

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM
DALI**

**DENİZLİ İLİ İÇİN FARKLI ZEMİN VE SICAKLIK
KOŞULLARINDA ÇİFT YÜZLÜ FOTOVOLTAİK
PANELLERİN PERFORMANS ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NUSRET BAĞ

DENİZLİ, AĞUSTOS - 2024

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM
DALI**



**DENİZLİ İLİ İÇİN FARKLI ZEMİN VE SICAKLIK
KOŞULLARINDA ÇİFT YÜZLÜ FOTOVOLTAİK
PANELLERİN PERFORMANS ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NUSRET BAĞ

DENİZLİ, AĞUSTOS-2024

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

NUSRET BAĞ

ÖZET

DENİZLİ İLİ İÇİN FARKLI ZEMİN VE SICAKLIK KOŞULLARINDA ÇİFT YÜZLÜ FOTOVOLTAİK PANELLERİN PERFORMANS ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NUSRET BAĞ

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. BEKİR SAMİ SAZAK)

DENİZLİ, AĞUSTOS-2024

Fotovoltaik paneller, güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine çeviren modern ve çevreci bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır. Güneş ışığını emen yarı iletken malzemeler sayesinde, sürdürülebilir enerji üretimi sağlanarak fosil yakıtlara bağımlılık azaltılmaktadır. Güneş enerjisi, sınırsız ve yenilenebilir bir kaynak olmasıyla birlikte, enerji sektöründe hızla önem kazanmaktadır. Fotovoltaik paneller, geniş uygulama alanlarıyla bireysel evlerden büyük enerji santrallerine kadar farklı ölçeklerde kullanılmakta, aynı zamanda enerji maliyetlerini düşürmekte ve karbon salınımını azaltmaktadır. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte, daha verimli ve ekonomik paneller üretilmekte, bu da küresel enerji dönüşümüne katkı sağlamaktadır.

Bu çalışma, çift yüzü PV hücre ve modüllerinin güneş ışığı altında nasıl performans gösterdiğini basit ve ekonomik bir yöntemle ölçmeyi amaçlamaktadır. Bu çalışmada, güneş ışınımı değerinin ışık aydınlatma şiddeti ile ölçülmesi hedeflenmektedir. Denizli ili için farklı zemin ve sıcaklık koşullarında çift yüzü fotovoltaik panellerin performansının detaylı bir analizi gerçekleştirilmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin kullanımının artırılması amacıyla, çift yüzü fotovoltaik panellerin zemin türüne ve çevresel sıcaklık değişimlerine karşı gösterdiği performansın belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Çift yüzü PV paneller, her iki yüzeyleri aracılığıyla güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürebilme kapasitesine sahiptir ve bu özellikleriyle geleneksel tek yüzü panellere kıyasla daha yüksek verimlilik sunarlar.

Araştırma kapsamında, Denizli ilinde belirlenen farklı zemin türleri (beyaz çakıl, siyah çakıl, toprak vb.) ve çeşitli sıcaklık koşulları altında çift yüzü PV panellerin enerji üretim performansları karşılaştırılmıştır. Her zemin türü için panelin albedo etkisi (yüzeyden yansıyan ışık) ve çevresel sıcaklıkların panel verimliliğine etkisi detaylı olarak incelenmiştir. Bu ölçümler sonucunda çift yüzü fotovoltaik panel ile yapılan ölçümlerde beyaz çakıl zemin ile siyah çakıl zemin arasında %8,56 fark olduğu tespit edilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Çift Yüzü Fotovoltaik Paneller, Albedo, Çift Yüzü, Performans Analizi, Enerji Verimliliği

ABSTRACT

PERFORMANCE ANALYSIS OF BIFACIAL PHOTOVOLTAIC PANELS UNDER DIFFERENT GROUND AND TEMPERATURE CONDITIONS FOR DENİZLİ PROVINCE

MSC THESIS
NUSRET BAĞ

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING
(SUPERVISOR: PROF. DR. BEKİR SAMİ SAZAK)

DENİZLİ, AUGUST-2024

Photovoltaic panels stand out as a modern and eco-friendly technology that directly converts sunlight into electrical energy. By utilizing semiconductor materials that absorb sunlight, sustainable energy production is achieved, thereby reducing dependence on fossil fuels. Solar energy, being an inexhaustible and renewable resource, is gaining rapid importance in the energy sector. Photovoltaic panels are used in a wide range of applications, from individual homes to large-scale power plants, and contribute to reducing energy costs and carbon emissions. With advancements in technology, more efficient and economical panels are being produced, further contributing to the global energy transition.

This study aims to measure the performance of bifacial PV cells and modules under sunlight using a simple and cost-effective method. The study focuses on measuring solar irradiance through light intensity. A detailed analysis of the performance of bifacial photovoltaic panels under different ground and temperature conditions in the Denizli province has been conducted. To enhance the efficient utilization of renewable energy sources, determining the performance of bifacial photovoltaic panels against ground type and environmental temperature variations is of great importance. Bifacial PV panels have the capacity to convert sunlight into electrical energy through both surfaces, offering higher efficiency compared to traditional monofacial panels.

Within the scope of the research, the energy production performance of bifacial PV panels was compared under various ground types (white gravel, black gravel, soil, etc.) and temperature conditions in the Denizli province. The albedo effect (light reflected from the surface) for each ground type and the impact of environmental temperatures on panel efficiency were examined in detail. As a result of these measurements, it was determined that there was an 8.56% difference between the measurements taken with bifacial photovoltaic panels on white gravel and black gravel surfaces.

KEYWORDS: Bifacial Photovoltaic Panels, Albedo, Bifacial, Performance Analysis, Energy Efficiency

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	2
1.2 Literatür Özeti	2
2. FOTOVOLTAİK HÜCRE TEKNOLOJİLERİ	15
2.1 Giriş.....	15
2.2 Monokristal Silisyum Hücreler	16
2.3 Polikristal Silisyum Hücreler	16
2.4 Amorf Silisyum Hücreler	16
2.5 Kadmiyum Tellür Hücreler	17
2.6 Bakır İndiyum Selenür Güneş Hücreleri.....	17
2.7 Bakır İndiyum Galyum Selenid Güneş Hücreleri	17
2.8 Organik Fotovoltaik Hücreler	18
2.9 Perovskit Güneş Hücreleri	19
2.10 Dye-Sensitized Güneş Hücreleri	19
2.11 Kuantum Noktalı Güneş Hücreleri	20
2.12 Tandem Güneş Hücreleri	21
2.13 Yarım Hücre (Half-Cut) Teknolojisi.....	22
2.14 Çift Yüz (Bifacial) Teknolojisi	22
2.15 Multi Busbar Teknolojisi	22
2.16 Takip (Tracker) Teknolojisi	22
3. FOTOVOLTAİK PANELLERİN MODELLENMESİ	23
3.1 Tek Yüzlü Fotovoltaik Hücrenin Tek Diyotlu Eşdeğer Devresi	23

3.2	Tek Yüzlü Fotovoltaik Hücrenin İki Diyotlu Eşdeğer Devresi	24
3.3	Çift Yüzlü Fotovoltaik Hücrenin Tek Diyotlu Eşdeğer Devresi	25
3.4	Fotovoltaik Panellerin I-V Eğrisini Etkileyen Faktörler	26
3.4.1	Seri Direnç Kayıpları	26
3.4.2	Paralel Direnç Kayıpları	28
3.4.3	Işınım Değerinden Kaynaklanan Kayıplar	29
3.4.4	Fotovoltaik Hücre Sıcaklığındaki Artış	30
4.	ÇİFT YÜZLÜ PANELLERİN MODELLENMESİ VE ÇİFT YÜZLÜ PANEL İLE DENEYSEL ÇALIŞMA.....	31
4.1	Çift Yüzlü Panellere Giriş.....	31
4.2	Albedo.....	31
4.3	Çift Yüzlü Fotovoltaik Sistemin Deney Bileşenleri	32
4.3.1	Çift Yüzlü Fotovoltaik Panel	33
4.3.2	VEML7700 Işık Sensörü	33
4.3.3	BF1750 Işık Sensörü Devresi	35
4.3.4	ESP32 S3 Kart Devresi.....	36
4.3.5	HDC 1080 Sıcaklık ve Nem Sensörü Kartı	37
4.3.6	LDR Işık Sensörü Kartı	37
4.3.7	Mikro SD Kart Modülü.....	38
4.3.8	Gerçek Zamanlı Saat Modülü	39
4.3.9	PT100 Sıcaklık Sensörü.....	39
4.4	Çift Yüzlü Fotovoltaik Panelin Farklı Zemin ve Sıcaklık Koşullarında Performansının Karşılaştırılması İçin Kurulan Sistem.....	40
5.	BULGULAR VE TARTIŞMA.....	42
5.1	Deney Düzeneği ve Detaylı Analizi.....	42
6.	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	51
7.	KAYNAKLAR	52
8.	ÖZGEÇMİŞ	56

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Fotovoltaik hücre teknolojilerinin sınıflandırılması.	16
Şekil 3.1: Fotovoltaik hücrenin tek diyotlu eşdeğer devresi.	23
Şekil 3.2: Fotovoltaik hücrenin iki diyotlu eşdeğer devresi.	24
Şekil 3.3: Çift yüzlü fotovoltaik hücrenin eşdeğer devresi.	25
Şekil 3.4: R_s değerlerine göre IV eğrisindeki değişimler a) $R_s=1$ Ohm ; b) $R_s=2,5$ Ohm; c) $R_s=4$ Ohm.	27
Şekil 3.5: R_p Değerlerine göre IV eğrisindeki değişimler a) $R_p=500$ Ohm; b) $R_p=200$ Ohm; c) $R_p=100$ Ohm.	29
Şekil 3.6: Işınım değerlerine göre IV eğrisindeki değişimler.	29
Şekil 3.7: Fotovoltaik hücredeki sıcaklık değişimlerinin IV eğrisindeki etkisi.	30
Şekil 4.1: Farklı zeminlerde albedo katsayısının gösterilmesi (Albedo Nedir?, 2024).	32
Şekil 4.2: VEM7700 blok diyagramı.	34
Şekil 4.3: BF1750 ışık sensörünün blok diyagramı.	35
Şekil 4.4: ESP32 S3 kart devresi.	36
Şekil 4.5: HDC 1080 kartının gösterimi.	37
Şekil 4.6: LDR ışık sensörü kartı.	38
Şekil 4.7: Micro SD kart modülü.	38
Şekil 4.8: Gerçek zamanlı saat modülü.	39
Şekil 4.9: PT100 sıcaklık sensörü.	40
Şekil 5.1: Çift yüzlü fotovoltaik panel ile kurulan deney düzeneği.	42
Şekil 5.2: Deneysel Çalışmanın Yapıldığı Yer ve Harita Gösterimi(Solargis Prospect, 2024).	43
Şekil 5.3: Güneş azimutu ve güneş yüksekliği(Solargis Prospect, 2024).	43
Şekil 5.4: Çift yüzlü fotovoltaik panelin yüzey sıcaklığı ve hava sıcaklığı.	45
Şekil 5.5: Aydınlanma şiddeti ön yüz değerleri.	46
Şekil 5.6: Aydınlanma şiddeti arka yüzey değerleri.	46
Şekil 5.7: Deneysel çalışma da ölçülen panel gücü.	47

Şekil 5.8: Deneysel çalışma a) Beyaz çakıl b) Siyah çakıl.	47
Şekil 5.9: Sıcaklık ve Nem değişimlerine ait grafik.	48
Şekil 5.10: Farklı yüzeylerde yansıyan aydınlanma şiddetine ait grafik.	49
Şekil 5.11: Farklı zeminlerdeki panel gücü değişimine ait grafik.	49
Şekil 5.12: Farklı zeminlerde ölçülen aydınlatma şiddeti değişimine ait grafik.	50

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 4.1: Bazı yüzeylerin albedo değerleri.	32
Tablo 4.2: Çift yüzlü fotovoltaik panelin karakteristik özellikleri.....	33
Tablo 4.3: Deneysel çalışma da kullanılan modülün arka güç kazanımı.	33
Tablo 4.4: VEML7700 ışık sensöründe gain ve IT zaman (ms) tablosu.	34
Tablo 5.1: Küresel yatay ışınım (GHI) - saatlik ortalamalar [Wh/m ²].	44

SEMBOL LİSTESİ

I	:	Akım (A)
V	:	Gerilim (V)
P	:	Güç (W)
PV	:	Fotovoltaik
I_{ph}	:	PV hücrenin ürettiği akım
I_d	:	Diyot akımı
N_s	:	Fotovoltaik modüllerde seri bağlı hücre sayısı
T	:	Sıcaklık
q	:	Elektronun elektrik yükü (C)
K	:	Boltzman sabiti (joule / kelvin (K))
G	:	Işınım değeri
kWh	:	Kilowatt saat
lx	:	Aydınlatma şiddeti birimi
R_s	:	Seri direnç
R_p	:	Paralel direnç
V_{oc}	:	Açık devre gerilimi
I_{oc}	:	Kısa devre akımı
FF	:	Doldurma oranı
$^{\circ}C$:	Sıcaklık birimi
μm	:	Mikrometre

ÖNSÖZ

Bu tezde açıklanan “Denizli İli İçin Farklı Zemin ve Sıcaklık Koşullarında Çift Yüzlü Fotovoltaik Panellerin Performans Analizi” başlığı altında yapılan çalışmanın herkese faydasının olmasını ve bu konularda araştırma yapacak kişilere yol gösterici olmasını dilerim.

Öncelikle, Yüksek Lisans eğitimim boyunca bana desteklerini esirgemeyen, akademik kariyerim boyunca zorlukların üstesinden gelmemde yardımcı olan, yoğun çalışma temposuna rağmen beni hiç geri çevirmeyen, zorlandığım anlarda problemleri çözmeme yardımcı olan değerli hocam ve danışmanım Sayın Prof. Dr. Bekir Sami SAZAK’a teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak bana bütün ömrüm boyunca destek verip sahip çıkan ve akademik hayatımı destekleyen, haklarını asla ödeyemeyeceğim sevgili Eşim ve oğlum Ömer Tuna’ya, akademik anlamda yaşadığım zorluklarda tarafıma desteğini esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Remzi İNAN ve Dr. Öğr. Üyesi Ali Serkan SOYDAN’a, deneysel çalışmaların yapılmasında ve mekanik çalışmaların tamamlanmasında desteğini esirgemeyen Kadir SARIÇAM’a, yazılım konusunda haftaiçi/haftasonu gözetmeksizin destek veren Hasan KALE’ye, Mekanik sistemin kurulmasında desteğini esirgemeyen Fatih TUNCEL’e, bilgi ve tecrübeleriyle desteğini esirgemeyen Hakan BİLGE başta olmak üzere tüm aileme ve benim bugünlere gelmeme katkısı olan tüm dostlarıma teşekkürü borç bilirim.

1. GİRİŞ

İnsanoğlu yerleşik hayata geçtiğinden bu yana çeşitli ihtiyaçlarını gidermek için gündelik hayatı kolaylaştıran yenilikçi icatlar yapmışlardır. Bu süreçte en büyük icatlarından biri de elektriğın keşfedilmesidir. Bu keşif sonrası insanoğlu tarafından yıllar içerisinde farklı yeraltı ve yerüstü kaynakları, enerji kaynağı olarak kullanılagelmiştir.

19.yy sonlarında elektrik santrallerinin de kurulmasıyla elektrik gündelik hayatta kullanılmaya başlanmıştır. İnsan popülasyonundaki artış nedeniyle elektrik ihtiyacı petrol, doğalgaz, kömür vb. fosil yakıtlarla üretilmeye devam etse de yenilenebilir enerji kaynakları da doğa dostu olması nedeniyle tercih edilmeye başlanmıştır.

Yenilenebilir Enerji kaynakları; Klasik enerji kaynaklarına alternatif olarak sunulan kaynaklardır. Güneş, rüzgâr, hidrojen, hidroelektrik ve jeotermal kaynaklar buna örnektir. Doğada sürekli var olan faktörlere dayalı olan bu kaynakların en önemli özelliğı ise yenilenebilir olmaları ve doğaya zarar vermemeleridir.

Güneş enerjisi, kaynağı Güneş olan ısı ve parlak ışıktır. Güneş'in çekirdeğinde yer alan füzyon süreci ile açığa çıkan ışınım enerjisidir. Güneşteki hidrojen gazının helyuma dönüşmesi füzyon sürecinden kaynaklanır. Güneş, yaklaşık $3,9 \times 10^{26}$ W güç yayan, temiz ve tükenmez bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Dünya atmosferinin dışında Güneş ışınımının şiddeti, aşağı yukarı sabit ve 1370 W/m^2 (Watt/m²) değerindedir; ancak yeryüzünde $0-1100 \text{ W/m}^2$ değerleri arasında değişim gösterir. Bu enerjinin Dünya'ya gelen küçük bir bölümü dahi, insanlığın mevcut enerji tüketiminden kat kat fazladır. (Güneş, 2024)

1.1 Tezin Amacı

Bu çalışmada Denizli ili için farklı zemin ve sıcaklık koşullarında çift yüzü panellerin performans analizinin yapılması amaçlanmıştır. Bunun için 550 W çift yüzü panel ile farklı zeminlerden yansıyan güneş ışınımının etkileri de incelenerek deneysel çalışmalar yapılmıştır. Deneysel çalışmalar sırasında lüks ile kWh/m² arasındaki ilişki de incelenmiştir. Lüks ölçümleri için BH1750, VEM7700, LDR devreleri kullanılarak veriler lüks değerleri optimize edilmeye çalışılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda geleceğin enerji kaynaklarından biri olan güneş enerjisinden elektrik üretimi için Denizli ili özelinde verimliliğin artırılması ve farkındalık oluşturulması amaçlanmaktadır.

1.2 Literatür Özeti

Başak ve Sazak bu çalışmalarında PV sistemlerin verimliliğini artırma yollarını ve en uygun PV sistemi önerme stratejilerini ele almaktadır. Özellikle, en verimli PV panellerin seçimi, soğutma üniteleri ve güneş takip sistemleri gibi entegre bileşenlerin kullanımı üzerinde durulmaktadır. En verimli güneş hücreleri olarak bilinen GaInP/GaInAs/Ge çoklu eklemlili güneş hücreleri, standart test koşullarında (STC) %34,1 verimlilik sunmaktadır. Ancak, gerçek dünya koşullarında bu panellerin verimliliği çeşitli etkenler nedeniyle düşmektedir. Bu nedenle, en verimli sistemi oluşturmak için yalnızca yüksek verimli paneller seçmek yeterli olmayıp, aynı zamanda bu panellerin çalışma koşullarını optimize eden ek bileşenlerin kullanılması gerekmektedir. Entegre bileşenlerin kullanımı, PV sistemlerin verimliliğini artırmada önemli bir rol oynamaktadır. Örneğin, güneş takip sistemleri, panellerin güneşi gün boyunca takip etmesini sağlayarak güneş ışınlarının panel yüzeyine dik düşmesini sağlar ve bu sayede enerji üretimini maksimize eder. Soğutma üniteleri ise, panel yüzey sıcaklığını düşürerek verimliliği artırır. Özellikle pasif ve aktif soğutma sistemleri, yüksek sıcaklıkların neden olduğu verimlilik kayıplarını önlemekte etkilidir. PV sistemlerin verimliliğini artırmak için, yüksek verimli panellerin yanı sıra entegre bileşenlerin de dikkatle seçilmesi gerekmektedir. GaInP/GaInAs/Ge çoklu eklemlili güneş hücreleri, günümüzün en verimli panelleri arasında yer almakta ve maksimum verimlilik için tercih edilmelidir. Ayrıca, güneş takip sistemleri ve soğutma

üniteleri gibi entegre bileşenlerin kullanımı, PV sistemlerin gerçek dünya koşullarında daha yüksek verimlilikle çalışmasını sağlamaktadır. Bu bileşenlerin doğru bir şekilde entegre edilmesi, çevresel faktörlerin etkisini minimize ederek enerji üretimini optimize eder ve PV sistemlerin genel performansını artırır(Başak ve Sazak, 2013).

