

T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

FARKLI IŞIK ŞİDDETLERİ ALTINDA DOĞAL ALİZARİN BOYAR MADDESİNİN
TiO₂ TABANLI BOYA DUYARLI GÜNEŞ PİLİNİN VERİMLİLİĞİ ÜZERİNDEKİ
ETKİSİ

Fatih AKPINAR

Danışman: Prof. Dr. M. Ali YILDIRIM

TEZ JÜRİ ÜYELERİ
Prof. Dr. Harun GÜNEY
Prof. Dr. Aykut ASTAM
Prof. Dr. M. Ali YILDIRIM

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ERZİNCAN, 2026

© 2026 [Fatih AKPINAR]. Tüm hakları saklıdır.

Kabul ve Onay Sayfası

Prof. Dr. M. Ali YILDIRIM danışmanlığında, Fatih AKPINAR tarafından hazırlanan bu çalışma tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliği ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Harun GÜNEY İmza:

Üye : Prof. Dr. Aykut ASTAM İmza:

Üye : Prof. Dr. M. Ali YILDIRIM İmza:

Yukarıdaki sonuç Enstitü Yönetim Kurulunun / / 20.... tarih ve/..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Kemal Volkan ÖZDOKUR
Enstitü Müdür V.

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, şekil ve tabloların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

Bilimsel Etiğe Uygunluk Sayfası

“Farklı Işık Şiddetleri Altında Doğal Alizarin Boyar Maddesinin TiO₂ Tabanlı Boya Duyarlı Güneş Pilinin Verimliliği Üzerindeki Etkisi” isimli “Yüksek Lisans” tezim tarafımcı intihal tespit programı ile incelenmiştir. Buna göre tezimde bilimsel etik ihlali ve intihal olarak nitelendirilebilecek herhangi bir durum olmadığını taahhüt ederim.

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir biçimde elde edildiğini; aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiğı gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi beyan ederim./...../20.... (Tez savunma sınavı tarihi yazılmalıdır.)

(İmza)

Fatih AKPINAR

ÖZET

FARKLI IŞIK ŞİDDETLERİ ALTINDA DOĞAL ALIZARİN BOYAR MADDESİNİN TiO₂ TABANLI BOYA DUYARLI GÜNEŞ PİLİNİN VERİMLİLİĞİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Fatih AKPINAR

Yüksek Lisans Tezi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. M. Ali YILDIRIM

2026, 69 sayfa

Boya duyarlı güneş pillerinin (BDGP'lerin) ticarileştirilmesindeki büyük zorluklardan biri, uzun vadeli cihaz stabilitesinin ve yüksek foto dönüşüm verimliliğinin (PCE) aynı anda sağlanmamasıdır. Ayrıca, doğal boyalar genellikle yaygın olarak kullanılan sentetik boyaların yüksek maliyeti ve toksik doğası nedeniyle tercih edilse de genellikle foto-kararsızlık ve düşük PCE ile karşı karşıyadır, bu da BDGP'lerin genel performansını sınırlamaktadır. Bu bağlamda, doğal alizarin boya duyarlaştırıcısının, değişen güneş ışığı şiddetleri altında TiO₂ tabanlı bir BDGP'nin verimliliği üzerindeki etkisini inceledik. BDGP'de fotoanot olarak kullanılmak üzere TiO₂ nanopartikülleri, çevre dostu bir hidrotermal yöntem ile sentezlendi. Sentezlenen TiO₂ nanopartiküllerinden hazırlanan bir macun, doktor blade yöntemi kullanılarak 0,49 cm² alanına sahip flor katkılı kalay oksit (FTO) kaplı cam altlığına uygulandı. X-ışını kırınımı (XRD) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri, TiO₂ fotoanodunun anataz fazında olduğunu ve nanopartiküllerden oluşan yoğun ve gözenekli bir morfolojiye sahip olduğunu gösterdi. UV-Vis analizi, fotoanodun görünür bölgede %80 maksimum geçirgenlik ve 3,28 eV'lik bir doğrudan bant aralığına sahip olduğunu ortaya koydu. FTO/TiO₂/Alizarin/(I⁻/I₃⁻)/Pt/FTO mimarisine sahip bir BDGP üretildi ve fotovoltaiik performansı, değişen ışık şiddetleri altında test edildi. Ölçümler, BDGP'nin, ışık şiddetine bağlı olarak J_{SC} (4,48-9,59 mA/cm²), V_{OC} (0,65-0,76 V), FF (0,55-0,65) ve PCE (η) (4,01-9,48%) değerlerinde değişiklikler gösterdiğini ortaya koydu. Bulgularımız, doğal alizarin boyasının, BDGP'lerin ticarileştirilmesi için umut verici bir duyarlaştırıcı adayı olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: BDGP, TiO₂, Doğal Alizarin, Işık Şiddeti.

ABSTRACT

EFFECT OF NATURAL ALIZARIN SENSITIZER ON THE EFFICIENCY OF TiO₂- BASED DYE-SENSITIZED SOLAR CELL UNDER DIFFERENT LIGHT INTENSITIES

Fatih AKPINAR

**Master's Thesis, Erzincan Binali Yıldırım University, Institute of Science and
Technology,**

Department of Electrical and Electronics Engineering

Advisor: Prof. Dr. M. Ali YILDIRIM

2026, 69 pages

One of the major challenges in the commercialization of dye-sensitized solar cells (DSSCs) is the simultaneous non-achievement of long-term device stability and high photoconversion efficiency (PCE). In addition, while natural dyes are often preferred due to the high cost and toxic nature of commonly used synthetic dyes, they typically suffer from photo-instability and low PCE, which limits the overall performance of DSSCs. In this context, we investigated the effect of the natural dye sensitizer alizarin on the efficiency of a TiO₂-based DSSC under varying solar light intensities. TiO₂ nanoparticles, intended for use as photoanode in DSSC, were synthesized using an environmentally friendly hydrothermal method. A paste prepared from the synthesized TiO₂ nanoparticles was applied onto a 0.49 cm² area of fluorine-doped tin oxide (FTO)-coated glass substrate using the doctor blade method. The X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM) analyses indicated that the TiO₂ photoanode was in the anatase phase, with a dense and porous morphology composed of nanoparticles. UV-Vis analysis revealed that the photoanode exhibited a maximum transmittance of 80% in the visible region and a direct bandgap energy of 3.28 eV. A DSSC with the architecture FTO/TiO₂/Alizarin/(I⁻/I₃⁻)/Pt/FTO was fabricated, and its photovoltaic performance was evaluated under varying light intensities. The measurements revealed that the DSSC exhibited variations in J_{SC} (4.48-9.59 mA/cm²), V_{OC} (0.65-0.76 V), FF (0.55-0.65) and PCE (η) (4.01-9.48%), depending on the light intensity. Our findings indicate that natural alizarin dye is a promising candidate sensitizer for the commercialization of DSSCs.

Keywords: DSSC, TiO₂, Natural Alizarin, Light Intensity

TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans tezinin tamamlanmasında bana rehberlik eden değerli danışmanım Prof. Dr. Memet Ali YILDIRIM' a, bilgi ve deneyimlerini benimle paylaştığı için en içten teşekkürlerimi sunarım. Tez sürecim boyunca bana verdiği sürekli destek, değerli tavsiyeleri ve yönlendirmeleri, bu çalışmanın başarısında en büyük paya sahiptir. Ayrıca, bu çalışmaya teknik destek sağlayan ve her adımda yardımcı olan Dr. Öğr. Üyesi Sümeyra Tuna YILDIRIM, Prof. Dr. Aykut ASTAM'a ve Doç. Dr. Sefa GÖZCÜ'ye teşekkürü bir borç bilirim. Onların katkıları, araştırmamın kalitesini artırmamda önemli bir rol oynamıştır. Bana gösterdikleri sabır, anlayış ve ilgi için tüm hocalarıma teşekkür ederim.

Fatih AKPINAR

Haziran, 2026

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
1.GİRİŞ.....	1
1.1. Araştırmanın Amacı	2
1.2. Araştırmanın Önemi	2
1.3. Varsayımlar	3
1.4. Sınırlılıklar.....	3
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR	5
2.1. Kuramsal Temeller	5
2.1.1. Güneş pili.....	5
2.1.2. Güneş pili türleri.....	6
2.1.2.1. Fotovoltaik güneş pillerinin kristal yapısına göre sınıflandırılması	6
2.1.2.1.1. p-n homoeklemlı güneş pilleri.....	6
2.1.2.1.1.1. Galyum arsenik güneş pilleri.....	7
2.1.2.1.1.2. Silisyum güneş pilleri	7
2.1.2.1.2. p-n heteroeklemlı güneş pilleri	7
2.1.2.1.2.1. Kadmiyum sülfür-bakır sülfür güneş pilleri	8
2.1.2.1.2.2. Kadmiyum sülfür-bakır indium diselenoid güneş pilleri.....	8
2.1.2.1.2.3. Bakır sülfür-çinko kadmiyum sülfür güneş pilleri	8
2.1.2.1.2.4. Kadmiyum sülfür-silisyum güneş pilleri	8
2.1.2.1.2.5. Kadmiyum sülfür-kadmiyum tellür güneş pilleri	9
2.1.2.1.3. Amorf silisyum güneş pilleri	9
2.1.2.2. Fotovoltaik güneş pillerinin tarihsel gelişim sırasına göre sınıflandırılması.....	9
2.1.2.2.1. 1.Nesil fotovoltaik piller.....	9
2.1.2.2.2. 2.Nesil fotovoltaik piller.....	9
2.1.2.2.3. 3.Nesil fotovoltaik piller.....	10
2.1.2.2.4. 4.Nesil fotovoltaik piller.....	10

2.1.3 Güneş pillerinin fotovoltaiik özelliklerinin incelenmesi	10
2.1.4. Boya duyarlı güneş pillerinin avantajları	13
2.1.5. Boya duyarlı güneş pillerinin yapısı.....	14
2.1.6. Boya duyarlı güneş pillerinin çalışma prensibi	16
2.1.7. Doğal boya ve diğer boya türleri	18
2.1.8. Kaynak özetleri.....	20
3. YÖNTEM	27
3.1. Deneyisel Yöntem	27
3.1.1. Hidrotermal sentez yöntemi	27
3.1.2. TiO ₂ nanopartiküllerini sentezlemek için kullanılan sarf malzemeler.....	29
3.1.3. TiO ₂ nanopartiküllerinin hidrotermal sentez yöntemiyle sentezlenmesi	29
3.1.4. TiO ₂ nanopartiküllerinin FTO altlık üzerine kaplanması	30
3.1.5. Boyar maddenin hazırlanması ve TiO ₂ fotoanot filmine uygulanması.....	31
3.1.6. Sıvı elektrolitin hazırlanması.....	33
3.1.7. Karşıit elektrotun hazırlanması.....	33
3.1.8. Boya duyarlı güneş pillerinin hazırlanması	34
3.2. Yapısal, Morfolojik ve Optik Özellikler.....	35
3.2.1. X-ışını kırınımı yöntemi (XRD)	35
3.2.2. Taramalı elektron mikroskobu (SEM).....	37
3.2.3. Optik soğurma, geçirgenlik ve FT-IR analizleri.....	40
3.2.4. Fotovoltaiik performans analizleri.....	42
4. BULGULAR	43
4.1. FTO/TiO ₂ Fotoanot Filminin Yapısal (XRD) Analizi	43
4.2. FTO/TiO ₂ Fotoanot Filminin Morfolojik Analizi.....	44
4.3. FTO/TiO ₂ Fotoanot Filminin ve Doğal Alizarin Boyasının Optik Analizi.....	45
4.4. FTO/TiO ₂ /Alizarin/(I ⁻ /I ₃ ⁻)/Pt/FTO Mimarisine Sahip BDGP'nin Fotovoltaiik Analizleri	47
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	52
5.1. Yapısal, Morfolojik ve Optik Analizler.....	54
5.2. Fotovoltaiik Analizler.....	57
KAYNAKÇA	60

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. TiO_2/FTO fotoanot filminin yapısal parametreleri.....	55
Tablo 2. TiO_2/FTO fotoanot elektrodunun optik parametreleri.....	56
Tablo 3. $\text{FTO}/\text{TiO}_2/\text{Alizarin}/(\text{I}^-/\text{I}_3^-)/\text{Pt}/\text{FTO}$ mimarisine sahip bir BDGP'nin değişen ışık şiddetleri altındaki fotovoltajik parametreleri.....	57

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Güneş pilinin basit eşdeğer devresi	12
Şekil 2. İdeal bir güneş pilinin aydınlık-karanlık altındaki akım-gerilim (I-V) grafiği (a) ve eğrisi (b)	13
Şekil 3. Boya duyarlı güneş pillerinin (BDGP) şematik yapısı	16
Şekil 4. Boyaya duyarlı güneş pillerinin (BDGP) çalışma prensibi	18
Şekil 5. Hidrotermal sentez düzeneği (a) ve ürün eldesi (b)	29
Şekil 6. TiO ₂ nanopartiküllerinin FTO altlık üzerine kaplanması	30
Şekil 7. Alizarinin kimyasal yapısı	31
Şekil 8. Alizarin boya kaplı TiO ₂ fotoanot filmi	33
Şekil 9. Karşıt elektrot (Pt)	34
Şekil 10. FTO/TiO ₂ /Alizarin/(I ⁻ /I ₃ ⁻)/Pt/FTO mimarisine sahip bir BDGP	35
Şekil 11. Kristal düzlemlerinden X-ışınlarının saçılması	36
Şekil 12. Panalytical empyrean X-ışınları kırınım cihazı	37
Şekil 13. Taramalı elektron mikroskobunun şematik yapısı	39
Şekil 14. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)	40
Şekil 15. PerkinElmer UV-Vis spektrofotometresi (a) ve Thermo Scientific Nicolet 6700 FT-IR spektrometresi (b)	41
Şekil 16. FYTRONIX 9000 tam otomatik solar simülatör	42
Şekil 17. TiO ₂ /FTO fotoanot filminin XRD deseni	43
Şekil 18. TiO ₂ /FTO fotoanot filminin SEM görüntüsü	44
Şekil 19. TiO ₂ filminin SEM görüntüsü	44
Şekil 20. FTO/TiO ₂ fotoanot filminin $(\alpha h\nu)^2-(h\nu)$ grafiği	45
Şekil 21. FTO/TiO ₂ fotoanot filminin geçirgenlik spektrumu	46
Şekil 22. Doğal alizarin boyasına ait optik soğurma spektrumu	46
Şekil 23. Doğal alizarin boyasına ait FT-IR spektrumu	47
Şekil 24. FTO/TiO ₂ /Alizarin/(I ⁻ /I ₃ ⁻)/Pt/FTO mimarisine sahip BDGP'nin akım yoğunluğu-gerilim karakteristiği	48
Şekil 25. FTO/TiO ₂ /Alizarin/(I ⁻ /I ₃ ⁻)/Pt/FTO mimarisine sahip BDGP'nin çıkış gücü- gerilim karakteristiği	48
Şekil 26. FTO/TiO ₂ /Alizarin/(I ⁻ /I ₃ ⁻)/Pt/FTO mimarisine sahip BDGP'nin kısa devre akım yoğunluğunun (J _{SC}) ışık şiddetine (P _{ışık}) bağlı değişimi	49

Şekil 27. FTO/TiO ₂ /Alizarin/(I ⁻ /I ₃ ⁻)/Pt/FTO mimarisine sahip BDGP'nin açık devre geriliminin (V _{OC}) ışık şiddetine (P _{ışık}) bağlı değişimi	49
Şekil 28. FTO/TiO ₂ /Alizarin/(I ⁻ /I ₃ ⁻)/Pt/FTO mimarisine sahip BDGP'nin dolum faktörünün (FF) ışık şiddetine (P _{ışık}) bağlı değişimi.....	50
Şekil 29. FTO/TiO ₂ /Alizarin/(I ⁻ /I ₃ ⁻)/Pt/FTO mimarisine sahip BDGP'nin güç dönüşüm verimliliğinin (PCE veya η) ışık şiddetine (P _{ışık}) bağlı değişimi	50
Şekil 30. FTO/TiO ₂ /Alizarin/(I ⁻ /I ₃ ⁻)/Pt/FTO mimarisine sahip BDGP'nin akım yoğunluğu-zaman karakteristiği	51

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

BDGP	Boya Duyarlı Güneş Pili
DSSC	Dye-Sensitized Solar Cell (Boya Duyarlı Güneş Pili)
e^-	Elektron
E_g	Yasak enerji aralığı (eV)
FESEM	Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu
FF	Dolum faktörü
FT-IR	Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi
FTO	Flor katkılı kalay oksit (Fluorine-doped tin oxide)
$h\nu$	Foton enerjisi
I_D	Diyottan geçen akım
I_L	Işık kaynağı tarafından üretilen akım
I_m	Maksimum güç noktasındaki akım
I_{SC}	Kısa devre akımı
I_D	Diyottan geçen akım
ITO	İndiyum kalay oksit (Indium tin oxide)
J_{SC}	Kısa devre akım yoğunluğu (mA/cm ²)
MPP	Maksimum güç noktası (Maximum Power Point)
$P_{ışık}$	Maksimum ışık gücü
P_{max}	Maksimum güç
PCE	Güç dönüşüm verimi
R_s	Seri direnç
R_{SH}	Paralel (şönt) direnç
S	Normal boya molekülü
S^*	Uyarılmış boya molekülü
S^+	Oksitlenmiş boya molekülü
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
T	Geçirgenlik (%)
TCO	Saydam iletken oksit (Transparent conducting oxide)
UV-Vis	Ultraviyole–Görünür bölge spektroskopisi
V_{oc}	Açık devre gerilimi (V)
XRD	X-Işını Kırınımı

HOMO	En yüksek dolu moleküler orbital
LUMO	En düşük boş moleküler orbital
α	Soğurma katsayısı
η	Güç dönüşüm verimi

1. GİRİŞ

Dünya genelinde enerji talebi sürekli olarak artmaktadır. Bu artışın temel nedenleri arasında nüfus artışı, sanayileşme, kentleşme ve teknolojik gelişmeler yer almaktadır. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde ekonomik büyüme ve yaşam standartlarının yükselmesi, enerji ihtiyacını daha da artırmaktadır. Ancak, bu talebin büyük bir kısmı halen fosil yakıtlarla karşılanmaktadır. Kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtlar, sanayi devriminden bu yana küresel enerji sisteminin bel kemiğini oluşturmuştur. Ne var ki, bu kaynaklar sınırlıdır ve tükenme riskiyle karşı karşıyadır. Ayrıca, fosil yakıtların kullanımı, sera gazı emisyonlarının artmasına ve iklim değişikliğine yol açmaktadır. Bu durum, çevresel sorunları daha da derinleştirmekte ve gezegenin geleceği için ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Fosil yakıtların sınırlılığı ve çevresel etkileri, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi ve talebi artırmaktadır. Yenilenebilir enerji, doğal süreçlerle kendini yenileyebilen ve tükenmeyen kaynaklardan elde edilen enerji anlamına gelmektedir. Güneş, rüzgâr, hidroelektrik, jeotermal ve biyokütle enerjisi, bu kaynakların başlıca örnekleridir. Son yıllarda, yenilenebilir enerji teknolojilerinde yaşanan gelişmeler ve maliyetlerin düşmesi, bu kaynakların daha erişilebilir ve yaygın hale gelmesini sağlamıştır. Özellikle güneş enerjisi hem çevre dostu hem de sürdürülebilir olması nedeniyle dünya genelinde büyük bir ilgi görmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim, sadece çevresel nedenlerle değil, aynı zamanda ekonomik ve stratejik nedenlerle de desteklenmektedir. Fosil yakıtların fiyatlarındaki dalgalanmalar ve bu kaynaklara olan bağımlılık, ülkelerin enerji güvenliği açısından risk oluşturmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları ise yerel olarak üretilebilir ve bu nedenle enerji bağımsızlığını artırır. Ayrıca, yenilenebilir enerji sektörü, yeni iş alanları oluşturarak ekonomik büyümeye katkıda bulunmaktadır. Ancak, geleneksel güneş panellerinin üretiminde kullanılan malzemeler, genellikle yüksek maliyetli ve çevreye zararlı kimyasallar içermektedir. Bu durum, güneş enerjisinin yaygın kullanımını sınırlayan temel engellerden biri haline gelmiştir. Geleneksel silisyum tabanlı güneş hücrelerinin yüksek maliyetli üretim süreçleri, çevreye olan etkileri ve verimliliklerinin belirli sınırlar içinde kalması, daha uygun maliyetli ve çevre dostu alternatif teknolojilerin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, doğal boyaya duyarlı güneş pilleri (BDGP'ler) son yıllarda, geleneksel güneş hücrelerine alternatif olarak dikkat çekmeye başlamıştır. Bu teknoloji çevre dostu güneş enerjisi üretmeyi mümkün kılmaktadır. Doğal pigmentlerin, güneş pillerinde ışık emici malzeme olarak kullanılması, bu teknolojinin hem çevresel sürdürülebilirliğini hem de ekonomik erişilebilirliğini artırmaktadır.

1.1. Araştırmanın Amacı

Güneş enerjisi, yenilenebilir enerji kaynakları arasında en büyük potansiyele sahip olanlardan biridir. Geleneksel güneş pilleri, genellikle silisyum bazlı malzemeler ve kimyasal boyalar kullanılarak üretilmektedir. Ancak, bu malzemelerin üretim süreçleri hem maliyetli hem de çevresel açıdan zararlı olabilmektedir. Bu nedenle, son yıllarda doğal boyalar kullanılarak üretilen güneş pilleri, daha evre dostu ve sürdürülebilir bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmanın amacı, güneş pillerinde kimyasal boya yerine doğal boya olan Rubia Tinctorum bitkisinin köklerinden elde edilen Alizarin boyası kullanılarak üretilen TiO₂ tabanlı pilin verimliliğini çeşitli ışık şiddetleri altında ölçmek ve bu boyanın güneş enerjisi teknolojisindeki potansiyelini değerlendirmektir.

1.2. Araştırmanın nemi

Güneş enerjisi, yenilenebilir enerji kaynakları arasında giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Ancak, geleneksel güneş panellerinin üretim sürecinde çevreye zarar verebilecek kimyasalların kullanılması, bu teknolojinin sürdürülebilirliğini kısıtlamaktadır. Bu durum, güneş enerjisi sistemlerinin ekolojik etkilerini en aza indirme hedefiyle çelişmektedir. Son yıllarda, bu sorunun üstesinden gelmek amacıyla doğal boyalarla çalışan güneş pilleri (BDGP'ler) gibi yenilikçi teknolojiler geliştirilmiştir. Bu bağlamda, güneş pili eşitleri hem akademik dünyada hem de sanayi sektöründe büyük bir ilgiyle araştırılmaktadır. BDGP'lerde ışık emici malzeme olarak doğal pigmentlerin kullanımı, bu teknolojinin evre dostu bir alternatif sunmasını sağlamaktadır. Bu pigmentler, yaprak, meyve ve iek gibi bitkisel materyallerden elde edilerek BDGP'lerin aktif katmanlarında değerlendirilmektedir. Bu bağlamda, doğal boyaya duyarlı güneş pillerinin (BDGP'ler) araştırılması ve geliştirilmesi, hem güneş enerjisi sektörünün sürdürülebilirliğini artıracak hem de yenilenebilir enerji kaynaklarının erişilebilirliğini genişletecektir. Geleneksel güneş pillerinin üretiminde kullanılan materyallerin çoğu, çevreye zarar verebilecek kimyasallar içermektedir ve bu kimyasalların üretim süreçlerinden atılmasına dair ciddi zorluklar bulunmaktadır. Oysa doğal boyaların kullanımı, bu olumsuz çevresel etkilerin önüne geçilmesine katkı sağlayabilir. Doğal pigmentlerin temin edilmesi ve işlenmesi genellikle ucuzdur ve bu, güneş enerjisinin daha ekonomik bir çözüm haline gelmesini sağlayabilir. Ayrıca, bu boyalar, yerel tarım ürünlerinden elde edilebileceği için, yerel ekonomilere katkı sağlamada da önemli bir rol oynayabilir. Bu da güneş enerjisi teknolojisinin sadece çevresel değil, aynı zamanda ekonomik sürdürülebilirliğini de artırır.

