygın ışınlar sayesinde avantaja çevirmektedirler.

Çift yüzlü fotovoltaik hücrelerin arka yüzeyleri, ön yüzeyi kadar iyi performans sergilemez. Buna çift yüzlülük faktörü (f_B) adı verilir ve Denklem 2.23 ile ifade edilir (Ismail Shoukry, 2015).

$$f_B = 100 \cdot \frac{\eta_{hücre,arka}}{\eta_{hücre,ön}} \quad (2.23)$$

Bu denklemde fotovoltaik panel arka yüzey verimi (%) $\eta_{hücre,arka}$, ön yüzey verimi (%) ise $\eta_{hücre,ön}$ olarak tanımlanmıştır.

Çift yüzlü fotovoltaik modüller, fotovoltaik panellerin güç çıkışını arttırmak için geliştirilmiştir. Bu modüller hem ön yüzeyinden hem de arka yüzeyinden güneş ışınlarını sönmüleyerek enerji verimini arttırmaktadır (Cuevas, Luque, Eguren ve del Alamo, 1982). Patel ve diğerleri (2019) çift yüzlü ve tek yüzlü fotovoltaik panellerin benzer maliyetlere sahip olduğunu varsayarak, 30° panel eğiminde yüksek enlemlere sahip lokasyonda yaptığı çalışmada enerji üretim maliyetinde yaklaşık %2,6 oranında bir azalma bulmuştur. Fischer, Herritsch, Trube ve Woodhouse (2021) çift yüzlü fotovoltaik teknolojilerinin pazar payının önümüzdeki yıllarda artacağını ve 2031’de %55’in üzerine çıkacağını öngörmektedir.

Yapılan farklı çalışmalara göre çift yüzlü fotovoltaik panellerin arka yüzeyinin simüle edilmesini zorlaştıran çeşitli parametrelerden bahsetmektedir. Radyasyon, albedo (zemin yansıması), panel yüksekliği, panel yönü ve eğim açıları bu parametreler olarak tanımlanmıştır (Sun, Khan, Deline ve Alam, 2018; Stanley Wang ve diğerleri, 2015).

2.7.1 Çift Yüzlü Fotovoltaik Hücrelerin Yapısı

Geleneksel fotovoltaik panellerde arka yüzeyin ışık Emilimini engelleyen alüminyum bir arka yüzey bulunmaktadır. Çift yüzlü fotovoltaik teknolojisinde ön ve arka yüzeylerden enerji üretebilir. Arka yüzeyler cam ya da şeffaf tabaka ile yapılandırıldığından güneş, bulut ve zemin gibi yüzeylerden yansıyan ışığın Emilimine olanak sağlar. Çift yüzlü fotovoltaik modüllerin ticarileştirilmesi ve seri üretimi, farklı kristal silikon hücre yapıları kullanılarak 2010'larda başlamıştır (Liang ve diğerleri, 2019).

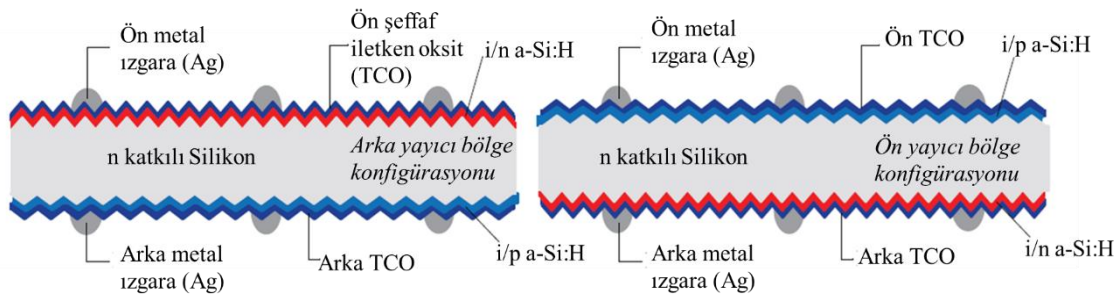
Çift yüzlü fotovoltaik paneller günümüzde yaygın olarak lokal olarak çok eklemli silikon (SHJ), pasifleştirilmiş arka yüzeyli (PERC+), tamamen pasifleştirilmiş arka yüzeyli (n-PERT/p-PERT) teknolojileriyle üretilmektedir.

2.7.2 Çift Yüzlü Fotovoltaik Hücrelerin Çeşitleri

2.7.2.1 Heteroeklem Fotovoltaik Hücreler

Heteroeklem fotovoltaik hücreler yüksek verimlilik ve az sayıda üretim aşamasıyla büyük avantaj sunar. Bu hücreler aynı zamanda düşük sıcaklık katsayısına ve yüksek çift yüzürlük oranına sahiptir. Heteroeklem fotovoltaik hücrelerin çift yüzürlük oranı %92'nin üzerindedir (Kopecek ve Libal, 2018).

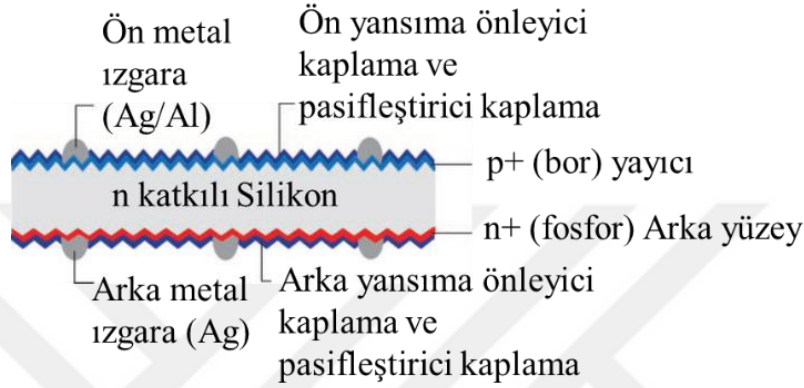
Heteroeklem fotovoltaik hücreler iki amorf silikon ince film arasına kristal bir silikon hücre konumlandırılarak yapılır (Şekil 2.33). Üst yüzeydeki ince amorf silikon film hem üstten gelen güneş ışığının bir kısmını hem de alt katmanlardan yansıyan güneş ışığını yakalar. Işınlar p-n bağlantılarına çarpar ve elektronları uyararak hareket etmesini sağlar. Bu da elektrik akımı oluşturur (Y. Liu ve diğerleri, 2020).



Şekil 2.33. Heteroeklem fotovoltaik hücrenin ön ve arka yüzeyi (Kopecek ve Libal, 2018)

2.7.2.2 N-PERT Fotovoltaik Hücreler

n-PERT fotovoltaik hücreler bir n-tipi yarı iletken silikon ve bir p-tipi yarı iletken silikonun birleşmesiyle oluşturulur (Şekil 2.34). P-tipi silikon bor gibi elektron eksikliği olan atomların eklenmesiyle oluşur ve bu eksiklik bir elektron boşluğu yaratır. N-tipi silikon yarı iletken ise fosfor gibi elektron fazlası olan atomların eklenmesiyle yapılır. Bu durum silikon içerisinde serbest hareket edebilen elektronlar yaratır.

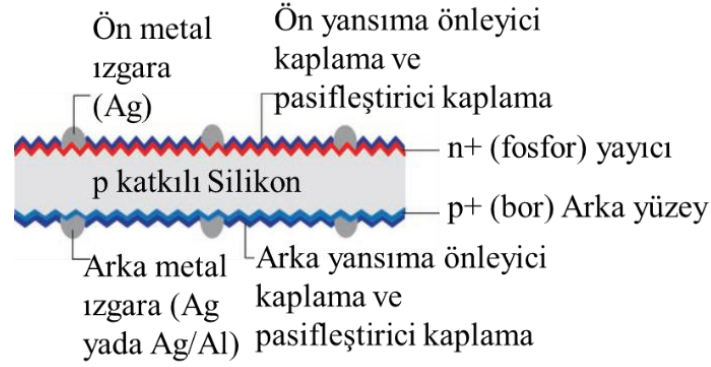


Şekil 2.34. n-PERT fotovoltaik hücrenin yapısı (Kopecek ve Libal, 2018)

Hücreye çarpan güneş ışınları yarı iletken silikondaki elektronları serbest bırakır ve boşluklar oluşur. Bu boşluklar n-tipi tabakaya hareket eder. Elektronlar ise p-tipi tabakaya doğru hareket eder. Bu hareket bir elektrik akımının oluşmasını sağlar (Benick ve diğerleri, 2014; Guerra, Guevara, Palacios ve Crupi, 2018). N-PERT fotovoltaik hücreler çok yüksek çift yüzölçüm oranına ve nispeten yüksek olan verimliliğe (%20-%22) sahiptir. Yapılan bazı çalışmalarda en yüksek verimin %21,8 olduğu belirtilmiştir (Glunz ve diğerleri, 2015).

2.7.2.3 P-PERT Fotovoltaik Hücreler

P-PERT fotovoltaik hücreler de n-PERT hücreler gibi n-tipi yarı iletken silikon ve bir p-tipi yarı iletken silikonun birleşmesiyle oluşturulur (Şekil 2.35). Çalışma yapısı olarak tamamen aynıdır. Tek farkı n-tipi fosfor katkılı yayıcı yüzeyin öne, p-tipi bor esaslı malzemenin arka yüzeye konumlandırılmasıdır (S. Kim, Hoang ve Bark, 2021).

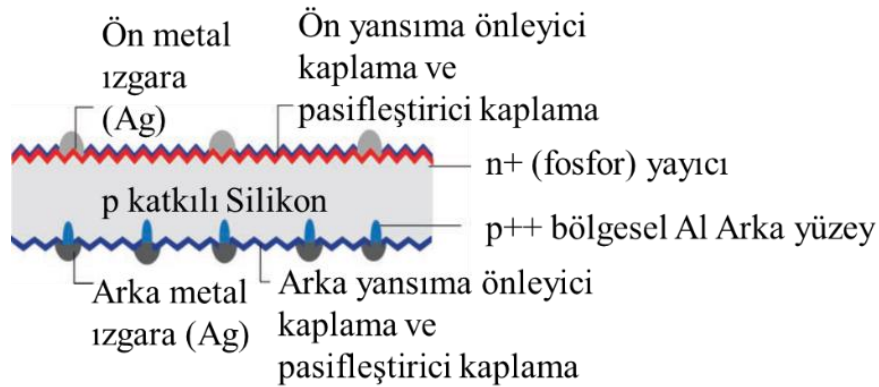


Şekil 2.35. p-PERT fotovoltatik hücrenin yapısı (Kopecek ve Libal, 2018)

p-PERT fotovoltatik hücreler yaklaşık %18,9'luk verime sahiptir ve çift yüzölçüm oranları yaklaşık %85-%90 aralığındadır (Kopecek ve Libal, 2018).

2.7.2.4 P-PERC+ Fotovoltatik Hücreler

Çift yüzölçüm PERC+ fotovoltatik hücreler, önde gelen birçok üretici tarafından uygulanan tek yüzölçüm PERC fotovoltatik hücreler ile benzer yapıya sahiptir (Şekil 2.36). PERC hücrelerin üretim aşamaları ile PERC+ hücrelerin üretim aşamaları aynıdır. Günümüzde tek yüzölçüm PERC hücreler sektörün %20'sini oluşturmaktadır. Bu payın önümüzdeki yıllarda %60'a çıkması beklenmektedir (Metz, Fischer ve Trube, 2017). Bu nedenle Çift yüzölçüm PERC+ hücrelerin üretilmesi ve sektöre büyük pay sahibi olması beklenen bir durumdur. Bu hücrelerin çift yüzölçüm oranı %80'e kadardır. Verma (2020) tarafından yapılan çalışmada hücre veriminin %22,8 olduğu belirtilmiştir.

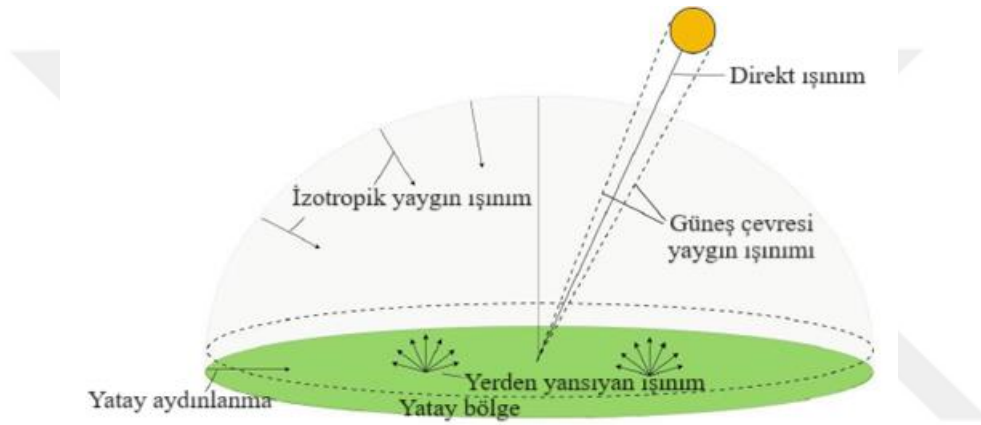


Şekil 2.36. p-PERC+ fotovoltatik hücrenin yapısı (Kopecek ve Libal, 2018)

2.7.3 Işınım

Fotovoltaik panele gelen toplam Güneş ışınımı, direkt ışınım (I_{direkt}), yayılan ışınım ($I_{yayılan}$) ve yansıyan ışınımın ($I_{yansıyan}$) toplamıdır. Denklem 2.24'te görülmektedir (Duffie ve Beckman, 2013). Güneş ışınlarının bileşenleri Şekil 2.37'de görülmektedir. Yayılan ışınım; izotropik ışınım ($I_{yayılan,izo}$), güneş çevresindeki yayılan ışınımı ($I_{yayılan,gun}$) ve ufuk aydınlanmasındaki yatay yayılan ışınımından ($I_{yayılan,yat}$) oluşmaktadır.

$$I_{top} = I_{direkt} + I_{yayılan} + I_{yansıyan} \quad (2.24)$$



Şekil 2.37. Güneş ışın bileşenleri

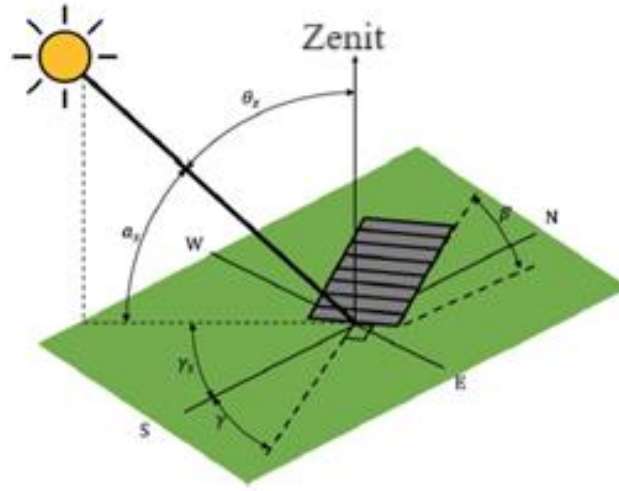
Güneş konumu ve fotovoltaik panel yönelimi çeşitli açı ve parametreler ile ifade edilebilir (Duffie ve Beckman, 2013). Güneşin konumu güneş azimut açısı (γ_s) ve güneş yükseklik açısı (α_s) ile tanımlanabilir. Fotovoltaik panele gelen ışınım, Güneş'in konumuna, panel azimut açısına (γ) ve panel eğimine (β) bağlıdır. Zenit açısı (θ_z), $90^\circ - \alpha_s$ olarak tanımlanmaktadır.

Çift yüzlü fotovoltaik panele gelen ön ve arka ışınım miktarını bulmak için hem ön hem de arak yüzey için beş bileşene ihtiyaç vardır. Arka ışınım hesaplanırken modül eğimi ve modül azimut açıları 180° derece olarak tamamlanır:

$$\gamma_A = \gamma_O + 180 \quad (2.25)$$

$$\beta_A = 180 - \beta_O \quad (2.26)$$

Burada A ifadesi “arka”, O ifadesi ise "ön" anlamına gelir. Şekil 2.38'deki eğim (β), ön eğimi (β_o) ifade eder.



Şekil 2.38. Fotovoltaik panel açıları

Geliş açısı (θ), bir yüzey üzerindeki ışın radyasyonu ile o yüzeye ait normal arasındaki açıdır. Denklem 2.27, güneşin konumu ve yüzey açılarına bağlı geliş açısını ifade etmektedir (Duffie ve Beckman, 2013). Geliş açısı 90° 'yi aşabilir, bu da güneşin yüzeyin arkasında olduğu anlamına gelir. Bu nedenle $\max(\theta_{O/A})=90^\circ$ olduğunu varsaymak önemlidir.

$$\cos\theta_{O/A} = \cos\theta_z \cdot \cos\beta_{O/A} + \sin\beta_{O/A} \cdot \sin\theta_z \cdot \cos(\gamma_s - \gamma_{O/A}) \quad (2.27)$$

Yayılan ufuk ışıının yansıma kayıplarını hesaplamak için yatay geliş açısı (θ_{yat}) hesaplanmıştır. Hesaplama 90° 'lik bir zenit açısı ile yapılır ve azimut açısının ufukta doğrusal olduğu varsayılır ve ufuk parlaklaşmasının azimut açısından bağımsız olduğu varsayılır (dolayısıyla $\gamma_s = \gamma$) (Hooper ve Brunger, 1980). Yatay geliş açısı aşağıdaki denklemde tahmin edilir:

$$\cos\theta_{yat,O/A} = \cos 90 \cdot \cos\beta_{O/A} + \sin\beta_{O/A} \cdot \sin 90 \cdot \cos(\gamma - \gamma_{O/A}) \quad (2.28)$$

2.7.3.1 Yansıma Kayıpları

Fotovoltaik panellerin ön arka yüzeyine gelen ışınımı hesaplarken, her ışınım bileşenindeki kayıpları hesaba katmak önemlidir. Martín ve Ruiz (2002, 2005) direkt ışınım, yayılan ufuk ışınımı, yansıyan ışınım ve izotropik ışınım için yansıma kaybını hesaplamak için aşağıdaki denklemleri sunmuştur;

$$R_{kayıp,direkt}^{O/A} = \frac{\exp\left(\frac{-\cos\theta_{O/A}}{\alpha_r}\right) - \exp\left(\frac{-1}{\alpha_r}\right)}{1 - \exp\left(\frac{-1}{\alpha_r}\right)} \quad (2.29)$$

$$R_{kayıp,yat}^{O/A} = \frac{\exp\left(\frac{-\cos\theta_{yat,O/A}}{\alpha_r}\right) - \exp\left(\frac{-1}{\alpha_r}\right)}{1 - \exp\left(\frac{-1}{\alpha_r}\right)} \quad (2.30)$$

$$R_{kayıp,yansıyan}^{O/A} = \exp\left[-\frac{1}{\alpha_r} \left(c_1 \cdot \left(\sin\beta + \frac{\left(\frac{\pi \cdot \beta}{180}\right) - \sin\beta}{1 - \cos\beta} \right) + c_2 \cdot \left(\sin\beta_{O/A} + \frac{\left(\frac{\pi \cdot \beta}{180}\right) - \sin\beta}{1 - \cos\beta} \right)^2 \right) \right] \quad (2.31)$$

$$R_{kayıp,izo}^{O/A} = \exp\left[-\frac{1}{\alpha_r} \cdot \left(c_1 \cdot \left\{ \sin\beta_{O/A} + \frac{\pi - \left(\frac{\pi \cdot \beta}{180}\right) - \sin\beta_{O/A}}{1 + \cos\beta_{O/A}} \right\} + c_2 \cdot \left\{ \sin\beta_{O/A} + \frac{\pi - \left(\frac{\pi \cdot \beta_{O/A}}{180}\right) - \sin\beta_{O/A}}{1 + \cos\beta_{O/A}} \right\}^2 \right) \right] \quad (2.32)$$

Burada α_r , açısal kayıp katsayısıdır. c_1 ve c_2 uyum parametreleridir. Klasik bir silikon fotovoltaik panel için $\alpha_r = 0,16$, $c_1 = 4/3\pi$ ve $c_2 = -0,074'$ tür (Martín ve Ruiz, 2002).

2.7.3.2 Direkt Işınım

Direkt ışınım, fotovoltaik panelin hem ön hem arka yüzeyine doğrudan gelen normal ışınım (I_{DNI}) ile Denklem 2.33'te gösterildiği şekilde tahmin edilir.

$$I_{direkt,O/A} = I_{DNI} \cdot \cos(\theta_{O/A}) \cdot (1 - R_{kayıp,direkt}^{O/A}) \quad (2.33)$$

Küresel yayılan yatay ışınlam I_{KYI} , direkt normal ışınlam I_{DNI} , yayılan yatay ışınlam I_{YYI} ve güneş zenit açısının (θ_z) fonksiyonu olarak ifade edilebilir;

$$I_{KYI} = I_{DNI} \cdot \cos(\theta_z) + I_{YYI} \quad (2.34)$$

2.7.3.3 Yayılan Işınlam

Yatay düzlemde yayılan ışınlam Perez modeli ile hesaplanabilmektedir. Perez, Ineichen, Seals, Michalsky ve Stewart (1990), Denklem 2.35'te gösterildiği gibi yayılan ışınlamı üç parçaya ayırır.

$$I_{yay} = I_{yay,izo} + I_{yay,gun} + I_{yay,yat} \quad (2.35)$$

İzotropik ışınlam ($I_{yay,izo}$) tüm gökyüzü kubbesinden eşit olarak alınır. Güneş çevresi yayılımı ($I_{yay,gun}$), güneş ışınlamının ileri doğru saçılmasının bir sonucudur ve gökyüzünde güneş etrafında yoğunlaşır. Ufuk parlaklaşması ($I_{yay,yat}$) ufuk yakınında yoğunlaşırken. Aşağıdaki denklemler eğimli bir yüzeydeki yaygın ışınlamı verir;

$$I_{yay,izo,O/A} = I_{YYI} \cdot (1 - F_1) \cdot \left(\frac{1 + \cos\beta_{O/A}}{2} \right) \cdot (1 - R_{kayıp,izo}^{O/A}) \quad (2.36)$$

$$I_{yay,gun,O/A} = I_{YYI} \cdot F_1 \cdot \frac{\alpha_{F/R}}{b} \cdot (1 - R_{kayıp,direkt}^{O/A}) \quad (2.37)$$

$$I_{yay,yat,O/A} = I_{YYI} \cdot F_2 \cdot \sin\beta_{O/A} \cdot (1 - R_{kayıp,yat}^{O/A}) \quad (2.38)$$

Denklemlerde F_1 ve F_2 güneş çevresi ve ufuk parlaklık katsayılarıdır. $\alpha_{O/A}$ ve b güneş çevresi radyasyonunun geliş açısını açıklayan terimlerdir (Perez ve diğerleri, 1990). Bu değişkenler sınırlarla tanımlanmaktadır:

$$\alpha_{O/A} = \max(0^\circ, \cos \theta_{O/A}), \quad b = \max(\cos 85^\circ, \cos \theta_z)$$

$$F_1 = \max[0, \left(f_{11} + f_{12} \cdot \Delta + \frac{\pi \cdot \theta_z}{180} \cdot f_{13} \right)] \quad (2.39)$$

$$F_2 = (f_{21} + f_{22} \cdot \Delta + \frac{\pi \cdot \theta_z}{180} \cdot f_{23}) \quad (2.40)$$

Katsayılar gökyüzü durumunu tanımlayan üç parametrenin fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır; zenit açısı (θ_z), açıklık parametresi (ε) ve parlaklık parametresi (Δ) (Perez ve diğerleri, 1990). Parlaklık katsayıları ($f_{11}, f_{12}, \dots, f_{23}$) netlik parametresi ile Çizelge 2.2'den bulunabilmektedir.

$$\varepsilon = \frac{\left(\frac{I_{YYI} + I_{DNI}}{I_{YYI}} \right) + 1,041 \cdot \left(\frac{\pi \cdot \theta_z}{180} \right)^3}{1 + 1,041 \cdot \left(\frac{\pi \cdot \theta_z}{180} \right)^3} \quad (2.41)$$

$$\Delta = \frac{I_{YYI} \cdot m}{I_{extra}} \quad (2.42)$$

Burada m Denklem 2.43 ile tahmin edilebilecek hava kütlesini ifade eder (Kasten ve Young, 1989) ve I_{YYI} , yayılan yatay ışıdır. I_{extra} , Denklem 2.44 ile hesaplanan, ışıma dik olan düzleme gelen dünya dışı radyasyondur.

$$m = \frac{1}{\sin(90 - \theta_z) + 0,50572 \cdot (6,07995 + \theta_z)^{-1,6364}} \quad (2.43)$$

$$I_{extra} = SC \cdot (1,00011 + 0,0034221 \cdot \cos\beta + 0,001280 \cdot \sin\beta + 0,000719 \cdot \cos 2\beta + 0,000077 \cdot \sin 2\beta) \quad (2.44)$$

Burada SC güneş sabitidir ve $1361,1 \text{ W/m}^2$ olarak tanımlanır (Gueymard, 2018). $B = (2\pi d)/365,242$ olup d , yılın herhangi bir gününü temsil eder.

Çizelge 2.2. Aydınlanma katsayıları

Açıklık parametresi (ε)	f11	f12	f13	f21	f22	f23
1,000-1,065	-0,008	0,588	-0,062	-0,060	0,072	-0,022
1,065-1,230	0,130	0,683	-0,151	-0,019	0,066	-0,029
1,230-1,500	0,330	0,487	-0,221	0,055	-0,064	-0,026
1,500-1,950	0,568	0,187	-0,295	0,109	-0,152	-0,014
1,950-2,800	0,873	-0,392	-0,362	0,226	-0,1462	0,001
2,800-4,500	1,132	-1,237	-0,412	0,288	-0,823	0,056
4,500-6,200	1,060	-1,600	-0,359	0,264	-1,127	0,131
6,200-∞	0,678	-0,327	-0,250	0,156	-1,377	0,251

2.7.3.4 Yansıyan Işınım

Sun ve diğerleri (2018), yerden yansıyan ışıını tahmin etmek için Denklem 2.45'te gösterilen bir model sunmaktadır. Yerden yansıyan ışıını (I_{yan}), kendi kendini gölgeleyen iki tür kaybı dikkate alır. Bunlardan ilki, yüzeye gelen direkt ışıının ve güneş çevresi ışıınının fotovoltaik panel tarafından doğrudan engellenmesidir. İkincisi, izotropik yayılan ışıının fotovoltaik panel tarafından gökyüzünü maskeleyesidir. Model görüş faktörü yaklaşımını kullanır.

$$I_{yan,O/A} = (I_{yan,O/A}^{yay,izo} + I_{yan,O/A}^{dir} + I_{yan,O/A}^{yay,gun}) \cdot (1 - R_{kayıp,yan}^{O/A}) \quad (2.45)$$

2.7.3.5 İzotropik Yansıyan Yaygın Işınım

Sun ve diğerleri (2018) zeminin fotovoltaik panel tarafından gölgelenmesi nedeniyle gökyüzünden gelen izotropik yaygın ışıının yalnızca bir kısmının yere çarptığını ve panele yansıdığını açıklamaktadır. Gökyüzü maskeleyesinin neden olduğu kendi kendini gölgeleme, modül üzerindeki yerden yansıyan ışıını etkiler. Yaygın izotropik ışıını büyük ölçüde görüş faktörünün hesaplandığı zemin konumuna (x) bağlıdır. Şekil 3.7, izotropik yaygın ışıından dolayı yerden yansıyan ışıının kendi kendini gölgelemesinin bir örneğini göstermektedir.

$$I_{yan,O/A}^{yay,izo} = \rho \cdot I_{yan,izo,yer} \cdot \frac{1}{H} \cdot \int_{x_{min}}^{+\infty} GF_{x \rightarrow gokyuzu}(x) \cdot GF_{x \rightarrow O/A}(x) dx \quad (2.46)$$

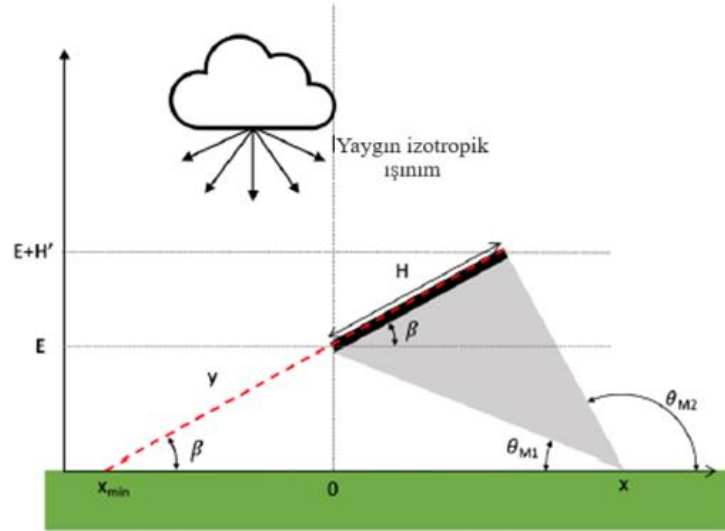
Denklem 2.46, sonsuz büyüklükte bir yansıtıcı yeryüzünü varsayar; burada ρ , yer albedo katsayısıdır ve H modül uzunluğudur. Yere ulaşan yaygın izotropik ışınım ($I_{yan,izo,yer}$), $\beta=0^\circ$ ve $\gamma=0^\circ$ kabul edilerek Denklem 3.14 ile Perez modeliyle tahmin edilebilir.

Görüş faktörü ($GF_{i \rightarrow j}$), yüzeyden (i) ayrılan ve yüzeye (j) doğrudan çarpan radyasyonun fraksiyonudur (Cengel, 2002). Modül tarafından toplanan yerden yansıyan ışınımın Denklem 2.46'da entegrasyonu, x 'in gökyüzüne doğru görüş faktörünü ($GF_{x \rightarrow gokyuzu}$) ve x 'in modülün ön veya arka tarafına görüş faktörünü ($GF_{x \rightarrow O/A}$) kapsamaktadır. İntegral, sonsuza kadar $x_{min} = \frac{E}{\tan(\beta_{O/A})}$ sınırlamaları ile tanımlanan, zemin üzerinden hesaplanır. $GF_{x \rightarrow gokyuzu}$ ve $GF_{x \rightarrow O/A}$ sırasıyla Denklem 2.48 ve 2.49 ile tahmin edilir.

$$x_{min} = \frac{E}{\tan(\beta_{O/A})} \quad (2.47)$$

$$GF_{x \rightarrow gokyuzu} = 1 - \frac{\cos(\theta_{M1}) + \cos(\theta_{M2})}{2} \quad (2.48)$$

$$GF_{x \rightarrow O/A} = 1 - GF_{x \rightarrow gokyuzu} \quad (2.49)$$



Şekil 2.39. Yerden yansıyan yaygın izotropik ışınların kendini gölgelemesi

Şekil 2.39'da gösterildiği gibi maskeleme açıları, θ_{M1} ve θ_{M2} , sırasıyla gölgenin (zemin) normali ile panel arasındaki açıyı temsil eder. İki açı Denklem 2.50 ve 2.51 ile hesaplanabilir. E , modül yüksekliği ve H , modül uzunluğudur.

$$\theta_{M1} = \begin{cases} 180 + \cot^{-1}\left(\frac{x}{E}\right), & x < 0 \\ \cot^{-1}\left(\frac{x}{E}\right), & x \geq 0 \end{cases} \quad (2.50)$$

$$\theta_{M2} = \begin{cases} -\cot^{-1}\left(\frac{x-H \cdot \cos(180-\beta_{O/A})}{E+H \cdot \sin(180-\beta_{O/A})}\right), & x < H \cdot \cos(180-\beta_{O/A}) \\ 180 - \cot^{-1}\left(\frac{x-H \cdot \cos(180-\beta_{O/A})}{E+H \cdot \sin(180-\beta_{O/A})}\right), & x \geq H \cdot \cos(180-\beta_{O/A}) \end{cases} \quad (2.51)$$

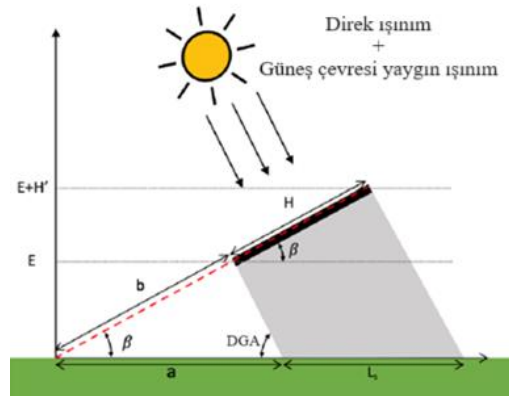
2.7.3.6 Direkt Yansıyan ve Güneş Çevresi Yaygın Işıyınım

Yerdeki direkt ve güneş çevresi yaygın ışınının bazı kısımları, Şekil 3.8'de gösterildiği gibi, kendi kendine gölgeleme nedeniyle panele yansımamaktadır.

$$I_{yan,O/A}^{dir} = \rho \cdot I_{DN1} \cdot \cos\theta_z \cdot GF_{O/A \rightarrow yer,go}^{dir} \quad (2.52)$$

$$I_{yan,O/A}^{yay,gun} = \rho \cdot I_{yan,gun,yer} \cdot GF_{O/A \rightarrow yer,go}^{gun} \quad (2.53)$$

Burada, $GF_{O/A \rightarrow yer,ns}^{dir}$ ve $GF_{O/A \rightarrow yer,go}^{gun}$ panelin ön veya arka yüzeyinin gölgeli olmayan (*go*) zemine direkt ve güneş çevresi görüş faktörüdür. Panelin zemine olan oranının (gölgeli olmayan) tahmin edilmesi görüş faktörü ile yapılabilir. Yere ulaşan yaygın güneş çevresi ışınımı ($I_{yan,gun,yer}$), Perez modeliyle Denklem 2.37 ile yayılan ışınım ile $\beta=0^\circ$ ve $\gamma=0^\circ$ varsayılarak tahmin edilebilir.



Şekil 2.40. Yerden yansıyan direkt ışınların ve Güneş çevresi yaygın ışınların kendini gölgelemesi

Fotovoltaik hücrenin gölge uzunluğu (L_s) güneşin konumuna bağlıdır. Şekil 2.40, gölge uzunluğunun belirli bir zaman diliminde nasıl görünebileceği göstermektedir. Burada H modül uzunluğu, a gölge ile orijin arasındaki mesafe ve b modül ile orijin arasındaki mesafedir.

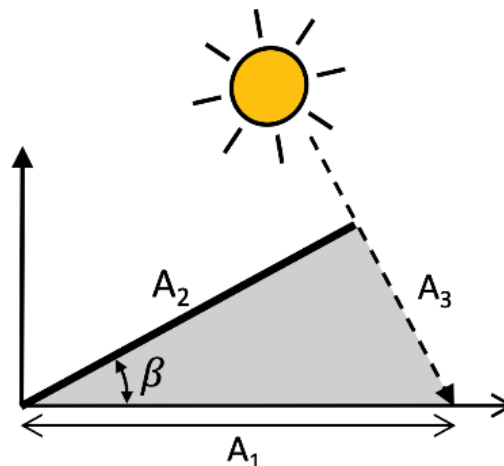
$$L_s = H \cdot \sin(180 - \beta_{O/A}) \cdot \left(\frac{1}{\tan(DGA_{O/A})} + \frac{1}{\tan(\beta_{O/A})} \right) \quad (2.54)$$

burada DGA dikey gölge açısı (veya profil açısı) olarak tanımlanır (Duffie ve Beckman, 2013).

$$DGA = \frac{\tan(90 - \theta_z)}{\cos(\gamma_s - (180 + \gamma_{O/A}))} \quad (2.55)$$

Appelbaum (2018) panelin arka yüzeyine düşen gölgenin görüş faktörünü Denklem 2.56'da sunmaktadır. Şekil 2.41'de, görüş faktörünün bir çizimini göstermektedir

$$GF_{A_1 \rightarrow A_2, arka} = \frac{A_1 + A_2 - A_3}{2 \cdot A_1} = \frac{A_1 + A_2 - \sqrt{(A_1 - A_2 \cdot \cos\beta)^2 + (A_2 \cdot \sin\beta)^2}}{2 \cdot A_1} \quad (2.56)$$



Şekil 2.41. Gölgelemiş zeminin (A_1) panelin arka yüzeyine (A_2) kadar olan görüş faktörünün çizimi (Sun ve diğerleri, 2018)

Denklem 2.57, Yer yüzeyine montajlanmış bir fotovoltaiik panelin arka yüzeyindeki gölgeli zeminin görüş faktörü olmaktadır ve bu faktörün aşamalar halinde hesaplanması gerekmektedir. Karşılıklılık kuralı ve süperpozisyon kuralı, yükseltilmiş bir modülün arka tarafındaki gölgeli zeminin görüş faktörünün hesaplanmasına olanak sağlar (Cengel, 2002).

