

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DOĞU KARADENİZ BÖLGESİNDE BULUNAN YÖRESEL ÜRÜNLERDEN
ELDE EDİLEN BOYALAR İLE BOYA DUYARLI GÜNEŞ PİLİ TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Akın ÖZDOĞAN

**MART 2025
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DOĞU KARADENİZ BÖLGESİNDE BULUNAN YÖRESEL ÜRÜNLERDEN
ELDE EDİLEN BOYALAR İLE BOYA DUYARLI GÜNEŞ PİLİ TASARIMI**

Akın ÖZDOĞAN

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"MAKİNA YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 20 /02 /2025

Tezin Savunma Tarihi : 26 /03 /2025

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Tülin BALI

İkinci Danışmanı : Dr. Hüseyin BAŞ

Trabzon 2025

ÖNSÖZ

Güneş enerjisi, dünyanın en yaygın ve sürdürülebilir enerji kaynaklarından biri olup enerji üretiminde önemli bir yer tutmaktadır. Yenilenebilir enerji alanındaki çalışmalar, çevresel etkileri azaltmayı ve maliyetleri düşürmeyi hedeflemekte; bu doğrultuda çeşitli alternatif çözümler geliştirilmektedir. Güneş enerjisinin verimli kullanımı için geliştirilen teknolojilerden biri de düşük maliyetli ve çevre dostu boya duyarlı güneş pilleridir (BDGP).

Bu tez çalışmasında, doğal boyaların boya duyarlı güneş pili uygulamalarındaki fotovoltaiik performansı araştırılmaktadır. Türkiye'nin Doğu Karadeniz Bölgesi'ne özgü kokulu kara üzüm, karayemiş ve likarba (mavi yemiş) meyvelerinden elde edilen doğal boyaların BDGP üretimindeki etkinliği incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, mevcut ticari boyaların yerine kullanılabilecek daha ekonomik, çevre dostu ve kolayca temin edilebilen yerel kaynaklardan elde edilen doğal boyaların potansiyelini ortaya koymaktır.

Yüksek lisans tezi olarak Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde yürütülen bu çalışma, yüksek lisans sürecimin her anında bana yol gösteren değerli danışmanım Doç. Dr. Cevdet DEMİRTAŞ'a ithaf edilmiştir. Kendisi yalnızca bir danışman değil, aynı zamanda bir baba şefkatiyle yanımda bulunmuş ve yolumu aydınlatmıştır. Kendisini rahmetle anıyor ve minnetlerimi sunuyorum. Danışmanımın vefatının ardından, bana her türlü desteği sunarak bu zorlu süreçte yanımda olan ve danışmanım olarak bana rehberlik eden Prof. Dr. Tülin BALI'ye; projenin tamamlanmasında maddi destek sağlayan KTÜ BAP Birimi'ne; deneylerin gerçekleştirilmesi için her türlü imkânı sunan Prof. Dr. Zekeriya BIYIKLIOĞLU'na; deneylerin her aşamasında bana rehberlik eden ikinci danışmanım Dr. Hüseyin BAŞ'a; laboratuvar olanaklarını sağlayarak deneylerin başarıyla tamamlanmasına katkı sunan Prof. Dr. İsmail POLAT'a; bana bu süreçte cesaret veren Arş. Gör. Ömer ÖKSÜZ ile Yük. Kim. Çağla AKKOL'a; süreç boyunca maddi ve manevi desteğini benden esirgemeyen canım aileme ve başta Mak. Müh. Halit Kerem KINALI olmak üzere sürecin her anında yanımda olan arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Akın Özdoğan

Trabzon 2025

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum "Doğu Karadeniz Bölgesinde Bulunan Yöresel Ürünlerden Elde Edilen Boyalar ile Boya Duyarlı Güneş Pili Tasarımı" başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Tülin BALI'nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

26/03/2025

Akın ÖZDOĞAN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XII
1.GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Güneş Pilleri	2
1.2.1. Birinci Nesil Güneş Pilleri.....	2
1.2.2. İkinci Nesil Güneş Pilleri	4
1.2.3. Üçüncü Nesil Güneş Pilleri	6
1.3. Boya Duyarlı Güneş Pilleri.....	7
1.3.1. Boya Duyarlı Güneş Pillerinin Bileşenleri	8
1.3.2. Boya Duyarlı Güneş Pillerinin Çalışma Prensipleri	11
1.3.3. Boya Duyarlı Güneş Pillerinin Performans Değerlendirme Parametreleri	14
1.4. Literatür Araştırması.....	17
1.5. Tezin Amacı ve Kapsamı	22
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	23
2.1. Deneylerde Kullanılan Materyaller	23
2.2. Deneylerde Kullanılan Ölçüm Cihazları	24
2.2.1. X-Işınım Kırınım Cihazı (XRD)	24
2.2.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	25
2.2.3. Güneş Simülatörü	26
2.2.4. Ultraviyole-Görünür Alan Spektroskopisi (UV-Vis)	26
2.3. Deneylerde Kullanılan Organik Boyalar	27
2.3.1. Likarba (Mavi Yemiş)	27
2.3.2. Kokulu Kara Üzüm.....	28
2.3.3. Karayemiş.....	28

2.4. Organik Güneş Pili Numunelerinin Hazırlanması.....	29
2.4.1. ITO Camların Temizlenmesi.....	29
2.4.2. ITO Camların İletken Tarafının Tespiti ve Yüzeye Sabitlenmesi.....	30
2.4.3. Titanyum Dioksit Macununun Hazırlanması	30
2.4.4. Macunun Cama Uygulanması ve Camın Isıtılması	31
2.4.5. Hazırlanan Camların Analizleri.....	32
2.4.6. Boyaların Hazırlanması ve Cama Uygulanması.....	32
2.4.7. Katot Kısımının Hazırlanması	35
2.4.8. Elektrolitin Hazırlanması.....	36
2.4.9. Camların Birleştirilmesi ve BDGP'nin Oluşturulması.....	36
3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	39
3.1. Titanyum Dioksit Tozunun SEM Analizi.....	39
3.2. Titanyum Dioksit Tozunun EDS Analizi	40
3.3. Titanyum Dioksit Tozunun XRD Analizi	42
3.4. Boyanın UV-Vis Analizi	43
3.5. Hazırlanan Boya Duyarlı Güneş Pillerinin Fotovoltaik Performansları.....	45
3.5.1. N719 Referans Boyalı BDGP'nin Karakterizasyonu	45
3.5.2. Likarba Boyalı BDGP'nin N719 ile Karşılaştırmalı Karakterizasyonu	47
3.5.3. Kokulu Üzüm Boyalı BDGP'nin N719 ile Karşılaştırmalı Karakterizasyonu..	50
3.5.4. Karayemiş Boyalı BDGP'nin N719 ile Karşılaştırmalı Karakterizasyonu	52
3.5.5. Hazırlanan Doğal BDGP'nin Karşılaştırmalı Karakterizasyonu	54
3.5.6. N719 ve Organik BDGP'nin Fotovoltaik Parametrelerinin Karşılaştırılması...	56
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	58
5. KAYNAKLAR.....	59
ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

DOĞU KARADENİZ BÖLGESİNDE BULUNAN YÖRESEL ÜRÜNLERDEN ELDE EDİLEN BOYALAR İLE BOYA DUYARLI GÜNEŞ PİLİ TASARIMI

Akın ÖZDOĞAN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Tülin BALI
2025, 65 Sayfa

Güneş enerjisi, sürdürülebilir ve temiz bir enerji kaynağı olarak büyük önem taşımaktadır. Bu alanda geliştirilen güneş pilleri, geleneksel silisyum bazlı yapılara alternatif olarak farklı teknolojilerle üretilmektedir. Boya Duyarlı Güneş Pilleri (BDGP), düşük maliyetleri ve kolay üretimleri sayesinde yenilikçi çözümler arasında öne çıkmaktadır. Bu tez çalışmasında, BDGP’de kullanılan ticari N719 boyasına alternatif olarak, Doğu Karadeniz Bölgesi’ne özgü kokulu kara üzüm, karayemiş ve likarba meyvelerinden elde edilen doğal boyaların fotovoltaiik performansı incelenmiştir. Çalışma kapsamında, doğal boyaların ekstraksiyonu, TiO₂ film kaplamaları ve BDGP montaj süreçleri gerçekleştirilmiş, elde edilen pillerin Jsc, Voc, doldurma faktörü ve verimlilik değerleri belirlenmiştir. Verilerin analizi için Excel ve SigmaPlot programları kullanılmış, ayrıca yapısal karakterizasyon için SEM, XRD ve EDS analizlerinden yararlanılmıştır. Sonuçlar, doğal boyaların BDGP’de kullanılabilir olduğunu ancak ticari boyaya kıyasla daha düşük verim sunduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, likarba boyasının diğer doğal boyalara göre daha yüksek performans sağladığı belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, doğal boyaların güneş pillerinde sürdürülebilir ve çevre dostu alternatifler olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Boya duyarlı güneş pili, Doğal Boyar Madde, fotovoltaiik karakterizasyon, Karayemiş, Kokulu kara üzüm, Likarba

Master Thesis

SUMMARY

DESIGN OF DYE-SENSITIZED SOLAR CELLS USING DYES DERIVED FROM LOCAL PRODUCTS OF THE EASTERN BLACK SEA REGION

Akın ÖZDOĞAN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Tülin BALI
2025, 65 Pages

Solar energy is a highly significant sustainable and clean energy source. Solar cells developed in this field employ various technologies as alternatives to conventional silicon-based structures. Among these, Dye-Sensitized Solar Cells (DSSCs) stand out due to their low production cost and ease of fabrication. This study investigates the photovoltaic performance of natural dyes extracted from fragrant black grape, black cherry laurel, and likarba, which are indigenous to the Eastern Black Sea region, as potential alternatives to the commercial N719 dye in DSSCs. The research encompasses natural dye extraction, TiO₂ thin film deposition, and DSSC assembly, followed by the determination of key photovoltaic parameters, including short-circuit current density, open-circuit voltage, fill factor, and power conversion efficiency. Data analysis was conducted using Excel and SigmaPlot, while scanning electron microscopy, X-ray diffraction, and energy-dispersive X-ray spectroscopy were utilized for structural characterization. The findings indicate that natural dyes can be employed in DSSCs; however, their efficiency remains lower compared to commercial dyes. Nevertheless, among the natural dyes tested, fragrant likarba demonstrated superior photovoltaic performance. These results suggest that natural dyes hold promise as sustainable and environmentally friendly alternatives for DSSC applications.

Key Words: Dye-Sensitized Solar Cell, Natural Dye, Photovoltaic Characterization, Black cherry laurel, Black grape, Likarba

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.	Monokristal güneş pili (sağ) ve polikristal güneş pili (sol).....	4
Şekil 2.	Boya duyarlı güneş pillerinin bileşeni katmanlarının şematik gösterimi	11
Şekil 3.	Boya duyarlı güneş pilinin çalışma prensibinin şematik gösterimi.....	12
Şekil 4.	Bir BDGP'nin J-V özellikleri	14
Şekil 5.	Deneylerde kullanılan X-Işınımları Kırınım Cihazı (XRD).....	25
Şekil 6.	Deneylerde kullanılan Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	25
Şekil 7.	Hazırlanan güneş pilinin ölçümünün yapıldığı solar simülatör.....	26
Şekil 8.	Deneylerde Kullanılan Ultraviyole-Görünür Alan Spektroskopisi	27
Şekil 9.	Likarba (Maviyemiş) meyvesi	27
Şekil 10.	Kokulu Kara Üzüm meyvesi	28
Şekil 11.	Karayemiş meyvesi	29
Şekil 12.	TiO ₂ macununun uygulandığı ITO camlar (Boyaya daldırılmadan önce) ...	31
Şekil 13.	Kokulu kara üzüm (a) ve karayemiş (b) boyasının eldesi	34
Şekil 14.	Camın kokulu üzüm,karayemiş,likarba, N719 boyasına daldırılması	34
Şekil 15.	Boyaya daldırılıp 24 saat bekletildikten sonra ITO camlar.....	34
Şekil 16.	Delinen ve platin kaplanan camların ısıtılması, hazır hale getirilmesi.....	35
Şekil 17.	Parafilm kesilmesi, ısıtılması, elektrolitin pile enjekte edilmesi.....	38
Şekil 18.	Boya duyarlı güneş pilinin son hali	38
Şekil 19.	TiO ₂ dağılımının farklı yakınlaştırma seviyelerinde SEM görüntüleri	39
Şekil 20.	EDX element haritalaması	41
Şekil 21.	Toplam Spektrum (Map Sum Spectrum) analizi.....	41
Şekil 22.	TiO ₂ difraktogramının XRD analizi	42
Şekil 23.	Likarbanın UV-Vis analizi	45
Şekil 24.	N719 Maddesinin J-V eğrisi	46
Şekil 25.	N719 Maddesinin P-V eğrisi	47
Şekil 26.	Likarba ve N719 Maddesinin J-V eğrileri.....	49
Şekil 27.	Likarba ve N719 Maddesinin P-V eğrileri	49
Şekil 28.	Kokulu Kara Üzüm ve N719 Maddesinin J-V eğrileri.....	51
Şekil 29.	Kokulu Kara Üzüm ve N719 Maddesinin P-V eğrileri.....	52
Şekil 30.	Karayemiş ve N719 Maddesinin J-V eğrileri.....	53

Şekil 31.	Karayemiş ve N719 Maddesinin P-V eğrileri	54
Şekil 32.	Likarba, kokulu kara üzüm ve karayemişin J-V eğrileri	55
Şekil 33.	Likarba, kokulu kara üzüm ve karayemişin P-V eğrileri	56



TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.	Monokristal ve polikristal güneş pillerinin karşılaştırılması.....	4
Tablo 2.	Farklı güneş pili çeşitlerinin doldurma faktörleri.....	16
Tablo 3.	Bazı organik boya kullanılan BDGP'nin fotovoltaiik parametreleri.....	19
Tablo 4.	N719 boyası ve organik boyaların fotovoltaiik parametreleri	56



SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AM 1.5	: Standart test koşullarında, güneş ışığı spektrumunun 1.5 atmosferdeki hali (Air Mass 1.5 Spectrum)
a-Si	: Amorf Silisyum (Amorphous Silicon)
at%	: Atomik Yüzde (Atomic Percentage)
BDGP	: Boya Duyarlı Güneş Pili
CdTe	: Kadmiyum Tellür (Cadmium Telluride)
CIS	: Bakır İndiyum Silisyum (Copper Indium Selenide)
cps	: Saniye başına sayım (Counts per second)
DSSC	: Dye-Sensitized Solar Cell
EDS	: Enerji Dağıtıcı X-Işını Spektroskopisi (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy)
eV	: Elektronvolt
FTO	: Florür katkılı Kalay Oksit
FF	: Doldurma Faktörü (Fill Factor)
Ga	: Galyum
h ν	: Foton enerjisi
HOMO	: En Yüksek Dolu Moleküler Orbital (Highest Occupied Molecular Orbital)
I ⁻	: İyot iyonu
I ₃ ⁻	: Triiyodür iyonu
ITO	: İndiyum katkılı Kalay Oksit
J _{max}	: Maksimum Akım Yoğunluğu (Maximum Current Density)
J _{sc}	: Kısa Devre Akım Yoğunluğu (Short-Circuit Current Density)
LUMO	: En Düşük Boş Moleküler Orbital (Lowest Unoccupied Molecular Orbital)
mA/cm ²	: Santimetrekare başına miliamper
mW/cm ²	: Santimetrekare başına milliwatt
N719	: Rutenyum bazlı bir duyarlılaştırıcı boya
P _{max}	: Maksimum Güç
SEM	: Tarama Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscopy)
S	: Boya Molekülü
S*	: Uyarılmış Boya Molekülü

TiO ₂	: Titanyum Dioksit
V _{OC}	: Açık Devre Gerilimi
vd.	: Ve diğerleri
XRD	: X-Işını Kırınımı (X-Ray Diffraction)
°	: Derece
η	: Verimlilik



1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Günümüzde fosil yakıtların çevresel etkileri ve tükenebilir olmaları nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarına olan talep giderek artmaktadır. Bu durum, sürdürülebilir enerji teknolojilerinin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Güneş enerjisi, temiz ve tükenmez bir kaynak olarak öne çıkmakta, bu alanda yapılan çalışmalar ise verimliliği artırmaya yönelik teknolojik gelişmelere odaklanmaktadır. Geleneksel silikon bazlı güneş pillerine alternatif olarak geliştirilen boya duyarlı güneş pilleri (BDGP), düşük maliyetli, esnek ve çevre dostu yapılarıyla büyük ilgi görmektedir (Grätzel, 2003).

Bu çalışmanın temel amacı, BDGP'lerin performansını artırmak için Doğu Karadeniz'de bulunan meyvelerden elde edilen farklı boyar maddelerin fotovoltaiik etkinliğini araştırmaktır. Yaygın olarak kullanılan sentetik boyar madde N719 ile, yerel kaynaklardan elde edilen kokulu kara üzüm, karayemiş ve likarba meyvelerinden izole edilen doğal boyar maddelerin BDGP verimliliği üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. Doğal boyar maddeler, sürdürülebilirlik ve düşük üretim maliyetleri açısından önemli avantajlar sunarken, bu çalışmada bu maddelerin elektriksel performans parametreleri detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Ayrıca, BDGP yapımında kullanılan TiO_2 fotoanotların üretim sürecinde, geleneksel yöntemlere kıyasla daha ekonomik ve çevre dostu alternatif bağlayıcıların etkinliği değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmalar kapsamında, farklı boyar maddelerle üretilen hücrelerin akım-gerilim (I-V) ve güç-gerilim (P-V) eğrileri ölçülmüş, açık devre gerilimi (Voc), kısa devre akım yoğunluğu (Jsc), dolum faktörü (FF) ve enerji dönüşüm verimliliği (η) gibi temel parametreler analiz edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, doğal boyar maddelerin BDGP uygulamalarında umut vaat ettiğini göstermekle birlikte, sentetik boyalara kıyasla verimlilik açısından bazı sınırlamalar taşıdığını ortaya koymuştur. Bu bulgular, literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırılarak değerlendirilmiş ve doğal boyaların optimizasyonu için gelecekte yapılacak araştırmalara yol gösterici olabilecek öneriler sunulmuştur (Hagfeldt & Grätzel, 2000; Zhang vd., 2013).

Bu tez çalışması, BDGP teknolojisinde doğal boyar maddelerin kullanım potansiyelini araştıran akademik çalışmalara katkı sağlamayı hedeflemektedir. Deneysel bulgular, sürdürülebilir enerji sistemlerinin geliştirilmesine yönelik önemli veriler sunmakta ve

gelecekteki BDGP tasarımları için referans teşkil etmektedir.

1.2. Güneş Pilleri

Güneş pilleri, bir diğer adıyla fotovoltaik hücreler, fotovoltaik etkiyi kullanarak ışık enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren cihazlardır. Yarı iletken malzemelerden oluşan bu yapılar, güneş ışığından enerji elde edilmesini sağlar. Fotovoltaik cihazlar ışığa maruz kaldıklarında elektriksel özellikleri (akım, gerilim, direnç gibi) değişiklik gösterir ve bu durum, enerji üretiminin temel mekanizmasını oluşturur. Söz konusu mekanizma, cihazların enerji dönüşüm potansiyelini artırmaya yönelik araştırmaların da temelini oluşturmaktadır (Bagher vd., 2015).

Bu bağlamda, enerji dönüşüm potansiyeli nedeniyle fotovoltaik sistemler günümüzde sürekli geliştirilmektedir. Bu cihazların verimliliğini artırmak ve üretim maliyetlerini düşürmek amacıyla yapılan yenilikler, teknolojik sınıflandırmaların oluşmasına zemin hazırlamıştır. Malzeme teknolojilerindeki ilerlemeler ve bu sistemlerin uygulama alanları, verimlilik ve maliyet dengesini optimize etme çabalarıyla doğrudan ilişkilidir (Chowdhury vd., 2020).

Fotovoltaik sistemler; birinci nesil, ikinci nesil ve üçüncü nesil olmak üzere üç kategoriye ayrılmaktadır. Birinci nesil cihazlar, yüksek verimlilik sunmalarına karşın, karmaşık üretim süreçleri nedeniyle maliyetli bir yapıya sahiptir. İkinci nesil hücreler, daha düşük maliyet avantajı sunmakla birlikte genellikle sınırlı bir verimlilik sergiler. Üçüncü nesil teknolojiler ise düşük maliyetle yüksek verimlilik sunmayı amaçlayarak bu alanda büyük bir potansiyel taşımaktadır (Green, 2006; Bhogaita vd., 2016).

1.2.1. Birinci Nesil Güneş Pilleri

Kristal silikon teknolojisine dayanan birinci nesil güneş pilleri, pazar payının yaklaşık %95'ini oluşturmaktadır. Silikonun doğada bol miktarda bulunması, toksik olmaması ve kimyasal stabilitesi gibi avantajları, bu pillerin yaygın tercih edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca, silikonun bant aralığı, güneşten gelen fotonları etkin bir şekilde toplayarak maksimum verimlilik elde edilmesine olanak tanır (Metz vd., 2017; Battaglia vd., 2016).

Birinci nesil güneş pilleri, monokristal silisyum ve polikristal silisyum olmak üzere

ikiye ayrılmaktadır (Toscano, 2023).

a. Monokristal Güneş Pilleri

Monokristal güneş pilleri, en yüksek verimliliğe sahip teknoloji olarak kabul edilmektedir. Verimlilikleri, maruz kaldıkları güneş ışığının açısı ve yoğunluğu gibi faktörlere bağlı olarak %20 ila %25 arasında değişmektedir. Ancak, monokristal güneş pillerinin üretimi eski ve maliyetli bir süreçtir. 1971 yılında geliştirilen "Czochralski Metodu," silisyum dioksitin yüksek sıcaklıklarda eritilerek tek kristalli silindirler haline getirilmesine dayanmaktadır. Elde edilen silindirler ince dilimlere ayrılarak güneş pillerinde kullanılmak üzere hazırlanır (Green, 2016; Hegedus & Luque, 2011).

Bu pillerin ömrü genellikle 25-30 yıl arasında olup, 30 yıl sonunda verimliliklerinde %20-25 oranında bir düşüş meydana gelmektedir. Monokristal güneş pilleri genellikle koyu mavi veya siyah renkte olup, yüksek verimlilikleri nedeniyle premium güneş enerjisi uygulamalarında tercih edilmektedir. Ancak, yüksek üretim maliyetleri, bu pillerin başlangıç yatırımının büyük olmasına neden olmaktadır (Green, 2016; Hegedus & Luque, 2011).

b. Polikristal Güneş Pilleri

Polikristal güneş pilleri, monokristal alternatiflerine kıyasla daha düşük verimliliğe sahiptir ve verimlilik oranları %15 ila %20 arasında değişmektedir. Bu pillerin üretiminde homojen olmayan atomik yapıya sahip malzemeler kullanılmakta olup, birden fazla monokristalin birleşiminden oluşmaktadır. Polikristal güneş pillerinin üretimi, monokristal türlerine göre daha az maliyetlidir ve bu durum, ekonomik açıdan cazip hale gelmelerini sağlamaktadır. Daha hızlı ve enerji tasarruflu bir üretim sürecine sahip olmaları, maliyetleri düşürmektedir (Green, 2016; Hegedus & Luque, 2011).

Polikristal güneş pillerinin ömrü genellikle 20-25 yıl arasında olup, monokristal pillerden daha kısadır. Genellikle mavi tonlarında olan bu piller, kristallerin farklı yapısı nedeniyle homojen olmayan bir görünüme sahiptir. Daha düşük verimlilik ve daha kısa ömre sahip olmalarına rağmen, uygun maliyetleri nedeniyle büyük ölçekli projelerde yaygın olarak tercih edilmektedir (Green, 2016; Hegedus & Luque, 2011).



Şekil 1. Monokristal güneş pili (sağ) ve polikristal güneş pili (sol) (URL-1, 2024)

Tablo 1’de monokristal ve polikristal güneş pilleri verimlilik, maliyet, üretim süreci, ömür ve görünüm bakımından karşılaştırılmıştır.