1.3. Varsayımlar

- **Doğal Boyaların Etkisi:** Kullanılan doğal pigmentlerin ışık emilim kapasitesinin artırılması ve kimyasal stabilitelerinin iyileştirilmesi durumunda, güneş pillerinin verimliliğinin önemli ölçüde artacağı varsayılmaktadır.
- **Elektrot ve Elektrolit Performansı:** Titanyum dioksit (TiO_2) gibi yarıiletken elektrotlar ve sıvı elektrolit çözeltilerinin, doğal pigmentlerin güneş pili performansını olumlu yönde etkileyerek verimlilik artışı sağlayacağı kabul edilmektedir.
- **Maliyet ve Çevresel Etki:** Doğal boyaya duyarlı güneş pillerinin, geleneksel silisyum bazlı güneş hücrelerine göre daha düşük maliyetli ve çevre dostu olacağı öngörülmektedir.
- **Uzun Süreli Stabilité:** Doğal pigmentlerin, uzun dönemli kullanımda kimyasal olarak stabil kalacağı ve güneş pili verimliliğini olumsuz yönde etkilemeyeceği kabul edilmektedir.

1.4. Sınırlılıklar

Bu araştırma, doğal boyaya duyarlı güneş pillerinin (BDGP'ler) geliştirilmesi ve performans analizine yönelik yürütülmekte olup, belirli sınırlılıklar çerçevesinde ele alınmıştır. Çalışmanın geçerliliğini ve güvenilirliğini etkileyebilecek sınırlılıklar aşağıda maddeler halinde açıklanmıştır.

- **Doğal Pigmentlerin Kimyasal Kararlılığı:** Araştırma kapsamında kullanılan doğal boyaların uzun süreli stabilitesi sınırlıdır. Pigmentlerin ışığa, sıcaklığa ve neme karşı dayanıklılığı zamanla azalabilir.
- **Fotovoltaik Verimlilik ve Stabilité:** Doğal boyaların ışık absorpsiyon kapasitesi sentetik boyalara kıyasla daha düşük olabilir. Güneş pili verimliliğinin uzun vadede azalması ihtimali vardır.
- **Elektrot ve Elektrolit Uyum Problemleri:** Kullanılan doğal pigmentlerin yarıiletken malzeme (TiO_2) ile etkileşimi bazı durumlarda yeterince optimize edilemeyebilir. Sıvı elektrolitlerin buharlaşma veya bozunma riski, pil ömrünü kısıtlayabilir.
- **Çevresel ve Operasyonel Faktörler:** Araştırma anlık bulunduğumuz laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiş olup, dış mekân koşullarında uzun vadede nasıl performans göstereceği bilinmemektedir.

- **Ölçeklenebilirlik ve Endüstriyel Uygulanabilirlik:** Laboratuvar ortamında üretilen BDGP'lerin sanayi ölçeğinde üretime uygun olup olmadığı tam olarak test edilmemiştir. Doğal pigmentlerin büyük ölçekli üretimde maliyet etkinliği tam olarak belirlenememiştir.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

2.1. Kuramsal Temeller

2.1.1 Güneş pili

Güneş pili, fotovoltaiik etki prensibine dayalı olarak doğrudan güneş ışığından elektrik enerjisi üreten bir yarı iletken cihazdır. Bu cihazın temel çalışma mekanizması, içerisinde yer alan p-n eklemi sayesinde gerçekleşir. Güneş ışığı, yarı iletken malzemenin yüzeyine çarptığında, fotonların enerjisi malzemenin atomik yapısında bulunan elektronları serbest bırakır; böylece elektronlar ve pozitif yüklü holler oluşur. Oluşan bu serbest taşıyıcılar, p-n eklemi boyunca mevcut olan dahili elektrik alan tarafından ayrıştırılır. Bu ayrışma, hücre içinde bir potansiyel fark (voltaj) oluşturur ve bu potansiyel fark, harici bir devreye bağlandığında elektronların akım oluşturmaya neden olarak elektrik enerjisi elde edilir.

Güneş pili genellikle kristal silisyum gibi yarı iletken malzemelerden üretilir. Silisyum, metal ve yalıtkan arasındaki ara elektriksel özelliklere sahip olması nedeniyle fotovoltaiik dönüşüm için tercih edilen malzemedir. Silisyum p-n eklemi oluşturulurken, malzemenin belirli bölgelerine dopant adı verilen katkı maddeleri eklenerek (n-tipi) ve (p-tipi) bölgeler oluşturulur. Güneş ışığının yarı iletken malzeme tarafından soğurulmasıyla, enerjisi bant aralığından büyük olan fotonlar elektronları değerlik bandından iletim bandına uyararak elektron-boşluk çiftlerinin oluşmasına neden olur. Oluşan yük taşıyıcıları, p-n ekleminde mevcut olan yerleşik elektrik alanın etkisiyle ayrıştırılarak dış devrede elektrik akımının oluşmasını sağlar.

Günümüzde güneş pilleri üzerine gerçekleştirilen araştırmalar, organik ve inorganik temelli çalışmalar olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Silisyum bazlı yapıya sahip güneş pilleri inorganik olarak sınıflandırılırken, organik bileşenler içeren güneş pilleri organik güneş pilleri olarak adlandırılmaktadır. Organik güneş pilleri üzerine yapılan çalışmaların daha yoğun olmasının temel nedenleri, bu pillerin üretim maliyetlerinin daha düşük olması ve kullanım açısından daha pratik çözümler sunmalarıdır (Fritts, 1883).

Organik güneş pilleri, kullanılan boyar madde türüne bağlı olarak farklı kategorilere ayrılmaktadır. Bu sistemlerin temel çalışma prensibi, fotosentez sürecinden esinlenerek geliştirilmiştir. Doğada, klorofil pigmentleri tarafından soğurulan güneş ışığı, bitkilerin yeşil

kısımlarındaki kloroplast organellerinde karbondioksit ve suyun, güneş enerjisi kullanılarak karbonhidrat (glukoz) ve oksijene dönüştürülmesini sağlar. Benzer şekilde, boyar madde ile çalışan güneş pillerinde (BDGP), ışığı soğuran organik veya doğal boya molekülleri, geniş bant aralığına sahip yarıiletkenler üzerinde değerlik bandından iletkenlik bandına elektron geçişini tetikleyerek elektrik enerjisi üretimini mümkün kılar.

Sonuç olarak, güneş pili, çevreye zararlı emisyonlar üretmeden, doğrudan güneş ışığından elektrik enerjisi üretebilen temiz ve yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Bu özelliği sayesinde hem ekonomik hem de ekolojik açıdan önemli avantajlar sunar.

2.1.2. Güneş pili türleri

Teknolojik açıdan güneş pilleri; tek kristal, çok kristal (polikristal) ve ince film yapısında üretilebilmektedir. Bu piller, genel olarak iki farklı şekilde sınıflandırılmaktadır:

a) Kullanılan Kristal Yapısına Göre

b) Tarihsel Gelişim Sürecine Göre

2.1.2.1. Fotovoltaik güneş pillerinin kristal yapısına göre sınıflandırılması

Güneş pillerinin üretiminde kullanılan kristal yapısına bağlı olarak yapılan sınıflandırmada, bu piller üç ana grupta incelenebilir (Küpeli, 2005):

a) p-n Homoeklemlı Güneş Pilleri,

b) p-n Heteroeklemlı Güneş Pilleri,

c) Amorf Silisyum (a:Si) Güneş Pilleri,

2.1.2.1.1. p-n homoeklemlı güneş pilleri

p-n eklemının her iki bölgesi aynı yarı iletken malzeme kullanılarak oluşturulan güneş pilleri homoeklemlı güneş pilleri olarak adlandırılmaktadır. Bu yapı, güneş pili teknolojilerinde

yaygın olarak kullanılmaktadır. Homoeklemlı p-n bağlantılarında farklı malzemeler arasında bir arayüz bulunmadığı için eklem bölgesinde oluşabilecek arayüz kaynaklı kayıplar büyük ölçüde azalır ve taşıyıcı verimliliği artar (Nelson, 2003).

2.1.2.1.1.1. Galyum arsenik güneş pilleri

Galyum ve arsenik elementlerinden oluşan galyum arsenik (GaAs), polikristal bir yapıya sahip olup, kristal yapısı silisyuma benzerlik göstermektedir. Galyum arsenik, radyasyona karşı yüksek dayanıklılık göstermesi nedeniyle uzay araştırmaları ve uydu yapımında tercih edilen bir malzeme konumundadır. Ancak, içerisindeki arseniğin toksik özellikleri göz önünde bulundurulduğunda, çevresel etmenler nedeniyle bu yarıiletkenin yeryüzü uygulamalarında uzun vadeli kullanımı sınırlı kalabilir.

2.1.2.1.1.2. Silisyum güneş pilleri

Silisyum güneş pilleri, yüksek açık devre gerilimi ve yapısal kararlılıklarına rağmen, artan sıcaklıkla performans kaybı göstermektedir. Bununla birlikte, yüksek saflık gerektiren üretim süreçleri yüksek enerji tüketimine bağlı olarak maliyetlidir. Rijit yapıları nedeniyle esnek uygulamalara uygun olmayan bu piller, düşük ışık şiddeti koşullarında sınırlı verim sunmaktadır.

2.1.2.1.2. p-n heteroeklemlı güneş pilleri

p-n ekleminin iki tarafında farklı yarı iletken malzemelerin kullanıldığı heteroeklemlı güneş pilleri, üretim kolaylığı ve görece düşük maliyetleri nedeniyle son yıllarda homoeklemlı yapılara kıyasla daha fazla tercih edilmektedir. Bu yapılar, sıcaklık ve radyasyon etkilerine karşı daha yüksek dayanım göstermektedir (Köse, 1986; Engin, 1996). Ancak iletim bandı kenarlarında oluşabilecek süreksizliklerin olumsuz etkilerini azaltmak amacıyla, eklem bölgelerinde örgü sabitleri birbirine yakın yarı iletkenlerin seçilmesine ve zıt yarı iletken tipte soğurucu ile pencere tabakalarının kullanılmasına dikkat edilmelidir (Oral, 1979; Engin, 1996).

2.1.2.1.2.1. Kadmiyum sülfür-bakır sülfür güneş pilleri

1954 yılında geliştirilen kadmiyum sülfür–bakır sülfür (n-CdS/p-Cu₂S) pilleri, silisyum güneş pillerinin aynı dönemde ortaya çıkmasına rağmen ticari üretime geçilememiştir. Bu durumun temel nedenleri arasında, pillerin düşük verimliliklerinin yanı sıra, uzun ömürlerini engelleyen çeşitli teknik sorunlar yer almaktadır. Özellikle, Cu₂S bileşiğinde bulunan bakırın, bulunduğu ortamda mevcut oksijenle reaksiyona girerek oksitlenmesi, bu yapıların en kritik problem noktası olarak öne çıkmaktadır (Köse, 1986).

2.1.2.1.2.2. Kadmiyum sülfür-bakır indiyum diselenid güneş pilleri

Fotovoltaik araştırmalarda en çok dikkat, bakır indiyum diselenid'e (CIS) yöneliktir. Bu yarıiletken, periyodik tablonun I., III. ve VI. grup elementlerinden sentezlenen ve tetragonal kalkopirit yapısına sahip I-III-VI₂ bileşik kategorisine dahildir (Küpeli, 2005). I-III-VI₂ bileşikleri, örgü parametreleri, yüksek absorpsiyon katsayıları ve oda sıcaklığında doğrudan bant aralıklarına sahip olmaları sayesinde, güneş pilleri, non-lineer optik uygulamalar ve termoelektrik sistemler gibi birçok alanda kullanılmaya uygun malzemeler olarak öne çıkmaktadır (Peker, 1999). Günümüzde, CIS ince film güneş pillerinin verimliliği, yapıya galyum elementinin eklenmesiyle artırılmaktadır. Ancak, yarıiletken bileşimindeki element sayısının artması, üretim sürecinde gerekli teknolojinin karmaşıklığını artırmakta ve malzeme özelliklerinin kontrolünü zorlaştırmaktadır (Oktik, 2001).

2.1.2.1.2.3. Bakır sülfür-çinko kadmiyum sülfür güneş pilleri

Zn_xCd_{1-x}S (x, çinko molar oranı) malzemesinde çinko konsantrasyonunun artırılması, pilin elektriksel ve optik özelliklerinde değişikliklere yol açmaktadır. Çinko oranı yükseldikçe, açık devre voltajı artarken, kısa devre akımı ise azalır (Köse, 1986).

2.1.2.1.2.4. Kadmiyum sülfür-silisyum güneş pilleri

Kadmiyum sülfür-silisyum (n-CdS/p-Si) güneş pilleri, yasak bant genişliği 1,21 eV olan silisyumun, yasak bant aralığı 2,24 eV olan CdS ile özel koşullar altında birleştirilmesiyle üretilir. Bu pillerde, p-tipi silisyum üzerine CdS kristali kaplanarak p-n heteroeklemi oluşturulur (Köse, 1986).

2.1.2.1.2.5. Kadmiyum sülfür-kadmiyum tellür güneş pilleri

Kadmiyum sülfür-kadmiyum tellür (n-CdS/p-CdTe) güneş pili üretiminde, kadmiyum tellür (CdTe) ile kadmiyum sülfür (CdS) birleştirilerek heteroeklem diyot oluşturulabilir. Yasak enerji aralığı yaklaşık 2,4 eV olan CdS yarıiletkeni, çok ince bir tabaka şeklinde uygulanır. CdS, 520 nm'nin üzerindeki görünür ışığı büyük ölçüde geçiren ve heteroeklemde saydam bir pencere işlevi gören bir malzeme olarak kullanılır (Oktik, 2001).

2.1.2.1.3. Amorf silisyum güneş pilleri

Hidrojenlenmiş amorf silisyum (a-Si:H) ilk olarak 1955 yılında Sterling tarafından incelenmiş, ancak hidrojenin yerleşimi konusunda herhangi bir araştırma yapılmamıştır. a-Si:H, amorf silisyumdan (a-Si) birçok yönden farklı özellikler sergiler. Özellikle fotoiletkenlik, a-Si filmlerinde ihmal edilebilir seviyede iken, a-Si:H filmlerinde belirgin bir fotoiletkenlik olayı gözlemlenmektedir. Güneş pilleri için önemli bir özellik olan fotoiletkenlik, a-Si:H malzemesinde önemli bir rol oynamaktadır. 1977 yılında, Wronski ve Carlson ilk defa a-Si:H güneş pili üretmiş ve bu pilin verimini %5,5 olarak bulmuşlardır (Köse, 1986)

2.1.2.2. Fotovoltaik güneş pillerinin tarihsel gelişim sırasına göre sınıflandırılması

2.1.2.2.1. 1.Nesil fotovoltaik piller

Birinci nesil güneş pilleri grubuna, tek kristal ve çok kristal silisyum güneş pilleri dahildir. Silisyum, üstün fiziksel özellikleri ve uzun ömürlülüğü nedeniyle, üretim teknolojilerindeki ilerlemelerle birlikte, güneş hücreleri için en yaygın tercih edilen malzeme haline gelmiştir. Hammaddesi Si (Silisyum), deniz kumunda yaygın olarak bulunmasına karşın, bu kaynaktan tüm metallerin arındırılması ve ardından eritilmesi, son derece zahmetli ve maliyetli bir süreçtir (Cebeci, 2017).

2.1.2.2.2. 2. Nesil fotovoltaik piller

İkinci nesil güneş pilleri, ince film teknolojisine dayalı uygulamaları ifade eder ve bu kategori amorf silisyum (a-Si), ince film silisyum, CuInSe₂ ile kadmiyum tellür (CdTe) gibi sistemleri

kapsamaktadır. CdTe, ekonomik özellikleri nedeniyle tercih edilse de içerdği toksik kadmiyum nedeniyle birçok ülkede yasal kısıtlamalara tabi tutulmakta ve kullanım alanları sınırlandırılmaktadır. Öte yandan, bakır indiyum diselenid (CuInSe_2) teknolojisinde kullanılan film kalınlığı 1–2 μm düzeyinde olmasına karşın, doğada indiyumun sınırlı bulunması bu malzemenin tercih edilme oranını düşürmektedir (Cebeci, 2017).

2.1.2.2.3. 3. Nesil fotovoltaik piller

Üçüncü nesil güneş pilleri, organik güneş pilleri ve boya duyarlı pillerini kapsamaktadır. Günümüzde organik olmayan malzemelerle üretilen güneş pillerinin katı yapıların elastik olmaması, uygulama alanlarının sınırlı kalması, kullanılan malzemelerin yüksek maliyetli olması ve rezerv sıkıntısı gibi dezavantajları, araştırmacıları alternatif malzeme arayışlarına yöneltmiştir. Bu bağlamda, düşük maliyet, yüksek iletkenlik ve yüksek moleküler ağırlık gibi avantajlara sahip organik moleküller, özellikle yarıiletken polimerlerin geliştirilmesiyle önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Organik malzemelerin kullanıldığı güneş pilleri, BDGP ve organik güneş pilleri olarak iki ana sınıfa ayrılmakta olup, bu teknolojilerin sağladığı üstünlükler, gelecekteki araştırmaların bu yönde yoğunlaşacağına işaret etmektedir.

2.1.2.2.4. 4. Nesil fotovoltaik piller

Bu piller, gelecekte üretimi ve kullanımı öngörülen, ancak hâlen yalnızca tasarım aşamasında bulunan sistemlerdir. Özellikle bitkilerin gerçekleştirdiği fotosentez sürecinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi amacıyla, bitkiler doğal güneş pilleri olarak değerlendirilmektedir. Enerji üretiminde kullanılacak teknolojilerin hangi noktaya ulaşacağı ise, teknolojik gelişmelerin seyrine bağlı olarak zaman içerisinde ortaya konulacaktır (Boz, 2011).

2.1.3. Güneş pillerinin fotovoltaik özelliklerinin incelenmesi

Fotovoltaik sistemlerin karakterizasyonu, tipik olarak farklı ışınım şiddetlerinde (aydınlık ve karanlık koşullar) uygulanan gerilimlere bağlı olarak değişen akım yoğunluklarının ölçülmesiyle gerçekleştirilir. Aydınlık ortamda yapılan akım-gerilim (I-V) ölçümleri, hücrelerin foto-duyarlılık, verimlilik ve dolum faktörü gibi temel performans göstergelerinin belirlenmesine olanak tanırken; karanlık koşullarda elde edilen I-V verileri ise doyma akımı, bariyer yüksekliği ve idealite katsayısı gibi parametrelerin hesaplanmasını sağlar.

Güneş pillerinin performans karakteristikleri, temel olarak beş parametre üzerinden incelenmektedir. Bu parametreler; açık devre gerilimi, kısa devre akımı, maksimum güç noktası, dolum faktörü ve verimlilik olarak tanımlanmaktadır.

Açık devre gerilimi (open-circuit voltage, V_{OC}): Güneş pili devresinin açık durumda, yani uçlar arasındaki direnç teorik olarak sonsuz kabul edildiğinde ölçülen gerilim değeridir. Bu parametre, sistemde akım akışının bulunmadığı noktada elde edilen maksimum potansiyel farkı temsil eder. Ayrıca, V_{OC} değeri, foto-üretim sürecinde oluşan elektron-boşluk çiftlerinin rekombinasyon oranının dolaylı bir göstergesidir; bu nedenle, pilin içsel kayıpları ve performansı hakkında önemli bilgiler sunar.

Kısa devre akımı (short-circuit current, I_{SC}): Güneş pilinde devre kapalıyken, yani kutuplar arasında teorik olarak sıfır direnç bulunduğu anda ölçülen akım değeridir. Bu durum, aydınlık ortamda oluşan akımın doğrudan yansımasıdır. Kısa devre akımı, fotoelektrik etkiyle oluşturulan elektron-boşluk çiftlerinin üretimi ve birikimine bağlıdır. Standart koşullarda kısa devre akımı, foto-akım ile eşdeğer kabul edilmekte olup, güneş pilinden elde edilebilecek en yüksek akım değerini temsil etmektedir. Ayrıca, bu parametre güneş pilinin aktif alanı, ışık spektrumu, gelen ışık yoğunluğu ve pilin ışığı soğurma/yansıtma özelliklerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

Maksimum güç noktası (Maximum Power Point, P_{max}): Güneş pillerine belirli bir V gerilimi uygulandığında, elde edilen güç, uygulanan potansiyelle bu potansiyel altında gerçekleşen akımın çarpımına eşdeğer olarak tanımlanmaktadır. Bu hesaplamalar sonucunda elde edilen güç eğrisi incelendiğinde, en yüksek güç noktasının belirlenmesiyle sistemin performans zirvesi ortaya konur. Bu noktada ölçülen gerilim ve akım değerleri, sırasıyla güneş pilinin maksimum gerilimi (V_m) ve maksimum akımı (I_m) olarak ifade edilir.

$$P_{max} = V_m \times I_m \quad (2.1)$$

Dolum faktörü (fill factor, FF): Güneş pillerinin sağladığı maksimum güç çıkışını belirleyen temel bir parametre olarak tanımlanmaktadır. Güneş pillerinde, kısa devre akımı (I_{SC}) ve açık devre gerilimi (V_{OC}) sırasıyla cihazın üretebileceği maksimum akım ve gerilim değerlerini

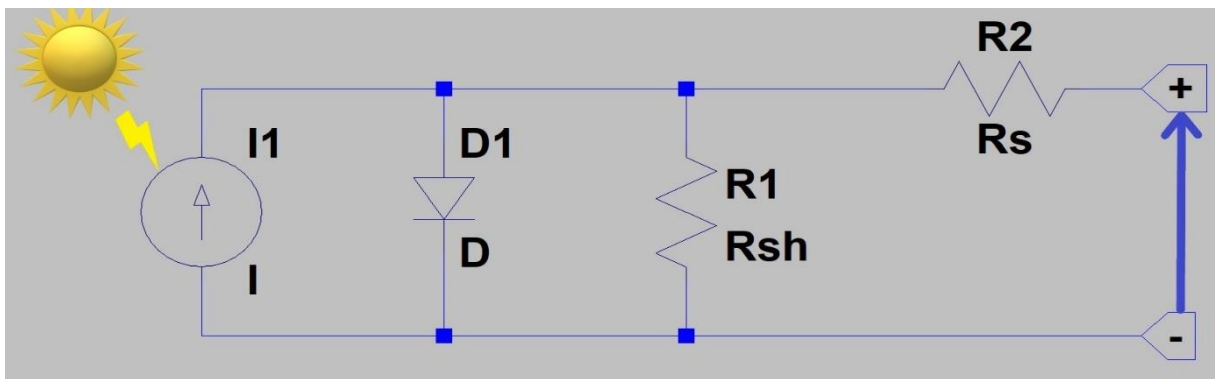
temsil etmektedir. Bununla birlikte, bu iki uç noktada üretilen güç sıfır olacağından, gerçek çalışma koşullarında elde edilebilecek maksimum güç, I-V eğrisinin eğimli bölgesinde ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla, dolum faktörü, ideal maksimum değerlerin bir göstergesi olarak, güneş pilinin pratik güç üretim verimliliğini yansıtmada kritik bir rol oynamaktadır ve aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$FF = \frac{V_m \times I_m}{I_{SC} \times V_{OC}} = \frac{P_{max}}{I_{SC} \times V_{OC}} \quad (2.2)$$

Verim (efficiency, η): Güneş pili verimliliği (η), fotovoltaiik cihazın üzerine düşen güneş ışınımı gücü ile bu cihaz tarafından üretilen elektrik enerjisi arasındaki oran şeklinde tanımlanır. Başka bir deyişle, fotovoltaiik hücre üzerine etki eden güneş ışınımı miktarı ile elde edilen elektriksel güç arasındaki ilişki, güneş pilinin performansını ortaya koyan temel bir parametre olarak değerlendirilmektedir.