Bir çift görüş faktörü $F_{i \rightarrow j}$ ve $F_{j \rightarrow i}$ birbirleriyle karşılıklılık kuralıyla ilişkilidir:

$$A_i \cdot F_{i \rightarrow j} = A_j \cdot F_{j \rightarrow i} \quad (2.57)$$

Süperpozisyon kuralına göre: "bir i yüzeyinden j yüzeyine kadar olan görüş faktörü, i yüzeyinin j yüzeyi kısımlarına olan görüş faktörlerinin toplamına eşittir" bunun anlamı;

$$F_{i \rightarrow (j_1, j_2)} = F_{i \rightarrow j_1} + F_{i \rightarrow j_2} \quad (2.58)$$

Şekil 3.9'da gösterildiği gibi yükseltilmiş bir panel için görüş faktörü, aşağıdaki kısıtlamalarla Denklem 2.59 ile hesaplanır:

$$GF_{L_s \rightarrow O/A}^{dir} = \begin{cases} f(L_s, H, a, b), \theta_{O/A} > 0 \\ 0, \theta_{O/A} \leq 0 \end{cases} \quad (2.59)$$

burada L_s gölge uzunluğu, H panel uzunluğu, a gölge ile orijin arasındaki mesafe ve b modül ile orijin arasındaki mesafedir. Panelin ön veya arka tarafının gölgelenmeyen zemine bakış faktörü Denklem 2.60 ile hesaplanabilir.

$$GF_{O/A \rightarrow yer, go}^{gun} = GF_{O/A \rightarrow yer}^{dir} - GF_{L_s \rightarrow O/A}^{dir} \cdot \frac{L_s}{H} \quad (2.60)$$

burada $GF_{O/A \rightarrow yer}^{dir}$ panelin zemine bakış faktörüdür (gölgeli ve gölgeli olmayan) $(1 - \cos \beta_{O/A})/2$ ile tahmin edilir (Appelbaum, 2018). Modülün güneş çevresi ışıınının gölgeli olmayan zeminine bakış faktörü ($GF_{O/A \rightarrow yer, go}^{gun}$), Denklem 2.56'dan Denklem 2.60'a kadar olanla aynı şekilde bir değişiklik ile hesaplanır. Güneş çevresi ışıını için dikey gölge açısı (DGA_{gun}), maksimum 85° değeriyle θ_z 'ye eşit olan güneş çevresi yaygın ışığın ($\theta_{z, gun}$) zenit açısı ile hesaplanır.

$$\theta_{z,gun} = \begin{cases} \theta_z, & \theta_z < 85^\circ \\ 85^\circ, & \theta_z \geq 85^\circ \end{cases} \quad (2.61)$$

2.7.4 Albedo

Albedo, kelime anlamı olarak yansıtabilirlik olarak tanımlanmaktadır. Tanım olarak, kendine ait ışık kaynağı bulunmayan cisimlerin üzerine gelen güneş ışınlarını yansıtma gücüdür. Albedo değeri fotovoltaik sistemlerde zamanla değişebilmektedir. Bu değişim fotovoltaik modülün alt yüzeyinin rengi, kalınlığı, bitki örtüsü ve iklimsel koşullara bağlıdır (Çizelge 2.3). Kirlenme albedo değerini güçlü bir şekilde azaltmaktadır.

Çizelge 2.3. Farklı yüzeylerin ortalama albedo değerleri

Yüzey tipi	Albedo değeri
Çim	%23
Beton	%16
Beyaz boyalı beton	%60-%80
Beyaz çakıl	%27
Beyaz membran	>%80

Kaynak: Bembe, M. T., Daniel Chowdhury, S. P., Meeding, N., Lekhuleni, E. G., Ayanna, M. B. ve Simelane, S. (2018). *Effects of Grass and Concrete Reflective Surface on the Performance of Dual Axis Bifacial Solar PV Systems*. 2018 IEEE PES/IAS PowerAfrica içinde (ss. 734-738). IEEE. doi:10.1109/PowerAfrica.2018.8521143

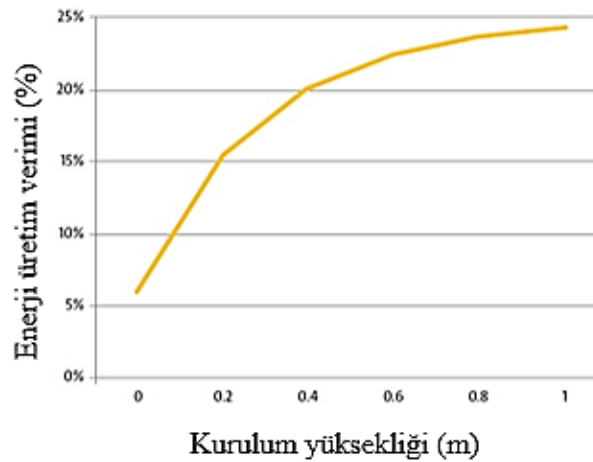
Dikey kurulumlu fotovoltaik panellerin daha fazla güneş radyasyonu aldığı ve albedoya karşı daha duyarlı olduğu tespit edilmiştir (Baloch, Hammat, Figgis, Alharbi ve Tabet, 2020). Sun ve diğerleri (2018) yerden 1 m yükseklikte iki adet çift yüzlü fotovoltaik panelleri %25 ve %50 oranında albedo değerine sahip zemine konumlandırmıştır. Çift yüzlülük kazanıcının %50 albedo değerine sahip panelde %20 oranında arttığını bulmuştur. Chiodetti ve diğerleri (2016) %20, %40 ve %60'lık albedo değerlerinin çift yüzlü fotovoltaik panellerin ön ve arka yüzeyine etkilerini araştırmıştır. Sonucunda yerden yansıyan ışınımın arttığını ancak dağınık ışınımın albedodan etkilenmediğini göstermiştir. Zhang, Wang, Pan ve Hu (2013) günlük albedo değişimlerini incelemişler albedonun sabah saatlerinde, güneş yükselme açısının 40°'ye ulaştığı durumlardan daha yüksek olduğu sonucuna varmışlardır.

Albedo hesaplanması yere ve gökyüzüne bakan 2 adet piranometre yardımı ile yapılmaktadır (Marion, 2020). Yere bakan piranometrenin ölçtüğü değerin, gökyüzüne bakan piranometrenin ölçtüğü değere bölünmesiyle elde edilir (Lave, 2015), Denklem 2.62'de gösterilmektedir.

$$\rho = \frac{\text{yerden yansıyan ışınlm}}{\text{küresel yatay ışınlm}} = \frac{I_{GRI}}{I_{GHI}} \quad (2.62)$$

2.7.5 Panel Yüksekliği

Çift yüzölü fotovoltaiik panellerde kurulum yüksekliği ne kadar artarsa arka yüzeyden enerji kazanımı o derece büyük olmaktadır. Zemine yakın yapılan kurulumlarda ise panelin alt yüzeyinin kendi gölgesinden etkilenmesine ve enerji üretiminin azalmasına sebep olmaktadır. Şekil 2.42’de görüldüğü gibi panel yüksekliğinin verime etkisi gösterilmektedir. Bu eğriye göre panel yüksekliği 0,5 m’de büküm noktasına, 1 m yükseklikte ise doyum noktasına ulaştığı görülmektedir (Modules, 2016). Panel yüksekliği ne kadar artarsa enerji veriminin doyum noktasından sonra daha az artacağından ve kurulum maliyetini en aza indirmek için optimum yüksekliğin kullanılması gerekmektedir.



Şekil 2.42. Kurulum yüksekliğinin enerji üretimine etkisi (Modules, 2016)

2.7.6 Paneller Arası Mesafe

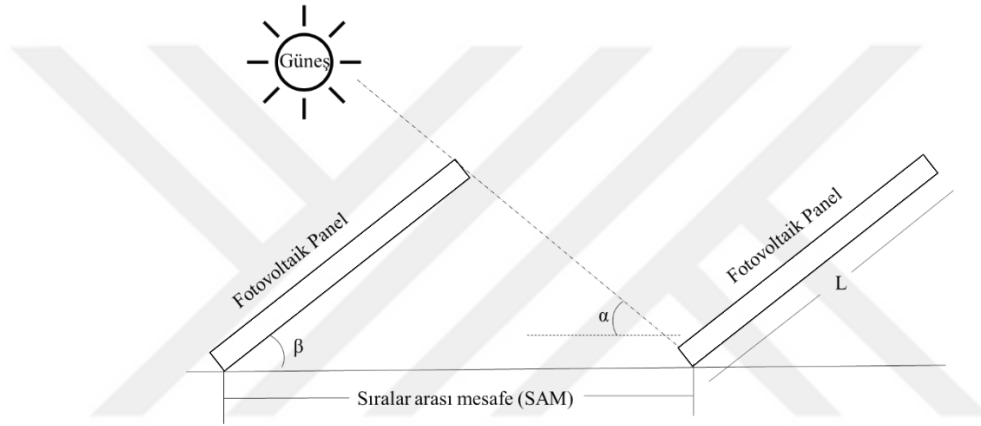
Fotovoltaiik sistemlerde gölgelenme önemli bir problem teşkil etmekte olup gerek geleneksel tek yüzölü gerekse çift yüzölü fotovoltaiik panellerde enerji üretiminin azalmasına sebep olabilecek primer etkenlerden biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Çift yüzölü fotovoltaiik panellerde gölge etkisinin en büyük sebebi olarak sıralar arası mesafe (SAM) göze çarpmaktadır. Aynı sıradaki panellerin birbirini etkilemesi başlıca gölgelenme sebebidir.

Çift yüzölü fotovoltaiik panellerin yakın sıra dizimleri sadece ön yüzeyi değil, arka yüzeyden gelen ışınlm miktarını da olumsuz yönde etkilemektedir (Şekil 2.43). Sistemlerin

tasarlanmasında paneller arası mesafenin dikkatle hesaplanması gerekmektedir. Ancak güneşin gün içerisindeki hareketi, mevsimsel değişimler gibi değişkenlerden dolayı sıralar arası mesafenin hesaplanması oldukça güçtür. Aşağıdaki denklemde bir panelin ön yüzeyi, bir duvar tarafından gölgelenmeye maruz bırakılarak panelin duvar ile arasındaki mesafenin matematiksel olarak hesaplanmasına yer verilmiştir (Arizona Solar Center, 2021).

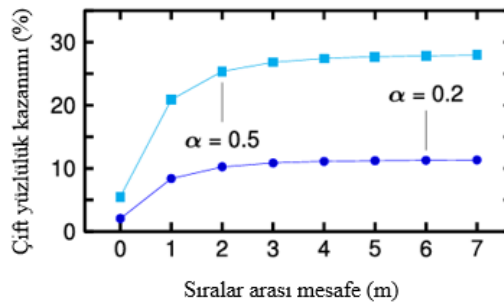
$$SAM = L + \cos \beta \left(\sin \beta \cdot \tan \left(\varphi + 23,5 \left(\frac{\alpha}{2} \right) \right) \right) \quad (2.63)$$

Bu denklemde α değeri panelin konumlandırıldığı alanın albedo katsayısını ifade etmektedir.



Şekil 2.43. Sıralar arası mesafenin hesaplanması (Arizona Solar Center, 2021)

Gölgeleme kayıplarını tamamen ortadan kaldırmak için paneller arası mesafeyi arttırmak yeterli gözükse de proje sahasının alanının maliyetini arttırmaktadır. Bu nedenle optimum paneller arası mesafe seçmek yerinde bir karar olacaktır. Shoukry, Libal, Kopecek, Wefringhaus ve Werner (2016) yaptıkları bir çalışmada bir dizi modülün gölgelemesini incelemişler ve dizi aralığını arttırmanın bir değerden sonra anlamsız olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 2.44).



Şekil 2.44. Paneller arası mesafenin çift yüzürlüğe etkisi (Shoukry ve diğerleri, 2016)

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışmanın bu bölümünde deney düzeneğinde kullanılan materyallerin özellikleri ve nasıl kullanıldıkları hakkında bilgi verilecektir. Ayrıca deneylerin yapılma yöntemleri ve amaçları konuları detaylandırılacaktır.

3.1 Deney Düzeneği Sistem Donanımları

3.1.1 Fotovoltaik Paneller

Deney düzeneğinin ana elemanlarından olan fotovoltaik paneller iki adet çift yüzlü ve bir adet tek yüzlü olarak ele alınmıştır. Bu panellerin özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Güneş panellerinin özellikleri

Özellik	Tek Yüzlü Panel	Çift Yüzlü Panel
Hücre Türü	Yarım Kesim Tek Kristalli	Yarım Kesim Tek Kristalli
Hücre Sayısı	144	144
Ölçüler (uzunluk-genişlik-yükseklik)	2095×1039×40 mm	2104×1040×30 mm
Ağırlık	24,5 kg	26,7 kg
Maksimum Güç	460 Wp	460 Wp
Modül Verimliliği	%21,1	%20,3
Maksimum Güç Gerilimi	41,8 V	44,02 V
Maksimum Güç Akımı	11 A	10,45 A
Açık Devre Gerilimi	49,6 V	52,10 V
Kısa Devre Akımı	11,7 A	11,30 A
Çalışma Sıcaklığı	-40 °C-+85 °C	-40 °C-+85 °C
Maksimum Arka Yüzey Güç Kazanımı	-	%25

3.1.2 Mikro invertör

Fotovoltaik paneller güneşten aldıkları ışıyınım aracılığı ile elektrik üretmektedir. Ancak bu elektrik doğru akım özellikli olduğundan şebekelerde kullanım için uygun değildir. Bu elektriği şebekeye uygun alternatif akıma çevirecek cihazlara ihtiyaç vardır. Bu kapsam da invertörler ortaya çıkmaktadır. Deney sahasında kullandığımız invertör türü şebekeye bağlı mikro invertör olarak tanımlanmaktadır. Deneyler süresince iki adet mikro invertör

kullanılmıştır. Deneylere ilk başlandığında 1500 W dönüştürme gücüne sahip dört ayrı panel bağlanabilen bir invertör kullanılmıştır (Şekil 3.1). Ancak ilerleyen süreçlerde panellerin anlık güçlerindeki yüksek değerler bu invertöre zarar vermiş ve 2000 W çıkış gücüne sahip dört panel bağlantısı bulunan eşdeğer bir invertöre geçiş yapılmıştır (Şekil 3.2). Bu invertörler her bir panelin ürettiği gücü ayrı olarak gözlemlemeye ve üretilen enerji miktarlarını ayrı olarak kaydetmeye yararmaktadır. Üretilen doğru akımı alternatif akıma çevrilerek şebekeye gönderilmesi de yine mikro invertör aracılığı ile sağlanmaktadır.



Şekil 3.1. 1500 W gücüne sahip mikro invertör



Şekil 3.2. 2000 W gücüne sahip mikro invertör

3.1.3 Veri Kayıt Cihazı

Meteoroloji istasyonundaki sensörlerden toplanan verilerin işlenerek bulut ortamına aktarılmasını sağlayan bu cihaz verileri anlık olarak gözlemlememizi ve depolanmasını sağlamaktadır (Şekil 3.3). Aynı zamanda cihaz üzerinde bulunan RS485 portu, dijital ve analog portlar sayesinde çok sayıda sensörden veri alınmasını ve sonraki çalışmalarda kullanılmasını sağlamaktadır.



Şekil 3.3. Veri kayıt cihazı

3.1.4 Solar Kablolar

Fotovoltaik panellerin verimi açısından solar kablolar büyük önem taşımaktadır. Kabloların çevre şartlarından minimum etkilenmesi ve yüksek akım taşıma kapasitesine sahip olması gerekmektedir. Bu bilgiler göz önünde bulundurulduğunda TS EN 60228 standartlarına uygun bakır çekirdekli ve 6 mm çapında kablolar kullanılmıştır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Solar kablo

3.1.5 Konnektörler

Solar kablolar fotovoltaik panel ile invertör arasında ya da birbirleri arasında bağlantı sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Bu bağlantıların korozyona uğramaması ve akımı güvenli ve en iyi şekilde taşıması gerekir. Konnektörler bu görevi yerine getirmektedir. Çalışmada Mc4 tipinde geleneksel konnektörler kullanılmıştır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Mc4 tip konnektör

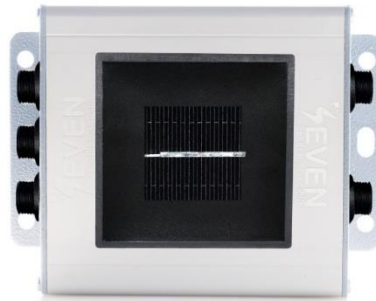
3.1.6 Işınım Sensörü

Işınım sensörü Güneş'ten gelen ışınım miktarını ölçmek için kullanılmaktadır. Çalışmada kullanılan ışınım sensörü toplam güneş ışınımını metre kare başına watt (W/m²) olacak şekilde ölçmektedir. Kullanılan ışınım sensörü RS485 portuna sahip olan veri kaydedicileri ile çalışmaktadır (Şekil 3.6). Aynı zamanda diğer sensörlerin veri aktarımına aracılık etmektedir. Kullanılan ışınım sensörünün özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Işınım sensörünün teknik özellikleri

Referans Hücre	Monokristal Silikon (31×31 mm)
Işınım Aralığı	0 – 1600 W/m ²
Belirsizlik	≤%2, IEC61724-1 standardına göre A Sınıfı
Çözünürlük	IEC61724-1 standardına göre 0,1 W/m ² ≤ 1 W/m ² A Sınıfı
Tepki Süresi	1 sn. 3 sn'den az olduğu için IEC61724-1 standardına göre A Sınıfı
Sapma	Yılda %0.3'den çok daha az sapma oranı
Görüş Alanı	IEC61724-1 standardı A Sınıfı gereğince 160°'den büyük
Tilt-Azimut Açısı	0°- 0° , ≤ 1°; IEC61724-1 standardına göre A Sınıfı
Çıkış Hızı	1/s
Veri Çıkışı	RS485, 38400 Baud hızına kadar
Haberleşme Protokolü	Modbus RTU
Güç Kaynağı	12 ile 30 VDC (20 VDC'de is 30 mA)
Güç Tüketimi	30 mA max @24 VDC
Elektriksel Bağlantı	3 m PUR Kablo LIYC11Y, UV ve hava koşullarına dayanıklı
Galvanik İzolasyon	Güç kaynağı ve RS485 hattı arasında 1000 V
Hücre Sıcaklık Sensör Tipi	EN 60751'e göre A Sınıfı PT1000
Çalışma Sıcaklığı	-40°C ila +85°C
Çalışma Nem Aralığı	0 to 100 %
Boyut	142 mm × 110 mm × 40 mm (W×L×H)
Ağırlık	0.3 kg
Koruma Sınıfı	EN 60751'e göre A Sınıfı PT1000
Muhafaza	Alüminyum
Uyumlu Standart	IEC 61724-1:2021 ve IEC 60904

Kaynak: Seven Sensör. (2020). Ürün Katagorileri. ArgeSim Group. 6 Ocak 2024 tarihinde <https://www.sevensensor.com/tr/urunler> adresinden erişildi.



Şekil 3.6. Işınım sensörü (Seven Sensör, 2020)

3.1.7 Hava Sıcaklık Sensörü

Hava sıcaklık sensörü bulunduğu ortamın sıcaklığını ölçmektedir (Şekil 3.7). Kullanılan sıcaklık sensörü ölçtüğü değeri ısınım sensörüne bağlanarak RS485 portu üzerinden veri kayıt cihazına aktarmaktadır. Sıcaklık sensörünün teknik özellikleri Çizelge 3.3’te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Sıcaklık sensörü teknik özellikleri

Ölçüm Aralığı	-55°C ile +125°C (-67°F ile +257°F)
Belirsizlik	$\pm 0,5$ °C, IEC61724-1 Uyumluluk
Sensör Muhafazası	Paslanmaz çelik boru, 6 mm çap, 50 mm uzunluk, 4 plakalı kalkan
Kablo	1,5 m PUR Kablo, UV ışınlarına dayanıklı
Koruma	IP67
Bağlantı	Tek telli veri yolu tekniği
Çözünürlük	0,1°C, IEC61724-1 Uyumluluk

Kaynak: Seven Sensör. (2020). Ürün Katagorileri. ArgeSim Group. 6 Ocak 2024 tarihinde <https://www.sevensensor.com/tr/urunler> adresinden erişildi.



Şekil 3.7. Hava sıcaklık sensörü (Seven Sensör, 2020)

3.1.8 Nem Sensörü

Nem sensörü herhangi bir ortamda bulunan hava içindeki nem durumunu ölçmek için kullanılır. Bu nemi yüzde (%) cinsinden ifade eder. Kullanılan nem sensörü nem miktarını ısınım sensörüne bağlanarak RS485 portu üzerinden veri kayıt cihazına aktarmaktadır (Şekil 3.8). Nem sensörünün teknik özellikleri Çizelge 3.4’te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Nem sensörü teknik özellikleri

Sensör Tipi	Kapasitif
Nem Ölçüm Aralığı	0,1%
Nem Ölçüm Hassasiyeti	$\pm 1\%$
Nem Ölçüm Çözünürlük	0,1%
Sıcaklık Ölçüm Aralığı	-40°C ila +85°C
Sıcaklık Ölçüm Hassasiyeti	$\pm 0.1^{\circ}\text{C}$
Sıcaklık Ölçüm Çözünürlük	0.1°C
Veri Çıkışı	I ² C
Güç Kaynağı	3 V DC
Elektriksel Bağlantı	3 m PUR Kablo LIYC11Y, UV ve hava koşullarına dayanıklı
Çalışma Sıcaklığı	-40°C ila +85°C
Koruma Kalkan Boyutları	Ø 105 x 100 mm
Ağırlık	0,2 kg
Koruma Sınıfı	IP 65
Muhafaza	Paslanmaz Çelik Boru
Koruma Kalkan Malzemesi	ABS

Kaynak: Seven Sensör. (2020). Ürün Katagorileri. ArgeSim Group. 6 Ocak 2024 tarihinde <https://www.sevensensor.com/tr/urunler> adresinden erişildi.



Şekil 3.8. Nem sensörü (Seven Sensör, 2020)

3.1.9 Rüzgâr Hızı Sensörü

Rüzgâr hız sensörü anemometre adıyla da bilinmektedir (Şekil 3.9). Bu sensör yatayda esen rüzgârın hızını m/s cinsinden ölçerek ışınlam sensörü aracılığı ile veri kayıt cihazına aktarmaktadır. Rüzgâr hız sensörünün teknik özellikleri Çizelge 3.5’te verilmiştir.

Çizelge 3.5. Rüzgâr hız sensörünün teknik özellikleri

Ölçüm Aralığı	0,9 m/s - 40 m/s
Doğruluk	$\pm 0,3$ m/s veya Ölçüm Değerinin $\pm \%3$ 'i
Çözünürlük	0,1 m/s
Eşik değeri	0,9 m/s
Bozulma hızı	60 m/s
Veri Çıkışı	Reed Relay
Elektriksel Bağlantı	3 m PUR Kablo LIYC11Y, UV ve hava koşullarına dayanıklı
Çalışma Sıcaklığı	-40°C ila +85°C (Donma)
Boyut	Ø 180 × 145 mm
Ağırlık	0,2 kg
Koruma Sınıfı	IP 54 (IP65 opsiyonu ile)
Muhafaza Malzemesi	Anotlanmış Alüminyum
Çanak Malzemesi	ABS
Montaj Tipi	Boru ya da zemine montaj
Standart	IEC 61724-1:2021 standardına uygun

Kaynak: Seven Sensör. (2020). Ürün Kategorileri. ArgeSim Group. 6 Ocak 2024 tarihinde <https://www.sevensensor.com/tr/urunler> adresinden erişildi.



Şekil 3.9. Rüzgâr hız sensörü (Seven Sensör, 2020)

3.1.10 Rüzgâr Yönü Sensörü

Rüzgâr yön sensörü, yatayda esen rüzgârın yönünü derece (°) cinsinden ölçmeyi sağlar (Şekil 3.10). Kullanılan sensör rüzgâr yönünü ölçer ve ışınlam sensörü aracılığı ile RS485 portundan veri kayıt cihazına aktarmaktadır. Çizelge 3.6'da rüzgâr yön sensörünün teknik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.6. Rüzgâr yön sensörü teknik özellikleri

Ölçüm Aralığı	0 ila 359°
Doğruluk	± 3°
Çözünürlük	1°
Eşik değeri	1 m/s
Bozulma hızı	60 m/s
Veri Çıkışı	Potansiyometre
Elektriksel Bağlantı	3 m PUR Kablo LIYC11Y, UV ve hava koşullarına dayanıklı
Çalışma Sıcaklığı	-40°C ila +85°C (Buzlanma yok)
Boyut	410 × 220 mm
Ağırlık	0,6 kg
Koruma Sınıfı	IP 54 (IP65 opsiyonu ile)
Muhafaza Malzemesi	Poliamid
Kanat Malzemesi	Alüminyum
Montaj Tipi	Boru ya da zemine montaj
Standart	IEC 61724-1:2021 standardına uygun

Kaynak: Seven Sensör. (2020). Ürün Kategorileri. ArgeSim Group. 6 Ocak 2024 tarihinde <https://www.sevensensor.com/tr/urunler> adresinden erişildi.



Şekil 3.10. Rüzgâr yön sensörü (Seven Sensör, 2020)

3.1.11 Panel Yüzey Sıcaklık Sensörü

Panel yüzey sıcaklık sensörü bir PT1000 probu kullanarak panel yüzeyinin sıcaklığını derece (°C) cinsinden ölçmek için kullanılır (Şekil 3.11). Çalışmada kullanılan panel yüzey sıcaklık sensörleri veri kayıt cihazının analog girişine bağlanarak panel yüzey sıcaklık verilerini aktarmaktadır. Panel yüzey sıcaklık sensörünün teknik özellikleri Çizelge 3.7’de verilmiştir.

Çizelge 3.7. Panel yüzey sıcaklık sensörünün teknik özellikleri

Sensör Tipi	EN 60751'e göre Pt1000 1/3 Class B, düz yüzeyler için (güneş panelinin arka tarafı)
Ölçüm Aralığı	-40...+85°C
Doğruluk	± 0.1°C
Sensör Muhafazası	Alüminyum plakalı plastik kutu, Y × G × U: 12 mm × 50 mm × 50 mm
Kablo	3 m ya da 5 m PUR Kablo, UV ve hava koşullarına dayanıklı
Koruma	IP67
Bağlantı	İki Telli

Kaynak: Seven Sensör. (2020). Ürün Katagorileri. ArgeSim Group. 6 Ocak 2024 tarihinde <https://www.sevensensor.com/tr/urunler> adresinden erişildi.



Şekil 3.11. Panel yüzey sıcaklık sensörü (Seven Sensör, 2020)

3.2 Yöntem

3.2.1 Deney Düzeneğinin Kurulumu

Deney düzeneği Tekirdağ ili Çorlu ilçesinde (Enlem:41,159° K, Boylam:27,8052° D) kurulmuştur. Çalışmada kullanılan materyaller birbirleri ile uyum içinde çalışacak şekilde seçilmiştir. Çalışma sahasının kurulumunda ilk olarak fotovoltaik panelleri taşıyacak konstrüksiyon belirlenmiştir. Şiddetli rüzgâr ve yağışlardan etkilenmeyecek şekilde tasarlanması ve kullanışlı olması en önemli parametredir. Bu kapsamda konstrüksiyon kurulumunda 40×40×2 mm ölçülerinde kutu profiller seçilmiştir (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. Fotovoltaik paneller için kullanılan profiller

Profillerin yüzeye sabitlenmesi için $25 \times 25 \times 4$ mm ölçülerinde lamalar seçilmiş ve zemine sabitlenebilmesi için 4 adet delik açılmıştır (Şekil 3.13).



Şekil 3.13. Profillerin zemine sabitlenmesi için kullanılan lamalar

Profiller ve zemin sabitleme lamaları kaynak yardımı ile birleştirilmiştir (Şekil 3.14).



Şekil 3.14. Profiller ile lamaların birleştirilmesi

Hazırlanan materyaller deney sahasına götürülerek kurulum aşamasına başlanmıştır. Panellerin montajlanacağı zemin beton olmasından dolayı yüzeye 50 cm uzunluğunda delikler açılmış ve hazırlanan montaj profilleri demir saplamalar ile bu deliklere sabitlenmiştir. Saplamaların üzerine hazırlanan profile-lama bağlantıları kaynaklanarak sağlamlaştırılmıştır (Şekil 3.15).



Şekil 3.15. Fotovoltaik panel düzeneğinin kurulması

Panellerin kurulumu çeşitli literatür araştırmalarına göre tasarlanmıştır. Joge ve diğerleri (2004) yaptığı çalışmada panellerin dikey konumlandırılmasının kar ve kirlenmeden daha az etkilenme, daha küçük alana daha fazla panel konumlandırılması gibi avantajları olduğunu belirtmiştir. Patel ve diğerleri (2019) yaptığı hesaplamalara göre panellerin yere dikey olarak değil yatay olarak konumlandırmanın minimum arazi boyutunda maksimum enerji üretimini sağlayacağını belirtmiştir. Ancak çalışmaların sonunda panellerin dikey konumlandırılmasının daha fazla enerji üretimi ve maksimum arazi faydası sağladığını gözlemlemiştir.

Dikey olarak yerleştirilmiş fotovoltaik çift yüzlü panellerin klasik tip fotovoltaik paneller ile karşılaştırıldığı bir CFD modeli geliştiren Johansson, Gustafsson, Stridh ve Campana (2022) bu modele göre 90° eğimli ve doğuya bakan çift yüzlü panellerin 30° eğimli güneşe bakan tek yüzlü panellerden yüksek güneş radyasyonu olan zamanlarda daha az etkilendiğini ve daha yüksek enerji ürettiğini tespit etmiştir. Wang ve diğerleri (2015) çift yüzlü panellerin performansını tespit etmek için yaptıkları çalışmada panel açısını 40° olarak almışlardır. Ghenai ve diğerleri (2021) ise çift yüzlü fotovoltaik panellerden oluşan deney düzeneğini 15°, 25°, ve 35°'lik eğimlerde kurmuşlar ve deneyler sonucunda 35°'lik panel

eğiminin en yüksek verimi sunduğunu gözlemlemişlerdir. Baloch ve diğerleri (2020) yaptığı deneysel çalışmada panel eğim açısını 30° olarak almıştır.

Asgharzadeh, Deline, Stein ve Toor (2018) yaptıkları çalışmada farklı enlemlere sahip lokasyonlarda dikey ve doğu yönünde kurulan çift yüzlü panellerin, çift yüzlü güneye bakan panellere göre daha yüksek enerji verimine sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Bunun sebebi olarak düşük panel eğim açılarında diğer panellerin gölgelenmesinden daha az etkilenebileceğini belirtmişlerdir. Pike, Whitney, Wilber ve Stein (2021) yaptığı çalışmada dikey konumda doğu-batı yönüne bakan çift yüzlü panellerin güneye bakan çift yüzlü paneller ile hemen hemen aynı üretime sahip olduğunu belirtmiştir. Guo, Walsh ve Peters (2013) ise dikey olarak doğuya bakan çift yüzlü panellerin yüksek enlemlerde enerji üretimlerinin daha yüksek olabileceğini sunmuşlardır.

Appelbaum (2018) yaptığı çalışmada çift yüzlü panelin kendi gölgelenmesini araştırmış ve optimum eğimde 1 m panel yüksekliğinin yeterli olacağını belirtmiştir. Wang ve diğerleri (2015) çift yüzlü fotovoltaik panellerin optimum yüksekliğini araştırmıştır. Panel enerji üretiminin maksimum güç noktasına ulaşabilmesi için panel yüksekliğinin 2,5 m olması gerektiğini belirtmiştir. Ghenai ve diğerleri (2021) çalışmasında çift yüzlü panel yüksekliğini 0,5 m, 1 m, ve 1,5 m belirleyerek deneyler gerçekleştirmişlerdir. En iyi verimi 1,5 m yükseklikte almışlardır. Baloch ve diğerleri (2020) ise deneylerinde panel yüksekliğini 1,1 m olarak kullanmıştır. Artan panel yüksekliği ile yansıma yüzeyi de artmaktadır. Ancak panel yüksekliğinin artması panel arka yüzeyine gelen ışınımın azalmasına ve panel arka yüzeyinden enerji üretim katkısının azalmasına sebep olmaktadır. Bu yüzden optimum bir yükseklik gerekmektedir. Yapılan çalışmada Yusufoglu ve diğerleri (2015) panel doygunluk yüksekliğinin 1-2 m aralığında olmasının yeterli olacağını belirtmiştir. Yapılan çalışmalarda modülün alt kenarının yerden yüksekliği arttıkça arka yüzeye gelen ışınım yapısının daha homojen olduğu görülmüştür. Ayrıca zemine yakın yüksekliklerde modülün kendi gölgesi yansıma gerçekleştirecek yüzeye düştüğü için yansıyan ışınım miktarı azalmakta ve homojenliği bozulmaktadır. Arka yüzeye gelen ışınımın az olduğu bölgeler arka yüzey kazancını sınırlar (Kreinin ve diğerleri, 2010).

Çift yüzlü panel performansını etkileyen bir diğer parametre ise panellerin birbirinin gölgelenmesinden etkilenmeden konumlandırılmasıdır. Shoukry ve diğerleri (2016) yaptıkları çalışmada çift yüzlülük kazanımının her bir panel arası mesafe 2,5 m olana kadar arttığını, bu

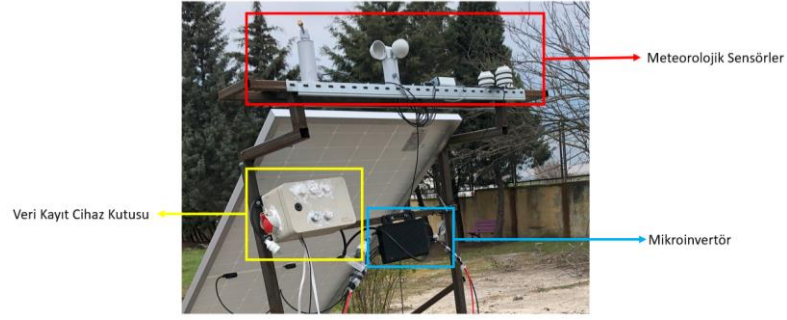
değerden sonra sabit kaldığını gözlemlemişlerdir. Baloch ve diğerleri (2020) ise yaptıkları çalışmada çift yüzlü güneş panelleri arası mesafeyi 4,5 m olarak almışlardır.

Yapılan çalışma Nisan, Mayıs, Haziran, Temmuz, Ağustos ve Eylül ayları olmak üzere toplam altı ayı kapsamaktadır. Bunun sebebi bölgenin ışıınım miktarının bu aylarda daha fazla olmasıdır. Çalışmada çift yüzlü güneş panelleri doğu yönüne dikey olarak, tek yüzlü güneş panelini ise güney yönüne dikey olarak konumlandırıldı. Çift yüzlü güneş panelleri arasında 2,5 m mesafe bırakılarak ve arka arakaya gelmemesine dikkat edilerek panellerin birbirini gölgelendirmesi en aza indirildi. Çift yüzlü güneş panellerinden bir tanesi yerden 50 cm diğeri ise 100 cm yükseğe konumlandırılarak sabitlendi. Deneylerde tek yüzlü panel eğim açısı 40° eğimde sabit bırakılırken çift yüzlü güneş panelleri iki aylık periyotlarla 30° , 40° ve 50° panel eğim açılarında kullanılmıştır. Deneyler boyunca maksimum performans sağlanması adına çift yüzlü güneş panellerin zemini beyaz membran ile kaplanarak albedo değerini en yüksek seviyeye getirilmesi sağlanmıştır (Şekil 3.16).



Şekil 3.16 Deney düzeneği

Deney tasarımı tamamlandıktan sonra meteoroloji istasyonu ve mikro invertör tek yüzlü fotovoltaiik panelin üstüne ve altına konumlandırılmıştır. Veri kayıt cihazı ve elektrik aktarım kabloları çevresel etkilerden etkilenmemesi adına izole edilmiş bir kutu içerisine yerleştirilmiştir (Şekil 3.17).