Tablo 1. Monokristal ve polikristal güneş pillerinin karşılaştırılması

Özellik	Monokristal Güneş pili	Polikristal Güneş pili
Verimlilik	Yüksek (%20-25)	Orta (%15-20)
Maliyet	Yüksek	Düşük
Üretim Süreci	Karmaşık	Daha Basit
Ömür	Uzun (25-30 yıl)	Orta (20-25 yıl)
Görünüm	Siyah ve düzenli	Mavi ve düzensiz

1.2.2. İkinci Nesil Güneş Pilleri

İkinci nesil güneş pilleri, fotovoltaik enerji üretimi için kullanılan önemli teknolojilerden biridir. Bu güneş hücreleri, ince film malzemelerinin fotovoltaik katmanlar hâlinde istiflenmesiyle üretilmekte olup, bu yapı sayesinde hücreler verimlilik ve maliyet açısından avantaj sağlamaktadır. İnce film güneş hücrelerinin esneklik özellikleri, bu teknolojinin farklı yüzeylere uygulanmasını mümkün kılmakta ve geniş bir kullanım alanı sunmaktadır. Ayrıca, geleneksel güneş hücrelerine kıyasla üretim maliyetlerinin daha düşük olması, bu teknolojiyi ekonomik açıdan avantajlı bir çözüm hâline getirmektedir. Bununla birlikte, bu hücrelerin bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Özellikle, ev tipi uygulamalarda verimlilikleri genellikle daha düşük seviyelerde kalabilmekte ve ömürleri diğer güneş pillerine göre daha kısa olabilmektedir. Kullanılan malzemelerin çeşitliliği ve üretim yöntemlerindeki yenilikler ise bu avantaj ve dezavantajların derecesini belirleyen en önemli etkenlerdir (Kant ve Singh, 2022).

Bu çerçevede, amorf silikon (a-Si), mikrokristalin silikon ve diğer ince film malzemeleri ile üretilen yapılar öne çıkmaktadır. Bu malzemeler, fotovoltaik hücrelerin hem verimliliğini artırmak hem de üretim maliyetlerini düşürmek amacıyla çeşitli kombinasyonlarla birleştirilebilmektedir. Öne çıkan malzemeler arasında kadmiyum tellür (CdTe), kadmiyum sülfür (CdS) ve amorf silisyum (a-Si) yer almaktadır. Bu bileşenler, ince film güneş hücrelerinin hem verimliliklerini artıran hem de ekonomik olarak daha uygun maliyetli çözümler sunan temel yapı taşlarıdır. Böylelikle, bu teknolojilerle yenilikçi ve sürdürülebilir enerji çözümleri geliştirilmesi amaçlanmaktadır (Green, 2005).

a. Amorf Silisyum Güneş Pilleri (a-Si)

Amorf silisyum güneş pilleri, 250°C gibi yüksek sıcaklıklarda geniş yüzeylere düzgün bir şekilde uygulanabilmesini sağlayan yüksek bir soğurma katsayısına sahiptir. Birinci nesil güneş pilleri olan kristalli silisyumdan farklı olarak, amorf silisyum güneş pillerinde atom düzenlemesi gelişigüzel olduğundan, elektriksel iletkenlik kalitesi daha düşüktür. Ancak, bu sorunun üstesinden gelmek için %5-12 oranında hidrojen eklenerek amorf silisyum, fotovoltaik dönüşüme uygun hâle getirilebilmektedir. Üretiminde en yaygın kullanılan yöntem ise "ışık boşalım" tekniğidir. Bu teknikle elde edilen amorf silisyum güneş pilleri, özellikle küçük ölçekli enerji ihtiyacı olan cihazlarda yaygın olarak tercih edilmektedir (Öztürk, 2012).

b. CdTe Güneş Pilleri

CdTe (kadmiyum tellür) güneş pilleri, diğer ince film güneş teknolojilerine kıyasla daha kolay depolanabilmesi ve geniş ölçekli üretime uygun olması nedeniyle gelecek vadede fotovoltaik malzemelerden biri olarak değerlendirilmektedir. Bu piller, yüksek bir güneş ışını emme katsayısına ve ideal bir bant genişliğine sahiptir. Ayrıca, CdTe güneş pillerinin verimliliği %15'in üzerindedir. Bu hücrelerle üretilen güneş panel modülleri ise %9'un üzerinde bir verim sağlamaktadır. CdTe teknolojisinin sunduğu bu avantajlar, onu gelecekte daha geniş bir kullanım alanı bulabilecek potansiyel bir seçenek hâline getirmektedir (Arslan, 2018).

c. CIS Güneş Pilleri

CIS (bakır indiyum silisyum) güneş pilleri, periyodik tablonun I., III. ve VI. grup elementlerinin bir araya gelmesiyle oluşur ve yarı iletken soğurma katsayılarının yüksek olması nedeniyle güneş spektrumu ile uyumlu bir şekilde çalışmaktadır. CdTe güneş pillerine rakip olarak görülen CIS güneş pilleri, genellikle Ga (galyum) elementinin eklenmesiyle daha yüksek verimlilik sağlamaktadır. Teknolojinin karmaşıklığı arttıkça, laboratuvar ölçeğinde üretilen CIS güneş pillerinin verimliliği %18'e kadar çıkarken, modül düzeyinde bu oran %15 civarında kalmaktadır. CIS pillerinde en yaygın kullanılan iki teknoloji, elementlerin vakum ortamında buharlaştırılması ve bakır-indiyum ince film alaşımının selenyum ile tepkimeye sokulmasıdır. Bu yöntemler, ince film tabakalarının homojenliğini artırarak cihaz performansını doğrudan etkilemektedir. Ayrıca, esnek yüzeylere uygulanabilir olmaları sayesinde CIS güneş pilleri taşınabilir elektroniklerde ve bina entegreli sistemlerde de kullanım potansiyeline sahiptir. CIS güneş pilleri, gelişen üretim yöntemleri ile verimliliklerini artırmaya devam etmekte ve fotovoltaik teknolojiler arasında önemli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır (Ardağ, 2012).

1.2.3. Üçüncü Nesil Güneş Pilleri

Üçüncü nesil güneş pilleri, gelecekte umut vaat eden bir grup olarak fotovoltaik sistemler arasında hem maliyet açısından hem de üretim aşamasındaki teknik ve pratik kolaylıklar bakımından dikkat çekmektedir (Can, 2019).

Üçüncü nesil güneş pilleri arasında boya duyarlı, kuantum noktalı, organik ve perovskit tabanlı güneş pilleri bulunmaktadır. Bu yenilikçi teknolojilerin çeşitli versiyonlarında, oldukça yüksek verimlilik oranlarına ulaşılmış olup, sürekli olarak daha iyi sonuçlar elde etmek amacıyla yoğun araştırmalar devam etmektedir (Soosaimanickam vd., 2019).

a. Boya Duyarlı Güneş Pilleri

Boya duyarlı güneş pilleri, fotosentez sürecinden ilham alınarak geliştirilmiş ve geniş bant aralığına sahip yarı iletkenlerde elektron geçişini sağlayan üçüncü nesil fotovoltaik cihazlar arasında yer almaktadır. Bu cihazlar, özellikle düşük ışık seviyelerinde yüksek verimlilik sağlamaları, esnek malzemelerle uygulanabilir olmaları ve ekonomik üretim

süreçleri gibi önemli avantajlar sunmaktadır. Ayrıca, p-n eklemli fotovoltaik cihazlar için bir alternatif olarak değerlendirilebilmektedirler (Battal, 2020).

b. Organik Güneş Pilleri

Organik güneş pilleri, güneş ışığını organik malzemeler kullanarak enerjiye dönüştüren yapılardır. Bu piller, genellikle bir elektron verici ve bir elektron alıcı olmak üzere iki farklı organik malzemeden oluşur. Kolay üretilebilirlikleri ve düşük maliyetleri nedeniyle tercih edilen fotovoltaik pillerdir. Ancak, organik malzemelerin kısa uyarılma ömürleri, bazı zorluklar yaratabilir (Teker, 2015).

c. Kuantum Noktalı Güneş Pilleri

Kuantum noktalı güneş pilleri, nanometre ölçeğindeki kristal yarı iletkenlerden oluşan yenilikçi bir fotovoltaik teknolojidir. Bu kuantum noktaları, genellikle yapay atomlar olarak nitelendirilir ve soğurma eşiğinin ayarlanmasına imkân tanır. Bu özellik, enerji taşıyıcılarını kontrol etme yeteneğini sağlar ve dolayısıyla yarı iletken malzemenin nanometre ölçeğindeki granüllerini oluşturur (Gülsever, 2020).

d. Perovskit Güneş Pilleri

Perovskit güneş pilleri, düşük maliyetleri ve kolay üretim süreçleri nedeniyle büyük ilgi görmektedir. Perovskit malzemeleri, farklı bant aralıklarıyla çeşitlendirilebilme özelliğine sahiptir, bu da onların farklı uygulama alanlarına uyum sağlamasını kolaylaştırır (Aslan, 2021).

1.3. Boya Duyarlı Güneş Pilleri

Boya duyarlı güneş pilleri (BDGP), bir boya yardımı ile güneş ışığını emerek elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik sistemlerdir. Üçüncü nesil güneş pilleri kategorisinde yer alan BDGP, ilk olarak 1991 yılında Alman araştırmacı Michael Grätzel tarafından geliştirilmiştir. Grätzel ve ekibi, kolloidal TiO_2 karışımını N719 olarak bilinen rutenyum bazlı bir boya ile duyarlılaştırarak ilk BDGP'yi üretmiştir. N719, geniş spektrumlu ışık

soğurma kapasitesine sahip olup, BDGP'nin verimliliğini artırmada önemli bir bileşendir (O'Regan ve Grätzel, 1991).

1.3.1. Boya Duyarlı Güneş Pillerinin Bileşenleri

Boya duyarlı güneş pilleri, fotoelektrot, karşı elektrot, boya ve elektrolit olmak üzere dört ana bileşenden oluşur (Şekil 2). Güneş ışığı pillerin üzerine düştüğünde, bileşenler arasında bir dizi yük (elektron-boşluk) transferi gerçekleşir ve bu süreç, enerji dönüşümünün temelini oluşturur. Yük transferinin verimli bir şekilde gerçekleşmesi, her bir bileşenin işlevini etkin bir şekilde yerine getirmesine bağlıdır. Bu pillerin verimliliği, bileşenlerin malzeme özellikleri ve birbirleriyle uyumlu etkileşimleriyle doğrudan ilişkilidir. Fotoelektrot, ışığı emen duyarlılaştırıcı boya ile etkileşerek ışık enerjisini elektrik enerjisine dönüştürür, elektrolit ise elektronların geri dönüşümünü sağlayarak devreyi tamamlar (Ünlü, 2024).

a. İletken Alt-Üst Cam Tabanlar

Şeffaf iletken oksit (TCO) kaplı camlar, foto anot ve karşı elektrot için alt tabaka olarak kullanılmaktadır. Bu tabakanın kaplanması, foto anot tarafından salınan elektronların toplanması ve dış devre aracılığıyla karşı elektroda iletilmesi açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu bağlamda, söz konusu tabaka aynı zamanda "akım toplayıcı" olarak da adlandırılmaktadır. İletken cam yüzeylerinin, düşük maliyetli, bol bulunan ve güneş ışınlarına karşı maksimum şeffaflığa sahip malzemelerden üretilmesi gerekmektedir. Bu gereksinimlere uyum sağlamak amacıyla, bu camlar genellikle florür katkılı kalay oksit (FTO) veya indiyum katkılı kalay oksit (ITO) olarak üretilmektedir. Söz konusu yüzeyler, oda sıcaklığında 20 Ω/sq 'dan daha düşük bir elektrik direncine sahiptir (Karthick, 2019).

b. Foto Anot

Tipik bir foto anot malzemesi, bir oksit yarı iletken malzemenin elektriksel olarak iletken moleküllerle kaplanması ve iletken cam tabakalara uygulanmasıyla oluşur. Bu malzeme, güneş hücresinde elektriksel olarak hassas bir elektrot olarak işlev görür. En yaygın kullanılan yarı iletken malzeme, 3.2 eV bant aralığına sahip anataz fazındaki titanyum dioksittir (TiO_2).

TiO₂, toksik olmayan ve düşük maliyetli bir malzemedir; yerkabuğunda bol miktarda bulunur. TiO₂'nin iletken cam tabanına yapışmasını sağlamak için terpineol, etil selüloz, polietilen glikol ve etilen glikol gibi bağlayıcılar kullanılır. Bu bağlayıcılarla hazırlanan TiO₂ karışımı, cam veya iletken yüzeylere serigrafi baskı veya diğer tekniklerle uygulanır. Bağlayıcıların çıkarılması ve yüzeyde yalnızca TiO₂'nin kalması için, FTO (veya ITO) iletken cam, 450-500 °C'de 30 dakika süreyle tavlınır. Bu işlem, titanyum dioksitin iletken cam üzerine iyi bir şekilde yapışmasını sağlar, parçacıklar arasındaki teması kolaylaştırır ve nano parçacıklı gözenekli elektrotlar oluşturur. Oluşan gözenekli elektrotların kalınlığı yaklaşık 10-15 µm'dir (Dhungel, 2010).

c. Boyalar (Duyarlaştırıcılar)

Duyarlaştırıcı, güneş ışınlarını emerek hücrenin iletkenliğini artırır. Yarı iletken ile güçlü bir etkileşim sağlamak amacıyla, bir duyarlılaştırıcının karboksil ve hidroksil gruplarını içermesi gerekmektedir (Monishka, 2012).

Mevcut duyarlılaştırıcılar, güneş enerjisinin emilmesi ve elektrik enerjisine dönüştürülmesinde önemli bir rol oynar. Elektrik akımı, TiO₂ yarı iletken yüzeyine kimyasal olarak bağlanarak TiO₂ yüzeyine güçlü bir yapışma ve iletim bandının kenarı ile hizalanmayı garanti eder. Elektrik akımının geniş bir ışık spektrumunu absorbe edebilmesi ve elektrolitin redoks potansiyelinin altında bir LUMO seviyesine sahip olması gerekir. Bu durum HOMO seviyesi ile karşılaştırıldığında geçerlidir (Can, 2019).

Bir boya duyarlı güneş pilinde kullanılan boyanın belirli özelliklere sahip olması beklenir. Bu özellikler şunlardır:

- Kararlılık: Yaklaşık 20 yıl süresince doğal ışık koşullarına maruz kalmaya karşılık gelen yaklaşık 10⁸ çevrim döngüsünü sürdürebilecek bir dayanıklılık göstermesi gerekmektedir (Grätzel, 2003).
- Soğurma: İdeal bir duyarlılaştırıcıya sahip fotovoltaiik hücre, 900 nm'den daha uzun dalga boylarına sahip ışığı emme yeteneğine sahip olmalıdır. Bu durum, 1.4 eV bant aralığına sahip bir yarı iletkenle eşdeğerdir (Wang, 2008).
- Yüzey Etkileşimleri: Yarı iletken yüzeyinde etkili bir şekilde adsorbe olabilmek kapasitesine sahip olmalıdır (Smestad, 1998).

- Enerji Düzeyi: Uyarılmış enerji seviyesi, yarı iletkenin iletim bandı alt seviyesiyle örtüşmeli veya ona oldukça yakın bir konumda olmalıdır. Bu sayede elektron aktarımı sırasında meydana gelen enerji kaybı en aza indirilir (Grätzel, 2003).

d. Karşıt Elektrot

Karşıt elektrotun üç önemli işlevi vardır:

- (i) İşlemin tamamlanmasını sağlar; oksitlenmiş redoks çifti, karşı elektrot yüzeyinde elektron alarak indirgenir. Katı hal BDGP'de bu indirgeç, iyonik taşıma materyali aracılığıyla elektronları toplar.
- (ii) Dış devreden elektronları toplar ve hücre içindeki elektrolit çözeltiye aktarır.
- (iii) Karşı elektrot, bir ayna gibi çalışarak emilmemiş ışığı foto anota yansıtarak güneş ışığının daha verimli kullanılmasını sağlar (Wu vd., 2017).

Bu işlevleri yerine getirmek için, karşı elektrotun yüksek katalitik aktivite, iletkenlik, yansıtıcılık, gözenekli yapı, kimyasal korozyon direnci ve iyi yapışma özelliklerine sahip olması gerekir. Platin, bu özellikleri sağlamak için en yaygın kullanılan malzemedir, ancak karbon, grafit ve iletken polimerler gibi alternatifler de kullanılır (Zhong vd., 2011).

Platin, hızlı redoks reaksiyonları ve yüksek yansıtıcılık özellikleri nedeniyle tercih edilir. Ancak, platin pahalı olduğu için, araştırmacılar son yıllarda alternatif malzemelere yönelmiştir. Bu alternatifler arasında karbon nanotüpler, CoS filmleri ve iletken polimerler bulunmaktadır. Örneğin, nikel ile gömülü bimodal mezogözenekli karbon, platin karşı elektrottan daha yüksek verimlilik göstermiştir (Wu vd., 2017).

e. Elektrolit

Elektrolit, boya duyarlı güneş pillerinde karşı elektrot ile foto anot arasında yük taşıyıcı olarak kritik bir rol oynar. Kullanılacak yük taşıyıcı redoks çifti, görünür ışığı emmemeli, kimyasal olarak kararlı ve geri dönüşümlü olmalı, düşük viskoziteye sahip olmalı ve boyayı çözmemelidir. Bu özellikleri nedeniyle, düşük viskozite, ihmal edilebilir buhar

basıncı ve optimum kaynama noktası gibi ideal özellikleri ile iyot/triiyodür çifti yaygın ve verimli bir redoks aracı olarak kullanılmaktadır (Wu vd., 2015).

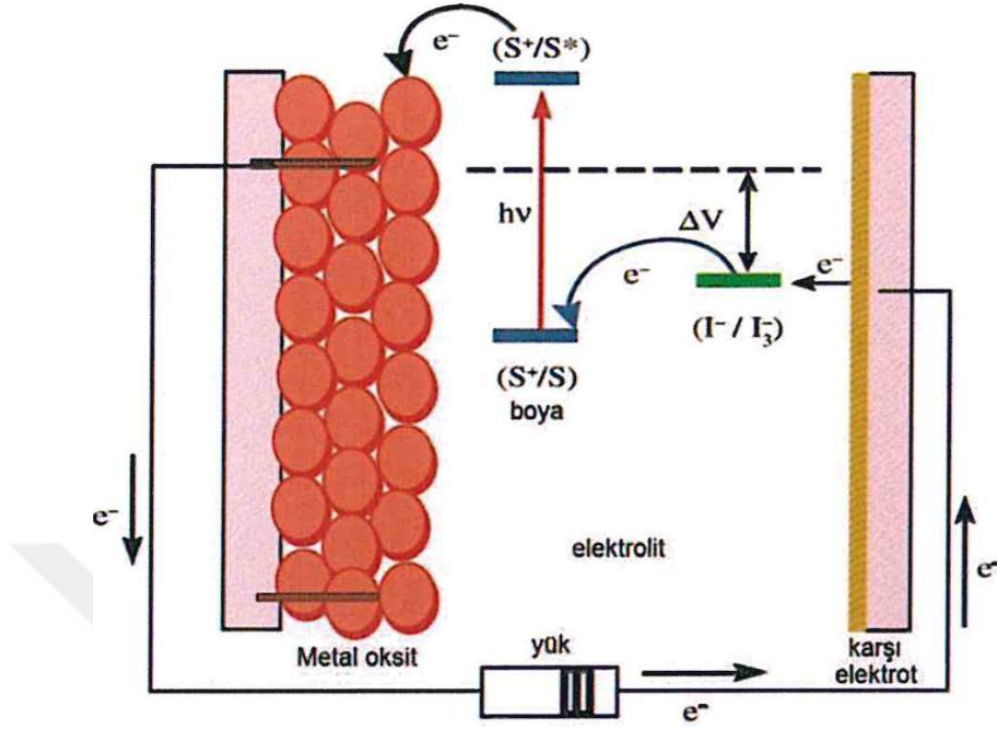
Boya molekülleri elektron enjekte ettiğinde, triiyodür oksitlenmiş boyayı indirger ve iyodür karşı elektrota hareket ederek kaybettiği elektronları geri alır. Bu süreç, dış devrede elektron göçü ile tamamlanır (Karthick, 2019).



Şekil 2. Boya duyarlı güneş pillerinin bileşeni katmanlarının şematik gösterimi

1.3.2. Boya Duyarlı Güneş Pillerinin Çalışma Prensipleri

Boya duyarlı güneş pillerinin çalışma mekanizması, fotosentez sürecine benzerlik gösterir. Boya molekülleri, tıpkı bitkilerdeki klorofilin ışığı emerek enerji üretmesi gibi, güneş ışığını emerek pozitif ve negatif yük taşıyıcıları oluşturur. Bu nedenle, bu sistem yapay fotosentez olarak da adlandırılmaktadır. Benzer şekilde, ışık absorpsiyonu yoluyla enerji dönüşümünü sağlayan bu sistem, doğal süreçleri taklit eden bir fotokimyasal tepkime olarak kabul edilir (Lenzmann ve Kroon, 2007; O'Regan ve Grätzel, 1991). Boya duyarlı güneş pillerinin çalışma prensibinin Şekil 3'te görülmektedir.



Şekil 3. Boya duyarlı güneş pilinin çalışma prensibinin şematik gösterimi (Ok, 2019)

Bu piller, güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümünü boya molekülleri, titanyum dioksit (TiO_2) ve elektrolit arasındaki etkileşim yoluyla gerçekleştirir. Başlangıçta, güneşten gelen fotonlar boya molekülü (S) tarafından absorbe edilir (Denklem 1). Bu absorpsiyon süreci sırasında boya molekülü, fotonun enerjisini ($h\nu$) alarak uyarılmış duruma geçer (S^*). Foton enerjisi, boyanın en yüksek dolu moleküler orbitalinden (HOMO) en düşük boş moleküler orbitaline (LUMO) geçiş yapan elektronları harekete geçirir. Bu olay, güneş ışığının kimyasal bir değişime neden olmadan elektrik üretimi için gerekli enerji dönüşümünü başlattığı kritik bir adımdır. Böylece boya molekülü, ışık toplama işlevini yerine getirerek foton enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesindeki ilk adımı oluşturur (Ok, 2019).

Uyarılmış olan elektronlar (S^*), boya molekülünden ayrılarak TiO_2 'nin iletken bandına aktarılır ve bu süreçte boya molekülü oksitlenir (Denklem 2). Bu aşamada, TiO_2 geniş yüzey alanıyla sadece boyayı tutundurmamakla kalmaz, aynı zamanda uyarılmış elektronların etkin bir şekilde iletilmesini sağlar. Elektronlar, TiO_2 'nin iletken bandında hareket ederek bir devre oluşturur. Bu elektronlar, anot elektrottan (TiO_2 'nin bağlı olduğu elektrot) başlayarak

dış devre üzerinden katot elektroda doğru yönlendirilir. Bu süreçte, elektronların hareketi elektrik akışı oluşturur ve elektrik enerjisi elde edilir (Ok, 2019).

Katot bölgesinde, elektronlar, karşıt elektrot (katot) yüzeyinde elektrolit aracılığıyla I^-/I_3^- redoks çiftine aktarılır. Elektrolit, anot ve katot arasında elektron iletimi sağlayan bir ortam olarak görev yapar. Oksitlenmiş boya molekülü (S^+), elektrolitte bulunan iyodür iyonlarından (I^-) elektron alarak yeniden indirgenir. Bu süreçte, Denklem 3'te gösterildiği gibi, iyodür iyonları (I^-), boya molekülüne elektron aktarırken triiyodür iyonlarına (I_3^-) oksitlenir. İyodür iyonlarının triiyodür iyonlarına dönüşümü, sistemdeki elektron dengesini sağlamaya yardımcı olur (Norasikin vd., 2014).

Triiyodür iyonları (I_3^-), katot bölgesine doğru hareket eder ve burada karşıt elektrottan elektronlarını alarak tekrar iyodür iyonlarına (I^-) indirgenir. Bu süreç, Denklem 4'te açıklanmıştır. Karşıt elektrot yüzeyindeki bu reaksiyon, redoks çiftinin sürekli bir döngü içinde çalışmasını sağlar ve bu şekilde boya duyarlı güneş pillerinde (BDGP) elektrik enerjisinin kesintisiz olarak üretilmesine olanak tanır. Bu döngüsel mekanizma, sistemin kararlılığını ve uzun vadeli enerji üretim kapasitesini destekler (Norasikin vd., 2014).