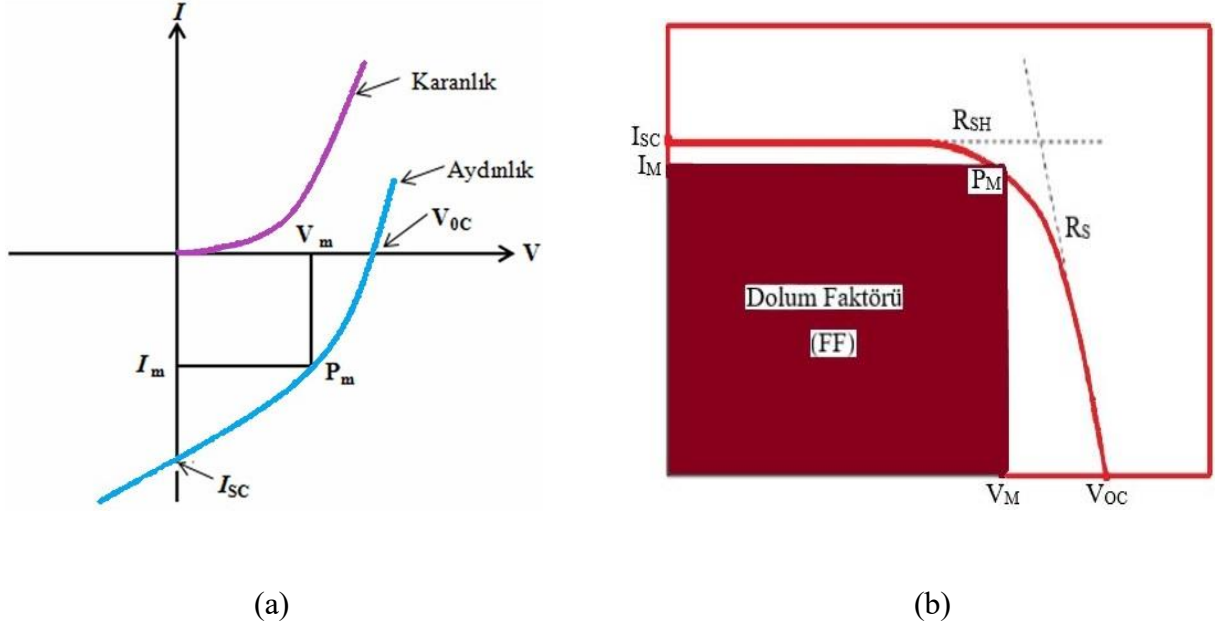
$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{ışık}} = \frac{I_{SC} \times V_{OC} \times FF}{P_{ışık}} \quad (2.3)$$

Fotovoltaiik parametreler, Şekil 1’de sunulan güneş pilinin basitleştirilmiş eşdeğer devre modeli kullanılarak incelenebilir. Bu modelde, uygulanan gerilim altında diyottan geçen akım I_D ve ışık kaynağı tarafından üretilen akım I_L olarak gösterilirken, aygıtın seri ve paralel dirençleri sırasıyla R_S ve R_{SH} ile ifade edilmektedir.



Şekil 1. Güneş pilinin basit eşdeğer devresi

Uygulanan V gerilimi altında ideal bir güneş pilinin karanlık ve aydınlık koşullardaki akım-gerilim karakteristiği Şekil 2’de gösterilmektedir.



Şekil 2. İdeal bir güneş pilinin aydınlık-karanlık altındaki akım-gerilim (I-V) grafiği (a) ve eğrisi (b)

2.1.4. Boya duyarlı güneş pillerinin avantajları

Boya duyarlı güneş pilleri (BDGP) günümüz araştırmalarında gelecek vadeden bir teknoloji olarak değerlendirilmektedir. Teoride, bu pillerin avantajlarının arasında üretim maliyetlerinin potansiyel olarak düşük olması, düşük enerji gereksinimi ve esnek uygulama olanakları yer almaktadır. Önerilen üretim süreçlerine göre, BDGP'lerde kullanılan malzemelerin silisyum bazlı güneş pillerine kıyasla daha az enerji yoğunluğu gerektirdiği ve düşük sıcaklıklarda işlenebilmesinin, çevresel ayak izinin azaltılmasına ve üretim sürecinin basitleştirilmesine olanak sağlayabileceği öngörülmektedir.

Ayrıca, mevcut teorik yaklaşımlara göre boyaya duyarlı güneş pilleri esnek altlıklar üzerinde uygulanabilir hale getirilebilmekte; bu durumun bükülebilir ve taşınabilir cihazlarla entegrasyon için uygun olabileceği düşünülmektedir. Bu bağlamda, mimari cam yüzeyler, giyilebilir teknolojiler ve diğer esnek uygulama alanlarına yönelik çözümler geliştirilebileceği öngörülmektedir. Ek olarak, geniş spektral ışık absorpsiyonu sayesinde, düşük aydınlatma koşullarında dahi belirli bir verimlilik elde edilebileceği teorik olarak kabul edilmektedir; bu özellik, özellikle kapalı alanlarda enerji üretimi için potansiyel bir avantaj olarak

değerlendirilmektedir.

Optik özelliklerin optimize edilebilmesi, duyarlaştırıcı moleküllerinin çeşitliliği ve nanopartiküler elektrot malzemelerinin kullanılması durumunda, yüksek ışık toplama verimliliğinin sağlanabileceği iddia edilmektedir. Ayrıca, malzeme seçimi ve hücre mimarisindeki esneklik, üretim sırasında farklı renk ve estetik gereksinimlere cevap verilebilmesinin mümkün olacağına işaret etmektedir. Bu durum, teknolojinin mimari ve dekoratif uygulamalara entegrasyonu açısından gelecekte önemli bir rol oynayabilir.

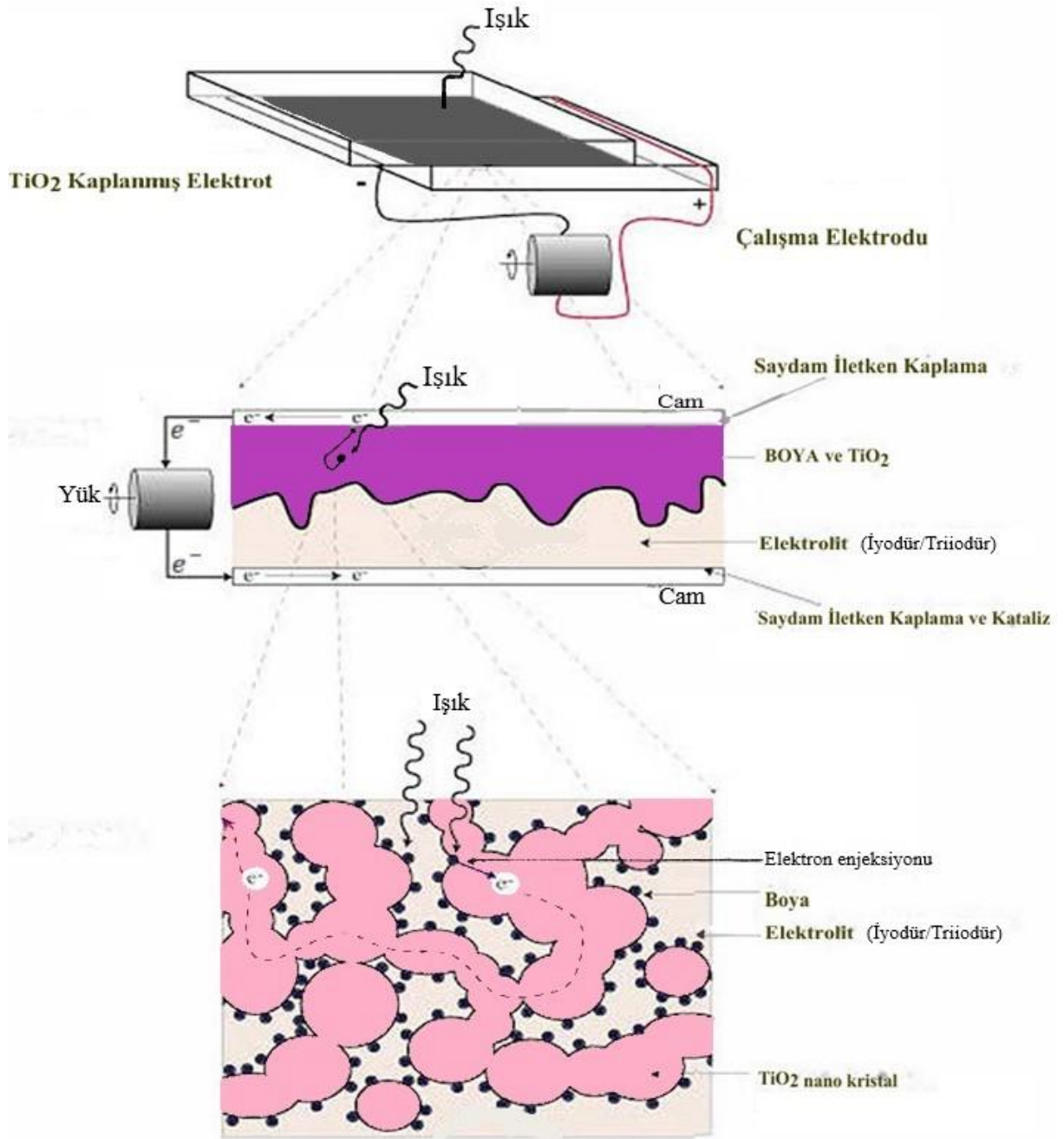
Sonuç olarak, mevcut teorik yaklaşımlar doğrultusunda, boyaya duyarlı güneş pillerinin düşük üretim maliyetleri, esnek uygulama olanakları, çevre dostu üretim süreçleri ve düşük ışık koşullarında dahi verimli enerji üretimi gibi potansiyel avantajları gelecekte netlik kazanabilir ve bu teknoloji, yenilenebilir enerji alanında önemli bir alternatif olarak öne çıkabilir.

2.1.5. Boya duyarlı güneş pillerinin yapısı

BDGP'lerin ışığı elektriğe dönüştürme prensibi, geleneksel güneş pillerinden önemli ölçüde farklılık göstermektedir. Klasik güneş pillerinde, silisyum hem fotoelektron kaynağı olarak işlev görmek hem de elektriksel yüklerin (elektron ve boşluk) ayrılmasında potansiyel bariyer rolünü üstlenmektedir. Buna karşın, BDGP'lerde ışığa duyarlı boyalar aracılığıyla üretilen fotoelektronlar, TiO_2 , SnO_2 , ZnO gibi yarıiletken ince filmler ve sıvı elektrot kombinasyonu kullanılarak yük ayrımını sağlamaktadır. Gratel'in geliştirmiş olduğu BDGP sistemi ise üç temel bileşene dayanmaktadır:

- a) Anot kısmı, saydam iletken FTO ($\text{F}:\text{SnO}_2$) altlık üzerine yerleştirilen ve geniş bant aralıklı yarıiletken özelliklere sahip TiO_2 filminden oluşmaktadır,
- b) Yarıiletken yüzeye adsorbe edilmiş organik boya moleküllerinin tek katmanı,
- c) Şekil 3'te gösterildiği üzere, I^-/I_3^- redoks çiftini içeren sıvı elektrolit, saydam iletken tabakaya temas edecek şekilde kontrollü olarak yerleştirilmiş ve hücre içerisinde ince bir katman oluşturacak biçimde dağıtılmıştır. Bununla birlikte, çalışma sırasında elektrolitin hücre dışına sızmasını önlemek ve yapısal bütünlüğü korumak amacıyla uygun kapatma işlemleri uygulanmıştır.

Yüksek güneş pili performansı sağlamak amacıyla, numunenin düşük tabaka direncine ve yüksek optik saydamlığa sahip olması gerekmektedir. Buna ek olarak, tabaka direncinin numunenin tavlama ve büyütme sıcaklıklarından bağımsız olması büyük önem taşımaktadır. Saydam iletken oksit tabakalar arasında İndiyum Kalay Oksit (ITO) tabanlı malzeme yaygın olarak kullanılmaktadır; ancak ITO, düşük elektriksel dirence sahip olmasına rağmen yüksek sıcaklıklarda direncinde anlamlı bir artış göstermektedir. Bu nedenle, BDGP uygulamalarında, yüksek sıcaklık kararlılığı ve kimyasal dayanımı nedeniyle flor katkılı kalay oksit (FTO, F:SnO₂) tabanlı iletken camlar yaygın olarak tercih edilmektedir. Karşıt elektrot olarak ise platin (Pt) kaplı FTO tabanlı malzeme (Pt:FTO) kullanılmakta ve çalışma elektrotu ile karşıt elektrotu birbirine bağlayan iletken malzemeler aynı zamanda tutucu görev üstlenmektedir. Elektrolit olarak iyodür/triiodür (I⁻/I₃⁻) redoks çifti tercih edilmekte olup, yarıiletken yüzeyin duyarlılaştırılmasında kullanılan boya, ilgili yarıiletkenin (ZnO, TiO₂, SnO₂) türüne bağlı olarak değişiklik göstermektedir.



Şekil 3. Boya duyarlı güneş pillerinin (BDGP) şematik yapısı

2.1.6. Boya duyarlı güneş pillerinin çalışma prensibi

Boya duyarlı güneş pillerinin (BDGP) çalışma mekanizması Şekil 4'te gösterilmiştir. Nanopartikül yapıya sahip titanyum dioksit (TiO₂) tabaka üzerine adsorbe olmuş boya moleküllerinin ışığı emmesi ve sonrasında gerçekleşen redoks tepkimeleri ile sağlanır. Bu yapı genellikle, iletken özellik gösteren florin katkılı kalay oksit (FTO) kaplı cam taban üzerinde

inşa edilmektedir.

Güneş ışığı, önce FTO kaplı cam altlık üzerinden hücre içerisine iletilir ve TiO₂ fotoanot yarıiletken tabakaya ulaşır. Burada yüzeye bağlı boya molekülleriyle etkileşime girer. Bu etkileşim sonucunda, boya molekülleri gelen ışığı soğurur ve uyarılmış bir hal alır (Grätzel, 2003).



Burada, S normal boya molekülünü, $h\nu$ foton enerjisini ve S^* uyarılmış boya formunu temsil eder.

Uyarılmış boya molekülü (S^*) kazanılan enerji sayesinde bir elektronunu doğrudan TiO₂ fotoanot filminin iletkenlik bandına aktarır. Bu olay, "elektron enjeksiyonu" olarak tanımlanır ve sonraki enerji dönüşüm sürecinin ilk basamağını oluşturur (Kato vd., 2004).



Bu aşamada, S^+ elektronunu kaybeden (oksidlenmiş) boya formunu, e^- ise TiO₂ fotoanot filmine enjekte edilen elektronları ifade eder.

TiO₂'nin nanopartikül yapısı içerisindeki enjeksiyon sonucu ortaya çıkan serbest elektronlar, TiO₂ fotoanot filmi boyunca hareket ederek FTO elektrota ulaşır. Buradan, elektronlar dış devre üzerinden hareket edip karşıt elektrota iletilir. Böylece, sistemde elektrik akımı oluşturulmuş olur.

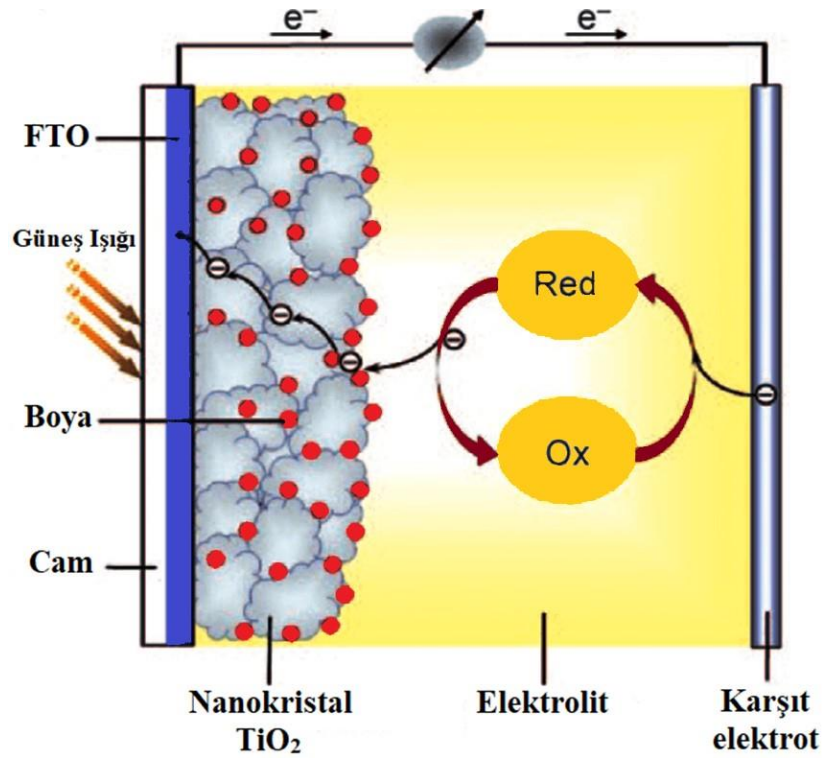
Elektronunu TiO₂'ye devreden boya molekülleri, oksidasyon sonucu pozitif yüklü (S^+) hale gelir. Hücre içerisinde bulunan iyodür/triiyodür (I^-/I_3^-) redoks çifti, oksitlenmiş boya molekülünü indirger ve molekül yeniden temel haline dönüştürülür:



Dış devreden sağlanan elektronlar, karşıt elektrot üzerinde triiyodür iyonunun (I_3^-) indirgenmesini sağlayarak döngünün devam etmesini mümkün kılar:



Bu redoks süreçleri, hücrenin sürekli çalışabilmesi için gerekli olan redoks döngüsünü oluşturur. İndirgeme tepkimeleri sayesinde boya molekülleri yeniden foton absorpsiyonu yapabilecek hale getirilmiş olur (Kay ve Grätzel, 1993).



Şekil 4. Boya duyarlı güneş pillerinin (BDGP) çalışma prensibi

2.1.7. Doğal boya ve diğer boya türleri

Güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesinde boyar maddelerin kullanımı, özellikle boyar maddelerin hassaslaştırma işlevi nedeniyle cihaz performansında önemli bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, çeşitli boyar maddeler sentezlenmiş ve bu maddelerin optoelektronik özellikleri, enerji dönüşüm verimliliğini artırmak amacıyla detaylı olarak incelenmiştir.

BDGP'lerde (Boya Duyarlı Güneş Pilleri) bugüne kadar kullanılan başlıca sentetik boyar maddeler arasında polipiridil kompleksleri (O'Regan & Grätzel, 1991), konjüge polimerler

(Gebeyehu, 2002), porfirin türevleri (Cherian vd., 2005) ve indolin bazlı bileşikler (Tamotsu vd., 2004) yer almaktadır. Bu boya türleri arasında özellikle rutenyum kompleks boyaları (örneğin N3 ve N719), yüksek verimlilikleri nedeniyle uzun yıllar boyunca tercih edilmiştir. Rutenyum boyaları, TiO_2 ile oluşturdıkları güçlü bağlanma ve etkin elektron transferi özellikleri sayesinde öne çıkmıştır. Ancak bu boyaların yaygın kullanımına rağmen, bazı ciddi dezavantajları bulunmaktadır. Hammaddelerinin pahalı olması, sentezlerinin karmaşık ve maliyetli olması, molar soğurma katsayılarının düşük seviyelerde kalması, güneş spektrumunun yalnızca sınırlı bir kısmını absorbe edebilmeleri ve çevresel risk taşıyan ağır metaller içermeleri bu sınıf boyaların dezavantajlarını oluşturmaktadır (O'Regan & Grätzel, 1991; Sönmezoğlu vd., 2012).

Bu nedenle, çevre dostu, ekonomik ve sürdürülebilir alternatiflerin araştırılması kaçınılmaz hale gelmiştir. Bu bağlamda doğal boyar maddeler, BDGP sistemlerinde giderek artan bir ilgiyle araştırılmaktadır. Doğal kaynaklardan elde edilen antosiyanin, karotenoid ve klorofil gibi pigmentler, sahip oldukları yüksek molar soğurma katsayısı ve geniş spektral absorpsiyon yetenekleri sayesinde bu alanda öne çıkmaktadır. Doğal boyalar, güneş spektrumunun özellikle 920 nm altındaki geniş bir aralığını absorbe edebilme kabiliyetine sahiptir. Ayrıca yapılarında yer alan karboksil, hidroksil ve benzeri fonksiyonel gruplar, TiO_2 gibi yarıiletken yüzeylere kuvvetli şekilde bağlanmalarını sağlayarak etkili bir elektron transferi gerçekleştirmelerine olanak tanımaktadır (Tennakone vd., 1997; Smestad ve Grätzel, 1998; Garcia vd., 2003).

Doğal boyaların bir diğer avantajı da redoks potansiyellerinin BDGP sisteminde kullanılan elektrolitlerle uyumlu olmasıdır. Bu uyumluluk, boyar maddenin uyarıldıktan sonra elektron kaybetmesini ve yeniden indirgenmesini kolaylaştırmakta, böylece döngüsel enerji dönüşüm süreci desteklenmektedir (Sönmezoğlu vd., 2012). Ayrıca doğal boyalar çevreye zarar vermeyen ekstraksiyon yöntemleriyle elde edilebilmekte ve düşük maliyetleriyle endüstriyel üretime uygunluk göstermektedir.

Bu avantajlar doğrultusunda, literatürde birçok çalışma doğal boyar maddelerin BDGP sistemlerinde başarılı şekilde kullanılabileceğini ortaya koymuştur. Örneğin, antosiyanin bazlı boyalar ile yapılan çalışmalarda %0,5–2,5 arasında değişen verimlilikler rapor edilmiştir (Wongcharee vd., 2007; Yamazaki vd., 2007; Ernando ve Senadeera, 2008). Polo ve İha (2006) ile Gomez-Ortiz ve arkadaşları (2010) da doğal pigmentlerin ışık absorpsiyonu ve fotokimyasal stabiliteleri üzerine yaptıkları çalışmalarda, bu boyaların BDGP'ler için uygun adaylar

olduğunu vurgulamışlardır.

Sonuç olarak, sentetik rutenyum kompleksleri her ne kadar yüksek verimlilik göstermiş olsa da çevresel ve ekonomik açıdan çeşitli dezavantajlara sahiptir. Buna karşın, doğal boyar maddeler geniş spektral absorpsiyon aralığı, yüksek molar soğurma katsayısı, düşük maliyet, biyolojik olarak parçalanabilirlik ve çevre dostu olmaları gibi nedenlerle BDGP uygulamalarında önemli bir alternatif olarak ön plana çıkmaktadır. Bu nedenle, sürdürülebilir enerji teknolojilerinde doğal kaynaklı boyaların kullanım potansiyelinin daha fazla araştırılması gerekmektedir.

2.1.8. Kaynak özetleri

BDGP'lerin (Boya Duyarlı Güneş Pilleri) geliştirilme sürecinde, ilk etapta doğal fotosentez mekanizmalarından ilham alınmıştır (Chang vd., 2013). 1972 yılında Tributsch'ın, klorofil modifikasyonu ile duyarlılığı artırılmış çinko oksit (ZnO) elektrotunu geliştirmesi, doğal boyaların kullanıldığı güneş pilinin tarihsel başlangıcını işaret eden önemli bir dönüm noktası olarak kabul edilmektedir (Nataraj, 2012). Sonraki yıllarda güneş enerjisi hücresi araştırmalarında öne çıkan konulardan biri olan BDGP sistemlerinde, yüzeye tek katman halinde uygulanan boya molekülü diziliminin yalnızca %1 oranında foton absorpsiyonu gerçekleştirmesi temel bir sorun olarak belirlenmiştir (Dai vd., 2004). 1991 yılında O'Regan ve Grätzel (O'Regan & Grätzel, 1991) tarafından TiO₂ nanopartikülleri kullanılarak geliştirilen BDGP'lerin ardından, 1993 yılında yapılan çalışmalarda fotoduyarlılaştırıcı olarak, fotosentezdeki etkinliği nedeniyle ilgi gören klorofil ve klorofil türevleri kullanılmıştır (Kay ve Grätzel, 1993). 1993 yılında Kay ve Grätzel'in gerçekleştirdiği bu çalışmanın ardından, fotoduyarlılaştırıcının yapı içerisindeki etkisi daha iyi anlaşılmış ve aynı yıl içerisinde Ru esaslı boya geliştirilerek BDGP üretiminde uygulanmıştır (Nazeeruddin vd., 1993). Bu gelişmeler sonrasında, araştırmalar genel olarak sentetik boya uygulamalarına kayarken, Ru bazlı sentetik boyaların getirdiği dezavantajların ortaya çıkmasıyla doğal fotoduyarlılaştırıcılar üzerindeki çalışmalar yeniden ivme kazanmış; özellikle 2006 yılından itibaren bu konu üzerine yapılan çalışmaların artışı dikkat çekmektedir.