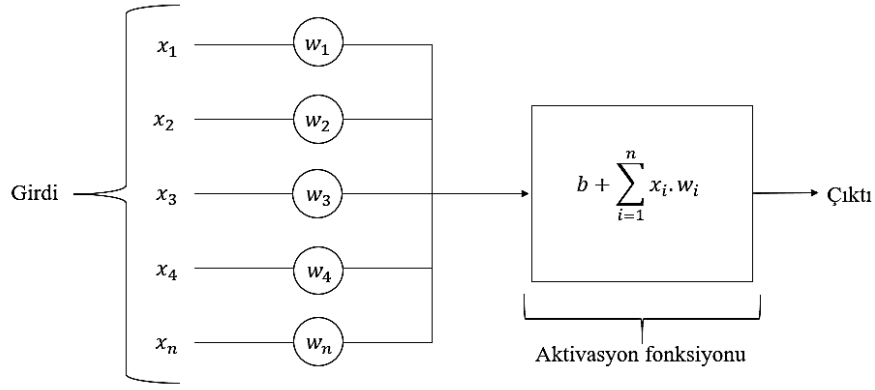


Şekil 3.17. Meteoroloji istasyonu, mikro invertör ve veri kayıt cihazı

3.2.2 Yapay Sinir Ağları

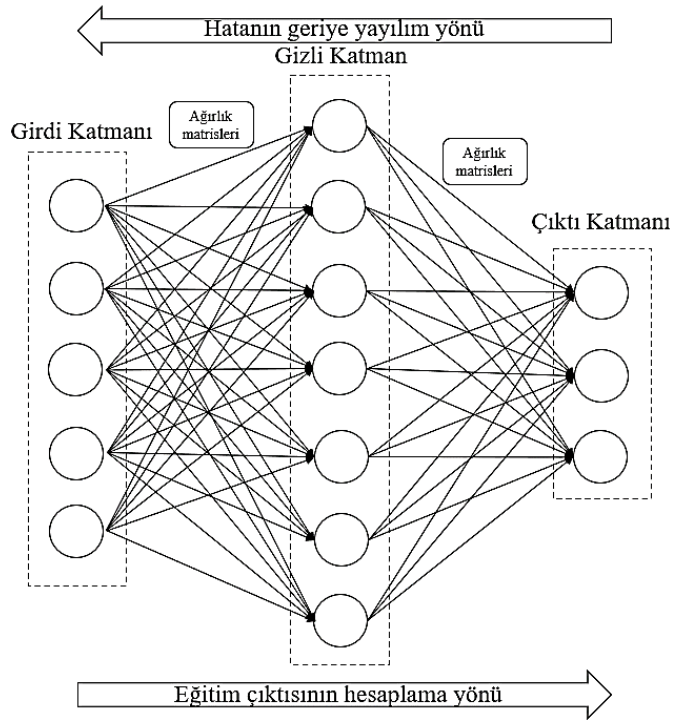
Yapay sinir ağları (YSA), insan beyinin biyolojik sinir yapısından esinlenerek geliştirilen bir programlama şeklidir. Karmaşık problemlerin çözülmesi, istatistiksel tahmin, görüntü işleme alanlarında oldukça sık kullanılmaktadır. Genel olarak YSA, sinir ağı işleminin temelini oluşturan birbirine bağlı "nöronlar" sistemi olarak temsil edilebilir. Ağırlık parametreleri ve aktivasyon fonksiyonları nöronların bir parçasıdır (Maier ve Dandy, 2000; T.-S. Wang, Tan, Chen ve Tsai, 2008). Yapay sinir ağları genel olarak girdi, gizli ve çıktı olmak üzere üç katmana ayrılır. Gizli katmandaki nöronlar farklı girdilerden aldıkları bilgileri aktivasyon fonksiyonları ve rastgele ya da optimize edilmiş ağırlıklar ile işleyerek çıktı katmanına yakınsamayı amaçlamaktadırlar. Yapay sinir ağ mimarisinde başarı büyük ölçüde veri miktarına bağlıdır (Loke, Warnaars, Jacobsen, Nelen ve do Céu Almeida, 1997). Ağırlıkların elde edilmesi genellikle rastgele olmasına karşın genetik algoritma, parçacık sürü optimizasyonu gibi algoritmalar ile bu ağırlıklar optimize edilebilmektedir. Yapay sinir ağlarının birçok öğrenme algoritması olmasına karşın Levenberg-Marquardt algoritması ve geri yayılım (BP) algoritması en yaygın kullanılan algoritmalar (Kiran ve Miklas, 2012; Nour, Smith, El-Din ve Prepas, 2006). Yapay sinir ağlarında kullanılan aktivasyon fonksiyonları her katmanda farklı olabilir. Literatürde en çok kullanılan aktivasyon fonksiyonları doğrusal, adım, hiperbolik tanjant ve sigmoid olarak belirtilmektedir ve zamana bağlı serilerin tahmini için "Sigmoid" fonksiyonu önerilmektedir (Tebelskis, 1995).

Şekil 3.18'de bir biyolojik nöronun matematiksel olarak ifadesi görülmektedir. x_n ; n sayıda girdiyi, w_n ; n girdiye karşılık gelen ağırlığı b ise standart sapmayı ifade etmektedir.



Şekil 3.18. Nöronun matematiksel olarak ifadesi

Yapay sinir hücreleri bir araya gelerek yapay sinir ağının yapısını oluşturmaktadır. Girdi verileri yapay sinir ağındaki katmanlardan geçerek işlenir ve çıktı katmanını oluşturmaktadır. Girdi katman sayısı ve çıktı katman sayısı problemin durumuna göre değişmektedir. Yapay sinir ağlarındaki katman sayısının ve nöron sayısının belirlenmesine yönelik herhangi bir matematiksel ifade bulunmamaktadır. Gizli katman sayısı ve nöron sayıları sadece deneme yanılma yöntemi ile yapılarak maksimum yaklaşımın bulunması gerekmektedir. Yapay sinir ağlarının en büyük dezavantajı olarak bu durum görülmektedir. Şekil 3.19’da tek gizli katmana sahip ileri beslemeli geri yayımlı bir yapay sinir ağ mimarisi görülmektedir.



Şekil 3.19. İleri beslemeli geri yayımlı YSA mimarisi

Şekil 4.18’de girdi katmanı ile gizli katman arasındaki ve gizli katman ile çıktı katmanı arasındaki bağlantılar ağırlık değerleridir. Bu ağırlıklar girdi verilerinin nöron üzerindeki etkisini ifade eden katsayıdır. Rastgele olarak atanan bu ağırlık değerleri eğitim esnasında çıktı değerleri ile gerçek değerler arasındaki hata oranı en aza inene kadar geriye doğru yayılır ve tekrar hesaplanır. Bu şekilde ileri beslemeli geri yayımlı bir ağ mimarisi oluşturulmuş olmaktadır.

Yapay sinir ağlarında verilerin hazırlanması ağın başarısı için büyük önem taşımaktadır. Deneyler esnasında sensör hataları, iletim hataları gibi durumlardan kaynaklanan olağan dışı veriler olabilmektedir. Bunun önüne geçebilmek için tüm verilerin incelenmesi ve sürece uygunluğu kontrol edilmesi gerekmektedir. Aynı zamanda eğitim setlerindeki verilerin rastgele karıştırılarak verilmesi ağın verileri ezberlemesi yerine öğrenmesi sağlanır ve ağ performansı daha yüksek olmaktadır (Ay, 2010).

Yapay sinir ağlarında eğitim performansı Pearson korelasyon katsayısı (R) ve ortalama hataların karesi (MSE) değerine göre belirlenmektedir. Bu değerlere bakılarak ağın performansı hakkında yorum yapılabilen ve başarısı gözlenmektedir. Pearson korelasyon katsayısı iki sürekli değişken arasındaki istatistiksel ilişkiyi ifade eder. Katsayı -1 ile +1 arasında değerler almaktadır. Korelasyon katsayısının +1’e yakın olması değişkenler arasında pozitif bir ilişki olduğunu 0 ve -1’e yakın olması durumunda ise iki değişken arasında herhangi bir ilişki olmadığı anlamına gelmektedir. Korelasyon katsayısının 0’a yakın olması zayıf korelasyon anlamına gelmektedir (Yousif, Kazem, Alattar ve Elhassan, 2019). Ortalama hataların karesinin ise 0 değerine olabildiğince yakın olması istenen bir durumdur. Aşağıdaki korelasyon katsayısının (R) ve ortalama hataların karesi (MSE) değerinin hesaplanmasında kullanılan denklemler verilmiştir.

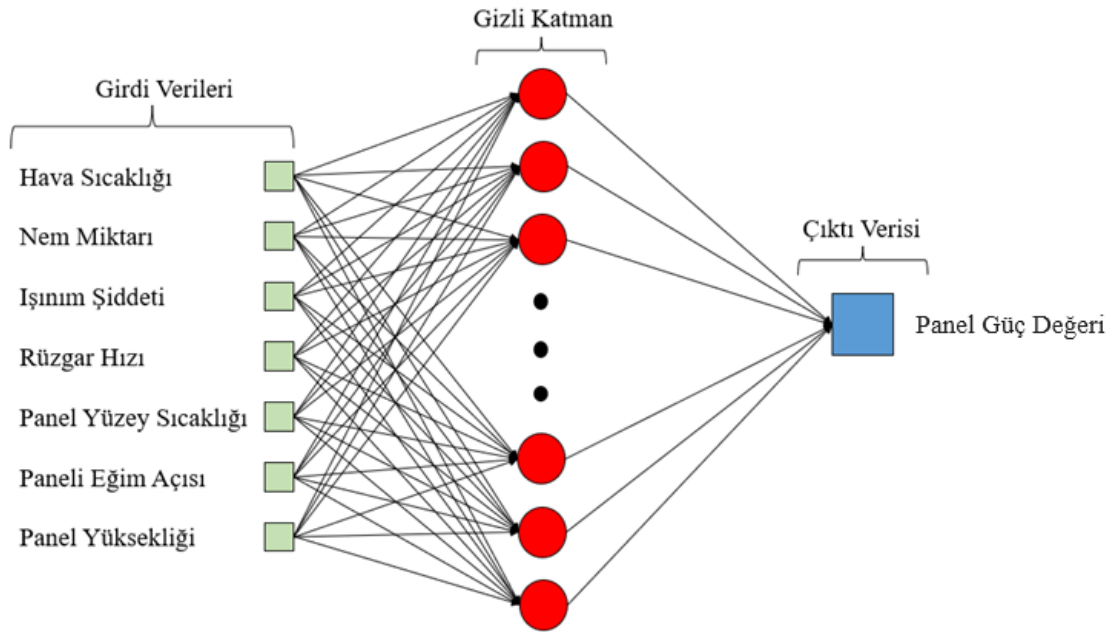
$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2 \quad (3.1)$$

Burada Y_i ve X_i sırasıyla tahmin değerini ve gerçek değeri ifade etmektedir. n ise bu değerlerin sayısıdır.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}) \cdot (Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (3.2)$$

Burada $\bar{X}$ gerçek değerlerin (X_i) ortalamasını, $\bar{Y}$ ise tahmin edilen değerlerin (Y_i) ortalamasını ifade etmektedir.

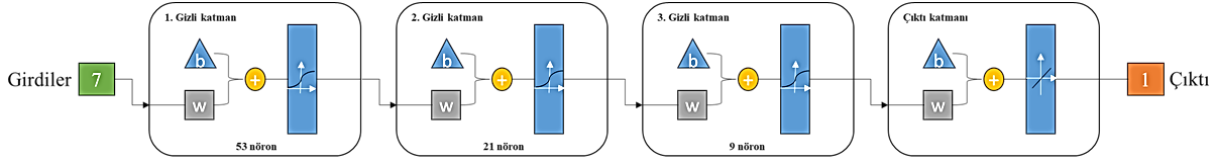
Çalışmada altı ay süresince hem panel enerji üretim verileri hem de meteorolojik veriler kullanılmıştır. Çift yüzlü güneş panellerinin eğim açısı ve yüksekliği yüzey sıcaklıkları, ışıınım miktarı, hava sıcaklığı, nem oranı ve rüzgâr hızı yedi adet girdi parametresi olarak tanımlanmıştır. Çıktı parametresi olarak ise panellerin enerji üretimleri tanımlanmıştır (Şekil 3.20).



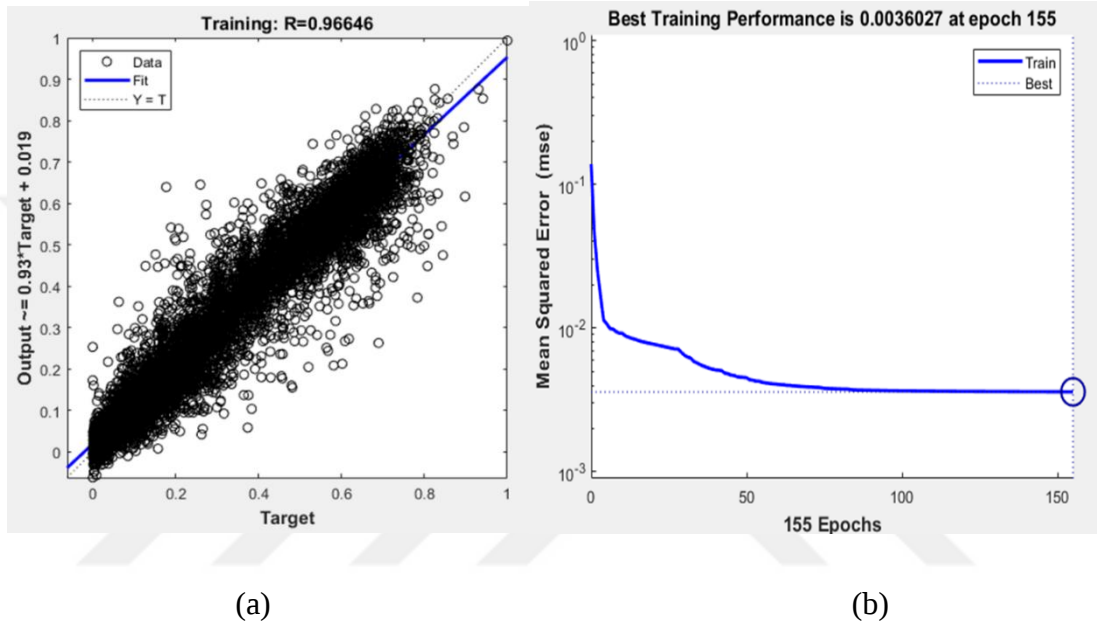
Şekil 3.20. Yapay sinir ağ mimarisi

Yapay sinir ağının eğitim algoritması oluşturmak için çok sayıda konfigürasyon denenmiştir. Katman sayısı, katman sayılarında bulunacak nöron sayıları ve kullanılacak aktivasyon fonksiyonları farklı şekillerde denenmiştir (Çizelge 3.8). Bu konfigürasyonların sonuçlarında ortalama kare hatası (MSE) ve korelasyon katsayısı (R) değerinin istenen seviyeye ulaşması amaçlanmıştır. Yapılan eğitim tasarımlarından en yüksek performansın 3 gizli katman, ilk katmanda 53 nöron ikinci gizli katmanda 21 nöron, üçüncü gizli katmanda 9 nöron ve her üç katmanda da logaritmik sigmoid aktivasyon fonksiyonunun kullanılmasının en düşük

MSE (0,0036027) ve en yüksek R (0,96646) değerine sahip olduğu saptanmıştır (Şekil 3.22). Oluşturulan ağı yapısı Şekil 3.21’de görsel olarak verilmektedir.



Şekil 3.21. Eğitilmiş yapay sinir ağı mimarisi



Şekil 3.22. Ağ eğitiminde (a) en yüksek korelasyon katsayısı ve (b) en düşük MSE değeri

Çizelge 3.8. Eğitim algoritmalarının konfigürasyonları

Eğitim sürecinde test edilen çeşitli yapılandırmalar											
1 gizli katmanlı ağ			2 gizli katmanlı ağ				3 gizli katmanlı ağ				
1. Katman			1. Katman	2. Katman			1. Katman	2. Katman	3. Katman		
Nöron sayısı / aktivasyon fonksiyonu	R	MSE	Nöron sayısı / aktivasyon fonksiyonu	Nöron sayısı / aktivasyon fonksiyonu	R	MSE	Nöron sayısı / aktivasyon fonksiyonu	Nöron sayısı / aktivasyon fonksiyonu	Nöron sayısı / aktivasyon fonksiyonu	R	MSE
30/LS	0.88292	5.12E+04	10/LS	5/LS	0.80307	7.73E+03	10/LS	10/LS	10/TH	0.9069	3.52E+07
120/LS	0.88993	4.96E+04	100/LS	45/LS	0.86238	5.63E+03	42/TH	67/LS	75/TH	0.8921	4.32E+07
250/LS	0.88965	5.29E+04	30/LS	10/TH	0.86194	4.53E+03	35/TH	12/TH	24/LS	0.8739	4.07E+07
80/TH	0.88791	5.14E+04	100/LS	60/TH	0.67892	1.16E+04	40/LS	6/TH	82/TH	0.89019	3.55E+03
150/TH	0.88894	5.00E+04	45/TH	25/LS	0.87404	4.82E+04	14/TH	55/TH	42/TH	0.70688	1.07E+04
180/TH	0.89244	4.95E+04	75/TH	40/TH	0.87266	4.99E+04	30/TH	64/LS	22/LS	0.67892	1.16E+04

Oluşturulan yapay sinir ağı oluşturulmasında eğitimin gerçekleştirildiği sınır koşulları Çizelge 3.9’da verilmiştir.

Çizelge 3.9. YSA sınır koşulları

Faktörler	Sınır Koşulları
Girdi sayısı	7
Gizli katman sayısı	3
1. Gizli katmandaki nöron sayısı	53
2. Gizli katmandaki nöron sayısı	21
3. Gizli katmandaki nöron sayısı	9
Çıktı sayısı	1
Eğitim algoritması	Levenberg-Merquardt
Öğrenme algoritması	LearnGdm
Aktivasyon fonksiyonu	Logaritmik Sigmoid
Döngü sayısı	1000
Ağ türü	İleri beslemeli geri yayımlı

3.2.3 Termodinamik Analiz

3.2.3.1 Enerji Analizi

İş ya da iş yapabilme yeteneği olarak tanımlanan enerji, bir sistemin ne kadar iş ya da ısı alışverişi yapabileceğini tanımlayan bir durum fonksiyonudur. Termodinamiğin ilk yasasına göre “evreninin toplam enerjisi sabittir.” Bu kavrama göre enerjinin vardan yok yoktan var edilemeyeceği ve dolayısıyla korunacağı anlamı çıkmaktadır. Fotovoltaik sistemlerde Güneş enerjisinin verimli kullanılması termal kayıpların azaltılmasına bağlıdır. Termodinamik analizlerle belirlenen termal kayıplar için sistemde gerekli iyileştirmeler yapılması enerji verimliliğini arttıracaktır (Ozturk, Dogan ve Yesilyurt, 2023).

Fotovoltaik sistemlerde enerji verimi, panelin ürettiği enerji miktarının panele giren enerji miktarına oranı ile bulunmaktadır ve Denklem 3.3 ile hesaplanmaktadır.

$$\eta_{fv} = \frac{En_{c,fv}}{En_{g,fv}} \quad (3.3)$$

Burada, η_{fv} , $En_{c,fv}$ ve $En_{g,fv}$ sırasıyla fotovoltaik panelin verimini, fotovoltaik panelin ürettiği enerji miktarını ve panele giren enerji miktarını vermektedir.

Bir fotovoltaik panele giren enerji değeri Denklem 3.4 ile hesaplanmaktadır. Burada A_{fv} fotovoltaik panelin yüzey alanını, S_T ise toplam solar radyasyonu vermektedir.

$$En_{g,fv} = A_{fv} \cdot S_T \quad (3.4)$$

Fotovoltaik panelin ürettiği enerji miktarı ise Denklem 3.5 ile hesaplanmaktadır.

burada sırasıyla V_{adv} , I_{kda} , $\dot{Q}_t$, P_{max} ve FF açık devre voltajı (V), kısa devre akımı (A), termal enerji (J), maksimum çıkış gücü (W) ve doldurma faktörüdür (Bayat ve Ozalp, 2018; Joshi, Dincer ve Reddy, 2009a).

$$En_{\zeta, fv} = V_{adv} \cdot I_{kda} + \dot{Q}_t = \frac{P_{max}}{FF} + \dot{Q}_t \quad (3.5)$$

Termal enerji ise Denklem 3.6 ile ifade edilebilir (Joshi, Dincer ve Reddy, 2009b),

$$\dot{Q}_t = h_{fv} \cdot A_{fv} \cdot (T_{fv} - T_{ortam}) \quad (3.6)$$

burada h_{fv} fotovoltaik panel ile atmosfer arasındaki taşınım ve ışıyım ısı transfer katsayısıdır. T_{fv} fotovoltaik hücrenin sıcaklığını, T_{ortam} ise havanın sıcaklığını temsil etmektedir.

Fotovoltaik panel ile atmosfer arasındaki taşınım ve ışıyım ısı transfer katsayısı rüzgâr hızına (v_R) bağlı olarak Denklem 3.7 ile hesaplanabilir (Joshi ve diğerleri, 2009b),

$$h_{fv} = 5.7 + 3.8 \cdot v_R \quad (3.7)$$

Doldurma faktörünü hesaplamak için Denklem 3.8 kullanılır. Burada, V'_{adv} ve I'_{kda} atmosferik şartlara göre değişen devre voltajı ve kısa devre akımıdır (Joshi ve diğerleri, 2009b).

$$FF = \frac{P_{max}}{V'_{adv} \cdot I'_{kda}} \quad (3.8)$$

Atmosferik şartlara göre değişen devre voltajı Denklem 3.9, atmosferik şartlara göre değişen kısa devre akımı ise Denklem 3.10'da görülmektedir.

$$V'_{adv} = V_{adv} \cdot \frac{100 + ((T_{fv} - 25) \cdot (T_{fv,stk}))}{100} \quad (3.9)$$

$$I'_{kda} = I_{kda} \cdot \frac{S_T}{1000} \quad (3.10)$$

burada, $T_{fv,stk}$ standart test koşullarında fotovoltaiik panelin sıcaklığına bağlı voltaj değişim katsayısını ifade etmektedir.

Maksimum elektrik enerjisi verimliliği ($\eta_{max,ev}$) ise fotovoltaiik panelden üretilen maksimum elektrik enerjisinin toplam giriş enerjisine oranı ile Denklem 3.11 ile ifade edilmektedir (Bayat ve Ozalp, 2018; Joshi ve diğerleri, 2009a).

$$\eta_{max,ev} = \frac{V_{adv} \cdot I_{kda}}{S_T \cdot A_{fv}} = \frac{\frac{P_{max}}{FF}}{S_T \cdot A_{fv}} \quad (3.11)$$

3.2.3.2 Ekserji Analizi

Ekserji, çevre şartları ile denge koşullarının sağlanması durumunda teorik olarak elde edilebilecek maksimum iş miktarıdır (Akyol, Akal ve Durak, 2021). Başka bir deyişle ekserji, enerjinin işe dönüştürülebilir kısmıdır ve aynı zamanda kullanılabilirlik olarak da ifade edilir (Sudhakar ve Srivastava, 2014). Ekserji büyük ölçüde fotovoltaiik panelin sıcaklığına bağlıdır ve sıcaklık arttıkça artmaktadır (Petela, 2005).

Fotovoltaiik sistemlerde ekserji, ekserji verimliliği (ψ_{fv}) olarak tanımlanmaktadır. Çıkış ekserjisinin ($\dot{E}x_{çıkış}$) giriş ekserjisine ($\dot{E}x_{giriş}$) oranı olarak Denklem 3.12 ile ifade edilebilir.

$$\psi_{fv} = \frac{\dot{E}x_{çıkış}}{\dot{E}x_{giriş}} \quad (3.12)$$

Çıkış ekserjisi fotovoltaiik panelin ekserjisi, giriş ekserjisi ise Güneş ekserjisi olarak bilinmektedir.

$$\psi_{fv} = \frac{\dot{E}x_{çıkış}}{\dot{E}x_{giriş}} = \frac{\dot{E}x_{fv}}{\dot{E}x_s} \quad (3.13)$$

Bir fotovoltaik sistemin birim zamanda ekserji hesaplaması Denklem 3.14'te verilmiştir (Joshi ve diğerleri, 2009a).

$$\dot{E}x_{fv} = V_{max} \cdot I_{max} - h_{ca} \cdot A_{fv} \cdot (T_{fv} - T_{ortam}) \left(1 - \frac{T_{ortam}}{T_{fv}} \right) \quad (3.14)$$

Jeter Solar ekserji modelinin ifadesi Denklem 3.15'te verilmiştir. Jeter güneş ekserji modeli güneş ekserjisinin hesaplanmasında en çok tercih edilen modeldir (Jeter, 1981). Bu çalışmada güneş sıcaklığı ($T_{güneş}$) 5777 K olarak alınmıştır (Holmberg, Flynn ve Portinari, 2006).

$$\dot{E}x_s = \left[1 - \left(\frac{T_{ortam}}{T_{güneş}} \right) \right] \cdot S_T \cdot A_{fv} \quad (3.15)$$

Denklemler 3.14 ve 3.15, Denklem 3.16'da ikame edilerek, bir PV sisteminin ekserji verimliliği ifadesi aşağıdaki şekilde ifade edilir (Bayat ve Ozalp, 2018; Joshi ve diğerleri, 2009a).

$$\psi_{fv} = \frac{V_{max} \cdot I_{max} - h_{ca} \cdot A_{fv} \cdot (T_{fv} - T_{ortam}) \left(1 - \frac{T_{ortam}}{T_{fv}} \right)}{\left[1 - \left(\frac{T_{ortam}}{T_{güneş}} \right) \right] S_T \cdot A_{fv}} \quad (3.16)$$

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

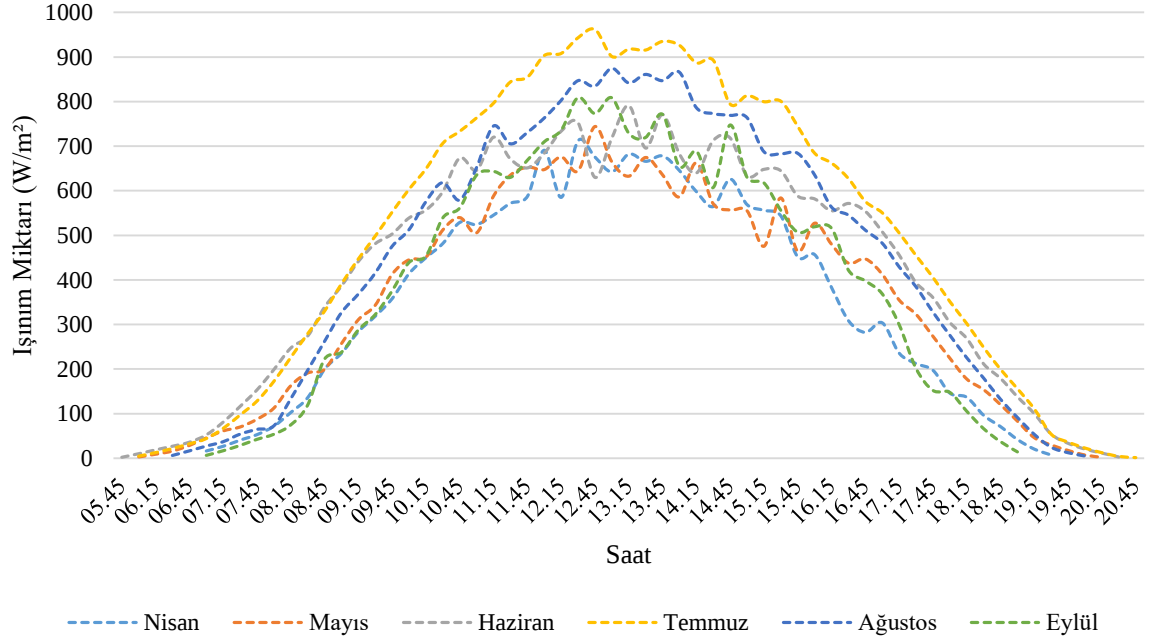
4.1 Meteorolojik Ölçümler

Işınım miktarı, rüzgâr hızı, nem oranı, hava sıcaklığı ve panel yüzey sıcaklığı değerlerinin aylara göre saatlik ortalamaları aşağıda grafiklerde verilmiştir. Bu değerler hesaplanırken, bir ayın günlerinin aynı saatinde ölçülen değerlerin aritmetik ortalaması alınmıştır. Bu ortalamalar, ilgili ay için aynı zamana denk gelen değer olarak tanımlanmıştır.

$$\bar{X}[h, d] = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^{k=n} X[k, h, d] \quad (4.1)$$

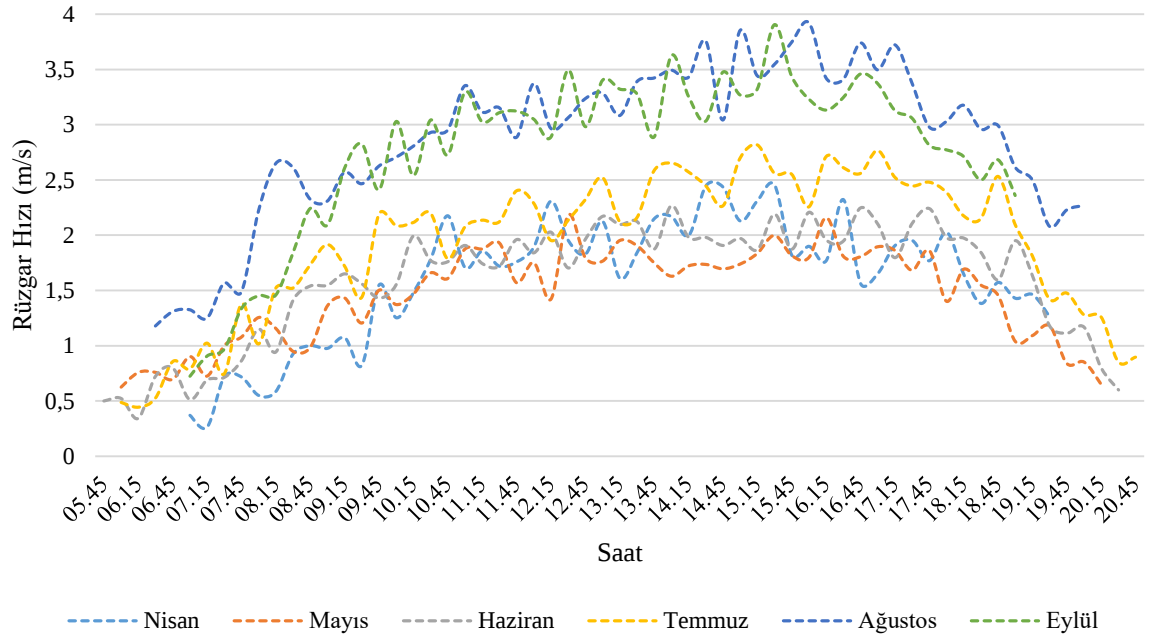
Burada, ayın gün sayısı n , ölçüm yapılan zaman diliminin saati h , ölçüm yapılan zaman diliminin dakikası d , belirli bir ay boyunca ilgili zaman diliminde ölçülen değerlerin aritmetik ortalaması $\bar{X}[h, d]$, ve belirli bir ayın k . gününde ilgili zaman dilimindeki ölçülen değer $X[k, h, d]$ olarak tanımlanmıştır.

Şekil 4.1’de 2013 yılı Nisan, Mayıs, Haziran, Temmuz, Ağustos ve Eylül aylarının saatlik ortalama global radyasyon miktarları gösterilmiştir. Saatlik ortalama, tüm günlerin aynı saatlerinin ortalamaları alınarak hesaplanmıştır. Bu grafiğe göre yılın en güneşli 6 ayı gözlemlendiğinde temmuz ayı ortalamasında maksimum 960 W/m^2 ve ağustos ayı ortalamasında ise maksimum 875 W/m^2 değerine ulaşarak en yüksek ışıınım miktarına sahip olduğu gözlenmiştir. Nisan ve mayıs aylarında ise sırasıyla maksimum 710 W/m^2 ve 650 W/m^2 değerine ulaşarak en düşük maksimum ışıınım değerlerine sahip olmuştur.



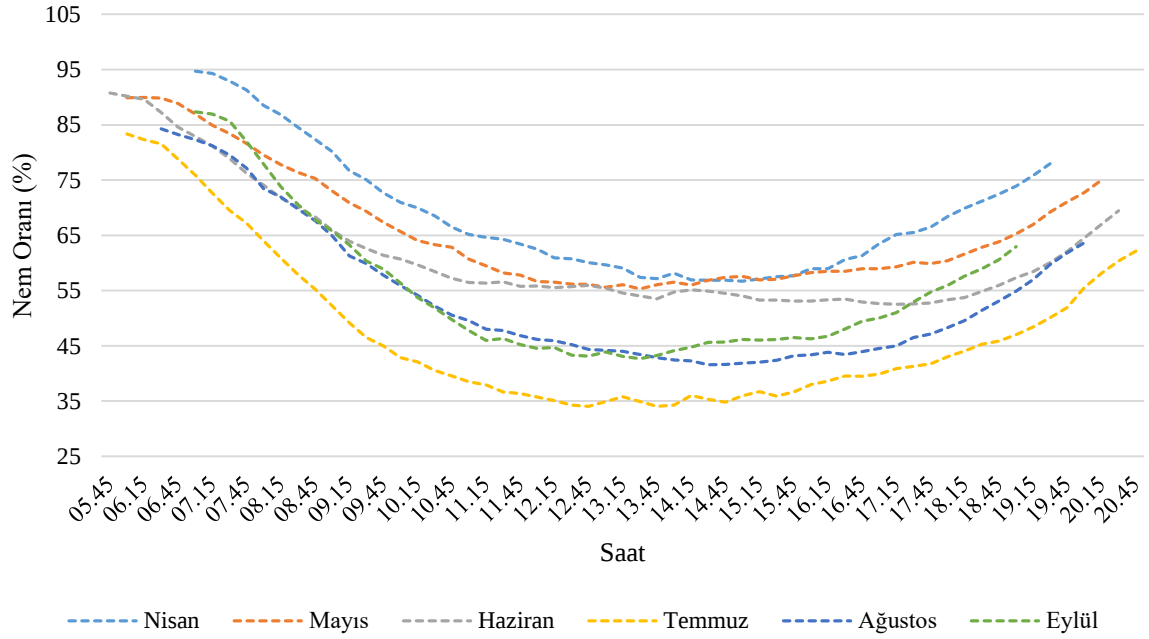
Şekil 4.1. Saatlik ortalama ışıınım değęerlerinin aylara göre değışimi

Şekil 4.2’de 6 aylık rüzgâr hızının saatlik ortalamaları gösterilmektedir. Grafiğe göre ağustos ve eylöl aylarında rüzgâr hızı ölçümler süresince en yüksek değęerlere ulaşmıştır. Ağustos ayında yaklaşık 3,92 m/s, eylöl ayında ise yaklaşık 3,90 m/s hızlara ulaşmıştır. Nisan, mayıs ve haziran ayları birbirine yakın rüzgâr hızlarına sahipken temmuz ayında rüzgâr hızı nispeten artmıştır.