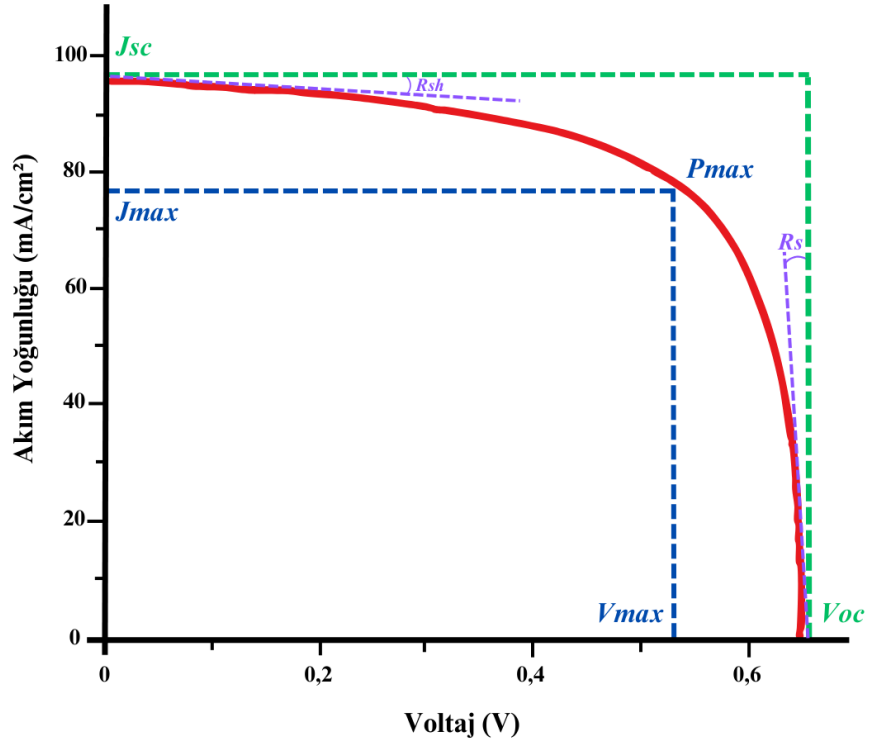
BDGP'nin çalışma prensibi, güneş enerjisini etkin bir biçimde elektrik enerjisine dönüştürebilen bir sistem sunar. Bu sistemde boya, TiO_2 ve elektrolit, sırasıyla ışık toplama, yük ayrışması ve yük aktarımı gibi temel fonksiyonları yerine getirir (Norasikin vd., 2014).



1.3.3. Boya Duyarlı Güneş Pillerinin Performans Değerlendirme Parametreleri

Boya duyarlı güneş pillerinin (BDGP) performansı, altı temel fotovoltaiik parametre olan açık devre gerilimi (V_{oc}), kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}), doldurma faktörü (FF), enerji dönüşüm verimliliği (η), seri direnç (R_s) ve şönt direnci (R_{sh}) üzerinden değerlendirilmektedir.

Tipik bir J - V eğrisinden J_{sc} , V_{oc} , R_s , R_{sh} , maksimum güç noktasındaki akım yoğunluğu (J_{max}), maksimum güç noktasındaki gerilim (V_{max}), maksimum güç (P_{max}) değerleri belirlenebilir. Enerji dönüşüm verimliliği ve doldurma faktörü ise bu parametrelere dayanarak hesaplanmaktadır. Şekil 4'te tipik bir J - V eğrisi gösterilmektedir.



Şekil 4. Bir BDGP'nin J - V özellikleri

a. Açık Devre Gerilimi (V_{oc})

Açık devre gerilimi (V_{oc}), bir güneş pilinde dış devreden akım akmadığı durumda ölçülen gerilim değeridir. Bu parametre, güneş pilinin temel enerji dönüşüm süreçleriyle doğrudan ilişkili olup, cihazın performansını belirleyen önemli faktörlerden biridir. V_{oc} değerini etkileyen en önemli unsurlardan biri, sistemdeki indirgenme-yükseltgenme (redoks) tepkimelerinin dengesidir. Redoks tepkimeleri, elektron transfer mekanizmalarını

tetikleyerek enerji üretim sürecinin verimliliğini belirler. Bu süreçte, yarı iletkenin iletim bandı kenarı ile elektrolitin redoks potansiyeli arasındaki enerji uyumu, açık devre geriliminin büyüklüğünü belirleyen kritik bir faktördür. Dolayısıyla, redoks tepkimelerinin optimize edilmesi, güneş pilinin verimliliğini artırmak açısından büyük önem taşımaktadır. Açık devre geriliminin yüksek olması, güneş pilinin ışık enerjisini elektrik enerjisine daha etkin şekilde dönüştürdüğünü göstermektedir (O'Regan ve Grätzel, 1991; Grätzel, 2003).

b. Kısa devre fotoakım yoğunluğu (J_{sc})

Boya duyarlı güneş pillerinde (BDGP), birim alan başına üretilen fotoakım yoğunluğu (mA/cm^2), kısa devre koşulları altında ölçülen kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}) ile ifade edilir. J_{sc} değeri, TiO_2 yarı iletkeni ile boya duyarlılaştırıcı arasındaki etkileşim düzeyine ve kullanılan boyanın ışık soğurma kapasitesine doğrudan bağlıdır. Bu nedenle, yüksek bir J_{sc} değeri elde edilmesi, hücre verimliliğinin artırılması açısından kritik bir öneme sahiptir. J_{sc} 'nin büyüklüğü, aşağıdaki temel faktörlere bağlıdır (Ooyoma ve Harima, 2012):

- Boya duyarlılaştırıcının ışık soğurma kapasitesi: Kullanılan boya, geniş bir spektrumdaki güneş ışığını etkin bir şekilde soğurabilmelidir. Daha geniş bir spektrumda ışık soğurulması, daha fazla fotonun emilmesini ve dolayısıyla daha yüksek akım üretimini sağlar.
- Elektron enjeksiyon verimi: Işık tarafından uyarılan boyanın, enerjisini TiO_2 'nin iletim bandına etkili bir şekilde aktararak yüksek verimli bir elektron enjeksiyonu sağlaması gerekir. Elektron transferinin hızlı ve etkin olması, taşıyıcı kayıplarını en aza indirir.
- Redoks döngüsünün verimliliği: Oksitlenmiş boyanın, elektrolit içerisindeki iyodür (I^-) iyonları aracılığıyla hızlı ve verimli bir şekilde indirgenmesi gerekmektedir. Bu süreç, hücrenin kararlılığı ve enerji dönüşüm döngüsünün sürdürülebilirliği açısından kritik bir rol oynar.

Bu faktörlerin optimize edilmesi, BDGP'nin verimliliğini artırmak ve enerji dönüşümünü en üst seviyeye çıkarmak için gereklidir (Ooyoma ve Harima, 2012).

c. Doldurma Faktörü (FF)

Doldurma faktörü (FF), güneş pillerinin performansını değerlendirmede temel bir parametre olarak kabul edilir ve hücrenin enerji dönüşüm verimliliği üzerindeki etkisini doğrudan belirler. Son yıllarda, doldurma faktörünü artırarak güneş pillerinin genel verimliliğini iyileştirmek amacıyla TiO_2 tabanlı hücreler yaygın olarak kullanılmaktadır. TiO_2 'nin benzersiz kimyasal ve fiziksel özellikleri, yüksek elektron iletkenliği ve yüzey etkileşimleri sayesinde verimli bir yük taşıma mekanizması sunar. Bu özellikler, doldurma faktörünün artırılmasına katkıda bulunarak güneş pillerinin daha yüksek performans sergilemesini sağlar.

Doldurma faktörü, bir güneş pilinin maksimum güç üretim kapasitesini gösteren kritik bir parametredir ve maksimum güç noktası (P_{max}) ile açık devre gerilimi (V_{oc}) ve kısa devre akımı (I_{sc}) çarpımına oranı olarak ifade edilir. Matematiksel olarak bu ilişki Denklem 5'te verilmiştir.

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (5)$$

Bu oran, hücrenin güç üretim verimliliğini ve sistemdeki enerji kayıplarının minimize edilme derecesini belirleyen kritik bir parametre olarak öne çıkmaktadır (Zhang, 2017). Doldurma faktörünün yüksek olması, güneş pilinin iç direnç kayıplarının düşük olduğunu ve maksimum güç noktasında daha yüksek bir enerji dönüşüm kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Gelişmiş malzemelerin ve yenilikçi üretim tekniklerinin kullanımıyla doldurma faktörünün optimize edilmesi, güneş pillerinin toplam verimliliğini artırmada önemli bir potansiyel sunmaktadır.

Tablo 2'de, farklı güneş pili türlerine ait doldurma faktörleri karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.

Tablo 2. Farklı güneş pili çeşitlerinin doldurma faktörleri (Dobrzański vd., 2006)

Güneş pili çeşidi	Dolum faktörü
Mono-Kristal Silikon	0.83 – 0.86
Poli-Kristal Silikon	0.87 – 0.89
Amorf Silikon	0.63 – 0.67
Boya Duyarlı Güneş Pili	0.30– 0.72

d. Verim (η)

Güneş enerjisinin elektriğe dönüşüm verimi (η), maksimum üretilen gücün (P_{max}) gelen güce (P_{in}) oranı olarak tanımlanır. η , Denklem 6'da gösterildiği şekilde hesaplanmaktadır (Erdağ Maden, 2022).

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} \quad (6)$$

e. Seri direnç (R_s)

Seri direnç, yarıiletken malzemede temas direnci ve yük transfer direnci olarak değerlendirilebilir. Seri direncin artması, maksimum verimliliği belirleyen dolum çarpanının azalmasına neden olur. Ayrıca, R_s kısa devre akımını (I_{sc}) düşürür, ancak açık devre gerilimi (V_{oc}) üzerinde bir etkisi bulunmamaktadır (Öztürk vd., 2019).

f. Şönt direnci (R_{sh})

Şönt direnci, düşük verimliliğe sahip akımın alternatif bir yol izlemesine olanak tanıdığı için önemli bir parametredir. Şönt direncinin düşük olması, dolum çarpanının azalmasına ve açık devre geriliminin (V_{oc}) düşmesine yol açar. Ancak, toplam akım kısa devre koşullarında harici bir yol üzerinden aktığından, kısa devre akımı (J_{sc}) şönt direncinden etkilenmez (Öztürk vd., 2019).

1.4. Literatür Araştırması

Boya duyarlı güneş pilleri (BDGP), düşük maliyetleri ve çevre dostu özellikleri nedeniyle yenilenebilir enerji teknolojileri arasında önemli bir yer tutmaktadır. Doğal kaynaklardan elde edilen boyalar, geniş ışık emilim spektrumları ve çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Literatürdeki çeşitli çalışmalar, bu doğal boyaların BDGP'deki fotovoltaiik performansını değerlendirmiş ve dikkate değer sonuçlar ortaya koymuştur. Aşağıda, bu alanda yapılan bazı çalışmalar ve elde edilen temel bulgular özetlenmiştir:

Calogero ve Marco (2008), kırmızı Sicilian portakal suyu ve patlıcan kabuğu özütlerinin TiO_2 tabanlı BDGP’de kullanıldığını rapor etmiştir. Çalışmada, kırmızı portakal suyunun %0.66 verimlilikle en yüksek performansı sergilediği, patlıcan kabuğu özütünün ise benzer bir başarı gösterdiği belirtilmiştir (Calogero ve Marco, 2008).

Zhou ve arkadaşları (2011), çiçekler, meyveler ve bitkilerden elde edilen 20 farklı doğal boyanın BDGP performansını incelemiş ve mangostan kabuğu boyasının %1.17 verimle en iyi sonuçları verdiğini ortaya koymuştur. Çalışmada, rutil bileşiğinin en etkili duyarlılaştırıcı olduğu belirlenmiştir (Zhou vd., 2011).

Eren ve arkadaşları (2015), atık gül kalıntılarından elde edilen antosiyanin bazlı doğal boyalarla BDGP üretmiş ve elde edilen hücrelerin fotovoltaiik parametrelerini analiz etmiştir. En yüksek kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}) 0.291 mA/cm^2 , açık devre gerilimi (V_{oc}) 300 mV, doldurma faktörü (FF) 0.426 ve verimlilik (η) %0.04 olarak rapor edilmiştir (Eren vd., 2015).

Al-Alwani ve arkadaşları (2017), bambu zambağı (*Cordyline fruticosa*) ve kırmızı ejder meyvesi (*Hylocereus polyrhizus*) boyalarını kullanarak BDGP üretmiş ve ekstraksiyon verimlerini incelemiştir. Çalışmada, kırmızı ejder meyvesi boyasının %44 IPCE değeri ile daha yüksek performans sergilediği belirlenmiştir (Al-Alwani vd., 2017).

Ung ve arkadaşları (2017), siyah zeytin ve mangostan boyalarının BDGP performansını değerlendirerek, doğal boyaların ışık emilim kapasitesinin hücre verimliliğinde kritik bir rol oynadığını göstermiştir. Çalışma, doğal boyaların potansiyelini ortaya koymakla birlikte, bu boyaların performansını artırmak için ek araştırmalara ihtiyaç duyulduğunu vurgulamıştır (Ung vd., 2017).

Gu (2018), havuç, dut, mor lahana, patates ve üzümünden elde edilen doğal boyalarla BDGP üretmiş ve mor lahana boyasının %0.162 verimlilik ve %48.4 FF ile en iyi performansı sergilediğini rapor etmiştir (Gu, 2018).

Cari ve arkadaşları (2018), rutenyum bazlı boyalar yerine doğal boyalar kullanarak BDGP üretmiş ve farklı ekstraksiyon çözücülerinin (etanol, metanol, n-heksan, asetik asit ve distile su) etkisini incelemiştir. Çalışmada, en yüksek verimliliğin yaklaşık %0.072 ile ıspanak boyasında elde edildiği belirlenmiştir (Cari vd., 2018).

Karmakar ve arkadaşları (2023), Bangladeş’in Dhaka bölgesinde yetiştirilen yerel doğal boyalarla BDGP üretmiş ve zerdeçal boyalı hücrenin %0.031 verimlilikle en yüksek performansı gösterdiğini rapor etmiştir. Çalışmada, pancar boyalı hücre ise %50 FF ile en yüksek doldurma faktörüne sahip olmuştur (Karmakar vd., 2023).

Hussain ve arkadaşları (2024), *Syzygium cumini* ve *Malva verticillata* bitkilerinden elde edilen boyaların BDGP'deki performansını incelemiş ve asidik boyaların daha iyi ışık emme ve yük transfer özellikleri sağladığını göstermiştir. Çalışmada, pH 3'te Antho/Chl kombinasyonunun %4.22 verimlilikle en yüksek performansı sergilediği belirlenmiştir (Hussain vd., 2024).

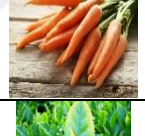
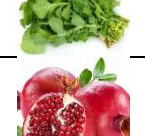
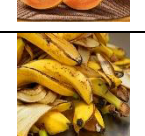
Davisan ve arkadaşları (2024), *Santalum album* meyvesinden elde edilen doğal boya ile BDGP üretmiş ve bu hücrenin 1.321 mA/cm^2 kısa devre akım yoğunluğu ve %0.589 verimlilikle başarılı bir performans sergilediğini bildirmiştir (Davisan vd., 2024)

Tablo 3'te, literatürde rapor edilen bazı BDGP çalışmalarında kullanılan doğal boyaların fotovoltatik parametreleri (J_{sc} , V_{oc} , FF ve η) karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.

Tablo 3. Bazı organik boya kullanılan BDGP'nin fotovoltatik parametreleri

Kaynak	Görsel	Bitki İsmi	J_{sc}	V_{oc}	FF	η
			(mA/cm^2)	(V)	(%)	(%)
(Al-Alwani vd., 2017)		Ejder meyvesi	0.4	0.5	79.16	0.16
(Gu vd., 2018)		Patates	0.512	0.044	53.2	0.012
(Zhou vd., 2011)		Zambak	0.51	0.49	66.7	0.17
(Zhou vd., 2011)		Gül	0.97	0.59	66.0	0.38
(Hafez vd., 2018)		Ahududu	2.316	0.29	36.6	0.246
(Hernandez vd., 2011)		Mor Begonvil	1.88	0.25	73.0	0.35
(Taya vd., 2013)		Maydanoz	0.53	0.44	34.0	0.07
(Gu vd., 2018)		Siyah üzüm	0.532	0.223	43.0	0.051

Tablo 3'ün devamı

(Eren vd., 2015)		Gül kalıntıları	0.291	-	42.6	0.040
(Gu vd., 2018)		Dut	0.550	0.181	51.2	0.051
(Calogero vd., 2008)		Şeker Portakalı	3.84	0.34	50.0	-
(El-Agez vd., 2012)		Ceviz	0.73	0.304	39.0	0.0104
(Moustafa vd., 2012)		Zerdeçal	0.288	0.529	48.0	0.030
(Huizhi vd., 2011)		Mandalina Kabuğu	0.74	0.592	63.1	0.280
(Gu vd., 2018)		Havuç	0.281	0.100	42.2	0.011
(Gu vd., 2018)		Çay Yaprağı	0.4	0.0001	40	0.00001
(Gu vd., 2018)		Mor Lahana	0.541	0.621	48.4	0.162
(Taya vd., 2013)		Roka	0.78	0.59	42.0	0.200
(Alor vd., 2023)		Nar	0.133	0.283	28.0	0.010
(Adedokun vd., 2016)		Papaya	0.37	0.15	30.37	0.02
(Alor vd., 2023)		Muz Kabuğu	0.122	0.282	26.0	0.009

Tablo 3'ün devamı

(Cari vd., 2018)		Tatlı Patates	0.0003	0.515	-	0.057
(Cari vd., 2018)		Brokoli	0.0002	0.561	-	0.069
(Cari vd., 2018)		Ispanak	0.0001	0.005	-	0.072
(Zhou vd., 2011)		Kahve	0.85	0.55	69.0	0.330
(Alor vd., 2023)		Hint Bademi	0.005	0.470	68.3	1.580
(Ghann vd., 2017)		Yaban Mersini	2.72	0.42	38.0	0.400
(Ghann vd., 2017)		Böğürtlen	11.16	0.47	26.0	1.400
(Mathew vd., 2016)		Siyah Erik	0.270	1.750	65.0	0.180
(Mathew vd., 2016)		Kırmızı Pancar	0.3600	1.750	58.0	0.200
(Alor vd., 2023)		Soğan Kabuğu	0.2400	0.510	47.0	0.065
(Davisan vd., 2024)		Beyaz Sandal Ağacı	1.321	0.599	74.3	0.589
(Zhou vd., 2011)		Sarı Gül	0.600	0.554	57.1	0.270
(Ung vd., 2017)		Siyah Zeytin	0.11	0.543	54.0	0.08
(Adedokun vd., 2016)		Karpuz	0.33	0.14	26.78	0.01

1.5. Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu tez çalışmasında, Türkiye'nin Doğu Karadeniz Bölgesi'ne özgü kokulu kara üzüm, karayemiş ve likarba (mavi yemiş) meyvelerinden elde edilen doğal boyaların kullanıldığı boya duyarlı güneş pilleri (BDGP) üretilmiş ve bu pillerin fotovoltaiik performansı araştırılmıştır. Çalışmanın amacı, BDGP teknolojisinde yaygın olarak kullanılan ticari boyalara alternatif olarak, düşük maliyetli, çevre dostu ve yerel kaynaklardan temin edilebilen doğal boyaların etkinliğini ortaya koymaktır. Bu kapsamda, doğal boyalar ekstrakte edilerek saflaştırılmış ve TiO_2 kaplı ITO camlara emdirilerek BDGP'nin fotoanotları hazırlanmıştır. Hücrelerin karşı elektrotları platin kaplı ITO camlar kullanılarak oluşturulmuş ve elektrolit olarak iodyür/tri-iodür (I^-/I_3^-) redoks çifti içeren bir elektrolit çözeltisi eklenmiştir. Son olarak, üretilen BDGP'ler birleştirilerek karakterizasyonları gerçekleştirilmiş, ticari N719 boyası referans olarak seçilmiş ve elde edilen doğal boyaların fotovoltaiik performansı ile karşılaştırılmıştır.

BDGP üretiminde yaygın olarak kullanılan Triton X-100 ve asetilaseton gibi kimyasalların yüksek maliyeti, bu teknolojinin geniş çapta uygulanmasının önünde ekonomik bir engel oluşturmaktadır. Bu nedenle, maliyetleri düşürmek ve yerel kaynakları daha etkin değerlendirmek amacıyla TiO_2 pastasının hazırlanmasında etil selüloz gibi daha uygun maliyetli ve çevre dostu malzemeler tercih edilmiştir. Bu yaklaşım doğrultusunda, minimum kimyasal bileşenle maksimum performans hedeflenmiş ve deneysel süreç buna uygun şekilde tasarlanmıştır.

Deneysel süreç, doğal boyaların ekstraksiyonu, etil selüloz bazlı TiO_2 pastalarının hazırlanmasını, bu pastaların BDGP yapılarında uygulanmasını ve elde edilen cihazların performans analizini içermektedir. Fotovoltaiik performans analizinde, kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}), açık devre gerilimi (V_{oc}), doldurma faktörü (fill factor, FF) ve verimlilik (η) gibi temel parametreler değerlendirilmiş ve doğal boyaların ticari boyalar ile rekabet edebilirliği ortaya konmuştur. Ayrıca, doğal boyaların çevresel sürdürülebilirliği ve ekonomik uygulanabilirliği üzerine çıkarımlar yapılmıştır.

Bu çalışma, yenilenebilir enerji teknolojilerinde yerel kaynakların kullanımını teşvik etmeyi ve ticari boyaların yüksek maliyetine alternatif oluşturmayı amaçlamaktadır. Elde edilen sonuçların, BDGP teknolojisinin gelecekte daha geniş çapta benimsenmesine katkı sağlaması beklenmektedir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Deneylerde Kullanılan Materyaller

Deneylerde kullanılan materyaller aşağıda sırasıyla verilmiştir. Organik boya duyarlı güneş pili üretiminde:

- Altlık malzemesi olarak 10-15 Ω /sq arasında değişen düşük yüzey direnci ve %85'in üzerinde ışık geçirgenliği bulunan Maideli marka iletken ITO cam kullanılmıştır.
- TiO_2 tabakasının kurutulması ve sinterlenmesi işlemleri için 550 °C sıcaklıklara kadar çıkabilen DLAB marka ısıtıcı tabla kullanılmıştır.
- Güneş pillerinin hazırlanmasında kullanılan camların iletken yüzeyinin belirlenmesi ve hazırlanan güneş pillerinin güneş simülatöründe ölçüm öncesinde güneş pili özelliklerini taşıyıp taşımadığının tespit edilmesi amacıyla, 40-400 mV ve 40-400 mA aralıklarında ölçüm yapabilen Toolfix marka dijital multimetre kullanılmıştır.
- Cam yüzeylerin temizlenmesi ve deney öncesinde homojen bir yüzey elde edilmesi amacıyla ultrasonik temizleme cihazı kullanılmıştır.
- Deneylerde kullanılan kimyasal ve fiziksel malzemelerin hassas ve doğru bir şekilde tartılması amacıyla, 0.001 g hassasiyetinde ölçüm yapabilen OHAUS marka hassas terazi kullanılmıştır.
- Deneylerde çözelti hazırlama ve temizleme işlemleri için yüksek saflıkta (%99) Emsure marka etil alkol kullanılmıştır.
- TiO_2 macununun viskozitesini artırmak ve bağlayıcı özellik sağlamak amacıyla Sigma Aldrich marka etil selüloz kullanılmıştır.
- Elektrolit çözeltisinde kullanılan %99 saflığındaki ZAG Kimya marka iyot, redoks reaksiyonları için gerekli olan iyot/triiodür çiftini oluşturmak amacıyla kullanılmıştır.
- Elektrolit çözeltisinde yer alan %99 saflığındaki ZAG Kimya marka potasyum iyodür, iyot ile birlikte redoks çiftinin oluşturulmasına yardımcı olarak elektron transfer mekanizmasını desteklemiştir.

- Mono etilen glikol, %99.5 saflığında Tekkim Kimya marka kullanılarak TiO_2 macununun homojenliğini artırmak ve viskozitesini iyileştirmek için kullanılmıştır.
- %98 saflığındaki Sigma-Aldrich marka titanyum dioksit (TiO_2), güneş hücresinin fotoanot malzemesi olarak ışığı soğurmak ve elektron iletimini sağlamak amacıyla kullanılmıştır.
- Solaronix marka platin, karşı elektrot yüzeyinde katalitik aktivite sağlayarak güneş hücresinin verimliliğini artırmıştır.
- Bide Pharmaceutical marka N719, ışık enerjisini soğurup elektron enjeksiyonunu sağlayan bir duyarlılaştırıcı madde olarak kullanılmıştır.