Cherepy ve arkadaşları (1997) çalışmasında, böğürtlen özünden elde edilen antosiyanin bazlı doğal boya, metanol/asetik asit/su (25:4:21) karışımı ile ekstrakte edilmiş ve bu boya kullanılarak imal edilen güneş pilinin fotoelektrokimyasal performansı değerlendirilmiştir. Çalışmada, ortalama 10–50 nm çapındaki TiO₂ nanopartiküllerinden oluşan pasta, FTO kaplı

cam üzerine uygulanıp sinterlendikten sonra, iki elektrot arasına iyodür/triiodür (I^-/I_3^-) içeren sıvı elektrolit yerleştirilerek boyayla duyarlılaştırılmış bir güneş pili oluşturulmuştur. $0,9 \text{ cm}^2$ aktif alana sahip olan pil, 1000 W/m^2 aydınlatma koşulları altında yapılan ölçümler neticesinde V_{OC} değeri $0,45 \text{ V}$, J_{SC} değeri $2,2 \text{ mA/cm}^2$ olarak belirlenmiş ve enerji dönüşüm verimliliği $\%0,56$ olarak hesaplanmıştır.

Kashyout ve arkadaşları (2005) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, yarıiletken tabaka olarak ZnO kullanılarak iki farklı boyar madde ile BDGP'ler üretilmiştir. Araştırmada; bir tarafta ticari N3 (Ru) boyası, diğer tarafta ise antosiyanin içeren böğürtlen boyası tercih edilmiştir. Böğürtlen meyvesi sıkılarak elde edilen doğal öz, hiçbir katkı maddesi eklenmeden doğrudan boyar madde olarak kullanılmıştır. ZnO tabanlı fotoelektrot ile karbon kaplı arka elektrotun bulunduğu güneş pilinde, N3 boyar madde kullanıldığında açık devre gerilimi $0,6 \text{ V}$ ve kısa devre akım yoğunluğu $0,2 \text{ mA/cm}^2$ olarak ölçülürken, böğürtlen boyası kullanıldığında ise sırasıyla $0,55 \text{ V}$ ve $30 \mu\text{A/cm}^2$ değerleri elde edilmiştir.

Polo ve İha (2006), sarıçalı (Calafate) ve Brezilya üzümü (Jaboticaba) gibi doğal kaynaklardan elde edilen boyar maddeleri kullanarak boyayla duyarlılaştırılmış güneş pilleri üretmişlerdir. Yapılan performans testleri sonucunda, Brezilya üzümü kullanılarak hazırlanan güneş pilinde kısa devre akım yoğunluğu 9 mA/cm^2 , açık devre gerilimi $0,59 \text{ V}$ ve dolum faktörü $0,54$ olarak belirlenmiştir. Buna karşılık, sarıçalıdan elde edilen boyar maddeyle hazırlanan cihazda bu değerler sırasıyla $6,2 \text{ mA/cm}^2$, $0,47 \text{ V}$ ve $0,36$ olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar, kullanılan doğal boyar maddesinin güneş pili performansı üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymaktadır.

Hao ve çalışma arkadaşları (2006), yaptıkları çalışmada güneş pilinin enerji dönüşüm verimliliğinin, kullanılan boyar maddenin kimyasal yapısıyla doğrudan bağlantılı olduğunu ortaya koymuştur. Çalışmada, doğal boyar maddeler içerisinde yer alan antosiyanin molekülünün, içerdiği hidroksil ve karbonil fonksiyonel gruplar sayesinde TiO_2 fotoanot filmin yarıiletken yüzeye etkin biçimde bağlandığı; buna karşın, klorofil ve karoten içeren boyar maddelerin benzer yapısal özelliklerden yoksun olmaları nedeniyle yarıiletken oksit yüzeye yeterli tutunma sağlamadığı ifade edilmiştir. Doğal boyar maddeler, siyah pirinç (black rice), kanarya kuş gülü (Rosa xanthina), mercan ağacının kırmızı çiçeği (Erythrina), kırmızıbiber (Capsicum), orkide çiçeği (variegata flower) ve yosun (kelp) gibi kaynaklardan alkol kullanılarak ekstrakte edilmiş; ardından elde edilen çözeltilerin bileşim tayini amacıyla UV spektroskopi yöntemi uygulanmıştır. Elde edilen veriler, kanarya kuş gülü ve siyah pirincin

antosiyenin, mercan ağacı çiçeği ile kırmızıbiberin karoten, orkide çiçeği ve yosunun ise klorofil içerdiğini ortaya koymuştur. Fotovoltaik performans analizlerinde ise en iyi sonuç, siyah pirinç boyar maddesiyle üretilen cihazda gözlemlenmiş; bu cihazda kısa devre akım yoğunluğu $1,142 \text{ mA/cm}^2$, açık devre gerilimi $0,551 \text{ V}$ ve dolum faktörü $0,52$ olarak kaydedilmiştir.

Wongcharee ve arkadaşları (2007), doğal boyaların güneş pili performansı üzerine etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada Afrika bamyası (*Hibiscus Sabdariffa L.*) ve mavi bezelye çiçeğinden (blue pea flower) elde edilen doğal boyar maddeler için saf su ve etil alkol kullanarak farklı sıcaklıklarda ekstraksiyon yapılmıştır. Yapılan analizlerde, boyar maddelerin $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de su ile ekstrakte edilmesi durumunda, yalnızca rosella özünün kullanıldığı cihazda enerji dönüşüm verimliliği $\%0,37$, sadece mavi bezelye ekstraktının kullanıldığı durumda $\%0,05$ ve her iki ekstraktın karışımının uygulandığı pilde ise $\%0,15$ olarak ölçülmüştür. Ayrıca, çalışmada ekstraksiyon sıcaklığı ile ekstrakt çözeltisinin pH değerinin güneş pili performansı üzerindeki etkileri de değerlendirilmiştir. Rosella bitkisinden su ile hazırlanan boyanın, ekstraksiyon sıcaklığının $100 \text{ }^\circ\text{C}$ yerine $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye düşürülmesi ve boya pH'sinin $0,1 \text{ M HCl}$ kullanılarak $3,2$ 'den $1,0$ 'a ayarlanması sonucunda, üretilen BDGP'nin enerji dönüşüm verimliliğinin $\%0,37$ 'den $\%0,70$ 'e yükseldiği gözlemlenmiştir. Ipomea bitkisinden elde edilen boya kullanılarak yapılan diğer bir çalışmada (Chang vd., 2010), doğal boyaların pH seviyesindeki değişiminin enerji dönüşüm verimliliğine etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada, pH değerinin düşürülmesiyle BDGP'lerin performansında belirgin bir artış gözlemlenmiş; pH değeri $3,0$ 'dan $1,0$ 'a indirildiğinde, BDGP'lerin fotoelektrik dönüşüm etkinliği $\%0,253$ 'ten $\%0,318$ 'e yükselmiştir. Ek olarak, azalan pH seviyesinin doğal boya moleküllerinin stabilitesini artırabileceğine dair bulgular da rapor edilmiştir (Bakowska vd., 2003; Hao vd., 2004).

Calogero ve arkadaşları (2008) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, *Citrus arantium L.* türü kırmızı Sicilya portakalı ve mor patlıcan kullanılarak BDGP üretimi yapılmıştır. Deneysel olarak, kırmızı portakal suyunun boyar madde kaynağı olarak kullanıldığı durumda elde edilen BDGP cihazı için ölçülen fotovoltaik parametreler; enerji dönüşüm verimliliği (η) $\%0,66$, kısa devre akım yoğunluğu (J_{SC}) $3,84 \text{ mA/cm}^2$, açık devre gerilimi (V_{OC}) $0,340 \text{ V}$ ve dolum faktörü (FF) $0,50$ olarak tespit edilmiştir. Buna karşın, patlıcan kabuğundan elde edilen boyar madde ile üretilen cihazda, ölçümler J_{SC} : $3,40 \text{ mA/cm}^2$, V_{OC} : $0,350 \text{ V}$ ve FF: $0,40$ olarak bulunmuştur.

Zhang ve arkadaşlarının (2008) çalışmasında, kırmızı pancar köklerinden izole edilen doğal betalain pigmentleri içeren boyar maddenin, görünür spektrumda (özellikle 535 nm) belirgin bir ışık absorpsiyonu gerçekleştirdiği bildirilmiştir. Ayrıca, metoksypropiyonitril içeren sıvı elektrolit (I^-/I_3^-) kullanılarak hazırlanan BDGP cihazından elde edilen ölçümler sonucunda, cihaz parametreleri; kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}) 2,42 mA/cm², açık devre voltajı (V_{oc}) 0,44 V, doluluk faktörü (FF) 0,63 ve enerji dönüşüm verimi %0,67 olarak tespit edilmiştir.

Tekerek (2009), BDGP fabrikasyonu için çeşitli bitkilerden hazırlanan doğal boyar maddeler kullanmıştır. Bu kapsamda, doğal boyar madde üretiminde siyah ahududu (*Rubus ideaus* L.), böğürtlen (*Rubus fruticosus* L.), mor havuç (*Daucus carota* L.), urmududu (*Morus nigra* L.), Afrika bamyası (*Hibiscus sabdariffa* L.), ve urmududu, ahududu, böğürtlen çözeltilerinden hazırlanan meyve suları tercih edilmiştir. Yapılan deneysel uygulamalarda, üretilen güneş pilleri arasında en yüksek enerji dönüşüm verimliliğine (%0,248) mor havuç suyuyla hazırlanan cihazda rastlanmıştır.

Kılıç (2010) tez çalışmasında, elektrokimyasal yöntemle sentezlenen farklı morfolojilere sahip ZnO nanopartiküller, N719 rutenyum kompleks boyar madde ile fonksiyonelleştirilerek BDGP üretiminde kullanılmıştır. Akım yoğunluğu-gerilim karakteristikleri incelendiğinde, ZnO nano-çubuk yapıları hücrelerin enerji dönüşüm verimi %1,59, nanotel yapıları hücrelerin verimi %2,10 ve nano-çiçek morfolojisine sahip hücrelerin verimi ise %3,10 olarak belirlenmiştir.

Zhou ve arkadaşları (2011) çalışmasında, çiçek, yaprak, meyve, geleneksel Çin ilaçları ve içecekleri gibi çeşitli doğal kaynaklardan izole edilen 20 farklı doğal boya, BDGP'lerde boyar madde olarak değerlendirilmiştir. Bu doğal boyalara dayalı olarak üretilen boya duyarlı güneş pillerinin fotovoltaiik performansları, açık devre geriliminin (V_{oc}) 0,337 ile 0,689 V arasında ve kısa devre akım yoğunluğunun (J_{sc}) 0,14 ile 2,69 mA/cm² arasında değiştiğini ortaya koymuştur. En yüksek V_{oc} değeri, mangostan pericabından elde edilen boya kullanılarak hesaplanan 0,686 V ve %1,17 verimlilik (η) ile belirlenmiştir.

Sönmezoğlu ve arkadaşları (2014) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, ceviz meyve kabuklarından sıcak ekstraksiyon yöntemiyle izole edilen juglon boyarmaddesi, TiO₂ tabanlı boyar madde duyarlı güneş pillerinde kullanılmıştır. Optik analiz ölçümleri, juglon boyarmaddesinin TiO₂'ye bağlanması sonucu, saf TiO₂'ye kıyasla daha yüksek bir soğurma katsayısına sahip olduğunu göstermiştir. Çalışmada, BDGP, FTO/TiO₂/juglon şeklindeki

Çalışma elektrodu ile FTO/Platin karşıt elektrotunun sandiviç formasyonunda birleştirilmesiyle oluşturulmuştur. 100 mW/cm² ışınım altında gerçekleştirilen deneysel ölçümlerde, oluşturulan güneş pilinin fotovoltatik verimliliği %1,63 olarak rapor edilmiştir.

Kakiage ve çalışma arkadaşları (2015), alkoksisilil-ankor ve karboksil-ankor gruplarına sahip iki farklı organik boya birleşimi kullanarak boya-duyarlı güneş pillerinde %14,3'lk rekor bir enerji dönüşüm verimi elde etmişlerdir. Söz konusu boyalar, ışığı soğurarak açığa çıkan elektronların TiO₂ elektrotuna aktarımını verimli bir şekilde artırmakta; böylece fotoaktif bileşenler ve elektrot yüzeyi arasında uyumlu bir etkileşim sağlanmaktadır.

Mutlu (2016) tez çalışmasında, buğday ve nohut DNA'ları, tek başına ve birlikte eş duyarlılaştırıcı olarak kullanıldıkları biyo-duyarlı güneş pillerinin yanı sıra, N719 boyası (trikarbonil dithiokarbamatlı ruthenyum kompleksi) ile birlikte eş duyarlılaştırıcı görevini üstlendikleri 1 cm²'lik aktif alana sahip hücrelerde 300 W/m² ışık şiddeti altında incelenmiş; her iki bitki DNA'sı ile N719'in kombine kullanıldığı düzenlemenin en yüksek kısa devre akım yoğunluğu ($J_{SC} = 6,17 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$) ve buna bağlı olarak %6,83 maksimum güç verimliliği sağladığı belirlenmiştir.

Ünverdi (2020) tarafından gerçekleştirilen alışma, CdS yarıiletkeni farklı morfolojilerde (ince film, toz ve nanopartiküller) ve dört farklı yöntemle (kimyasal pşkrtme, kimyasal çözelti biriktirme, doctor blade tekniği ve hidrotermal yöntem) sentezlenmiş ve bu yapılar kullanılarak hibrit güneş hücreleri üretilmiştir. Ayrıca, CdS yüzeyi Eosin-Y, D205, N719 ve N3 boylarıyla işlevsel hale getirilerek yapısal, morfolojik, optik ve elektriksel karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir. Boyar madde modifikasyonunun, ışık soğurma özelliklerini iyileştirdiği ve çoğu örnekte absorpsiyon pik şiddetini artırdığı gözlenmiştir. RTPL analizleri, farklı üretim yöntemlerinin CdS örneklerinde farklı kusur merkezleri oluşturduğunu göstermiştir. Boya modifikasyonu, heteroyapıların fotolüminesans şiddetinde genel bir azalmaya neden olmuştur. Elektriksel lmler, tüm heteroyapıların fotovoltatik özellik sergilediğini ve elde edilen verimlerin hem morfolojiye hem de kullanılan boya türüne bağlı olarak farklılık gösterdiğini ortaya koymuştur. En yüksek verim, nanopartikül yapıda sentezlenen ve N719 boyasıyla modifiye edilen örneklerde %0,881 olarak elde edilmiştir.

Eşgin (2021) tez çalışmasında, BDGP'lerde fotoanot malzemesi olarak yaygın olarak kullanılmayan ancak potansiyel taşıyan ZnO nanopartiküller tercih edilmiş ve Cu ile Mn geçiş

metalleriyle katkılanarak yapısal, optik ve fotovoltaiik özellikleri optimize edilmiştir. ZnO nanopartikülleri hidrotermal yöntemle sentezlenmiş; XRD, SEM, UV-Vis ve XPS analizleri ile karakterize edilmiştir. Katkı elementleri, görünür bölgede kısıtlı olan ışık absorpsiyonunu artırmış ve morfolojik iyileşmeler sağlamıştır. FTO üzerine Doctor Blade Yöntemi ile kaplanan ZnO yapıları, N719 boya ile 1–3 saat aralığında duyarlılaştırılarak BDGP'ler oluşturulmuştur. En yüksek verim, katkısız ZnO için %1,70 (3 saat); Cu katkılı ZnO için %2,03 (0,1 M, 1 saat); Mn katkılı ZnO için ise %2,26 (0,1 M, 1 saat) olarak elde edilmiştir.

Demir (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, BDGP'lerde TiO₂ ve ZnO yarı iletkenlerinin hibrit kompozit olarak kullanımı incelenmiştir. Beş farklı pil tasarımı üretilmiş ve her bir tasarımda TiO₂ ve ZnO'nun farklı oranları (saf TiO₂, saf ZnO, 1:3, 3:1 ve 1:1 TiO₂/ZnO) kullanılmıştır. TiO₂ ve ZnO'nun tanecik boyutlarının küçültülmesi için hidrotermal yöntemle üretim yapılmış ve ZnO nanoçubukları için pH değeri 10 seviyesinde tutulmuştur. Üretilen pillerin elektriksel karakterizasyon ölçümleri, solar simülatör cihazı ile 100 mW/cm² (1 sun) aydınlatma altında gerçekleştirilmiştir. En yüksek verimlilik %2,36 ile saf TiO₂ içeren güneş pilinde elde edilmiştir. En düşük verimlilik ise %0,0013 ile saf ZnO içeren pilde gözlemlenmiştir.

Atlı'nın (2023) tez çalışmasında, hibrit fotoanot yapıları geliştirilerek boya duyarlı güneş pillerinin verimliliğinin artırılması hedeflenmiştir. Bu kapsamda, TiO₂ nanoparçacık katmanı; Evonik P25 tozunun etil selüloz-terpineol bağlayıcı ile karıştırılmasıyla elde edilen viskoz P25 pastasının FTO camlara 2000 rpm'de 30 s süreyle spin-kaplama ve ardından 450 °C'de 1 saat tavlama işlemlerinden geçirilmesiyle hazırlanmıştır. TiO₂ nanoparçacıklar ise hidrotermal yöntemle, 150 °C'de 4 s süreyle büyütülüp 450 °C'de 30 dk tavlansarak elde edilmiştir. İki farklı morfolojinin enerji bant uyumunun iyileştirilmesi amacıyla, TiCl₄ öncüllü kimyasal banyoda biriktirme (CBD) yöntemiyle küçük parçacıklardan oluşan bir ara katman uygulanmış; bu sayede nanoçubuk ve nanoparçacık katmanları arasındaki ara yüzey uyumsuzluğu azaltılmıştır. Performans değerlendirmelerinde, yalnızca nanoçubuklu hücre %1,04, yalnızca nanoparçacıklı hücre %4,95 verim gösterirken, hibrit yapı ve buffer tabakası birlikte %5,58 ile en yüksek enerji dönüşüm verimi sunmuştur (Atlı, 2023).

Kaur (2024), TiO₂ tabanlı BDGP'nin verimliliğini artırmak amacıyla, düşük enerjili fotonları absorplayabilen çapraz konjügasyonlu küçük organik duyarlaştırıcılar geliştirilmiştir. Benzo[b]tiofen ve dibenzosilin tabanlı çift donör yapılar kullanılarak, görünür ve yakın

kızılötesi (NIR) bölgede geniş spektrumlu ışık absorpsiyonu sağlayan yeni boyalar sentezlenmiştir. Bu boyalardan biri olan ND6, benzo[b]tiofen donör grubu içeren, çapraz konjugasyonlu sentetik bir organik moleküldür. ND6 boyasıyla yaklaşık %5,2 güç dönüşüm verimi ve $27,5 \text{ mA/cm}^2$ kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}) değerlerine ulaşılmıştır. Ayrıca, biyolojik görüntüleme için NIR-II bölgesinde ($\sim 1310 \text{ nm}$) emisyon yapabilen xanten bazlı floresan boyalar geliştirilmiştir.

Adhikari ve çalışma arkadaşları (2025), N719 (Ru temelli, iki bipiridil-dikarboksilat ve iki SCN^- ligandı içeren bir boya) boyasıyla duyarlılaştırılmış TiO_2 fotoanot filmler, iyodür-temelli bir elektrolit ile hazırlanıp hem simüle güneş ışığı (1 sun) altında hem de karanlıkta 0–1008 saat arası hızlandırılmış yaşlandırmaya tabi tutuldu. J–V analizleri, başlangıçta $13,4 \pm 0,7 \text{ mA/cm}^2$ olan kısa devre akım yoğunluğunun $\%74 \pm 3$ oranında azalmasının, $\%73,1 \pm 0,7$ 'lik verim kaybının birincil kaynağı olduğunu ortaya koydu; aynı zamanda açık devre gerilimi $\%13,8$ gerilerken dolum faktörü $\%22,5$ oranında artış gösterdi ve cihazın yarı ömrü yaklaşık 450 saat olarak belirlendi. XPS, NISS, UPS, FTIR ve UV–Vis DRS gibi yüzey ve ara yüzey karakterizasyon teknikleri kullanılarak, yalnızca ışık altında iyodür (I^-/I_3^-) iyonlarının boya katmanına sızarak tiyosiyanat ligandlarını (SCN^-) yerinden kopardığı; buna karşın rutenyum çekirdeğinin ve organik kromoforun yapısal bütünlüğünün korunduğu belirlendi. Böylece boya/ TiO_2 ara yüzeyine iyodür sızmasının cihaz verimindeki kaybın temel nedeni olduğu ortaya konuldu.

3. YÖNTEM

3.1. Deneysel Yöntem

3.1.1. Hidrotermal sentez yöntemi

Hidrotermal sentez, yüksek basınç ve sıcaklık altında, sulu çözeltiler veya mineralleştirici katkılar eşliğinde gerçekleşen heterojen reaksiyonlar bütünüdür. Bu yöntem; öncelikle düşük çözünürlük göstermesi muhtemel katı bileşenleri çözerek, sonra da kontrollü ortam koşullarında yeniden kristallendirmeyi mümkün kılar. Kristalleşme sürecinin temel itici gücü, malzemenin yüksek çözünürlük bölgesinden daha düşük çözünürlük bölgesine doğru termodinamik eğilim göstermesidir. Literatürde hidrotermal senteze dair çeşitli tanımlar mevcuttur. Rabenau, bu yöntemi 1 bar basınç ve 100 °C üzeri sıcaklıkta, sulu ortamda yürütülen heterojen dönüşümler olarak tanımlamıştır (Rabenau, 1985). Roy ise, 1 atm'den yüksek basınç ve oda sıcaklığını aşan koşullarda sulu bir ortamda ilerleyen tüm heterojen reaksiyonları hidrotermal sentez kapsamında ele almıştır (Roy, 1994). Yoshimura ve Suda'ya göre ise kapalı sistemlerde, 1 atm'in üzerinde basınç ve 100 °C'den yüksek sıcaklık değerlerinde gerçekleşen reaksiyonlar bu başlık altında toplanır (Yoshimura & Suda, 1994). Metal komplekslerin hazırlanmasına odaklanan bu tanımlamalar, sıcaklık ve basınca dair sabit bir alt sınır öngörmez.

Hidrotermal yöntem, sadece kristal büyümesiyle sınırlı kalmayıp arıtma, iyon değişimi, bozunma, dehidrasyon, ekstraksiyon, reaksiyonla sinterleşme, çökelme-kristallendirme, elektrokimyasal dönüşümler ve mekanokimyasal süreçler gibi çok çeşitli teknikleri içerecek şekilde genişletilmiştir (Somiya & Roy, 2000). Günümüzde araştırmacılar, kapalı bir sistemde, atmosferik basınç değerinin üstünde ve oda sıcaklığının üzerinde sıcaklık şartlarında, heterojen bir reaksiyon ortamı sağlayan her türlü işlemi "hidrotermal" başlığı altında değerlendirmektedirler.