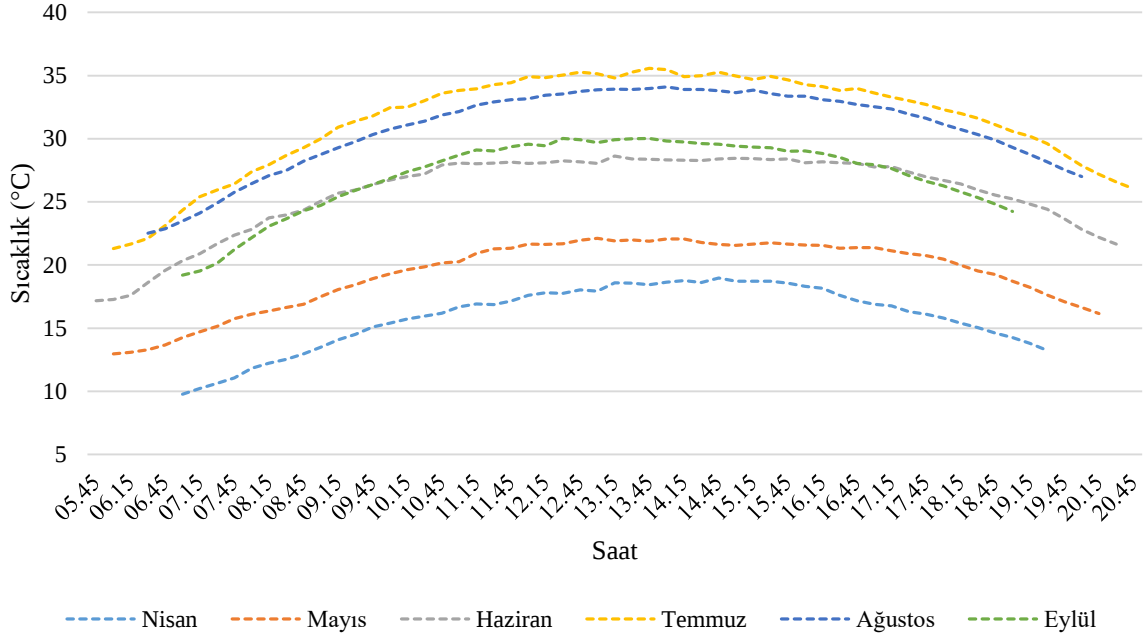
Şekil 4.2. Saatlik ortalama rüzgâr hızı değęerlerinin aylara göre değışimi

Şekil 4.3'te aylık ortalama nem oranlarının saatlik ortalamaları gösterilmektedir. Nem oranının sabah ve akşam saatlerinde yükseldiği öğle saatlerinde ise minimuma indiği görülmektedir. Temmuz ve ağustos gibi diğer aylara nispeten sıcak aylarda nem oranı nispeten düşüktür. Nisan ve mayıs aylarında ise nem oranının az da olsa arttığı görülmektedir.



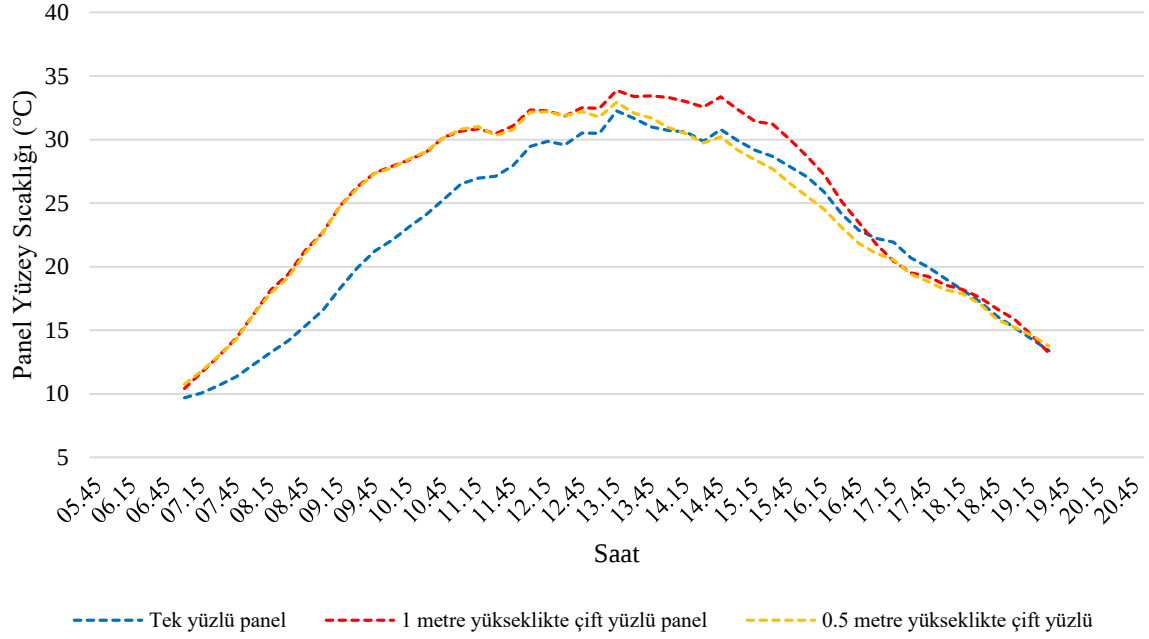
Şekil 4.3. Saatlik ortalama nem değerlerinin aylara göre değişimi

Hava sıcaklığına ait saatlik ortalama değişimler Şekil 4.4'te verilmiştir. Temmuz ve ağustos aylarında sırasıyla maksimum 35,15°C ve 34,10°C değerlerine ulaşmıştır. En düşük maksimum sıcaklıklar ise nisan ve mayıs aylarında sırasıyla 18,55°C ve 22°C olarak gözlenmiştir. Haziran ve temmuz aylarında ise hava sıcaklığı 30°C civarında değerlere ulaşmıştır.

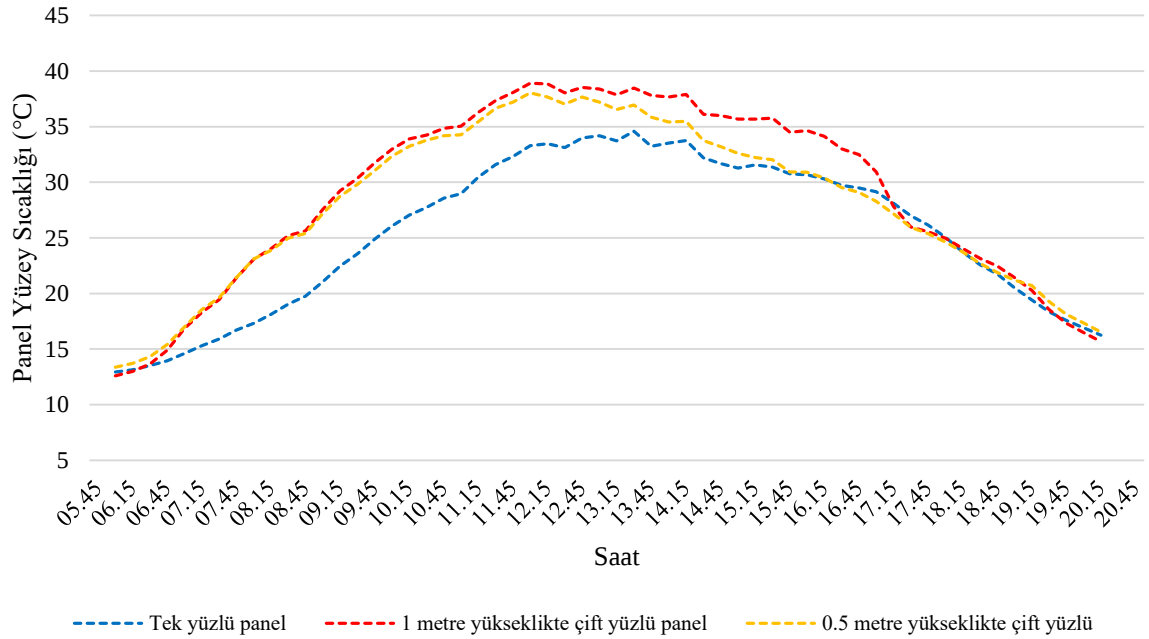


Şekil 4.4. Saatlik ortalama sıcaklık değerlerinin aylara göre değişimi

Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da nisan ve mayıs aylarında panellerin yüzey sıcaklıklarının saatlik değişimleri verilmiştir. Nisan ve mayıs aylarında çift yüzlü panellerin eğim açısı 30° olarak ayarlanmıştır. Grafikler incelendiğinde çift yüzlü panellerin sıcaklıkları öğlen saatine kadar hızlıca yükselmiştir. Bunun temel sebebi panel ön yüzeyinin doğu yönüne bakmasıdır. Tek yüzlü klasik panel yüzeyinin güney yönüne bakmasından dolayı yüzey sıcaklığı daha geç yükselmiştir. Saat 17.00 civarına geldiğinde ise klasik tip güneş panelinin yüzey sıcaklığı çift yüzlü güneş panellerinden az da olsa düşük olduğu gözlenmiştir. Ancak bu fark daha yüksek ortam sıcaklıklarında ve daha yüksek panel eğim açılarında artmaktadır. Yerden 1 m ve 0,5 m yükseklikte bulunan iki çift yüzlü panelin yüzey sıcaklıkları ise benzer orantıda yükselmiş ancak 13.00-16.00 saat aralığında ise 1 m yüksekte olan panelin sıcaklığı, 0,5 m yükseklikte olan çift yüzlü panelin sıcaklığından daha yüksek seyrettiği görülmüştür. Bunun sebebi olarak panel yüksekliğinin gölgelenme oranını düşürmesi olarak görülebilir. Artan gölgelenme, güneş ışınımının ve dolayısıyla panel yüzey sıcaklığının azalmasına sebep olabilmektedir.

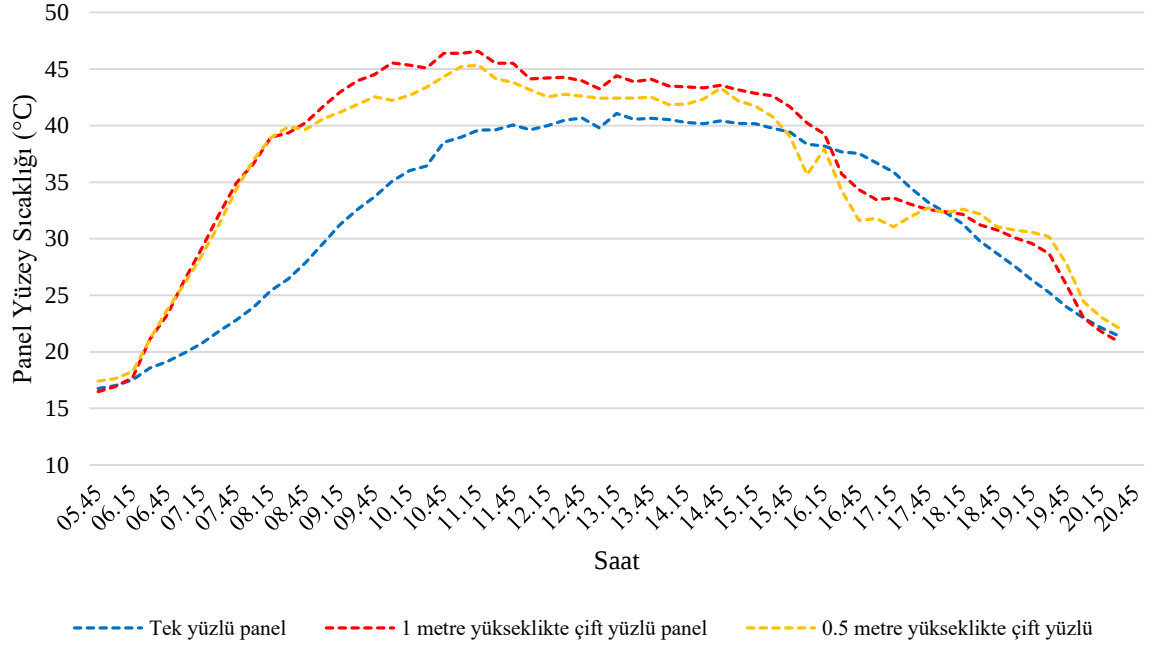


Şekil 4.5. Nisan ayının saatlik ortalama panel yüzey sıcaklıklarının karşılaştırılması

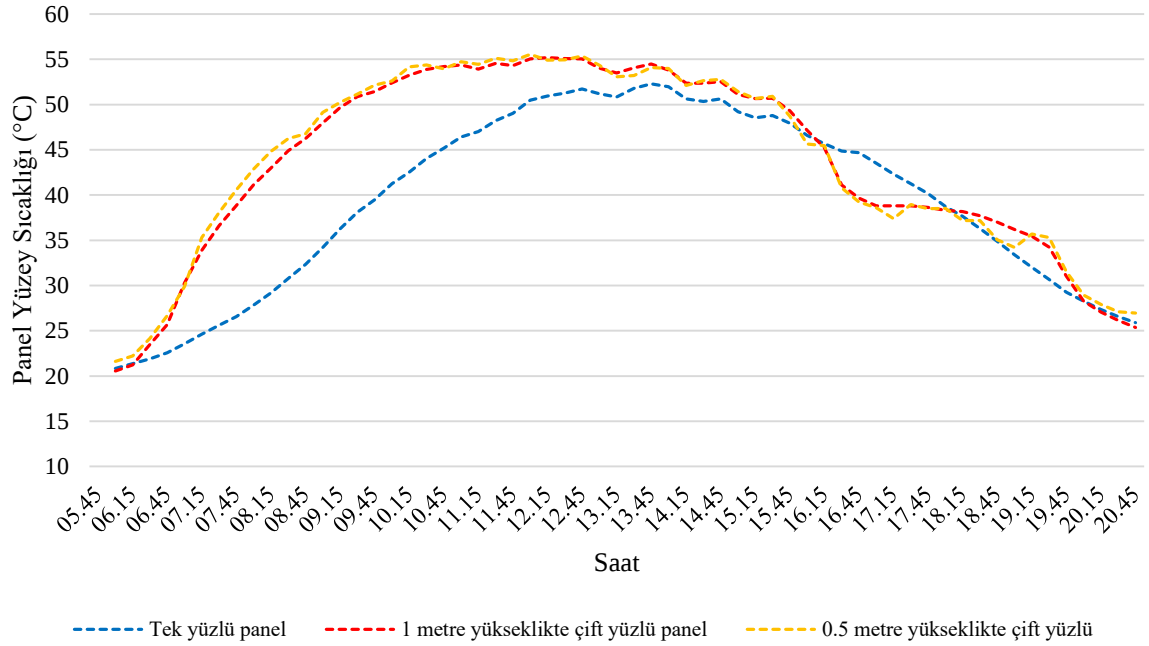


Şekil 4.6. Mayıs ayının saatlik ortalama panel yüzey sıcaklıklarının karşılaştırılması

Haziran ve temmuz aylarına ait panel yüzey sıcaklıklarının ortalama saatlik değişimleri Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de verilmiştir. Haziran ve temmuz aylarında çift yüzlü panellerin eğim açısı 40°’ye getirilmiştir. Grafikler incelendiğinde hava sıcaklığının artması ve panel açısının sabah ilk saatlerinde ortaya çıkan çift yüzlü güneş panelleri ve tek yüzlü güneş paneli arasındaki sıcaklık farkının daha da arttığı gözlenmiştir. Çift yüzlü güneş panellerinin sıcaklıkları birbiri ile uyumlu seyretmiş, aralarında çok fazla değişim gözlenmemiştir.

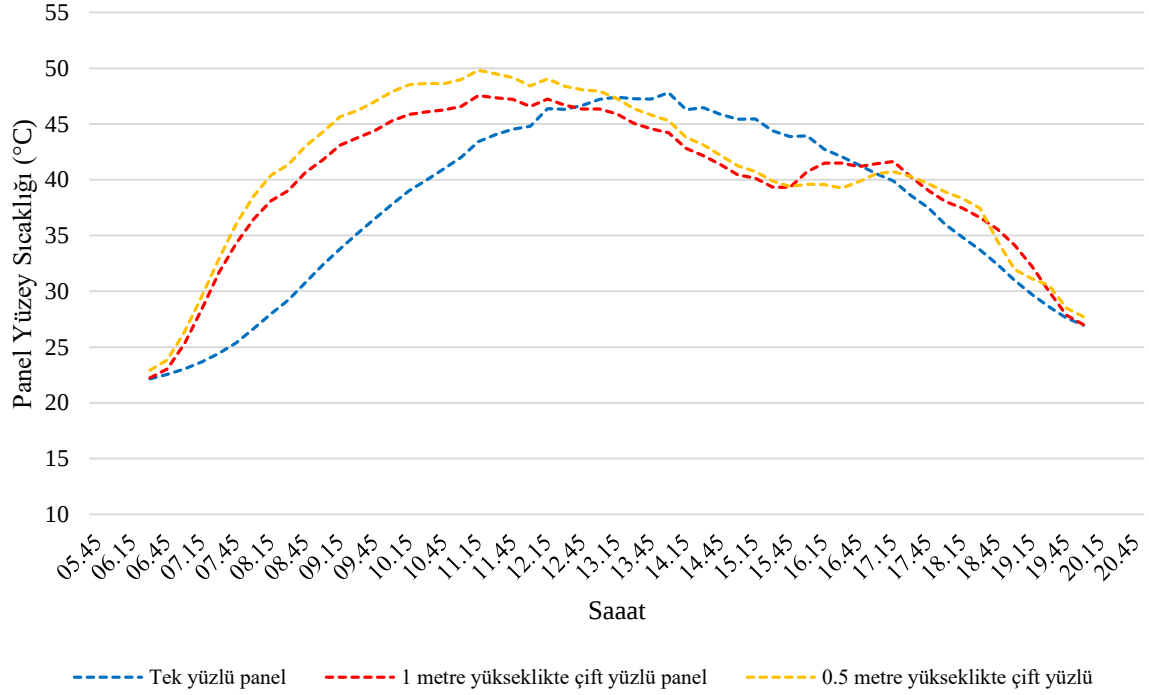


Şekil 4.7. Haziran ayının saatlik ortalama panel yüzey sıcaklıklarının karşılaştırılması

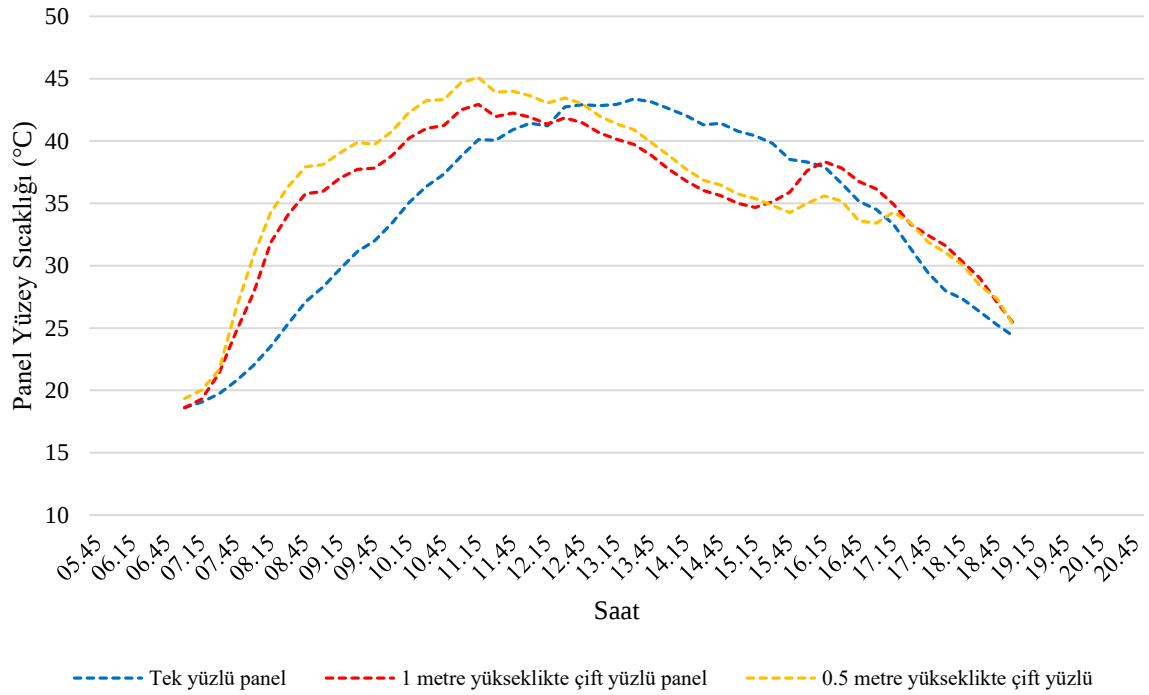


Şekil 4.8. Temmuz ayının saatlik ortalama panel yüzey sıcaklıklarının karşılaştırılması

Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’da ağustos ve eylül aylarına ait panel yüzey sıcaklıklarının değişimi verilmiştir. Bu aylarda çift yüzlü panellerin eğim açıları 50° olarak ayarlanmıştır. Bu grafikler incelendiğinde diğer aylarda olduğu gibi sabah ilk saatlerde çift yüzlü güneş panellerinin sıcaklıklarının tek yüzlü panelden daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 4.9. Ağustos ayının saatlik ortalama panel yüzey sıcaklıklarının karşılaştırılması

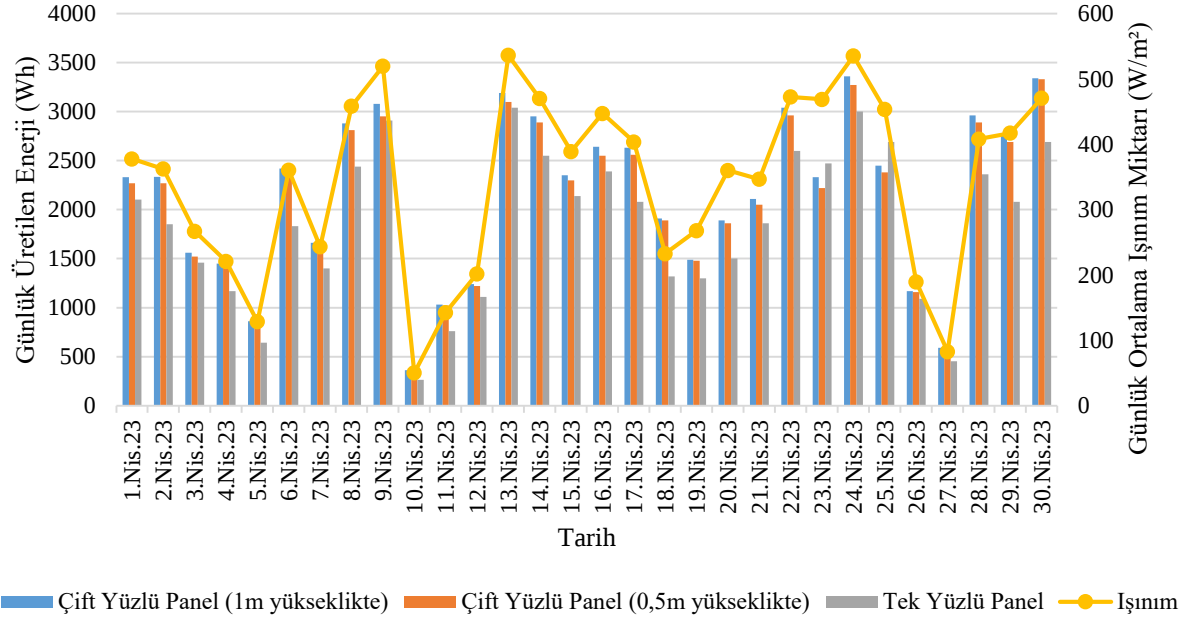


Şekil 4.10. Eylül ayının saatlik ortalama panel yüzey sıcaklıklarının karşılaştırılması

4.2 Fotovoltaik Panellerin Enerji Üretimleri

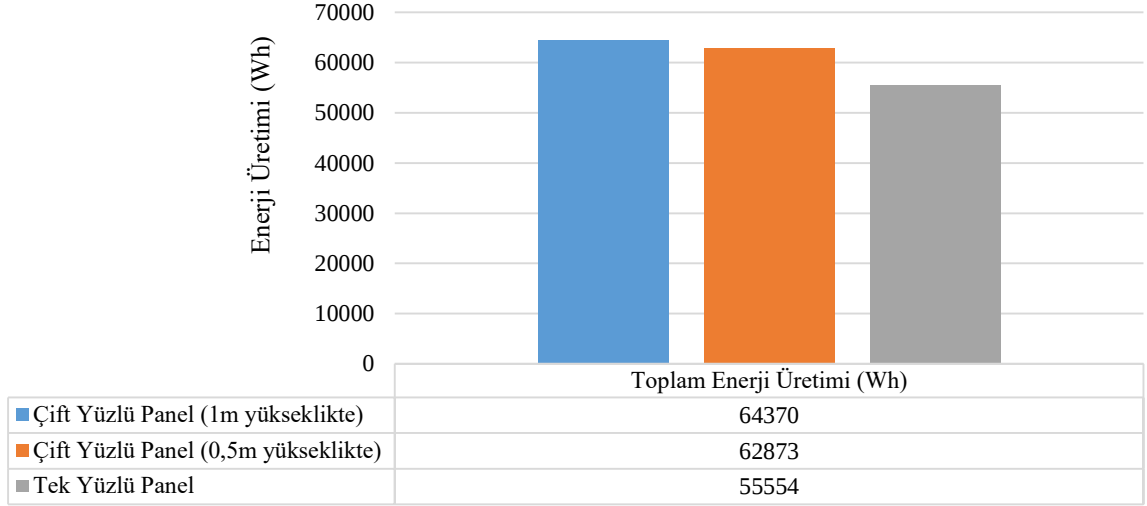
Şekil 4.11’de nisan ayına ait panellerin günlük toplam enerji üretimleri ve günlük ortalama ışınım miktarlarının karşılaştırılması verilmiştir. Nisan ayında çift yüzlü panelleri

30°'lik eğime sahiptir. Grafiği incelediğimizde günlük ortalama ışıınım değerlerinin panellerin toplam enerji üretimleri ile nispeten uyumlu olduğu görülmektedir. Paneller 10 Nisan ve 27 Nisan tarihlerinde en az enerji üretimine sahiptir. Bu zaman aralığına baktığımızda da günlük ortalama ışıınım miktarının bu tarihlerde en düşük olduğu görülmektedir. Klasik tek yüzlü güneş panelinin enerji üretimi ise çift yüzlü panellerden daha azdır.



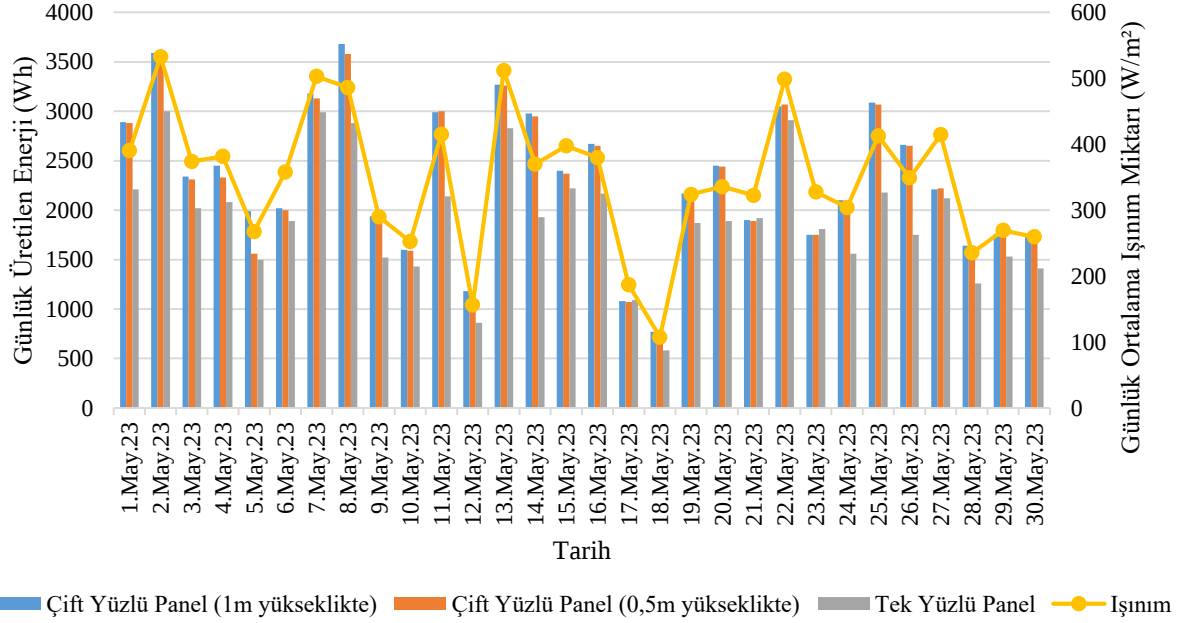
Şekil 4.11. Nisan ayı panellerin günlük toplam üretilen enerji ve günlük ortalama ışıınım miktarı

Şekil 4.12’de panellerin aylık toplam enerji üretimleri gösterilmektedir. Yerden 1 m yükseklikte olan çift yüzlü güneş paneli, klasik tek yüzlü panele göre yaklaşık %16 daha fazla enerji üretmiş, yerden 0,5 m yükseklikte olan çift yüzlü güneş paneline göre ise yaklaşık %2,4 daha fazla enerji üretmiştir. Çift yüzlü güneş panelleri arasındaki bu enerji üretim farkının tek sebebi yerden yüksekliktir. Panelin yüksekliğinin artması, albedo etkisinin artması ve dolayısıyla arka panel yüzeyine gelen ışıınım miktarının artmasına katkı sağlamaktadır.



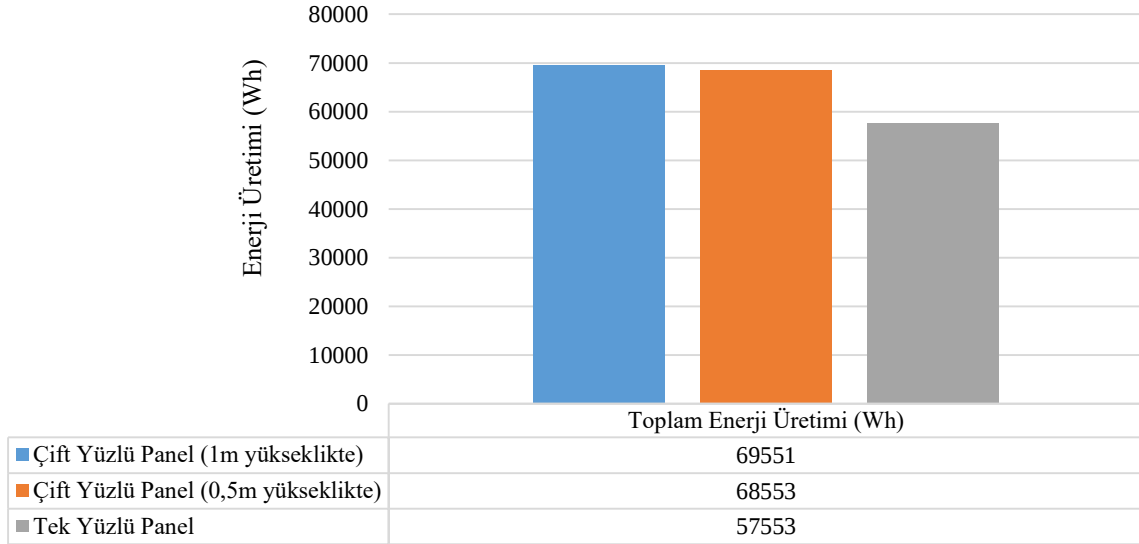
Şekil 4.12. Nisan ayı panellerin toplam enerji üretimleri

Şekil 4.13'te Mayıs ayında panellerin günlük toplam enerji üretimleri ile ortalama ışıınım miktarı karşılaştırılmıştır. Mayıs ayında çift yüzlü panelleri 30°'lik eğime sahiptir. Grafiğe göre 18 Mayıs'ta en düşük ışıınım ortalaması ve enerji üretimi sağlanmıştır. Çift yüzlü güneş panellerinin en yüksek enerji üretimi 8 Mayıs tarihinde olurken en yüksek ortalama ışıınım 2 Mayıs olarak hesaplanmıştır. Bu durum 8 Mayıs tarihinde tahmini güneşlenmenin özellikle akşam üstü saatlerinde bulutlar ile gölgelendiğini gösterebilir. Çünkü çift yüzlü güneş panelleri sabah saatlerinde oldukça yüksek ışıınıma maruz kalarak yüksek enerji üretimi sağlamış ancak güneşten en az fayda sağladığı saatlerde gölgelenme sebebiyle enerji üretimleri çok etkilenmemiş sadece günlük ortalama ışıınım miktarı etkilenmiştir.



Şekil 4.13. Mayıs ayı panellerin günlük toplam üretilen enerji ve günlük ortalama ısınım miktarı

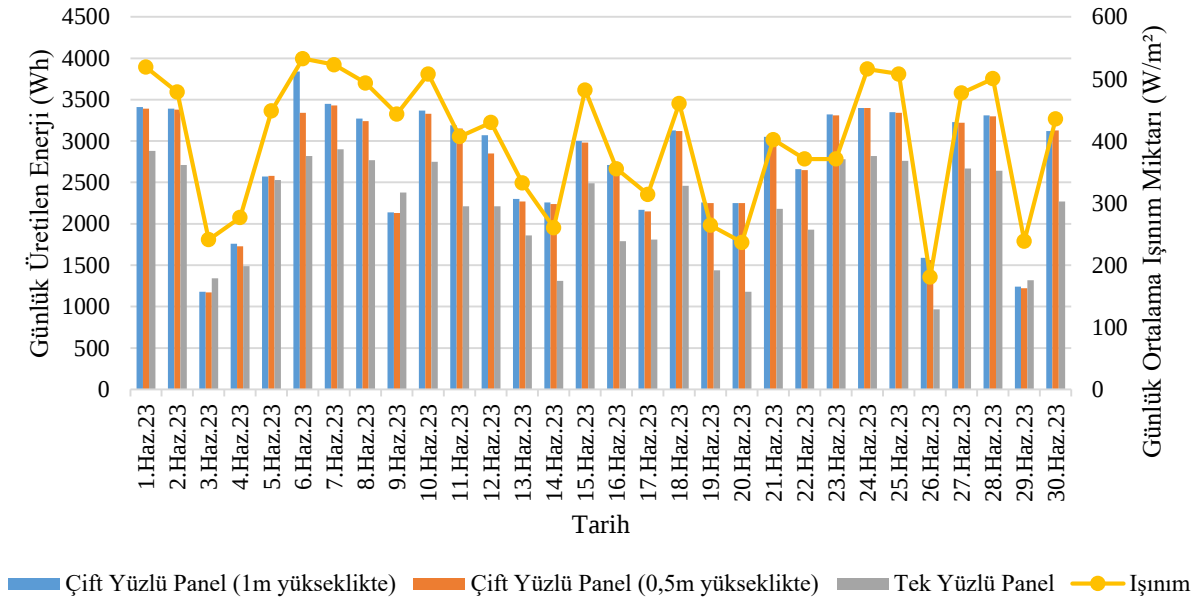
Şekil 4.14'te baktığımızda panellerin Mayıs ayında toplam enerji üretimleri görülmektedir. Yerden 1 m yüksekte olan çift yüzlü güneş paneli, klasik tek yüzlü panele göre yaklaşık %20,85 daha fazla enerji üretmiş, yerden 0,5 m yüksekte olan çift yüzlü güneş paneline göre ise yaklaşık %1,45 daha fazla enerji üretmiştir.



Şekil 4.14. Mayıs ayı panellerin toplam enerji üretimleri

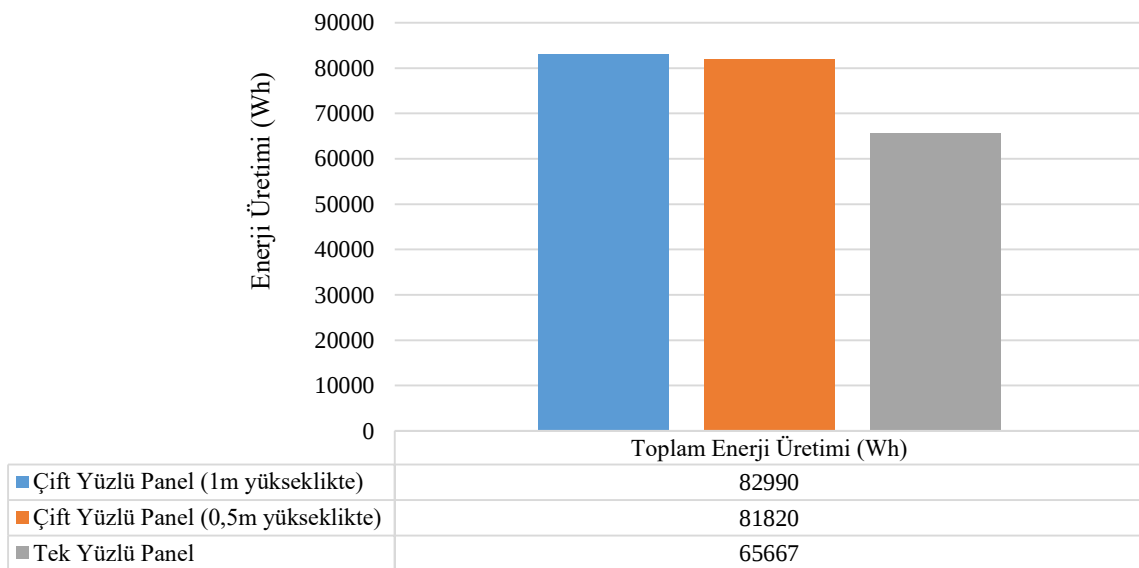
Şekil 4.15'te Haziran ayına ait panellerin günlük toplam ürettikleri güç, günlük ortalama ısınım miktarı ile karşılaştırılmıştır. Haziran ayında çift yüzlü panellerin eğim açısı 40° olarak ayarlanmıştır. Haziran ayında çift yüzlü güneş panellerinin en düşük enerji üretimi 3 Haziran

en yüksek enerji üretimi ise 6 Haziran tarihinde gerçekleşmiştir. Tek yüzlü klasik panel ise en düşük enerji üretimi 26 Haziran en yüksek enerji üretim ise 1 Haziran tarihinde gerçekleşmiştir.