Singh, Walsh ve Aberle yaptıkları bu çalışmada 1960 yılında geliştirilmeye başlayan çift yüzü güneş hücrelerinin karakteristiklerine yeni bir yaklaşımla incelemişlerdir. Bu yöntem, standart test koşulları altında iki yüzeyli güneş hücrelerinin eşzamanlı ön ve arka yüzey aydınlatmasını dikkate alarak karakterizasyon yapmaktadır. Bu bağlamda, çift yüzeyli 1.x verimliliği ve kazanç-verimlilik ürünü şeklinde iki parametre tanımlamışlardır. Bu parametreler, çift yüzeyli hücrelerin performansını daha doğru bir şekilde değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Yeni karakterizasyon yöntemi, çift yüzeyli güneş hücrelerinin ön yüzey elektriksel parametrelerinin (verimlilik, açık devre voltajı, kısa devre akımı ve dolgu faktörü) ve arka yüzey kısa devre akımının standart test koşulları altında ölçülmesi esasına dayanmaktadır. İki yüzeyli 1.x verimliliği, hücrenin hem ön hem de arka yüzeylerinin eşzamanlı aydınlatılması durumunda elde edilen efektif verimliliği ifade ederken, kazanç-verimlilik ürünü ise bu hücrelerin belirli bir kurulum için son kullanıcıya sağladığı faydayı yansıtmaktadır. Bu parametrelerin hesaplanmasında, tek diyotlu bir güneş hücresi eşdeğer devresi kullanılmaktadır. Çalışma, çift yüzeyli güneş hücrelerinin karakterizasyonunda kullanılan geleneksel yöntemlerin yetersizliklerini ortaya koyarak, önerilen yeni yöntemin üstünlüklerini vurgulamaktadır. İki yüzeyli 1.x verimliliği ve kazanç-verimlilik ürünü parametreleri, hücre tasarımında ve uygulama alanında önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu yeni yaklaşım, iki yüzeyli güneş hücrelerinin daha verimli ve doğru bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanımakta ve bu alandaki araştırmalara önemli katkılar sunmaktadır (Singh, Walsh, ve diğ., 2014).

Schmid, Dülger, Baraah, Kräling bu çalışmada, çift yüzeyli modüllerin karakterize edilmesi için farklı ölçüm yöntemleri karşılaştırılmaktadır. Tek taraflı ve çift taraflı aydınlatma altındaki ölçüm sonuçları analiz edilerek, farklı yaklaşımlar arasındaki farklar incelenmiş ve modül özelliklerinin sonuçlar üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışmada, çift yüzeyli modüllerin temel karakterizasyonu için her bir yüzey ayrı ayrı standart test koşullarında ölçülmüştür. Modülün arka yüzeyi siyah bir

perde ile kaplanarak, ışık geçişi minimuma indirilmiş ve bu sayede her iki yüzeyin elektriksel parametreleri en yüksek hassasiyetle belirlenmiştir. Çift yüzeyli modüllerin gerçek uygulamalarda hem ön hem de arka yüzeyden aynı anda aydınlatıldıkları göz önüne alındığında, bu modül tipinin çift taraflı aydınlatma altında karakterize edilmesi önerilmektedir. Bu amaçla, CalLab PV Modüllerinde, çift yüzeyli aydınlatma sağlayan yeni bir ölçüm sistemi geliştirilmiştir. Bu sistem, her iki yüzeyde de yüksek kaliteli bir ışınım sağlayarak, modüllerin gerçek çalışma koşulları altında nasıl performans gösterdiğini doğru bir şekilde belirlemektedir. Sonuç olarak, çift yüzeyli modüllerin temel karakterizasyonu için tek taraflı standart test koşullarında ölçümler gereklidir. Farklı çift yüzeyli kazanç belirleme yöntemlerinin karşılaştırılması, düşük arka yüzey ışınım seviyelerinde ($200\text{W}/\text{m}^2$ 'ye kadar) yöntemler arasında yaklaşık %0,5 oranında bir uyum olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, arka yüzeydeki IV eğrisinin ciddi şekilde bozulduğu modüller için, doğru IV eğrisinin gerçek çalışma koşulları altında değerlendirilmesi için gerçek çift taraflı aydınlatma altında ölçüm yapılması önerilmektedir. Ek olarak, tek taraflı standart test koşullarında ölçümlere ve ek bir SunsVoc ölçümüne dayalı olarak, çift yüzeyli verimlilik hesaplanabilmektedir ve bu hesaplamalar, çift taraflı aydınlatma altındaki ölçüm sonuçlarıyla çok iyi bir uyum göstermektedir. Bu çalışma, çift yüzeyli modüllerin doğru ve tekrarlanabilir bir şekilde karakterize edilmesine yönelik önemli katkılar sunmaktadır(Schmid ve diğ., 2017).

Bayyigit, Çinici, Acır bu çalışmalarında tek yüzeyli ve çift yüzeyli fotovoltaik (PV) panellerin performans analizleri karşılaştırılmıştır. Tek yüzeyli PV paneller, ortalama %82,21 performans oranı ile yıllık 1537 kWh enerji üretim potansiyeline sahiptir. Buna karşılık, çift yüzeyli PV paneller %93,06 performans oranı ile yıllık 1740 kWh enerji üretim potansiyeli sunmaktadır. Çift yüzeyli panellerin maksimum güç çıkışı, hücre sıcaklığının $10\text{ }^\circ\text{C}$ 'den $70\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye yükselmesi durumunda bile tek yüzeyli panellere göre daha yüksektir. Ayrıca, çift yüzeyli panellerin yıllık ortalama enerji üretimi, tek yüzeyli panellere göre %13 daha fazladır. Sonuç olarak, çift yüzeyli PV panellerin kullanımı, tek yüzeyli panellere kıyasla daha avantajlıdır. Çift yüzeyli paneller, enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik açısından daha yüksek performans sunmaktadır. 25 yıllık bir proje süresi boyunca, çift yüzeyli PV sistemlerinin kullanımı ile 2134,123 ton karbon emisyonu önlenirken, tek yüzeyli PV sistemleri ile 1866,462 ton karbon emisyonu önlenmektedir. Ayrıca, geri ödeme süreleri incelendiğinde, çift yüzeyli sistemler 5,4 yıl, tek yüzeyli sistemler ise 5,8 yıl

olarak hesaplanmıştır. Bu nedenle, çift yüzeyli PV sistemlerinin yaygınlaştırılması, sürdürülebilir enerji üretimi için önemli bir adım olabileceği belirtilmiştir(Bayyığıt ve diğ., 2023).

Kılıcı, Koklu bu çalışmada, tek yüzeyli ve çift yüzeyli fotovoltaik (PV) panellerin performanslarının PVsyst simülasyon programı kullanılarak karşılaştırılması yapılmıştır. Tek yüzeyli paneller yalnızca bir yüzeyden güneş ışığı alırken, çift yüzeyli paneller her iki yüzeyden de güneş ışığı alabilmektedir. Çalışmanın amacı, aynı güç çıkışına sahip bu iki panel türünün enerji üretim kapasitesini, verimliliklerini ve ekonomik avantajlarını karşılaştırmaktır. Araştırma, Ankara'da belirlenen koordinatlarda yapılmış ve bu koordinatlar kullanılarak programın hesaplamaları her iki santral için aynı koşullarda gerçekleştirilmiştir. Bu sayede, albedo etkisi gibi çevresel parametrelerin etkisi de değerlendirilmiştir. Çalışmanın materyal ve metot kısmında, PVsyst yazılımı ile tek ve çift yüzeyli panellerin performansı analiz edilmiştir. Çift yüzeyli panellerin yıllık ortalama enerji üretiminin, tek yüzeyli panellere göre %13 daha yüksek olduğu hesaplanmıştır. Ayrıca, hücre sıcaklığı 10°C'den 70°C'ye yükseldiğinde, tek yüzeyli panellerin güç çıkışınının 526,7 W'tan 417,8 W'a, çift yüzeyli panellerin ise 534,2 W'tan 426,9 W'a düştüğü gözlemlenmiştir. Bu bulgular, çift yüzeyli panellerin daha yüksek enerji verimliliğine ve daha kısa geri ödeme sürelerine sahip olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, çift yüzeyli PV paneller, tek yüzeyli panellere kıyasla daha yüksek enerji üretim kapasitesine sahip olup, özellikle albedo etkisi yüksek olan zemin koşullarında daha avantajlıdır. Çift yüzeyli panellerin kurulumu başlangıçta daha maliyetli olsa da, uzun vadede sağladıkları enerji kazancı ve ekonomik geri dönüş göz önüne alındığında daha karlı bir yatırım olarak değerlendirilmektedir. Bu çalışma, PV panellerin tasarımı ve optimizasyonu konusunda önemli bulgular sunmakta ve gelecekteki araştırmalara ışık tutmaktadır(Kılıcı ve Koklu, 2020).

Yusufoğlu, Pletzer, Kaduvelikulathu, Comparotto, Kopecek, ve Kurz, bu çalışmalarında kurulum koşullarına bağlı olarak güneşe bakan çift yüzlü modüllerin güç üretimini simüle edebilen bir araç geliştirmişlerdir. Bu aracı kullanarak, bireysel güneş hücrelerinin özelliklerine dayanan çift yüzlü modüllerin yıllık enerji verimini simüle edilmiştir. Çift yüzlü davranışı etkileyen parametrelerin analizi sonrasında, yıllık enerji verimini optimize etmek için yöntemler önerilmektedir. Yerden yakın bir

kurulum durumunda, arka modül düzlemindeki standart sapmanın %30 kadar yüksek olabileceği gösterilmiştir. Ancak, modül yüksekliği 1 m olarak seçilirse bu %4'e düşürülebilir. Yıllık enerji verimi simülasyonları için bu düzensiz ışınım dağılımını dikkate almak hayati önem taşımaktadır. Ayrıca, çift yüzlü modüller için optimum eğim açısının belirlenmesinin daha karmaşık bir prosedür gerektirdiği gösterilmiştir, çünkü bu açı, yerin konumu, albedo değerine ve modül yüksekliği gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Zeminin yansıtıcılığı arttıkça, arka taraftaki ışınım ve dolayısıyla güç üretimine katkısı da artar, ancak arka taraf ışınımının düzensizliğini azaltmak için optimum eğim açıları daha küçük hale gelir. Yansıtıcı zeminin boyutunun artması ile yıllık enerji verimi arasında monotonik olarak artan ama aynı zamanda doygunluğa ulaşan bir ilişki vardır; ancak, modül yüksekliğinin yıllık enerji verimi üzerindeki etkisiyle kıyaslandığında bu daha az önemlidir. Modüller yerden yükseldikçe yıllık enerji veriminde bir artış gözlenir. Ancak, modül yüksekliği arttıkça bu artış bir noktada azalmaya başlar. Bu, artan yüksekliklerde kendiliğinden gölgelenmenin azalması ile yansıtıcı zeminden faydalanmanın düşmesi arasındaki dengeye bağlıdır. Optimum modül yüksekliği Kahire'de yaklaşık 1 m ve Oslo'da 0.5 m'dir. Yansıtıcı yüzeyin boyutuna bağlıdır, ancak yansıtıcı alanın etkisi daha yüksek yüksekliklerde daha belirgindir. Son olarak, albedo katsayısı ile çift yüzlü panel arasında doğrusal bir ilişki sunduk. Kahire, daha yüksek yansıtıcı yüzeyden nispeten daha fazla fayda sağlar ve albedo katsayısının 0,5 sağlanması durumunda %25'e kadar verim elde edilebilir(Yusufoglu ve diğ., 2015).

Merodio, Moreno, Moreton ve Lorenzo bu çalışmalarında albedo ölçümlerinin PV verim tahminlerindeki belirsizliğe etkisini araştırmışlardır. Üç farklı konum (Şili, İspanya ve İsveç) ve iki tip PV tesisi (statik ve tek eksenli takipçi) için temsil edici bir verim simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Çeşitli albedo ölçüm koşullarına bağlı belirsizlikler değerlendirilmiştir. Beş farklı yüzey türünün (yapay çim, geleneksel çakıl, beyaz çakıl, yüksek yansıtıcı plastik katman ve kar) yüzey yansıtması dört sensör kullanılarak ölçülmüştür. Albedo ölçümlerinin PV verim tahminlerindeki belirsizliği en fazla %1,5'e indirgeyecek kısa vadeli zemin tabanlı ölçüm koşulları için bir dizi öneri sunulmuştur. Ayrıca, mevcut PV pazarında yaygın albedo ölçüm uygulamaları da ele alınmıştır. PV tesisi inşaatının neden olduğu arazi kullanımındaki değişiklikler ve uzun vadeli mevsimsel değişiklikler, albedo belirsizliğinde baskın faktörler olarak belirlenmiştir. Çalışma sonucunda albedo ölçümlerinin doğru yapılmasının enerji

verim tahminlerindeki belirsizlikleri önemli ölçüde azaltabileceği gösterilmiştir. Albedo ölçüm belirsizliğinin yıllık enerji verim tahminlerindeki belirsizliğe etkisini anlamak için kapsamlı bir simülasyon yapılmıştır. Sonuçlar, çift yüzlü PV sistemlerin verim tahminlerindeki belirsizlikleri en aza indirmek için uygun albedo ölçüm yöntemlerinin önemini vurgulamaktadır(Merodio ve diğ., 2023).

Tonita, Valdivia, Russell, Martinez-Szewczyk, Bertoni and Hinzer, bu çalışmada 2019 yılında Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC), çift yüzlü PV cihazlarının karakterize edilmesinde iki standart yöntemi tanımlayan IEC 60904-1-2 teknik spesifikasyonunu yayınlamıştır. Bu yöntemlerden biri, ön yüzeyin 1,000 W/m² ile, arka yüzeyin ise 100-250 W/m² arasında aydınlatılmasını içerir. Bir diğer yöntem ise eşdeğer aydınlatma yöntemidir. Bu çalışmada, çift yüzlü silikon heteroeklem (SHJ) güneş hücresinin performansını IEC'nin tanımladığı iki standart yöntem ve yeni spektral albedo yaklaşımı olan ölçekli arka aydınlatma (SRI) yöntemi olarak üç çift yüzlü aydınlatma tekniği altında modelledik. Bu yöntemlerin cihaz ve sistem seviyesinde enerji verimini tahmin etme yeteneği, optik ve elektrik performans modeli ile karşılaştırılarak gösterilmiştir. Bu çalışma, çift yüzlü PV sistemlerinin enerji verimini tahmin etmek için genel bir aydınlatma yöntemi geliştirmiştir. Çift yüzlü PV cihazlarının doğru ve standart ölçümleri, sistem performans ihtiyaçlarını planlamak için kullanılır ve bu da sistem maliyeti, teknoloji seçimi, malzeme tüketimi, arazi kullanımı ve şebeke istikrarını etkiler. Yeni geliştirilen SRI yöntemi, spektral albedonun cihaz performansı üzerindeki etkilerini test etmek amacıyla tasarlanmıştır ve arka yüzey aydınlatmasının spektral albedo ile belirlenmesi esasına dayanır. Bu yöntem, cihaz ve modül seviyesinde enerji verimini doğru bir şekilde temsil edebilmekte ve tahmin edebilmektedir(Tonita ve diğ., 2023).

Vogt, Gewohn, Bothe, Schinke ve Brendel bu çalışmalarında çift yüzeyli fotovoltaik (PV) modüllerin ölçümleri ve sistem modeli tahminlerinde spektral albedo etkilerini kapsamlı bir şekilde analiz etmektedir. Araştırmada, silikon heterojunction (SHJ) modülleri kullanılarak uygulanan ölçekli arka ışınım yöntemiyle iç mekân çift yüzlü cihaz ölçümleri yapılmıştır. Sistem modeli performansı, sabit eğimli ve yatay tek eksenli izleyicili (SAT) diziler için 15° ile 75° enlemler arasında detaylı bir 3D sonlu eleman modeli (DUET) kullanılarak incelenmiştir. Spektral etkiler, ölçülen SHJ modüllerinin kısa devre akımında %2'ye, verimlilikte ise %0,3'e varan

değişimlere neden olmuştur. Ayrıca, PV sistem modellemesinde spektral albedonun dahil edilip edilmemesinden kaynaklanan arka yüzey spektral uyumsuzluk faktörlerinin (SMM) $\pm\%13$ arasında değiştiği ve toplam (ön + arka) SMM'lerin dağılıma ve enleme bağlı olarak $\%3$ 'e kadar değiştiği gösterilmiştir. Yüksek enlemlerde sabit eğimli dizilerde, spektral albedo etkilerinin daha belirgin olduğu bulunmuştur. Çalışma, spektral albedo etkilerinin göz ardı edilmesinin, özellikle yüksek enlemlerdeki sabit eğimli kurulumlar, geniş bant aralıklı teknolojiler ve yüksek albedo değerlerine sahip zemin kaplamaları gibi durumlarda PV ölçüm ve sistem modellemesinde birkaç yüzde oranında belirsizliklere yol açabileceğini ortaya koymuştur(Vogt ve diğ., 2018).

Russell, Saive, Augusto, Bowden, Atwater, bu çalışmalarında farklı zeminler ve farklı dalga boylarında albedo değerlerini araştırmışlardır. Bu çalışma, spektral albedonun çift yüzlü güneş hücrelerinin güç çıkışı üzerindeki etkisini incelemektedir. Bu çalışmada, Shockley-Queisser radyatif denge çerçevesi, gelen ışığın spektrum ve yoğunluğundaki değişiklikleri hesaba katacak şekilde uyarlanmıştır. Çalışmada, çevrenin spektral albedosunun ideal bant aralığı ve maksimum verimlilik üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuçlar, spektral olarak bağımsız bir albedo ile karşılaştırıldığında, spektral albedo modelinin, yeşil çim ile çevrili bir çift yüzlü silikon güneş hücresinin güç çıkışını $\%3,1$ oranında ve beyaz kum için $\%5,2$ oranında artırdığını göstermektedir. Bu eğilim, silikon hetero-eklem güneş hücreleri üzerinde deneysel olarak doğrulanmıştır ve ideal spektral albedo türetilmiştir. Çalışmanın sonuçları, çift yüzlü güneş hücrelerinin çevresel albedoya duyarlılığını vurgulayarak, farklı yüzey malzemelerinin güneş hücresi verimliliği üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır. Yeşil çim ve beyaz kum gibi yüzeylerin, gelen ışığın spektral dağılımını değiştirerek güneş hücrelerinin performansını önemli ölçüde artırabileceği gösterilmiştir. Bu bulgular, güneş enerjisi sistemlerinin tasarımı ve yerleştirilmesinde albedo özelliklerinin dikkate alınması gerektiğini göstermektedir(Russell ve diğ., 2017).

Chiodetti, Lindsay, Dupeyrat, Binesti, Lutun, Radouane ve Mousel, bu çalışmalarında, çeşitli araştırma tesislerinde albedo değerlerinin günler ve mevsimsel olarak değişkenlik gösterdiğini doğrulamışlardır. Bu değişkenliği göz önünde bulundurarak, albedonun daha doğru bir şekilde modellenmesi gerekmektedir. Çift

yüzlü PV modüllerinin enerji üretim simülasyonları, yüzey yansıtıcılığının etkisinin belirgin olduğunu göstermektedir. Örneğin, albedonun 0,2 ile 0,4 arasında değiştiği durumlarda, çift yüzlü kazancın %5 ila %15 arasında değişebileceği belirlenmiştir. Bu nedenle, EDF R&D tarafından geliştirilen çift yüzlü PV modeline entegre edilen basitleştirilmiş değişken albedo modeli, farklı yüzey türleri üzerinde uzun süreli ölçümlerle test edilmiş ve kalibre edilmiştir. Bu model, arka yüzey radyasyonlarını ve verim tahminlerini hesaplamak için kullanılmıştır(Chiodetti ve diğ., 2016).