2.2. Deneylerde Kullanılan Ölçüm Cihazları

Bu çalışmada hazırlanan organik boya duyarlı güneş pillerinin performans karakterizasyonunu ve malzeme analizlerini gerçekleştirmek amacıyla aşağıda belirtilen ölçüm cihazları kullanılmıştır.

2.2.1. X-Işınım Kırınım Cihazı (XRD)

Çalışmalar, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi (RTEÜ) Merlab'da gerçekleştirilmiş olup, X-Işını Kırınım analizi için Şekil 5'te görülen Rigaku SmartLab X-ışını difraktometresi kullanılmıştır. Bu cihaz, kristal malzemelerin fazlarını, kristal boyutlarını, latis parametrelerini ve yapıdaki değişimleri incelemek için kullanılmaktadır. X-Işını Kırınım yöntemi, her bir kristal fazın kendine özgü kırınım profillerini sağlayarak, malzeme yapısındaki faz değişimlerini ve kristal yönelmelerini tespit eder. Cihaz, numune tahribatı yapmadan ve çok az miktarda numune ile analiz yapılmasına olanak tanır. Bu sayede, TiO_2 tabakasının kristal yapısının detaylı bir şekilde incelenmesi ve güneş pilinin verimliliği üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi sağlanmıştır (URL-2, 2025).



Şekil 5. Deneylerde kullanılan X-Işınları Kırınım Cihazı (XRD)

2.2.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

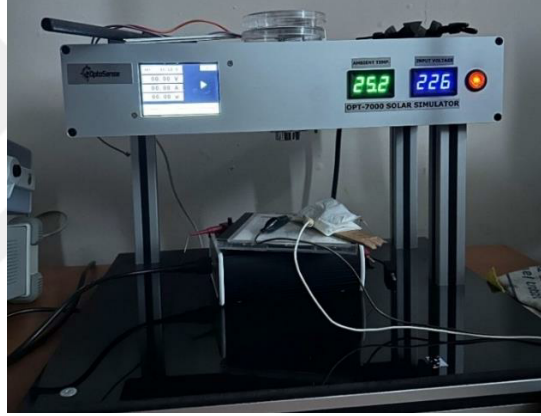
Çalışmalar, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi (RTEÜ) Merlab'da gerçekleştirilmiş olup, SEM analizi için Şekil 6'da görülen JEOL 6610 model cihaz kullanılmıştır. Hücrelerin yüzey morfolojisi ve yapılarının detaylı incelenmesini sağlayan bu cihaz, TiO_2 tabakasının ve diğer malzeme katmanlarının nanoyapı düzeyinde görüntülenmesini mümkün kılarak, ışık soğurma ve elektron iletimi gibi önemli özelliklerin değerlendirilmesine olanak tanır. Ayrıca, hücrelerin yapısal bütünlüğü ve homojenliği üzerine bilgi vererek, güneş pilinin performansını etkileyebilecek olası kusurları tespit eder (URL-3, 2025).



Şekil 6. Deneylerde kullanılan Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

2.2.3. Güneş Simülatörü

Çalışmalar, Karadeniz Teknik Üniversitesi (KTÜ) Fizik Bölümü laboratuvarında gerçekleştirilmiş olup, güneş pili performansının değerlendirilmesi için Şekil 7’de görülen Optosense OPT 7000 Solar Simulator kullanılmıştır. Bu cihaz, AM 1.5 spektrumuna uygun ışık yoğunluğu sağlayarak, güneş pillerinin fotovoltaiik performansını test etmeye olanak tanımaktadır. 0-1000 mW/cm² arasında geniş bir ışık yoğunluğu aralığına sahip olan simülatör, yüksek doğrulukla ışık kaybını %1’in altında tutarak ölçüm yapmaktadır. Ayrıca, 45x45 cm² alanında homojen ışık dağılımı sağlayarak, farklı boyutlardaki hücrelerde performans testlerinin yapılmasını mümkün kılmaktadır (URL-4, 2025).



Şekil 7. Hazırlanan güneş pilinin ölçümünün yapıldığı solar simülatör

2.2.4. Ultraviyole-Görünür Alan Spektroskopisi (UV-Vis)

Çalışmalar, Karadeniz Teknik Üniversitesi (KTÜ) Kimya Bölümü laboratuvarında gerçekleştirilmiş olup, UV-Vis spektrofotometri analizi için Şekil 8’de görülen Perkin Elmer Lambda cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz, BDGP’de kullanılan boyaların ışık absorpsiyon özelliklerini belirleyerek, farklı dalga boylarındaki soğurma davranışlarını incelemeye olanak tanır. Bu analiz kapsamında yalnızca likarba ekstraktına ait UV-Vis spektrumu elde edilmiştir. Elde edilen spektrum aracılığıyla, likarbanın görünür bölgedeki ışık absorpsiyon kapasitesi değerlendirilmiş ve maksimum absorpsiyon dalga boyu belirlenerek fotovoltaiik performans üzerindeki potansiyel etkileri analiz edilmiştir (URL-5, 2025).



Şekil 8. Deneylerde kullanılan Ultraviyole-Görünür Alan Spektroskopisi

2.3. Deneylerde Kullanılan Organik Boyalar

2.3.1. Likarba (Maviyemiş)

Ülkemizde özellikle Rize ve Bursa illerinde önemli ölçüde üretilen ve maviyemiş olarak bilinen likarba meyvesi (*Vaccinium* sp.), fenolik bileşikler, antosiyaninler ve terpenik maddeler açısından zengin bir bitkidir. İçeriğinde bulunan antosiyaninler, özellikle delfinidin ve malvidin gibi bileşikler sayesinde güçlü renk özelliklerine sahip olup, bu özellikleriyle boya duyarlı güneş pillerinin verimliliğini artırma potansiyeline sahiptir. Bu nedenlerle maviyemiş, doğrudan güneş enerjisi teknolojilerinde, özellikle boya duyarlı güneş pillerinde etkili bir doğal boyar madde olarak değerlendirilebilir (Pepe vd., 2023).



Şekil 9. Likarba (Maviyemiş)

2.3.2. Kokulu Kara Üzüm

Karadeniz Bölgesi'nde doğal olarak yetişen kokulu üzüm (*Vitis labrusca* L.), fenolik bileşikler, antosiyaninler, tanenler ve terpenik maddeler bakımından zengin bir meyvedir. Üzüm kabuğunda bulunan antosiyaninler, özellikle delfinidin, malvidin ve siyanidin türevleri, güçlü renklendirme özelliklerine sahiptir. Bu özellikler, boyar maddelerin ışık soğurma kapasitelerinin artırılmasında önemli bir rol oynar. Kokulu kara üzümün bu zengin kimyasal profili, doğal bir boyar madde olarak boya duyarlı güneş pillerinde kullanımını cazip hale getirmektedir (Üneş, 2016).



Şekil 10. Kokulu Kara Üzüm

2.3.3. Karayemiş

Karayemiş (*Prunus laurocerasus*), Türkiye'nin Karadeniz Bölgesi'nde özellikle Samsun, Giresun, Trabzon, Rize, Ordu ve Artvin gibi yüksek dağlık bölgelerde doğal olarak yetişmektedir. Bu bitki, içerdiği fenolik bileşikler, β -sitosterol ve doğal pigmentlerle zengindir. Özellikle meyve çekirdeklerinde bulunan bu bileşikler, renklendirme özellikleri bakımından önemlidir; meyveleri, zamanla siyah renge dönüşerek, doğal bir pigment kaynağı oluşturur. Karayemişin içerdiği bu pigmentler, boya duyarlı güneş pillerinde (BDGP) kullanıldığında, ışık emme kapasitesini artırarak verimliliği olumlu yönde etkileyebilir. Ayrıca, bu doğal bileşiklerin güneş pillerinin stabilitesini artırmada da potansiyel sunduğu düşünülmektedir; çünkü karayemişin antioksidan özellikleri, pillerin

uzun ömürlü ve dayanıklı olmasına katkı sağlayabilir. Bu nedenle, karayemişin güneş enerjisi sistemlerinde kullanımı, sürdürülebilir enerji üretimi için yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır (Celep vd., 2012).



Şekil 11. Karayemiş

2.4. Organik Güneş Pili Numunelerinin Hazırlanması

2.4.1. ITO Camların Temizlenmesi

Bu tez çalışmasında 2 cm × 1 cm boyutlarında ve yarı iletken özellikte olan indiyum kalay oksit (ITO) kaplı camlar kullanılmıştır. Camlar, yüzeylerinde oluşabilecek kir ve kalıntılardan arındırılmaları amacıyla iki aşamalı bir temizleme işlemine tabi tutulmuştur.

İlk aşamada, ITO kaplı camlar sırasıyla aseton ve %100 etanol ile ultrasonik temizleme işlemine alınmıştır. Her bir numune, bir kap içerisine yerleştirilip aseton banyosuna daldırılmış ve ultrasonik temizleyicide 10 dakika boyunca işleme tabi tutulmuştur. Daha sonra, aynı işlem etanol banyosunda tekrarlanmıştır. Bu işlem sayesinde, yüzeydeki organik ve inorganik kirlerin çözündürülerek numunelerin yüzeyi etkin bir şekilde temizlenmiştir.

İkinci aşamada, numuneler distile su ile durulanarak etanol kalıntılarından arındırılmıştır. Bu işlemde de ultrasonik temizleyici kullanılmış ve numuneler 5 dakika boyunca distile su içerisinde tutulmuştur. Böylece numuneler, herhangi bir kimyasal kalıntı bırakmaksızın deney için hazır hale getirilmiştir.

2.4.2. ITO Camların İletken Tarafının Tespiti ve Yüzeye Sabitlenmesi

Temizleme işlemleri sonrasında her bir cam numunenin iletken tarafı, doğruluğunu teyit etmek amacıyla multimetre ile ölçülmüştür. Yapılan ölçümler sonucunda, iletken olmayan taraf 0 ohm değerini gösterirken, iletken olan tarafın ölçüm değerleri cam numuneleri arasında farklılık göstermiştir. Ancak, iletken tarafın direnç değeri ortalama olarak 20 ohm olarak kaydedilmiştir. Bu ölçümler, numunelerin iletken taraflarının doğrulanmasını sağlamıştır.

Doğrulama işlemi tamamlanan numuneler, iletken tarafı üstte kalacak şekilde düz bir zemine yerleştirilmiştir. Numunelerin sağ ve sol kenarlarından 2,5 mm, üst ve alt kenarlarından ise yaklaşık 7,5 mm boşluk bırakılarak, scotch bant yardımıyla zemine sabitlenmiştir. Bu düzenleme, TiO_2 macununun sürülmesi için istenen alanın oluşturulmasına olanak tanımıştır. Yapılan bu işlemler sonucunda, her bir cam numunesinde TiO_2 macununun uygulanacağı yaklaşık 5 mm x 5 mm'lik bir alan tanımlanmış ve çalışmaya uygun bir yüzey hazırlanmıştır. Bu alanın sınırları, bantlar yardımıyla hassas bir şekilde belirlenmiş ve düzgün bir kaplama yapılması için ideal koşullar sağlanmıştır.

2.4.3. Titanyum Dioksit Macununun Hazırlanması

ITO cam ile boya arasındaki özellikleri iyileştirerek etkili bir kaplama sağlamak amacıyla TiO_2 macunu hazırlanmıştır. 0,5 gram TiO_2 tozu, 0,05 gram etil selüloz ve 3 ml etanol karıştırılarak macun elde edilmiştir. Daha önce yapılan denemelerde, polietilen glikol, asetik asit ve nitrik asit gibi farklı çözücüler ve bağlayıcılar ucuz alternatif olarak kullanılmış, ancak bu maddeler macunun çatlamasına ve istenilen kaplama kalitesine ulaşılmamasına neden olmuştur. Bu sebeple, etil selüloz bağlayıcı olarak tercih edilmiştir. Hazırlanan TiO_2 macunu, cam yüzeylerde homojen bir kaplama elde edilmesini sağlamak amacıyla uygun kıvamı getirilmiştir. Macunun kıvamı ve yapısı, deneysel koşullarda istenilen kaplama performansını elde etmek için optimize edilmiştir.

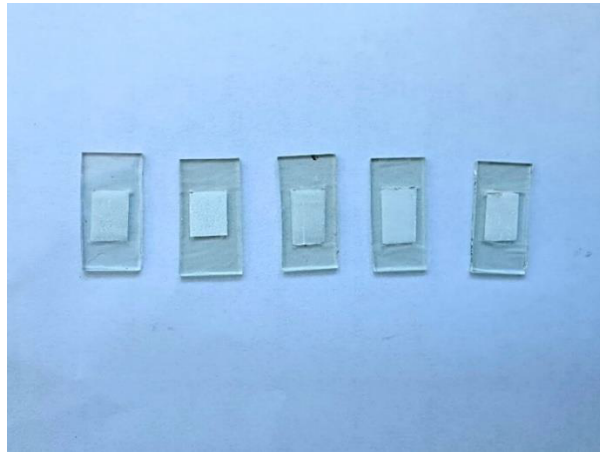
Etil selüloz, TiO_2 tozunun yüzeyine güçlü bir şekilde bağlanmasını sağlayarak macunun kıvamını artırır ve homojen bir yapının oluşmasına yardımcı olur. Etil selüloz ayrıca, macunun uygulama sırasında daha düzgün ve homojen bir şekilde yüzeye yayılmasını sağlar. Bu özellik, cam yüzeylere uygulanan TiO_2 tabakasının kalitesini artırarak daha verimli bir kaplama elde edilmesine olanak tanır (Li vd., 2010).

2.4.4. Macunun Cama Uygulanması ve Camın Isıtılması

TiO₂ macununun hazırlanmasından sonra, macunun cam yüzeylere uygulanması ve ısıtılması aşamasına geçilmiştir. Bu aşamada macun, önceden bantlanmış ITO cam yüzeylerine doctor blade yöntemi ile dikkatlice uygulanmıştır. Doctor blade yöntemi, cam yüzeyinde homojen bir kaplama sağlaması açısından tercih edilmiş olup, macun ince bir tabaka halinde camın bantlanmamış kısmına yayılmıştır.

Macun uygulandıktan sonra, camlar oda sıcaklığında yaklaşık 5 dakika boyunca kuruması için bekletilmiştir. Bu kuruma süresi, macunun yüzeyde stabil hale gelmesini ve sonraki işlem aşamalarında bozulma olmamasını sağlamak amacıyla belirlenmiştir. Kuruma işlemi tamamlandıktan sonra, cam yüzeyde kalan bantlar dikkatlice çıkarılmış ve macunun yüzeyde düzgün bir şekilde kalması sağlanmıştır. Bantlar çıkarıldıktan sonra, hedeflenen 5x5 mm²'lik alanın sınırlarının temizlenmesi amacıyla, kaplama yapılmayan bölgelerde hafif bir temizleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Böylece, TiO₂ kaplamasının tam olarak 5x5 mm²'lik bir alanda düzgün bir şekilde bulunduğu doğrulanmıştır.

Hazırlanan TiO₂ kaplı camlar, önce 1 dakika boyunca 200 °C'de ısıtılmış, ardından 450 °C'ye ayarlanmış ısıtıcı tablada 5 dakika tavlama işlemine tabi tutulmuştur. Tavlama işlemi sırasında, cam yüzeyinde kahverengi bir renk değişimi gözlemlenmiş ve bu renk, sıcaklığın etkisiyle beyaza dönene kadar ısıtıcı tablaya maruz bırakılmıştır. Bu renk dönüşümü, TiO₂ kaplamasının kristal yapısının stabil hale geldiğini göstermektedir. Camlar istenen beyaz rengi aldıktan sonra, ısıtıcı tabla kapatılmış ve numunelerin yavaşça soğuması için camlar ısıtıcı tablanın üzerinde bırakılmıştır.



Şekil 12. TiO₂ macununun uygulandığı ITO camlar (Boyaya daldırılmadan önce)

2.4.5. Hazırlanan Camların Analizleri

Hazırlanan TiO_2 kaplı cam numunelerin karakterizasyonu amacıyla yüzey ve kristal yapı analizleri gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan numune, yapısal özelliklerinin detaylı bir şekilde incelenmesi için SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) ve XRD (X-Işını Kırınımı) analizleri yapılmak üzere Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Merkezi Laboratuvarı'na gönderilmiştir.

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile yapılan analizde, TiO_2 kaplı yüzeyin mikroyapı özellikleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. SEM analizi, yüzeydeki TiO_2 partiküllerinin dağılımını, yoğunluğunu ve kaplama kalınlığını belirlemeye yardımcı olmuştur. Bu analiz, kaplamaların homojenliğini değerlendirmek ve yüzeydeki morfolojik özellikleri gözlemek açısından önemli bir araç olarak kullanılmıştır. Yüksek çözünürlüklü SEM görüntüleri, kullanılan çözücünün TiO_2 kaplamasının yapısal özelliklerine etkisini incelemek için faydalı olmuştur.

X-Işını Kırınımı (XRD) analizi ile TiO_2 kaplamasının kristal yapısı incelenmiştir. XRD analizinde elde edilen kırınım desenleri, TiO_2 kaplamasının kristal fazlarını belirlemek için kullanılmıştır. Çözücü olarak etanol ile hazırlanmış TiO_2 kaplamasının kristal yapısındaki farklılıklar gözlemlenmiş, bu da kaplamanın kristal fazlarının (anatase veya rutile) oluşum oranları hakkında bilgi sağlamıştır. XRD sonuçları, etanolün TiO_2 'nin kristalizasyon süreci üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla analiz edilmiştir.

2.4.6. Boyaların Hazırlanması ve Cama Uygulanması

Tez çalışmasının temel amacı olan boyar maddelerin boya duyarlı güneş pillerinin performansına etkilerinin incelenmesi için, TiO_2 kaplı cam yüzeyler üzerine dört farklı boya uygulanmıştır. Bu kapsamda, ticari N719 boyası, karayemiş (*Laurocerasus officinalis* M.Roem.) ekstraktı, kokulu kara üzüm ekstraktı ve likarba ekstraktı kullanılarak boyaların güneş pili performansına etkileri değerlendirilmiştir.

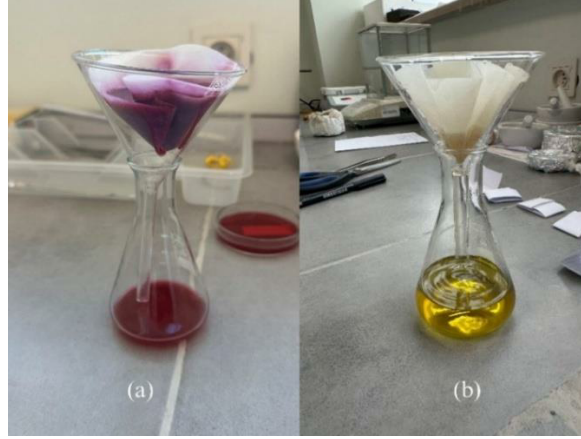
Ticari olarak temin edilen N719 boyası, kullanıma hazır çözelti halinde olmadığından etanol ile seyreltilerek hazırlanmıştır. Bu işlemde, 1 g N719 boya tozu, 100 ml etanolde çözülerek homojen bir çözelti elde edilmiştir. TiO_2 kaplı cam, hazırlanan bu çözelti içine daldırılmış ve 24 saat boyunca karanlık ortamda bekletilmiştir. Bu süreç, boyanın cam

yüzeyine adsorpsiyonunu sağlayarak, N719'un TiO_2 yüzeyiyle etkileşimini optimize etmiştir.

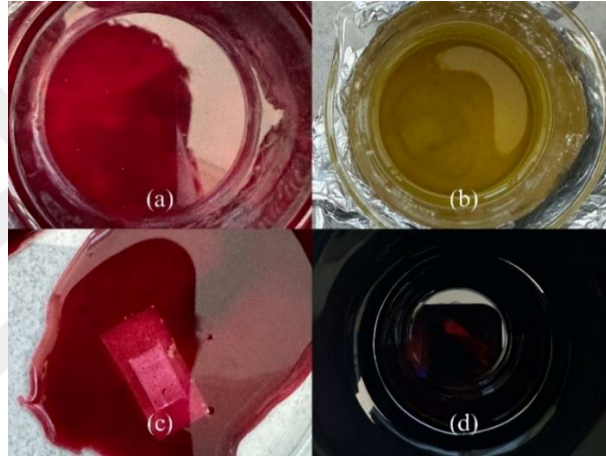
Karayemiş (*Laurocerasus officinalis* M.Roem.) boyar madde olarak, karayemiş kabuklarından elde edilen özüt kullanılmıştır. İlk olarak, karayemiş kabukları 60 °C'de 4 saat etüvde kurutulmuştur. Daha sonra, bir beher içine konulan 100 ml etanole, beherdeki hacim 125 ml seviyesine ulaşana kadar kurutulmuş karayemiş kabukları eklenmiştir. Karışım, 150 °C'lik bir ısıtıcı tabla üzerinde etanol hacmi 50 ml'ye düşene kadar yaklaşık 3 saat boyunca kaynatılmıştır. Bu işlemle, karayemiş kabuklarındaki boya maddesinin etanole ekstrakte edilmesi sağlanmıştır. Elde edilen karışım oda sıcaklığında soğutulduktan sonra, TiO_2 kaplı cam bu çözelti içine daldırılmış ve 24 saat boyunca karanlık ortamda bekletilmiştir. Bu süreç, boyanın cam yüzeyine adsorpsiyonunu sağlayarak, boyanın TiO_2 yüzeyiyle etkileşimini optimize etmiştir.

Kokulu kara üzüm (*Vitis vinifera* L.) boyar maddesi olarak, %100 saf kokulu kara üzüm suyu (Natuva markası) tercih edilmiştir. Boyanın etkinliğini artırmak ve daha homojen bir kaplama elde etmek amacıyla, üzüm suyu önce filtre kâğıdı yardımıyla yaklaşık 2 saat boyunca posasından ayrılması için süzölmeye bırakılmıştır. Elde edilen berrak üzüm suyu, boyama işlemi için saf boya kaynağı olarak kullanılmıştır. TiO_2 kaplı cam yüzey, bu saf boya çözeltisine daldırılmış ve boyanın cam yüzeylere tam olarak nüfuz edebilmesi için 24 saat kapalı ve karanlık bir ortamda bekletilmiştir. Bu yöntem, boyanın cam yüzeyde eşit ve tutarlı bir dağılımını sağlamış, doğal bir boya kaynağı olan üzüm suyunun tüm potansiyelini açığa çıkarmıştır.

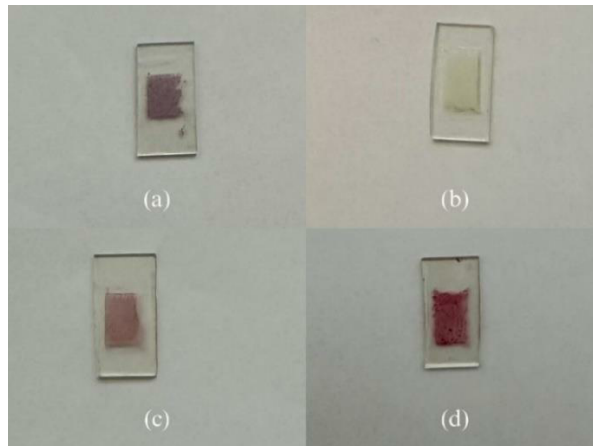
Likarba (*Vaccinium arctostaphylos* L.) boyar maddesi olarak taze likarba meyveleri kullanılmıştır. Boyama işlemi için, taze likarba meyveleri ezilerek elde edilen özüt dikkatlice süzölmüştür. TiO_2 kaplı cam yüzey, bu doğal boya çözeltisine tamamen daldırılmış ve boyanın yüzeylere homojen şekilde nüfuz etmesi için 24 saat karanlık bir ortamda bekletilmiştir. Bu yöntem, doğal likarba boyasının cam yüzeylerde eşit bir şekilde dağılımını sağlayarak etkili bir kaplama elde edilmesini mümkün kılmıştır.