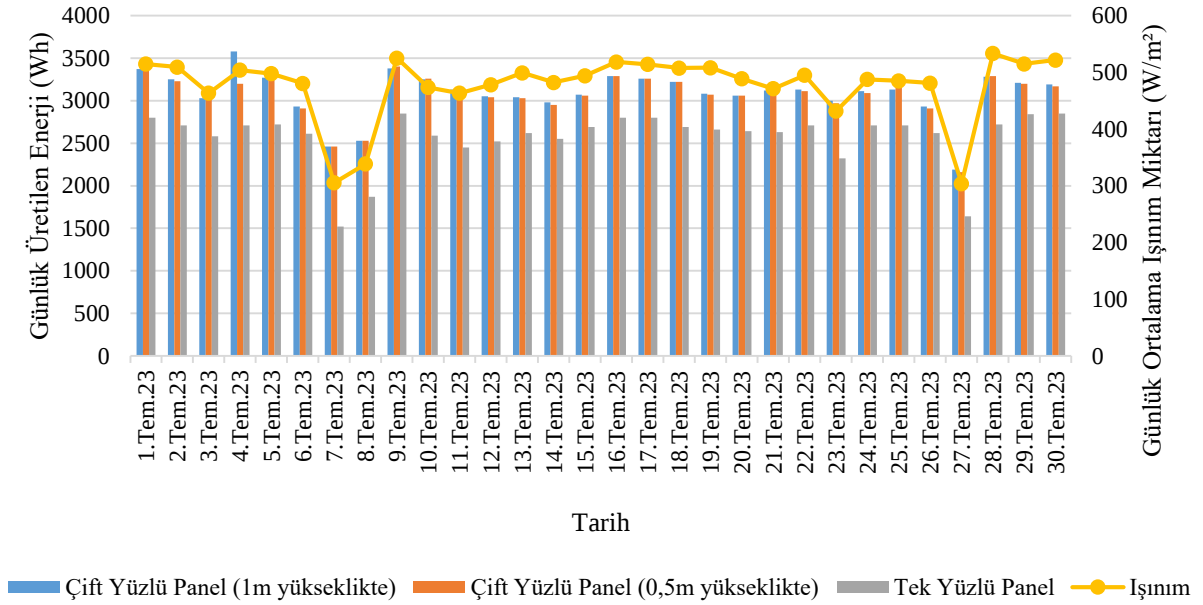
Şekil 4.15. Haziran ayı panellerin günlük toplam üretilen enerji ve günlük ortalama ışınım miktarı

Şekil 4.16'da baktığımızda panellerin haziran ayında toplam enerji üretimleri görülmektedir. Yerden 1 m yüksekte olan çift yüzlü güneş paneli, klasik tek yüzlü panele göre yaklaşık %26,40 daha fazla enerji üretmiş, yerden 0,5 m yüksekte olan çift yüzlü güneş paneline göre ise yaklaşık %1,43 daha fazla enerji üretmiştir.



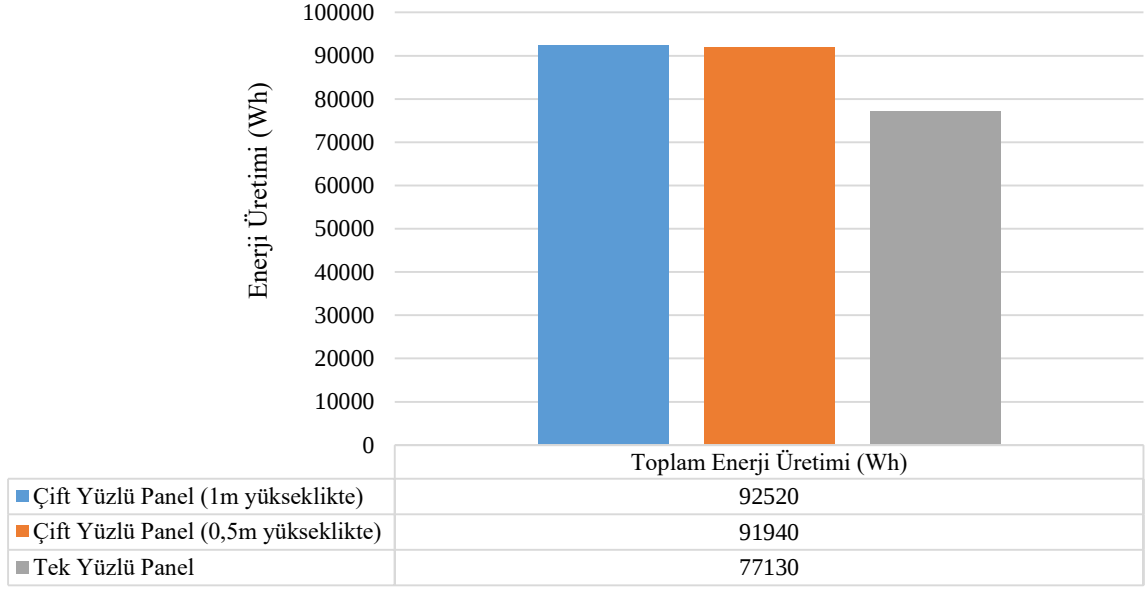
Şekil 4.16. Haziran ayı panellerin toplam enerji üretimleri

Çift yüzlü güneş panellerinin ve tek yüzlü güneş panellerinin en yüksek enerjiyi ürettiği ay temmuz olarak gözlenmiş ve Şekil 4.17’de gösterilmiştir. Temmuz ayında güneşlenmenin oldukça yüksek olması ve panel eğim açısının 40° olarak ayarlanması enerji üretimini maksimum hale getirmektedir. Günlük ortalama ışıınım değerleri ise yine diğer aylar ile karşılaştırıldığında yüksek ve daha stabil olarak seyretmektedir.



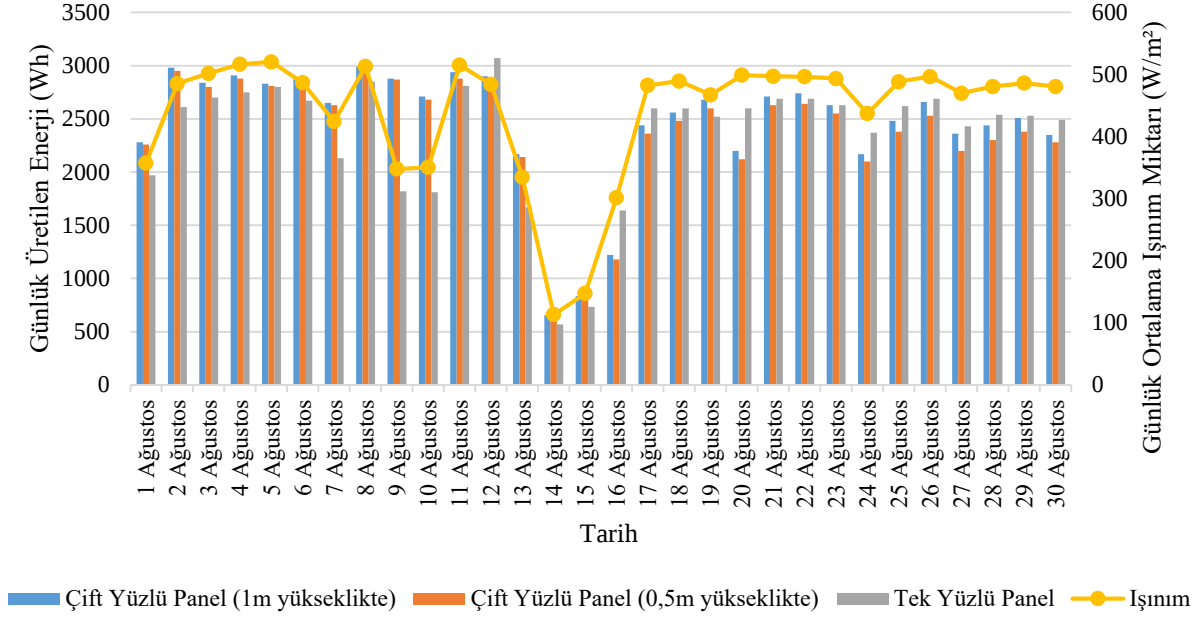
Şekil 4.17. Temmuz ayı panellerin günlük toplam üretilen enerji ve günlük ortalama ışıınım miktarı

Şekil 4.18’e baktığımızda panellerin temmuz ayında toplam enerji üretimleri görülmektedir. Yerden 1 m yüksekte olan çift yüzlü güneş paneli, klasik tek yüzlü panele göre yaklaşık %20 daha fazla enerji üretmiş, yerden 0,5 m yüksekte olan çift yüzlü güneş paneline göre ise yaklaşık %0,65 daha fazla enerji üretmiştir.



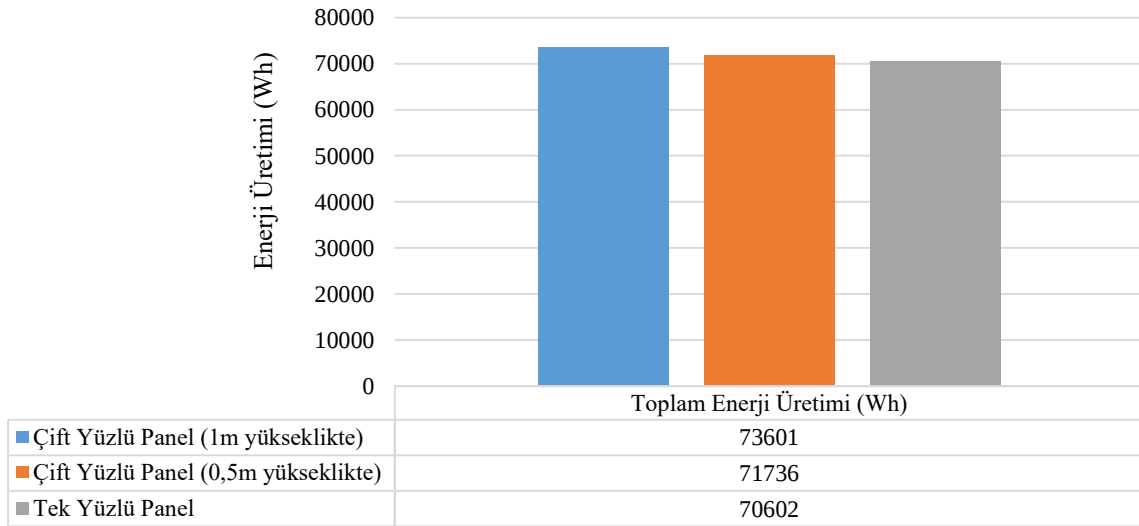
Şekil 4.18. Temmuz ayı panellerin toplam enerji üretimleri

Ağustos ayında çift yüzlü güneş panellerin eğim açısı 50° olarak ayarlanmıştır. Şekil 4.19’da panellerin günlük ürettikleri toplam güç ve günlük ortalama ışıınım miktarı grafik ile gösterilmektedir. Bu aydan önceki 4 ayın grafikleri incelendiğinde çift yüzlü güneş panellerinin ürettikleri enerji miktarı ile günlük ortalama ışıınım miktarları oldukça stabil seyretmiştir. Ancak ağustos ayında bu durum kısmen değişmiştir. Ağustos ayının özellikle son 15 gününe bakıldığında çift yüzlü panellerin ürettikleri enerji miktarında diğer aylara kıyasla oldukça fazla düşüş olduğu görülmektedir. Ağustos ayının diğer aylardan tek farkı rüzgâr hızının artması, panel açısının değişimi ve güneş açısının dik konumdan yatay konuma doğru yer değiştirmesidir.



Şekil 4.19. Ağustos ayı panellerin günlük toplam üretilen enerji ve günlük ortalama ışıınım miktarı

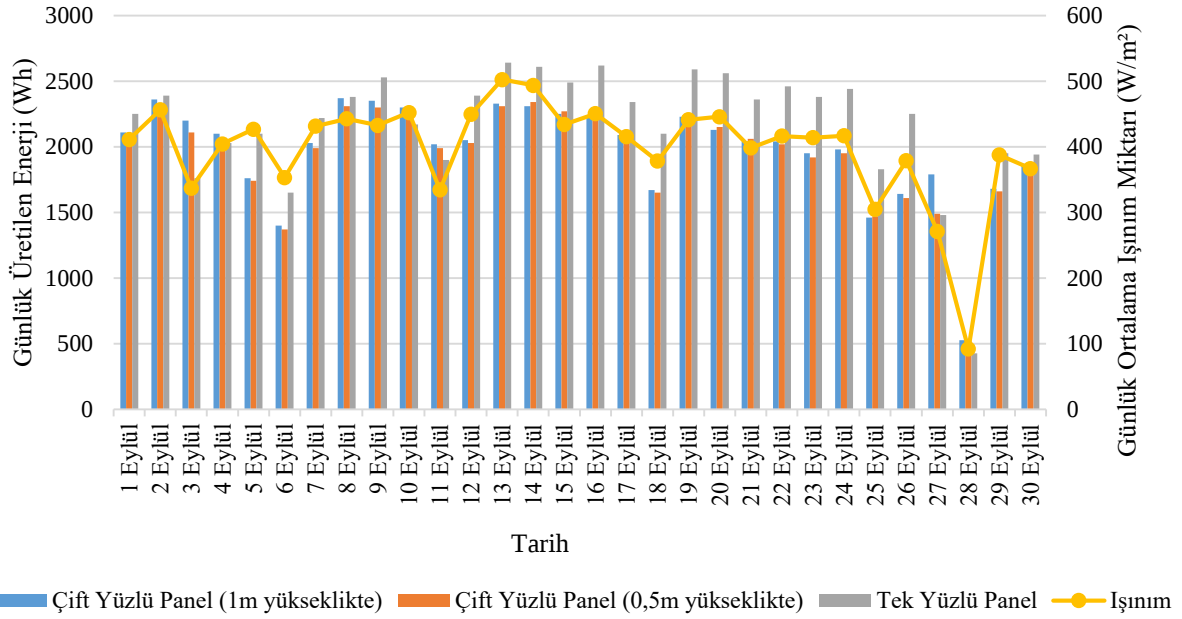
Şekil 4.20'ye baktığımızda panellerin ağustos ayında toplam enerji üretimleri görülmektedir. Yerden 1 m yüksekte olan çift yüzlü güneş paneli, klasik tek yüzlü panele göre yaklaşık %4,25 daha fazla enerji üretmiş, yerden 0,5 m yüksekte olan çift yüzlü güneş paneline göre ise yaklaşık %2,6 daha fazla enerji üretmiştir.



Şekil 4.20. Ağustos ayı panellerin toplam enerji üretimleri

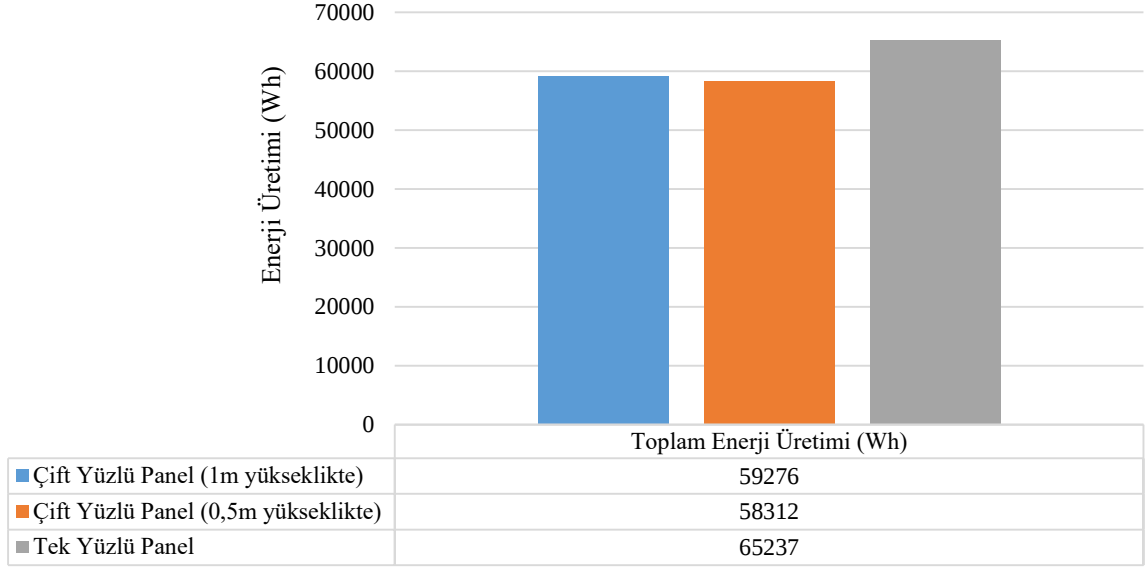
Eylül ayına ait günlük ortalama ışıınım miktarının değişimi ve panellerin günlük toplam enerji miktarlarını gösteren grafik Şekil 4.21'de verilmiştir. Eylül ayında da panel eğim açısı 50° olarak ayarlanmıştır. Eylül ayına ait grafik incelendiğinde klasik tip tek yüzlü panelin enerji

üretiminin çift yüzölçü güneş panellerinden daha yüksek olduğunu net olarak görülmektedir. Ortalama ışıınım miktarı ise çift yüzölçü güneş panellerinin ürettiği enerji oranında azalmıştır. Burada gözlenen asıl farklı durum tek yüzölçü panelin diğer aylara kıyasla çift yüzölçü panellerden daha fazla enerji ürettiğidir. Bunun açıklaması olarak güneşin dik konumdan yatay konuma doğru doğu ve batış hareketini izlemesidir.



Şekil 4.21. Eylül ayı panellerin günlük toplam üretilen enerji ve günlük ortalama ışıınım miktarı

Şekil 4.22'ye baktığımızda panellerin eylül ayında toplam enerji üretimleri görülmektedir. Klasik tek yüzölçü panelin ürettiği enerji yerden 1 m yüksekte olan çift yüzölçü güneş panelden %10, yerden 0,5 m yüksekte olan çift yüzölçü güneş panelden ise yaklaşık %12 daha fazla enerji üretmiştir. Yerden 1 m yüksekte olan çift yüzölçü panel ise yerden 0,5 m yüksekte olan çift yüzölçü panelden %1,65 daha fazla enerji üretmiştir.

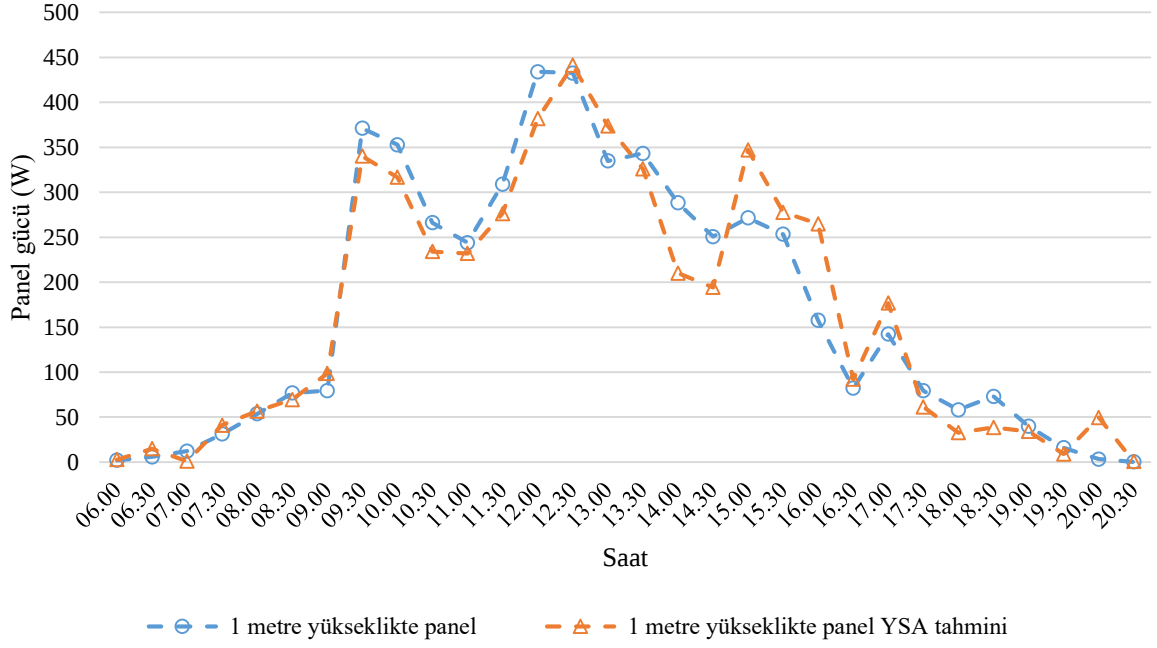


Şekil 4.22. Eylül ayı panellerin toplam enerji üretimleri

4.3 Fotovoltaik Panellerin Yapay Sinir Ağları ile Modellenmesi

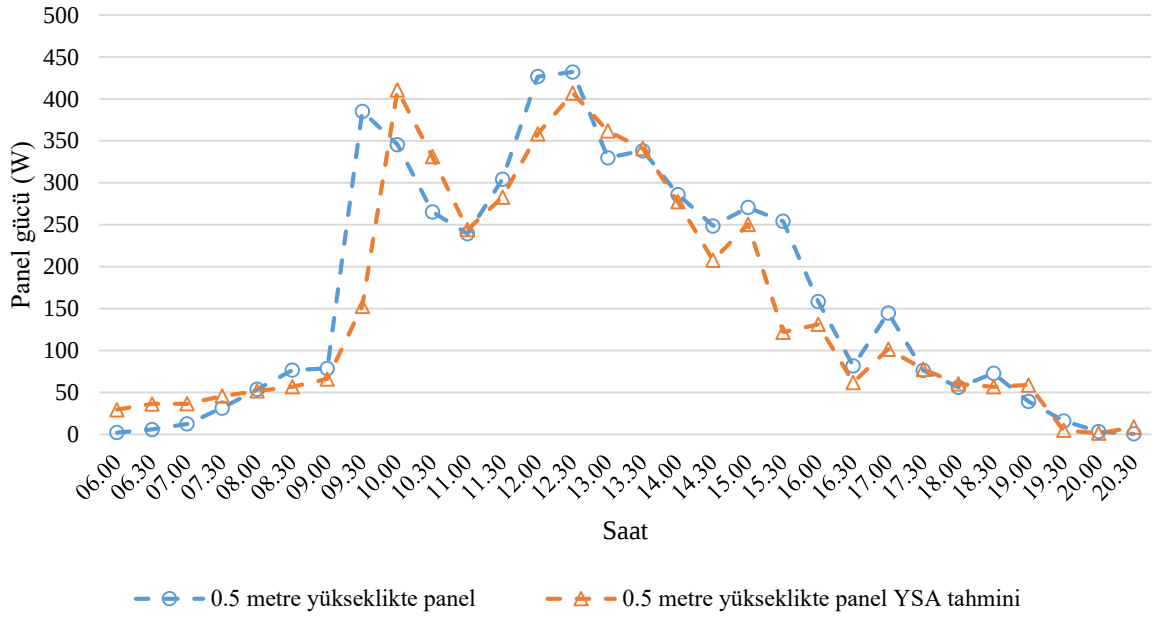
Korelasyon katsayısı (R), iki veri serisi arasındaki doğrusal ilişkinin gücünü ve yönünü gösteren bir istatistiksel ölçüttür. R değeri 0 ile 1 arasında değişir. 0'a yakın bir değer, iki seri arasında zayıf bir ilişki olduğunu, 1'e yakın bir değer ise güçlü bir ilişki olduğunu gösterir.

Şekil 4.23, 15 Mayıs tarihinde yerden 1 m yüksekte konumlandırılmış çift yüzlü bir fotovoltaik panelin saatlik güç üretim grafiğini sunmaktadır. Bu grafikte, deneysel veriler ile yapay sinir ağları (YSA) tarafından tahmin edilen değerler karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Deneysel veriler ve YSA tahminleri arasında yüksek bir korelasyon katsayısı ($R = 0,964$) bulunmaktadır. Bu, iki veri serisi arasında güçlü bir doğrusal ilişki olduğunu göstermektedir.



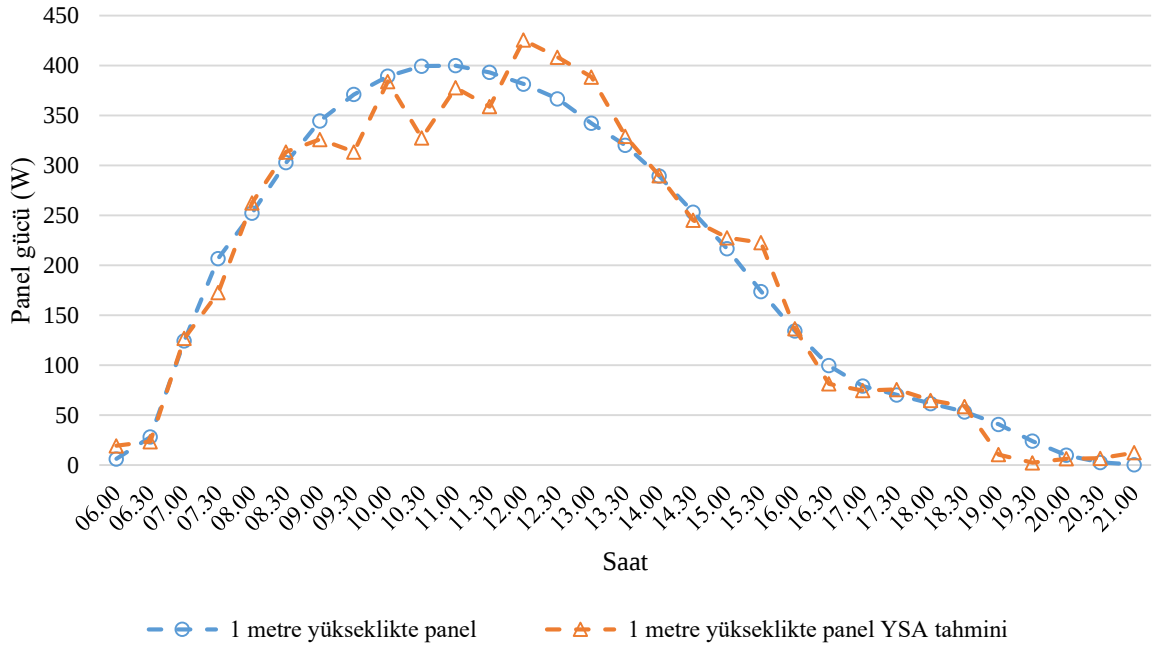
Şekil 4.23. 15 Mayıs 1 m yükseklikteki panel gücünün deneysel ve tahminsel karşılaştırılması

Şekil 4.24, 15 Mayıs tarihinde yerden 0,5 m yüksekte konumlandırılmış bir çift yüzölü fotovoltaik panelin saatlik güç üretim grafiğini sunmaktadır. Bu grafikte, deneysel veriler ile yapay sinir ağları tarafından tahmin edilen değerler karşılaştırılarak analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında iki seri arasında korelasyon katsayısı (R) değeri 0,921 olarak hesaplanmıştır.



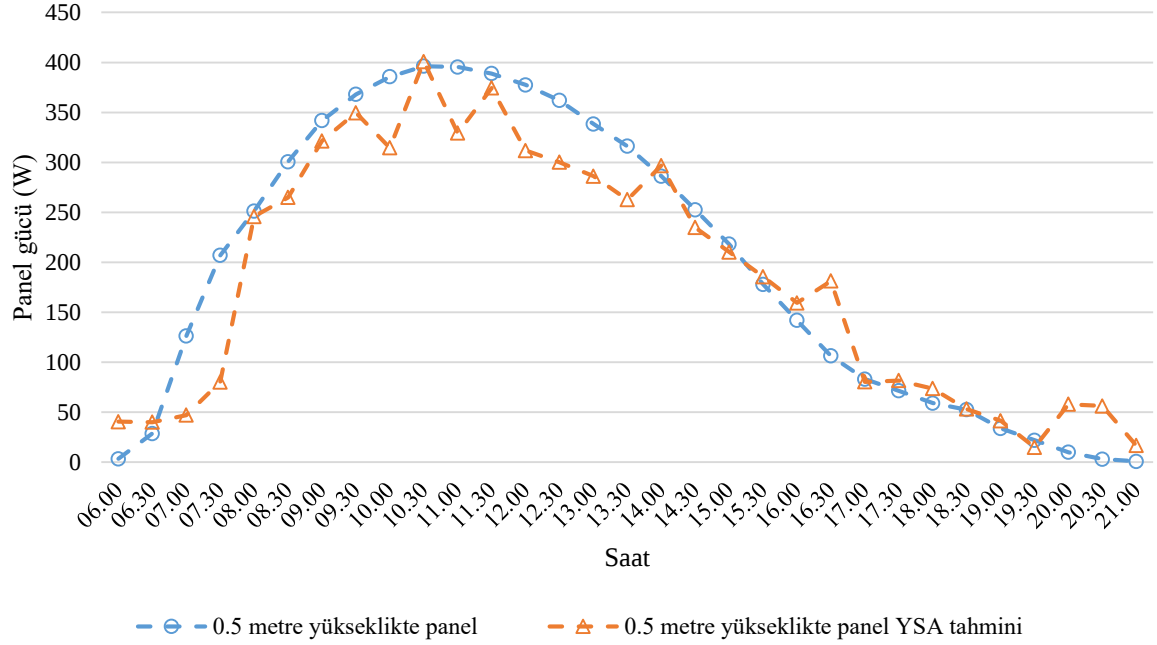
Şekil 4.24. 15 Mayıs 0,5 m yükseklikteki panel gücünün deneysel ve tahminsel karşılaştırılması

15 Temmuz tarihinde yerden 1 m yüksekte konumlandırılmış bir çift yüzölü fotovoltaiik panelin saatlik güç üretim grafiğı Şekil 4.25'te sunulmaktadır. Bu grafiğkte, deneysel veriler ile yapay sinir ağıları tarafından tahmin edilen değler karşılaştırılarak analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında iki seri arasında korelasyon katsayısı (R) değeri 0,982 olarak hesaplanmıştır.



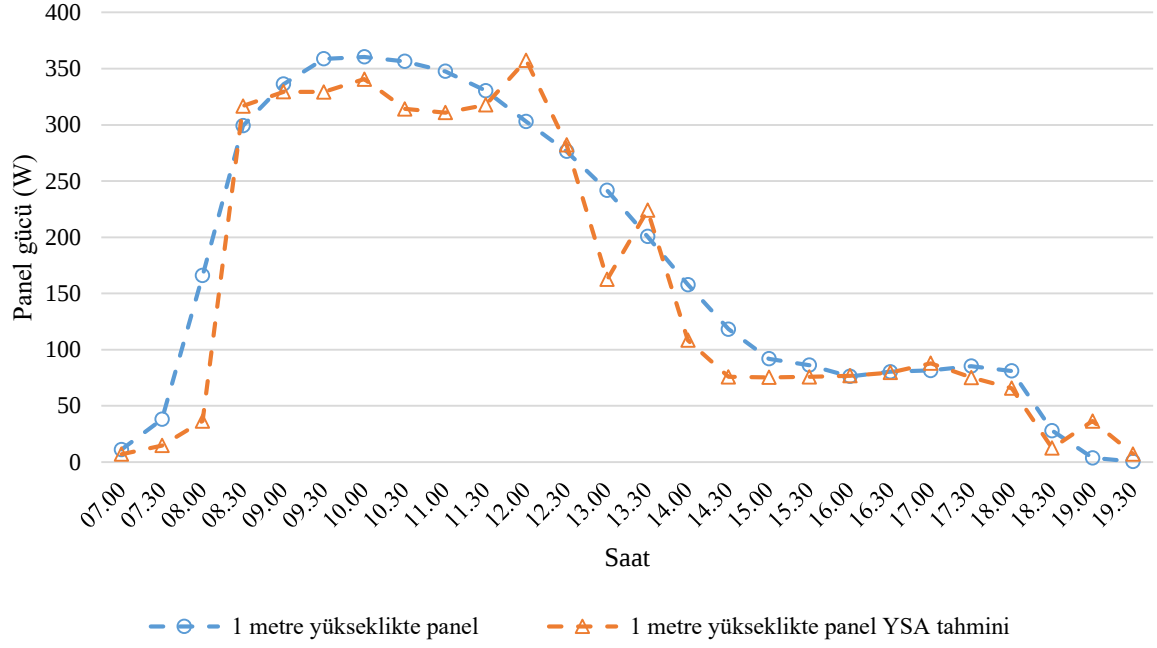
Şekil 4.25. 15 Temmuz 1 m yükseklikteki panel gücünün deneysel ve tahminsel karşılaştırılması

15 Temmuz tarihinde yerden 0,5 m yüksekte konumlandırılmış bir çift yüzölü fotovoltaiik panelin saatlik güç üretim grafiğı Şekil 4.26'te sunulmaktadır. Bu grafiğkte, deneysel veriler ile yapay sinir ağıları tarafından tahmin edilen değler karşılaştırılarak analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında iki seri arasında korelasyon katsayısı (R) değeri 0,960 olarak hesaplanmıştır.



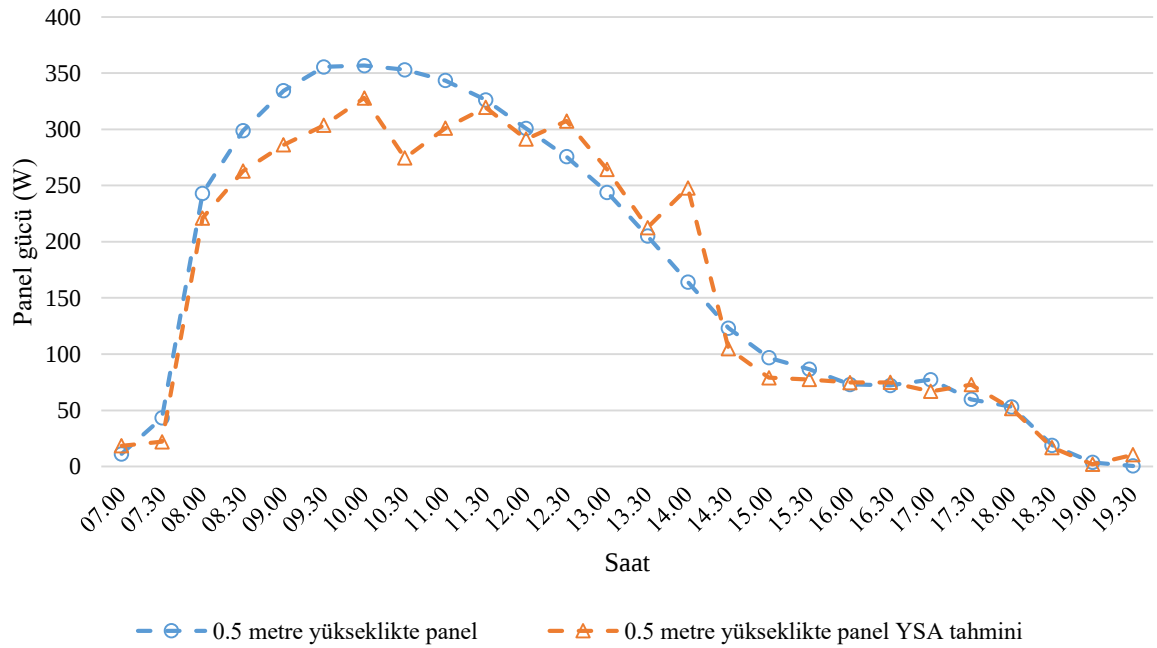
Şekil 4.26. 15 Temmuz 0,5 m yükseklikteki panel gücünün deneysel ve tahminsel karşılaştırılması

Şekil 4.27, 15 Eylül tarihinde yerden 1 m yüksekte konumlandırılmış çift yüzü bir fotovoltaik panelin saatlik güç üretim grafiğini sunmaktadır. Bu grafikte, deneysel veriler ile yapay sinir ağları (YSA) tarafından tahmin edilen değerler karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Deneysel veriler ve YSA tahminleri arasında yüksek bir korelasyon katsayısı ($R=0,961$) bulunmaktadır.