Hidrotermal sentez süreçleri; reaksiyon cihazının tasarımı ve işletilmesi, sıcaklık ile basınç kontrolü, çözünürlük analizleri ve kristallenme kinetiğinin izlenmesini kapsar ve her biri deneylerin güvenilirliği ile tekrarlanabilirliği açısından kritik öneme sahiptir. Yeterli basınç koşullarının elde edilebilmesi için genellikle iki tip basınçlı kap tercih edilir: Ağızları sızdırmaz biçimde kapatılmış kuvars veya cam ampuller ve iç yüzeyi teflon kaplı, dış yüzeyi paslanmaz çelikten imal edilen otoklav benzeri reaktörler. Kap malzemesinin seçimi sırasında, hem reaksiyon ortamının potansiyel aşındırıcı etkileri hem de sentez ürünü üzerinde oluşabilecek

metal veya diğerkirillik riskleri göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca sistemde oluşabilecek maksimum basınç değeri; ampul veya reaktörün iç çapı, duvar kalınlığı, çalışma sıcaklığı ve kullanılan malzemenin mekanik mukavemeti gibi parametrelerin birleşik etkisiyle belirlenir.

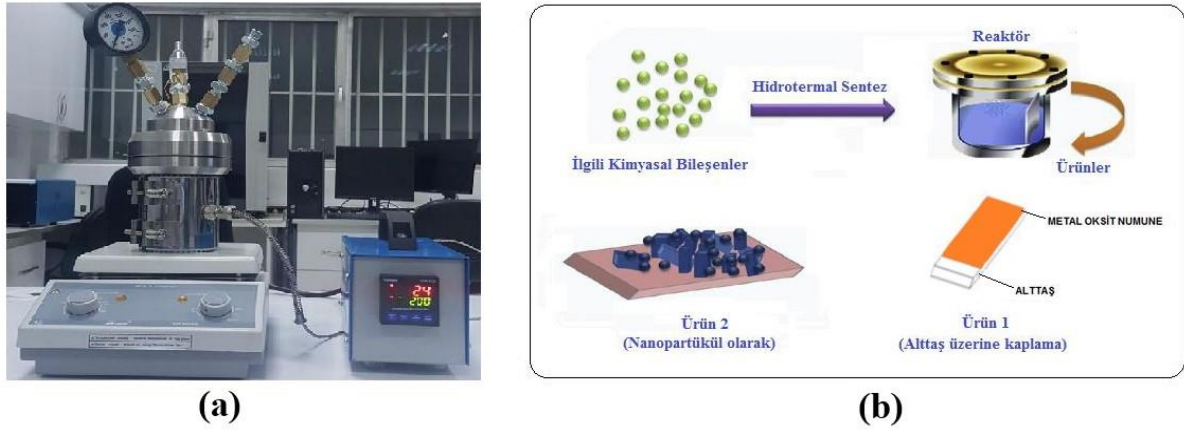
Hidrotermal yöntem, metal oksitlerin sentezinde yaygın olarak başvurulanan bir yaklaşımdır. Kapalı sistem altında çözücü fazda gerçekleşen bu teknik, nispeten düşük sıcaklıklarda bile dar tanecik boyutu dağılımı, kontrollü morfoloji ve yüksek kristal saflığı elde etmeye imkân tanır. Günümüzde TiO_2 , Fe_2O_3 , ZnO ve MnO_2 gibi birçok metal oksit, bu yöntemle sentezlenerek elektronik, kataliz ve manyetik uygulamalar için istenen yapısal ve fonksiyonel özellikleri kazanacak şekilde şekillendirilmektedir.

Bu sentez yöntemi malzeme tasarımında bir dizi önemli avantaj sunar;

- **Kontrollü morfoloji ve tanecik boyutu:** Reaksiyon koşullarının hassas ayarlanabilmesi, kristallerin boyut dağılımı, şekli ve aglomerasyon derecesi üzerinde sıkı kontrol olanağı sağlar.
- **Düşük işlem sıcaklıkları:** Geleneksel katı hâl sentez yöntemlerine kıyasla daha ılımlı sıcaklıklarda çalışılabilmesi, enerji tüketimini azaltır.
- **Çözücü geri kazanımı:** Kullanılan su veya organik çözücüler, reaksiyon sonrasında kolaylıkla geri kazanılıp yeniden kullanılabilir.
- **Ekonomik ve çevresel açıdan uygun:** Hem sarf malzeme maliyetleri düşük kalır hem de atık oluşumu minimize edilir; bu yönüyle “yeşil kimya” ilkelerine uygundur.
- **Hızlı kinetik süreçler:** Yüksek basınç-sıcaklık koşulları, reaksiyon hızlarını artırarak üretim sürelerini kısaltır.
- **Yüksek saflıkta ürünler:** İstenmeyen yan fazların oluşum riski azalır; böylece elde edilen malzemelerde yabancı iyon ve partikül kontaminasyonu en aza indirilir.
- **Geniş yüzey alanlı yapılar:** İnce uzun nanotel ve gözenekli mikroyapılar tasarlamak mümkün olduğundan, katalitik ve adsorpsiyon uygulamaları için ideal özellikler elde edilir.
- **Zor sentezlenen bileşiklerin erişilebilirliği:** Özellikle yüksek oksidasyon basamağına sahip ferromanyetik bileşikler (örneğin Cr (IV) oksit gibi) gibi geleneksel yöntemlerle hazırlanması güç malzemeler, hidrotermal koşullarda verimli biçimde elde edilebilir.

Hidrotermal yöntem, inorganik malzemelerin sentezinde hem konvansiyonel hem de alternatif yaklaşımlara kıyasla sayısız avantaj sunar. Tek kristallerden tozlara, liflerden monolitik

seramiklere; metal kaplamalardan polimer ve seramik kompozitlere kadar geniş bir ürün yelpazesi bu teknikle elde edilebilir. Göreceli olarak düşük sıcaklıklarda yürütülebilen reaksiyonlar, enerjiden tasarruf edilmesini sağlarken; reaksiyon sonrası açığa çıkan atıkların geri dönüştürülebilir yapıda olması veya uygun biçimde bertaraf edilebilmesi, hidrotermal prosesi çevre dostu kılar. Ayrıca katı hâl reaksiyonlarına kıyasla çok daha kısa sürede haftalar yerine günler içinde homojen ürün elde edilebilmesi, yöntemin bir diğer önemli üstünlüğüdür. Öte yandan, yüksek basınç koşullarının temini için mutlaka basınca dayanıklı bir otoklav sistemine ihtiyaç duyulur. Tezimizde kullanılan hidrotermal sentez düzeneği ve bu yöntemle üretilen ürün eldesi Şekil 5’te sunulmuştur.



Şekil 5. Hidrotermal sentez düzeneği (a) ve ürün eldesi (b)

3.1.2. TiO₂ Nanopartiküllerini sentezlemek için kullanılan sarf malzemeler

TiO₂ nanopartiküllerini hidrotermal sentez yöntemi ile sentezlemek için titanyum (IV) klorür (TiCl₄, 99,9%-Sigma-Aldrich), tetrametilamonyum hidroksit (TMAH) çözeltisi ((CH₃)₄N(OH), 25%-Sigma-Aldrich), etanol (CH₃CH₂OH, 99,8%-Sigma-Aldrich) gibi kimyasallar kullanıldı.

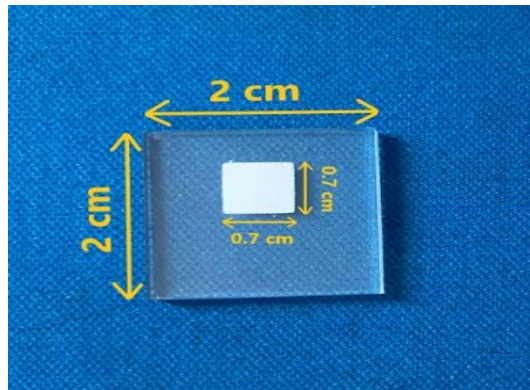
3.1.3. TiO₂ Nanopartiküllerinin hidrotermal sentez yöntemiyle sentezlemesi

Hidrotermal sentez yöntemi ile TiO₂ nanopartiküllerini sentezlemek için buzlu su banyosunda 250 mL’lik bir reaksiyon balonuna 4,38 mL TiCl₄ eklendi. 20 mL deiyonize su, damlatma hunisi yardımıyla reaksiyon balonuna damlatıldı ve bir manyetik karıştırıcıda Ti(OH)₄ reaksiyonu tamamlanincaya kadar karıştırıldı. Bu reaksiyon sonucunda oluşan Ti(OH)₄ üzerine 60mL TMAH sulu çözeltisi eklenerek karıştırma işlemine 30 dakika boyunca devam edildi.

Elde edilen jel halindeki titanyum çözeltisi 100 mL'lik hidrotermal sentez sisteminin teflon kabına aktarıldı. TiO_2 nanopartiküllerinin sentezlenmesi için hidrotermal sentez sistemi $120\text{ }^\circ\text{C}$ sentez sıcaklığına PID kontrolcüsü ile ayarlanarak 12 saat boyunca bekletildi. Reaksiyon süreci tamamlandıktan sonra sistem oda sıcaklığında soğumaya bırakıldı. Daha sonra, toplanan çökelti birkaç kez deiyonize su ve etanol ile yıkandı ve ardından $60\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 12 saat etüvde kurutuldu. Kurutulan TiO_2 çökeltisi $450\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 1 saat kül fırınında kalsine edildi. Kalsine edilen TiO_2 nanopartikülleri vakumlu desikatörde muhafaza edildi.

3.1.4. TiO_2 Nanopartiküllerinin FTO altlık üzerine kaplanması

TiO_2 boya duyarlı güneş pillerinde altlık olarak $\approx 7\text{ ohm/sq}$ yüzey direncini sahip Flor Katkılı Kalay Oksit (SnO_2 : F, FTO) kaplı cam malzemeler altlık malzemesi olarak kullanıldı. FTO kaplı altlık malzemeleri Sigma–Aldrich firmasından temin edildi. TiO_2 nanopartiküllerini içeren fotoanot filmi oluşturmak için FTO kaplı camlar $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ boyutlarında kesildi. Foto aktif bölge olarak adlandırılan $0,7\text{ cm} \times 0,7\text{ cm}$ açıklığa sahip $0,49\text{ cm}^2$ 'lik bir alan boşta kalacak şekilde 3M Scotch polimer bantları $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ boyutlarında kesilen FTO kaplı cam yüzeyine yapıştırıldı. Daha önce kalsine edilmiş 2 g TiO_2 nanopartikülleri, 15 mL etanol içerisine eklenerek homojen bir macun kıvamına gelinceye kadar ultrasonik banyoda karıştırıldı. Hazırlanan TiO_2 macunu, bir cam çubuk yardımıyla FTO kaplı cam üzerindeki $0,49\text{ cm}^2$ 'lik alana doctor-blade yöntemiyle ile kaplandı (Şekil 6). FTO kaplı cam üzerine yapıştırılan bantlar sökülerek TiO_2 fotoanot filmi oda sıcaklığında kurutulmaya bırakıldı. Son olarak kuruyan TiO_2 fotoanot filmi kristalize olması için $400\text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta 60 dakika kül fırınında tavlandı.

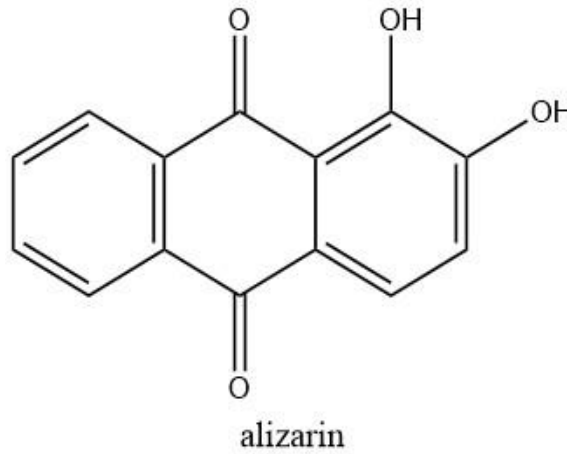


Şekil 6. TiO_2 nanopartiküllerinin FTO altlık üzerine kaplanması

3.1.5. Boyar maddenin hazırlanması ve TiO_2 fotoanot filmine uygulanması

Boya duyarlı güneş hücrelerinde (BDGP), duyarlaştırıcı olarak kullanılan boyanın optik absorpsiyon kapasitesi, yarıiletken yüzeyine bağlanabilme yeteneği ve elektron enjeksiyon etkinliği, hücrenin fotovoltaiik performansını belirleyen temel parametrelerdir. Bu bağlamda alizarin, doğal kaynaklı bir boya olarak BDGP sistemlerinde alternatif bir duyarlaştırıcı malzeme olarak incelenmektedir.

Alizarin (1,2-dihidroksiantrakinon), bitkisel kökenli doğal boyalar arasında yer alan ve antrakinon türevleri sınıfına dâhil edilen bir pigmenttir (Lofrumento vd., 2013). Alizarin, Rubiaceae familyasına ait *Morinda*, *Galium* ve *Oldenlandia* cinslerinin çeşitli türlerinin kök özütlerinde bulunan önemli bir bileşendir (Eastaugh vd., 2007). Tarihsel olarak kökboya bitkisinden elde edilen alizarin, günümüzde hem tekstil hem de fotofonksiyonel malzemeler alanında ilgi görmektedir (Vankar vd., 2008). Molekül yapısında bulunan geniş konjuge aromatik sistem, alizarinin ışııkla etkileşimini mümkün kılarken, fenolik hidroksil grupları ise yüzey bağlanması açısından önemli rol oynamaktadır. Alizarinin kimyasal yapısı Şekil 7’ de verilmiştir.



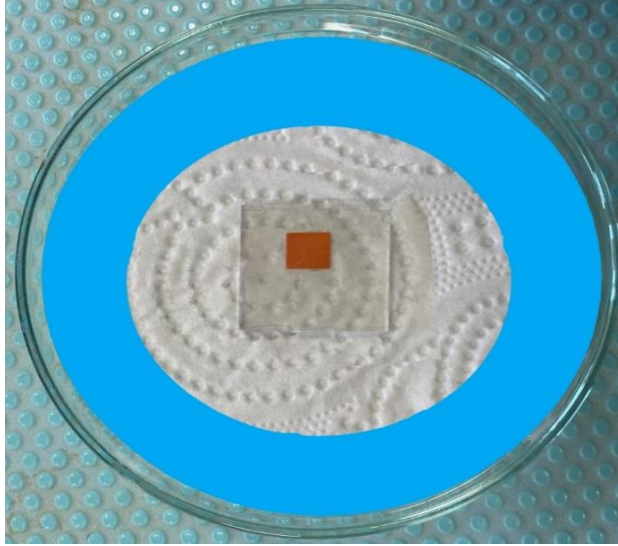
Şekil 7. Alizarinin kimyasal yapısı

Alizarin molekülü, görünür bölgeye uzanan absorpsiyon özellikleri sayesinde güneş ışııkından faydalanabilen doğal boyalar arasında değerlendirilmektedir (Krawczak ve Zdyb, 2019). Aromatik antrakinon çekirdeği, π -elektron delokalizasyonunu artırarak ışıık soğurma kapasitesini destekler. Bu özellik, alizarinin fotouyarılma sonrası elektron transfer süreçlerine katılabilmesine olanak tanır. Fotouyarılma sonrasında oluşan uyarılmış elektronlar, uygun enerji hizalanması sayesinde TiO_2 ’nin iletim bandına aktarılabilir. Alizarinin yapısında

bulunan fenolik hidroksil grupları, TiO_2 yüzeyi ile etkileşimde önemli rol oynamaktadır. Bu fonksiyonel gruplar aracılığıyla boya molekülü yarıiletken yüzeye adsorbe olurken, boya- TiO_2 ara yüzünde elektron transferine olanak sağlayan bir temas bölgesi oluşmaktadır.

Bu çalışma kapsamında boyar madde olarak kullanılan doğal alizarin, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Eczacılık Fakültesi Eczacılık Meslek Bilimleri Bölümü Farmakognozi Anabilim Dalından temin edilmiştir. Alizarin izolasyonu için öncelikle kurutulmuş *Rubia tinctorum* L. kökleri laboratuvar tipi bir değirmende öğütülerek ince toz haline getirilmiştir. Elde edilen bitkisel materyal, 1:10 (w/v) katı/çözücü oranında hazırlanan metanol/su (80:20, v/v) karışımı ile geri soğutucu altında 60 °C’de 4 saat refluks yöntemi kullanılarak ekstrakte edilmiştir. Ekstraksiyon sonrasında süzülen ham ekstrakta, ruberitrik asidin (alizarin glikoziti) aglikon forma dönüştürülmesi amacıyla %2 (v/v) hidroklorik asit (HCl) ilave edilmiş ve asit hidrolizi işlemi 90 °C’de 90 dakika boyunca gerçekleştirilmiştir. Hidroliz işleminin ardından reaksiyon karışımı oda sıcaklığına kadar soğutulmuş ve ayırma hunisine aktarılmıştır. Alizarin moleküllerinin organik faza alınması amacıyla diklorometan (CH_2Cl_2) kullanılarak sıvı-sıvı ekstraksiyonu uygulanmıştır. Birleştirilen organik fazlardan çözücü rotary evaporatör yardımıyla uzaklaştırılarak ham antrakinin fraksiyonu elde edilmiştir. Daha sonra bu fraksiyon, Silika Jel 60 ile doldurulmuş kolon kromatografisinde kloroform/metanol (95:5, v/v) mobil faz sistemi kullanılarak saflaştırılmıştır. Bu işlem sonucunda alizarin, purpurin ve diğer antrakinin türevlerinden ayrılarak izole edilmiş ve çalışma boyunca doğal boyar madde olarak kullanılmıştır.

1,2 g alizarin ($\text{C}_{14}\text{H}_8\text{O}_4$; 240,214 g/mol; turuncu) 50 mL’lik bir balon joje içerisine alınarak deiyonize su ile çözüldü ve 0,1 M alizarin boyar madde çözeltisi hazırlandı. FTO kaplı cam üzerine 0,49 cm^2 ’lik alana kaplanmış TiO_2 fotoanot filmi hazırlanan alizarin boyar madde çözeltisinde 6 saat karanlık bir ortamda bekletildi. Sonra, boyar madde çözeltisi içerisinden çıkarılan TiO_2 fotoanot filmi seyreltilmiş etanol çözeltisi ile yıkanarak yüzeye tutunamayan boyar maddeler yüzeyden temizlendi ve oda sıcaklığında kurumaya bırakıldı. Böylece fotoanot elektrotu (FTO / TiO_2 / Alizarin Boyar Madde) oluşturuldu. FTO kaplı cam üzerine 0,49 cm^2 ’lik alana kaplanmış ve doğal alizarin boyası ile adsorbe edilmiş TiO_2 fotoanot filmi Şekil 8’de verilmiştir.



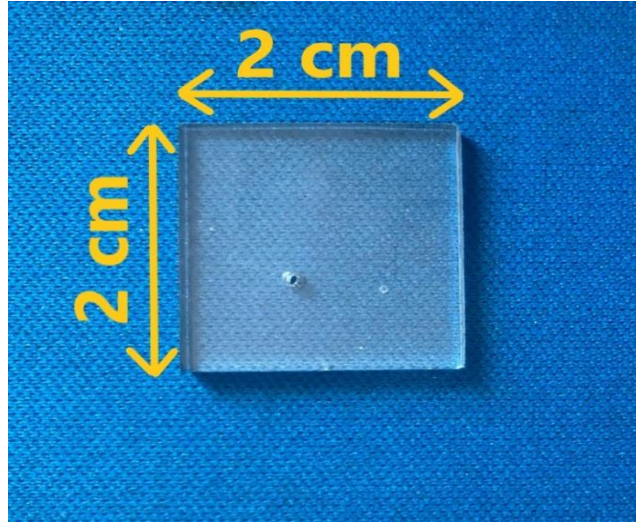
Şekil 8. Alizarin boya kaplı TiO₂ fotoanot filmi

3.1.6. Sıvı elektrolitin hazırlanması

Boya duyarlı güneş pillerinin (BDGP) kararlılığı ve dönüşüm verimliliği üzerinde elektrolit çözeltiler büyük öneme sahiptir. Bu elektrolit çözeltiler, BDGP'nin çalışması esnasında gerekli olan tepkimelerin gerçekleştiği tabakadır ve fotoanot elektrotu ile karşıt elektrot arasında yer alırlar. Sıvı elektrolit çözeltisi için 50 mL'ik bir balon joje içerisine 0,4 g LiI ve 0,038 g I₂ alındı. Bunun üzerine hacim oranı 1:1 olacak şekilde 10 mL tersiyer butil alkol ve 10 mL asetonitril eklenerek manyetik karıştırıcı ile oda sıcaklığında 2 saat karıştırıldı. Böylece iyodür/triiyodür (I⁻/I₃⁻) redoks elektrolit çözeltisi hazırlandı.

3.1.7. Karşıt elektrotun hazırlanması

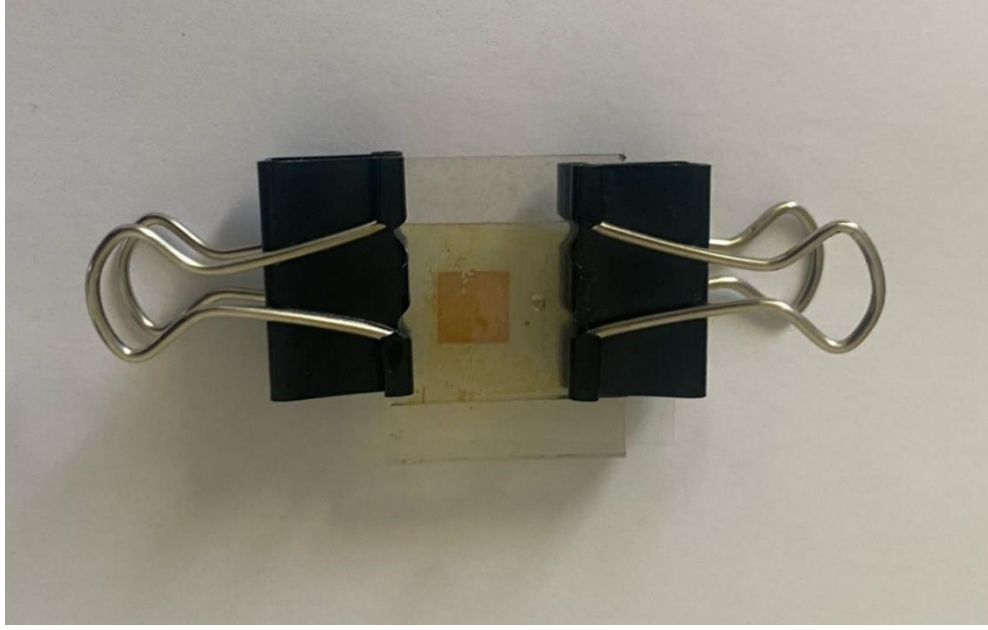
Boya duyarlı güneş pilinde karşıt elektrot, elektronları dış devreden alarak indirgeme için elektrolite aktaran bileşendir. Bu çalışmada karşıt elektrot olarak FTO kaplı cam üzerine kaplanmış platin (Pt) elektrot kullanıldı. Pt elektrot, Fytronix Elektronik Teknolojileri A.Ş. firmasından temin edilmiştir.



Şekil 9. Karşıt elektrot (Pt)

3.1.8. Boya duyarlı güneş pilinin hazırlanması

Doğal alizarin boyası ile duyarlılaştırılmış BDGP'nin üretimi, FTO kaplı cam üzerine 0,49 cm²'lik alana kaplanmış ve doğal alizarin boyası ile adsorbe edilmiş TiO₂ fotoanot, sıvı elektrolit ve FTO üzerine kaplanmış Pt karşıt elektrot kullanılarak gerçekleştirildi. TiO₂ fotoanot ve Pt karşıt elektrotlar, elektrotlar arasında sızdırmazlık ara parçası olarak surlyn esaslı polimer film kullanılarak kışkaçlar yardımıyla sandviç yapısı elde edildi. Redoks çifti iyodür/triiyodür (I⁻/I₃⁻) sıvı elektrolit, karşıt elektrotun arka tarafında bulunan bir delikten enjekte edildi. Daha sonra, elektrolit sızıntısını ve buharlaşmasını önlemek için delik, UV ile kürlenebilir bir jel kullanılarak ince bir cam slayt ile kapatıldı. Böylece uygulama amacıyla kullanılacak FTO/TiO₂/Alizarin/(I⁻/I₃⁻)/Pt/FTO mimarisine sahip bir sandviç tipi BDGP hazırlandı. Hazırlanan BDGP Şekil 10'da gösterilmektedir.