Riedel-Lyngskær, Ribaconka, Po, Thorseth, Thorsteinsson, Dam-Hansen, Jakopsen bu çalışmalarında Danimarka Teknik Üniversitesi'nde (55.6°K, 12.1°D) 15 aylık bir süre boyunca toplanan spektral albedo ölçümlerini analiz etmektedir. Yüksek çözünürlüklü spektrofotometreler, yeşil bitki örtüsü, kuru bitki örtüsü, çakıl ve kar gibi dört farklı albedo senaryosunu izlemek için kullanılmıştır. Üç farklı iki yüzeyli hücre konseptinin ön ve arka yüzleri için spektral uyumsuzluk ve spektral etkiler hesaplanmıştır. Albedonun spektral doğasının, iki yüzeyli fotovoltaik performans üzerinde önemli bir etkisi olduğu gösterilmiştir. Çalışma, arka yüzeyde spektral etkinin yeşil bitki örtüsü üzerinde sabit eğimli sistemler için 1,20 kadar yüksek, kar üzerinde ise 0,98 kadar düşük olduğunu ortaya koymuştur. İki yüzeyli PV sistemlerinin performansını etkileyen birçok faktörün detaylı bir şekilde araştırıldığı ve kurulum ile çevresel koşulların iki yüzeyli enerji kazançlarını nasıl etkilediğinin nicel olarak belirlendiği görülmektedir. Bu bağlamda, yer yüzeyinin albedosu büyük bir öneme sahiptir. Çoğu tek yüzlü sistemde yerden yansıyan radyasyon, toplam etkili ışınımın %3'ünden azını oluştururken, iki yüzeyli sistemlerde bu oran %10'a kadar çıkabilmektedir. Albedonun spektral özellikleri, PV uygulamaları bağlamında incelenmiş ve arka yüzeyde alınan ışınım üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir (Riedel-Lyngskaer ve diğ., 2021).

De Barros, Callegari, Mendonça, Amorim, Silva ve Pereira yapmış oldukları bu çalışma da geleneksel güneş ışınımı ölçüm cihazlarına kıyasla düşük maliyetli bir alternatif olarak, ışığa bağımlı direnç (LDR) sensörleri kullanılarak bir güneş ışınımı ölçer geliştirilmiştir. LDR sensörlerinin kalibrasyonu, fotodiyot piranometre temel alınarak gerçekleştirilmiştir. Veriler, veri kaydedici aracılığıyla toplanmış ve farklı direnç değerlerinin farklı güneş ışınımı aralıkları için daha iyi okumalar sağladığı belirlenmiştir. Çalışmanın sonuçları, istatistiksel analizler ve görelî hatalar aracılığıyla

sistemin geçerliliğini göstermektedir. Özellikle, 100 Ω , 500 Ω ve 1 k Ω dirençlerle farklı güneş ışınımı aralıklarında gerçekleştirilen ölçümler, belirli aralıklarda daha iyi sonuçlar vermiştir. Örneğin, 100 Ω dirençle yapılan ölçümler 0-200 W/m², 200-400 W/m², 400-600 W/m² ve 600-800 W/m² aralıklarında daha yüksek R² ve korelasyon katsayılarına sahiptir. Ancak, 800-1100 W/m² aralığında, örnek sayısının azlığı nedeniyle hata oranları artmıştır. Farklı direnç değerleri ile yapılan ölçümler, belirli güneş ışınımı aralıklarında daha iyi sonuçlar vermiştir. Genel olarak, LDR sensörleri, uygun kalibrasyon ve veri analizi ile düşük maliyetli ve etkili bir güneş ışınımı ölçüm çözümü sunabilir. Bu durum, güneş enerjisi projelerinde maliyet etkinliği sağlamak ve daha geniş kitlelere ulaşmak adına önemli bir adım olarak değerlendirilebilir (De Barros ve diğ., 2018).

Michael, Johnston ve Moreno bu çalışma da Güneş enerjisi projelerinde ışınım seviyelerinin anlaşılması, enerji üretim potansiyelinin belirlenmesi açısından önemlidir. Geleneksel ışınım ölçüm cihazları arasında termopil piranometre, fotodiyot ve pirheliometre bulunur. Ancak bu cihazların yüksek maliyetleri, daha ekonomik alternatifler arayışını doğurmuştur. Bu çalışmada, Işık Bağımlı Direnç (LDR) sensörleri kullanılarak düşük maliyetli bir güneş ışınım ölçer tasarımı sunulmaktadır. LDR sensörlerinin fotodiyot piranometreye dayalı olarak kalibrasyonu yapılmış ve toplanan verilerin istatistiksel analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, düşük maliyetli alternatif bir prototip geliştirilmiştir. Veriler, veri kaydedici ile toplanmış, ışınım aralıklarına ayrılmış, polinom regresyonları geliştirilmiş, yüksek istatistiksel katsayıya sahip modeller seçilmiş ve Arduino platformunda algoritma uygulanmıştır. Sensörlerin doğruluğunu değerlendirmek için istatistiksel analizler yapılmış ve sonuçlar referans ölçümlerle karşılaştırılmıştır. Farklı direnç değerlerinin kullanılması, farklı güneş ışınım aralıkları için daha iyi okumalar sağlamıştır. Bu sistemin geçerliliği, göreceli hatalar ve korelasyon yoluyla yapılan istatistiksel analizlerle gösterilmiştir. Çalışmanın sonuçları, düşük maliyetli LDR sensörlerinin, geleneksel yüksek maliyetli güneş ışınım ölçerlerle uyumlu ölçümler yapabildiğini göstermektedir. Bu, güneş enerjisi projelerinde ekonomik ve güvenilir bir alternatif sunmaktadır. Geliştirilen prototip, yerel ışınımın belirlenmesinde kullanılabilir ve böylece fotovoltaik projelerin verimliliğini artırabilir. Ayrıca, ekonomik riskleri azaltarak güneş enerjisi sistemlerinin güvenilirliğini artırır ve enerji maliyetlerini düşürür. Bu çalışma, daha sürdürülebilir bir dünya için yenilenebilir enerji kullanımını

teşvik etmekte ve fosil yakıtların tükenmesine karşı bir önlem olarak önemli bir katkı sağlamaktadır. Geliştirilen sistem, ekonomikliği ve işlevselliği ile güneş ışınımı ölçümünde önemli bir yenilik sunmaktadır. Ayrıca CIE 2008 dataları kullanılarak $1 \text{ W/m}^2 = 116 \text{ lx}$ sonucu elde edilmiştir. Laboratuvar simülasyonlarında benzer şekilde $116 \pm 3 \text{ lx}$ sonucu elde edilirken dış ortamda yapılan ölçümlerde $1 \text{ W/m}^2 = 122 \pm 1 \text{ lx}$ sonucu elde edilmiştir. 1 güneş ışınımı (1000 W/m^2) yaklaşık olarak 120.000 lx değerine eşit olduğu söylenebilir (Michael ve diğ., 2020).

Şentürk ve Coşkun tarafından yapılan çalışma da güneş enerjisi sistemleri için düşük maliyetli, geliştirilebilir ve kullanımı kolay bir çevresel parametre ölçüm cihazı tasarlanmıştır. Tasarlanan cihaz, Arduino kartı, sıcaklık sensörleri, akım sensörü, SD kart modülü ve LCD ekran gibi bileşenlerden oluşur. Bu cihaz, fotovoltaik panel üzerine düşen ışınım miktarını, panel sıcaklığını ve çevre sıcaklığını ölçüp kaydeder, böylece güneş enerjisi sistemlerinin kurulumu öncesi fizibilite çalışmaları için gerekli verileri sağlar. Çevresel parametrelerin doğru ölçümü, güneş enerjisi sistemlerinin verimliliğini ve ekonomik uygulanabilirliğini belirlemek için kritiktir. Bu çalışmada geliştirilen cihaz, anlık olarak çevresel parametreleri ölçer ve beş dakikalık aralıklarla kaydeder. Ölçülen veriler kullanılarak, bir fotovoltaik panelin üreteceği enerji miktarı hesaplanmıştır. Deneysel sonuçlar, cihazın güneş ışınımını ve sıcaklığı doğru bir şekilde ölçebildiğini göstermiştir. Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi'nde yapılan testlerde, cihazın performansı, profesyonel piranometrelerle karşılaştırılmış ve güvenilir sonuçlar elde edilmiştir. Cihazın maliyeti 38 \$ olarak belirlenmiş olup, ticari veri kaydedici sistemlere göre oldukça ekonomiktir. Ayrıca, cihazın açık kaynaklı yazılımı ve modüler yapısı, kullanıcıların ihtiyaçlarına göre kolayca uyarlanabilmesini sağlar. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, cihazın güvenilir ve doğru ölçümler yapabildiğini, böylece güneş enerjisi sistemleri için önemli bir araç olduğunu göstermektedir. Gelecekte, cihazın farklı çevresel parametreleri de ölçebilmesi için geliştirilmesi ve daha geniş kapsamlı testlerle doğrulanması önerilmektedir (Şentürk ve diğ., 2023).

El-Ahmar, El-Sayed, Hemeida, Bu çalışmalarında tek ve çift diyot modelleri kullanarak fotovoltaik (PV) modüllerin kapsamlı bir analizini sunmaktadır. Çalışma, çeşitli çevresel koşullar altında PV modülü performans simülasyonlarının doğruluğunu artırmayı amaçlayarak, güneş enerjisi sistemlerinin optimizasyonu için

kritik olan bu konuyu ele almaktadır. Makale, güneş hücrelerinin gerçek dünya davranışlarını yeniden oluşturmak için I-V (akım-gerilim) ve P-V (güç-gerilim) karakteristik eğrilerinin türetilmesiyle PV hücrelerinin modelleme inceliklerini derinlemesine inceliyor. Araştırma, simülasyonlar için referans olarak ticari olarak temin edilebilen çok kristalli bir fotovoltaik modül olan KC200GT-200W modülünü kullanıyor. Shockley'in diyot denklemine dayanan tek diyot modeli, PV modülünün performansı üzerindeki güneş ışınımı ve sıcaklık etkilerini araştırmak için uygulanmıştır. Bu model, PV hücresinde meydana gelen karmaşık fiziksel süreçleri basitleştirir, ancak pratik uygulamalar için makul bir tahmin sağlar. Buna karşılık, çift diyot modeli, uzay yük bölgesindeki rekombinasyon kayıplarını da hesaba katarak daha hassas bir temsil sunar ve düşük ışınım seviyelerinde daha iyi doğruluk sağlar. Çalışmada, PV modellerini yöneten doğrusal olmayan denklemleri çözmek için Newton-Raphson yöntemi kullanılmış ve değişen koşullar altında çıkış akımının hesaplanması sağlanmıştır. Ana bulgular, sıcaklık, ışınım ve idealite faktörü gibi çevresel faktörlerin PV modüllerinin performansı üzerindeki önemli etkisini vurgulamaktadır. Özellikle, hücre sıcaklığındaki artış, diyot doyma akımının yükselmesi nedeniyle güç çıkışında azalmaya yol açar. Benzer şekilde, ışınım seviyelerindeki değişiklikler, PV hücreleri tarafından üretilen akımı doğrudan etkileyerek modülün genel verimliliğini değiştirir. Araştırma ayrıca, seri direnç (R_s) ve paralel direnç (R_p) gibi parametrelerin PV modülünün çıkışı üzerindeki etkisini de incelemektedir. Sonuçlar, daha düşük seri direncin güç çıkışını artırdığını, daha yüksek paralel direncin ise kaçak akımları en aza indirerek verimliliği iyileştirdiğini göstermektedir. Tek ve çift diyot modellerinin karşılaştırmalı analizi, tek diyot modelinin standart test koşullarında üretici veri sayfasına daha yakın bir tahmin sağladığını, ancak çift diyot modelinin düşük ışınım senaryolarında üstün doğruluk sunduğunu ortaya koymaktadır. Bu, belirli uygulama ve çevresel koşullara göre uygun bir modelleme yaklaşımının seçilmesinin önemini vurgulamaktadır. Makale, PV modüllerinin performansını doğru bir şekilde tahmin ederek mühendislerin sistem yapılandırmalarını optimize edebileceğini ve bu sayede enerji verimliliği ve güvenilirliğinin artırılabilirliğini belirterek sonuçlanmaktadır. Bu çalışmadan elde edilen bilgiler, PV teknolojisi ve yenilenebilir enerji sistemleri uygulamaları hakkında daha geniş bir anlayışa katkıda bulunmakta ve sürdürülebilir enerji çözümlerinin benimsenmesini teşvik etmektedir (El-Ahmar ve diğ., 2016).

Baumann, Klenk, Keller, Nussbaumer, Baumgartner yaptıkları bu çalışmada, çift yüzölçümlü fotovoltaik (PV) sistemlerinin performansını etkileyen çeşitli kurulum koşulları altında yapılan dış mekân ölçümleri sunulmuştur. Özellikle, çift yüzölçümlü modüllerin arka yüzeyindeki aydınlatma homojenliğini ve bu homojenliğin toplam enerji çıktısı üzerindeki etkisini incelemeye odaklanılmıştır. Çalışmada, ZHAW'da (Zürich Uygulamalı Bilimler Üniversitesi) kurulmuş olan bir dış mekân test sistemi kullanılmıştır. Bu sistem, modüllerin eğim açısını periyodik olarak 0° ile 90° arasında on iki pozisyonda bir dakika içinde ayarlayabilmektedir. Çalışmanın temel amacı, çift yüzölçümlü modüllerin optimum montaj koşullarını belirlemek için metodik bir ölçüm yaklaşımı geliştirmektir. Bu amaçla, modüllerin ön ve arka yüzeylerindeki aydınlatma homojenliği ve bu homojenliğin toplam enerji verimi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Araştırmada kullanılan ölçüm düzeneği, bir dizi küçük ışık sensörü ile donatılmıştır ve bu sensörler, modülün kenarlarına yerleştirilmiştir. Bu sensörler, modülün ön ve arka yüzeylerindeki aydınlatma homojenliğini ayrıntılı olarak analiz etmeye olanak tanımaktadır. Ayrıca, farklı eğim açılarındaki duyarlılığı ve uzun vadeli ölçümlerden elde edilen genel verim sonuçlarını değerlendirmek için kullanılmıştır. Çift yüzölçümlü PV sistemlerinin standart tek yüzölçümlü sistemlere kıyasla geliştirilmiş modül güç çıktısı potansiyeli, çeşitli simülasyonlar ve tek modüller üzerindeki ölçümlerle defalarca gösterilmiştir. Bu çalışmada, çift yüzölçümlü sistemlerin öngörülebilirliğini artırmak için dış mekân ölçümleri kullanılarak elde edilen veriler, mevcut fiziksel modellerin ve algoritmaların test edilmesi ve geliştirilmesi için kullanılmıştır. Çift yüzölçümlü modüllerin optimum montaj koşulları, ön ve arka yüzeylerden elde edilen performansın maksimuma çıkarılmasına dayanır. Bu nedenle, modüllerin arka yüzeyindeki aydınlatma yoğunluğu ve homojenliği, ön yüzeye göre daha karmaşıktır. Geniş PV tesislerinde, paralel çift yüzölçümlü modül sıraları ile, bitişik sıraların gölgelemesi nedeniyle azalan yer albedosu gibi ek faktörler dikkate alınmalıdır. Bu çalışmada, modüllerin eğim açısının sürekli olarak değiştirilmesi ve uzun vadeli ölçümlerin yapılması ile bu tür faktörlerin etkileri analiz edilmiştir. Araştırmada, modüllerin montaj yüksekliği, eğim açısı ve yer yansıtıcılığı gibi parametrelerin manuel olarak ayarlandığı bir test düzeneği kullanılmıştır. Bu düzeneğin temel avantajı, bitişik sıraların gölgeleme ve ışık yansıma etkilerini çeşitli konfigürasyonlarda içerebilmesidir. Modüllerin eğim açısının otomatik olarak değiştirilmesi ile her adımda modülün güç çıktısı ölçülmüştür. Bu düzenek, aynı pozisyonda bulunan aynı modülden elde edilen ölçüm değerlerini kullanarak, bireysel modüllerin sapma etkilerini ve çevresel değişkenlikleri

dışlamaktadır. Araştırmanın uzun vadeli hedefi, çift yüzlü sistemlerin enerji verimini ve gölgeleme etkilerini belirlemek için uzun süreli ölçümler yapmaktır. Bu sayede, mevcut simülasyon araçlarının geçerliliği ve doğruluğu test edilip geliştirilebilir. Elde edilen veriler, çift yüzlü sistemlerin enerji verimi üzerindeki etkilerini daha iyi anlamamıza ve bu sistemlerin tasarım ve optimizasyonunda daha güvenilir öngörülerde bulunmamıza yardımcı olacaktır. Sonuç olarak, bu çalışma, çift yüzlü PV sistemlerinin kurulum koşullarına bağlı olarak aydınlatma homojenliğinin ve enerji veriminin nasıl değiştiğini sistematik bir şekilde ortaya koymakta ve bu sistemlerin optimize edilmesi için önemli bulgular sunmaktadır. Bu bulgular, çift yüzlü modüllerin performansını maksimize etmek ve bu sistemlerin yaygınlaşmasını sağlamak için kritik öneme sahiptir (Baumann ve diğ., 2017).

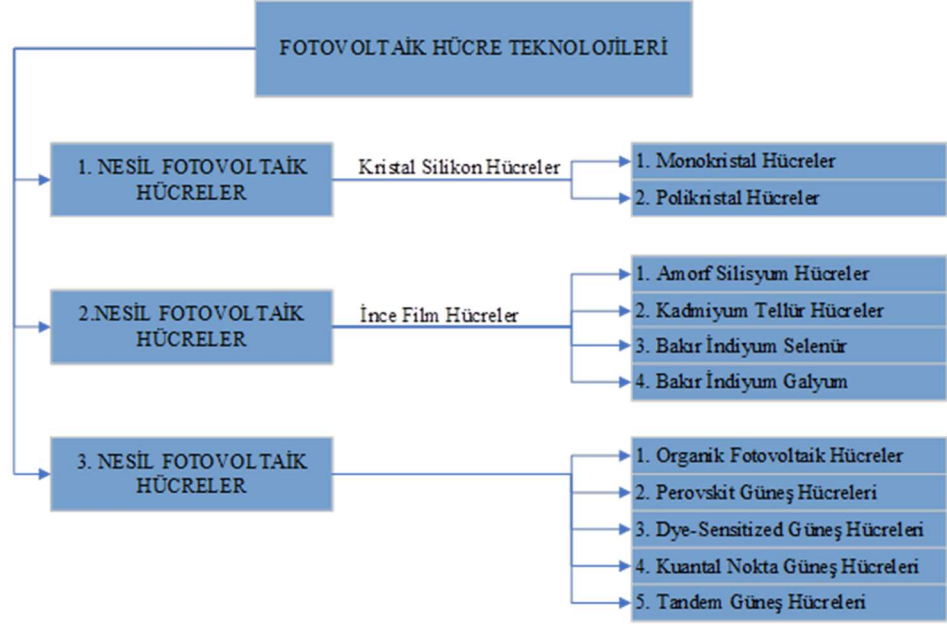
Singh, Aberle ve Walsh tarafından yapılan bu çalışmada, çift yüzlü fotovoltaik (PV) modüllerin elektriksel karakterizasyonu için yeni bir metodoloji sunulmaktadır. Makale, çift yüzlü PV modüllerin açık devre voltajı (V_{oc}), kısa devre akımı (I_{sc}), doldurma faktörü (FF) ve verimlilik gibi elektriksel parametrelerinin karakterizasyonu için kullanılan yöntemleri detaylandırmaktadır. Bu parametrelerin hem tek yüzlü hem de çift yüzlü aydınlatma koşullarında nasıl ölçüldüğü ve simüle edildiği açıklanmaktadır. Araştırmada, iki taraflı modüllerin performans değerlendirmesi için çeşitli deneysel ve simülasyon tabanlı yöntemler kullanılmaktadır (Singh, Aberle, ve diğ., 2014).