Şekil 4.27. 15 Eylül 1 m yükseklikteki panel gücünün deneysel ve tahminsel karşılaştırılması

Şekil 4.28, 15 Eylül tarihinde yerden 0,5 m yüksekte konumlandırılmış çift yüzölümlü bir fotovoltaik panelin saatlik güç üretim grafiğini sunmaktadır. Bu grafikte, deneysel veriler ile yapay sinir ağları (YSA) tarafından tahmin edilen değerler karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında iki seri arasında korelasyon katsayısı (R) değeri 0,973 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.28. 15 Eylül 0,5 m yükseklikteki panel gücünün deneysel ve tahminsel karşılaştırılması

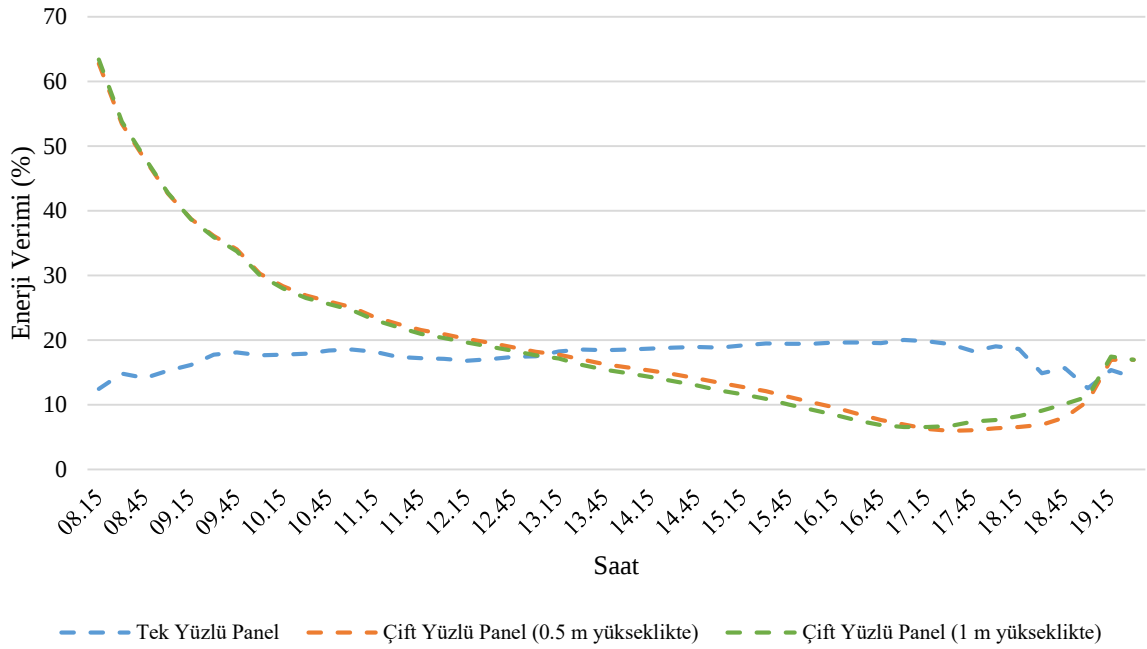
4.4 Fotovoltaik Panellerin Enerji ve Ekserji Analizleri

Manjunath, Reddy, Reddy, Kumar ve Sanketh (2022) yaptıkları çalışmada 50 W gücünde klasik tek yüzlü bir fotovoltaik panelin enerji ve ekserji performanslarını incelemişler ve analiz etmişlerdir. Bu çalışmaya göre modülün maksimum enerji verimliliği 308 K sıcaklıkta yaklaşık %24 olarak bulmuşlardır. Ancak ortam sıcaklığının artması ve dolayısıyla hücre sıcaklığının artmasının ekserji verimini olumsuz etkilediğini belirtmişlerdir. Günün ilk ve son saatlerinde ekserji veriminin yüksek olduğunu ve güneş ışıınım yoğunluğunun artmasıyla birlikte artmakta ancak doyum noktasından ve sıcaklık artışından sonra fotovoltaik ekserjinin azaldığını gözlemlemişlerdir. Bayat ve Özalp (2018) yaptıkları çalışmada fotovoltaik paneli ekserjisini sabah saat 09.00'da maksimum seviyede olduğunu ve azalarak devam ettiğini saat 14.00 civarında ise minimum seviyeye ulaştığını belirtmişlerdir. Soliman (2023) çift yüzlü fotovoltaik paneller ile yaptığı çalışmada günün ilk yarısında ekserji verimi en düşük değere ulaşmaya kadar azalmakta, daha sonra hücre sıcaklığının azalmasına bağlı olarak artmakta olduğunu gözlemlemişlerdir.

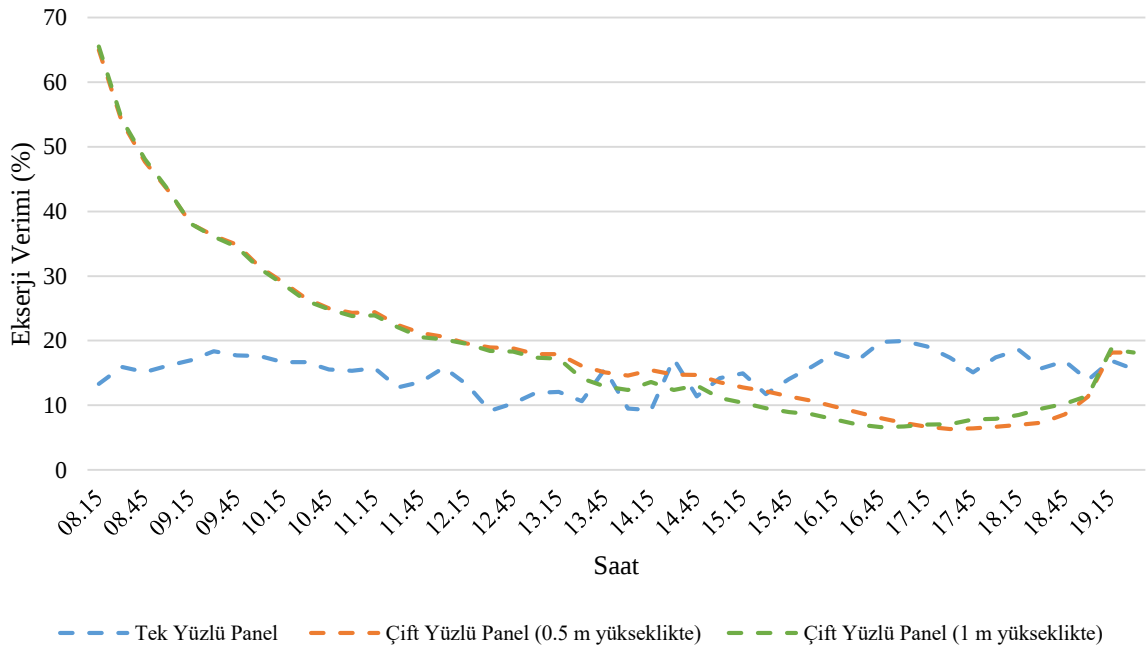
Daha önceki konularda açıklandığı üzere fotovoltaik panellerin enerji ve ekserji verimliliği ısı transfer katsayısı, hücre sıcaklığı, dış ortam sıcaklığı, rüzgâr hızı, panel yüzey alanı ve ışıınım miktarı gibi parametrelere bağlıdır. Aşağıdaki grafiklerde 6 ay süresince yapılan deneylerden her ay için rastgele seçilen bir günün enerji ve ekserji verimlerinin saatlik değişimleri sunulmuştur.

Şekil 4.29'da 24 Nisan tarihinde panellerin enerji veriminin değişimi, Şekil 4.30'da ise 24 Nisan tarihinde panellerin ekserji veriminin değişimi görülmektedir. Çift yüzlü panellerin enerji verimi değerleri ve değişimleri birbirine oldukça benzer olduğu anlaşılmaktadır. Çift yüzlü panellerinin enerji veriminin sabah saatlerinde yaklaşık %63 oranı ile maksimum olduğu ve günün geri kalanında azalarak devam ettiği akşam üstü ise düşük miktarda olsa da arttığı görülmektedir. Bunun sebebi olarak çift yüzlü panellerin doğu yöneliminde olduğu ve ilk enerji üretimine oldukça düşük sıcaklıklarda başlaması olarak düşünülebilir. Ardından artan panel yüzey sıcaklığı enerji verimini olumsuz etkilemiş ve 18.00 saatlerinde panel yüzey sıcaklığının düşmesi ile birlikte enerji verimi tekrar artmaya başlamıştır. Tek yüzlü klasik fotovoltaik panel ise güney yöneliminde olduğundan dolayı enerji verimi maksimum %20 civarına erişmiş ve sabah ilk saatlerinden itibaren artarak ilerlemiş öğlen saatlerinde maksimum değere ulaşmış ve ardından tekrar düşüşe geçmiştir. Çift yüzlü güneş panellerinde ekserji verimliliği enerji verimliliği grafiğine benzer hareket etmiştir ve enerji veriminden nispeten daha yüksek (%65)

seyrettiği görülmektedir. Tek yüzlü panelin ekserji verimliliği ise maksimum %20 değerini saat 17.00 saatlerinde yakaladığı görülmektedir.



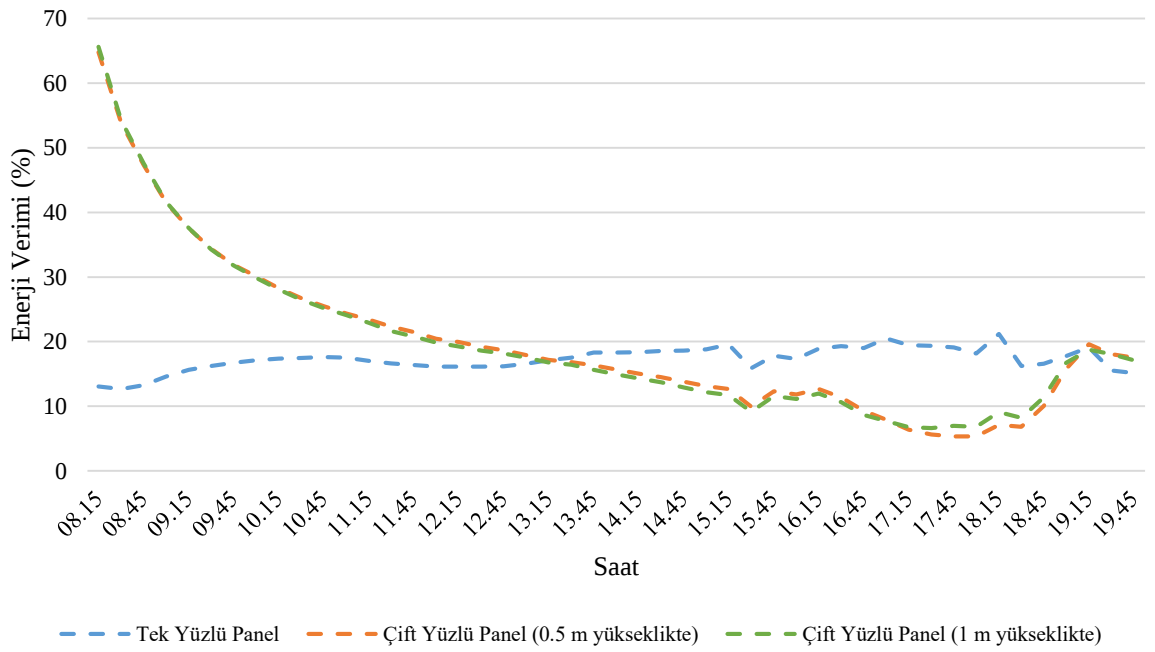
Şekil 4.29. 24 Nisan tarihinde çift yüzlü ve tek yüzlü panellerin enerji verimliliklerinin değişimi



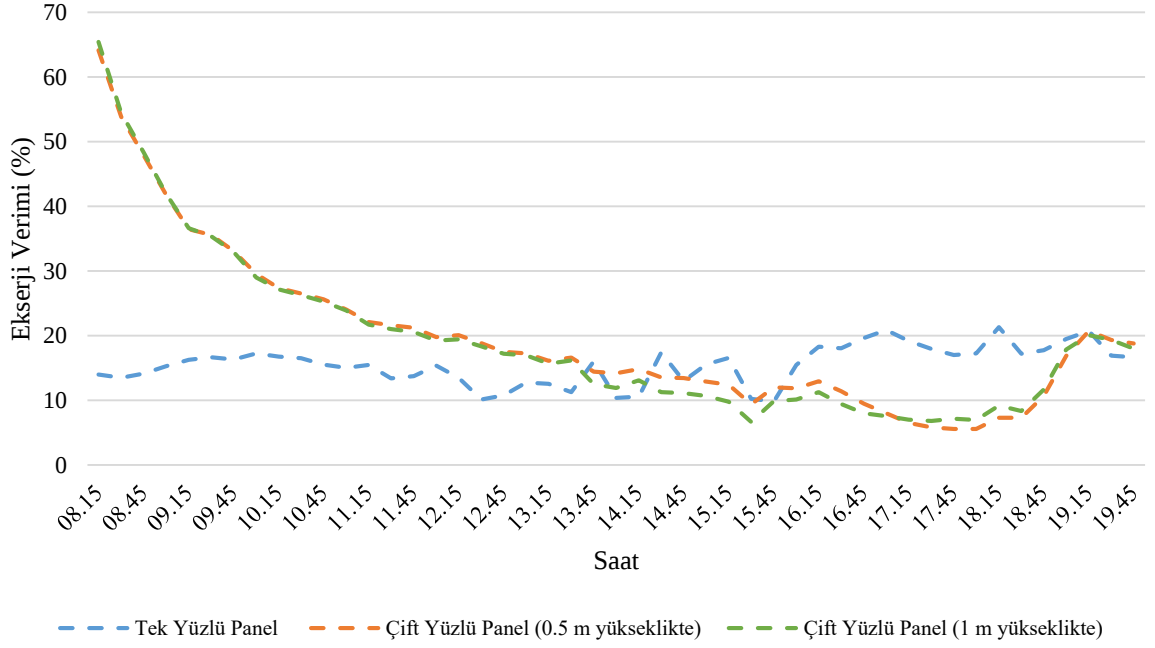
Şekil 4.30. 24 Nisan tarihinde çift yüzlü ve tek yüzlü panellerin ekserji verimliliklerinin değişimi

Şekil 4.31 ve Şekil 4.32 2 Mayıs tarihine ait sırasıyla enerji ve ekserji grafiklerini göstermektedir. 2 Mayıs tarihinde çift yüzlü güneş panellerinin maksimum enerji verimi sabah

saatlerinde %65,5 civarındadır. Minimum enerji verimi ise akşamüzeri 17.45-18.00 saatlerinde olup %6,8 civarındadır. Tek yüzlü güneş panelinin maksimum enerji verimi öğlen saatlerinde yaklaşık %20,5 minimum enerji verimi sabah ve akşam üstü saatlerde gözlenmiş ve yaklaşık %12,5'tir. Şekil 4.26'da görülen ekserji verimi grafiği ise enerji verimi ile oldukça benzer olduğu gözlenmektedir. Çift yüzlü güneş panellerinin maksimum ekserji miktarı sabah saatlerinde %65,5, minimum ekserji verimi miktarları ise akşam üstü saatlerinde yaklaşık %5,5'tir. Tek yüzlü fotovoltaik paneli ekserji verimi ise saat 17.30'da maksimum seviyeyi görmüştür. Bu değer yaklaşık olarak %21,5'tir. Minimum ekserji değeri ise öğle saatlerinde %10 olarak hesaplanmıştır.

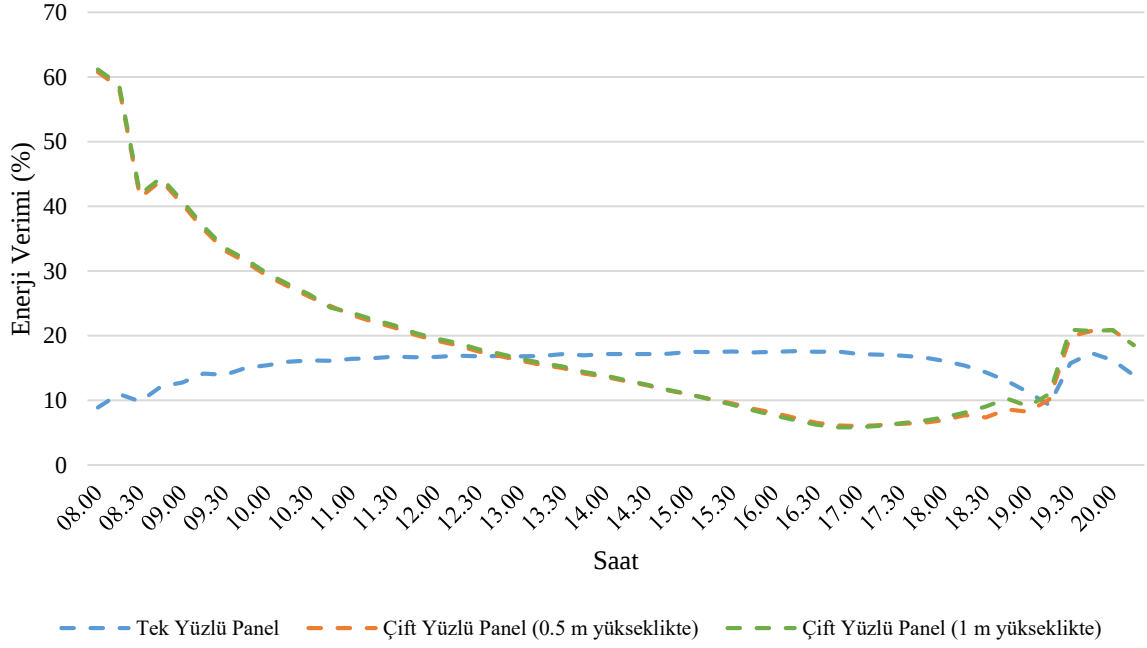


Şekil 4.31. 2 Mayıs tarihinde çift yüzlü ve tek yüzlü panellerin enerji verimliliklerinin değişimi

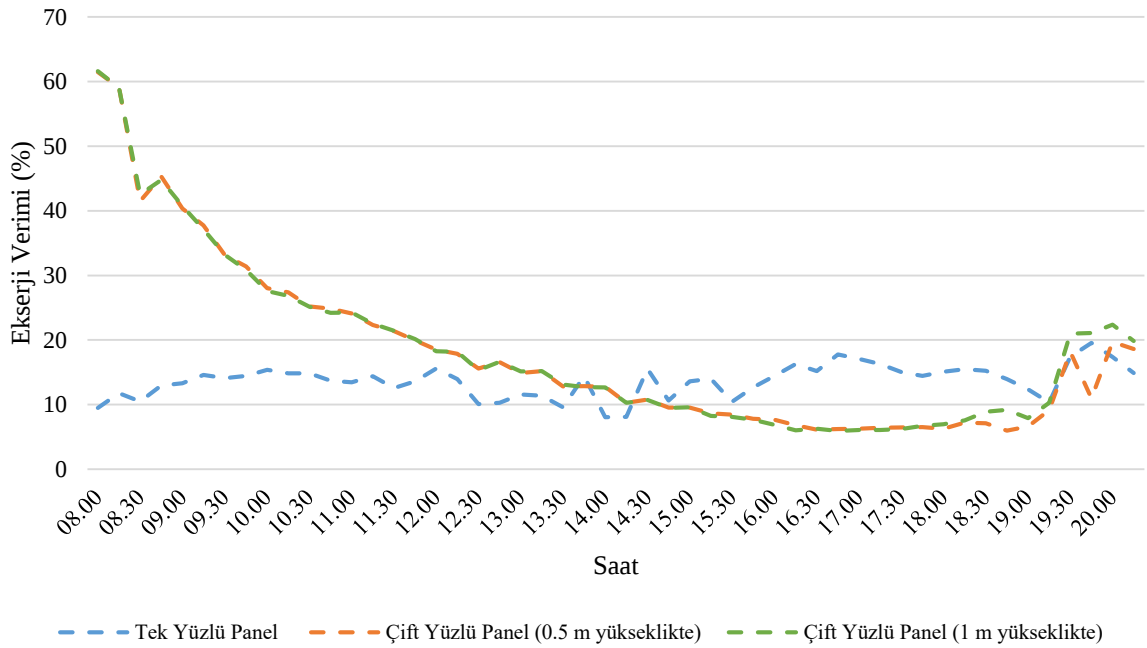


Şekil 4.32. 2 Mayıs tarihinde çift yüzlü ve tek yüzlü panellerin ekserji verimliliklerinin değişimi

Haziran ayında ve temmuz ayında panel açısı 40° olarak ayarlanmıştır. Şekil 4.33 ve Şekil 4.34 7 Haziran tarihine ait enerji ve ekserji grafiklerini vermektedir. 7 Haziran tarihinde çift yüzlü güneş panelleri sabah saatlerinde maksimum %61 enerji ve ekserji verimine ulaşmıştır. Saat 17.00 civarında %7 verim oranı ile minimum enerji ve ekserji seviyesine inmiştir. Ardından günün ilerleyen saatlerinde tekrar yükselmeye başlamış ve %20 oranlarına ulaşmıştır. Bunun sebebi doğu yönüne bakan çift yüzlü güneş panelleri gün batımına doğru arka yüzeylerinden aldıkları yüksek ışıınım miktarının ve düşen panel ve hava sıcaklığının etkisi ile verimlerini arttırmıştır. Tek yüzlü fotovoltaik panel sabah ve akşam üstü saatlerinde enerji verimi %10 ile minimum seviyeye, gün ortasında ise %17,5 ile maksimum seviyeye ulaşmıştır. Ekserji verimleri ise sabah %10 olarak başlamış ardından artmaya devam ederek öğlen saatlerinde sıcaklığın artması ile tekrar düşmeye başlamıştır. Akşam üstü ise tekrar yükselerek maksimum %17 değeri bulunmuştur.



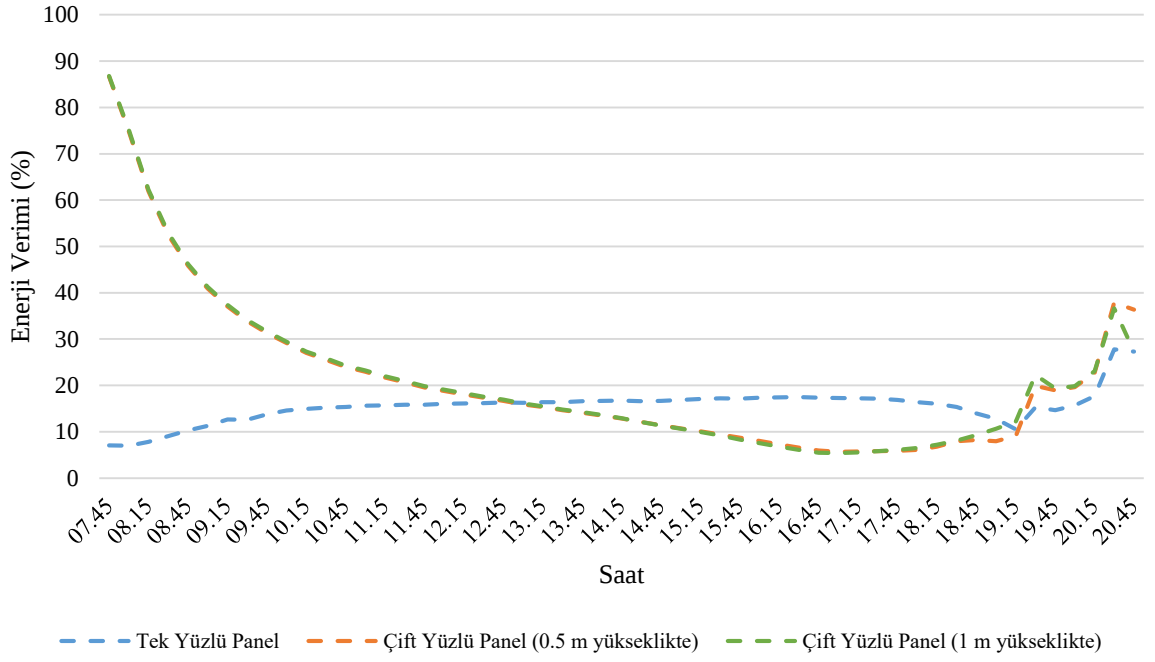
Şekil 4.33. 7 Haziran tarihinde çift yüzölçekli ve tek yüzölçekli panellerin enerji verimliliklerinin değişimi



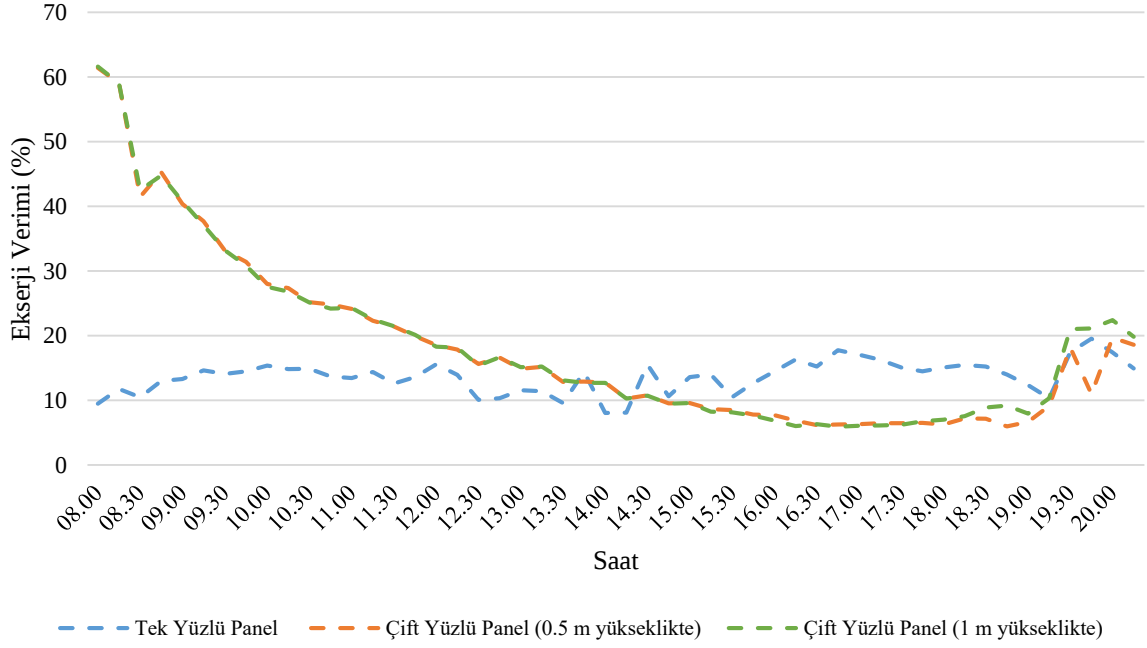
Şekil 4.34. 7 Haziran tarihinde çift yüzölçekli ve tek yüzölçekli panellerin ekserji verimliliklerinin değişimi

17 Temmuz tarihine ait enerji verimi ve ekserji verimi grafikleri sırasıyla Şekil 4.35 ve Şekil 4.36'da verilmiştir. Bu tarihte çift yüzölçekli güneş panellerinin en yüksek enerji ve ekserji verimi sabah saatlerinde sırasıyla %86,80 ve %61,7 olarak hesaplanmıştır. Her iki verimde de azalmaya devam ederek saat 17.00 civarında minimum seviyeye ulaşmış ve minimum verimleri

her iki grafikte de yaklaşık %6 olarak hesaplanmıştır. Güneşin batışına doğru panel arka yüzeylerine gelen ışıınım miktarının artmasıyla da tekrardan hem enerji verimi hem de ekserji verimi artmaya başlamış ve enerji verimi yaklaşık %37 ekserji verimi ise yaklaşık %22,5 civarına ulaşmıştır. Klasik tek yüzlü fotovoltaik panelin ise hem enerji hem de ekserji verimi öğlen saatlerinden sonra maksimum seviyeye ulaşmış ve iki grafik için yaklaşık %17,5 civarına kadar gelmiştir.

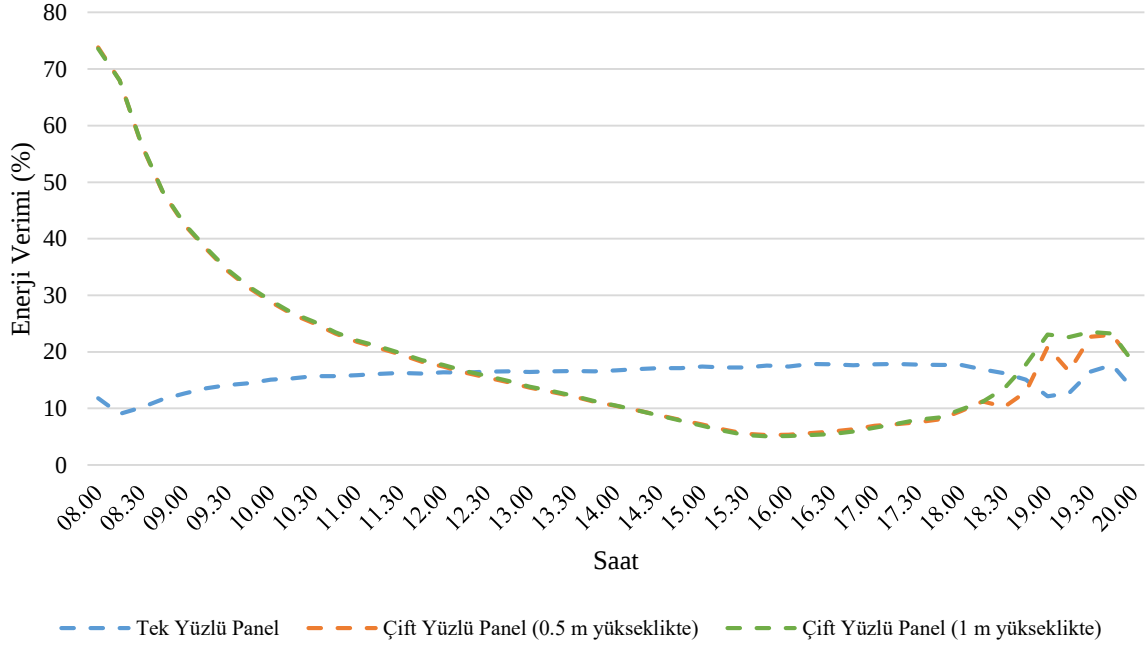


Şekil 4.35. 17 Temmuz tarihinde çift yüzlü ve tek yüzlü panellerin enerji verimliliklerinin değişimi

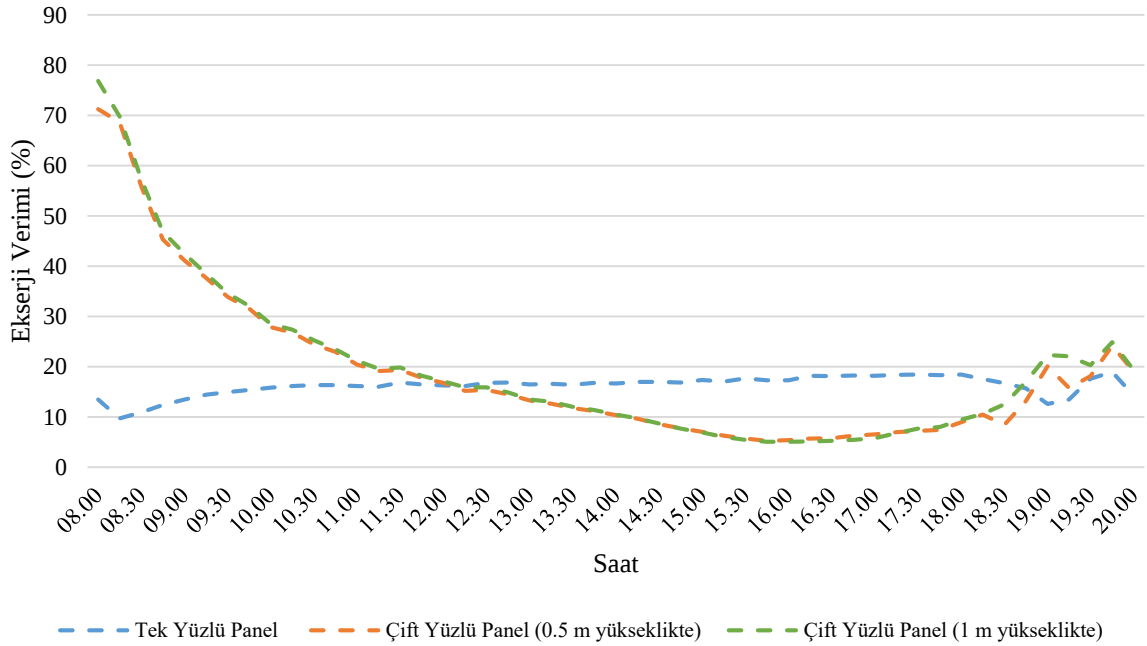


Şekil 4.36. 17 Temmuz tarihinde çift yüzlü ve tek yüzlü panellerin ekserji verimliliklerinin değişimi

Ağustos ve eylül aylarında panel eğim açısı 50° olarak ayarlanmıştır. 4 Ağustos tarihine ait enerji ve ekserji verimleri Şekil 4.37 ve Şekil 4.38’de verilmiştir. Çift yüzlü fotovoltaik panellerinin enerji verimi diğer grafiklerde olduğu gibi sabah ilk saatlerde ile maksimum seviyede başlamış ve azalarak devam etmiştir. Maksimum %73,5 değerinde başlayan enerji verimi azalarak %5 civarına kadar düşmüştür. Ardından tekrar yükselerek %23,5 civarında enerji verimi ile günü tamamlamıştır. Klasik tek yüzlü fotovoltaik paneli ise sabah %9 minimum enerji verimi ile başlamış, artarak devam etmiş ve maksimum %17,5’lik enerji verimi değerine ulaşmış ardından azalma eğilimine girmiştir. Şekil 4.38’de verilen ekserji grafiği seyrine bakıldığında ise enerji verim grafiği ile benzerlik göstermektedir. Çift yüzlü fotovoltaik panelleri %75,5 ile sabah saatlerinde maksimum ekserji verim ile güne başlamış ardından azalarak devam etmiştir. %5’lik minimum değere ulaşan çift yüzlü panellerin gün sonuna doğru ekserji verimi tekrar artmaya devam etmiştir. Tek yüzlü panelin ise gün doğumu ile ekserji verimi %9,5 ile minimum seviyede başlamış artarak devam etmiş ve maksimum %18 değerine ulaşmış, ardından azalarak devam etmiştir.