Şekil 10. FTO/TiO₂/Alizarin/(I⁻/I₃⁻)/Pt/FTO mimarisine sahip bir BDGP

3.2. Yapısal, Morfolojik ve Optik Özellikler

3.2.1. X-Işını kırınımı yöntemi (XRD)

X-ışınları, Alman fizikçi Wilhelm Röntgen tarafından 1895 yılında ilk kez tanımlanmıştır. Bu radyasyon türü, kapalı bir tüp içinde katottan yayılan elektronların yüksek bir potansiyel farkıyla hızlandırılarak anot üzerindeki metal hedefe çarpması sonucu üretilir. Hedef metal içindeki atom çekirdeklerine yaklaşan elektronlar, güçlü elektromanyetik etkileşim nedeniyle ani bir biçimde yavaşlamak zorunda kalır ve fazladan enerjilerini foton yayarak kaybederler. Sürekli tekrarlanan bu süreç, oluşan yüksek enerjili fotonlardan meydana gelen X-ışınlarını ortaya çıkarır (Cömert, 2015). Katı fazlarda kristal yapı, temel yapı taşlarını oluşturan atom, atom grupları veya moleküllerin üç boyutlu uzayda periyodik ve simetrik bir örgü oluşturacak şekilde düzenlenmesiyle tanımlanır. Kristal örgünün atomik ölçekli çözümlemesinde en yaygın ve güvenilir tekniklerden biri, X-ışını kırınımı (XRD) yöntemidir. Bu yöntemde, örnek boyutu genellikle yalnızca birkaç milimetreyi bulsa da elde edilen kırınım deseni kristalin iç yapısına dair ayrıntılı bilgi sağlar. Her bir malzeme, tıpkı bireysel parmak izleri gibi özgün bir kırınım profili sunar; böylece XRD analizleri, kristal örgü parametrelerinin kesinleşmesi ve faz tanımlamalarının yapılmasında kritik öneme sahiptir.

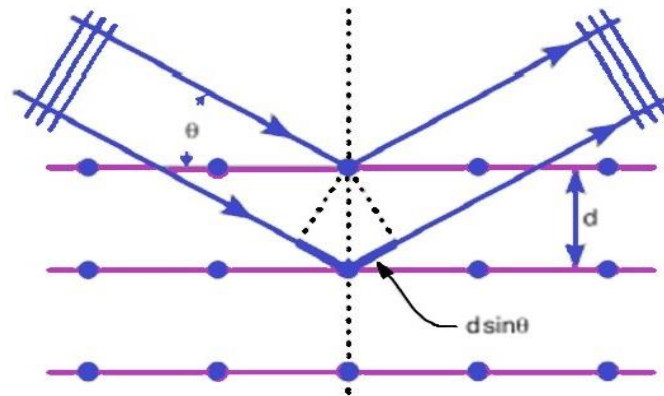
Yoğunlaştırılmış ince film örneklerinin X-ışını kırınımı yöntemiyle analiz edilebilmesi, ışının dalga boyunun atomlar arası mesafeler ölçeğine denk gelmesi ve saçılım sürecinin örneğe zarar vermeyecek biçimde gerçekleşmesinden kaynaklanır. Katı malzemelerde kullanılan X-ışınlarının tipik dalga boyları, yaklaşık 0,5 Å ile 2,5 Å arasında olup, bu değerler kristalize yapıdaki atomik mesafelerle karşılaştırıldığında son derece uygundur. X-ışını kırınımı tekniği aracılığıyla kristallerin iç düzeni ve mükemmellik derecesi, fazın kimyasal saflığı, kristal yönelimleri ve örgü sabitleri gibi temel yapısal parametreler kesin olarak tayin edilebilir.

Kristal yapılarının XRD yöntemiyle incelendiği uygun deney koşullarında, kristal örgüsüne gönderilen X-ışınları kristal içinde saçılmaya maruz kalır. Saçılan ışınların kırınım açısı, birim hücrenin şekil ve boyutsal özelliklerine dair veri sunarken; saçılım yoğunluğu, hücre içerisindeki atom dizilimlerine ilişkin ayrıntıları ortaya koyar (Yıldırım, 2010).

Kristal örgülerdeki X-ışını kırınımı olgusu, W. L. Bragg tarafından ortaya konmuştur. Şekil 11’de görüldüğü gibi, X-ışınları kristal yüzeyine dar bir geliş açısıyla çarptığında katı yüzeyinden tam yansıma gösterir; bu yansıyan dalgalar, iç yapıda atomları düzenleyen paralel düzlemler tarafından yeniden saçılır. Çok sayıda atom tarafından gerçekleştirilen bu saçınım olayı kırınım olarak adlandırılır ve X-ışınlarının kristal örgü içerisindeki kırınım koşulları, Bragg Kanunu ile ifade edilir.

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (3.1)$$

Denklem 3.1’de n bir tam sayı, λ dalga boyu, d atomlar arası mesafe, θ oluşan kırınım açısıdır.



Şekil 11. Kristal düzlemlerinden X-ışınlarının saçılması

Bu tez kapsamında elde edilen TiO₂ fotoanot filminin ve FTO kaplı camın XRD analizleri, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Temel Bilimler Uygulama ve Araştırma Merkezi Laboratuvarı'nda yer alan ve Şekil 12'de görülen Panalytical Empyrean X-Işını Difraktometre (CuK α ışını, $\lambda = 1,5405 \text{ \AA}$) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 12. Panalytical empyrean X-ışınları kırınım cihazı

3.2.2. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

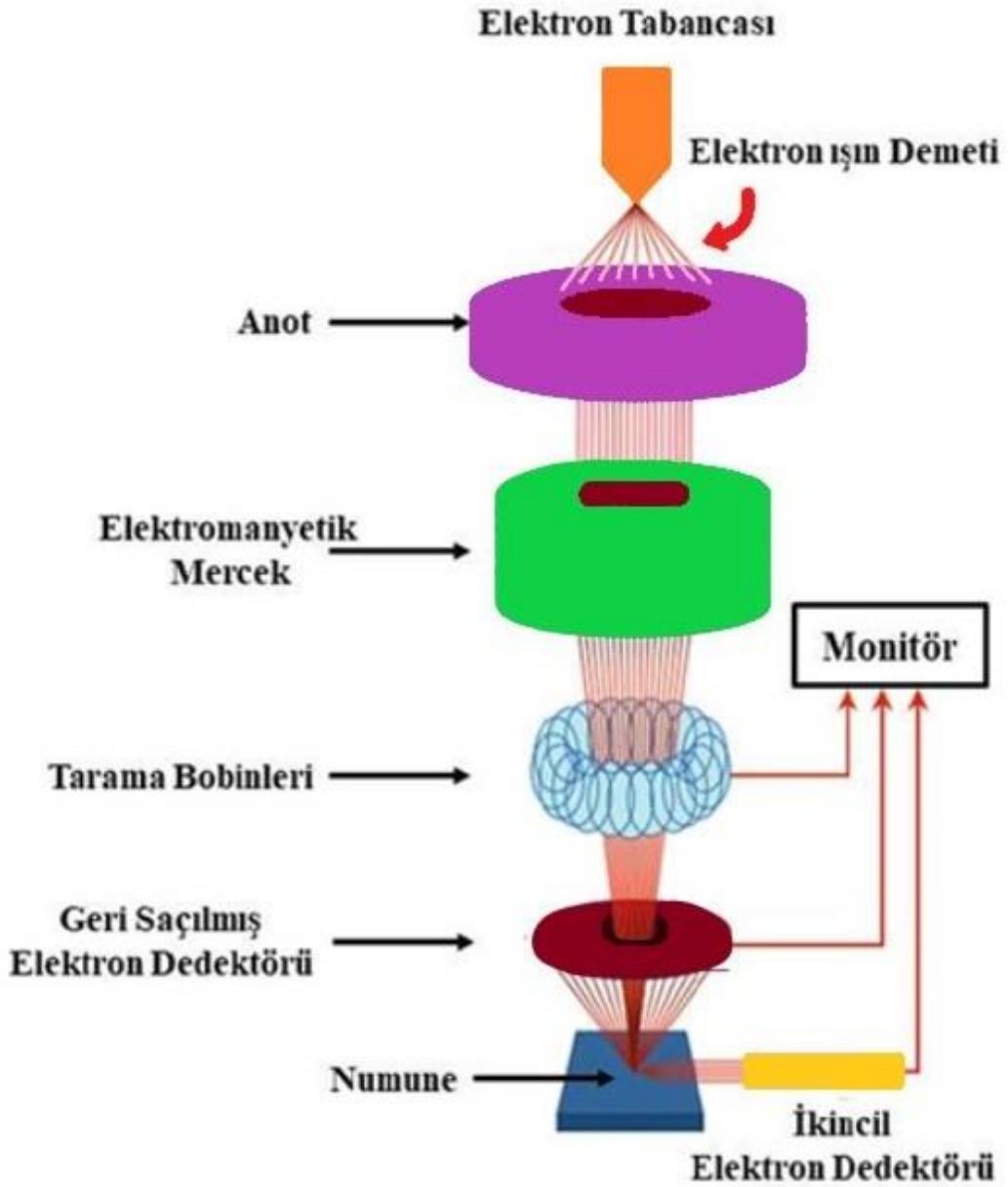
Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), optik yerine yüksek enerjili elektron demeti kullanarak numune yüzeyini tarar ve böylece yüzey topografyasının ayrıntılı, yüksek çözünürlüklü görüntülerini elde eder. Nanoölçekteki malzemelerin morfolojik özelliklerine dair derinlemesine bilgi sağlamak amacıyla uzun yıllardır yaygın biçimde kullanılan SEM, söz konusu malzemelerin fiziksel yapılarının tanımlanmasında kritik bir araç olarak görev yapmaktadır.

SEM incelemeleri için numunenin elektriksel iletkenlik özelliğine sahip olması ve vakum koşullarına dayanabilmesi zorunludur. İletken olmayan örneklerde, yüzeyin ince bir metal tabaka (örneğin altın veya karbon) ile kaplanması suretiyle iletkenlik sağlanır ve sonrasında analiz gerçekleştirilebilir. Öte yandan, SEM' de yüksek düzeyde bir vakum ortamı kritik öneme

sahiptir; yetersiz vakum, numune yüzeyinde ve cihazın elektron kaynağı kısmında kirleticilerin birikmesine yol açarak demetin numuneye ulaşmasını güçleştirir, numune safsızlıklarını artırır ve görüntü kalitesini düşüren cihaz kaynaklı görüntü bozulmalarına neden olur (Çelik, 2013).

Bir SEM cihazında, numune yüzeyine hızlandırılmış elektron demeti yönlendirilmesini sağlayan temel bileşenler yer almaktadır. Bu sistemde, elektron demetinin üretildiği elektron tabancası, demetin hızlandırılması için yüksek gerilim uygulanan anot plakası ile birlikte çalışır. İnce ve kontrollü demetler elde edilebilmesi için yoğunlaştırıcı mercekler kullanılırken, demetin numune üzerine odaklanmasını sağlayan objektif mercekler de sistemin kritik bir parçasıdır. Ayrıca, bu mercek sistemlerine bağlı olarak çeşitli çaplarda açıklıklar (aparatlar) ve elektron demetinin numune yüzeyinde tarama yapabilmesi için tarama bobinleri bulunur. Tüm bu mercek ve bobin sistemleri, elektromanyetik alanlar yardımıyla elektron demetini istenilen incelikte odaklayarak yüzey görüntüsünün yüksek çözünürlükte elde edilmesini mümkün kılar (Söyleyici, 2011).

Şekil 13'teki diyagramda, SEM'in temel bileşenleri şematik olarak sunulmuştur. Cihaz içinde yer alan elektron kaynağı, V biçimli tungsten filamentin vakum ortamında yaklaşık 2800 °C'ye ısıtılmasıyla çalışır. Bu yüksek sıcaklıkta termoiyonik emisyon sonucu tungsten yüzeyinden serbest kalan elektronlar, yaklaşık -30 kV'luk hızlandırma potansiyeli sayesinde filamentten itilir ve hızlandırılır. Havası boşaltılmış tüpün içine giren bu elektron demeti, tüp dışına yerleştirilmiş çok kademeli elektromanyetik mercek dizisi aracılığıyla numune üzerine odaklanır. Tarayıcı bobinler ise odaklanmış demetin yüzeyi satır satır taramasını sağlayarak, numuneden yayılan sinyalleri dedektörlere yönlendirir. Dedektörlerden gelen veriler, katot ışınlu tüp ekranında eş zamanlı olarak taranan bölgelere ilişkin görüntü oluşturur; kontrast ve çözünürlük ise elektronik kontrol birimleriyle ayarlanabilir.



Şekil 13. Taramalı elektron mikroskobunun şematik yapısı (Çorlu, 2017, s.31).

Bu tez kapsamında elde edilen FTO kaplı cam üzerine kaplanan TiO_2 fotoanot filminin SEM görüntüleri, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Temel Bilimler Uygulama ve Araştırma Merkezi Laboratuvarı'nda yer alan ve Şekil 14'te verilen FEI Quanta FEG 450 SEM cihazı kullanılarak alınmıştır.



Şekil 14. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

3.2.3 Optik soğurma, geçirgenlik ve FT-IR analizleri

Optik soğurma ve geçirgenlik ölçümleri, yarıiletken ve yarı saydam yapıdaki malzemelerin optik özelliklerini değerlendirmek amacıyla sıkça kullanılan güvenilir analiz yöntemlerindendir. Bu yöntemler, özellikle malzemenin ışığı hangi dalga boylarında ne ölçüde soğurduğu ya da geçirdiğini belirlemek ve buna bağlı olarak yasak enerji aralığı gibi temel optik parametreleri ortaya koymak için tercih edilmektedir. Ayrıca, numuneye herhangi bir fiziksel temas olmadan gerçekleştirilmeleri sayesinde, malzeme yapısına zarar verme riski taşımamaları önemli bir avantaj sağlar. Bu tür ölçümlerde, ışık kaynağından çıkan ışınlar öncelikle bir monokromatörden geçirilir ve ardından ışın bölücü yardımıyla referans ve numune kollarına ayrılır. Her iki ışık yolu, aynalar aracılığıyla ilgili hücrelere yönlendirilir. Film kaplanmış yüzeylerin karakterizasyonunda yalnızca filmin optik etkilerinin incelenebilmesi için, referans koluna taban malzemenin yerleştirilmesi gerekmektedir. Böylece, yalnızca film tarafından soğurulan ışık miktarı güvenilir bir şekilde belirlenebilir. Ölçüm sonrası, fotodedektörler aracılığıyla algılanan ışınlar kıyaslanarak dijital ortama aktarılır ve elde edilen veriler özel yazılımlar yardımıyla analiz edilir.

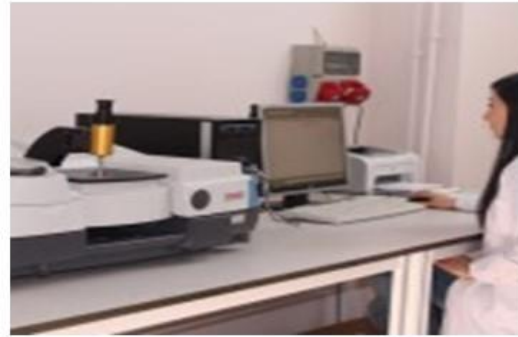
Bu çalışmada, incelenen malzemelerin orta kızılötesi dalga boyu aralığında kimyasal bağ titreşimlerinden kaynaklanan optik soğurma özelliklerinin belirlenmesi amacıyla Thermo Scientific Nicolet 6700 FT-IR spektrometresi kullanılmıştır. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi prensibine dayanan bu yöntemde, geniş bant IR ışını Michelson interferometresi içerisinde ışın bölücü yardımıyla iki optik yola ayrılmakta, sabit ve hareketli aynalardan yansıtıldıktan sonra yeniden birleştirilerek numuneden geçirilmekte ve dedektörde

interferogram olarak kaydedilmektedir (Griffiths & de Haseth, 2007). Elde edilen interferogramın Fourier dönüşümü uygulanmasıyla dalga sayısı ekseninde absorbans veya geçirgenlik spektrumu elde edilmekte ve böylece malzemenin fonksiyonel gruplarına ve kimyasal yapısına ait karakteristik soğurma bantları belirlenebilmektedir (Stuart, 2004). Ölçümlerde öncelikle uygun bir arka plan spektrumu alınmakta ve numune spektrumu bu referans ile oranlanarak yalnızca numuneye ait optik katkı hesaplanmaktadır; özellikle ince film kaplı yüzeylerde substratın arka plan olarak kullanılması, filmin optik etkilerinin güvenilir biçimde izole edilmesini sağlamaktadır (Griffiths & de Haseth, 2007). Temassız olarak gerçekleştirilen FT-IR ölçümleri, numune yapısına zarar vermeden yüksek sinyal-gürültü oranı sunması nedeniyle doğal boyalar ve yarı saydam yarıiletken malzemelerin kimyasal karakterizasyonunda sıklıkla tercih edilmektedir (Calogero vd., 2012; Hao vd., 2006).

Bu tez çalışmasında, TiO_2 fotoanot filminin ve doğal alizarin boyasının optik özellikleri, Perkin Elmer UV-Vis Lambda 2S model spektrofotometresi (Şekil 15a) ile elde edilen soğurma ve geçirgenlik spektrumları üzerinden değerlendirilmiş, ayrıca doğal alizarin boyasının FT-IR ölçümü ise Thermo Scientific Nicolet 6700 FT-IR spektrofotometresi (Şekil 15b) ile yapılmıştır.



(a)



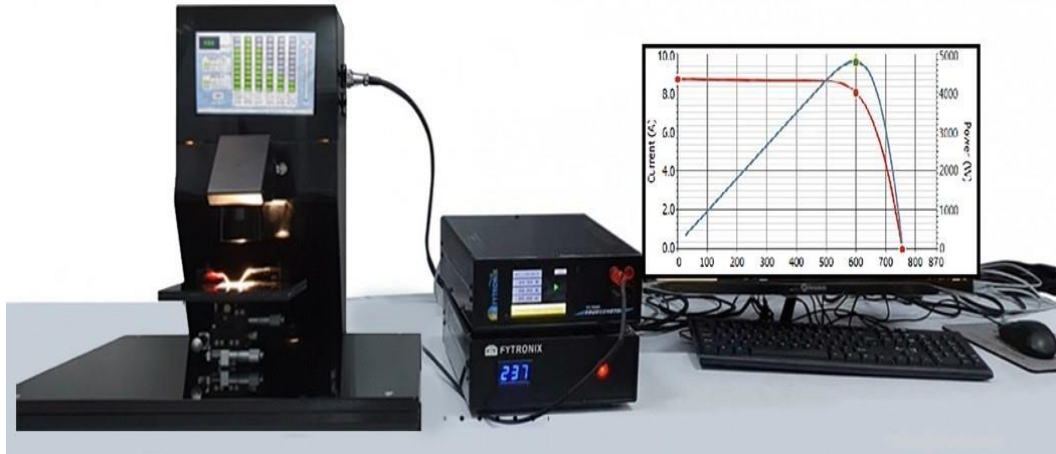
(b)

Şekil 15. PerkinElmer UV-Vis spektrofotometresi (a) ve Thermo Scientific Nicolet 6700 FT-IR spektrometresi (b)

3.2.4. Fotovoltaik performans analizleri

Güneş simülatörleri, fotovoltaik hücre ve modüllerin laboratuvar koşullarında karşılaştırılabilir ve tekrarlanabilir şekilde test edilmesi için üzerinde çalışılan cihazlardır. Temelde Xenon lambalı, tungsten-halojen, metal halojenürlü ve LED tabanlı olmak üzere dört ana tip simülatör bulunmaktadır. Xenon lambalı sistemler sabit 1 SUN, (1000 W/m^2 veya 100 mW/cm^2) ışınım sağlamakla birlikte ışık şiddetini dinamik olarak değiştirme yeteneğine sahip değildir. Buna karşın kullandığımız FYTRONIX 9000 Tam Otomatik Solar Simülatör, 1 W/m^2 'den ($0,1 \text{ mW/cm}^2$) 1000 W/m^2 'ye (100 mW/cm^2) kadar uzanan geniş bir aralıkta, programlanabilir ve otomatik kontrollü ışınım yoğunluğu sunabilmektedir.

Bu model, AM 1.5 spektrumuna yakın bir spektral dağılım sağlayan tungsten-halojen lamba kaynağı ile çalışmakta ve ASTM E927 standardına uygun AAA sınıfı ışık kalitesi sunarak, laboratuvar ortamında güneş ışığını simüle etmede yüksek doğruluk sağlar. Cihaz, I–V karakterizasyon sistemleriyle entegre çalışabilmekte ve bu sayede güneş pillerinin verimliliği ve fotovoltaik performansı üzerinde kapsamlı analizler yapılmasına olanak tanımaktadır. Halojen ışık kaynağının sağladığı geniş spektral kapsam ve homojen aydınlatma hem tekrarlanabilir deney sonuçları hem de güvenilir veri üretimi açısından önemli avantajlar sunmaktadır.

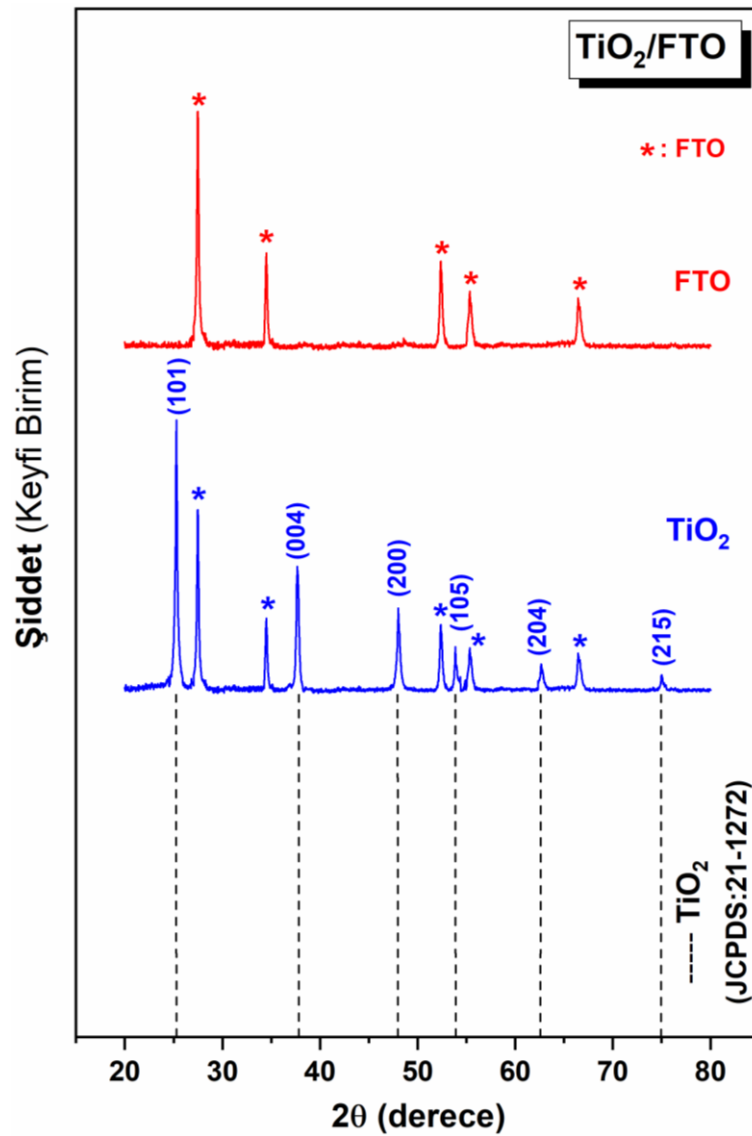


Şekil 16. FYTRONIX 9000 tam otomatik solar simülatör (Fytronix, 2026).