Şekil 13. Kokulu kara üzüm (a) ve karayemiş (b) boyasının eldesi



Şekil 14. Camın (a) kokulu üzüm, (b) karayemiş, (c) likarba ve (d) N719 boyasına daldırılması



Şekil 15. Boyaya daldırılıp 24 saat bekletildikten sonra ITO camlar
(a) Kokulu kara üzüm (b) Karayemiş (c) Likarba (d) N719

2.4.7. Katot Kısımının Hazırlanması

Katot hazırlama işlemi, boya duyarlı güneş pillerinin verimli çalışabilmesi için büyük bir özenle gerçekleştirilmiştir. İşlem, ilk olarak elektrolit damlatma amacıyla ITO camına delik açma aşamasıyla başlamıştır. Bu aşamada, 2 cm × 1 cm boyutlarındaki ITO camının iletken olmayan kısmına, belirli bir hassasiyetle delikler açılmıştır. Delik açma işlemi sırasında, ince uçlu bir matkap kullanılarak 5 mm × 5 mm'lik bir alanın iki köşesine simetrik olarak delikler delinmiştir. Bu işlem, cam yüzeyine zarar vermeden, deliklerin homojen ve düzgün bir şekilde açılmasını sağlamak amacıyla düşük hızda ve kontrollü bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Açılan deliklerin amacı, elektrolitin yalnızca belirlenen alanlara ulaşmasını sağlamak, katot ve anot arasındaki istenmeyen karışımı önlemek ve pilin yapısal bütünlüğünü korumaktır (Polat vd., 2017).

Delik açma işleminin ardından, 2 cm × 1 cm boyutlarındaki iletken yüzeye sahip ITO camının belirli bir bölgesine (yaklaşık üçte ikilik kısmına) pastör pipeti kullanılarak yaklaşık 3 ml platin çözeltisi dikkatlice uygulanmıştır. Çözeltinin yüzeye homojen bir şekilde yayılması sağlandıktan sonra ısıtım işlem sürecine geçilmiştir. İlk olarak, çözeltideki fazla çözücünün buharlaşmasını sağlamak amacıyla ITO camı 200 °C'de 1 dakika süreyle ısıtılmıştır. Daha sonra, platin tabakasının yüzeye güçlü bir şekilde bağlanmasını ve elektrokatalitik özelliklerini kazanmasını sağlamak için 450 °C'de 10 dakika boyunca işlem görmüştür. Son olarak, yapının stabilize edilmesi ve gerilmelerin minimize edilmesi amacıyla ITO camı tekrar 200 °C'de 1 dakika süreyle ısıtılmıştır.



Şekil 16. (a) Delinen ve platin kaplanan camların ısıtılması (b) hazır hale getirilmesi

2.4.8. Elektrolitin Hazırlanması

BDGP (Boya Duyarlı Güneş Pili) sisteminin çalışma mekanizmasında kritik bir rol oynayan elektrolit çözeltisinin hazırlanması aşamasında, belirli miktarlarda iyot ve potasyum iyodür kullanılarak redoks çiftinin oluşması sağlanmıştır.

Öncelikle, uygun bir karıştırma kabına hassas terazide ölçülen 0,127 gram iyot (I_2) ve 0,83 gram potasyum iyodür (KI) eklenmiştir. Bu iki bileşen, karıştırıldıklarında hızlı bir şekilde tepkimeye girmiş ve çözeltinin rengi açık kahverengiye dönüşmüştür. Bu renk değişimi, iyot ve potasyum iyodür arasındaki redoks reaksiyonunun başladığını ve I^-/I_3^- (iyot/triiyodür) redoks çiftinin oluşumunu göstermektedir (URL-6, 2025).

İlk reaksiyon tamamlandıktan sonra, karışıma çözücü olarak 10 ml etilen glikol eklenmiştir. Etilen glikol, çözeltinin viskozitesini artırarak elektrolit tabakasının güneş pilinde daha stabil bir şekilde yerleşmesini sağlar. Çözücü eklendikten sonra, karışım iyice homojen hale gelene kadar sürekli olarak karıştırılmıştır. Etilen glikol, redoks çiftini çözerek I^-/I_3^- iyonlarının çözelti içinde dengeli bir dağılım göstermesini sağlamıştır.

Bu hazırlık işlemi sonucunda, BDGP hücresinde elektron transferini sağlayacak olan elektrolit çözeltisi elde edilmiştir. Hazırlanan elektrolit, pil sistemine enjekte edilmek üzere uygun koşullarda saklanmıştır.

2.4.9. Camların Birleştirilmesi ve Boya Duyarlı Güneş Pilinin Oluşturulması

Son aşamada, boya duyarlı güneş pili (BDGP) hücrelerinin nihai montajı, katmanların uygun şekilde birleştirilmesi ve hücre yapısının bütünlüğünün sağlanması amacıyla özenle gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte hem boyalı anot hem de platin kaplı katot arasındaki bağlantının güçlü ve sızdırmaz bir yapıya kavuşması için özel bir yöntem uygulanmıştır.

Öncelikle, anot ve katot arasında bağlantı sağlamak için parafilm kullanılmıştır. Parafilm, yaklaşık 1 cm × 1 cm boyutlarında kesilerek hücre tasarımına uygun hale getirilmiştir. Ayrıca, elektrolit çözeltisinin elektrot yüzeylerine temasını kolaylaştırmak amacıyla filmin orta kısmına 5 mm × 5 mm boyutlarında kare şeklinde bir boşluk açılmıştır. Bu hazırlık aşamasından sonra, parafilm dikkatlice boyalı anot yüzeyi ile platin kaplı katot arasına yerleştirilmiştir.

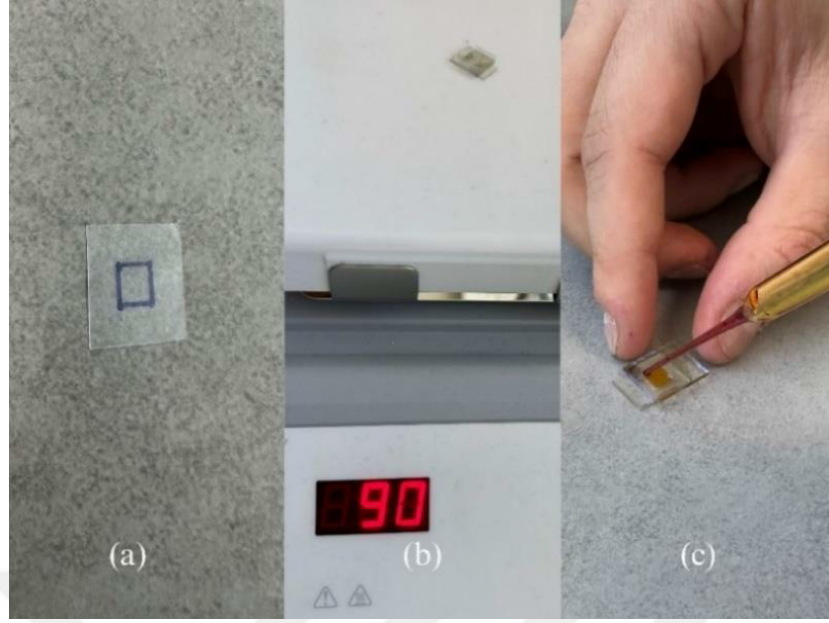
Katmanların birleşimini tamamlamak ve sızdırmaz bir yapı oluşturmak için montajlanan hücre, yaklaşık 90 °C sıcaklığa ayarlanmış bir ısıtıcı tablada 5 dakika boyunca işlem görmüştür. Bu aşamada, parafilm erimesiyle anot ve katot arasında güçlü bir

yapışma sağlanmıştır. Isıtma işleminin ardından hücre, mekanik gerilmeleri azaltmak ve yapının stabilize olmasını sağlamak amacıyla oda sıcaklığında 5 dakika süreyle soğutulmuştur.

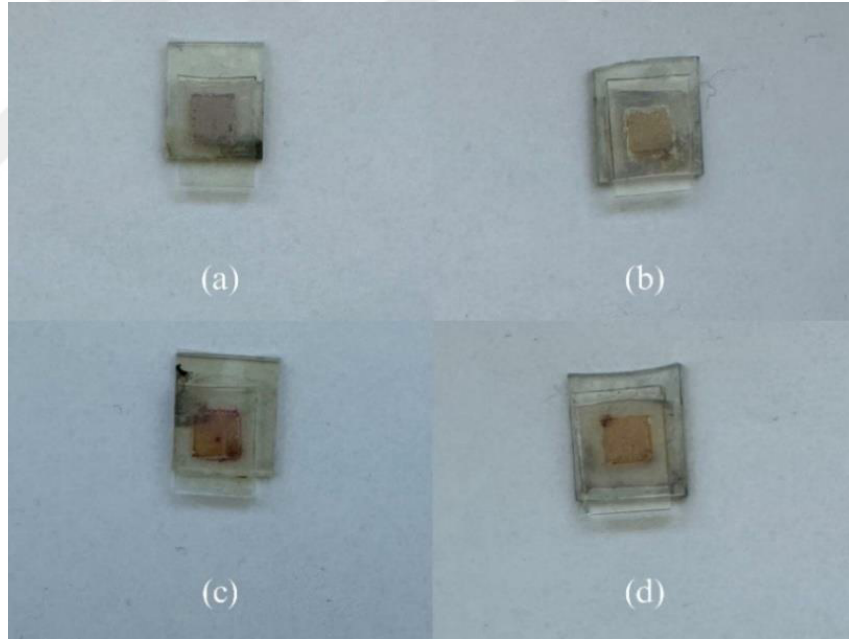
Montajın ardından, daha önce delinmiş katot kısmı kullanılarak bir şırınga yardımıyla elektrolit çözeltisi dikkatlice uygulanmıştır. Elektrolit, hücre tasarımında bırakılmış 5 mm × 5 mm'lik boşluk alanına damlatılmış ve bu sayede TiO₂ kaplı anot yüzeyiyle doğru şekilde temas etmesi sağlanmıştır. Bu adım, hücre içindeki iyonik iletkenliği artırarak elektrokimyasal tepkimelerin verimli bir şekilde gerçekleşmesine olanak tanımıştır.

Tüm montaj işlemleri tamamlandıktan sonra, BDGP (Boya Duyarlı Güneş Pili) hücrelerinin performans testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testler, Karadeniz Teknik Üniversitesi (KTÜ) Fizik Bölümü laboratuvarında yapılmış olup, ilk olarak multimetre ile hücrelerin güneş pili özelliği gösterip göstermediği belirlenmiştir. Ardından, güneş pillerinin fotovoltaiik performansı daha ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmek üzere güneş simülatörüne taşınmıştır. Simülatör altında yapılan ölçümlerle, hücrelerin enerji dönüşüm verimliliği ve elektriksel özellikleri kaydedilerek analiz edilmiştir. I-V (akım-voltaj) karakteristikleri, hücrenin verimliliği ve çalışma sınırları hakkında bilgi sağlamak amacıyla dikkatlice incelenmiştir.

Bulgular ve tartışma bölümünde ölçümleri tamamlanan organik boya duyarlı güneş pillerinin analiz sonuçları tartışılmıştır.



Şekil 17. (a) Parafilm kesilmesi (b) Anot ve katot arasında parafilmin erimesi için ısıtılması (c) Elektrolitin pastör pipeti ile delikten hazırlanan güneş piline enjekte edilmesi

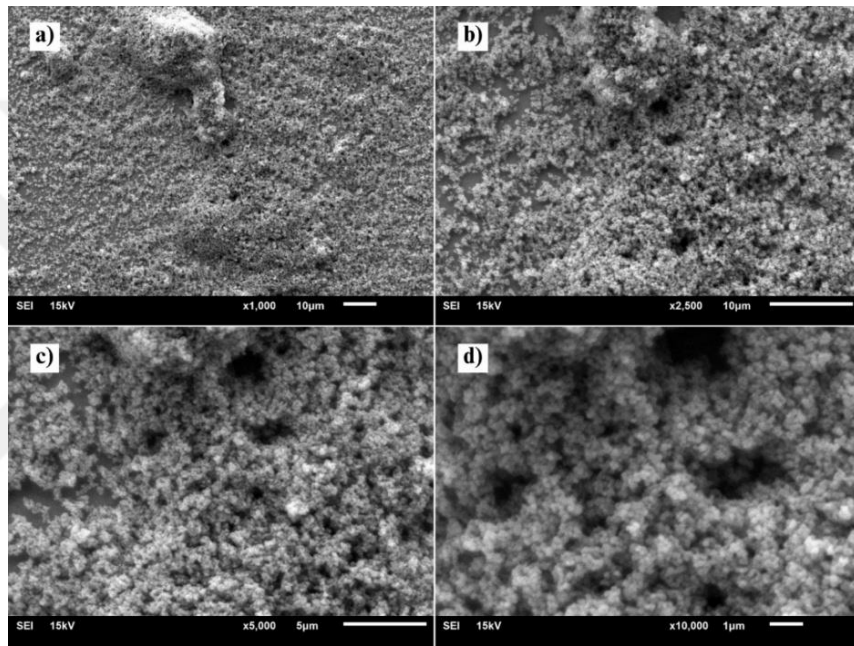


Şekil 18. Boya duyarlı güneş pilinin son hali
(a) Kokulu kara üzüm (b) Karayemiş (c) Likarba (d) N719

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Titanyum Dioksit Tozunun SEM Analizi

Şekil 19, TiO_2 nanopartiküllerinin farklı yakınlaştırma derecelerindeki ($1000\times$, $2500\times$, $5000\times$ ve $10.000\times$) üstten görünüş SEM (Scanning Electron Microscopy) görüntülerini sunmaktadır.



Şekil 19. TiO_2 dağılımının farklı yakınlaştırma seviyelerinde SEM görüntüleri: (a) $1000\times$, (b) $2500\times$, (c) $5000\times$, (d) $10.000\times$

Görüntüler, TiO_2 nanopartiküllerinin yüzey morfolojisini ve dağılımını ayrıntılı bir şekilde inceleme olanağı sunmaktadır. Yapılan analizler, partiküllerin genel olarak orta düzeyde homojen bir dağılıma sahip olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, Şekil 19 (a) incelendiğinde, belirli bölgelerde partikül yoğunluğunun arttığı ve bu alanlarda aglomera (yığılma) oluşumunun meydana geldiği tespit edilmiştir. Yakınlaştırma derecesi artırıldığında ise, Şekil 19 (b), Şekil 19 (c) ve Şekil 19 (d)'de bazı bölgelerde boşlukların (voids) olduğu gözlemlenmiştir.

Bu durum, nanopartiküllerin kalsinasyon süreci sırasında meydana gelen sinterleme etkisiyle birleşerek daha büyük yapılar oluşturmasından kaynaklanabilir. Ayrıca, yüzeydeki boşluklar, partiküllerin düzenlenme sürecindeki kinetik sınırlamalardan veya kullanılan

çözücünün buharlaşma hızından ileri gelmiş olabilir. Elde edilen sonuçlar, partikül dağılımı ve morfolojisinin, kalsinasyon sıcaklığı, çözücü seçimi ve hazırlama koşulları gibi süreç parametrelerinden doğrudan etkilendiğini ortaya koymaktadır.

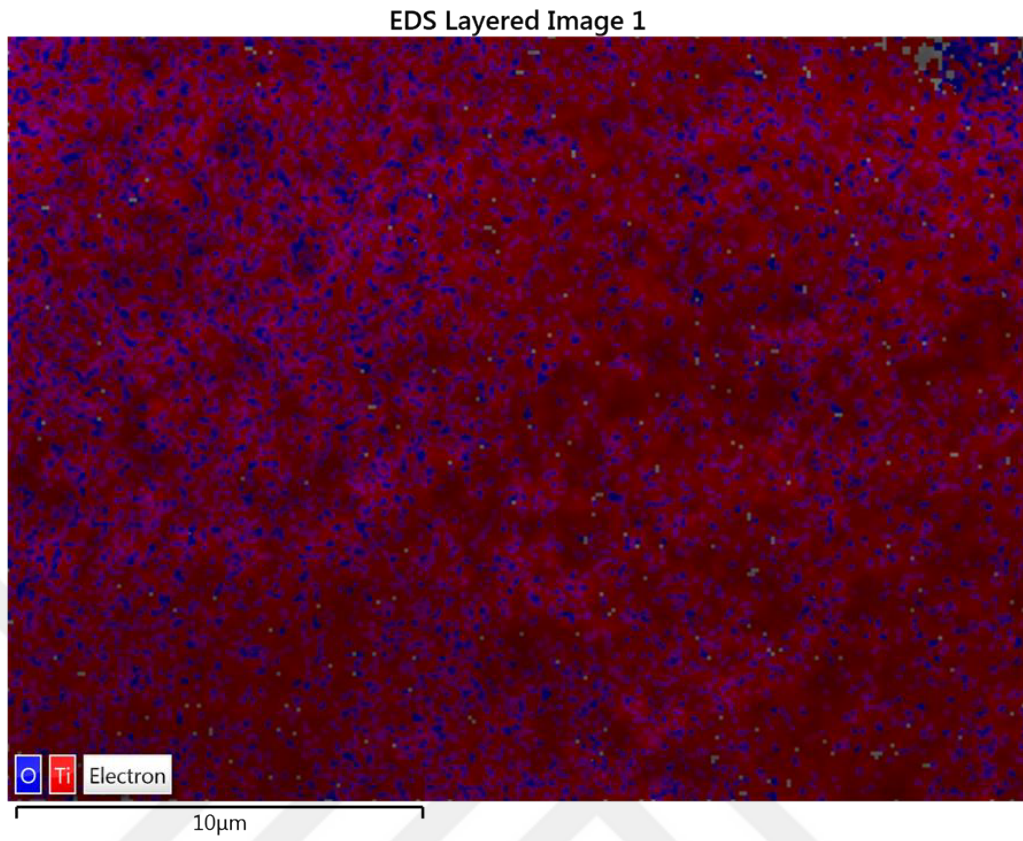
3.2. Titanyum Dioksit Tozunun EDS Analizi

Şekil 20’de, TiO_2 nanopartiküllerinin EDX (Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi) element haritasını, Şekil 21’de ise Toplam Spektrum (Map Sum Spectrum) analizi sunulmaktadır.

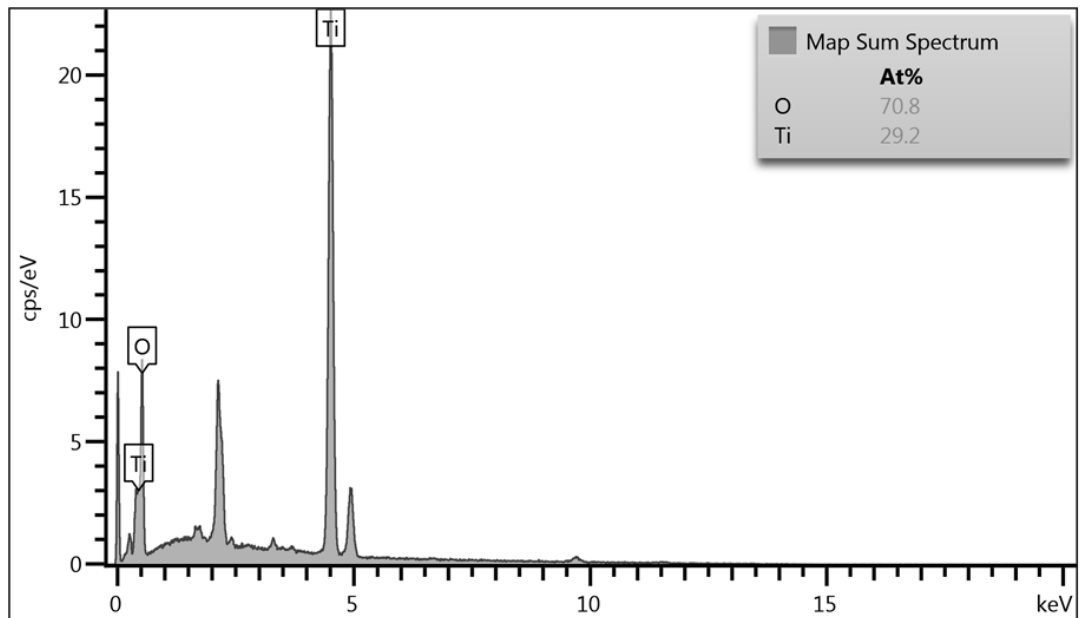
Titanyumun (Ti) kırmızı renk ile, oksijenin (O) ise mavi renk ile temsil edildiği Şekil 20 incelendiğinde 10 μm ölçeğinde elde edilen görüntüde, elementlerin genel olarak homojen bir şekilde dağıldığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, bazı bölgelerde oksijen (O) birikimi gözlemlenmiştir. Bu durum, malzemenin yüzeyindeki elementlerin büyük ölçüde homojen dağıldığını, ancak yer yer oksijenin yoğunlaştığı bölgelerin oluştuğunu göstermektedir. Bu da yüzeydeki yapıların dinamik ve karmaşık bir düzen içinde şekillendiğini ortaya koymaktadır.

Şekil 21 incelendiğinde yapılan kantitatif analiz sonucunda, TiO_2 nanopartiküllerinin atomik yüzdeleri (at%) oksijen (O) için %70,8 ve titanyum (Ti) için %29,2 olarak belirlenmiştir. Bu oran, TiO_2 ’nin stokiyometrik formülüne ($\text{Ti}:\text{O} = 1:2$) oldukça yakın olduğunu ve hazırlanan TiO_2 kimyasal bileşiminin doğru bir şekilde elde edildiğini göstermektedir. Elde edilen atomik oranlar, malzemenin saflığının yüksek olduğunu ve üretim sürecinde istenilen kimyasal bileşimin büyük ölçüde sağlandığını doğrulamaktadır. Ayrıca, bu sonuçlar TiO_2 ’nin potansiyel uygulamalar için uygun kimyasal yapıya sahip olduğunu ve malzemenin stabilitesinin sağlandığını ortaya koymaktadır.

Bu sonuçlar, TiO_2 nanopartiküllerinin üretim sürecinde başarılı bir şekilde sentezlendiğini, yüzeyde homojen bir element dağılımının sağlandığını ve kimyasal bileşiminin TiO_2 formülüne uygun olduğunu doğrulamaktadır.



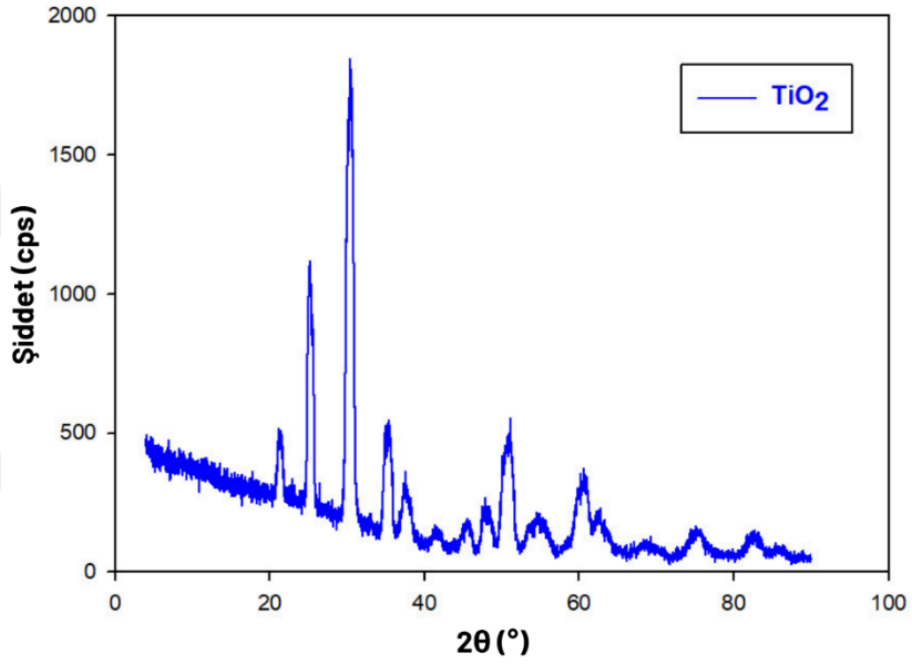
Şekil 20. EDX element haritalaması



Şekil 21. Toplam Spektrum (Map Sum Spectrum) analizi

3.3. Titanyum Dioksit Tozunun XRD Analizi

X-ışını kırınımı (XRD) analizi, TiO_2 'nin kristal yapısını ve fazlarını karakterize etmek için gerçekleştirilmiştir. Ölçümler, 20° ile 100° arasındaki 2θ değerleri aralığında yapılmış olup, TiO_2 'nin kristal fazlarına ilişkin karakteristik pike işaret eden belirgin zirveler gözlemlenmiştir. Şekil 22'de XRD analizinden elde edilen TiO_2 'nin difraktogramı sunulmaktadır.