2. FOTOVOLTAİK HÜCRE TEKNOLOJİLERİ

2.1 Giriş

Güneş paneli hücresi üretimin hammaddesi olan polisilikon kumdan üretilmektedir. Sıcaklık dalgalanmalarına karşı oldukça dirençlidir ve yüksek derece de yalıtım sağlamaktadır. Kum 2000 °C sıcaklıktaki fırınlarda karbon ile birlikte işlenerek teknolojinin yapı taşı olan ham silikon ortaya çıkar. Siemens yöntemi, ham silikonun gaz haline getirilmesi ve distilasyon kolonlarında saflaştırılması işlemlerini içeren bir saflaştırma yöntemidir Polisilisyum olarak da bilinen polisilikon, küçük kristalitten oluşan Silikon bir malzemedir. Güneş hücrelerinin üretiminde en çok kullanılan teknolojinin hammaddesidir. Hücre üretiminde polisilikonun saflık derecesi hücre verimini doğrudan etkileyen en önemli faktörlerden biri olduğu için yüksek saflıkta polisilikon kullanımı tercih edilir. Polisilikon elde edildikten sonra 1450°C sıcaklıktaki özel fırınlarda eritilir ve tungsten bir çubuğun eritilmiş polisilikona batırılması ve kendi etrafında döndürülmesi ile ingot oluşturulmaktadır. Hem tek hem de çoklu kristal yapıda ingot üretmek mümkündür. Günümüzde tek yapıli ingot üretimi daha verimli olması sebebiyle daha çok tercih edilmektedir. Wafer üretimi için, silindir ingotlar kusurlarından arındırılarak köşeli hale getirilir ve elmas kaplı tel testereler ile dilimlenir. Wafer dilimlerinin 30'a yakın kimyasal ve fiziksel işleme tabi tutulması ile hücre edilir (Dünyada ve Türkiye'de Güneş Enerjisi Sektörü, 2024).

Fotovoltaik Hücre teknolojileri Şekil 2.1'de gösterilmektedir. Bu teknolojiler: Birinci Nesil Fotovoltaik Hücreler, İkinci Nesil Fotovoltaik Hücreler ve Üçüncü Nesil Fotovoltaik Hücreler olmak üzere sınıflandırılmaktadır. Üçüncü Nesil Fotovoltaik hücreler günümüzde halen geliştirilmekte olup birden fazla teknolojilerde bu sınıflandırmaya eklenmesi beklenmektedir.



Şekil 2.1: Fotovoltaik hücre teknolojilerinin sınıflandırılması.

2.2 Monokristal Silisyum Hücreler

Tek bir kristal silisyum bloğundan yapılan bu hücreler, daha yüksek verimliliğe sahiptir, ancak üretim maliyetleri bir miktar daha fazladır.

2.3 Polikristal Silisyum Hücreler

Birçok küçük kristal silisyum tanesinden üretilen bu hücreler, mono-Si hücrelere göre daha az verimli olmakla birlikte, üretim maliyetleri de daha düşüktür.

2.4 Amorf Silisyum Hücreler

1970'lerde ilk kez keşfedilip kullanılmaya başlanmıştır. 80 °C ile 200 °C arasında bir değerde plazma yönteminden destek alarak kimyasal yöntemlerle elde edilmektedir. Amorf silikon, doğrudan bir yarı iletken ve yaklaşık 1 µm kalınlığında çok ince bir aktif tabakaya sahiptir.

2.5 Kadmiyum Tellür Hücreler

Kadmiyum tellür (CdTe) güneş ışınını absorbe etme katsayısı yüksek ve ideal bant genişliğine sahiptir. Kadmiyum tellür, ince film güneş pilleri için oldukça umut verici bir malzeme olarak öne çıkıyor. Bu teknolojiyle üretilen güneş hücreleri, %15'ten fazla verimlilik sunabiliyor. Ayrıca, kadmiyum tellürden yapılan güneş panelleri, %9'un üzerinde bir verim sağlayabilmektedir.

2.6 Bakır İndiyum Selenür Güneş Hücreleri

Bakır İndiyum Selenid (CIS) güneş hücreleri, ince film teknolojisinin önemli bir parçasıdır ve yüksek verimlilikleri ile dikkat çeker. CIS, bakır, indiyum ve selenyum elementlerinden oluşan bir yarı iletkenidir ve bu malzeme, güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürme yeteneğine sahiptir. CIS hücrelerinin avantajları arasında yüksek ışık absorpsiyonu, düşük maliyetli üretim süreçleri ve esneklik yer alır. CIS güneş hücreleri, genellikle vakumda veya düşük sıcaklıkta gerçekleştirilen kaplama teknikleri ile üretilir. Bu süreçler, malzemenin homojen bir tabaka oluşturmasını sağlar, bu da verimliliği artırır. CIS hücreleri, %15-20 arası verimlilik oranlarına ulaşabilir ve bu, onları geniş ölçekli güneş enerjisi uygulamaları için uygun hale getirir.

2.7 Bakır İndiyum Galyum Selenid Güneş Hücreleri

Bakır İndiyum Galyum Selenid (CIGS) güneş hücreleri, ikinci nesil ince film fotovoltaik teknolojilerinin önemli bir temsilcisidir. CIGS, bakır, indiyum, galyum ve selenyum elementlerinin birleşiminden oluşan bir yarı iletkenidir. Bu malzeme, yüksek ışık absorpsiyonu ve enerji dönüşüm verimliliği sağlama kapasitesi ile dikkat çeker. CIGS hücrelerinin verimlilik oranları genellikle %15-20 arasında değişir ve bu, onları geniş ölçekli güneş enerjisi sistemleri için uygun hale getirir. CIGS hücrelerinin yüksek verimliliği, malzemenin geniş bir güneş spektrumunu absorbe edebilme yeteneğinden kaynaklanır. Ayrıca, bu hücreler, ince tabakalar halinde üretilebildiğinden, hafif ve esnek paneller üretimine olanak tanır. CIGS güneş hücrelerinin üretim süreci genellikle vakumda gerçekleştirilen kaplama yöntemleri ile

yapılır. Bu yöntemler, homojen bir malzeme tabakası elde edilmesini sağlar ve böylece verimlilik artar. CIGS hücreleri, düşük ışık koşullarında da iyi performans gösterme kapasitesine sahiptir, bu da onların çeşitli iklim ve çevre koşullarında etkili olmasını sağlar. Ancak, CIGS hücrelerinin üretim süreci bazı zorluklar içerebilir, özellikle yüksek maliyetli malzemelerin kullanımı ve karmaşık üretim teknikleri bu zorluklar arasında yer alır. Bununla birlikte, CIGS teknolojisinin sürekli gelişmesi ve maliyetlerin düşmesi, bu hücrelerin gelecekteki enerji çözümlerindeki rolünü güçlendirecektir (Machkih ve diğ., 2024).

2.8 Organik Fotovoltaik Hücreler

Organik fotovoltaik hücreler (OPV), organik moleküller veya polimerler kullanılarak üretilen bir tür güneş hücresidir. Bu hücreler, düşük maliyetli üretim süreçleri, esneklik ve hafiflik gibi avantajları ile dikkat çeker. Organik malzemeler, çözünürlükleri ve düşük sıcaklıkta işlenebilirlikleri sayesinde, geniş yüzey alanlarına ve çeşitli substratlara kolayca uygulanabilir. OPV hücrelerinin temel çalışma prensibi, ışığın emilmesi sonucu organik yarı iletken malzemede eksiton adı verilen bağlanmış elektron-delik çiftlerinin oluşturulmasına dayanır. Bu eksitonlar, donör ve akseptör malzemeler arasındaki arayüzde ayrılarak serbest elektron ve deliklere dönüşür. Serbest kalan elektronlar ve delikler, elektrotlar aracılığıyla dış devreye taşınarak elektrik akımı oluşturur. Organik fotovoltaik hücrelerin verimliliği genellikle inorganik güneş hücrelerine kıyasla daha düşüktür, ancak son yıllarda yapılan araştırmalar ve gelişmeler sayesinde OPV hücrelerinin verimliliği önemli ölçüde artmıştır. Şu anda, laboratuvar ortamında %15'e kadar ulaşan verimlilik değerleri elde edilmiştir. Bu hücrelerin ticari uygulamalarda yaygınlaşması için verimlilik ve stabilite konularında daha fazla iyileştirme yapılması gerekmektedir. OPV hücrelerinin avantajları arasında esneklik, hafiflik ve düşük maliyetli üretim süreçleri yer alır. Bu özellikler, özellikle taşınabilir cihazlar, giyilebilir teknolojiler ve bina entegrasyonları gibi uygulamalar için büyük bir potansiyel sunar. Ayrıca, şeffaf veya yarı şeffaf OPV hücreleri, pencereler ve cepheler gibi yüzeylere entegre edilebilir, böylece binaların enerji üretim kapasiteleri artırılabilir (Yu ve diğ., 2014).

2.9 Perovskit Güneş Hücreleri

Perovskit güneş hücreleri, adını perovskit kristal yapısına sahip olan ve genellikle organik-inorganik hibrit bir bileşen içeren malzemelerden alır. Bu hücreler, son yıllarda fotovoltaik araştırmalarında büyük ilgi görmüştür çünkü düşük maliyetli üretim süreçleri ve yüksek enerji dönüşüm verimlilikleri sunarlar. İlk olarak 2009 yılında kullanılan perovskit malzemeleri, hızla geliştirilerek laboratuvar ortamında %25'e kadar verimlilik seviyelerine ulaşmıştır (Green ve diğ., 2014). Perovskit güneş hücrelerinin temel yapısı, bir perovskit ışık soğurucu katman, elektron taşıyıcı katman (ETL) ve delik taşıyıcı katmandan (HTL) oluşur. Güneş ışığı perovskit malzeme tarafından absorbe edildiğinde, elektron-delik çiftleri (eksitonlar) oluşturulur. Bu eksitonlar, ETL ve HTL yardımıyla ayrışarak serbest elektronlar ve delikler oluşturur ve böylece elektrik akımı elde edilir (Yang ve diğ., 2015). Perovskit güneş hücrelerinin avantajları arasında yüksek verimlilik, düşük üretim maliyetleri, esneklik ve geniş renk yelpazesi sayılabilir. Üretim süreçleri, düşük sıcaklıkta ve çözümlü bazlı tekniklerle gerçekleştirilebilir, bu da enerji maliyetlerini düşürür. Ayrıca, perovskit malzemeler yarı saydam olabileceği için bina entegrasyonu ve diğer estetik uygulamalarda kullanılabilir (Jeong ve diğ., 2020). Ancak, perovskit güneş hücrelerinin ticari uygulamalarında bazı zorluklar bulunmaktadır. Bunların başında malzemenin uzun vadeli stabilitesi ve nem, oksijen gibi çevresel faktörlere karşı duyarlılığı gelmektedir. Araştırmacılar, perovskit hücrelerin ömrünü uzatmak ve çevresel dayanıklılığını artırmak için çalışmalarını sürdürmektedir (Kojima ve diğ., 2009).

2.10 Dye-Sensitized Güneş Hücreleri

Dye-sensitized güneş hücreleri (DSC), düşük maliyetli, estetik olarak çekici ve çeşitli uygulamalarda kullanılabilir özelliklere sahip bir fotovoltaik teknoloji türüdür. İlk kez 1991 yılında Michael Grätzel ve Brian O'Regan tarafından tanımlanan DSC'ler, özellikle düşük ışık koşullarında yüksek performans göstermeleri ile bilinir (Brain O'Regan & Michael Gratzel, 1991). DSC'ler, genellikle üç ana bileşenden oluşur: bir boya molekülü, bir yarı iletken (genellikle titanyum dioksit, TiO_2) ve bir elektrolit. Güneş ışığı, boya molekülü tarafından absorbe edilir ve bu süreçte bir elektron uyarılarak TiO_2 'ye transfer edilir. Elektronlar, TiO_2 nanokristallerinden geçerek anot

(genellikle şeffaf bir iletken oksit) üzerinden devreyi tamamlar. Aynı zamanda, elektron kaybeden boya molekülü, elektrolit tarafından yenilenir (Grätzel, 2003). DSC'lerin avantajları arasında düşük üretim maliyetleri, şeffaflık, esneklik ve renkli olabilme özellikleri yer alır. Bu özellikler, DSC'leri bina entegre fotovoltaik sistemler, giyilebilir teknolojiler ve diğer estetik uygulamalar için ideal kılar. Ayrıca, DSC'ler düşük ışık koşullarında (örneğin iç mekân aydınlatmasında) iyi performans gösterirler(Yella ve diğ., 2011). Ancak, DSC'lerin bazı dezavantajları da vardır. Elektrolit malzemesi genellikle sıvı olduğundan, uzun vadeli stabilite ve sızdırmazlık sorunları ortaya çıkabilir. Ayrıca, verimlilik oranları, diğer fotovoltaik teknolojilere kıyasla genellikle daha düşüktür ve yaklaşık %11-14 civarındadır. Araştırmacılar, katı hal elektrolitler ve yeni boya molekülleri kullanarak bu sorunları çözmeye çalışmaktadır (Wang ve diğ., 2003).

2.11 Kuantum Noktalı Güneş Hücreleri

Kuantum noktalı güneş hücreleri, kuantum noktaları adı verilen nano boyutlu yarı iletken parçacıkları kullanarak güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürür. Kuantum noktaları, elektron ve deliklerin kuantum seviyelerinde hapsedilmesini sağlayan bir yapıya sahip olup, enerji seviyeleri ve optik özellikleri boyutlarına göre ayarlanabilir (Nair ve diğ., 2011). Kuantum noktalarının kullanıldığı güneş hücrelerinin temel avantajlarından biri, geniş bir spektrum aralığını absorbe edebilme yetenekleridir. Bu, fotovoltaik hücrenin daha fazla güneş ışığına tepki vermesini ve dolayısıyla daha yüksek verimlilik sağlamasını mümkün kılar. Ayrıca, kuantum noktaları çeşitli malzemelerle kaplanabilir ve farklı dalga boylarındaki ışığı etkili bir şekilde absorbe edebilir (Bera ve diğ., 2010). Kuantum noktalı güneş hücrelerinin verimliliği, bu noktaların boyutları, şekilleri ve malzemeleri gibi birçok faktörden etkilenir. Bu tür hücreler, geleneksel silikon bazlı hücrelere göre daha yüksek verimlilik vaat etse de bu teknolojinin ticari uygulamalarına geçişinde karşılaşılan en büyük zorluklardan biri, kuantum noktalarının üretimindeki karmaşıklık ve maliyetlerdir(Liu Feng ve diğ., 2013).

2.12 Tandem Güneş Hücreleri

Tandem güneş hücreleri, güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürmede verimliliği artırmak için iki veya daha fazla fotovoltaik (PV) katmanının seri olarak kullanıldığı yenilikçi bir teknoloji türüdür. Bu hücreler, geniş bir ışık spektrumunu absorbe edebilmek için farklı malzemelerden yapılmış hücreleri bir araya getirir. Her bir katman, belirli bir dalga boyu aralığındaki ışığı absorbe ederek enerji üretiminde daha yüksek verimlilik sağlar. Tandem hücrelerin en yaygın kullanılan türlerinden biri, silikon bazlı hücrelerin üzerine perovskit malzemeler eklenerek oluşturulan yapıdadır. Bu tür hücreler, hem silikonun stabilitesi ve geniş spektrumlu ışık emilimi avantajlarından hem de perovskit malzemelerin yüksek verimlilik ve düşük maliyet avantajlarından yararlanır (Bush ve diğ., 2017). Bir tandem hücrede, üst hücre kısa dalga boylu (yüksek enerjili) fotonları absorbe ederken, alt hücre daha uzun dalga boylu (düşük enerjili) fotonları absorbe eder. Bu yapı, daha geniş bir spektrumda enerji dönüşümünü mümkün kılar ve tek katmanlı hücelere göre daha yüksek verimlilik sağlar. Laboratuvar ortamında, tandem hücrelerin verimliliği %30'un üzerine çıkabilmiştir (Albrecht ve diğ., 2016).

Tüm bu teknolojiler dışında halen gelişmekte olan birçok teknolojilerde mevcuttur. Bunlardan bazıları; Çok Eklemlili (Multi-junction) Güneş Hücreleri, İnorganik-Organik Hibrid Hücreler, Kendi Kendini Onaran Hücreler, Grafen Bazlı Güneş Hücreleri, Plazmonik Fotovoltaik Hücreler, Yarı Şeffaf Güneş Hücreleri, Fotovoltaik-Termik Hibrit Sistemler, Nanokristal Güneş Hücreleri, Fotokatalitik Güneş Hücreleri, Termoelektrik Güneş Hücreleri, Spintronik Güneş Hücreleri, Biyolojik Fotovoltaik Hücreler, Uzay Tabanlı Güneş Hücreleri vb. şeklinde sıralanabilir.

Fotovoltaik hücre teknolojilerinin dışında son yıllarda verimliliği arttırmak için farklı teknolojilerde uygulanmaya başlanmıştır.

2.13 Yarım Hücre (Half-Cut) Teknolojisi

Panelde kullanılan hücreler ikiye bölünerek yarım hücreler olarak yerleştirilmektedir. Bu teknoloji sayesinde, gün ışığı alamama veya bir hücrenin arızalanması durumlarında panelin etkilenmesi daha az olur ve artan devre sayısı ile panel verimliliği artar.

2.14 Çift Yüz (Bifacial) Teknolojisi

Gelişen teknolojiyle birlikte son yıllarda güneş panelleri konusunda en çok karşılaşılan teknolojilerden biri haline gelen çift yüz fotovoltaik modüller hem arka hem de ön yüzeyinden elektrik üreterek daha verimli olduklarını göstermektedirler. Panelin arka kısmında cam ya da transparan yüzey kullanılarak yansıtılan güneş ışığı tekrar değerlendirilmektedir.

2.15 Multi Busbar Teknolojisi

Hücrelerin birbirine seri bağlanmasını ve hücrelerden elektronu daha verimli bir şekilde çekmeyi sağlamak için lehimlenen ribonların sayısı artırılmaktadır. Bu sayede panelde oluşabilecek çatlaklar azaltılır ve panelin verimliliği artırılır.

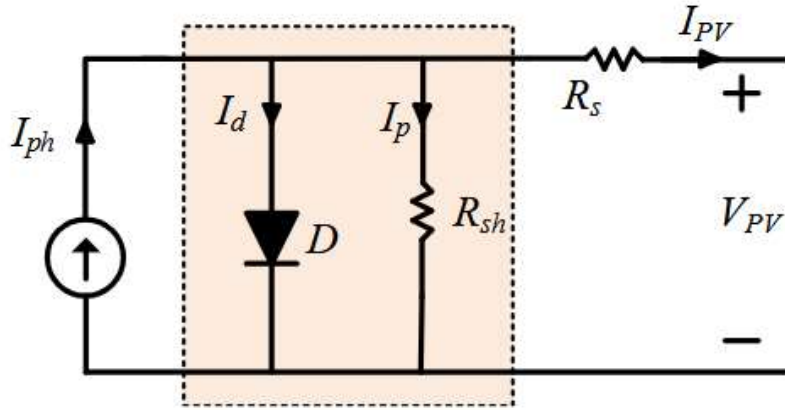
2.16 Takip (Tracker) Teknolojisi

Güneş hareketini takip edecek şekilde sensörler yardımıyla tek eksenli veya çift eksenli olarak tasarımlar yapılarak enerji üretimini arttırmayı hedefleyen sistemlerdir. Bu teknoloji Çift yüzlü panellerle birlikte kullanıldıklarında daha fazla verim elde edilebilmektedir.

3. FOTOVOLTAİK PANELLERİN MODELLENMESİ

3.1 Tek Yüzlü Fotovoltaik Hücrenin Tek Diyotlu Eşdeğer Devresi

PV hücre bir akım kaynağı gibi davranmaktadır ve ürettiği akım (I_{ph}) aldığı ışınım ile orantılıdır. Fotovoltaik hücre ışık enerjisi ile uyarılmadığı zaman standart bir diyot gibi davranmaktadır. İdeal durumlar düşünüldüğünde bir solar hücrenin eşdeğer devresi diyot ve ona paralel bir akım kaynağı ile kurulabilmektedir. Ancak gerçek durumları karşılması için seri ve paralel bir direnç eşdeğer devreye eklenmektedir. Seri direnç (R_s) hücre bağlantılarından, p-n eklemesinin derinliğinden ve materyallerin saf olmamasından kaynaklanan direnci karşılamaktadır. R_{sh} direnci ise p-n bağlantısının sızıntı akımından kaynaklanan bir dirençtir ve malzeme kalitesi ile doğrudan ilgilidir.