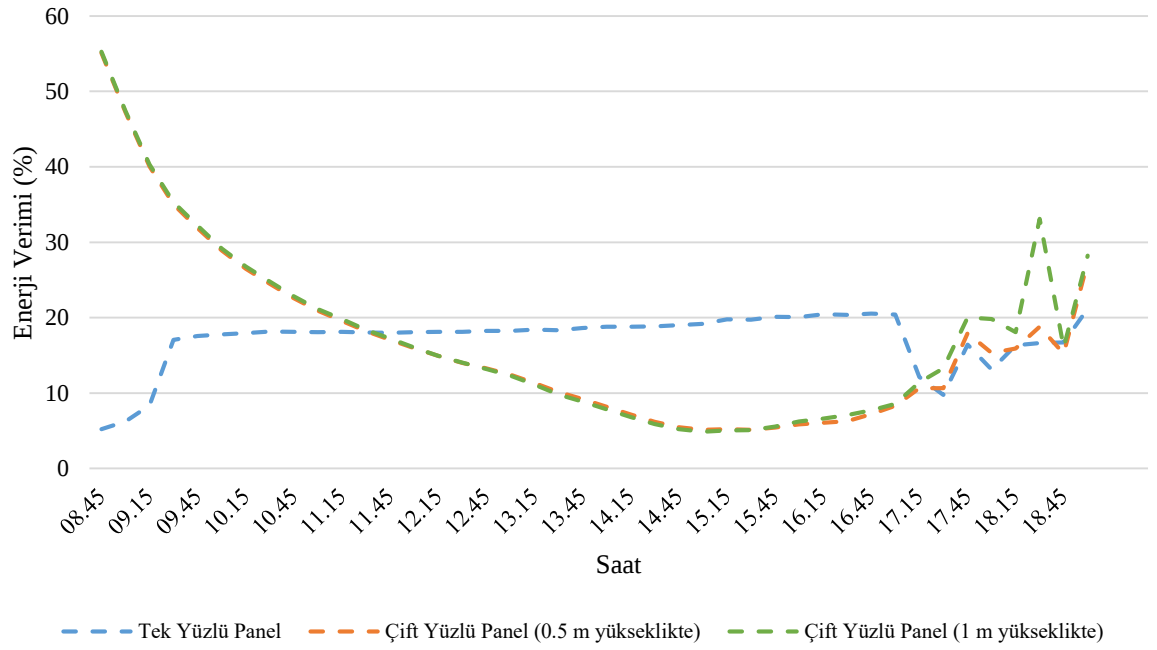
Şekil 4.37. 4 Ağustos tarihinde çift yüzlü ve tek yüzlü panellerin enerji verimliliklerinin değişimi



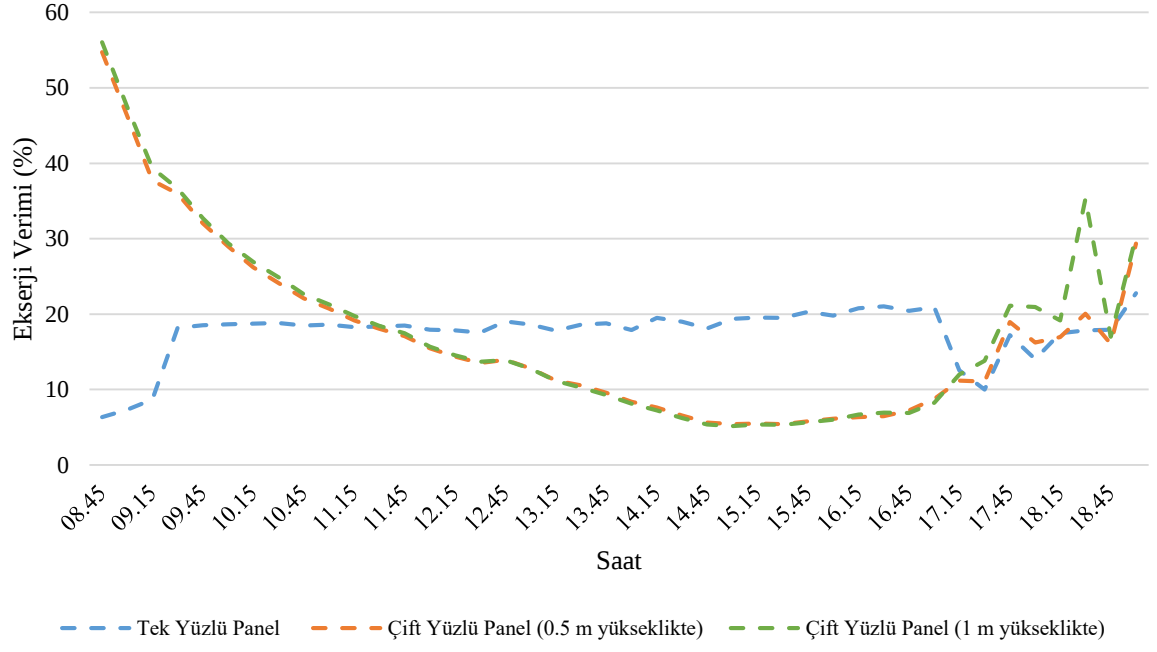
Şekil 4.38. 4 Ağustos tarihinde çift yüzlü ve tek yüzlü panellerin ekserji verimliliklerinin değişimi

14 Eylül tarihine ait enerji ve ekserji verimi grafikleri Şekil 4.39 ve Şekil 4.40'ta gösterilmektedir. Çift yüzlü güneş panellerinin ekserji verimi ve enerji verimi grafiklerinin hareket şekli diğer aylar ile benzer olmasına rağmen her iki grafikte de maksimum verimi %55 olarak hesaplanmıştır. Minimum değer olarak %5'e kadar azalmıştır. Ardından tekrar

yükselmeye başlamıştır. Ancak grafiklere bakıldığında özellikle yerden 1 m yüksekte olan çift yüzlü fotovoltaik panelin enerji ve ekserji verimi değerleri %35 seviyelerine ulaştığı görülmektedir. Bunun ana sebebi artan panel açısı yüksekliğinden dolayı panel arka yüzeyinin gün batımına doğru daha fazla güneş ışıınımı alabilmesi olarak düşünülmektedir. Tek yüzlü fotovoltaik panelin enerji ve ekserji verimi grafiği sabah saatlerinde %5,5 ile minimum değere sahipken ilerleyen saatlerde yaklaşık %21 ile maksimum enerji ve ekserji verimlerine ulaştığı görülmektedir.



Şekil 4.39. 14 Eylül tarihinde çift yüzlü ve tek yüzlü panellerin enerji verimliliklerinin değişimi



Şekil 4.40. 14 Eylül tarihinde çift yüzlü ve tek yüzlü panellerin ekserji verimliliklerinin değişimi

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu araştırma teorik ve deneysel yaklaşımları içermektedir. Deneylerden elde edilen veriler analiz edilerek güneş enerjisi sistemlerinin optimizasyonu için pratik bilgiler sunmaktadır. Çalışma, çift yüzölü güneş panellerinin çeşitli çevresel faktörlere tepkisinin anlaşılması, gelecekte yapılacak güneş enerjisi projelerinin tasarımı ve uygulanması için önemli bir referans oluşturacaktır. Ayrıca bu çalışma sürdürülebilir enerji kaynaklarının daha etkin ve verimli kullanılmasına yönelik stratejilere katkı sağlayacaktır.

2023 yılı Nisan, Mayıs, Haziran, Temmuz, Ağustos ve Eylül aylarında yapılan çalışmada, sonuçlar incelendiğinde çift yüzölü fotovoltaik panellerin, tek yüzölü fotovoltaik panellere oranla daha fazla enerji ürettiği ortaya çıkmıştır. Literatürde yapılan çalışmalar ile elde edilen deneysel sonuçların örtüştüğü görülmüştür. Panel eğim açısı, panel yüksekliği, sıcaklık, ışınlam miktarı gibi parametreler panellerin enerji verimini etkilemektedir. Çalışmada çift yüzölü fotovoltaik panellerden biri yerden 0,5 m diğeri ise 1 m yüksekliğinde konumlandırılmıştır. Yapılan 6 aylık çalışmada, 0,5 m yüksekte olan çift yüzölü fotovoltaik panel 670 kWh enerji üretirken 1 m yüksekte olan çift yüzölü fotovoltaik panel 680 kWh ve tek yüzölü fotovoltaik panel ise 617 kWh enerji üretmiştir. Çift yüzölü iki panelin ürettiği enerji arasındaki fark sadece %1,5 olarak bulunmuştur. Panel yüksekliğini arttırmak için kullanılan malzeme maaliyeti, panelin yüksekte olmasından dolayı karşımıza çıkan temizleme zorluğu ve yüksekte olan panelin zorlu hava şartlarından daha fazla etkileneyeceği düşünüldüğünde bu enerji üretim farkının göz ardı edilebileceği sonucuna varılmıştır. Doğu yönüne bakan çift yüzölü paneller için ölçüm yapılan lokasyonda panel yüksekliğinin yerden 0,5 m olmasının yeterli olduğu belirlenmiştir.

Çalışmanın bir diğerk gözlem değeri olan panel eğim açısı incelendiğinde, eğim açısı 50° olduğunda panel arka yüzeyine gelen ışınlam miktarının azaldığı ve panel enerji üretiminin düştüğü gözlenmiştir. Benzer meteorolojik şartlarda ve maksimum albedo etkisi altında panel eğim açısının 40° olmasının yeterli olacağı sonucuna varılmıştır.

Enerji ve ekserji sonuçları incelendiğinde çift yüzölü fotovoltaik panellerin doğu yöneliminden dolayı sabah saatlerinde daha yüksek enerji ve ekserji oranına sahip olduğu gözlenmiştir. Artan sıcaklık, çift yüzölü fotovoltaik paneller üzerinde tek yüzölü fotovoltaik panele kıyasla daha fazla olumsuz etki oluşturmuştur. Gün içerisinde değışen enerji ve ekserji

değerlerine bakıldığında çift yüzölü fotovoltaiik panellerin daha yüksek enerji ve ekserji değerlerine sahip olduğu görölmüştür.

Yapay sinir ağı modeli tahmininden elde edilen enerji üretim değeri ile çift yüzölü fotovoltaiik panellerin gerçek enerji üretim değeri arasında güçlü bir korelasyon bulunmuştur. 15 Mayıs tarihinde yerden 1 m yüksekte olan panelin enerji üretimi ile YSA tahmini arasındaki korelasyon katsayısı 0,964, aynı tarihte yerden 0,5 m yüksekte olan panelin enerji üretimi ile YSA tahmini arasındaki korelasyon katsayısı ise 0,921 olarak hesaplanmıştır. 15 Temmuz tarihinde yerden 1 m yüksekte olan panelin enerji üretimi ile YSA tahmini arasındaki korelasyon katsayısı 0,982, aynı tarihte yerden 0,5 m yüksek olan panelin enerji üretimi ile YSA tahmini arasındaki korelasyon katsayısı 0,960'tır. 15 Eylül tarihinde yerden 1 m yüksekte olan panelin enerji üretimi ile YSA tahmini arasındaki korelasyon katsayısı 0,961, aynı tarihte yerden 0,5 m yüksek olan panelin enerji üretimi ile YSA tahmini arasındaki korelasyon katsayısı 0,973 olarak hesaplanmıştır.

Bu YSA modeli farklı meteorolojik koşullar altında gerçekleştirilebilecek deneysel çalışmaların öngörülmesinde kullanılabilir. Bu kapsamda;

- Deneysel veri sayısının arttırılmasının
- Eğitim algoritmalarının gerçekleştirileceği yazılımsal ve donanımsal ekipman performansının arttırılmasının

yapay sinir ağı eğitim hızını ve başarısını geliştirebileceği düşünülmektedir.

Bu tez çalışmasında da gösterildiği üzere, çift yüzölü fotovoltaiik panellerin enerji üretimi birçok faktöre bağlıdır. Bu çerçevede gelecekte yapılması önerilen çalışmalar aşağıdaki maddeler halinde sıralanabilir;

- Panel eğim açıları çeşitlendirilebilir,
- Bu çalışmada kış aylarında veri alınmamıştır. Kış aylarında veri toplanarak, çift yüzölü panellerin enerji üretimlerinin tek yüzölü panellerin enerji üretimi ile karşılaştırılması yapılabilir,
- Tek yüzölü fotovoltaiik paneller ile çift yüzölü fotovoltaiik paneller aynı yönetime (güney) konumlandırılarak verimleri incelenebilir,

- Dikey yerleştirilen çift yüzlü fotovoltaik panellerin kısa kenarları ve uzun kenarlarının yerleri değiştirilerek (yatay yerleştirilerek), üretilen enerji değerleri karşılaştırılabilir,
- Farklı zemin albedo değerlerinde çift yüzlü panellerin enerji üretimi incelenebilir,
- Çift yüzlü fotovoltaik panellerin soğutucu sistemler ile yüzey sıcaklıklarının düşürülmesinin enerji üretimine ve verimine etkileri analiz edilebilir.



KAYNAKLAR

- Abd-Elhady, M. S., Fouad, M. M. ve Khalil, T. (2016). Improving the efficiency of photovoltaic (PV) panels by oil coating. *Energy Conversion and Management*, 115, 1-7. doi:10.1016/j.enconman.2016.02.040
- Aden solar. (2021). Şebekeye bağlı sistemler. *Aden Solar*. 15 Aralık 2023 tarihinde <https://www.adensolar.com/tr/services/on-grid> adresinden erişildi.
- Ahmad, K. S., Naqvi, S. N. ve Jaffri, S. B. (2021). Systematic review elucidating the generations and classifications of solar cells contributing towards environmental sustainability integration. *Reviews in Inorganic Chemistry*, 41(1), 21-39. doi:10.1515/revic-2020-0009
- Akhsassi, M., El Fathi, A., Erraissi, N., Aarich, N., Bennouna, A., Raoufi, M. ve Outzourhit, A. (2018). Experimental investigation and modeling of the thermal behavior of a solar pv module. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 180, 271-279. doi:10.1016/j.solmat.2017.06.052
- Akyol, U., Akal, D ve Durak, A. (2021). Estimation of power output and thermodynamic analysis of standard and finned photovoltaic panels. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 45:3, 8438-8457. doi: 10.1080/15567036.2021.1928337
- Alam, M., Gul, M. S. ve Muneer, T. (2023). Performance analysis and comparison between bifacial and monofacial solar photovoltaic at various ground albedo conditions. *Renewable Energy Focus*, 44, 295-316. doi:10.1016/j.ref.2023.01.005
- Alhmoud, L. (2023). Why does the pv solar power plant operate ineffectively? *Energies*, 16(10), 4074. doi:10.3390/en16104074
- Anonim. (2010). *PV battery photovoltaic system component*. 17 Aralık 2023 tarihinde <https://www.solardirect.com/archives/pv/batteries/batteries.htm> adresinden erişildi.
- Anonim. (2019). *Yarım kesim (hücre) teknolojisi güneş paneli tasarım ve imalatı*. 17 Aralık 2023 tarihinde <https://tr.ds solar.com/info/half-cut-technology-for-solar-panel-design-and-34919965.html> adresinden erişildi.
- Anonim. (2020). *Differences monocrystalline vs polycrystalline solar panels*. 17 Aralık 2023 tarihinde <https://www.prostarsolar.net/article/differences-monocrystalline-vs-polycrystalline-solar-panels.html> adresinden erişildi.
- Anonim. (2022). *Hibrit pv-t panel*. 17 Aralık 2023 tarihinde <https://www.solimpeks.com.tr/hibrit-pv-t-panel/> adresinden erişildi.
- Appelbaum, J. (2018). The role of view factors in solar photovoltaic fields. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 161-171. doi:10.1016/j.rser.2017.07.026
- Arizona Solar Center. (2021). *PV Row to Row Spacing*. Arizona Solar Center. 27 Aralık 2023 tarihinde <https://azsolarcenter.org/pv-row-to-row-spacing> adresinden erişildi.

- Arslanoglu, N., Yigit, A. ve Eker, B. S. (2020). Investigation of wind speed effect on different mounted pv systems using satellite data. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 39(4). doi:10.1002/ep.13397
- Arslanoğlu, N., Yiğit, A. ve Eker, B. S. (2019). Fotovoltaik sistemlerin projelendirme, kurulum ve işletilmesinde önemli faktörler. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 483-490. doi:10.17482/uumfd.562016
- Asgharzadeh, A., Deline, C., Stein, J. ve Toor, F. (2018). A comparison study of the performance of south/north-facing vs east/west-facing bifacial modules under shading condition. *2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC)*. doi:10.1109/PVSC.2018.8548185
- Assi, A. (2008). *Effect of Wind Blown Sand and Dust on Photovoltaic Arrays*. Conference, Global Conference on Global Warming 2008 (GCGW-08), Istanbul (Turkey). Erişim adresi: <http://www.gcgw.org/Abstract-book-GCGW08.pdf>
- Ay, İ. (2010). *Süper alaşımların aşındırıcılı su jeti ile işlenebilirliğinin araştırılması*. (Yüksek Lisans Tezi). Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul .
- Ayadi, O., Jamra, M., Jaber, A., Ahmad, L. ve Alnaqep, M. (2021). An experimental omparison of bifacial and monofacial pv modules. *2021 12th International Renewable Engineering Conference, IREC 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. doi:10.1109/IREC51415.2021.9427864
- Bagher, A. M., Vahid, M. M. A. ve Mohsen, M. (2015). Types of solar cells and application. *American Journal of Optics and Photonics*, 3(5), 94. doi:10.11648/j.ajop.20150305.17
- Baloch, A. A. B., Hammat, S., Figgis, B., Alharbi, F. H. ve Tabet, N. (2020). In-field characterization of key performance parameters for bifacial photovoltaic installation in a desert climate. *Renewable Energy*, 159, 50-63. doi:10.1016/j.renene.2020.05.174
- Bayat, M. ve Ozalp, M. (2018). Energy, exergy and exergoeconomic analysis of a solar photovoltaic module. *Exergetic, Energetic and Environmental Dimensions* (ss. 383-402). Elsevier. doi:10.1016/B978-0-12-813734-5.00022-6
- Bembe, M. T., Daniel Chowdhury, S. P., Meeding, N., Lekhuleni, E. G., Ayanna, M. B. ve Simelane, S. (2018). *Effects of Grass and Concrete Reflective Surface on the Performance of Dual Axis Bifacial Solar PV Systems*. 2018 IEEE PES/IAS PowerAfrica içinde (ss. 734-738). IEEE. doi:10.1109/PowerAfrica.2018.8521143
- Benick, J., Steinhäuser, B., Müller, R., Bartsch, J., Kamp, M., Mondon, A., ... Glunz, S. (2014). High efficiency n-type PERT and PERL solar cells. *2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)* içinde (ss. 3637-3640). IEEE. doi:10.1109/PVSC.2014.6924895
- Bronzoni, M., Colace, L., De Iacovo, A., Laudani, A., Lozito, G., Lucaferri, V., ... Rampino, S. (2018). Equivalent circuit model for Cu(In,Ga)Se₂ solar cells operating at different temperatures and irradiance. *Electronics*, 7(11), 324. doi:10.3390/electronics7110324

- Calabrò, E. (2013). An Algorithm to determine the optimum tilt angle of a solar panel from global horizontal solar radiation. *Journal of Renewable Energy*, 2013, 1-12. doi:10.1155/2013/307547
- Cañete, C., Carretero, J. ve Sidrach-de-Cardona, M. (2014). Energy performance of different photovoltaic module technologies under outdoor conditions. *Energy*, 65, 295-302. doi:10.1016/j.energy.2013.12.013
- Carron, R., Nishiwaki, S., Feurer, T., Hertwig, R., Avancini, E., Löckinger, J., ... Tiwari, A. N. (2019). Advanced alcały treatments for high-efficiency Cu(In,Ga)Se solar cells on flexible substrates. *Advanced Energy Materials*, 9(24). doi:10.1002/aenm.201900408
- Cengel, Y. (2002). *Heat transfer - a practical approach (2nd ed.)*. New York: McGraw-Hill Science, Engineering & Mathematics.
- Chiodetti, M., Lindsay, A., Dupeyrat, P., Binesti, D., Lutun, E., Khalid, R. ve Mousel², S. (2016). *PV bifacial yield simulation with a variable albedo model*. Conference: EU PVSEC, 2016, Munich. Erişim adresi: https://www.researchgate.net/profile/Matthieu-Chiodetti/publication/338370497_pv_bifacial_yield_simulation_with_a_variable_albedo_model/links/5e0f4a4492851c8364aec116/pv-bifacial-yield-simulation-with-a-variable-albedo-model.pdf
- Chu, T. L. ve Chu, S. S. (1993). Recent progress in thin-film cadmium telluride solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 1(1), 31-42. doi:10.1002/pip.4670010105
- Cuevas, A., Luque, A., Eguren, J. ve del Alamo, J. (1982). 50 Per cent more output power from an albedo-collecting flat panel using bifacial solar cells. *Solar Energy*, 29(5), 419-420. doi:10.1016/0038-092X(82)90078-0
- Dabbabi, S., Ben Nasr, T. ve Turki Kamoun, N. (2019). CIGS solar cells for space applications: Numerical simulation of the effect of traps created by high-energy electron and proton irradiation on the performance of solar cells. *JOM*, 71(2), 602-607. doi:10.1007/s11837-018-2748-9
- Demirgil, B. ve Birol, Y. E. (2020). Yenilenebilir enerji tüketimi ve ekonomik büyüme ilişkisi: Türkiye için bir toda-tamamoto nedensellik analizi. *Cumhuriyet Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 21(1), 68-83. doi:10.37880/cumuiibf.671591
- Desai, A., Mukhopadhyay, I. ve Ray, A. (2022). Feasibility assessment of bifacial rooftop photovoltaic systems in the State of Gujarat in India. *Frontiers in Energy Research*, 10. doi:10.3389/fenrg.2022.869890
- Division, C. E. Commission. t. s., engineering, e. ve regional economic research, I. (2001). A Guide to Photovoltaic (PV) System Design and Installation: Consultant Report. California Energy Commission. <https://books.google.com.tr/books?id=snlGNwAACAAJ> adresinden erişildi.
- Djalab, A., Bessous, N., Rezaoui, M. M. ve Merzouk, I. (2018). Study of the effects of partial shading on pv array. *2018 International Conference on Communications and Electrical Engineering (ICCEE)* içinde (ss. 1-5). IEEE. doi:10.1109/CCEE.2018.8634512

- Doble, D. M. J., Kurtz, S. R., Marion, B., Perdichizzi, R. F., Christian, T., Koch, M., ... Duell, M. (2010). *Impact of structured glass on light transmission, temperature and power of pv modules*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:135480228> adresinden erişildi.
- DS New Energy. (2019). *Silicon solar cells with PERC technology*. 10 Aralık 2023 tarihinde <https://www.dsneg.com/info/silicon-solar-cells-with-perc-technology-32662180.html> adresinden erişildi.
- Duffie, J. A. ve Beckman, W. A. (2013). Solar radiation. *Solar Engineering of Thermal Processes* (ss. 3-42). doi:10.1002/9781118671603.ch1
- Durusoy, B., Ozden, T. ve Akinoglu, B. G. (2020). Solar irradiation on the rear surface of bifacial solar modules: a modeling approach. *Scientific Reports*, 10(1), 13300. doi:10.1038/s41598-020-70235-3
- EIA. (2021, 6 Aralık). *U.S. Energy information administration - independent statistics and analysis*. 7 Aralık 2023 tarihinde <https://www.eia.gov/totalenergy/data/monthly/index.php> adresinden erişildi.
- EİGM, E. işleri genel müdürlüğü. (2023, 8 Aralık). *Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası*. 8 Aralık 2023 tarihinde <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/> adresinden erişildi.
- Eyderman, S. ve John, S. (2016). Light-trapping and recycling for extraordinary power conversion in ultra-thin gallium-arsenide solar cells. *Scientific Reports*, 6(1), 28303. doi:10.1038/srep28303
- Fajuke, I. D. ve Raji, A. K. (2022). Firefly algorithm-based optimization of the additional energy yield of bifacial pv modules. *Energies*, 15(7). doi:10.3390/en15072651
- Fernández, E. F., Ferrer-Rodríguez, J. P., Almonacid, F. ve Pérez-Higueras, P. (2017). Current-voltage dynamics of multi-junction CPV modules under different irradiance levels. *Solar Energy*, 155, 39-50. doi:10.1016/j.solener.2017.06.012
- Fischer, M., Herritsch, S., Trube, J. ve Woodhouse, M. (2021). International technology roadmap for photovoltaic (ITRPV). *VDMA photovoltaic equipment*. 26 Aralık 2023 tarihinde <https://itrpv.vdma.org/en/> adresinden erişildi.
- Fouad, M. M., Shihata, L. A. ve Morgan, E. I. (2017). An integrated review of factors influencing the performance of photovoltaic panels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 1499-1511. doi:10.1016/j.rser.2017.05.141
- Fraas, L. M. (2014). The dream of thin film pv. *Low-cost solar electric power*, 73-79. Cham: Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-07530-3_6
- Fraas, L. ve Partain, L. (2010). Crystalline silicon solar cells and modules. *Solar cells and their applications*, 4(5), 1135-157.
- Fthenakis, V. ve Kim, H. C. (2010). Life-cycle uses of water in U.S. electricity generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 2039-2048. doi:10.1016/j.rser.2010.03.008

- Fthenakis, V. M. (2004). Life cycle impact analysis of cadmium in CdTe pv production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8(4), 303-334. doi:10.1016/j.rser.2003.12.001
- Gangopadhyay, U., Jana, S. ve Das, S. (2013). State of art of solar photovoltaic technology. *Conference Papers in Energy*, 2013, 1-9. doi:10.1155/2013/764132
- Garcia, J., Gago, E., Bayo, J. ve Montes, G. (2007). The use of solar energy in the buildings construction sector in Spain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(9), 2166-2178. doi:10.1016/j.rser.2006.03.010
- Gardas, B. B., Tendolkar, M., Bhai, V. ve Polytechnic, P. (2012). *Design of cooling system for photovoltaic panel for increasing şts electrical efficiency*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:55949610> adresinden erişildi.
- Garg, S. ve J.B., A. (2016). High temperature effect on multicrystalline photovoltaic module in Western Rajasthan, India. *Communications on Applied Electronics*, 4(2), 44-48. doi:10.5120/cae2016652055
- Garrison, J. D. (1985). A study of the division of global irradiance into direct and diffuse irradiance at thirty-three U.S. sites. *Solar Energy*, 35(4), 341-351. doi:10.1016/0038-092X(85)90142-2
- Geisler, B. (2010). *String vs. central inverters: Dimension of the inverter*. Conference: Stuttgart: Photon's1st PV Inverter
- Gezgin, Ç. D. (2023). *Güneş panellerinde, güneş takip sistemlerinin ve panel kirliliğinin panel verimliliğine etkisinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
- Ghenai, C., Ahmad, F. F., Rejeb, O. ve Bettayeb, M. (2022). Artificial neural networks for power output forecasting from bifacial solar pv system with enhanced building roof surface Albedo. *Journal of Building Engineering*, 56. doi:10.1016/j.jobbe.2022.104799
- Ghenai, C., Ahmad, F. F., Rejeb, O. ve Hamid, A. K. (2021). Sensitivity analysis of design parameters and power gain correlations of bi-facial solar pv system using response surface methodology. *Solar Energy*, 223, 44-53. doi:10.1016/j.solener.2021.05.024
- Glunz, S. W., Feldmann, F., Richter, A., Bivour, M., Reichel, C., Steinkemper, H., ... Hermle, M. (2015). The irresistible charm of a simple current flow pattern – approaching 25% with a solar cell featuring a full-area back contact. *31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition* içinde . Hamburg: 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition.
- Gong, J., Sumathy, K., Qiao, Q. ve Zhou, Z. (2017). Review on dye-sensitized solar cells (DSSCs): Advanced techniques and research trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 234-246. doi:10.1016/j.rser.2016.09.097
- Green, M. A., Hishikawa, Y., Dunlop, E. D., Levi, D. H., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M. ve Ho-Baillie, A. W. Y. (2019). Solar cell efficiency tables. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 27(1), 3-12. doi:10.1002/pip.3102
- Green, S. (2021). *Fotovoltaik (PV) Güneş enerji sistemi nedir? Sistem bileşenleri nelerdir?* Green Solar Network. 15 Aralık 2023 tarihinde <https://www.greensolarnetwork.org/bilgi->

bankasi/fotovoltaik-pv-gunes-enerji-sistemi-nedir-sistem-bilesenleri-nelerdir adresinden erişildi.

- Griffith, J. ~S., Rathod, M. ~S. ve Paslaski, J. (1981). Some tests of flat plate photovoltaic module cell temperatures in simulated field conditions. *15th Photovoltaic Specialists Conference*, 822-830.
- Grommes, E. M., Blieske, U. ve Hadji-Minaglou, J. R. (2023). Positive impact of red soil on albedo and the annual yield of bifacial photovoltaic systems in Ghana. *Energies*, 16(4). doi:10.3390/en16042042
- Gu, W., Li, S., Liu, X., Chen, Z., Zhang, X. ve Ma, T. (2021). Experimental investigation of the bifacial photovoltaic module under real conditions. *Renewable Energy*, 173, 1111-1122. doi:10.1016/j.renene.2020.12.024
- Gu, W., Ma, T., Li, M., Shen, L. ve Zhang, Y. (2020). A coupled optical-electrical-thermal model of the bifacial photovoltaic module. *Applied Energy*, 258. doi:10.1016/j.apenergy.2019.114075
- Guerra, N., Guevara, M., Palacios, C. ve Crupi, F. (2018). Operation and physics of photovoltaic solar cells: an overview. *I+D Tecnológico*, 14(2), 84-95. doi:10.33412/idt.v14.2.2077
- Gueymard, C. A. (2018). A reevaluation of the solar constant based on a 42-year total solar irradiance time series and a reconciliation of spaceborne observations. *Solar Energy*, 168, 2-9. doi:10.1016/j.solener.2018.04.001
- Guo, S., Walsh, T. M. ve Peters, M. (2013). Vertically mounted bifacial photovoltaic modules: A global analysis. *Energy*, 61, 447-454. doi:10.1016/j.energy.2013.08.040
- Guter, W., Schöne, J., Philipps, S. P., Steiner, M., Siefer, G., Wekkeli, A., ... Dimroth, F. (2009). Current-matched triple-junction solar cell reaching 41.1% conversion efficiency under concentrated sunlight. *Applied Physics Letters*, 94(22). doi:10.1063/1.3148341
- Gül, M. (2019, 22 Mart). *Fotovoltaik/termal hibrit güç sisteminin ekonomik analizi ve performansının incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Fen Bilimleri Enstitü, Balıkesir.
- Gündoğdu, K., Öztürk, A. ve Kabadayı, H. S. (2016). Fotovoltaik paneller için güneş takip edebilen basit ve ekonomik bir sistem tasarımı. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi* 4(2), 634-639.
- Gwandu, B. A. L. ve Creasey, D. J. (1995). Humidity: A factor in the appropriate positioning of a photovoltaic power station. *Renewable Energy*, 6(3), 313-316. doi:10.1016/0960-1481(95)00073-S
- Hayat, M. B., Ali, D., Monyake, K. C., Alagha, L. ve Ahmed, N. (2019, 10 Mart). Solar energy—a look into power generation, challenges, and a solar-powered future. *International Journal of Energy Research*. John Wiley and Sons Ltd. doi:10.1002/er.4252
- Hegazy, A. A. (2001). Effect of dust accumulation on solar transmittance through glass covers of plate-type collectors. *Renewable Energy*, 22(4), 525-540. doi:https://doi.org/10.1016/S0960-1481(00)00093-8

- Holmberg, J., Flynn, C. ve Portinari, L. (2006). The colours of the sun. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 367(2), 449-453. doi:10.1111/j.1365-2966.2005.09832.x
- Hooper, F. C. ve Brunger, A. P. (1980). A Model for the angular distribution of sky radiance. *Journal of Solar Energy Engineering*, 102(3), 196-202. doi:10.1115/1.3266154
- Hoppe, H. ve Sariciftci, N. S. (2004). Organic solar cells: An overview. *Journal of Materials Research*, 19(7), 1924-1945. doi:10.1557/JMR.2004.0252
- Huld, T., Gottschalg, R., Beyer, H. G. ve Topič, M. (2010). Mapping the performance of pv modules, effects of module type and data averaging. *Solar Energy*, 84(2), 324-338. doi:10.1016/j.solener.2009.12.002
- International Energy Agency (IEA). (2023, 4 Aralık). *Data and statistics*. 4 Aralık 2023 tarihinde <http://www.iea.org/> adresinden erişildi.
- Islam, M. D., Islam, M. A., Sajjad, R. N. ve Khan, M. R. (2022). A techno-economic analysis of bifacial panels under soiling in south-asian urban area. *2022 IEEE Region 10 Symposium, TENSYP 2022* içinde . Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. doi:10.1109/TENSYP54529.2022.9864510
- Ismail Shoukry. (2015). *Bifacial modules- simulation and experiment*. Master's Thesis. University of Stuttgart Institute for Photovoltaic, 2015.
- Jamalullail, N., Smohamad, I., Nnorizan, M. ve Mahmed, N. (2018). Enhancement of energy conversion efficiency for dye sensitized solar cell using zinc oxide photoanode. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 374, 012048. doi:10.1088/1757-899X/374/1/012048
- Jayakumar, P. ve UN.ESCAP. (2009). Solar energy : resource assessment handbook. *Asian and Pacific Centre for Transfer of Technology*. 16 Aralık 2023 tarihinde <https://repository.unescap.org/handle/20.500.12870/5255#> adresinden erişildi.
- Jayaseelan, J. D., Vijayalakshmi, N., Shanmugam, M., Jaiganesh, R., Sankarraj, K. ve Srinivasan, M. (2022). *Performance and efficiency of different types of solar cell material -A review*.
- Jeter, S. M. (1981). Maximum conversion efficiency for the utilization of direct solar radiation. *Solar Energy*, 26(3), 231-236. doi:10.1016/0038-092X(81)90207-3
- Joge, T., Eguchi, Y., Imazu, Y., Araki, I., Uematsu, T. ve Matsukuma, K. (2004). Basic application technologies of bifacial photovoltaic solar modules. *Electrical Engineering in Japan*, 149(3), 32-42. doi:10.1002/eej.10370
- Johansson, F., Gustafsson, B. E., Stridh, B. ve Campana, P. E. (2022). 3D-thermal modelling of a bifacial agrivoltaic system: a photovoltaic module perspective. *Energy Nexus*, 5, 100052. doi:10.1016/j.nexus.2022.100052
- Joshi, A. S., Dincer, I. ve Reddy, B. V. (2009a). Thermodynamic assessment of photovoltaic systems. *Solar Energy*, 83(8), 1139-1149. doi:10.1016/j.solener.2009.01.011

- Joshi, A. S., Dincer, I. ve Reddy, B. V. (2009b). Performance analysis of photovoltaic systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8), 1884-1897. doi:10.1016/j.rser.2009.01.009
- Kalogirou, S. (2009). Solar energy engineering: *Processes and systems: Second Edition*.
- Kannan, N. ve Vakeesan, D. (2016). Solar energy for future world: - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 1092-1105. doi:10.1016/j.rser.2016.05.022
- Kaplan, R. (2005). *Amorf silikon p-i-n güneş pilleri ve kalkajonid camlarda fototaşıyıcı ömür süresi ölçümü*. III. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, Mersin.
- Karaagac, M. O., OGUL, H. ve Bardak, S. (2020). Güneş enerji sistemi tasarımı: Kanatlı hayvan çiftliği örneği. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8(1), 711-722. doi:10.29130/dubited.490154
- Karabaş, A. ve Mengi, O. Ö. (2019). Fotovoltaik güneş panelleri için farklı MGNİ teknikleri kullanılarak bir şarj regülatörünün performansının incelenmesi ve karşılaştırılması. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 9(1), 152-175. doi:10.31466/kfbd.565701
- Karafil, A., Ozbay, H., Kesler, M. ve Parmaksiz, H. (2015). Calculation of optimum fixed tilt angle of PV panels depending on solar angles and comparison of the results with experimental study conducted in summer in Bilecik, Turkey. *2015 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)* içinde (ss. 971-976). IEEE. doi:10.1109/ELECO.2015.7394517
- Kasten, F. ve Young, A. T. (1989). Revised optical air mass tables and approximation formula. *Applied Optics*, 28(22), 4735. doi:10.1364/AO.28.004735
- Katkar, A., Shinde, N. N. ve Patil, P. (2011). Performance & evaluation of industrial solar cell w.r.t. temperature and humidity. *International Journal of Research in Mechanical Engineering and Technology*, 1, 69-73.
- Kern, J. ve Harris, I. (1975). On the optimum tilt of a solar collector. *Solar Energy*, 17(2), 97-102. doi:10.1016/0038-092X(75)90064-X
- Kim, S., Hoang, V. Q. ve Bark, C. W. (2021). Silicon-cased technologies for flexible photovoltaic (pv) devices: From basic mechanism to manufacturing technologies. *Nanomaterials*, 11(11), 2944. doi:10.3390/nano11112944
- Kim, T., Lim, S., Yun, S., Jeong, S., Park, T. ve Choi, J. (2020). Design strategy of quantum dot thin-film solar cells. *Small*, 16(45). doi:10.1002/sml.202002460
- King, D. L., Boyson, W. E. ve Kratochvil, J. A. (2002). Analysis of factors influencing the annual energy production of photovoltaic systems. *Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2002. içinde (ss. 1356-1361). IEEE. doi:10.1109/PVSC.2002.1190861
- Kiran, T.-M. ve Miklas, S. (2012). Artificial neural network simulation of combined permeable pavement and earth energy systems treating storm water. *Journal of Environmental Engineering*, 138(4), 499-509. doi:10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000497