Şekil 22. TiO_2 difraktogramının XRD analizi

Elde edilen difraktogramda, en yüksek şiddetli pik değeri yaklaşık $30,07^\circ$ 'de gözlemlenmiş ve şiddeti 1850 cps olarak ölçülmüştür. Bu pik, TiO_2 'nin anataz fazının (101) düzlemine karşılık gelmektedir ve bu fazın kristal yapısı içinde baskın olduğunu göstermektedir. Bunun yanı sıra, $25,05^\circ$, $35,30^\circ$ ve $50,79^\circ$ civarlarında daha düşük şiddetli zirveler tespit edilmiştir. Yaklaşık 25° 'de elde edilen pik, şiddet değeri 1100 cps ile TiO_2 'nin yine anataz fazına ait (004) düzlemine işaret etmektedir. 35° ve 50° 'de sırasıyla 500 cps ve 600 cps şiddet değerlerine sahip pikler ise anataz fazındaki sırasıyla (200) ve (105) düzlemleriyle ilişkilendirilmektedir. TiO_2 'nin XRD deseninden elde edilen bu pikler, literatürde rapor edilen anataz fazının karakteristik pik değerleriyle uyum göstermektedir. Bu sonuçlar, numunenin ağırlıklı olarak anataz fazında kristalize olduğunu ve bu fazın

kristalin saflığının yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, piklerin dar olması ve belirgin bir şekilde ayırt edilebilmesi, TiO_2 'nin iyi kristalize olduğunu ve yapısal bozulmaların minimum seviyede olduğunu göstermektedir (Wang vd., 2014).

Kristalin saflığını değerlendirmek amacıyla, anataz fazının yanı sıra rutil ve brookite gibi diğer olası TiO_2 fazlarına ait karakteristik pikler de incelenmiştir. XRD deseninde, yalnızca anataz fazına ait pikler değil, aynı zamanda aşağıdaki noktalarda başka pikler de gözlemlenmiştir: Yaklaşık 20° 'de elde edilen pik, şiddet değeri 524 cps ile TiO_2 'nin anataz fazına ait (100) düzlemine işaret etmektedir. 37° 'de gözlemlenen 300 cps şiddetindeki pik, anataz fazına ait (004) düzlemiyle ilişkilendirilmektedir. 41° 'de elde edilen 160 cps'lik pik ise (121) düzlemiyle uyumludur. 45° ve 47° 'de sırasıyla 190 cps ve 242 cps şiddetlerinde gözlemlenen pikler ise (200) ve (105) düzlemleriyle ilişkilendirilmektedir. 54° 'deki 210 cps'lik pik, anataz fazına ait (211) düzlemine işaret ederken, 60° 'deki 360 cps'lik pik (204) düzlemiyle ilişkilendirilmektedir. 62° 'de gözlemlenen 219 cps şiddetindeki pik ise (116) düzlemiyle uyumludur. 70° 'de elde edilen 136 cps'lik pik (220) düzlemiyle ilişkilendirilmiştir. 75° ve 82° 'de sırasıyla 160 cps ve 148 cps şiddetinde elde edilen pikler, (215) ve (224) düzlemleriyle ilişkilendirilmektedir. Son olarak, 86° 'de gözlemlenen 101 cps şiddetindeki pik, (303) düzlemiyle uyumludur. Bu veriler, TiO_2 'nin yalnızca anataz fazına ait düzlemleri değil, aynı zamanda diğer fazlara ait düzlemlerle de ilişkili olan farklı piki de içerdiğini göstermektedir (Pratheepa vd., 2017).

Sonuç olarak, yapılan XRD analizi, incelenen TiO_2 örneğinin baskın şekilde anataz fazında olduğunu ve kristalin saflığının yüksek düzeyde olduğunu doğrulamaktadır. Ayrıca, XRD pik şiddetlerinin yüksekliği, bu fazın numune içinde büyük bir orana sahip olduğunu desteklemektedir. Bu bulgular, TiO_2 'nin kristal yapısının istenen özelliklere sahip olduğunu ve malzemenin uygulamalar için uygun bir morfolojiye sahip olduğunu göstermektedir.

3.4. Boyanın UV-Vis Analizi

Likarba ekstraktının ışık absorpsiyon özelliklerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen UV-Vis spektrofotometri analizi sonucunda elde edilen spektrum Şekil 23'te verilmiştir. Analiz, 300-800 nm aralığında gerçekleştirilmiş olup, absorbans değerleri dalga boyuna bağlı olarak incelenmiştir.

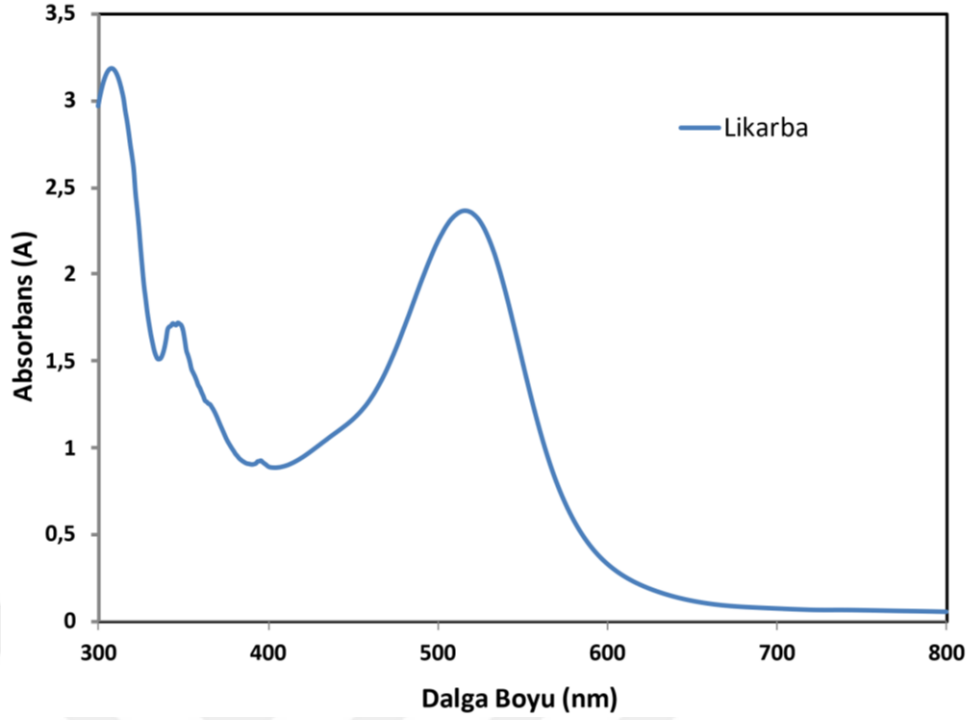
Spektral analiz incelendiğinde, ekstraktın 320 nm civarında ($\sim 3,2$ A) güçlü bir absorbans piki gösterdiği tespit edilmiştir. Bu bölge, genellikle UV bölgesi olup, ekstrakt

içerisindeki konjuge sistemler veya fenolik bileşiklerin varlığına işaret etmektedir. Ancak, BDGP uygulamalarında UV ışığı hücre verimliliğine doğrudan katkı sağlayamadığından, bu pikin güneş pili performansına etkisi sınırlı olacaktır (Narayan, 2012).

BDGP’de verimli bir ışık hasadı için görünür bölgedeki absorpsiyon kritik önem taşımaktadır. Likarba ekstraktının 530-540 nm aralığında ($\sim 2,3$ A) belirgin bir absorbans pikine sahip olduğu görülmektedir. Bu bölge, antosiyaninler gibi doğal pigmentlerin absorpsiyon özellikleri ile ilişkilendirilebilir ve ekstraktın görünür bölgedeki ışık hasadı kapasitesini göstermektedir. Ancak, absorpsiyon değerlerinin 600 nm’den sonra hızla azalması, kırmızı ve yakın kızılötesi bölgede etkin bir ışık hasadının gerçekleşemeyeceğini göstermektedir (Calogero vd., 2009).

Fotovoltaik uygulamalar açısından değerlendirildiğinde, BDGP’de kullanılan ticari N719 boyası 400-600 nm aralığında geniş bir absorpsiyon spektrumuna sahipken, likarba ekstraktının absorpsiyon spektrumu daha dar bir bant aralığında yoğunlaşmıştır. Bu durum, ekstraktın ışık hasadı kapasitesini sınırlandırabilir ve hücrenin genel fotovoltaik verimini etkileyebilir.

Sonuç olarak, likarba ekstraktı BDGP’de görünür bölgede ışık absorbe edebilme potansiyeline sahip olmakla birlikte, absorpsiyon spektrumunun genişliği ve kızılötesi bölgede düşük absorpsiyon göstermesi nedeniyle, geniş spektrumlu bir güneş ışığı soğurucu olarak yeterli olup olmadığı ek çalışmalarla değerlendirilmelidir. Özellikle absorpsiyon spektrumunun genişletilmesi amacıyla pH ayarlaması, metal kompleksleme veya farklı çözücülerle ekstraksiyon gibi yöntemlerin uygulanması, likarba bazlı BDGP’nin performansını artırmaya yönelik gelecekteki çalışmalar için önerilmektedir.



Şekil 23. Likarbanın UV-Vis analizi

3.5. Hazırlanan Boya Duyarlı Güneş Pillerinin Fotovoltaik Performansları

3.5.1. N719 Referans Boyalı BDGP'nin Karakterizasyonu

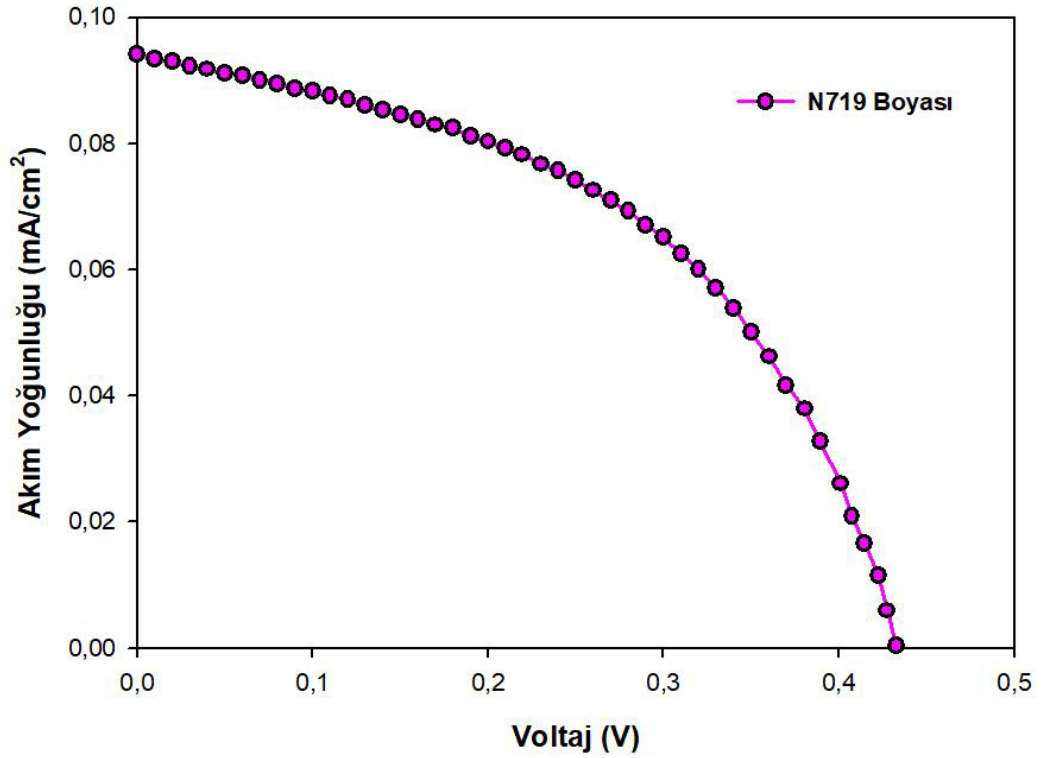
Şekil 24 ve Şekil 25'te sırasıyla referans boya olarak kullanılan N719 boyası ile hazırlanan boya duyarlı güneş pilinin (BDGP) *I-V* ve *P-V* eğrisi gösterilmektedir.

Şekil 24'te yer alan *J-V* eğrisine bakıldığında, BDGP'nin geleneksel güneş pili tasarımlarına benzer bir akım yoğunluğu-voltaj ilişkisi sergilediği açıkça gözlemlenmektedir. Bu eğri, pilin ışık altında ürettiği kısa devre akım yoğunluğunun 0,095 mA/cm² ve açık devre voltajının ise 0,433 V civarında olduğunu göstermektedir. *J-V* eğrisindeki bu veriler, pilin maksimum güç noktasındaki akım yoğunluğu ve voltaj değerlerini de belirlemeye olanak tanımaktadır. Eğriden elde edilen verilere göre, maksimum akım yoğunluğu yaklaşık 0,065 mA/cm² ve maksimum voltaj ise yaklaşık 0,300 V olarak yorumlanmaktadır.

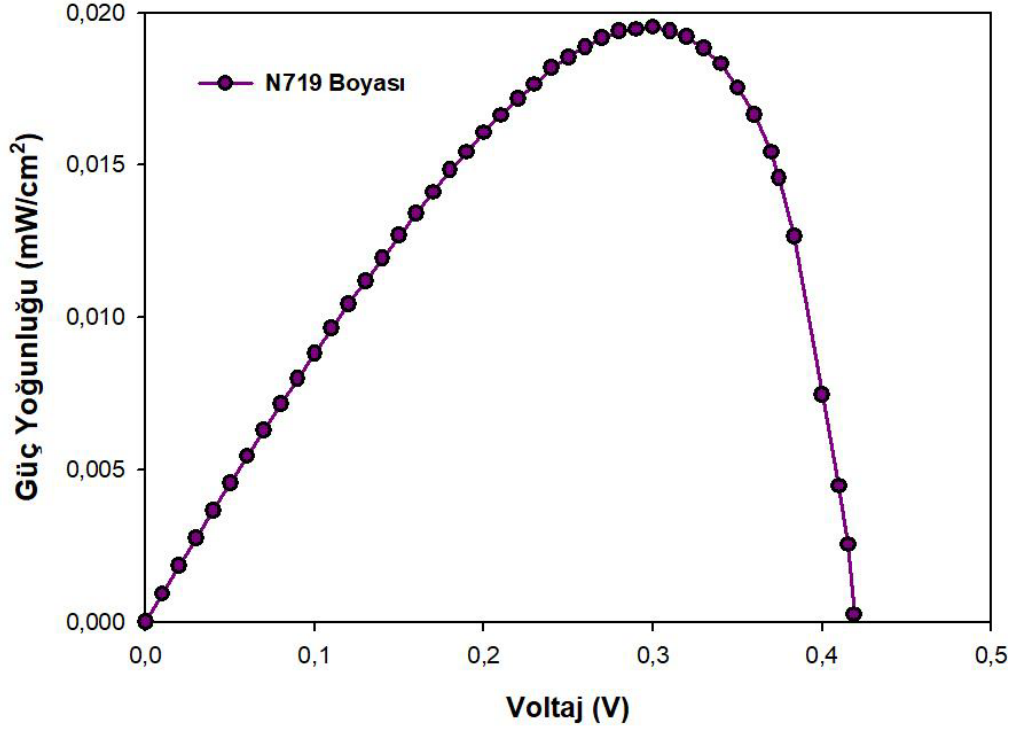
Şekil 25'te yer alan *P-V* eğrisine bakıldığında ise BDGP'nin güç yoğunluğunun voltaj ile değişim gösterdiği görülmektedir. Maksimum güç yoğunluğu 0,0195 mW/cm² olarak ölçülmüş ve bu, BDGP'nin en yüksek verimle çalıştığı noktayı göstermektedir. *P-V*

eğrisindeki maksimum güç noktaları, BDGP'nin genel verimliliğini ve elektriksel performansını daha iyi değerlendirebilmek için önemli bir referans noktasıdır.

Sonuç olarak, elde edilen veriler değerlendirildiğinde, N719 boyar maddesi ile hazırlanan BDGP'nin ışık altında iyi bir fotovoltaiik performans sergilediği görülmektedir. Akım yoğunluğu ve güç yoğunluğu eğrileri, BDGP'nin açık devre gerilimi, kısa devre akım yoğunluğu ve maksimum güç noktasındaki değerlerinin, BDGP'lerin karakteristiğine uygun olduğunu göstermektedir. Maksimum güç yoğunluğu $0,0195 \text{ mW/cm}^2$ olarak ölçülmüş ve bu değer, N719 boyar maddesinin etkili bir duyarlayıcı olarak çalıştığını desteklemektedir. Bununla birlikte, doldurma faktörü ve genel verimlilik gibi parametreler göz önüne alındığında, BDGP'nin performansını artırmak için elektrot malzemesi, elektrolit içeriği veya boya adsorpsiyon süresi gibi faktörlerin optimize edilmesi gerektiği söylenebilir.



Şekil 24. N719 maddesinin *J-V* eğrisi



Şekil 25. N719 maddesinin P - V eğrisi

3.5.2. Likarba Boyalı BDGP'nin N719 ile Karşılaştırmalı Karakterizasyonu

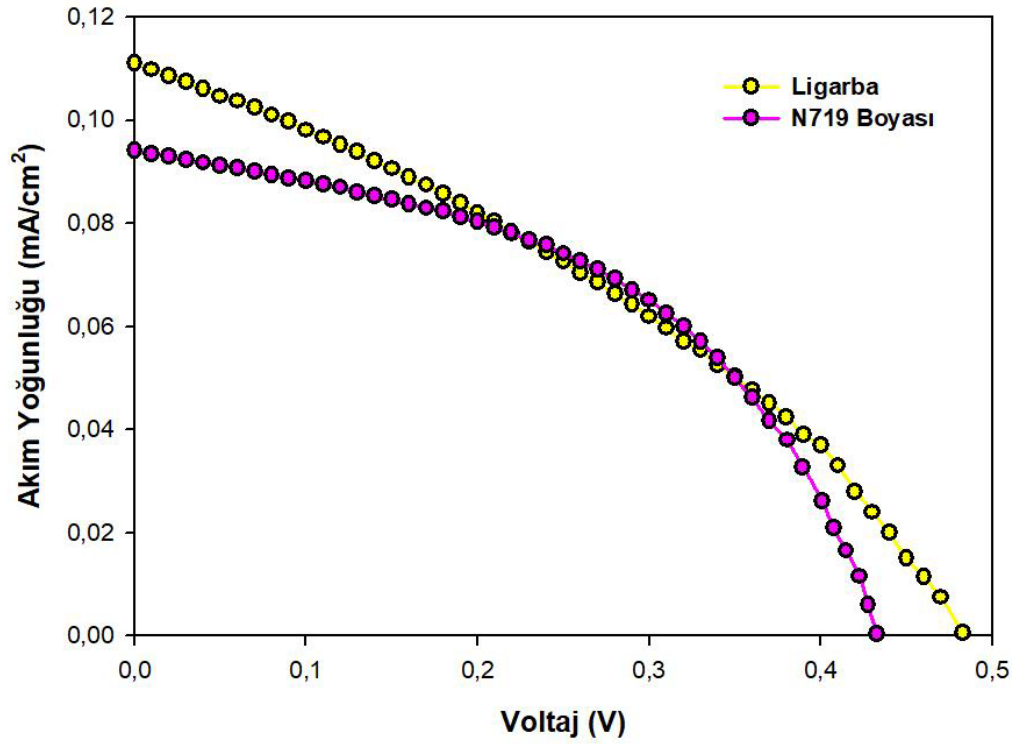
Şekil 26 ve Şekil 27'de sırasıyla organik boya olarak kullanılan likarba (mavi yemiş) ile hazırlanan boya duyarlı güneş pilinin N719 referans boyası ile karşılaştırmalı J - V eğrileri ve P - V eğrileri gösterilmektedir.

Şekil 26 incelendiğinde, Likarba organik boyar maddesi ve N719 boyar maddesi kullanılarak hazırlanan BDGP'nin J - V eğrilerinde benzer voltaj aralıklarında çalıştıkları görülmektedir. Ancak, kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}) açısından Likarba boyar maddesi, N719'a kıyasla daha yüksek bir değer sergileyerek ışık absorpsiyon kapasitesinin veya elektron transfer veriminin daha iyi olabileceğini ortaya koymaktadır. Açık devre gerilimi (V_{oc}) karşılaştırıldığında ise Likarba boyar maddesinin daha yüksek bir V_{oc} değerine sahip olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, akım yoğunluğunun voltaja bağlı değişimi incelendiğinde, Likarba boyar maddesinin J değerinin daha yavaş azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, taşıyıcı taşınım mekanizması veya hücre içerisindeki seri direnç ile ilişkili olabilir. Öte yandan, N719 boyar maddesinin referans boya olmasına rağmen daha düşük J_{sc} ve V_{oc} değerleri sergilemesi, boya adsorpsiyon süresi, çözücü etkisi veya TiO_2 yüzeyiyle etkileşimi gibi faktörlerden kaynaklanıyor olabilir. Genel olarak, elde edilen J - V eğrileri,

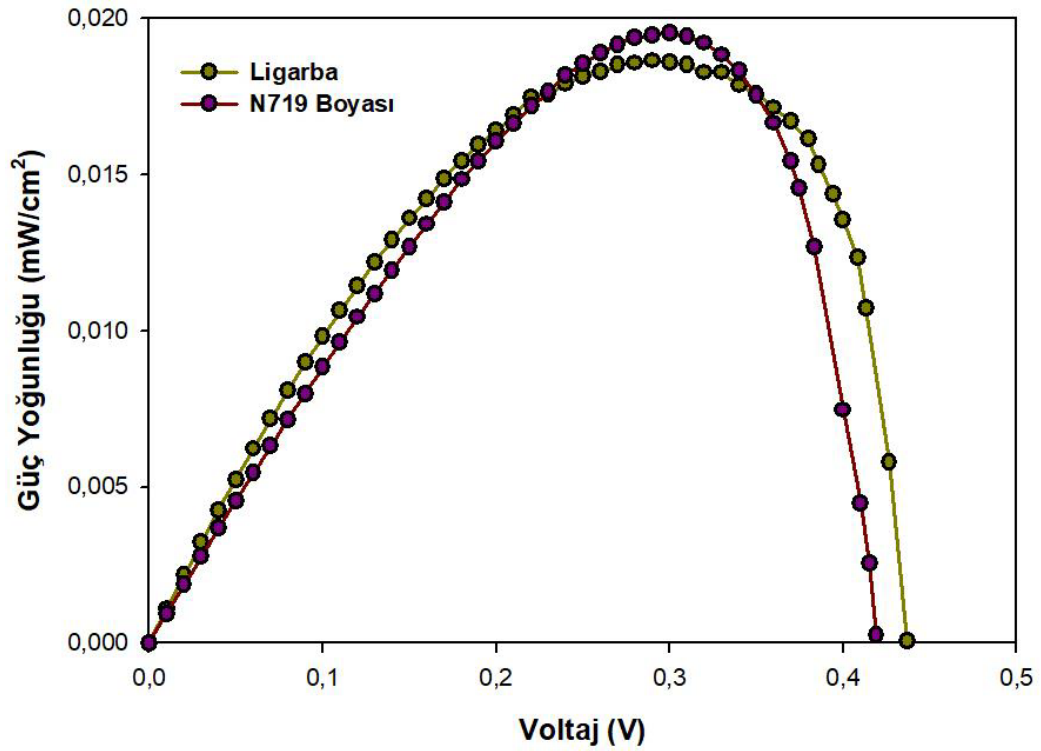
Likarba boyar maddesinin BDGP’de potansiyel bir alternatif duyarlayıcı boya olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir.

Şekil 27’de ise, aynı boyarların P - V eğrileri karşılaştırılmıştır. Her iki boyanın da benzer bir güç yoğunluğu profili sergilediği, ancak maksimum güç yoğunluğu (P_{max}) açısından N719 boyar maddesinin Likarba’ya kıyasla daha yüksek bir değere ulaştığı görülmektedir. Bu durum, N719 boyasının daha dengeli bir elektron transfer süreci veya daha iyi bir enerji seviyesine sahip olabileceğini düşündürmektedir. Ayrıca, yapılan hesaplamalar sonucunda doldurma faktörünün (FF) N719 boyar maddesi için %48, Likarba için ise %35 olduğu belirlenmiştir. Bu fark, Likarba boyasının iç direnç kaynaklı kayıplarının daha fazla olduğunu ve hücre verimliliğinin N719’a kıyasla daha düşük seviyede kaldığını göstermektedir. Maksimum güç noktası (MPP) değerlendirildiğinde, N719 boyar maddesinin maksimum güce ulaştığı voltajın Likarba ile benzer olduğu, ancak güç yoğunluğunun daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç, N719 ile hazırlanan BDGP’nin daha iyi bir fotogerilim verimliliğine sahip olduğunu desteklemektedir. Şekildeki eğrilerin simetrik yapısı, cihazların doğrusal olmayan karakteristiğini ve güç üretiminin voltaja bağlı değişimini ortaya koymaktadır.