Şekil 3.1: Fotovoltaik hücrenin tek diyotlu eşdeğer devresi.

Şekil 3.1 ile gösterilen eşdeğer devrede Kirchoff'un akımlar kanununa göre hücrenin üreteceği çıkış akımı hesabı için aşağıdaki denklem (3.1) kurulabilir.

$$I_{PV} = I_{ph} - I_p - I_d \quad (3.1)$$

Burada I_{ph} foton sonrası üretilen ışınım akımı anlamına gelir. I_p paralel direnç üzerinden geçen akımı temsil etmektedir. I_d ise diyot akımıdır. Shockley denklemi kullanılarak denklem yeniden yazılırsa;

$$I_d = I_0 \left[\exp \left(\frac{V_{Pv} + I_{PV} * R_s}{a * V_t} \right) - 1 \right] \quad (3.2)$$

Burada I_0 ters diyet doyma akımını, V_{Pv} Fotovoltaik panelin çıkış voltajını, a diyetun ideallik faktörünü, V_t gerilimi ifade eder. Buna göre;

$$V_t = \frac{N_s * K * T}{q} \quad (3.3)$$

N_s Fotovoltaik modüllerde seri bağlı hücre sayısını, K ise Boltzman sabitini ($K = 1.3806503 * 10^{-23}$ J/K), q ise elektron yükünü ($q = 1.60217646 * 10^{-19}$ Coulombs), T ise modülün bağlantı sıcaklığını (Kelvin) ifade eder. I_p denklemini de yazarsak;

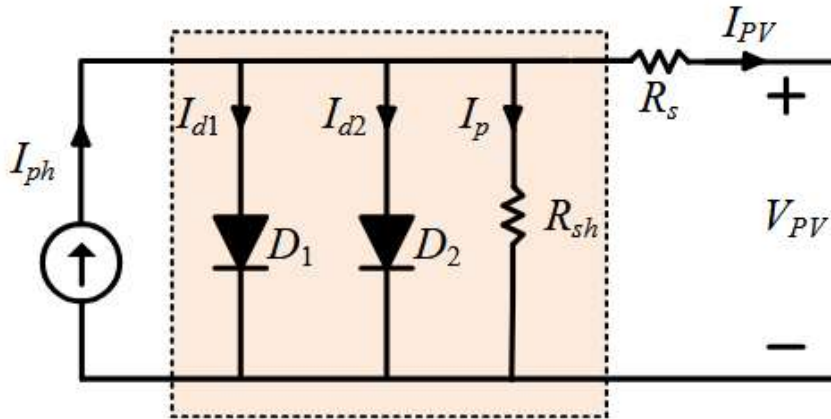
$$I_p = \frac{V_{Pv} + I_{PV} * R_s}{R_{sh}} \quad (3.4)$$

Yukarıda bulunan tüm denklemler birleştirip tek bir denklem haline getirirsek;

$$I_{PV} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V_{Pv} + I_{PV} * R_s}{a * \frac{N_s * K * T}{q}} \right) - 1 \right] - \frac{V_{Pv} + I_{PV} * R_s}{R_{sh}} \quad (3.5)$$

3.2 Tek Yüzlü Fotovoltaik Hücrenin İki Diyetlu Eşdeğer Devresi

Şekil 3.2’de tek yüzlü fotovoltaik hücrenin iki diyetlu eşdeğer devresi gösterilmektedir. Bu devre fotovoltaik panellerdeki kayıpları farklı şekilde modellemek için oluşturulmuştur.



Şekil 3.2: Fotovoltaik hücrenin iki diyetlu eşdeğer devresi.

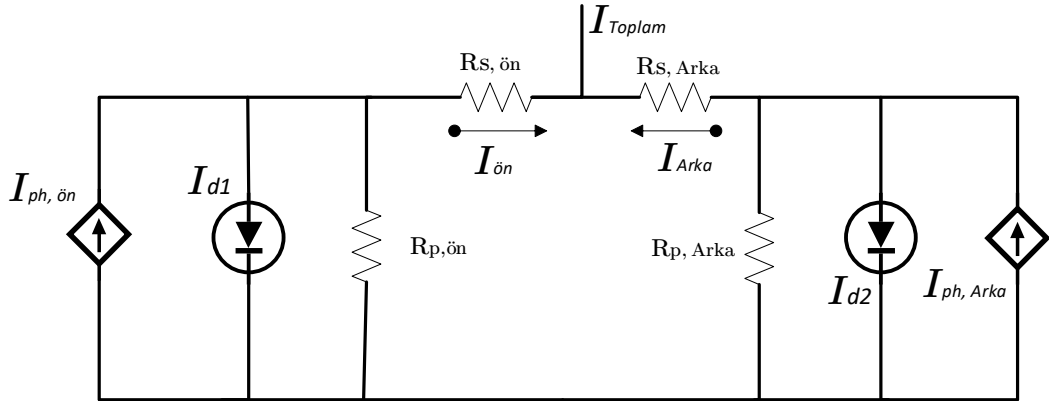
Benzer şekilde tek diyetlu eşdeğer devre gibi Kirchoff'un akımlar kanununu uygularsak; aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$I_{PV} = I_{ph} - I_p - I_{d1} - I_{d2} \quad (3.6)$$

$$I_{PV} = I_{ph} - I_{01} \left[\exp \left(\frac{V_{PV} + I_{PV} * R_s}{a * \frac{N_s * K * T}{q}} \right) - 1 \right] - I_{02} \left[\exp \left(\frac{V_{PV} + I_{PV} * R_s}{a * \frac{N_s * K * T}{q}} \right) - 1 \right] - \frac{V_{PV} + I_{PV} * R_s}{R_{sh}} \quad (3.7)$$

3.3 Çift Yüzlü Fotovoltaik Hücrenin Tek Diyotlu Eşdeğer Devresi

Çift yüzlü Fotovoltaik hücrenin hem üst hem de alt kısmından üretilen akımları göstermek için tek diyotlu devre modeli Şekil 3.3'te gösterilmektedir. Tek yüzlü fotovoltaik hücrenin eşdeğer devresinde kullanılan formüllere benzer şekilde denklemler oluşturabiliriz.



Şekil 3.3: Çift yüzlü fotovoltaik hücrenin eşdeğer devresi.

$$I_{Toplam} = [I_{ön} - I_{ph} - I_{d1}] + [I_{Arka} - I_{ph} - I_{d2}] \quad (3.8)$$

$$I_{Toplam} = \left| I_{ph} - I_{01} \left[\exp \left(\frac{V_{PV} + I_{PV} * R_s}{a * \frac{N_s * K * T}{q}} \right) - 1 \right] - \frac{V_{PV} + I_{PV} * R_s}{R_p} \right|_{ön} + \left| I_{ph} - I_{01} \left[\exp \left(\frac{V_{PV} + I_{PV} * R_s}{a * \frac{N_s * K * T}{q}} \right) - 1 \right] - \frac{V_{PV} + I_{PV} * R_s}{R_p} \right|_{Arka} \quad (3.9)$$

Çift yüzlü fotovoltaik hücrenin eşdeğer devresi ile tek yüzlü fotovoltaik hücrenin eşdeğer devresi tek diyotlu tasarım ile yapılırsa birbirine benzemektedir. Ancak çift yüzlü fotovoltaik hücrenin arka yüzeyinde de hücreler bulunduğu için

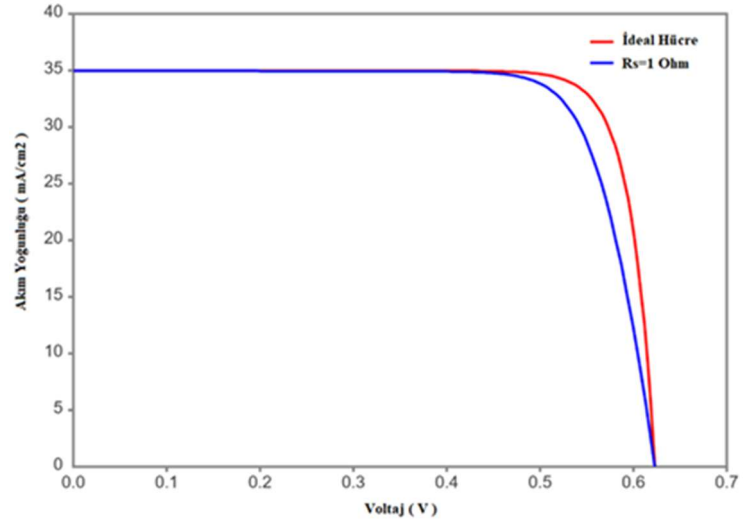
modellemeye Şekil 3.3'teki gibi tasarım yapılması literatürdeki çalışmalardan da görüleceği gibi daha doğru bir tasarım olacaktır.

3.4 Fotovoltaik Panellerin I-V Eğrisini Etkileyen Faktörler

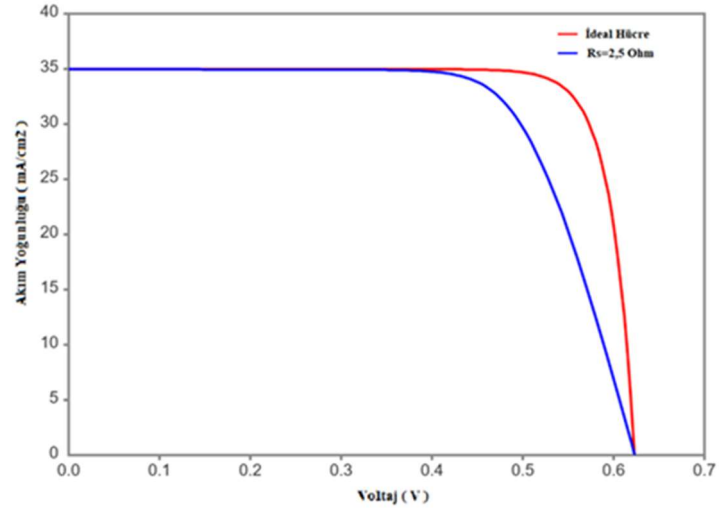
Güneş hücreleri farklı çevresel etmenlere maruz kaldıkları için değişken sıcaklık ve ışınım şiddeti gibi faktörlerden etkilenirler. Tek Yüzlü PV ve Çift Yüzlü PV 'nin akımı, gerilimi ve verimliliği bu çevresel parametrelere ve parazit dirençler ve bozulma gibi içsel kayıplara bağlı olarak değişir. Daha önce teorik analizi yapılan tek diyot modeli kullanılarak güneş hücresinin performans parametreleri (yani açık devre gerilimi, kısa devre akımı, foto akımı, seri ve paralel dirençler, doldurma faktörü ve verimlilik), hücrenin maruz kaldığı ışınım ve sıcaklığa bağlı olarak doğrudan etkilenir. Seri direncin artması ve paralel direncin azalması, PV cihazının erken bozulmasına neden olabilir, bu da geçici güç azalmasına veya kalıcı hücre hasarlarına yol açabilir.

3.4.1 Seri Direnç Kayıpları

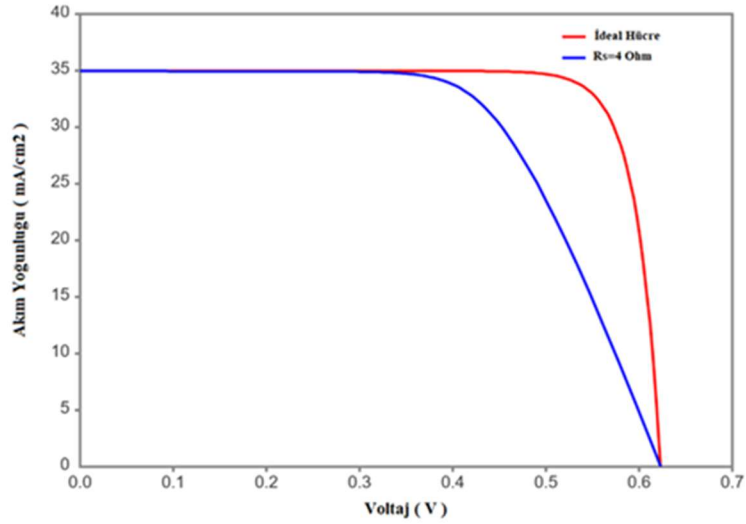
Fotovoltaik hücrelerde seri direnç kayıpları, birkaç kaybın toplamını temsil eder. Bu seri direnç, metal temaslarının korozyonu, bağlantı kutusu temasları ve hücreler arasındaki bağlantılardaki kusurlar gibi birçok bozulma mekanizması nedeniyle artabilir. Bu kayıplar yarı iletken, metal bağlantılar, metalizasyon süreci ve bir PV modülündeki hücreler arasındaki bara hattında olabilir. Seri direncin artması, Şekil 3.4'te gösterildiği gibi cihazın voltaj eğimini artırarak hücrenin I-V eğrisini deforme eder.



(a)



(b)

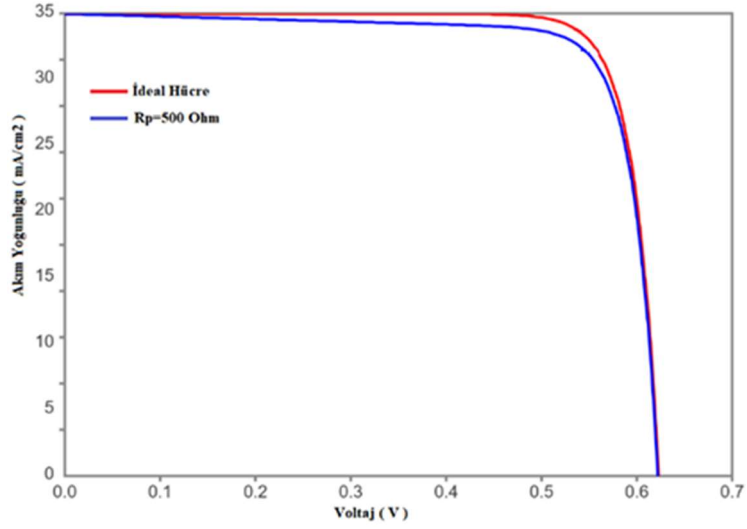


(c)

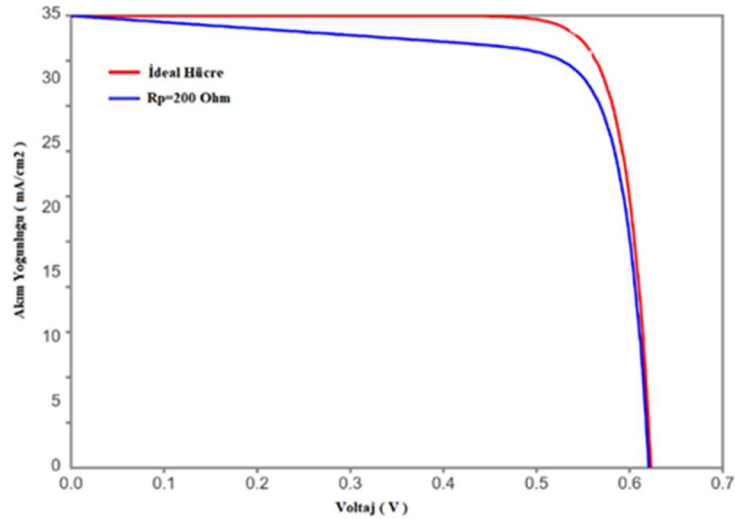
Şekil 3.4: R_s değerlerine göre IV eğrisindeki değişimler a) $R_s = 1 \text{ Ohm}$; b) $R_s = 2,5 \text{ Ohm}$; c) $R_s = 4 \text{ Ohm}$.

3.4.2 Paralel Direnç Kayıpları

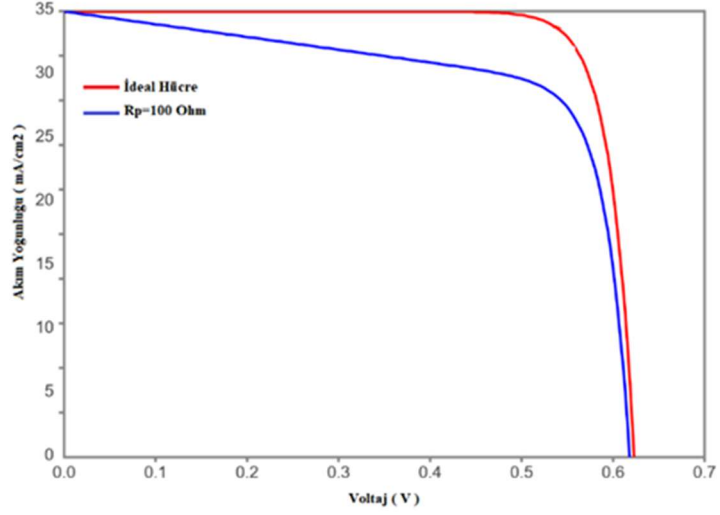
Fotovoltaik hücrelerde paralel direnci, yarı iletken p-n eklemi boyunca oluşabilecek paralel yüksek iletkenlik yolunun eşdeğerini temsil eder. Temel olarak, bu direncin değeri ne kadar yüksek olursa akacak olan akım küçüleceği için o kadar iyidir. Paralel direncinin azalması, Şekil 3.5'te gösterildiği gibi akım eğimini artırarak hücrenin I-V eğrisinin şeklini deforme eder. Bu direnç aynı zamanda kaçak akım direnci olarak da bilinir; değeri azaldığında, paralel iletkenlik yolları üzerinden daha fazla istenmeyen bir akım akmaya başlar ve bu nedenle fotovoltaik hücrenin ürettiği çıkış akımını önemli ölçüde azalır.



(a)



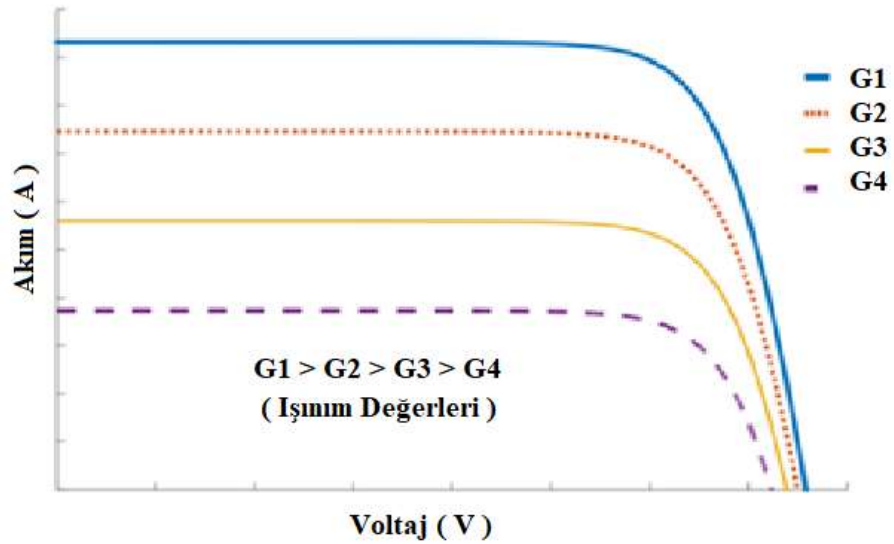
(b)



(c)
Şekil 3.5: R_p Değerlerine göre IV eğrisindeki değişimler a) $R_p=500$ Ohm; b) $R_p=200$ Ohm;
 c) $R_p=100$ Ohm.