4. BULGULAR

4.1. FTO/TiO₂ Fotoanot Filminin Yapısal (XRD) Analizi

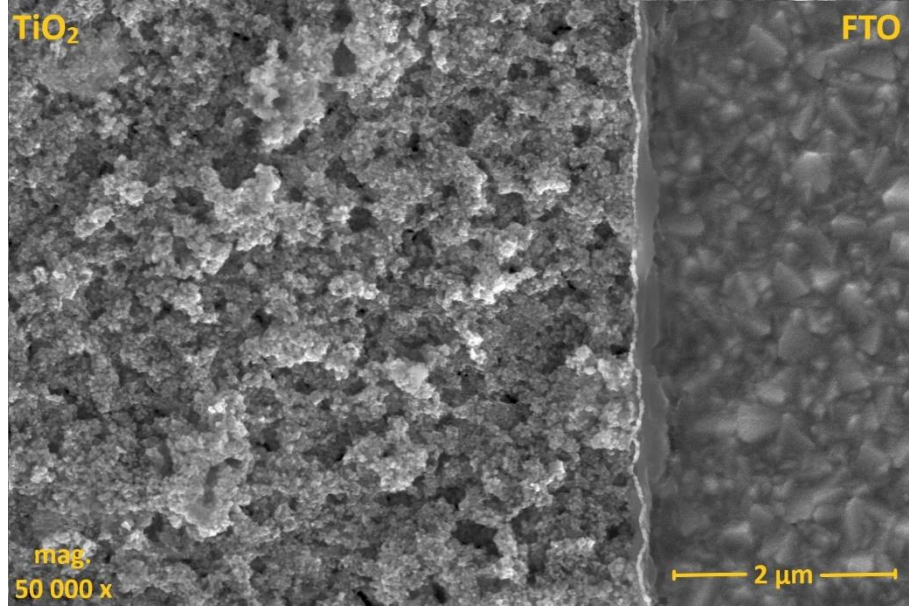
Hidrotermal sentez yöntemi ile elde edilen ve FTO altlık üzerine doktor blade yöntemi ile kaplanan TiO₂ fotoanot filminin yapısal özelliklerini analiz etmek için XRD ölçümleri Panalytical Empyrean X-ray Difraktometre (XRD) ($\lambda=1.5405 \text{ \AA}$ dalgaboylu Cu-K α ışını kullanan) cihazı kullanılarak $2\theta=20-80^\circ$ aralığında alındı. Bu ölçümler yardımıyla FTO/TiO₂ fotoanot filminin yapısal özellikleri belirlendi. Elde edilen FTO/TiO₂ fotoanot filminin XRD deseni Şekil 17’de verilmiştir.



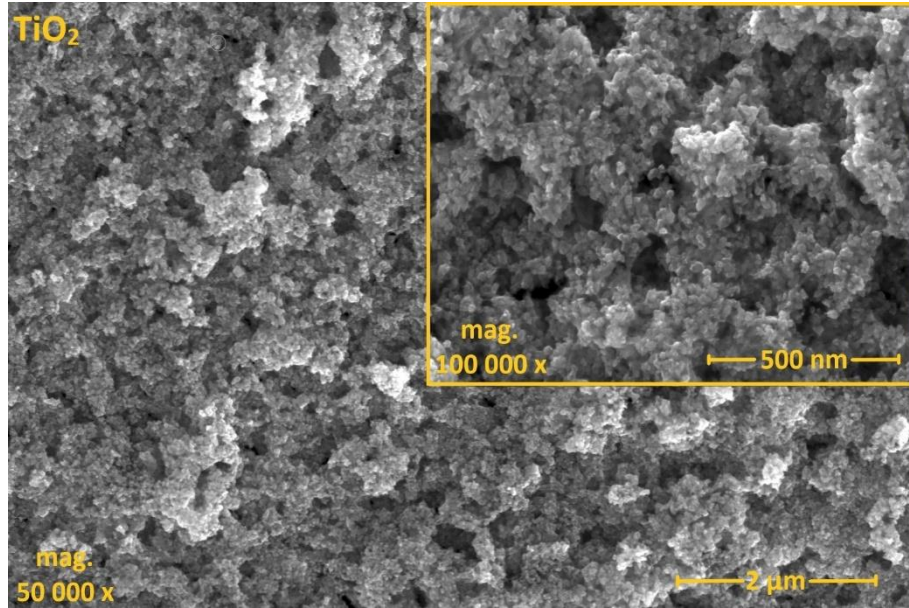
Şekil 17. FTO/TiO₂ fotoanot filminin XRD deseni

4.2. FTO/TiO₂ Fotoanot Filminin Morfolojik Analizi

Hidrotermal sentez yöntemi ile elde edilen ve FTO altlık üzerine doktor blade yöntemi ile kaplanan TiO₂ fotoanot filminin morfolojik özelliklerini analiz etmek için SEM görüntüleri FEI Quanta 450 FEG model taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazı kullanılarak yapıldı. FTO/TiO₂ fotoanot filminin SEM görüntüleri Şekil 18 ve Şekil 19’da verilmiştir.



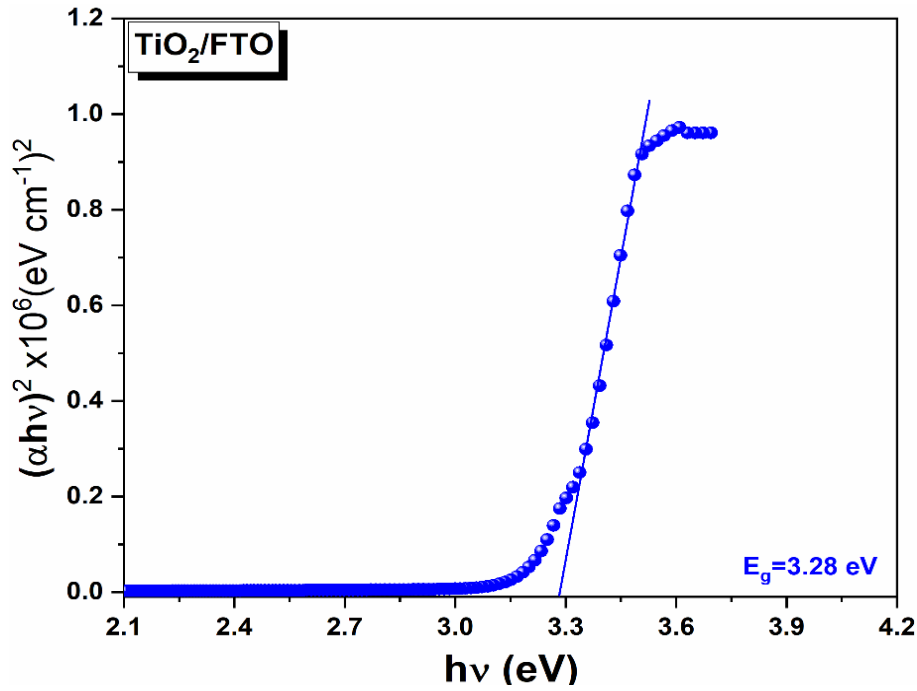
Şekil 18. FTO/TiO₂ fotoanot filminin SEM görüntüsü



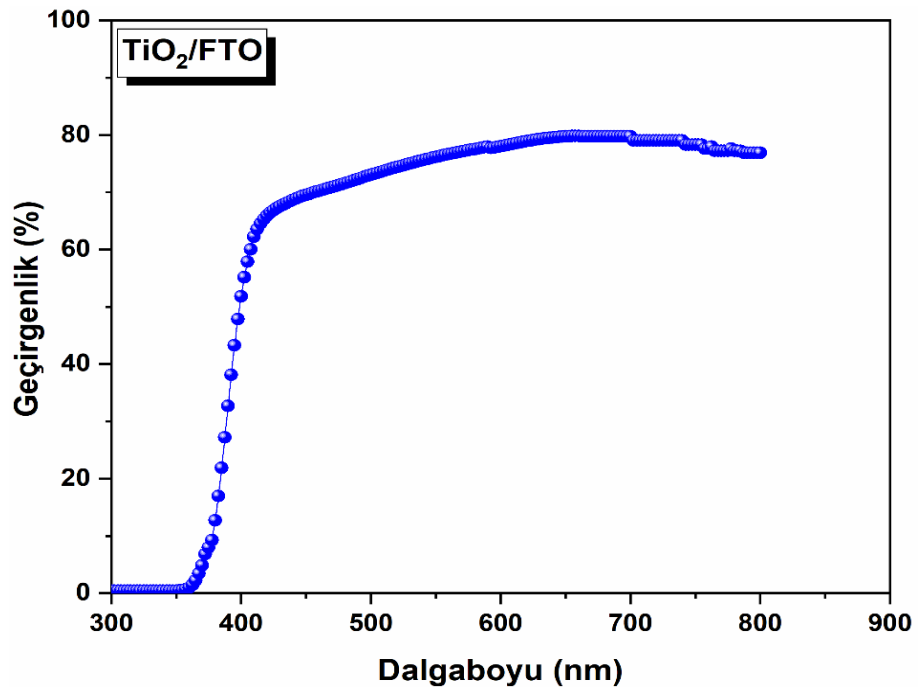
Şekil 19. TiO₂ filminin SEM görüntüsü

4.3. FTO/TiO₂ Fotoanot Filminin ve Doğal Alizarin Boyasının Optik Analizi

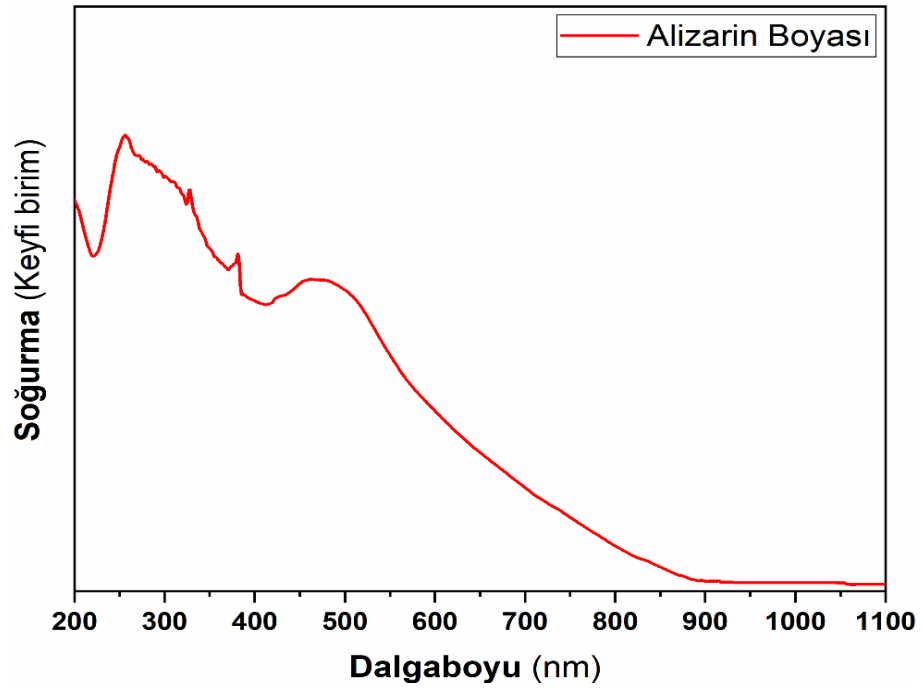
Hidrotermal sentez yöntemi ile elde edilen ve FTO altlık üzerine doktor blade yöntemi ile kaplanan TiO₂ fotoanot filminin optik özelliklerini analiz etmek için optik soğurma ve geçirgenlik (transmittans) ölçümleri PerkinElmer UV-Vis Spektrofotometre cihazı kullanılarak alındı. Bu ölçümler yardımıyla TiO₂ fotoanot filminin optik yasak enerji aralığı (E_g) ve geçirgenlik (T) değeri belirlendi. Elde edilen TiO₂ fotoanot filminin $(\alpha h\nu)^2$ 'nin enerjiye ($h\nu$) bağlı grafiği ve geçirgenliğin (%T) dalga boyuna bağlı grafiği sırasıyla Şekil 20 ve Şekil 21'de verilmiştir. Ayrıca, BDGP'de duyarlaştırıcı olarak kullanılan doğal alizarin boyasının optik soğurma özelliklerini belirlemek amacıyla optik soğurma ölçümleri aynı cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiş olup, alizarin boyasına ait soğurma spektrumu Şekil 22'de verilmiştir. Buna ek olarak, doğal alizarin boyasının BDGP uygulamalarındaki duyarlaştırıcı rolünü destekleyen yapısal özelliklerinin değerlendirilmesi amacıyla FT-IR ölçümleri Thermo Scientific Nicolet 6700 FT-IR spektrometresi ile gerçekleştirilmiş olup, elde edilen FT-IR spektrumu Şekil 23'te verilmiştir.



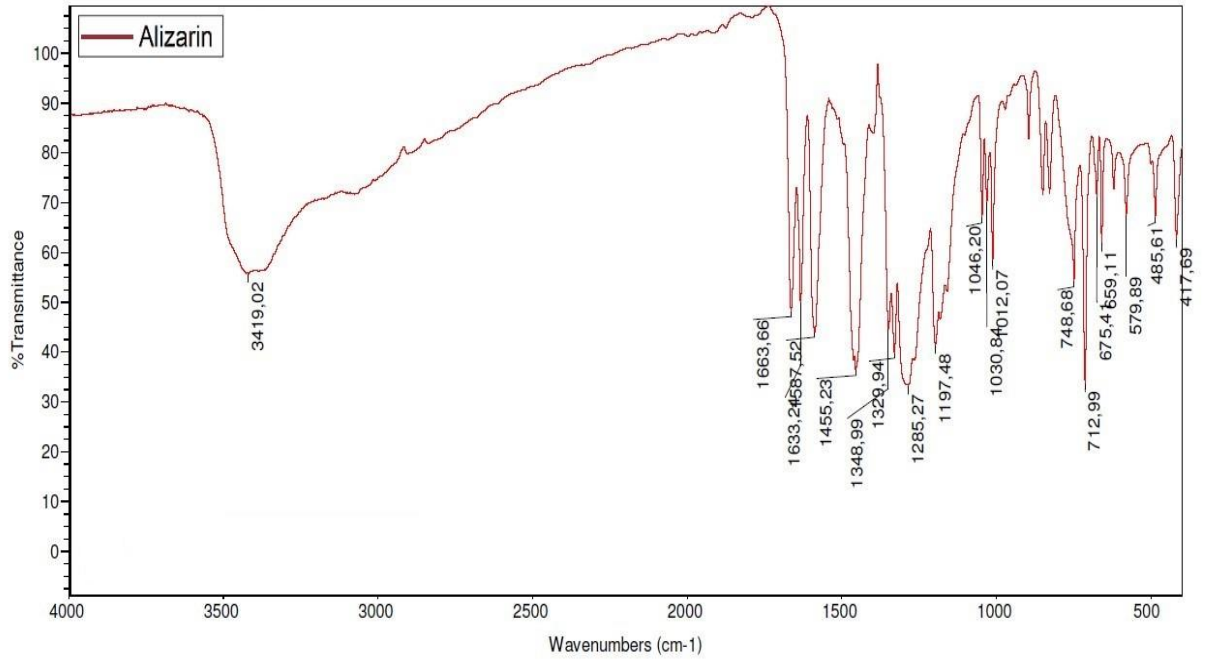
Şekil 20. FTO/TiO₂ fotoanot filminin $(\alpha h\nu)^2$ -($h\nu$) grafiği



Şekil 21. FTO/TiO₂ fotoanot filminin geçirgenlik spektrumu



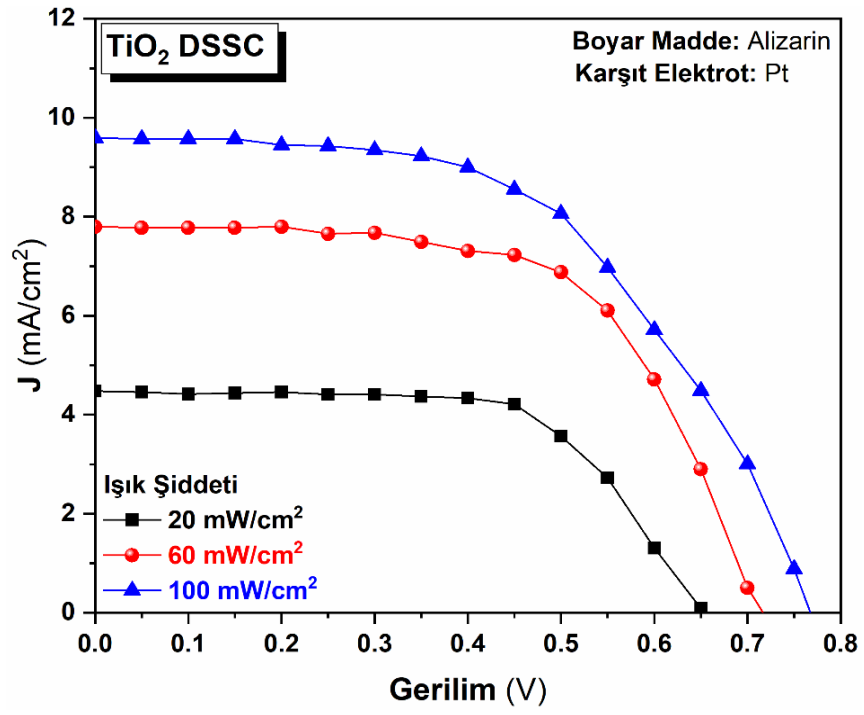
Şekil 22. Doğal alizarin boyasına ait optik soğurma spektrumu



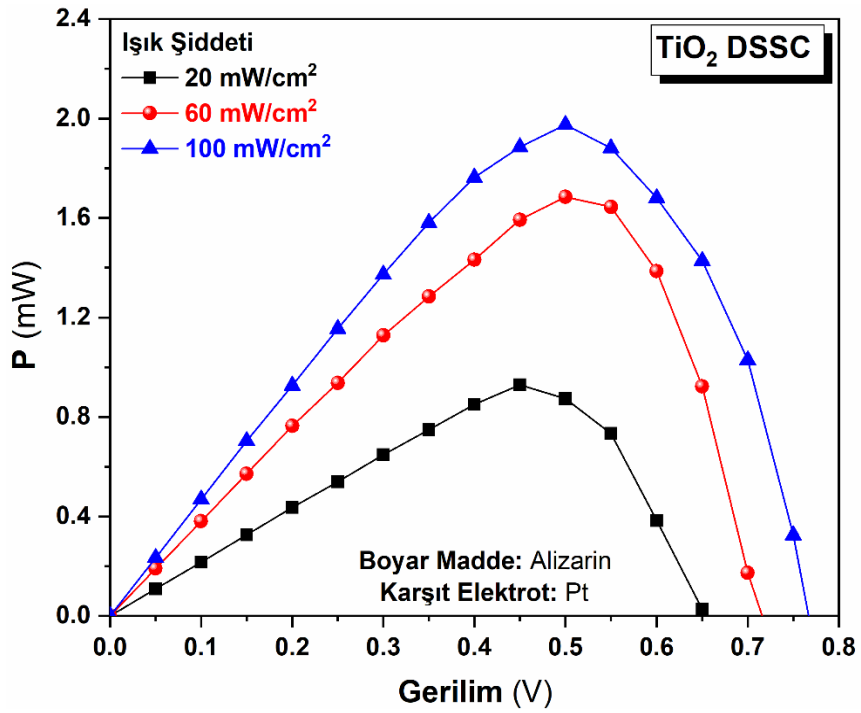
Şekil 23. Doğal alizarin boyasına ait FT-IR spektrumu

4.4. FTO/TiO₂/Alizarin/(I⁻/I₃⁻)/Pt/FTO Mimarisine Sahip BDGP'nin Fotovoltaik Analizleri

Üretilen FTO/TiO₂/Alizarin/(I⁻/I₃⁻)/Pt/FTO mimarisine sahip BDGP'nin fotovoltaik performansı belirlemek için FYTRONIX 9000 Tam Otomatik Solar Simülatör cihazı kullanıldı. Üretilen BDGP'nin I-V ölçümleri 20, 60 ve 100 mW/cm² solar ışık şiddetleri altında ayrı ayrı alındı. Fotoaktif alanı 0,49 cm² olan BDGP üzerinde farklı ışık şiddetleri altında gerçekleştirilen ölçümler kullanılarak elde edilen akım yoğunluğunun (J) gerilime (V) bağlı grafiği Şekil 24'te ve çıkış gücünün (P) gerilime (V) bağlı grafiği Şekil 25'te verilmiştir.

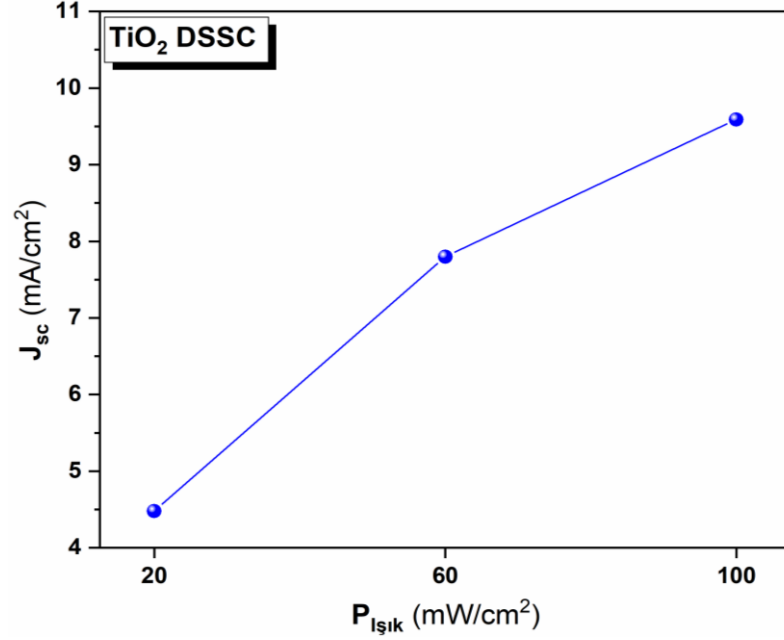


Şekil 24. FTO/TiO₂/Alizarin/(I⁻/I₃⁻)/Pt/FTO mimarisine sahip BDGP'nin akım yoğunluğu–gerilim karakteristiği

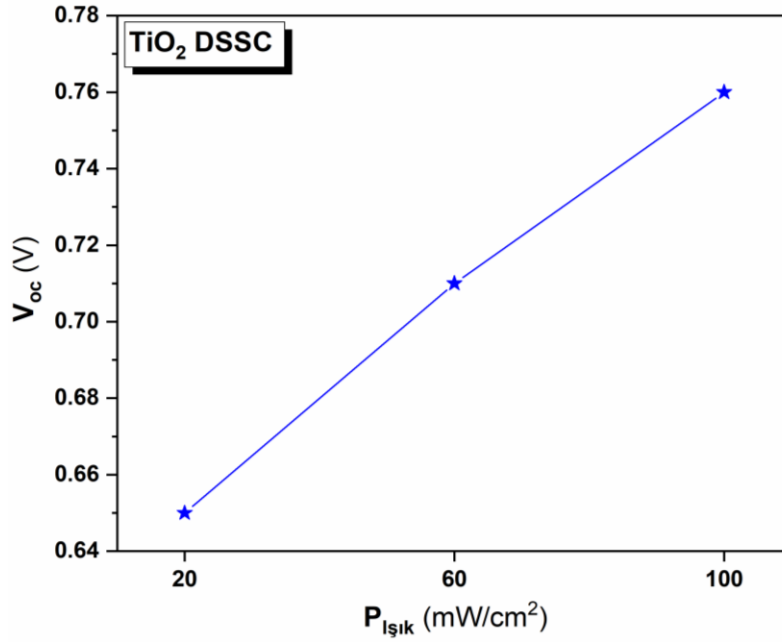


Şekil 25. FTO/TiO₂/Alizarin/(I⁻/I₃⁻)/Pt/FTO mimarisine sahip BDGP'nin çıkış gücü–gerilim karakteristiği

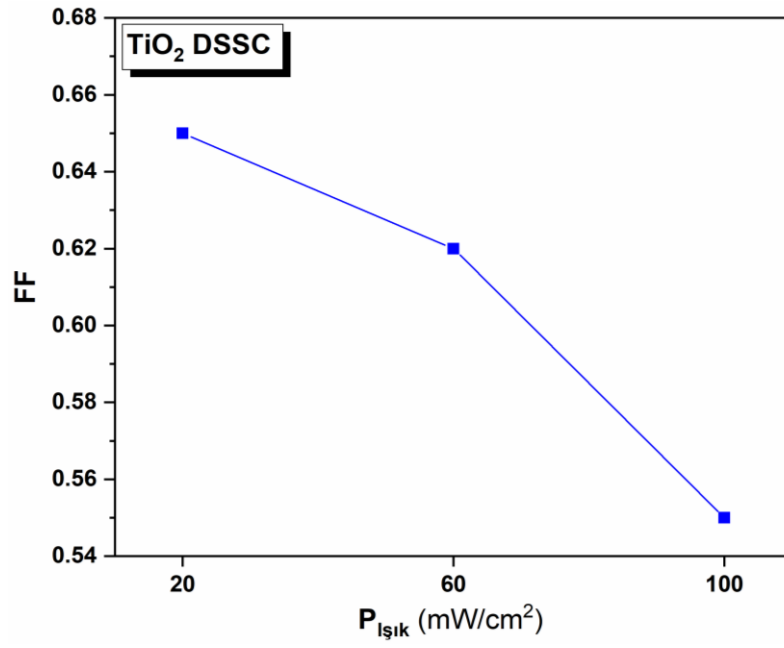
Üretilen FTO/TiO₂/Alizarin/(I⁻/I₃⁻)/Pt/FTO mimarisine sahip BDGP'nin J-V karakteristiği (Şekil 24), (2.2) ve (2.3) denklemleri kullanılarak hesaplanan kısa devre akım yoğunluğunun (J_{sc}), açık devre geriliminin (V_{oc}), dolum faktörünün (FF) ve güç dönüşüm verimliliğinin (PCE veya η) ışık şiddetine bağlı değişim grafikleri sırasıyla Şekil 26 ve Şekil 27-29'da verilmiştir.