Genel olarak, Likarba organik boyar maddesi BDGP performansında rekabetçi bir duyarlayıcı olarak değerlendirilebilse de hesaplanan doldurma faktörü ve maksimum güç değerleri dikkate alındığında, verimlilik açısından N719 boyasının halen daha üstün olduğu söylenebilir.



Şekil 26. Ligarba ve N719 maddesinin J - V eğrileri



Şekil 27. Ligarba ve N719 maddesinin P - V eğrileri

3.5.3. Kokulu Üzüm Boyalı BDGP'nin N719 ile Karşılaştırmalı Karakterizasyonu

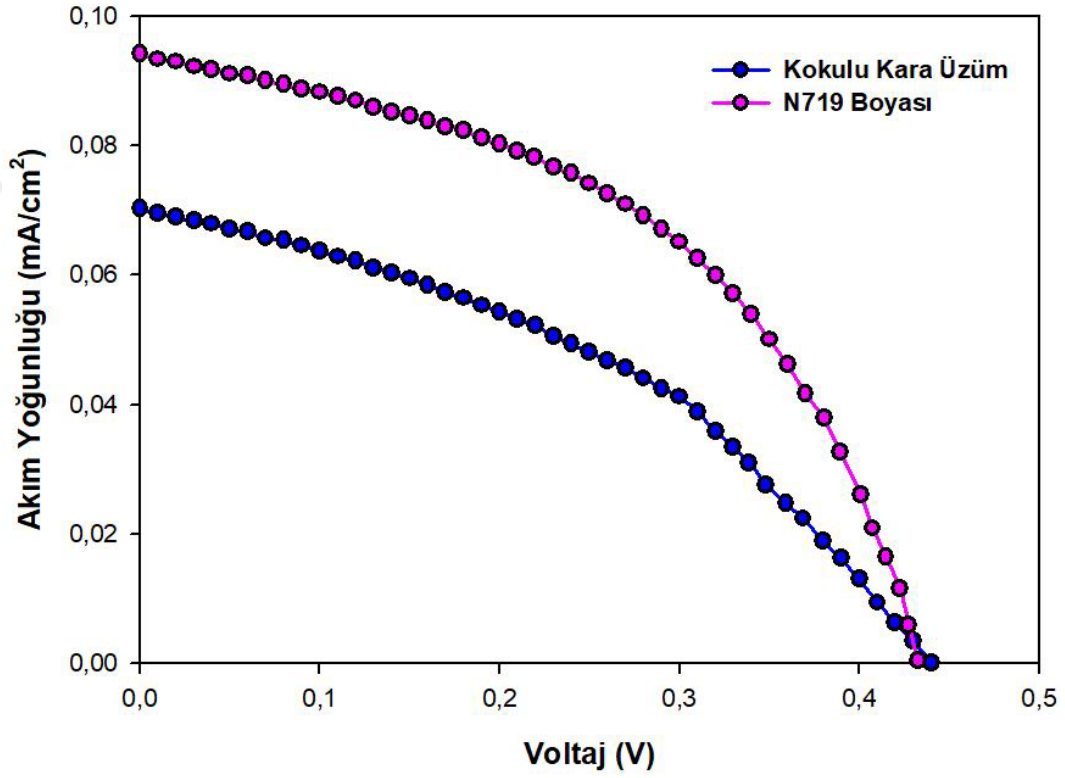
Şekil 28 ve Şekil 29'da sırasıyla organik boya olarak kullanılan kokulu kara üzüm ile hazırlanan boya duyarlı güneş pilinin N719 referans boyası ile karşılaştırmalı J - V eğrisi ve P - V eğrisi gösterilmektedir.

Şekil 28 incelendiğinde, kokulu kara üzüm ve N719 boyar maddesi kullanılarak hazırlanan BDGP'nin J - V eğrisinde benzer voltaj aralıklarında çalıştıkları görülmektedir. Ancak, kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}) açısından N719 boyar maddesi, kokulu kara üzüme kıyasla daha yüksek bir değer sergileyerek ışık absorpsiyon kapasitesinin veya elektron transfer veriminin daha iyi olabileceğini ortaya koymaktadır. Açık devre gerilimi (V_{oc}) karşılaştırıldığında ise N719 boyar maddesinin daha yüksek bir V_{oc} değerine sahip olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, akım yoğunluğunun voltaja bağlı değişimi incelendiğinde, kokulu kara üzüm boyar maddesinin J değerinin daha yavaş azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, taşıyıcı taşınım mekanizması veya hücre içerisindeki seri direnç ile ilişkili olabilir. Öte yandan, N719 boyar maddesinin referans boya olmasına rağmen daha yüksek J_{sc} ve V_{oc} değerleri sergilemesi, boya adsorpsiyon süresi, çözücü etkisi veya TiO_2 yüzeyiyle etkileşimi gibi faktörlerden kaynaklanıyor olabilir. Genel olarak, elde edilen J - V eğrileri, kokulu kara üzüm boyar maddesinin BDGP'de potansiyel bir alternatif duyarlayıcı boya olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir.

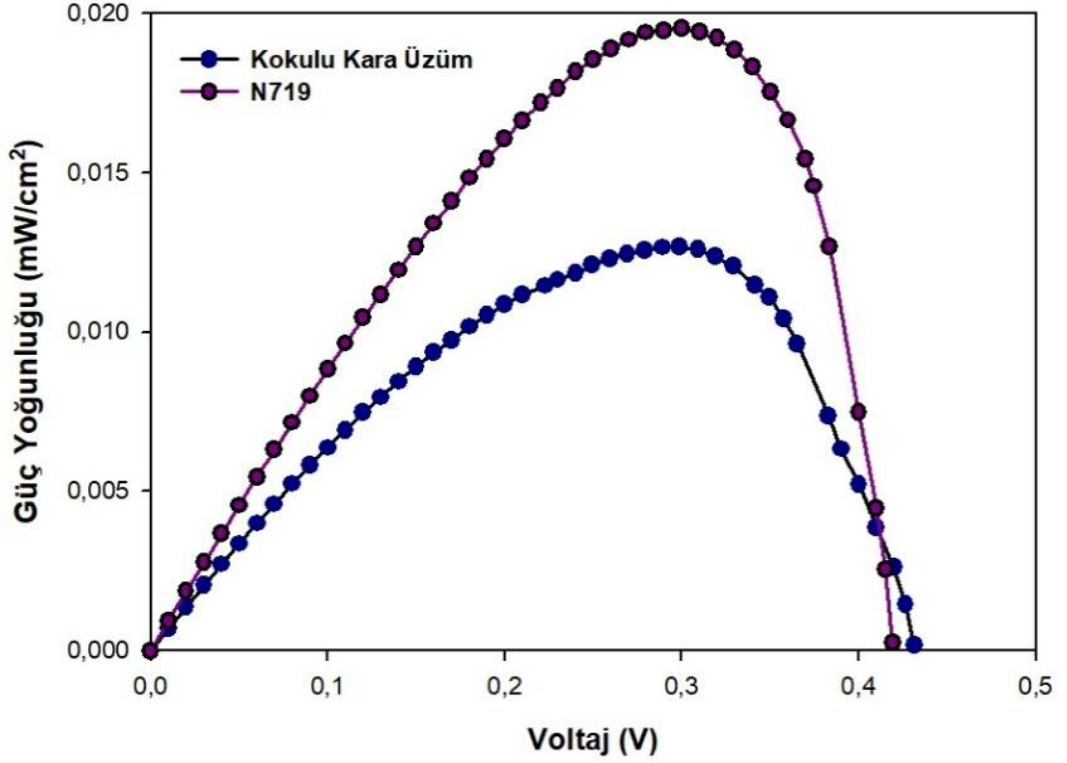
Şekil 29'da ise, aynı boyarların P - V eğrileri karşılaştırılmıştır. Her iki boyanın da benzer bir güç yoğunluğu profili sergilediği, ancak maksimum güç yoğunluğu (P_{max}) açısından N719 boyar maddesinin kokulu kara üzüme kıyasla daha yüksek bir değere ulaştığı görülmektedir. Bu durum, N719 boyasının daha dengeli bir elektron transfer süreci veya daha iyi bir enerji seviyesine sahip olabileceğini düşündürmektedir. Ayrıca, yapılan hesaplamalar sonucunda doldurma faktörünün (FF) N719 boyar maddesi için daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu fark, kokulu kara üzüm boyasının iç direnç kaynaklı kayıplarının daha fazla olduğunu ve hücre verimliliğinin N719'a kıyasla daha düşük seviyede kaldığını göstermektedir. Maksimum güç noktası (MPP) değerlendirildiğinde, N719 boyar maddesinin maksimum güce ulaştığı voltajın kokulu kara üzüm ile benzer olduğu, ancak güç yoğunluğunun daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç, N719 ile hazırlanan BDGP'nin daha iyi bir fotogerilim verimliliğine sahip olduğunu desteklemektedir. Şekildeki eğrilerin

simetrik yapısı, cihazların doğrusal olmayan karakteristiğini ve güç üretiminin voltaja bağlı değişimini ortaya koymaktadır.

Genel olarak, kokulu kara üzüm boyar maddesi BDGP performansında rekabetçi bir duyarlayıcı olarak değerlendirilebilse de hesaplanan doldurma faktörü ve maksimum güç değerleri dikkate alındığında, verimlilik açısından N719 boyasının halen daha üstün olduğu söylenebilir.



Şekil 28. Kokulu Kara Üzüm ve N719 maddesinin J - V eğrileri



Şekil 29. Kokulu Kara Üzüm ve N719 maddesinin P - V eğrileri

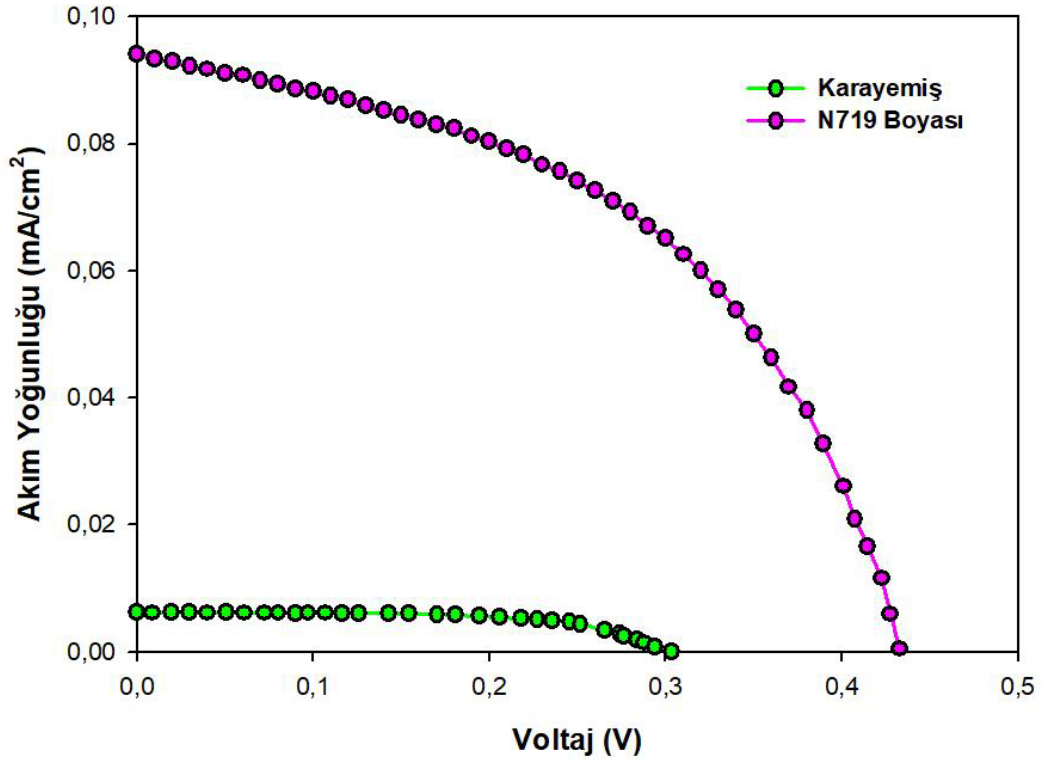
3.5.4. Karayemiş Boyalı BDGP'nin N719 ile Karşılaştırmalı Karakterizasyonu

Şekil 30 ve Şekil 31'de sırasıyla organik boya olarak kullanılan karayemiş ile hazırlanan boya duyarlı güneş pilinin N719 referans boyası ile karşılaştırmalı J - V eğrisi ve P - V eğrisi gösterilmektedir.

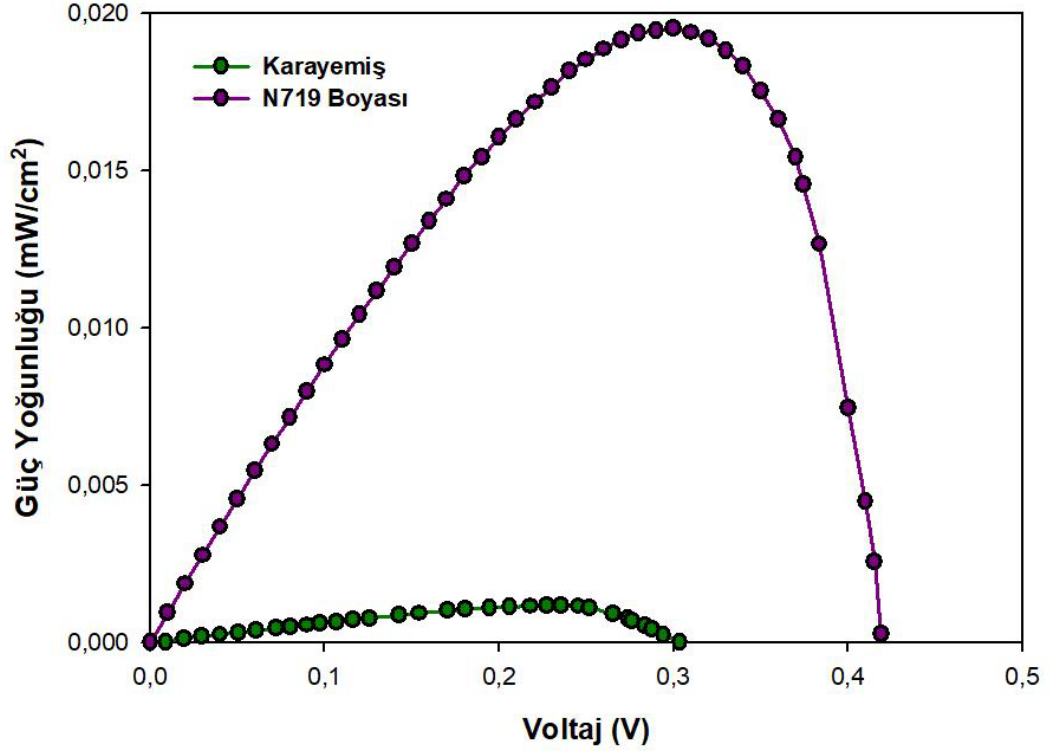
Şekil 30 incelendiğinde, karayemiş ve N719 boyar maddesi kullanılarak hazırlanan BDGP'nin J - V eğrilerinde, N719 boyasının çok daha yüksek bir kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}) ve açık devre gerilimi (V_{oc}) sergilediği görülmektedir. Karayemiş boyar maddesiyle hazırlanan BDGP'nin J_{sc} değerinin oldukça düşük olduğu ve akım yoğunluğunun voltaja bağlı değişiminin N719'a kıyasla çok daha sınırlı kaldığı belirlenmiştir. Bu durum, karayemiş boyasının ışık absorpsiyon kapasitesinin veya elektron transfer etkinliğinin N719'a kıyasla daha düşük olabileceğini göstermektedir. Ayrıca, karayemiş BDGP'nin V_{oc} değerinin de oldukça düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, boya adsorpsiyon süresi, çözücü etkisi veya TiO_2 yüzeyiyle etkileşimi gibi faktörlerden kaynaklanıyor olabilir. Genel olarak, elde edilen J - V eğrileri, karayemiş boyar maddesinin BDGP'de düşük akım üretme kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir.

Şekil 31’de ise, aynı boyarların P - V eğrileri karşılaştırılmıştır. N719 boyar maddesi, maksimum güç yoğunluğu (P_{max}) açısından karayemişe kıyasla çok daha yüksek bir değere ulaşmıştır. Karayemiş ile hazırlanan BDGP’nin maksimum güç yoğunluğunun oldukça düşük olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, maksimum güç noktası (MPP) değerlendirildiğinde, N719 ile hazırlanan BDGP’nin çok daha yüksek bir güç yoğunluğu sağladığı ve genel verimliliğinin daha üstün olduğu açıkça görülmektedir. Doldurma faktörü (FF) açısından da N719 boyasının karayemiştten çok daha yüksek bir değer sunduğu tahmin edilmektedir. Karayemiş BDGP’de düşük güç çıkışı, iç direnç kaynaklı kayıpların fazla olduğunu ve verimliliğin düşük seviyede kaldığını göstermektedir.

Genel olarak, karayemiş boyar maddesi BDGP’de duyarlayıcı olarak değerlendirilebilse de hesaplanan J_{sc} , V_{oc} ve P_{max} değerleri dikkate alındığında, verimlilik açısından N719 boyasının açık ara daha üstün olduğu söylenebilir.



Şekil 30. Karayemiş ve N719 Maddesinin I-V eğrileri



Şekil 31. Karayemiş ve N719 Maddesinin P - V eğrileri

3.5.5. Hazırlanan Doğal BDGP'nin Karşılaştırmalı Karakterizasyonu

Şekil 32 ve Şekil 33'te sırasıyla likarba, kokulu kara üzüm ve karayemiş ile hazırlanan boya duyarlı güneş pillerinin karşılaştırmalı J - V eğrileri ve P - V eğrileri gösterilmektedir.

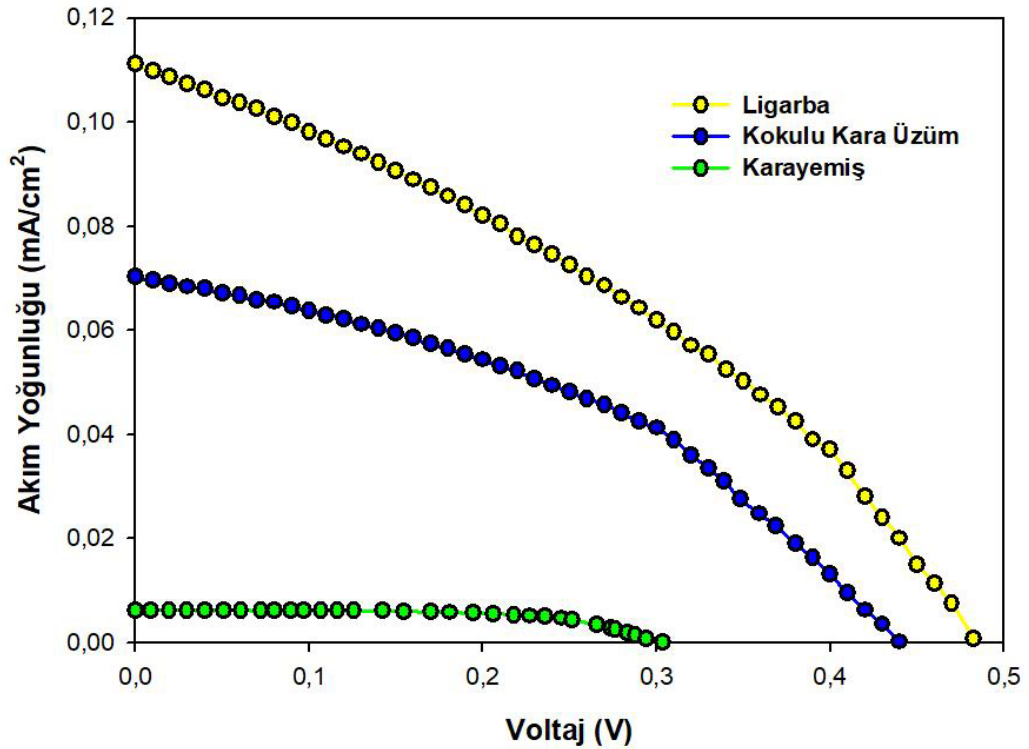
Şekil 32'de bulunan J - V eğrisi incelendiğinde, en yüksek kısa devre akım yoğunluğunun Likarba ile hazırlanan pilde olduğu gözlemlenmektedir. Likarba, yaklaşık $0,11 \text{ mA/cm}^2$ kısa devre akım yoğunluğu ile en iyi performansı sergilerken, Kokulu Kara Üzüm ile hazırlanan pil $0,07 \text{ mA/cm}^2$, Karayemiş ile hazırlanan pil ise $0,006 \text{ mA/cm}^2$ civarında bir kısa devre akım yoğunluğu göstermektedir. Açık devre voltajları incelendiğinde ise, Likarba ve Kokulu Kara Üzüm pillerinin yaklaşık $0,42 \text{ V}$, Karayemiş'in ise $0,30 \text{ V}$ civarında bir açık devre voltajına sahip olduğu görülmektedir. Genel olarak, Likarba en yüksek akım yoğunluğu değerine sahipken, Kokulu Kara Üzüm biraz daha düşük ancak Karayemiş'ten önemli ölçüde daha iyi bir performans sergilemiştir.

Bu pillerin iç direnç özellikleri incelendiğinde, şönt direncinin (R_{sh}) Likarba bazlı hücrede en yüksek, Kokulu Kara Üzüm bazlı hücrede daha düşük ve Karayemiş bazlı hücrede en düşük olduğu görülmektedir. Yüksek şönt direnci, sızıntı akımlarını minimize ederek daha yüksek verimlilik sağladığından, Likarba'nın en iyi performansı göstermesiyle

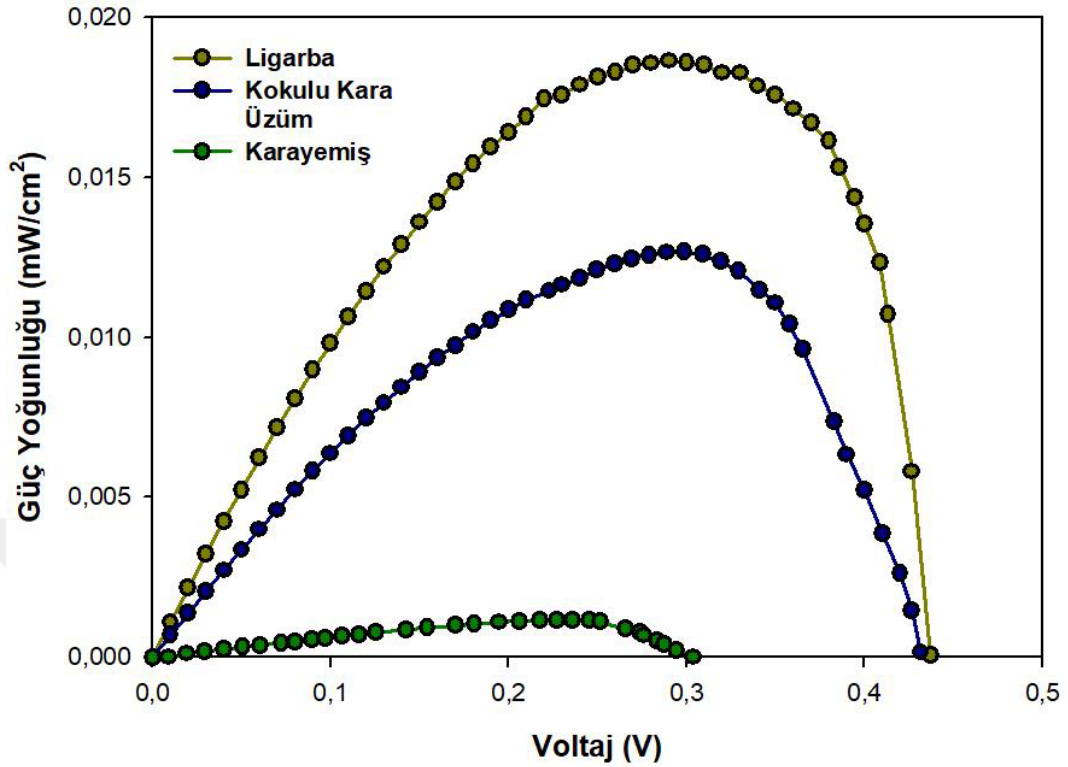
uyumlu bir sonuç ortaya çıkmaktadır. Seri direnç (R_s) açısından değerlendirildiğinde ise, en yüksek değer Karayemiş'te, daha düşük değer Kokulu Kara Üzüm'de ve en düşük değer Likarba'da ölçülmüştür. Yüksek seri direnç, iç kayıpları artırarak akım yoğunluğunu düşürdüğü için, Karayemiş'in zayıf performansı da bu durumla açıklanabilir.