3.4.3 Işınım Değerinden Kaynaklanan Kayıplar

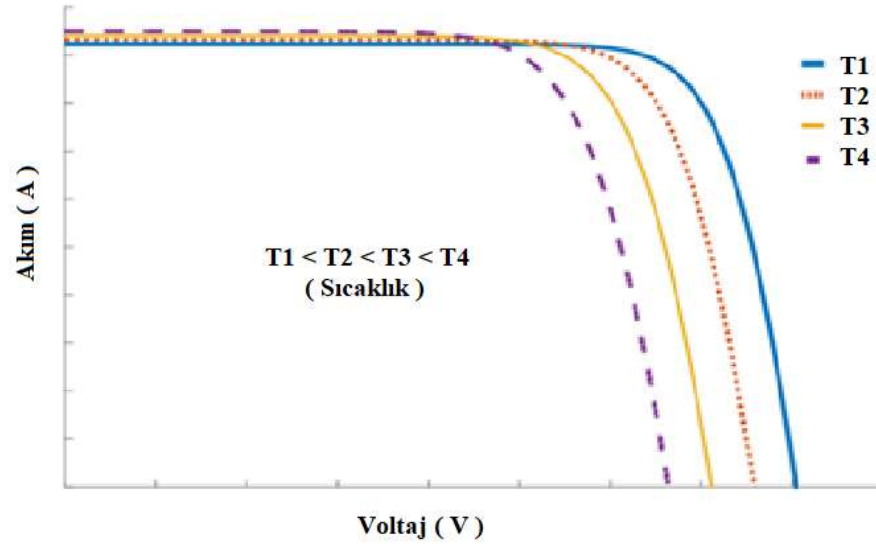
Bulutlanma vb. nedenlerle etkilenen ışınım değeri fotovoltaik panellerde üretilen akımı doğrudan etkilemektedir. Voltaj bu durumdan fazla etkilenmemektedir. Şekil 3.6'da bu açıkça görüldüğü gibi ışınım değeri düştükçe akımda düşmektedir.



Şekil 3.6: Işınım değerlerine göre IV eğrisindeki değişimler.

3.4.4 Fotovoltaik Hücre Sıcaklığındaki Artış

Fotovoltaik modüle düşen ışınım, hücre tarafından emilebilir veya hücreden geçebilir. Işınımın iletilen kısmı çoğunlukla IR (veya yakın) ışıdır ve modül boyunca iletebilir, emilebilir veya hücreye geri yansıtılabilir. Güneş hücresi tarafından emilen güneş ışınımının bir kısmı elektrik ve ısıya dönüştürülür, bu dönüşüm kayıpları nedeniyle oluşur. Modülün ortam sıcaklığına göre daha yüksek çalışma sıcaklığı, fotovoltaik enerji dönüşümü sırasında üretilen boşa harcanan enerjiden kaynaklanır. Boşa harcanan enerjinin çoğu ısıya dönüştürülür. Bu ısı, modüllerin güç çıkışını ve verimliliğini doğrudan etkiler. Şekil 3.7’de gösterildiği gibi ısı artışı fotovoltaik hücrelerdeki verimi olumsuz yönde etkilemektedir.



Şekil 3.7: Fotovoltaik hücredeki sıcaklık değişimlerinin IV eğrisindeki etkisi.

4. ÇİFT YÜZLÜ PANELLERİN MODELLENMESİ VE ÇİFT YÜZLÜ PANEL İLE DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1 Çift Yüzlü Panellere Giriş

Çift yüzlü fotovoltaik paneller, enerji verimliliği ön planda tutan yenilikçi bir teknoloji olarak ön plana çıkmaktadır. Bu paneller, hem ön yüzeylerinden doğrudan gelen güneş ışığını hem de arka yüzeylerinden yansıyan ışığı toplayarak elektrik üretirler. Bu sayede, geleneksel tek yüzlü panellere göre daha fazla enerji üretebilirler. Çift yüzlü panellerin en büyük avantajlarından biri, yansıtıcı yüzey alanlarına sahip cisimlerin fazla olduğu yerlerde verimli çalışmalarıdır. Örneğin, karla kaplı alanlarda karın yüksek yansıtma kapasitesi nedeniyle enerji üretimi belli bir oran kadar artabilir. Benzer şekilde, beton veya beyaz çakıl taşları gibi yansıtıcı yüzeylerle çevrili alanlarda da verimlilik artışı gözlemlenir. Kurulum maliyetleri, geleneksel panellere göre biraz daha yüksek olabilir. Ancak, uzun vadede sağladıkları yüksek enerji verimliliği ve düşük bakım maliyetleri sayesinde bu ek maliyetler kısa sürede telafi edilebilir. Sonuç olarak, çift yüzlü fotovoltaik paneller, yenilenebilir enerji kaynakları arasında giderek daha popüler hale gelmekte ve sürdürülebilir enerji üretimi için umut verici bir seçenek olarak görülmektedir.

4.2 Albedo

Bir yüzeyin üzerine gelen elektromanyetik enerjiyi geri yansıtma yeteneği, yani yüzeyin reflektif kapasitesi, albedo olarak tanımlanmaktadır. Cisimlerin albedo değerleri, bu cisimlerin yüzey alanı, dokusu ve rengi gibi özelliklerine bağlı olarak farklılık gösterir. Beyaz renkte görünen bir nesne, yüksek albedo değeriyle üzerine düşen ışığın büyük bir kısmını yansıtırken, koyu renkte görünen bir nesne düşük albedo değeri nedeniyle üzerine düşen ışığın çoğunu emer. Şekil 4.1’de güneşten gelen ışınım değerlerinin yeryüzündeki farklı yüzeylere göre değişimleri gösterilmektedir. Albedo değeri 0 ile 1 arasında değişmektedir. Tablo 4.1’de farklı zeminlerde albedo değerleri gösterilmektedir.



Şekil 4.1: Farklı zeminlerde albedo katsayısının gösterilmesi (Albedo Nedir?, 2024).

Albedo değerlerine göre dünyamızın küresel ısınma değerleri de değişmektedir. Örneğin, Şekil 4.1'deki buzul albedo değeri 0,80-0,95 iken dünya ortalama albedosu 0,31'dir. Küresel ısınma nedeniyle buzulların erimesi sonucu dünyamızın albedo ortalaması da bundan olumsuz etkilenmektedir.

Tablo 4.1: Bazı yüzeylerin albedo değerleri.

Temiz Kar / Buzul	0,80 - 0,95	Çimen	0,18 - 0,23
Bulut	0,60 - 0,90	Orman	0,05 - 0,18
Çöl	0,30	Asfalt	0,15
Deniz Suyu	0,05 - 0,22	Arazi	0,26

4.3 Çift Yüzlü Fotovoltaik Sistemin Deney Bileşenleri

Çift yüzlü fotovoltaik sistemin deney bileşenleri, güneş ışığını her iki yüzeyden de emerek enerji üretimini artırmayı amaçlayan bileşenleri içerir. Bu sistemlerde kullanılan temel bileşenler arasında çift yüzlü fotovoltaik paneller, panel açılarını ve konumlarını ayarlamaya yönelik montaj yapıları, ışınım ve sıcaklık sensörleri, arka yansıtıcı yüzeyler ve çevresel etkilerin takibini sağlayan ölçüm cihazları yer alır. Deneysel analizlerde, özellikle panel arkasındaki yansımaların etkisini belirlemek ve farklı ortam koşullarındaki performans farklarını gözlemlemek için bu bileşenlerin dikkatli bir şekilde seçilmesi ve konumlandırılması gerekmektedir.

4.3.1 Çift Yüzlü Fotovoltaik Panel

Deneysel çalışma da kullanılan 550 W çift yüzlü fotovoltaik panelin elektriksel karakteristik özellikleri Tablo 4.2’de gösterilmektedir. Çift yüzlü modülün arka güç kazanımı Tablo 4.3’te gösterilmektedir(GD Solar Energy, 2024)

Tablo 4.2: Çift yüzlü fotovoltaik panelin karakteristik özellikleri.

Elektriksel Karakteristik					
Modül	GD 72-182M10-BF				
Maksimum Güç (Pmax)	535W	540W	545W	550W	555W
Açık Devre Gerilimi (Voc)	49,36V	49,52V	49,68V	49,84V	50,03V
Kısa Devre Akımı (Isc)	13,77A	13,84A	13,91A	13,98A	14,04A
Maksimum Güç Voltajı	41,51V	41,67V	41,83V	41,99V	42,18V
Maksimum Güç Akımı	12,89A	12,96A	13,03A	13,10A	13,16A
Modül Verimliliği	20,7%	20,9%	21,1%	21,2%	21,3%
Pozitif Güç Toleransı	0-+5W				
Maksimum Sistem Voltajı	1500V DC				
Maksimum Seri Sigorta Akımı	25A				
Çalışma Sıcaklığı	-40 °C ile +85 °C				

Tablo 4.3: Deneysel çalışma da kullanılan modülün arka güç kazanımı.

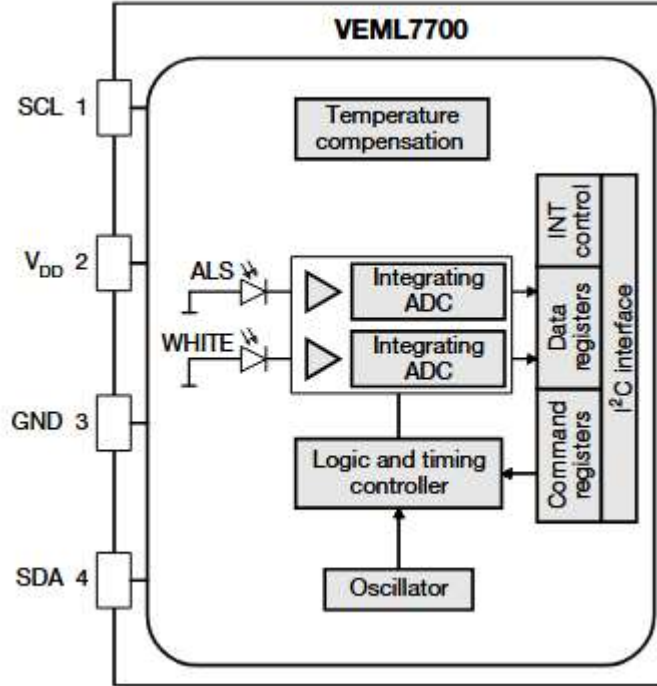
Çift Yüzlü Modül Arka Güç Kazanımı					
Modül	GD 72-18M10-BF			Çift Yüzlülük : 70±5%	
	Pmax	Voc/V	Isc/A	Vmp/V	Imp/A
567W	5%	49,52	14,53	41,67	13,60
594W	10%	49,52	15,22	41,67	14,25
621W	15%	49,52	15,91	41,67	14,90
648W	20%	49,52	16,60	41,67	15,55
675W	25%	49,52	17,30	41,67	16,20

Deneysel çalışma yapılacak panel Türkak tarafından onaylı Tübitak Ulusal Metroloji Enstitüsü tarafından Görsel Muayene Testi, Elektrolüminesans Görüntüleme Testi, En Yüksek Güç Tayini Testi, Yaşta Kaçak Akım Testi, Yalıtım Testi, Toprak Sürekliliği Testi ve Mekanik Yük Testi yapılmış ve başarıyla geçmiştir.

4.3.2 VEML7700 Işık Sensörü

Yüksek hassasiyetli ışık sensörü olan VEML7700, I2C haberleşme protokolü kullanmaktadır. Ortam ışığını 16 bit çözünürlükle 0 lüks ile 140000 lüks arasında ölçüm yapabilmektedir. VEML7700’nın blok diyagramı Şekil 4.2’de gösterilmektedir. VEML7700 uygulama alanları arasında; Televizyon Ekranlarında, Akıllı telefonlarda,

Dokunmatik telefonlarda arka ışığı kısmak için, Endüstriyel işletmelerde aydınlatma aç/kapa yapmak için ortam ışık sensörü olarak ve optik anahtar olarak kullanılmaktadır (Vishay Intertechnology, 2024).



Şekil 4.2: VEML7700 blok diyagramı.

Tablo 4.4: VEML7700 ışık sensöründe gain ve IT zaman (ms) tablosu.

ÇÖZÜNÜRLÜK VE MAKSİMUM ARALIK TESPİTİ									
	Gain 2	Gain 1	Gain 1/4	Gain 1/8		Gain 2	Gain 1	Gain 1/4	Gain 1/8
IT(ms)	TİPİK ÇÖZÜNÜRLÜK (lx/cnt)					MAKSİMUM İŞİNİM (lx)			
800	0,0042	0,0084	0,0336	0,0672		275	550	2202	4404
400	0,0084	0,0168	0,0672	0,1344		550	1101	4404	8808
200	0,0168	0,0336	0,1344	0,2688		1101	2202	8808	17616
100	0,0336	0,0672	0,2688	0,5376		2202	4404	17616	35232
50	0,0672	0,1344	0,5376	1,0752		4404	8808	35232	70463
25	0,1344	0,2688	1,0752	2,1504		8808	17616	70463	140926

Tablo 4.4'te gösterilen değerler VEML7700 için hesaplamalarda kullanılmaktadır.

Örneğin, VEML7700 ışık sensörü ALS değeri binary sayı sisteminde;

0001 0101 1100 1101 = 5581(decimal)

değerini gösterdiğini düşünelim. Ayrıca ALS kazanç değeri ¼ değerini ve IT= 100ms olduğunu düşünürsek;

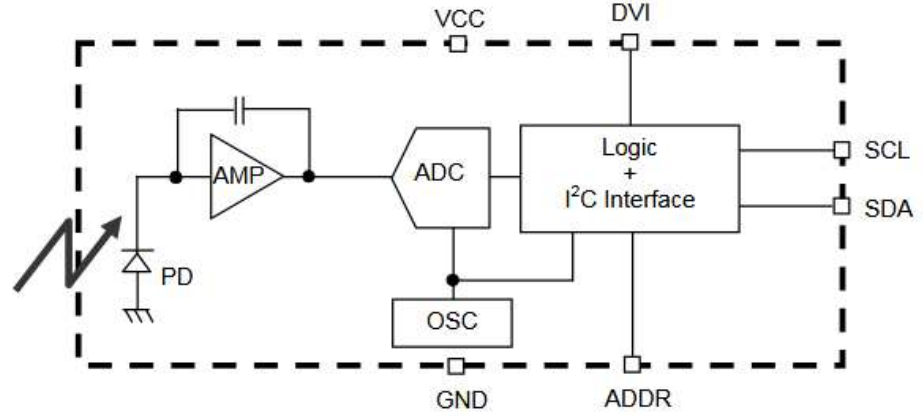
Doğrulanmamış Işık Şiddeti= $5581 * 0,2688 = 1500$ lüks

Polinom katsayıları da yerine konulursa Doğrulanmış Işık Şiddeti= 1658 lüks olacaktır.

4.3.3 BF1750 Işık Sensörü Devresi

BF1750 ışık sensörü devresi, güneşten gelen ışık şiddetini ölçmek için kullanılmıştır. Şekil 4.3'te BF1750 ışık sensörünün blok diyagramı gösterilmektedir (ROHM Co., 2011).

Bu devrenin özellikleri;



Şekil 4.3: BF1750 ışık sensörünün blok diyagramı.

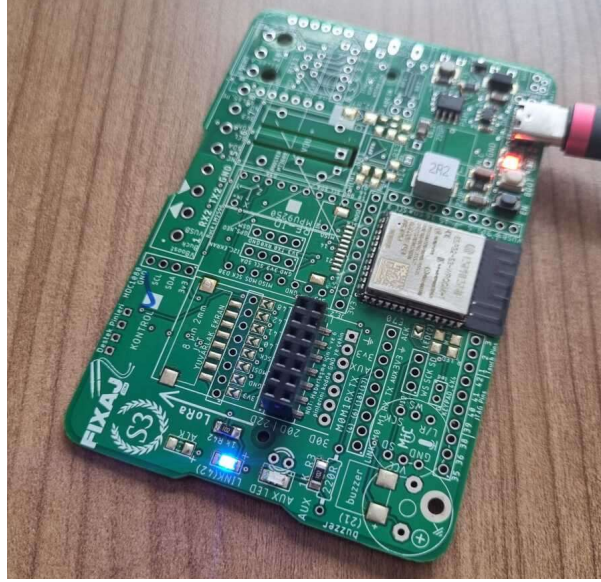
BF1750 ışık sensörü devresinin özellikleri;

- I2C haberleşme arayüzünü destekler.
- Sensörün belirli dalga boylarına verdiği tepkilerin insan gözünün o dalga boylarına verdiği tepkilere benzerlik göstermektedir.
- Aydınlatma seviyesini dijitalle dönüştürmektedir.
- 1 lüks (lx) ile 65535 lüks arasında değişen geniş bir aralıktaki ışık seviyelerini ölçebilir. Ayrıca yüksek çözünürlük, ışık seviyesindeki küçük farkların doğru bir şekilde ölçülmesini sağlar.
- Sensör çalışırken veya bekleme modundayken çok az akım tüketir ve bu modlar arası geçiş yapabilme özelliğine sahiptir.
- 16-bit çözünürlükle çıkış üretir.

- Üzerine yerleştirilen optik bir pencere ile ölçüm hassasiyeti 0,1 lüks ile 100000 lüks kadar geniş bir aralıkta ölçüm yapılabilir.
- Sensörün ölçüm sonuçlarının, gerçek değerden maksimum +/- %20 oranında sapma gösterebilmektedir.

4.3.4 ESP32 S3 Kart Devresi

ESP32 S3 Kart devresi Şekil 4.4'te gösterilmektedir. Bu kart devresi ile Arduino yazılım diliyle programlama yapılabilmektedir.



Şekil 4.4: ESP32 S3 kart devresi.

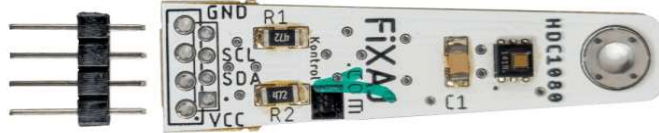
ESP32 S3 Kart Devresinin özellikleri;

- LoRa modülleri E32, E22 ve E70 Modellerinin tamamı dahil kablosuz haberleşme yapabilmektedir.
- LoRa modüllerine parametre ayarı verebilmek için USB Stick olarak kullanabilmektedir.
- Dokunmatik Ekran için FFC soket yeri mevcuttur.
- USB TYPE C bağlantı ve USB üzerinden program yükleme desteği mevcuttur.
- ESD koruması mevcuttur

- SMPS ile %96 varan randımanlı gerilim dönüşümü yapabilmektedir.
- TP4056 ile Lipo pil desteği mevcuttur.
- Dahili Röle yeri mevcuttur.
- RS485 ile haberleşme yapabilmektedir.
- RS232 haberleşme desteği mevcuttur.
- Ethernet destelemektedir.
- RFID desteklemektedir.
- SD kart yuvası bulunmaktadır.
- RJ11 ile esnek çıkış uçları mevcuttur.

4.3.5 HDC 1080 Sıcaklık ve Nem Sensörü Kartı

HDC 1080 Sıcaklık ve Nem sensörü havanın °C cinsinden sıcaklığını ve nem değerini ölçer. Yüksek doğrulukla düşük tolerans özelliğiyle bilinen bu kart, düşük güç tüketimine sahip olup I2C haberleşme protokolünü desteklemektedir. Şekil 4.5'te gösterilmiştir(Texas Instruments Incorporated, 2016).



Şekil 4.5: HDC 1080 kartının gösterimi.

4.3.6 LDR Işık Sensörü Kartı

Işığa bağlı direnç anlamına gelmekte olan LDR, “Light Dependent Resistor” baş harflerinin kısaltması olarak kullanılmaktadır. LDR ayrıca foto direnç olarak da adlandırılır. Bir direnç çeşidi olmasının yanında aynı zamanda bir pasif sensör olan LDR, ışık şiddetine bağlı olarak yapısında değişiklik gösterir. LDR Işık Sensörü Kartı, Arduino projelerinde rahatlıkla kullanabileceğimiz, ışığa bağlı olarak üzerindeki dijital pinden analog ve/veya dijital olarak çıkış veren bir sensör kartlı bir modüldür. Bu kart

4 pinli olup, bunlar A0, VCC, GND ve DO'dur. 3,3V veya 5V ile çalışmaktadır. Şekil 4.6'da deneyde kullanılan LDR ışık sensörü kartı gösterilmektedir.



Şekil 4.6: LDR ışık sensörü kartı.