- Kopecek, R. ve Libal, J. (2018). *Bifacial Photovoltaics: Technology, applications and economics*. Institution of Engineering and Technology. doi:10.1049/PBPO107E
- Kratochvil, J., Boyson, W. ve King, D. (2004). *Photovoltaic array performance model*. Albuquerque, NM, and Livermore, CA (United States). doi:10.2172/919131
- Krein, L., Bordin, N., Karsenty, A., Drori, A., Grob, D. ve Eisenberg, N. (2010). P_v module power gain due to bifacial design. Preliminary experimental and simulation data. *2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference* içinde (ss. 002171-002175). IEEE. doi:10.1109/PVSC.2010.5615874
- Kumar, N. M., Chopra, S. S., de Oliveira, A. K. V., Ahmed, H., Vaezi, S., Madukanya, U. E. ve Castañón, J. M. (2020). Solar pv module technologies. *Photovoltaic Solar Energy Conversion* (ss. 51-78). Elsevier. doi:10.1016/B978-0-12-819610-6.00003-X
- Lave, M. S. (2015). *Albedo and Diffuse POA Measurements to Evaluate Transposition Model Uncertainty*. Albuquerque, NM, and Livermore, CA (United States). doi:10.2172/1529054
- Lavey, J. I., Bozalakov, D., Van Eetvelde, G. ve Vandeveld, L. (2020). Impact of solar panel orientation on the integration of solar energy in low-voltage distribution grids. *International Journal of Photoenergy*, 2020, 1-13. doi:10.1155/2020/2412780
- Liang, T. S., Pravettoni, M., Deline, C., Stein, J. S., Kopecek, R., Singh, J. P., ... Khoo, Y. S. (2019). A review of crystalline silicon bifacial photovoltaic performance characterisation and simulation. *Energy & Environmental Science*, 12(1), 116-148. doi:10.1039/C8EE02184H
- Liu, C. P., Chang, M. W. ve Chuang, C. L. (2014). Effect of rapid thermal oxidation on structure and photoelectronic properties of silicon oxide in monocrystalline silicon solar cells. *Current Applied Physics*, 14(5), 653-658. doi:10.1016/j.cap.2014.02.017
- Liu, Y., Li, Y., Wu, Y., Yang, G., Mazzarella, L., Procel-Moya, P., ... Sun, B. (2020). High-efficiency silicon heterojunction solar cells: Materials, devices and applications. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 142, 100579. doi:10.1016/j.mser.2020.100579
- Loke, E., Warnaars, E. A., Jacobsen, P., Nelen, F. ve do Céu Almeida, M. (1997). Artificial neural networks as a tool in urban storm drainage. *Water Science and Technology*, 36(8), 101-109. doi:https://doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00612-4
- Lorenz, E., Scheidsteger, T., Hurka, J., Heinemann, D. ve Kurz, C. (2011). Regional pv power prediction for improved grid integration. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 19(7), 757-771. doi:10.1002/pip.1033
- Mahmoud, A. A., Hafez, A. A., Yousef, A. M., Gaafar, M. A., Orabi, M. ve Ali, A. F. M. (2023). Fault-tolerant modular multilevel converter for a seamless transition between stand-alone and grid-connected microgrid. *IET Power Electronics*, 16(1), 11-25. doi:10.1049/pel2.12359
- Maier, H. R. ve Dandy, G. C. (2000). Neural networks for the prediction and forecasting of water resources variables: a review of modelling issues and applications. *Environmental Modelling & Software*, 15(1), 101-124. doi:10.1016/S1364-8152(99)00007-9

- Mandoc, M. M., Koster, L. J. A. ve Blom, P. W. M. (2007). Optimum charge carrier mobility in organic solar cells. *Applied Physics Letters*, 90(13). doi:10.1063/1.2711534
- Manish, S., Pillai, I. R. ve Banerjee, R. (2006). Sustainability analysis of renewables for climate change mitigation. *Energy for Sustainable Development*, 10(4), 25-36. doi:10.1016/S0973-0826(08)60553-0
- Manjunath, C., Reddy, J., Reddy, K. S. R., Kumar, I. R. G. ve Sanketh, S. (2022). Energy, exergy performance and analysis of 50w solar photovoltaic module. *Materials Today: Proceedings*, 54, 531-536. doi:10.1016/j.matpr.2021.12.209
- Marion, B. (2020). *Albedo data sets for bifacial pv systems*. Calgary: National renewable energy laboratory. (ss. 485-489). 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC).
- Martín, N. ve Ruiz, J. M. (2002). A new model for pv modules angular losses under field conditions. *International Journal of Solar Energy*, 22(1), 19-31. doi:10.1080/01425910212852
- Martín, N. ve Ruiz, J. M. (2005). Annual angular reflection losses in pv modules. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 13(1), 75-84. doi:10.1002/pip.585
- Mazon, R., Kaiser, A. s, Zamora, B., García-Cascales, J. ve Vera-García, F. (2011). *Analytical model and experimental validation of the heat transfer and the induced flow in a pv cooling duct in environmental conditions*. World Renewable Energy Congress 2011, Sweden. Edoi:10.3384/ecp110572907
- Mekhilef, S., Saidur, R. ve Kamalisarvestani, M. (2012). Effect of dust, humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 2920-2925. doi:10.1016/j.rser.2012.02.012
- Mekhilef, S., Saidur, R. ve Safari, A. (2011). A review on solar energy use in industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4), 1777-1790. doi:10.1016/j.rser.2010.12.018
- Meral, M. E. ve Dinçer, F. (2011). A review of the factors affecting operation and efficiency of photovoltaic based electricity generation systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2176-2184. doi:10.1016/j.rser.2011.01.010
- Messenger, R. A. ve Ventre, J. (2004). *Photovoltaic Systems Engineering, Second Edition*. Taylor & Francis. <https://books.google.com.tr/books?id=XiOeYrhyVIEC> adresinden erişildi.
- Metz, A., Fischer, M. ve Trube, J. (2017). Crystalline silicon technology—current status and outlook. *International Technology Roadmap for Photovoltaics (ITRPV) 8 th edition*. Brussels: PV Manufacturing in Europe Conference.
- Metzger, W. K., Grover, S., Lu, D., Colegrove, E., Moseley, J., Perkins, C. L., ... Gloeckler, M. (2019). Exceeding 20% efficiency with in situ group V doping in polycrystalline CdTe solar cells. *Nature Energy*, 4(10), 837-845. doi:10.1038/s41560-019-0446-7
- Meyer, E. L. ve van Dyk, E. E. (2004). Assessing the reliability and degradation of photovoltaic module performance parameters. *IEEE Transactions on Reliability*, 53(1), 83-92. doi:10.1109/TR.2004.824831

- Mikofski, M. A., Darawali, R., Hamer, M., Neubert, A. ve Newmiller, J. (2019). Bifacial performance modeling in large arrays. *2019 IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)* içinde (ss. 1282-1287). IEEE. doi:10.1109/PVSC40753.2019.8980572
- Modules, S. (2016). *Calculating the additional energy yield of bifacial solar modules*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:174775800> adresinden erişildi.
- Moharram, K. A., Abd-Elhady, M. S., Kandil, H. A. ve El-Sherif, H. (2013). Enhancing the performance of photovoltaic panels by water cooling. *Ain Shams Engineering Journal*, 4(4), 869-877. doi:10.1016/j.asej.2013.03.005
- Mondol, J. D., Yohanis, Y. G. ve Norton, B. (2007). The impact of array inclination and orientation on the performance of a grid-connected photovoltaic system. *Renewable Energy*, 32(1), 118-140. doi:10.1016/j.renene.2006.05.006
- Moss, S. J. ve Ledwith, A. (1987). *The Chemistry of the Semiconductor Industry*. Springer Science.
- Muehleisen, W., Loeschnig, J., Feichtner, M., Burgers, A. R., Bende, E. E., Zamini, S., ... Georghiou, G. E. (2021). Energy yield measurement of an elevated PV system on a white flat roof and a performance comparison of monofacial and bifacial modules. *Renewable Energy*, 170, 613-619. doi:10.1016/j.renene.2021.02.015
- Narasimhan, A. (2020). Qualitative assessment of pv system cable loss and practical cost optimization. *2020 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT)* içinde (ss. 1-6). IEEE. doi:10.1109/CONECCT50063.2020.9198671
- Ndiaye, A., Charki, A., Kobi, A., Kébé, C. M. F., Ndiaye, P. A. ve Sambou, V. (2013). Degradations of silicon photovoltaic modules: A literature review. *Solar Energy*, 96, 140-151. doi:10.1016/j.solener.2013.07.005
- Nour, M. H., Smith, D. W., El-Din, M. G. ve Prepas, E. E. (2006). The application of artificial neural networks to flow and phosphorus dynamics in small streams on the boreal plain, with emphasis on the role of wetlands. *Ecological Modelling*, 191(1), 19-32. doi:10.1016/j.ecolmodel.2005.08.010
- Ozturk, M. C., Dogan, B. ve Yesilyurt, M. K. (2023). Energy, exergy, sustainability, and economic analyses of a grid-connected solar power plant consisting of bifacial PV modules with solar tracking system on a single axis. *Science and Technology for Energy Transition*, 78, 19. doi:10.2516/stet/2023015
- Özkan, A. O. ve Demir, H. B. (2019). Fotovoltaik panellerde sıcaklık ve zenit açısının panel güç üretimine etkisi. *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 1(1), 1-9. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/neufmbd/issue/44699/517309> adresinden erişildi.
- Öztürk, H. H. (2017). Güneş enerjisinden fotovoltaik yöntemle elektrik üretiminde güç dönüşüm verimi ve etkili etmenler. *Elektrik Tesisat Ulusal Kongre ve Sergisi Bildirileri*, 1, 1-14. https://www.emo.org.tr/ekler/3a921ffad054cb0_ek.pdf adresinden erişildi.

- Papež, N., Dallaev, R., Kaspar, P., Sobola, D., Škarvada, P., Țălu, Ș., ... Nebojsa, A. (2021). characterization of gaAs Solar cells under supercontinuum long-time illumination. *Materials*, 14(2), 461. doi:10.3390/ma14020461
- Papež, N., Dallaev, R., Țălu, Ș. ve Kaštyl, J. (2021). Overview of the current state of gallium arsenide-based solar cells. *Materials*, 14(11), 3075. doi:10.3390/ma14113075
- Parida, B., Iniyar, S. ve Goic, R. (2011). A review of solar photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1625-1636. doi:10.1016/j.rser.2010.11.032
- Patel, M. T., Ryyan Khan, M., Alnuaimi, A., Albadwawwi, O., John, J. J. ve Alam, M. A. (2019). Implications of seasonal and spatial albedo variation on the energy output of bifacial solar farms: A global perspective. *2019 IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)* içinde (ss. 2264-2267). IEEE. doi:10.1109/PVSC40753.2019.8981163
- Pelaez, S. A., Deline, C., MacAlpine, S. M., Marion, B., Stein, J. S. ve Kostuk, R. K. (2019). Comparison of bifacial solar irradiance model predictions with field validation. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 9(1), 82-88. doi:10.1109/JPHOTOV.2018.2877000
- Perera, H. D. M. R. ve Wen, H. (2019). Power generation and performance analysis of bi-facial vs mono-facial 10KW photovoltaic power station. *2019 18th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON)* içinde (ss. 1-3). IEEE. doi:10.1109/ICOON.2019.8934305
- Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, J. ve Stewart, R. (1990). Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. *Solar Energy*, 44(5), 271-289. doi:10.1016/0038-092X(90)90055-H
- Pérez-Higueras, P., Ferrer-Rodríguez, J. P., Almonacid, F. ve Fernández, E. F. (2018). Efficiency and acceptance angle of high concentrator photovoltaic modules: Current status and indoor measurements. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94, 143-153. doi:10.1016/j.rser.2018.06.011
- Petela, R. (2005). Exergy analysis of the solar cylindrical-parabolic cooker. *Solar Energy*, 79(3), 221-233. doi:10.1016/j.solener.2004.12.001
- Pike, C., Whitney, E., Wilber, M. ve Stein, J. S. (2021). Field performance of south-facing and east-west facing bifacial modules in the arctic. *Energies*, 14(4), 1-15. doi:10.3390/en14041210
- Piliouline, M., Cañete, C., Moreno, R., Carretero, J., Hirose, J., Ogawa, S. ve Sidrach-de-Cardona, M. (2013). Comparative analysis of energy produced by photovoltaic modules with anti-soiling coated surface in arid climates. *Applied Energy*, 112, 626-634. doi:10.1016/j.apenergy.2013.01.048
- Pradhan, A., Ali, S. M. ve Behera, P. (2012). Utilization of Battery Bank in case of Solar PV System and Classification of Various Storage Batteries. *International journal of scientific and research publications*, 2(12), 1-5.

- Pradhan, A. ve Panda, B. (2017). Analysis of ten external factors affecting the performance of PV system. *2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS)* içinde (ss. 3093-3098). IEEE. doi:10.1109/ICECDS.2017.8390025
- Quaschnig, V. ve Hanitsch, R. (1996). Numerical simulation of current-voltage characteristics of photovoltaic systems with shaded solar cells. *Solar Energy*, 56(6), 513-520. doi:10.1016/0038-092X(96)00006-0
- Rahman, M. M., Hasanuzzaman, M. ve Abd Rahim, N. (2017). Effects of operational conditions on the energy efficiency of photovoltaic modules operating in Malaysia. *Journal of cleaner production*, 143, 912-924.
- Rahoma, U., Hassan, A. H., HK, E. ve Fathy, A. (2005). Effect of airborne dust concentration on the performance of PV modules. *J Astron Soc Egypt*, 13, 24-38.
- Rajput, P., Sastry, O. S. ve Tiwari, G. N. (2017). Effect of irradiance, temperature exposure and an arrhenius approach to estimating weathering acceleration factor of glass, eva and tedlar in a composite climate of India. *Solar Energy*, 144, 267-277. doi:https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.01.027
- Ramanujam, J., Bishop, D. M., Todorov, T. K., Gunawan, O., Rath, J., Nekovei, R., ... Romeo, A. (2020). Flexible CIGS, CdTe and a-Si:H based thin film solar cells: A review. *Progress in Materials Science*, 110, 100619. doi:10.1016/j.pmatsci.2019.100619
- Ramli, M. A. M., Prasetyono, E., Wicaksana, R. W., Windarko, N. A., Sedraoui, K. ve Al-Turki, Y. A. (2016). On the investigation of photovoltaic output power reduction due to dust accumulation and weather conditions. *Renewable Energy*, 99, 836-844. doi:10.1016/j.renene.2016.07.063
- Rathore, N., Panwar, N. L., Yettou, F. ve Gama, A. (2021). A comprehensive review of different types of solar photovoltaic cells and their applications. *International Journal of Ambient Energy*, 42(10), 1200-1217. doi:10.1080/01430750.2019.1592774
- Reagan, J. ve Kurtz, S. (2022). Energetic comparison of vertical bifacial to tilted monofacial solar. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 12(6), 1334-1340. doi:10.1109/JPHOTOV.2022.3211650
- Rehman, A. U., Aslam, F. ve Khan, H. A. (2014). Analyze the absorption properties and i-v characterization of dye sensitized solar cell using ruthenium dye. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 7(4), 387-390. doi:10.3844/ajeassp.2014.387.390
- REN21. (2022). *Renewables global status report*. Global Status Report collection, Renewables in Energy Supply. Paris.
- Roper, LD. F. (2012, 29 Aralık). *Future world energy*. 27 Aralık 2023 tarihinde <http://roperld.com/science/EnergyFuture.htm> adresinden erişildi.
- Ross, M. M. D. (2005). *Optimal wire size for photovoltaic systems operating at maximum power point: A closed form approach*. SESCO 2005 Conference British Columbia Institute of Technology Burnaby, British Columbia, Canada August 20-24, 2005. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:197672108> adresinden erişildi.

- Saga, T. (2010). Advances in crystalline silicon solar cell technology for industrial mass production. *NPG Asia Materials*, 2(3), 96-102. doi:10.1038/asiamat.2010.82
- Said, S. A. M., Hassan, G., Walwil, H. M. ve Al-Aqeeli, N. (2018). The effect of environmental factors and dust accumulation on photovoltaic modules and dust-accumulation mitigation strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 743-760. doi:10.1016/j.rser.2017.09.042
- Said, S., Al-Aqeeli, N. ve Walwil, H. (2015). The potential of using textured and anti-reflective coated glasses in minimizing dust fouling. *Solar Energy*, 113. doi:10.1016/j.solener.2015.01.007
- Salloom, A. H., Abdulrazzaq, O. A., Qasim, A. Y., Ismail, B. H. ve Awad, S. M. (2022). Determination of optimal elevation of silicon bifacial solar panel. *Iraqi Journal of Industrial Research*, 9(1). doi:10.53523/ijoirVol9I1ID147
- Schnitzer, H., Brunner, C. ve Gwehenberger, G. (2007). Minimizing greenhouse gas emissions through the application of solar thermal energy in industrial processes. *Journal of Cleaner Production*, 15(13-14), 1271-1286. doi:10.1016/j.jclepro.2006.07.023
- Seven Sensör. (2020). *Ürün Kategorileri*. ArgeSim Group. 6 Ocak 2024 tarihinde <https://www.sevensensor.com/tr/urunler> adresinden erişildi.
- Shoukry, I., Libal, J., Kopecek, R., Wefringhaus, E. ve Werner, J. (2016). Modelling of bifacial gain for stand-alone and in-field installed bifacial pv modules. *Energy Procedia*, 92, 600-608. doi:10.1016/j.egypro.2016.07.025
- Shukir, S. (2022). Solar System Inverters Types. *Journal of Advances in Electrical Devices*, 6-3.
- Skoplaki, E., Boudouvis, A. G. ve Palyvos, J. A. (2008). A simple correlation for the operating temperature of photovoltaic modules of arbitrary mounting. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92(11), 1393-1402. doi:10.1016/j.solmat.2008.05.016
- Solangi, K. H., Islam, M. R., Saidur, R., Rahim, N. A. ve Fayaz, H. (2011, Mayıs). A review on global solar energy policy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. doi:10.1016/j.rser.2011.01.007
- Soliman, A. S. (2023). 4E analysis of a new design heat sink for cooling a bifacial photovoltaic system using PCM and ribs. *Journal of Energy Storage*, 73, 108907. doi:10.1016/j.est.2023.108907
- Sudhakar, K. ve Srivastava, T. (2014). Energy and exergy analysis of 36 W solar photovoltaic module. *International Journal of Ambient Energy*, 35(1), 51-57. doi:10.1080/01430750.2013.770799
- Suhandi, A., Tayubi, Y. R. ve Samsudin, A. (2020). Simulation and optimization of p-n junction gaas solar cell efficiency with using Sio2 antireflection coating coupled with Al gaas window layer. *International Journal of Scientific & Technology*, 9(4) 3761-3766.
- Sun, X., Khan, M. R., Deline, C. ve Alam, M. A. (2018). Optimization and performance of bifacial solar modules: A global perspective. *Applied Energy*, 212, 1601-1610. doi:10.1016/j.apenergy.2017.12.041

- Sundaram, S., Benson, D. ve Mallick, T. K. (2016). Overview of the pv industry and different technologies. *Solar Photovoltaic Technology Production* içinde (ss. 7-22). Elsevier. doi:10.1016/B978-0-12-802953-4.00002-0
- Swanson, R. M. (2000). The promise of concentrators. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 8(1), 93-111. doi:10.1002/(SICI)1099-159X(200001/02)8:1<93::AID-PIP303>3.0.CO;2-S
- Talavera, D. L., Ferrer-Rodríguez, J. P., Pérez-Higueras, P., Terrados, J. ve Fernández, E. F. (2016). A worldwide assessment of levelised cost of electricity of HCPV systems. *Energy Conversion and Management*, 127, 679-692. doi:10.1016/j.enconman.2016.09.054
- Taşkın, O. (2018). *Hibrit (güneş paneli / rüzgâr türbini) enerji sistemi destekli endüstriyel tip bir kurutucunun tasarımı ve performansı*. (Doktora Tezi). Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Tebelskis, J. (1995). *Speech Recognition using neural networks*. (PhD Thesis). Carnegie Mellon University, Pittsburgh.
- Tian, W., Wang, Y., Ren, J. ve Zhu, L. (2007). Effect of urban climate on building integrated photovoltaics performance. *Energy Conversion and Management*, 1-8. doi:10.1016/j.enconman.2006.05.015
- Tripanagnostopoulos, Y., Bazilian, M., Zoulia, I. ve Battisti, R. (2002). *Hybrid PV/T system with improved air heat extraction modification*. 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 6-10 June 2005, Barcelona, Spain.
- Tur, M. R., Colak, I. ve Bayindir, R. (2018). Effect of faults in solar panels on production rate and efficiency. *2018 International Conference on Smart Grid (icSmartGrid)* içinde (ss. 287-293). IEEE. doi:10.1109/ISGWCP.2018.8634509
- Turgut, M. (2020). *Hibrit bağlantılı güneş enerji sistemin nedir?* M5 Enerji. 15 Aralık 2023 tarihinde <https://www.m5enerji.com/hibrit-baglantili-gunes-enerji-sistemi-nedir/> adresinden erişildi.
- Tyagi, V. V., Rahim, N. A. A., Rahim, N. A. ve Selvaraj, J. A. /L. (2013). Progress in solar PV technology: research and achievement. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20, 443-461. doi:10.1016/j.rser.2012.09.028
- UNFCCC. (2021). *The Paris Agreement*. 4 Aralık 2023 tarihinde https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf adresinden erişildi.
- Verma, A. (2020, 25 Mayıs). 500W modules and higher efficiency, India falling behind. *Saur Energy International*.
- Vidyanandan, K. V. (2017). An overview of factors affecting the performance of solar pv systems. *Energy Scan (A house journal of Corporate Planning, NTPC Ltd.)*, 27, 2-8.
- Viitanen, J. (2015). *Energy efficient lighting systems in buildings with integrated photovoltaics*. (Phd Thesis). Aalto University, Helsinki.
- Wang, Shitao, Shen, Y., Zhou, J., Li, C. ve Ma, L. (2022). Efficiency enhancement of tilted bifacial photovoltaic modules with horizontal single-axis tracker—the bifacial companion method. *Energies*, 15(4). doi:10.3390/en15041262

- Wang, Stanley, Wilkie, O., Lam, J., Steeman, R., Zhang, W., Khoo, K. S., ... Rostan, H. (2015). Bifacial photovoltaic systems energy yield modelling. *Energy Procedia*, 77, 428-433. doi:10.1016/j.egypro.2015.07.060
- Wang, T.-S., Tan, C.-H., Chen, L. ve Tsai, Y.-C. (2008). Applying artificial neural networks and remote sensing to estimate chlorophyll-a concentration in water body. *2008 Second International Symposium on Intelligent Information Technology Application* içinde (ss. 540-544). IEEE. doi:10.1109/IITA.2008.279
- Wild-Scholten, M. J. (2013). Energy payback time and carbon footprint of commercial photovoltaic systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 119, 296-305. doi:10.1016/j.solmat.2013.08.037
- Yalılı Kılıç, M., Dönmez, T. ve Adalı, S. (2021). Bursa ve karaman illerinde konutlarda güneş enerji potansiyelinin uygulanabilirliğinin araştırılması. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 26(2), 421-432. doi:10.17482/uumfd.952925
- Yousif, J. H., Kazem, H. A., Alattar, N. N. ve Elhassan, I. I. (2019). A comparison study based on artificial neural network for assessing PV/T solar energy production. *Case Studies in Thermal Engineering*, 13, 100407. doi:10.1016/j.csite.2019.100407
- Yusufoglu, U. A., Pletzer, T. M., Koduvelikulathu, L. J., Comparotto, C., Kopecek, R. ve Kurz, H. (2015). Analysis of the annual performance of bifacial modules and optimization methods. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 5(1), 320-328. doi:10.1109/JPHOTOV.2014.2364406
- Zaihidee, F. M., Mekhilef, S., Seyedmahmoudian, M. ve Horan, B. (2016). Dust as an unalterable deteriorative factor affecting PV panel's efficiency: Why and how. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 1267-1278. doi:10.1016/j.rser.2016.06.068
- Zhang, Y., Wang, X., Pan, Y. ve Hu, R. (2013). Diurnal and seasonal variations of surface albedo in a spring wheat field of arid lands of Northwestern China. *International Journal of Biometeorology*, 57(1), 67-73. doi:10.1007/s00484-012-0534-x

EK-1 YSA EĞİTİM KODLARI

Name	Size	Bytes	Class
cikti	1x9606	76848	double
ctst	1x344	2752	double
girdi	7x9606	537936	double
gtst	7x344	19264	double
net	1x1	86245	network
sonuctest	344x1	2752	double
tr	1x1	326814	struct

Neural Network

name: 'Function Fitting Neural Network'

userdata: (your custom info)

dimensions:

numInputs: 1

numLayers: 4

numOutputs: 1

numInputDelays: 0

numLayerDelays: 0

numFeedbackDelays: 0

numWeightElements: 1766

sampleTime: 1

connections:

biasConnect: [1; 1; 1; 1]

inputConnect: [1; 0; 0; 0]

layerConnect: [4x4 boolean]

outputConnect: [0 0 0 1]

subobjects:

input: Equivalent to inputs{1}

output: Equivalent to outputs{4}

inputs: {1x1 cell array of 1 input}

layers: {4x1 cell array of 4 layers}

outputs: {1x4 cell array of 1 output}

biases: {4x1 cell array of 4 biases}

inputWeights: {4x1 cell array of 1 weight}

layerWeights: {4x4 cell array of 3 weights}

functions:

adaptFcn: 'adaptwb'

adaptParam: (none)

derivFcn: 'defaultderiv'

divideFcn: 'dividerand'

divideParam: .trainRatio, .valRatio, .testRatio

divideMode: 'sample'

initFcn: 'initlay'

performFcn: 'mse'

performParam: .regularization, .normalization

plotFcns: {'plotperform', 'plottrainstate', 'ploterrhist',
'plotregression', 'plotfit'}

plotParams: {1x5 cell array of 5 params}

trainFcn: 'trainlm'

trainParam: .showWindow, .showCommandLine, .show, .epochs,
.time, .goal, .min_grad, .max_fail, .mu, .mu_dec,
.mu_inc, .mu_max

weight and bias values:

IW: {4x1 cell} containing 1 input weight matrix

LW: {4x4 cell} containing 3 layer weight matrices

b: {4x1 cell} containing 4 bias vectors

methods:

adapt: Learn while in continuous use

configure: Configure inputs & outputs

gensim: Generate Simulink model

init: Initialize weights & biases

perform: Calculate performance

sim: Evaluate network outputs given inputs

train: Train network with examples

view: View diagram

unconfigure: Unconfigure inputs & outputs

Layer 1

Neural Network Layer

name: 'Hidden 1'

dimensions: 53

distanceFcn: (none)

distanceParam: (none)

distances: []

initFcn: 'initnw'

netInputFcn: 'netsum'

netInputParam: (none)
positions: []
range: [53x2 double]
size: 53
topologyFcn: (none)
transferFcn: 'logsig'
transferParam: (none)
userdata: (your custom info)

Layer 2

Neural Network Layer

name: 'Hidden 2'
dimensions: 21
distanceFcn: (none)
distanceParam: (none)
distances: []
initFcn: 'initnw'
netInputFcn: 'netsum'
netInputParam: (none)
positions: []
range: [21x2 double]
size: 21
topologyFcn: (none)
transferFcn: 'logsig'
transferParam: (none)
userdata: (your custom info)

Layer 3

Neural Network Layer

name: 'Hidden 3'
dimensions: 9
distanceFcn: (none)
distanceParam: (none)
distances: []
initFcn: 'initnw'
netInputFcn: 'netsum'
netInputParam: (none)
positions: []
range: [9x2 double]
size: 9
topologyFcn: (none)
transferFcn: 'logsig'
transferParam: (none)
userdata: (your custom info)

Layer 4

Neural Network Layer

name: 'Output'
dimensions: 1
distanceFcn: (none)
distanceParam: (none)
distances: []
initFcn: 'initnw'
netInputFcn: 'netsum'
netInputParam: (none)
positions: []

range: [1x2 double]
size: 1
topologyFcn: (none)
transferFcn: 'purelin'
transferParam: (none)
userdata: (your custom info)

Function Parameters for 'trainlm'

Show Training Window Feedback showWindow: true
Show Command Line Feedback showCommandLine: false
Command Line Frequency show: 25
Maximum Epochs epochs: 1000
Maximum Training Time time: Inf
Performance Goal goal: 0
Minimum Gradient min_grad: 1e-07
Maximum Validation Checks max_fail: 6
Mu mu: 0.001
Mu Decrease Ratio mu_dec: 0.1
Mu Increase Ratio mu_inc: 10
Maximum mu mu_max: 10000000000

Girdi Katmanı Ağırlıkları:

Gizli Katman 1 Ağırlıkları:

-2.8044	-4.4065	-1.5363	1.8713	2.1071	-1.8500	1.6164	-1.0162	2.5586	0.6649	2.7999	-2.7764	1.6941
1.5816	-0.6896	-1.3137	-2.4472	-0.1660	-2.6793	-2.5444	-0.5596	-2.0553	2.0476	4.0085	3.1748	-5.6840
1.0714	-1.5203	-3.2464	-3.1329	-0.2078	-8.8384	-5.6410	0.1151	-1.1223	-1.5412	-2.1635	-0.6537	4.8196
-0.2523	3.7620	-2.8188	-0.7767	2.1696	-0.7386	2.2497	2.7365	1.4472	3.9381	0.7342	-0.9834	-5.5167
-1.6782	-1.3703	2.7585	-2.0520	0.4735	-2.7493	5.0430	-0.3750	2.9317	-2.3365	2.5488	-3.4704	-8.8413
-1.4010	0.4657	1.7696	-4.7068	4.1790	-3.4214	-3.9077	-3.6087	7.4974	0.5639	-1.1924	-0.4449	-7.0273
-0.0313	1.4534	0.3504	-4.9631	-6.1539	-1.1752	6.6700	-2.4848	3.4092	-0.2545	7.3533	-1.0109	-4.6007

-2.8582	1.2906	1.1206	3.2767	-2.3672	-1.2947	1.7811	8.3901	-4.2870	-10.7784	1.0233	-4.4301	9.6175
6.1350	2.1213	-2.7942	5.2270	0.0642	4.6526	-1.0631	2.1121	0.2718	-1.1862	-2.3737	3.6193	-4.2570
2.6204	3.9312	0.5061	-0.9899	-3.2190	-0.9429	4.5610	-2.2429	-2.2938	1.0848	0.4320	-0.8886	10.7063
0.7412	-0.9808	1.2897	-1.3608	-2.5052	-0.5742	0.5808	-4.3829	2.9243	-0.7623	-2.0135	2.2510	2.9677
-7.4803	-1.9598	1.1420	0.6167	-4.1782	4.9075	-2.1348	-2.4674	0.3301	-12.4599	-0.0692	-2.9918	-4.5832
6.2433	-2.0354	-5.0909	-0.3606	1.8605	4.7909	-1.5246	0.3854	-0.0651	-3.4476	2.2591	-0.4350	5.7062
-3.6281	6.7668	0.0739	-0.6240	-1.4846	-3.1898	-0.9836	-1.7785	3.8767	3.1233	-1.9318	7.6689	2.6336
2.0042	1.9494	2.1070	-0.3437	2.2816	0.6625	0.6826	-1.5590	1.9454	4.6046	0.1322	1.7906	-0.0243
1.9478	-0.7073	-1.8144	1.4459	1.9076	-0.4944	-3.6746	-1.1343	-1.1457	1.4815	-1.2725	7.4871	-7.6191
-0.7573	6.2325	8.5422	-1.2639	0.0754	-1.1851	2.4647	2.1567	-1.5123	2.9015	1.3303	2.1075	6.6840
3.7126	0.8055	3.8653	-0.4006	4.1055	-0.7512	6.6629	0.0752	2.7347	0.2526	1.1937	2.5882	-5.2082
-0.9977	1.0904	-0.7719	3.0152	-2.9071	1.4987	-1.2039	4.0425	-0.2513	0.4447	-3.1208	1.0711	4.4795
2.6813	-1.1986	-3.9266	-1.8156	-0.4199	0.9813	-0.3095	-1.8956	0.4759	0.4003	2.2331	0.3525	4.7390
4.3157	-6.0256	1.1639	-0.8031	-2.0912	2.1424	0.4505	-0.7735	-0.6674	-6.4828	-0.0951	-3.0528	4.6803

Gizli Katman 2 Ağırlıkları:

3.7650	-0.6870	-0.6895	-0.1296	-1.2272	2.7455	-7.6297	2.5456	-3.1718	-0.0814	-3.4633	8.4854	-3.8836
-1.4796	-6.6407	1.6349	1.0485	4.4446	0.1723	0.5969	0.9647	-1.3219	-0.0596	-5.7565	-0.4186	-1.0942
0.2237	0.9540	-5.0153	-2.8387	-2.1389	-1.2475	3.9634	0.6898	0.4979	0.5575	6.8141	-6.4115	2.8179
-1.0938	-2.2074	1.6029	1.4208	2.8335	-2.4643	0.6790	-0.2541	0.8123	4.4567	-0.3117	-0.3477	0.3514
4.7997	0.1839	-3.9603	0.9039	0.7377	4.8273	-4.8362	4.4052	-3.4806	1.4908	2.0644	4.2218	-0.6757
-5.1865	-5.1941	1.0937	2.6072	4.0187	-0.5905	-0.0474	1.9356	-1.2232	-2.8823	-3.3917	0.5150	0.1928
2.1797	5.0253	6.2918	8.1284	-1.5120	2.4766	-0.6891	2.3042	2.6748	2.7904	9.2187	2.6822	5.6235
-17.3332	1.5992	-1.4017	-5.3441	37.0960	22.7227	-2.6726	2.8823	-30.9715	-16.9224	-1.2197	-3.9441	-25.8695
4.6300	13.9163	8.0846	7.5022	-0.8485	-1.4852	4.2983	-12.9617	6.9637	1.8939	2.2942	-9.3525	9.1646

Gizli Katman 3 Ağırlıkları:

-1.4829	3.2876	-0.8822	-0.3652	0.7995	-3.2603	-0.7351	0.7315	0.5246
---------	--------	---------	---------	--------	---------	---------	--------	--------

Bias Değerleri:

Katman 1 Bias:

-5.8089
-4.8929
-7.4629
-8.1142
-7.1039
-3.5536
-11.7946
-3.4908
6.6820
2.3948
2.7273
-2.4402
-1.4025
2.8890
4.7927
-2.9007
2.7409
-4.2571
-1.5247
-9.4733
0.2974
0.1679
0.8603
-0.7583
-0.3572
-1.2352
0.0452
-1.2262
-0.5343
-5.4456
1.1580
-1.8838
-2.3159
-2.3682

0.5086
-5.8077
-4.7502
2.4940
-0.5801
2.0024
-5.8030
-2.3745
-3.0201
9.0570
-8.7330
-4.8258
-7.2813
9.4492
-6.0288
-3.5004
-9.2243
-5.1264
-8.1971

Katman 2 Bias:

0.1112
-5.3190
5.4039
-9.4606
0.4889
-6.4998
7.1149
-7.7273
-1.1672
3.8089
1.5461
22.7721
-1.6412
2.8166
-0.9504

1.4605
-3.0818
-8.1562
7.0836
5.8625
-1.9175

Katman 3 Bias:

-13.4056
-13.6819
9.8322
-4.1285
-7.9840
-11.2681
2.6431
-5.5556
2.9767

Katman 4 Bias:

0.3949

TEZDEN ÜRETİLMİŞ ESERLER

- A. Uluslararası Hakemli Makaleler
- B. Uluslararası Makaleler
- C. Ulusal Hakemli Makaleler
- D. Ulusal Makaleler
- E. Uluslararası Konferans Bildirileri
- F. Ulusal Konferans Bildirileri
- G. Projeler

Proje Türü	1002 – B Hızlı Destek
Projedeki Görevi	Yürütücü
Proje No	123M661
Proje Adı	Çift Yüzlü Güneş Panellerinin Optimum Yükseklik ve Panel Açısı Parametrelerinin Belirlenmesi ve Verime Etkisi
Başlangıç Tarihi	05/07/2023
Bitiş Tarihi	05/01/2024

- H. Ödüller