Şekil 33'te bulunan $P-V$ eğrisinde ise, güç yoğunluğu bakımından en yüksek performansı yine Likarba göstermektedir. Likarba ile hazırlanan pilin maksimum güç yoğunluğu yaklaşık $0,0185 \text{ mW/cm}^2$ olarak hesaplanırken, Kokulu Kara Üzüm için bu değer $0,012 \text{ mW/cm}^2$, Karayemiş için ise $0,0025 \text{ mW/cm}^2$ seviyelerinde ölçülmüştür. Bu sonuçlar, Likarba'nın boya duyarlı güneş pillerinde en yüksek verimi sunduğunu, Kokulu Kara Üzüm'ün de makul bir performans gösterdiğini ancak Karayemiş'in diğerlerine kıyasla oldukça düşük bir verime sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, değerlendirilen üç doğal boya arasında Likarba en yüksek akım yoğunluğu, voltaj ve güç yoğunluğunu sağlayarak en verimli güneş pili malzemesi olarak öne çıkmaktadır. Kokulu Kara Üzüm de nispeten iyi bir performans sergilemiştir, ancak Likarba'nın gerisinde kalmaktadır. Karayemiş ise en düşük verime sahip olup, diğer iki boya ile karşılaştırıldığında güneş pili uygulamaları açısından daha zayıf bir performans göstermektedir.



Şekil 32. Likarba, kokulu kara üzüm ve karayemişin $J-V$ eğrileri



Şekil 33. Likarba, kokulu kara üzüm ve karayemişin P - V eğrileri

3.5.6. N719 ve Organik BDGP'nin Fotovoltaik Parametrelerinin Karşılaştırılması

Referans boya N719 ve likarba, kokulu kara üzüm ve karayemiş doğal boyaların fotovoltaik parametreleri Tablo 4'te gösterilmiştir:

Tablo 4. N719 boyası ve organik boyaların fotovoltaik parametreleri

Boyar Madde	J_{sc} ($mA\ cm^{-2}$)	V_{oc} (V)	P_{max} (mW/cm^2)	FF (%)	η (%)
N719	0,095	0,43	0.0195	48.0	0,020
Likarba	0,111	0,48	0.0186	35.0	0,019
Kokulu Üzüm	0,0703	0,44	0.0126	41.0	0,013
Karayemiş	0,006	0,30	0.00116	64.0	0,001

N719 boyası ile karşılaştırıldığında, likarba boyası kullanılarak hazırlanan boya duyarlı güneş pili, kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}) açısından daha yüksek bir performans sergilemiştir. Likarba boyasının J_{sc} değeri $0,111\ mA/cm^2$ iken, N719 boyasında bu değer $0,095\ mA/cm^2$ olarak ölçülmüştür. Benzer şekilde, açık devre voltajı (V_{oc}) da likarba

boyasında 0,48 V ile N719 boyasındaki 0,43 V'un üzerindedir. Ancak, güç yoğunluğu (P_{max}) açısından N719 boyası 0,0195 mW/cm² ile üstünlük sağlarken, likarba boyasının P_{max} değeri 0,0186 mW/cm² olarak belirlenmiştir. Doldurma faktörü (FF) değerlendirildiğinde, likarba boyası %35 ile N719 boyasının %48'lik doldurma faktörünün altında kalmıştır. Bu durum, likarba boyasının elektriksel verimlilik açısından N719 boyasına kıyasla daha düşük bir yük taşıma kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Verimlilik açısından ise N719 boyasının %0,02 ile likarba boyasının %0,019 değerine göre bir miktar daha yüksek bir performans sergilediği görülmektedir.

Kokulu üzüm boyası kullanılarak elde edilen güneş pili, kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}) açısından N719 boyasından daha düşük bir değere sahiptir. Kokulu üzüm boyasının J_{sc} değeri 0,0703 mA/cm² iken, N719 boyasında bu değer 0,095 mA/cm² olarak ölçülmüştür. Açık devre voltajı (V_{oc}) açısından değerlendirildiğinde ise kokulu üzüm boyası 0,44 V ile N719 boyasına yakın bir performans göstermektedir. Güç yoğunluğu (P_{max}) ve doldurma faktörü (FF) açısından incelendiğinde, kokulu üzüm boyasının sırasıyla 0,0126 mW/cm² ve %41 değerleriyle, N719 boyasına kıyasla daha düşük bir güç çıkışı ve yük taşıma kapasitesi sunduğu görülmektedir. Bu sonuçlar doğrultusunda, kokulu üzüm boyasının verimliliği %0,013 olarak hesaplanmış olup, N719 boyasının %0,02'lik verimliliğinin altında kalmaktadır.

Karayemiş boyası ise N719 boyasına kıyasla çok daha düşük fotovoltaiik parametreler sergilemiştir. Kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}) 0,006 mA/cm² ve açık devre voltajı (V_{oc}) 0,30 V ile, N719 boyasında ölçülen 0,095 mA/cm² ve 0,43 V değerlerinin oldukça gerisindedir. Benzer şekilde, güç yoğunluğu (P_{max}) ve verimlilik açısından da karayemiş boyası oldukça düşük performans göstermiştir. Karayemiş boyasının P_{max} değeri 0,00116 mW/cm² ve verimliliği %0,001 olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte, doldurma faktörü (FF) %64 olarak ölçülmüş olup, N719 boyasının %48'lik doldurma faktöründen daha yüksektir. Bu durum, karayemiş boyasının yüksek doldurma faktörüne rağmen, düşük J_{sc} ve V_{oc} değerleri nedeniyle toplam verimlilik açısından yetersiz kaldığını ortaya koymaktadır.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Doğu Karadeniz Bölgesi'ne özgü kokulu kara üzüm, karayemiş ve likarba meyvelerinden elde edilen doğal boyaların, ticari N719 boyasıyla karşılaştırılarak BDGP'lerdeki fotovoltaiik performansı incelenmiştir. Çalışma sonucunda, kokulu kara üzüm boyasının en yüksek fotovoltaiik verimi sağladığı belirlenmiştir, karayemiş boyası düşük adsorpsiyon kapasitesi ve zayıf elektron enjeksiyonu nedeniyle daha düşük verim göstermiştir. Tüm doğal boyalar, ticari N719 boyası ile kıyaslandığında daha düşük verim elde etmiştir. SEM analizleri, TiO_2 filminin gözenekli ve homojen bir yapıya sahip olduğunu, XRD analizleri ise TiO_2 'nin anataz fazında baskın olduğunu ortaya koymuştur. EDS sonuçları ise TiO_2 'nin yüksek saflıkta olduğunu ve belirgin bir safsızlık içermediğini göstermektedir. BDGP üretiminde kullanılan malzemelerin toplam maliyeti ise yaklaşık olarak 7,75 \$ olarak hesaplanmıştır ve düşük maliyetli doğal boyaların çevre dostu alternatifler olarak potansiyel sunduğu gözlemlenmiştir.

Fotovoltaiik verimin artırılabilmesi için, doğal boyaların kimyasal stabilitesinin, elektron transfer verimliliğinin ve TiO_2 yüzeyiyle olan etkileşimlerinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca, TiO_2 ile güçlü etkileşim gösteren boyaların kullanımı verimliliği artıracaktır. Doğal boyaların modifikasyonu ve karışım boyalarla sinerjik etkilerinin araştırılması da daha yüksek fotovoltaiik performans sağlanmasına katkı sunabilir. Elektrolit bileşenlerinin optimizasyonu, BDGP'lerin verimini artırabilir ve ticari rekabet avantajı kazandırabilir. Endüstriyel ölçekte üretim ve alternatif malzemelerin kullanımı ile maliyetlerin optimize edilmesi mümkündür. Gelecekte, farklı meyve türlerinden elde edilen doğal boyaların fotovoltaiik performanslarının daha detaylı bir şekilde incelenmesi önerilmektedir.

5. KAYNAKLAR

- Adedokun, O., Titilope, K., & Awodugba, A. O. (2016). Review on Natural Dye-Sensitized Solar Cells (DSSCs). *International Journal of Engineering Technologies IJET*, 2(2), 34-41.
- Al-Alwani, M. A., Ludin, N. A., Mohamad, A. B., Kadhum, A. A. H., & Sopian, K. (2017). Extraction, preparation and application of pigments from Cordyline fruticosa and Hylocereus polyrhizus as sensitizers for dye sensitized solar cells. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 179, 23-31.
- Alor, K. P., Ezekoye, B. A., Ugwuoke, P. E., Offiah, S. U., Ezema, F. I., Akor, S., Okafor, I. F., & Ekechukwu, O. V. (2023). A review of advances on natural dye sensitized solar cells (NDSSCs). *Journal of Engineering Research and Reports*, 25(10), 153–166.
- Ardağ, Y. (2012). *Güneş Pili Karakteristiklerinin İncelenmesi*. Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Denizli.
- Arslan, İ. (2018). *Tekirdağ Koşullarında Polikristal ve Monokristal Tip PV Güneş Panellerinin Verimlilik Karşılaştırılması*. Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Tekirdağ.
- Aslan, E. (2021). *Yüksek Verimli Perovskite Güneş Pillerinin Üretilmesi, Kararlılığının Artırılması ve 2 İnç²'lik Modül Üretilmesi*. Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya.
- Bagher, A.M., Vahid, M.M.A., Mohsen, M. (2015). Types Of Solar Cells and Application. *American Journal Of Optics And Photonics*, 3(5), 94-113.
- Battaglia, C., Cuevas, A., & De Wolf, S. (2016). High-efficiency crystalline silicon solar cells: status and perspectives. *Energy and Environmental Science*, 9(5), 1552-1576.
- Battal Het, G. (2020). Organik boya duyarlı güneş pilleri üzerine yapılan bir araştırma. *Uluslararası Sürdürülebilir Mühendislik ve Teknoloji Dergisi*, 1(4), 1-6.
- Bhogaita, M., Shukla, A., & Nalini, R. (2016). Recent advances in hybrid solar cells based on natural dye extracts from Indian plant pigment as sensitizers. *Solar Energy*, 137, 212.
- Calogero, G., & Di Marco, G. (2008). Red Sicilian orange and purple eggplant fruits as natural sensitizers for dye-sensitized solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92(11), 1341–1346.
- Calogero, G., Di Marco, G., Caramori, S., Cazzanti, S., Argazzi, R., & Bignozzi, C. A. (2009). Natural dye sensitizers for photoelectrochemical cells. *Energy & Environmental Science*, 2(11), 1162–1172.
- Can, C. (2019). *Boyaya Duyarlı Güneş Pilleri*. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta.

- Cari, C., Khairuddin, K., Septiawan, T., Suci atmoko, P., Kurniawan, D., & Supriyanto, A. (2018). The preparation of natural dye for dye-sensitized solar cell (DSSC). *AIP Conference Proceedings*, 2014, 020106.
- Celep, E., Aydın, A., & Yesilada, E. (2012). A comparative study on the in vitro antioxidant potentials of three edible fruits: Cornelian cherry, Japanese persimmon, and cherry laurel. *Food and Chemical Toxicology*, 50(9), 3329–3335.
- Chowdhury, M. S., Rahman, K. S., Selvanathan, V., Jaman, A., & Hosseini, M. (2020). Advances in solar photovoltaic technologies: Review and future perspectives. *Energy Reports*, 6, 2943–2957.
- Davisan, S., Nupearachchi, C. N., & Perera, V. P. S. (2024). Fabrication of dye-sensitized solar cells using *Santalum album* fruit ethanol extract. *Proceedings of the International Research Conference of the Open University of Sri Lanka*. Sri Lanka.
- Dhungel, S. K., & Park, J. (2010). Optimization of paste formulation for TiO₂ nanoparticles with a wide range of size distribution for its application in dye-sensitized solar cells. *Renewable Energy*, 35(12), 2776–2780.
- Dobrzański, L. A., Wosińska, L., Dołżańska, B., & Drygała, A. (2006). Comparison of electrical characteristics of silicon solar cells. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 18(1-2), 215.
- El-Agez, T. M., El Tayyan, A. A., Al-Kahlout, A., Taya, S. A., & Abdel-Latif, M. S. (2012). Dye-sensitized solar cells based on ZnO films and natural dyes. *International Journal of Materials and Chemistry*, 2(3), 105–110.
- Eren, E., Gok, E. C., Seyhan, B. N., Maslakci, N. N., & Oksuz, A. U. (2015). Evaluation of anthocyanin, a rose residue extract, for use in dye-sensitized solar cell. *Asian Journal of Chemistry*, 27(10), 3745.
- Erdağ Maden, Y. (2022). *Metallophthalocyanines in dye-sensitized solar cells*. Marmara Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Ghann, W., Kang, H., Sheikh, T., & Nam, S. (2017). Fabrication, optimization, and characterization of natural dye-sensitized solar cell. *Scientific Reports*, 7, 41470.
- Grätzel, M. (2003). Dye-sensitized solar cells. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 4, 145–153.
- Green, M. (2006). *Third Generation Photovoltaics: Advanced Solar Energy Conversion*. Springer Series in Photonics, 166p.
- Green, M. A. (2016). Solar cell efficiency tables (Version 47). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 24(7), 1005–1013.
- Green, M. A. (2005). Review of technologies and commercial status. *Thin Film Solar Cells*, 1–10.

- Gu, P., Yang, D., Zhu, X., Sun, H., & Li, J. (2018). Fabrication and characterization of dye-sensitized solar cells based on natural plants. *Chemical Physics Letters*.
- Gülsever, M. (2020). *Güneş enerjisi destekli evsel elektrik ihtiyacının matematiksel modellenmesi – Sistemin performans analizi*. Bingöl Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Bingöl.
- Hafez, H. S., Shenouda, S. S., & Fadel, M. (2018). Photovoltaic characteristics of natural light-harvesting dye-sensitized solar cells. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 192, 23–26.
- Hagfeldt, A., & Grätzel, M. (2000). Molecular photovoltaics. *Accounts of Chemical Research*, 33(5), 269–277.
- Hegedus, S., & Luque, A. (2011). *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering* (2nd ed.). Wiley.
- Hernandez-Martinez, A. R., Estevez, M., Vargas, S., Quintanilla, F., & Rodriguez, R. (2011). New dye-sensitized solar cells obtained from extracted bracts of *Bougainvillea glabra* and *spectabilis* betalain pigments by different purification processes. *International Journal of Molecular Sciences*, 12(9), 5565–5576.
- Huizhi, Z., Wu, L., Gao, Y., & Ma, T. (2011). Dye-sensitized solar cells using 20 natural dyes as sensitizers. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 219(2–3), 188–194.
- Hussain, M., Jalali, T., Maftoon-Azad, L., & Osfouri, S. (2024). Performance evaluation of natural dye-sensitized solar cells: A comparison of density functional theory and experimental data on chlorophyll, anthocyanin, and cocktail dyes as sensitizers. *ACS Applied Electronic Materials*, 6(3), 1693–1709.
- Kant, N., & Singh, P. (2022). Review of next generation photovoltaic solar cell technology and comparative materialistic development. *Materials Today: Proceedings*, 56(6), 3460–3470.
- Karmakar, S., Zaman, Q. M. A. U., Hossain, M. S., Siddika, A., Tabassum, S., Ibrahim, A. S. M., & Huque, S. (2023). Locally available natural dyes for dye-sensitized solar cells. *Dhaka University Journal of Applied Science and Engineering*, 7(1), 38–44.
- Karthick, S. N., Hemalatha, K., Balasingam, S. K., Franklin, M., Akshaya, S., & Kim, H.-J. (2019). Dye-sensitized solar cells: History, components, configuration, and working.
- Lenzmann, F. O., & Kroon, J. M. (2007). Recent advances in dye-sensitized solar cells. *Advances in OptoElectronics*, 2007(1), 065073.
- Li, H., Xie, Z., Zhang, Y., & Wang, J. (2010). The effects of ethyl cellulose on PV performance of DSSC made of nanostructured ZnO pastes. *Thin Solid Films*, 518(24), 68–71.

- Mathew, S., Sajina, N., & Haridas, K. R. (2016). Investigation of the efficiency of dye-sensitized solar cell using natural dyes as photo sensitizer. *Journal of the American Institute of Chemistry*, 89, 85–89.
- Metz, A., Fischer, M., & Trube, J. (2017). International technology roadmap for photovoltaics (ITRPV): Crystalline silicon technology-current status and outlook. In *Proceedings of the PV Manufacturing in Europe Conference*, Brussels, Belgium (pp. 18-19).
- Monishka, R. N. (2012). Review: Dye Sensitized Solar Cells Based on Natural Photosensitizers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 208-215.
- Moustafa, K. F., Rekaby, M., El Shenawy, E. T., & Khattab, N. M. (2012). Green dyes as photosensitizers for dye-sensitized solar cells. *Journal of Applied Sciences Research*, 8(10), 4393–4404.
- Narayan, M. R. (2012). Review: Dye sensitized solar cells based on natural photosensitizers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 208–215.
- Norasikin, A. L., Al-Alwani Mahmoud, A. M., Mohamad, A. B., Kadhum, A. H., Sopian, K., & Abdul Karim, N. S. (2014). Review on the development of natural dye photosensitizer for dye-sensitized solar cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 386-396.
- Ok, S. (2019). *Boya Duyarlı Güneş Pilleri İçin TiO₂ Bazlı Malzemelerin Sentezi, Karakterizasyonu ve Uygulaması*. Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Alanya.
- Ooyama, Y., & Harima, Y. (2012). Photophysical and electrochemical properties, and molecular structures of organic dyes for dye-sensitized solar cells. *Chemphyschem*, 13(18), 4032–4080.
- Oregan, B., & Gratzel, M. (1991). A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films. *Nature*, 353(6346), 737–740.
- Öztürk, A. (2012). *Monokristal ve Polikristal Güneş Pili Modüllerinin Mevsimsel Performanslarının İncelenmesi*. Tunceli Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Tunceli.
- Öztürk, A., Park, J., & Durkaya, G. (2019). Perovskit katı hal elektrolit esaslı boya duyarlı güneş enerjisi pili. TÜBİTAK.
- Pepe, A.V., Yıldırım, F., Yıldırım, A.N., & Çelik, C. (2023). Topraksız kültürde yetiştirilen bazı maviyemiş (*Vaccinium corymbosum* L.) çeşitlerinin meyve kalite ve antioksidan özelliklerinin belirlenmesi. *Mustafa Kemal Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi*, 28(3), 513-521.
- Polat, İ., Yilmaz, S., Tomakin, M., & BACAKSIZ, E. (2017). Role of Mg doping in the structural, optical, and electrical characteristics of ZnO-based DSSCs. *TURKISH JOURNAL OF PHYSICS*, 41(2), 160-170.

- Pratheepa, M. I., & Lawrence, M. (2017). X-ray diffraction analyses of titanium dioxide nanoparticles. *International Journal of Scientific Research in Science and Technology*, 3(11), 83.
- Smestad, G. P. (1998). Education and Solar Conversion: Demonstrating Electron Transfer. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 55, 157–178.
- Soosaimanickam, A., Kumar, R., & Moorthy Babu, S. (2019). Third-Generation Solar Cells: Concept, Materials and Performance- An Overview. In *Advances in Energy and Environmental Materials*, 305-339.
- Taya, S. A., El-Agez, T. M., El-Ghamri, H. S., & Abdel-Latif, M. S. (2013). Dye-sensitized solar cells using fresh and dried natural dyes. *International Journal of Materials Science and Applications*, 2(2), 37-42.
- Teker, T., Varınca, K.B., Karakurt, E.M., & Aylaz, G. (2015). Electric Power Generation in the Solar Systems: Comparisons of the Inorganic and Organic Solar Cells. *3rd International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science (ISITES2015)*, Universidad Politecnica de Valencia, Spain.
- Toscano, F. (2023). *Deposition and characterization of thin films made with active layer from end life first generation solar cells*. Yüksek Lisans Tezi, Politecnico di Torino, İtalya.
- Üneş, D. (2016). *İzabella üzümü (Vitis labrusca L.) meyvesinin fenolik bileşenleri ve antioksidan etkisinin araştırılması*. Bartın Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Bartın.
- Ung, M. C., Sipaut, C. S., Dayou, J., Liow, K. S., Kulip, J., & Mansa, R. F. (2017). Fruit based dye sensitized solar cells. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 217, 012003. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/217/1/012003>
- Ünlü, B. (2024). *Boya duyarlı güneş pilleri için boya ve elektrolit geliştirilmesi*. Sakarya Üniversitesi, Doktora Tezi, Sakarya.
- URL-1. (2024, Eylül). Monokristal ve Polikristal Güneş Panelleri: <https://mapperx.com/monokristal-ve-polikristal-gunes-panelleri> adresinden alınmıştır.
- URL-2. (2025, Ocak 24). X-Işınları Kırınım Cihazı: <https://merkeziilab.erdogan.edu.tr/tr/page/x-isinlari-kirinim-cihazi/2514> adresinden alınmıştır.
- URL-3. (2025, Ocak 24). Taramalı Elektron Mikroskobu: <https://merkeziilab.erdogan.edu.tr/tr/page/tema/2492> adresinden alınmıştır.
- URL-4. (2025, Ocak 24). Solar Simulator: https://www.newport.com/p/94082A?srsId=AfmBOoprDfKyL7Y3gquoDIAOaC5V-7_Q3CZJjVIqo6n_epwUy45FicVI adresinden alınmıştır.
- URL-5. (2025, Nisan 4). UV-VIS Spektrometre: <https://ernam.erciyes.edu.tr/tr/uv-vis-spektrometre> adresinden alınmıştır.

- URL-6. (2025, Ocak 19). Make a solar cell - TiO₂/raspberry based (Video): https://www.youtube.com/watch?v=WHTbw5jy6qU&ab_channel=NurdRage adresinden alınmıştır.
- Wang, J. T., Chen, C., Wang, E., & Kawazoe, Y. (2014). A new carbon allotrope with six-fold helical chains in all-sp² bonding networks. *Scientific Reports*, 4, 4339.
- Wang, Z.-S., Cui, Y., Dan-oh, Y., Kasada, C., Shinpo, A., & Hara, K. (2008). Molecular design of coumarin dyes for stable and efficient organic dye-sensitized solar cells. *The Journal of Physical Chemistry C*, 112(43), 17011–17017.
- Wu, J., Lan, Z., Lin, J., Huang, M., Huang, Y., Fan, L., & Luo, G. (2015). Electrolytes in dye-sensitized solar cells. *Chemical Reviews*, 115(5), 2136-2173.
- Wu, J., Zhang, L., Lin, J., Huang, M., Huang, Y., Fan, L., Luo, G., Lin, Y., Xie, Y., & Wei, Y. (2017). Counter electrodes in dye-sensitized solar cells. *Chemical Society Reviews*, 46(19), 5975-6023. The Royal Society of Chemistry.
- Zhang, W., Eperon, G., & Snaith, H. (2016). Metal halide perovskites for energy applications. *Nature Energy*, 1, 16048.
- Zhang, S. T. (2017). *Study of fluorine-doped tin oxide (FTO) thin films for photovoltaics applications* (Doctoral dissertation).
- Zhong, C., Hu, W. B., & Cheng, Y. F. (2011). On the essential role of current density in electrocatalytic activity of the electrodeposited platinum for oxidation of ammonia. *Journal of Power Sources*, 196(19), 8064-8072.
- Zhou, H., Wu, L., Gao, Y., & Ma, T. (2011). Dye-sensitized solar cells using 20 natural dyes as sensitizers. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 219(2-3), 188-194.

ÖZGEÇMİŞ

Akın ÖZDOĞAN, ilköğretim ve lise eğitimini Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti'nde tamamladı. Üniversite eğitimine 2016 yılında Avrasya Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde başladı ve 2020 yılında mezun oldu. 2022 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Bölümü, Termodinamik Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. Yabancı dili İngilizce'dir.

GENCELİ, H., ÖZDOĞAN, A. & ASKER, M. (2021). Dynamic simulation of a flat plate solar collector system under hot and humid climatic conditions. 5th International Anatolian Energy Symposium, 436-442.