4.3.7 Mikro SD Kart Modülü

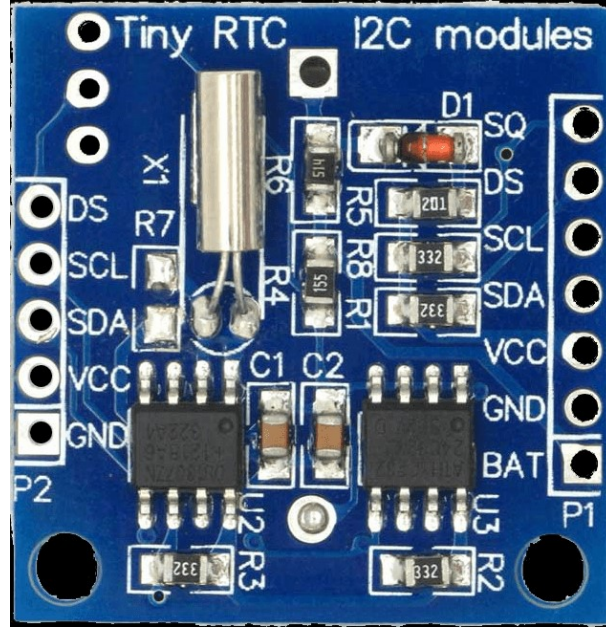
SD kart modülü, Arduino programlama dilinde bulunan SD kütüphanesi kullanılarak veri yazmak ve kaydetmek için kullanılan bir kart modülüdür. Veri depolama veya veri kaydı uygulaması için Micro SD Kart Modülü, 3V veya 5V cihazlarla kolay arabirim için yerleşik bir voltaj seviyesi dönüşümü içerir, iletişim standart SPI arayüzü ile yapılmaktadır. Deneysel çalışmalarımızın verileri kaydetmek için 16 GB SD Kart ile birlikte Şekil 4.7'deki Micro SD kart modülü kullanılmıştır.



Şekil 4.7: Micro SD kart modülü.

4.3.8 Gerçek Zamanlı Saat Modülü

Gerçek zamanlı saat modülü, Şekil 4.8’de gösterilmekte olan bu modül, deneysel çalışmalar gerçekleştirirken gerçek zaman değerlerini yüksek hassasiyetle tespit etmek için kullanılmıştır. I2C haberleşme protokolü ile haberleşmektedir. 3V’luk pil beslemesi ile çalışmaktadır.



Şekil 4.8: Gerçek zamanlı saat modülü.

4.3.9 PT100 Sıcaklık Sensörü

Panelin yüzeyindeki sıcaklıkların değişimini incelemek için PT100 Sıcaklık sensörü kullanılmıştır. Bu sensör sayesinde panel üzerinde artan sıcaklığın verim üzerindeki etkisi araştırılacaktır. PT100 bir Termodirenç sıcaklık sensörüdür. Termodirençler için RTD (Rezistans Termo Direnç) kısaltması kullanılır. PT100 Sıcaklık Sensörü aslında bir direnç olup sıcaklık değerine göre öz direnci-ohm değerleri değişen bir tür dirençtir. Şekil 4.9’da PT100 sıcaklık sensörü gösterilmektedir.



Şekil 4.9: PT100 sıcaklık sensörü.

4.4 Çift Yüzlü Fotovoltaik Panelin Farklı Zemin ve Sıcaklık Koşullarında Performansının Karşılaştırılması İçin Kurulan Sistem

Fotovoltaik (PV) sistemler kullanarak elektrik enerjisi üretimi, yenilenebilir enerji gelişiminin önemli bir parçasıdır. PV sistemlerin işletiminde ana konulardan biri, performansı etkili bir şekilde ölçme yeteneğidir. Önemli olan, PV güneş hücreleri ve modüllerinin düşük güneş ışığı koşullarında performansının nasıl etkili bir şekilde ölçüleceğidir. Düşük güneş ışınımını ölçmek için basit ve maliyet etkin bir yöntem, bu araştırmayı destekleyecektir. Güneş ışınımı metrekare başına watt (W/m^2) cinsinden ve ışık aydınlatması lüks (lx) birimiyle ölçülür. Standart olarak kabul edilen tam güneş ışınımı yoğunluğu, metrekare başına 1000 W'tır. Bu, genellikle güneş enerjisi sistemlerinin performansını değerlendirmek ve karşılaştırmak için kullanılan bir referans değeridir.

Çift yüzlü fotovoltaik panel güneşe doğru yerleştirilerek enerji verimliliğinin artırılması amaçlanmıştır. 0° den 180° dereceye kadar PV panelin hareket edebileceği bir düzenek kurulmuştur. Arduino programlama diliyle tüm yazılımlar yapılmıştır. ESP32 S3 kartındaki çift çekirdekli Xtensa LX7 işlemcine yazılan bu kodlar yüklenmiştir. BF1750 Işık Sensörü, VEML7700 Ortam ışık sensörü, LDR Işık sensörü kullanılarak güneşten gelen ışık şiddeti ölçülmeye çalışılmıştır. Düşük maliyetleri ile bilinen bu sensörler yardımıyla Denizli ili için farklı sıcaklık ve zeminlerde üretilen elektrik enerjisinin verimi araştırılmaktadır. Bu yöntem ile düşük maliyetli test düzeneği hazırlanarak Denizli ilimizdeki kurulacak olan güneş enerjisi santralleri için

ön fizibilite çalışması yapılması ve sonrasında doğru kurulumların yapılarak enerji üretimindeki verim artışları hedeflenmektedir.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1 Deney Düzeneği ve Detaylı Analizi

Şekil 5.1’de çift yüzlü fotovoltaik panel ile kurulan deney düzeneği gösterilmektedir. Deneyde kullanılacak olan fotovoltaik panel düzeneği hazırlandıktan sonra farklı zeminler kullanılarak PV panel gücündeki artış değerleri incelenmiştir. Buna göre çift yüzlü fotovoltaik panelin deney düzeneği; 37°48’55", 29° 05’ 24" Coğrafi koordinatında kurulmuştur.



Şekil 5.1: Çift yüzlü fotovoltaik panel ile kurulan deney düzeneği.

Solargis programı üzerinden alınan bilgilerle deneysel çalışma sonuçları arasında karşılaştırmalar yapılmıştır. Şekil 5.2’de koordinat sistemine göre Solargis programına yapılan girişleri ve deney düzeneğinin harita işaretli şekilde gösterilmektedir. Buna göre elde edilen verilerle gerçek zamanlı elde edilen verilerin tutarlı olup olmadığı tespit edilmeye çalışılmıştır.

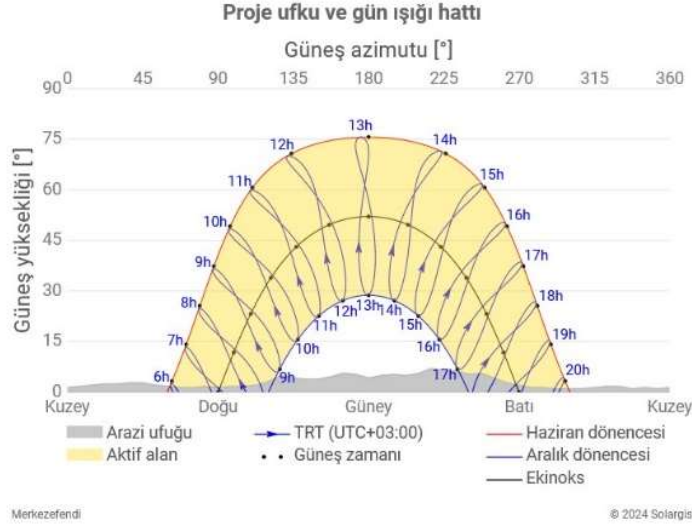
PROJE BİLGİSİ

Proje ismi	Merkezefendi
Adres	unnamed road, Merkezefendi, Denizli, Türkiye
Coğrafi koordinatlar	37°48'55", 029°05'24" 
Zaman dilimi	UTC+03, Europe/Istanbul [TRT]
Son değişiklik	19.05.2024
Yükseklik	323m 
Arazi örtüsü	Kentsel alanlar
Nüfus yoğunluğu	979sak./km ²
Arazi azimutu	düz
Arazi eğimi	1°



Şekil 5.2: Deneysel Çalışmanın Yapıldığı Yer ve Harita Gösterimi(Solargis Prospect, 2024).

Şekil 5.3'te gösterilen güneş azimut açısı ve güneş yüksekliği değerlerinin saatlere göre değişimini göstermektedir. Bu değerler kullanılarak farklı zemin ve sıcaklık koşullarında elde edilen veriler yorumlanmaktadır.



Şekil 5.3: Güneş azimutu ve güneş yüksekliği(Solargis Prospect, 2024).

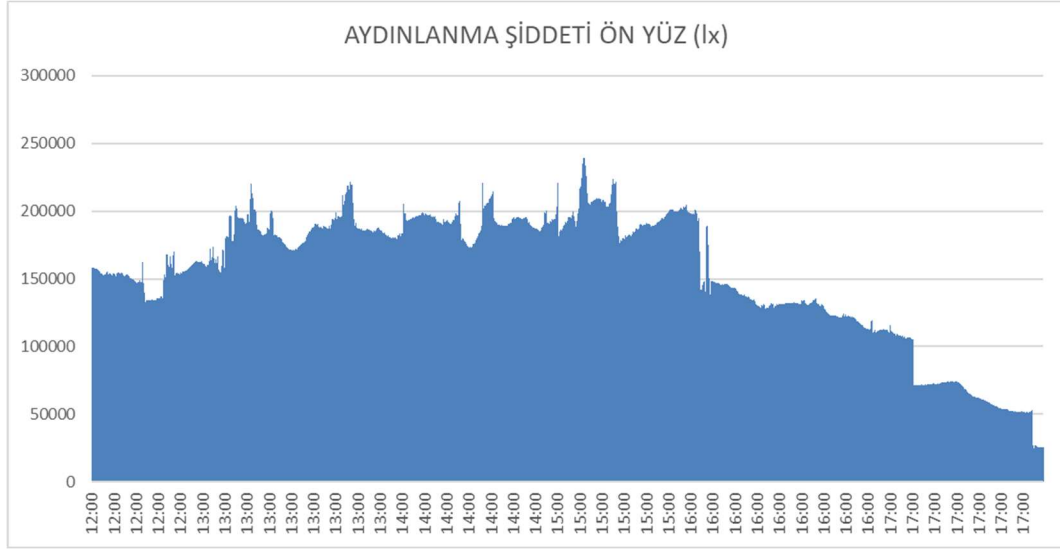
Tablo 5.1'de solargis programından alınan 12 aylık periyotta deneyin yapıldığı yerin saatlik Küresel Yatay Işınım değerleri gösterilmektedir. Bu değerler deney sonuçlarıyla karşılaştırılarak Temmuz 2024 tarihinde yapılan deneylerin sonuçları yıllık değerlere göre yorumlanacaktır.

Şekil 5.4'te 12:00 ile 17:00 arasındaki yapılan ölçümlerdeki panel sıcaklığı ile hava sıcaklığı verilerini göstermektedir. Panel sıcaklığını ölçmek için PT100 ve hava sıcaklığı da HDC1080 kullanılmıştır. Açısal derece 0° olduğunda ve güneş azimut açısı 180° ve güneş yüksekliği 90° yaklaştığında panel yüzeyindeki sıcaklığın en tepe noktası olan 138 °C'ye ulaştığı gözlemlenmiştir.

Tablo 5.1: Küresel yatay ışınım (GHI) - saatlik ortalamalar [Wh/m²].

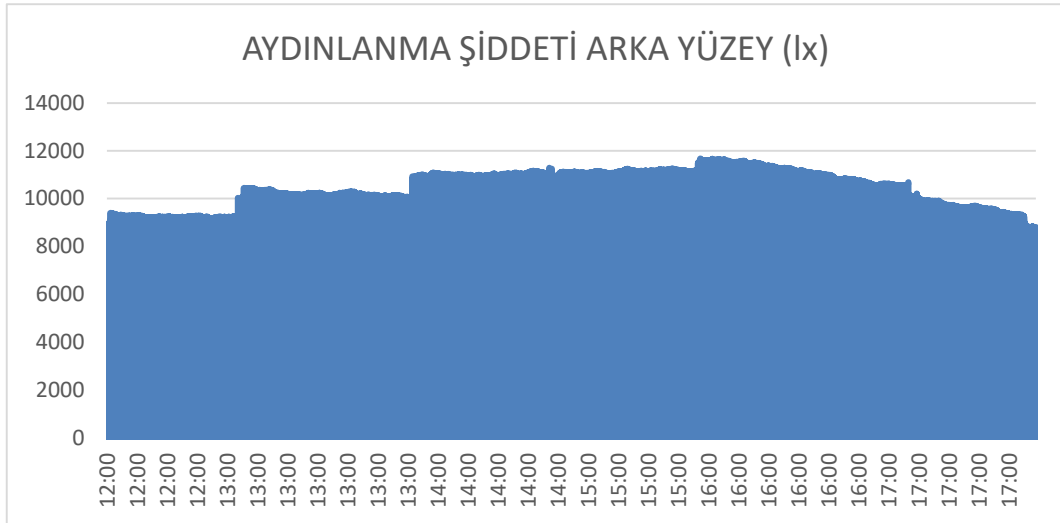
	Oca	Şub	Mar	Nis	May	Haz	Tem	Ağu	Eyl	Eki	Kas	Ara
0 - 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1 - 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2 - 3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3 - 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4 - 5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5 - 6	-	-	-	-	0	1	0	-	-	-	-	-
6 - 7	-	-	-	2	30	66	36	7	0	-	-	-
7 - 8	-	0	14	91	183	229	211	136	75	20	0	-
8 - 9	14	42	137	247	359	419	406	339	262	157	64	18
9 - 10	120	182	289	410	536	606	599	539	452	317	207	122
10 - 11	235	316	438	565	696	763	770	716	617	458	334	229
11 - 12	326	418	548	672	800	870	901	843	732	563	421	308
12 - 13	374	472	603	726	843	925	963	905	782	600	450	344
13 - 14	376	476	603	721	812	904	956	896	772	584	434	339
14 - 15	339	440	560	655	734	830	890	825	697	517	375	297
15 - 16	263	367	480	550	615	707	776	700	570	401	276	221
16 - 17	162	248	342	407	465	545	622	538	411	253	147	112
17 - 18	39	117	197	257	314	387	437	357	233	76	16	6
18 - 19	0	8	50	114	170	228	255	175	45	1	-	-
19 - 20	-	-	0	7	31	76	75	17	0	-	-	-
20 - 21	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-	-
21 - 22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22 - 23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23 - 24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Toplam	2248	3087	4260	5424	6587	7556	7899	6993	5648	3947	2724	1996

Şekil 5.5'te deneysel çalışma sırasında farklı açisal derecelerde elde edilen lüks değerleri gösterilmektedir. Bu ölçülen değerler incelendiğinde en yüksek lüks ölçüm değerinde panel üretim gücünün maksimum olduğu, en düşük lüks ölçüm değerlerinde de panel üretim gücünün giderek düştüğü gözlemlenmiştir.



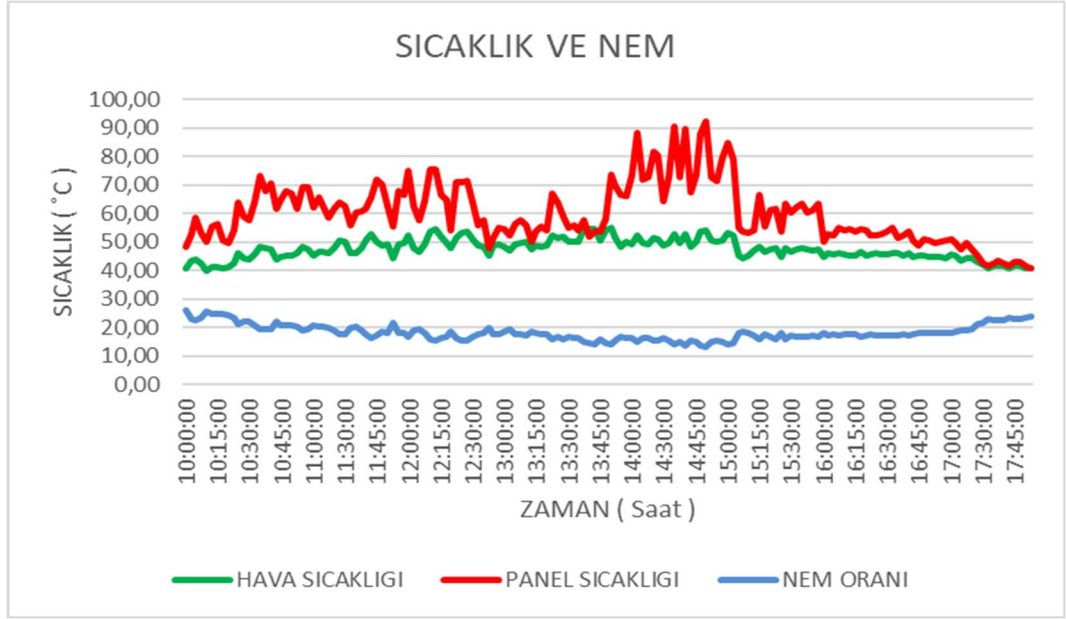
Şekil 5.5: Aydınlanma şiddeti ön yüz değerleri.

Şekil 5.6'da deneysel çalışmanın yapılmış olduğu koordinatlardaki yansıyan aydınlanma şiddeti değerleri gösterilmektedir.

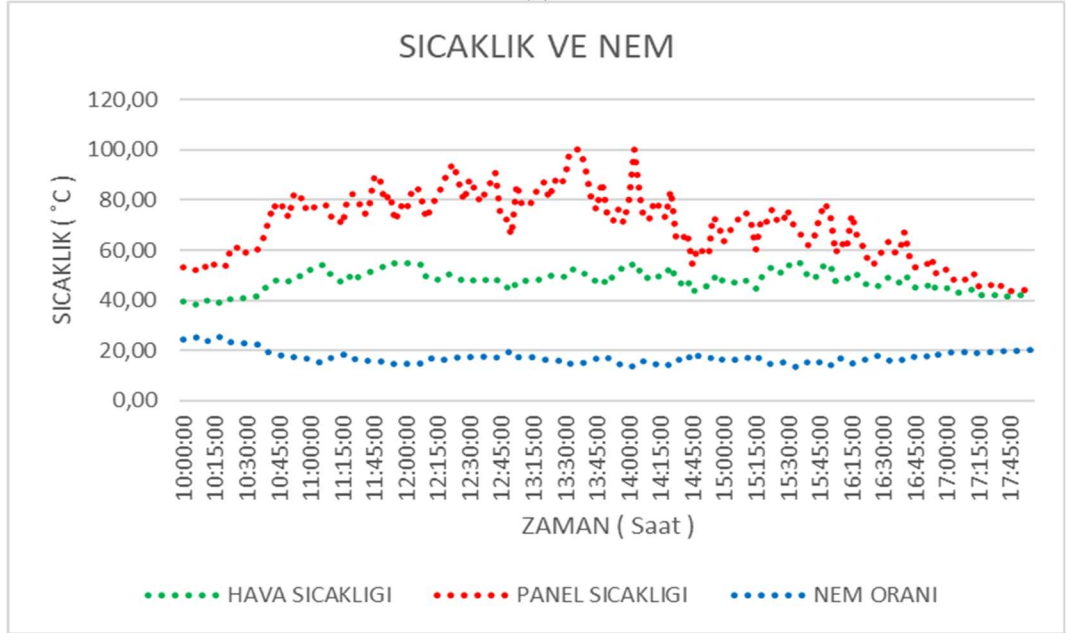


Şekil 5.6: Aydınlanma şiddeti arka yüzey değerleri.

Şekil 5.7'de çift yüzü fotovoltaik panelin ürettiği güç değerleri gösterilmektedir. Bu grafik incelendiğinde güneşin hareketine ve panel açısının değişimine göre güç değerlerinin değiştiği görülmektedir.



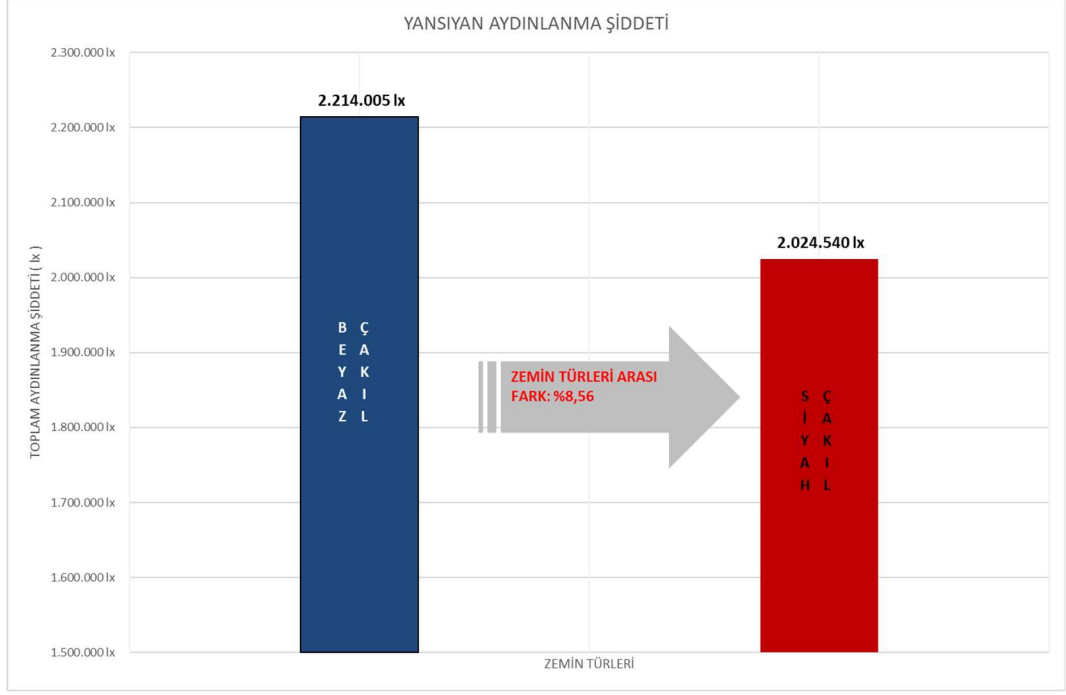
(a)



(b)

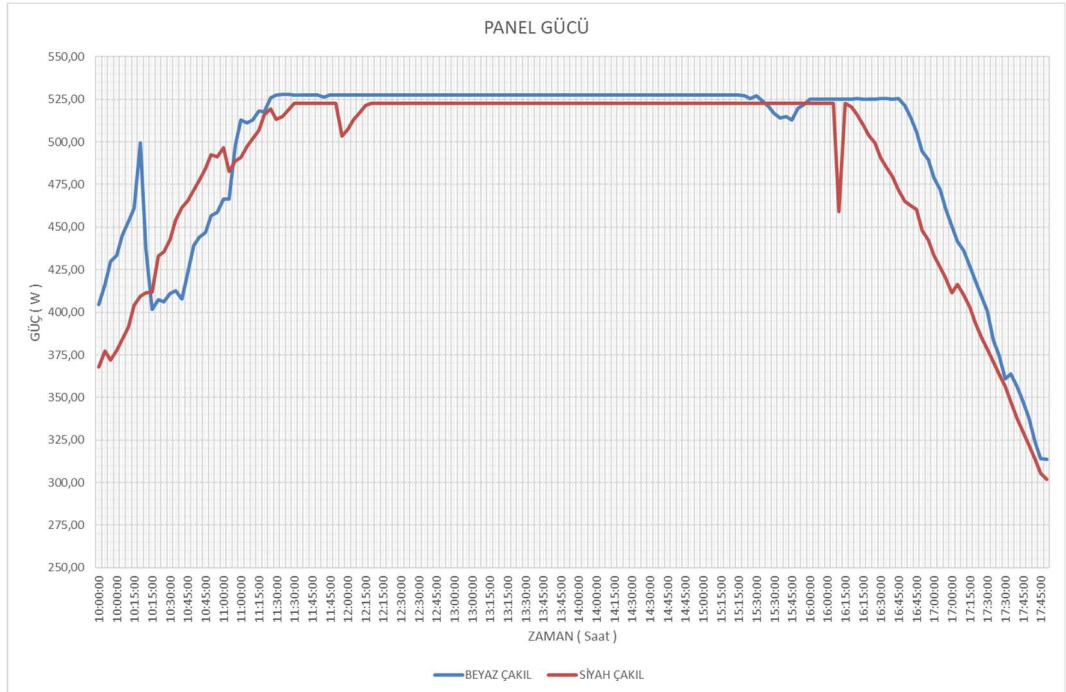
Şekil 5.9: Sıcaklık ve Nem değişimlerine ait grafik a) beyaz çakıl b) siyah çakıl.

Yansıyan aydınlanma şiddeti değerleri günlük olarak toplanmış ve günlük olarak aradaki değişimler Şekil 5.10'da gösterilmektedir. Deneysel çalışmalar sonunda elde edilen değerler zemin türleri arasında %8,56 fark olduğunu göstermektedir. Bunun sonucu olarakta panel güç üretim değerleri de değişim göstermektedir.



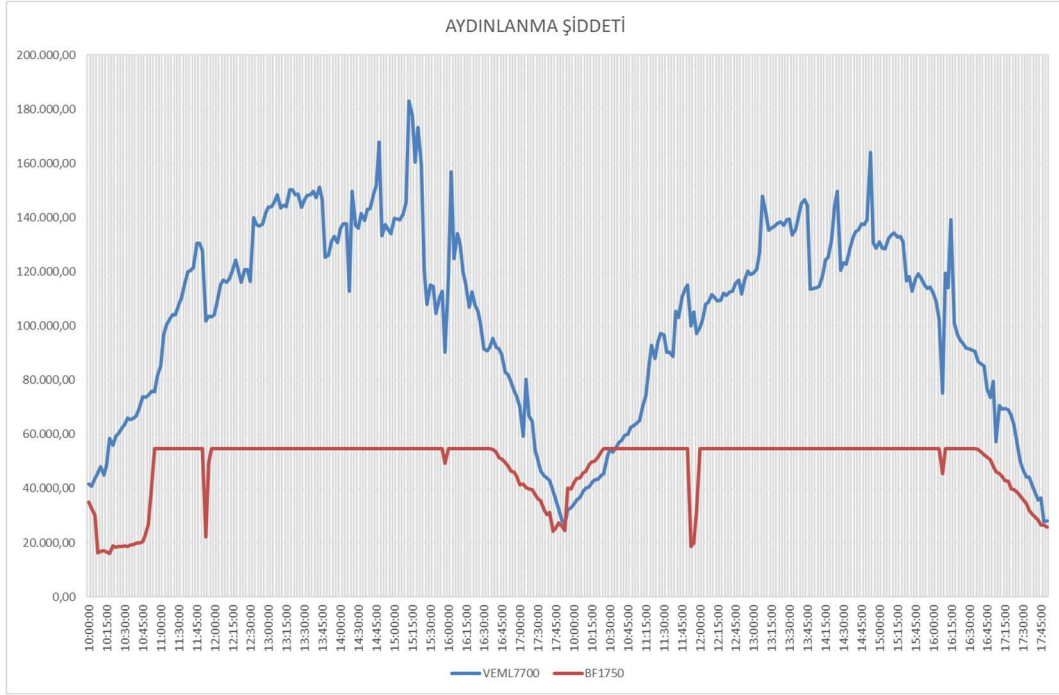
Şekil 5.10: Farklı yüzeylerde yansıyan aydınlanma şiddetine ait grafik.

Şekil 5.11’de farklı zemin türlerindeki üretilen güç değişimleri gösterilmektedir.



Şekil 5.11: Farklı zeminlerdeki panel gücü değişimine ait grafik.

Şekil 5.12’de panelin ön yüzüne gelen ve VEML7700 ile BF1750 sensör devreleri ile yapılan aydınlanma şiddeti ölçümleri bulunmaktadır.



Şekil 5.12: Farklı zeminlerde ölçülen aydınlatma şiddeti değişimine ait grafik.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında, Denizli ilinde belirlenen farklı zemin türleri (beyaz çakıl, siyah çakıl, toprak vb.) ve çeşitli sıcaklık koşulları altında çift yüzlü PV panellerin enerji üretim performansları karşılaştırılmıştır. Her zemin türü için panelin albedo etkisi (yüzeyden yansıyan ışık) ve çevresel sıcaklıkların panel verimliliğine etkisi detaylı olarak incelenmiştir. Çalışmada kullanılan veri toplama yöntemleri arasında yerinde ölçümler, sıcaklık ve ışınım sensörleri ile uzun süreli izleme sistemleri bulunmaktadır.

Bu çalışma sonucunda, zemin türünün ve sıcaklık değişimlerinin çift yüzlü PV panellerin performansında belirgin farklılıklar yarattığını ortaya koyduğu görülmektedir. Özellikle, yüksek albedo değerine sahip zeminlerin (örneğin, beyaz çakıl) panel verimliliğini artırdığı, buna karşılık düşük albedo değerine sahip zeminlerin (örneğin, siyah çakıl) ise verimliliği olumsuz etkilediği gözlemlenmiştir. Ayrıca, yüksek sıcaklıkların panel verimliliğini düşürdüğü, optimum performans için belirli bir sıcaklık aralığında çalışmanın önem taşıdığı belirlenmiştir.

Deneysel sonuçlarda elde edilen lüks değerleri (Michael ve diğ., 2020) $1 W/m^2 = 122 \pm 1 lx$ olarak düşünülürse ışınım değerlerine göre de tüm deneysel sonuçlar değerlendirilebilir.

Bu çalışma, çift yüzlü PV panellerin Denizli ilinde farklı zemin ve sıcaklık koşullarında nasıl performans gösterdiğine dair kapsamlı bir analiz sunarak, yenilenebilir enerji projeleri için önemli veriler sağlamaktadır. Elde edilen bulgular, PV sistemlerinin kurulumu ve optimizasyonu süreçlerinde dikkate alınarak, enerji üretim verimliliğinin artırılmasına katkı sağlayabilir. Bu bağlamda, araştırma sonuçları sadece Denizli ili için değil, benzer iklim ve zemin koşullarına sahip diğer bölgeler için de yol gösterici niteliktedir.

7. KAYNAKLAR

- Boğaziçi Üniversitesi İklim Değişikliği ve Politikaları Uygulama ve Araştırma Merkezi, “Albedo Nedir?”, (2024).
<https://Climatechange.Bogazici.Edu.Tr/Albedo-Nedir/>
- Albrecht, S., Saliba, M., Correa Baena, J. P., Lang, F., Kegelmann, L., Mews, M., Steier, L., Abate, A., Rappich, J., Korte, L., Schlatmann, R., Nazeeruddin, M. K., Hagfeldt, A., Grätzel, M., ve Rech, B. “Monolithic perovskite/silicon-heterojunction tandem solar cells processed at low temperature” *Energy and Environmental Science*, 9(1), (2016).
- Başak, Ö. D., ve Sazak, B. S., “Effect of developments on a PV system efficiency”, *Journal of Research in Engineering and Technology (IJRET)*, 3, 7–11, (2014).
- Baumann, T., Klenk, M., Keller, N., Nussbaumer, H., ve Zhaw, F. B., “Illumination Homogeneity Of Bifacial Systems – Outdoor Measurements With Systematically Varied Installation Conditions”. (2017).
- Bayyığıt, A., Çinici, O. K., ve Acır, A., “Tek Yüzeyle ve Çift Yüzeyle Fotovoltaik Panellerin Performans Analizi”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 11(2), (2023).
- Bera, D., Qian, L., Tseng, T. K., ve Holloway, P. H., “Quantum Dots and Their Multimodal Applications: A Review. Materials”, Vol. 3, Pages:2260-2345, 3(4), (2010).
- Brain O’Regan, ve Michael Gratzel. “A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films”, (1991).
- Bush, K. A., Palmstrom, A. F., Yu, Z. J., Boccard, M., Cheacharoen, R., Mailoa, J. P., McMeekin, D. P., Hoyer, R. L. Z., Bailie, C. D., Leijtens, T., Peters, I. M., Minichetti, M. C., Rolston, N., Prasanna, R., Sofia, S., Harwood, D., Ma, W., Moghadam, F., Snaith, H. J., ve McGehee, M. D. “23.6%-efficient monolithic perovskite/silicon tandem solar cells with improved stability”, *Nature Energy*, 2(4), (2017).
- Chiodetti, M., Lindsay, A., Dupeyrat, P., Binesti, D., Lutun, E., Radouane, K., ve Mousel, S., “PV bifacial yield simulation with a variable albedo model”, *32nd EU PVSEC*, (2020).

- De Barros, R. C., S Callegari, J. M., Mendonça, D. C., S Amorim, W. C., Silva H A Pereira, M. P., Silva, M. P., Pereira, H. A., Cassio de Barros, R., Marcus Soares Callegari, J., Caires Silva Amorim, W., Pereira Silva, M., ve Augusto Pereira, H., “Low-Cost Solar Irradiance Meter using LDR Sensors”, (2018).
- Aslan,S., İyikul, E., ve Özenbaş, M., “Dünyada ve Türkiye’de Güneş Enerjisi Sektörü”, (2024).
<https://www.pwc.com.tr/tr/sektorler/enerji/yayinlar/2024/pdf/dunyada-ve-turkiyede-gunes-enerjisi-sektoru.pdf>
- El-Ahmar, M., Ahmed, A.-H., Mohamed Hemeida, A., El-Ahmar, M. H., El-Sayed, A.-H. M., ve Hemeida, A. M. (n.d.), “Mathematical modeling of photovoltaic module and evaluate the effect of varoius paramenters on its performance”, *Eighteenth International Middle East Power Systems Conference*, (2016)
- GD Solar Energy. “GD 72-182M10-BF Transparent”, (Erişim Tarihi:08/05/2024), (2024).
<https://gdsolarenerji.com/hizmet-icerik/gd-72-18m10-bf-transparent-20>
- Grätzel, M., “Dye-sensitized solar cells. In Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews”, Vol. 4, Issue 2, (2003).
- Green, M. A., Ho-Baillie, A., Snaith, H. J., “The emergence of perovskite solar cells. In Nature Photonics” Vol. 8, Issue 7, (2014).
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, “Yenilenebilir Kaynaklar: Güneş”, (2024).
<https://Enerji.Gov.Tr/Eigm-Yenilenebilir-Enerji-Kaynaklar-Gunes>.
- Jeong, M., Choi, I. W., Go, E. M., Cho, Y., Kim, M., Lee, B., Jeong, S., Jo, Y., Choi, H. W., Lee, J., Bae, J. H., Kwak, S. K., Kim, D. S., ve Yang, C., “Stable perovskite solar cells with efficiency exceeding 24.8% and 0.3-V voltage loss”, *Science*, 369(6511), (2020).
- Kılıcı, O.,ve Koklu, M., “Bifacial and Monofacial Photovoltaic Module with Tracker System Analysis”, *In Journal of Amasya University the Institute of Sciences and Technology*, Vol.1, Issue:2, (2020).
- Kojima, A., Teshima, K., Shirai, Y., ve Miyasaka, T., “Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells”, *Journal of the American Chemical Society*, 131(17), (2009).
- Liu Feng, Zhu Jun, Wei Junfeng, Li Yi, Hu Linhua, ve Dai Songyuan., “Quantum Dot-Sensitized Solar Cells. Progress in Chemistry”, 25(0203), 409–418, (2013).

- Machkih, K., Oubaki, R., ve Makha, M., “A Review of CIGS Thin Film Semiconductor Deposition via Sputtering and Thermal Evaporation for Solar Cell Applications”, (2024).
- Merodio, P., Martínez-Moreno, F., Moretón, R., ve Lorenzo, E., “Albedo measurements and energy yield estimation uncertainty for bifacial photovoltaic systems”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 31(11). (2023).
- Michael, P. R., Johnston, D. E., ve Moreno, W., “A conversion guide: Solar irradiance and lux illuminance”, *Journal of Measurements in Engineering*, 8(4), 153–166, (2020).
- Nair, R., Poulouse, A. C., Nagaoka, Y., Yoshida, Y., Maekawa, T., ve Kumar, D. S., “Uptake of FITC labeled silica nanoparticles and quantum dots by rice seedlings: Effects on seed germination and their potential as biolabels for plants”, *Journal of Fluorescence*, 21(6), 2057–2068, (2011).
- Riedel-Lyngskaer, N., Ribaconka, M., Pó, M., Thorseth, A., Thorsteinsson, S., Dam-Hansen, C., ve Jakobsen, M. L., “The effect of spectral albedo in bifacial photovoltaic performance”, (2021).
- ROHM Co., Ltd., “Ambient Light Sensor IC Series Digital 16bit Serial Output Type Ambient Light Sensor IC BH1750FVI (11046EDT01)”, (2011).
<https://www.mouser.com/datasheet/2/348/bh1750fvi-e-186247.pdf>
- Russell, T. C. R., Saive, R., Augusto, A., Bowden, S. G., ve Atwater, H. A., “The Influence of Spectral Albedo on Bifacial Solar Cells: A Theoretical and Experimental Study”, *IEEE Journal of Photovoltaics*, 7(6), (2017).
- Schmid, A., Dülger, G., Baraah, G., Kräling, U., ve Ise, F., “IV Measurement of Bifacial Modules: Bifacial vs. Monofacial Illumination”, *33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, September, (2017).
- Şentürk, A., Tulga Coşkun, A., ve Tarihi, G., “Güneş enerjisi sistemleri için çevresel parametre ölçüm cihazının tasarlanması”, *Araştırma Makalesi BAUN Fen Bil. Enst. Dergisi*, 25(1), 263–278, (2023).
- Singh, J. P., Aberle, A. G., ve Walsh, T. M., “Electrical characterization method for bifacial photovoltaic modules”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 127, (2014).
- Singh, J. P., Walsh, T. M., ve Aberle, A. G., “A new method to characterize bifacial solar cells”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 22(8), (2014).
- Solargis Prospect, (2024).

- <https://apps.Solargis.Com/Prospect/>
- Texas Instruments Incorporated., “HDC1080 Low Power, High Accuracy Digital Humidity Sensor with Temperature Sensor (SNAS672A)”, (2016).
https://www.ti.com/lit/ds/symlink/hdc1080.pdf?ts=1724825611692&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.mouser.de%252F
- Tonita, E. M., Valdivia, C. E., Russell, A. C. J., Martinez-Szewczyk, M., Bertoni, M. I., ve Hinzer, K., “A general illumination method to predict bifacial photovoltaic system performance”, Vol. 7, Issue 1, (2023).
- Vishay Intertechnology, “High Accuracy Ambient Light Sensor With I2C Interface (91000)”, (2024).
<https://www.vishay.com/docs/84286/veml7700.pdf>
- Vogt, M., Gewohn, T., Bothe, K., Schinke, C., ve Brendel, R., “Impact Of Using Spectrally Resolved Ground Albedo Data For Performance Simulations Of Bifacial Modules”, *European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, (2018).
- Wang, P., Zakeeruddin, S. M., Moser, J. E., Nazeeruddin, M. K., Sekiguchi, T., ve Grätzel, M., “A stable quasi-solid-state dye-sensitized solar cell with an amphiphilic ruthenium sensitizer and polymer gel electrolyte. *Nature Materials*”, 2(6), (2003).
- Yang, W. S., Noh, J. H., Jeon, N. J., Kim, Y. C., Ryu, S., Seo, J., ve Seok, S. I., “High-performance photovoltaic perovskite layers fabricated through intramolecular Exchange”, *Science*, 348(6240), (2015).
- Yella, A., Lee, H. W., Tsao, H. N., Yi, C., Chandiran, A. K., Nazeeruddin, M. K., Diau, E. W. G., Yeh, C. Y., Zakeeruddin, S. M., ve Grätzel, M., “Porphyrin-sensitized solar cells with cobalt (II/III)-based redox electrolyte exceed 12 percent efficiency”, *Science*, 334(6056), (2011).
- Yu, J., Zheng, Y., ve Huang, J., “Towards High Performance Organic Photovoltaic Cells: A Review of Recent Development in Organic Photovoltaics. *Polymers*”, Vol. 6, Pages 2473-2509, 6(9), 2473–2509, (2014).
- Yusufoglu, U. A., Pletzer, T. M., Koduvelikulathu, L. J., Comparotto, C., Kopecek, R., ve Kurz, H., “Analysis of the annual performance of bifacial modules and optimization methods”, *IEEE Journal of Photovoltaics*, 5(1), 320–328, (2015).