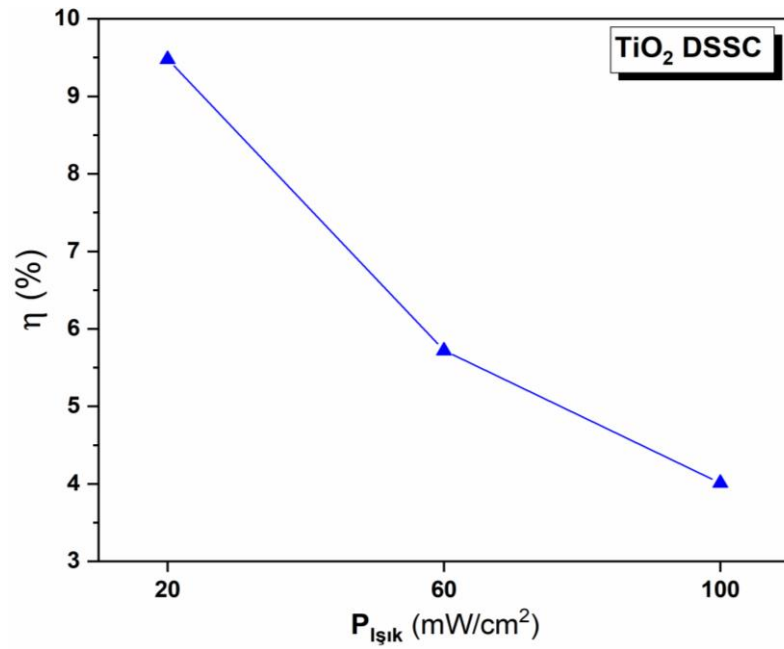
Şekil 26. FTO/TiO₂/Alizarin/(I⁻/I₃⁻)/Pt/FTO mimarisine sahip BDGP'nin kısa devre akım yoğunluğunun (J_{sc}) ışık şiddetine ($P_{ışık}$) bağlı değişimi



Şekil 27. FTO/TiO₂/Alizarin/(I⁻/I₃⁻)/Pt/FTO mimarisine sahip BDGP'nin açık devre geriliminin (V_{oc}) ışık şiddetine ($P_{ışık}$) bağlı değişimi

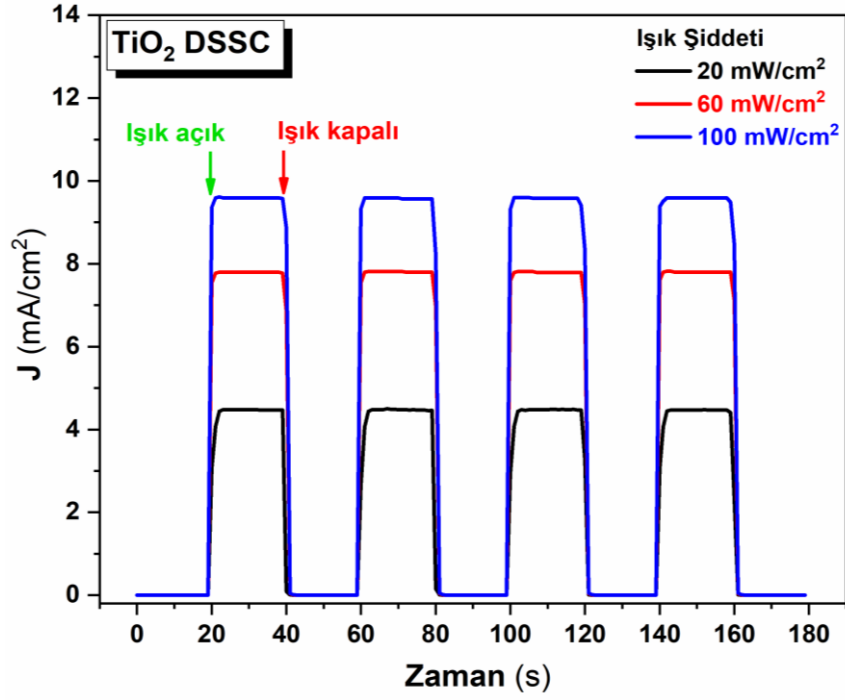


Şekil 28. FTO/TiO₂/Alizarin/(I⁻/I₃⁻)/Pt/FTO mimarisine sahip BDGP'nin dolum faktörünü (FF) ışık şiddetine ($P_{ışık}$) bağlı değişimi



Şekil 29. FTO/TiO₂/Alizarin/(I⁻/I₃⁻)/Pt/FTO mimarisine sahip BDGP'nin güç dönüşüm verimliliğinin (PCE veya η) ışık şiddetine ($P_{ışık}$) bağlı değişimi

Üretilen FTO/TiO₂/Alizarin/(I⁻/I₃⁻)/Pt/FTO mimarisine sahip BDGP'nin FYTRONIX 9000 Tam Otomatik Solar Simülatör cihazı kullanılarak fototransiyent ölçüm alındı ve periyodik olarak değiştirilen ışık şiddeti altında foto akım yoğunluğunun (J) zamana bağlı değişim grafiği Şekil 30'da verilmiştir.



Şekil 30. FTO/TiO₂/Alizarin/(I⁻/I₃⁻)/Pt/FTO mimarisine sahip BDGP'nin akım yoğunluğu– zaman karakteristiği

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Günümüzde enerji ihtiyacının hızla artması, sürdürülebilir ve çevre dostu teknolojilerin önemini her zamankinden daha görünür hâle getirmiştir. Yüksek sıcaklık gereksinimi, yoğun kimyasal işlem basamakları ve karbon ayak izi gibi dezavantajlara sahip geleneksel fotovoltaik üretim yöntemleri, çevresel etkiler açısından sorgulanmakta ve bu nedenle düşük maliyetli, toksik madde içermeyen, daha az enerji tüketen alternatif güneş pili teknolojilerine olan ilgi giderek artmaktadır. Bu bağlamda boya duyarlı güneş pilleri (BDGP), üretim süreçlerinin basitliği, düşük sıcaklıkta üretilmeleri ve çevreyle uyumlu malzemelerle çalışabilme potansiyelleri sayesinde sürdürülebilir enerji araştırmalarında önemli bir konuma taşımakta ve umut vadetmektedir.

Literatürde TiO_2 , boya duyarlı güneş pillerinde (BDGP) fotoanot malzemesi olarak en yaygın kullanılan yarıiletken olmayı sürdürürken; ZnO , SnO_2 , Fe_2O_3 , $\text{CuO/Cu}_2\text{O}$ ve In_2O_3 gibi alternatif metal oksitler de çeşitli çalışmalarda araştırılmıştır. ZnO , TiO_2 'ye benzer bant aralığı ve farklı morfolojilerde sentezlenebilmesi nedeniyle dikkat çekmiş olsa da, asidik boyalarla kimyasal kararsızlık göstermesi ve zayıf boya adsorpsiyonu nedeniyle uzun dönemli BDGP performansında sınırlamalar sergilemiştir (Keis vd., 2002). SnO_2 ise yüksek elektron hareketliliğine rağmen, iletim bandı konumunun uygun olmaması ve artan elektron–elektrolit rekombinasyonu nedeniyle TiO_2 tabanlı sistemlere kıyasla daha düşük verimlerle sonuçlanmıştır (Kavan vd., 1996). Fe_2O_3 ve $\text{CuO/Cu}_2\text{O}$ gibi yarıiletkenler düşük maliyet ve yüksek bulunabilirlik avantajı sunsalar da düşük iletkenlik, kısa taşıyıcı difüzyon uzunluğu ve fotokimyasal kararsızlık gibi nedenlerle BDGP uygulamalarında sınırlı başarı elde edebilmiştir (Sivula & van de Krol, 2016; Hara vd., 2003). Bu bağlamda TiO_2 , yüksek kimyasal kararlılığı, geniş yüzey alanına sahip nanopartikül yapılar oluşturabilmesi ve hem doğal hem de sentetik boyalarla güçlü yüzey bağlanması sayesinde, BDGP mimarisinde uzun yıllardır tekrarlanabilir ve güvenilir performans sunan en uygun fotoanot malzemesi olarak öne çıkmaktadır (O'Regan & Grätzel, 1991). Bu nedenle tez çalışmasında fotoanot olarak TiO_2 tercih edilmiş; çevresel sürdürülebilirliği desteklemek amacıyla sentetik metal kompleksleri yerine doğal alizarin boyası kullanılmıştır.

Alizarin, kökeni *Rubia tinctorum* (kökboyası) bitkisinin köklerine dayanan, doğal bir antrakinon türevi olup literatürde kırmızı pigment kaynağı olarak rapor edilen önemli bir doğal boyar maddedir (Ardila-Leal vd., 2021). Güncel çalışmalarda çevreci ekstraksiyon

tekniklerinin gelişmesiyle birlikte, alizarinin bitkisel kaynaktan daha saf ve yüksek verimle elde edilebildiği, ayrıca biyolojik olarak parçalanabilir yapısı sayesinde çevrede kalıcı kirlilik oluşturmada kullanılabildiği gösterilmiştir (Alegbe vd., 2024; Abou Elmaaty vd., 2023). Optik özellikleri incelendiğinde alizarinin görünür bölgede soğurma yapabildiği ve bu özelliği sayesinde boya duyarlı güneş pillerinde doğal bir duyarlaştırıcı olarak değerlendirilebileceği ifade edilmektedir (Anoua vd., 2022; Krawczak ve Zdyb, 2019). Bitkisel kökeni, yenilenebilirliği ve düşük toksisite profili, alizarini özellikle sürdürülebilir malzeme kullanımını önceleyen enerji uygulamalarında öne çıkan doğal bir boyar madde hâline getirmektedir.

Sentetik boyaların önemli bir kısmını, yapılarında renk oluşumundan sorumlu $-N=N-$ bağı taşıyan ve endüstride yaygın kullanılan azo grubu sentetik organik boyalar oluşturmaktadır. Bu boyalar geniş renk çeşitliliği ve kimyasal dayanıklılıkları nedeniyle tercih edilmekle birlikte, biyobozunurluklarının düşük olması ve parçalanmaları hâlinde toksik aromatik aminlere dönüşebilmeleri çevresel açıdan önemli riskler oluşturmaktadır (Ardila-Leal vd., 2021). Buna ek olarak BDGP sistemlerinde yüksek verim sağlayan rutenyum kompleksli sentetik boyalar da nadir metal içerikleri, pahalı olmaları ve sentez süreçlerinin kimyasal açıdan yoğun olması nedeniyle sürdürülebilirlik hedefleriyle tam olarak örtüşmemektedir (Tomar vd., 2020; Ali vd., 2019). Bu kapsamda alizarin, doğal bir boya olması nedeniyle ağır metal içermemesi, biyolojik olarak parçalanabilir yapısı ve görece düşük toksisite profili sayesinde çevresel açıdan daha sürdürülebilir bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Bu özellikleri doğrultusunda, tez çalışmasında alizarin sentetik boyalara kıyasla tercih edilmiştir (Alegbe & Uthman, 2024; Negi, 2025).

Deneysel çalışmada TiO_2 nanopartikülleri, belirlenen reaksiyon sıcaklığı, süre ve çözelti koşullarını içeren hidrotermal sentez yöntemi kullanılarak sentezlenmiş ve ardından gerçekleştirilen kalsinasyon işlemi ile nanopartiküllerin amorf ve safsızlık içeren yapısını kristal, saf ve kararlı bir TiO_2 fazına dönüşmesi amaçlanmıştır. Kalsinasyon işleminden sonra elde edilen TiO_2 nanopartiküller FTO iletken cam altlık üzerinde $0,49 \text{ cm}^2$ 'lik alana doctor-blade yöntemi kullanılarak kaplanmıştır. Elde edilen FTO/ TiO_2 fotoanot filmi kristalize olması için 400°C sıcaklıkta 60 dakika kül fırınında tavlansmıştır.

Elde edilen FTO/ TiO_2 fotoanot filminin yapısal, morfolojiksel ve optik özellikleri sırasıyla XRD, SEM ve optik soğurma ve geçirgenlik ölçümleri ile analiz edilmiştir. Ayrıca, alizarin

boyasının optik özellikleri optik soğurma ve FT-IR ölçümleri ile analiz edilmiştir. Tüm bu işlemlerin adımlarından FTO/TiO₂ fotoanot filmi alizarin çözeltisine daldırılarak TiO₂ yüzeyine boya adsorpsiyonu gerçekleştirilmiş ve aktif fotoanot tabakası oluşturulmuştur.

FTO kaplı cam üzerine 0,49 cm²'lik alana kaplanmış ve doğal alizarin boyası ile adsorbe edilmiş TiO₂ fotoanot, sıvı elektrolit (I⁻/I₃⁻) ve FTO üzerine kaplanmış Pt karşıt elektrot kullanılarak FTO/TiO₂/Alizarin/(I⁻/I₃⁻)/Pt/FTO mimarisine sahip bir sandviç tipi BDGP üretilmiştir. Üretilen BDGP'nin fotovoltaiik performansı belirlemek için I-V ölçümleri 20, 60 ve 100 mW/cm² solar ışık şiddetleri altında ayrı ayrı alınmıştır. Bu ölçümler kullanılarak üretilen BDGP'nin fotovoltaiik parametreleri farklı ışık yoğunluklarına bağlı olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, hücre performansını belirleyen yük üretimi, taşınımı ve rekombinasyonu süreçlerini zaman çözünürlüklü olarak incelemek ve kayıplarının kökenini ortaya koymak için BDGP'nin farklı ışık şiddetleri altında fototransiyent ölçümleri alındı.

5.1. Yapısal, Morfolojik ve Optik Analizler

TiO₂ fotoanot filminin kristal yapısı, X-ışını kırınımı (XRD) analizi ile incelenmiş olup, elde edilen kırınım deseni Şekil 17'de sunulmaktadır. Şekil 17'den görüldüğü üzere, TiO₂ fotoanodun tetragonal anataz fazına ve $a = 3,79 \text{ Å}$, $b = 3,79 \text{ Å}$ ve $c = 9,51 \text{ Å}$ kafes parametrelerine sahip olduğu belirlenmiştir. Bu değerlerin, TiO₂ için standart JCPDS 21-1272 kartı ile uyumlu olduğu görülmektedir (Kumar vd., 2020; Dongale vd., 2014; Kang vd., 2025; Lin ve Chen, 2025). TiO₂ yapısının (101), (004), (200), (105), (204) ve (215) kristal düzlemleri boyunca yönelimler içeren polikristal bir yapıya sahip olduğu tespit edilmiştir. Desende gözlenen ilave kırınım piklerinin ise FTO altlık malzemeden kaynaklandığı belirlenmiştir. Özellikle (101) düzlemine ait pikin baskın olması, TiO₂ anataz fazının tercihli büyüme yöneliminin (101) düzlemi olduğunu göstermektedir. TiO₂'nin kristal boyutu (D), baskın (101) kırınım pikine ait Bragg açısı (θ) ve yarı maksimumdaki tam genişlik (β) değerleri kullanılarak aşağıda verilen eşitlik yardımıyla hesaplanmıştır (Cullity ve Stock, 2001).

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (5.1)$$

Bu eşitlikte λ , kullanılan X-ışınının dalga boyunu, θ Bragg açısını, K Scherrer sabitini (0,9) ve β ise radyan cinsinden yarı maksimumdaki tam genişliği ifade etmektedir. TiO_2 fotoanoduna ait kristal boyutu (D), yarı maksimum genişlik (β) değerleri ile deneysel ve standart olarak elde edilen d değerleri Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. FTO/ TiO_2 fotoanot filminin yapısal parametreleri

Yapısal Parametreler	(hkl)	2 θ (deg.)	Standart d (Å)	d (Å)	FWHM (β)	D (nm)
TiO₂/FTO fotoanot filmi	(101)	25,27	3,5230	3,5213	0,2256	36

Fotoanodun morfolojik özellikleri, özellikle ışık soğurma ve yük taşıma davranışları açısından hücre performansının anlaşılmasında kritik bir role sahiptir. Bu nedenle fotoanod yüzey morfolojisinin ayrıntılı olarak incelenmesi büyük önem taşımaktadır. FTO altlık üzerine kaplanan TiO_2 fotoanoduna ait SEM görüntüleri Şekil 18’de ve Şekil 19’da sunulmaktadır. SEM görüntülerinden görüldüğü üzere, altlık yüzeyinde nanopartiküllerden oluşan yoğun, gözenekli ve granüler bir morfoloji gözlenmiştir. Bu tür morfolojik yapılar, yüzey alanını artırarak boya adsorpsiyonunu kolaylaştırmakta, fotokatalitik süreçleri desteklemekte ve sonuç olarak daha yüksek fotoakım elde edilmesine katkı sağlamaktadır (Mohamed vd., 2015; Kalasina vd., 2015).

TiO_2 ’nin optik geçirgenlik ve optik bant aralığı enerjisi gibi optik özellikleri, optik soğurma ölçümleri kullanılarak belirlenmiştir. TiO_2 ’ye ait Tauc grafiği ($(\alpha h\nu)^2 - (h\nu)$) ve geçirgenlik spektrumu sırasıyla Şekil 20 ve Şekil 21’de sunulmaktadır. TiO_2 ’nin görünür bölgede yaklaşık %80 düzeyinde maksimum geçirgenlik sergilediği belirlenmiştir. Bu yüksek geçirgenlik, yeterli miktarda ışığın fotoaktif tabakaya ulaşmasını sağlarken, morötesi (UV) bölgede gözlenen güçlü soğurma, TiO_2 ’nin geniş bant aralığı ve görünür bölgede yüksek şeffaflığı sayesinde etkili bir elektron taşıma tabakası olarak kullanılabilceğini göstermektedir (Cao vd., 2011; Arifin vd., 2018). Tauc ilişkisi ve elde edilen grafik kullanılarak, TiO_2 ’nin doğrudan bant aralığı enerjisi hesaplanabilmektedir (Anitha vd., 2021).

$$\alpha = \frac{A}{h\nu} (h\nu - E_g)^{1/2} \quad (5.2)$$

Bu eşitlikte α soğurma katsayısını, $h\nu$ foton enerjisini, A sabit bir katsayıyı ve E_g ise optik bant aralığı enerjisini ifade etmektedir. Şekil 20 ve Tablo 2’den elde edilen sonuçlara göre TiO_2 ’nin bant aralığı enerjisi 3,28 eV olarak belirlenmiştir. Bu değer, TiO_2 fotoanodunun etkin fotoaktif elektron enjeksiyonu için gerekli olan uygun bant aralığına sahip olduğunu göstermektedir (Patel vd., 2025; Chinnarani vd., 2023; Ramaripa vd., 2023).

Tablo 2. FTO/ TiO_2 fotoanot filminin optik parametreleri

Optik Parametreler	E_g (eV)	Geçirgenlik (%)
		Görünür Bölge (En Yüksek Değer)
FTO/TiO_2 fotoanot filmi	3,28	80

Boya duyarlı güneş pillerinin (BDGP) etkin bir şekilde çalışabilmesi için, kullanılan duyarlaştırıcı boyaların ultraviyole-görünür (UV-Vis) ve yakın kızılötesi (NIR) bölgelerde geniş bir soğurma spektrumu sergilemesi gerekmektedir. Bu durum, güneş fotonlarının daha verimli bir şekilde soğurulmasını ve dolayısıyla fotoakım üretiminin artırılmasını sağlamaktadır (Sharma vd., 2018; Anoua vd., 2022; Sun vd., 2019; Akila vd., 2016). Alizarin boyasına ait UV-Vis soğurma spektrumu Şekil 22’de sunulmaktadır. Şekil 22’den görüldüğü üzere, alizarin boyasının 200-900 nm dalga boyu aralığında geniş bir soğurma sergilediği belirlenmiştir. Alizarin boyasının bu geniş soğurma aralığı, BDGP’lerin ışık soğurma kapasitesini artırarak güneş enerjisinin daha etkin bir şekilde kullanılmasına olanak tanımaktadır.

Şekil 23’te alizarin boyasına ait FT-IR spektrumu sunulmaktadır. FT-IR analizi, alizarin boyasının kimyasal yapısına ilişkin ayrıntılı bilgiler sağlamaktadır. Spektrumdaki 3419,02 cm^{-1} ’deki geniş tepe, -OH fonksiyonel grubunun karakteristik bantlarını göstermektedir. 1633,66 cm^{-1} ve 1633,24 cm^{-1} ’deki tepeler, moleküldeki C=O (karbonil) bağlarının gerilme titreşimlerine karşılık gelmektedir. Antrakinon türevlerinde, karbonil sinyalleri tipik olarak daha düşük dalga sayılarında gözlemlenir. Ek olarak, 1587,52 cm^{-1} ve 1455,23 cm^{-1} ’deki tepeler, C=C fonksiyonel gruplarına karşılık gelmektedir. 1329,94 cm^{-1} , 1197,48 cm^{-1} ve 1046,20 cm^{-1} ’deki düşük frekanslı tepe noktaları, fenolik gruplardaki ve aromatik halkalardaki C-H ve C-O bağlarının gerilme titreşimlerini yansıtır. Son olarak, 712,99 cm^{-1} ve 748,68 cm^{-1} ’deki tepe noktaları, aromatik yapıdaki C-H ve C-C gerilme titreşimleriyle ilişkilidir. Bu bulgular, alizarin boyasında fenolik, karbonil ve aromatik fonksiyonel grupların varlığını

doğrulamakda ve kimyasal özellikleri hakkında önemli bilgiler sunmaktadır (Rosu vd., 2013; Sun vd., 2016; Krawczak vd., 2025).

5.2. Fotovoltaik Analizler

FTO/TiO₂/Alizarin/(I⁻/I₃⁻)/Pt/FTO mimarisine sahip boya duyarlı güneş pilinin (BDGP) fotovoltaik performansı, Şekil 16’da gösterilen ve 20, 60 ve 100 mW/cm² ışık şiddetleri sağlayabilen bir güneş simülatörü kullanılarak değerlendirilmiş ve pilin değişen aydınlatma koşulları altındaki verimlilik davranışı kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Üretilen BDGP’nin değişen ışık şiddetleri altında elde edilen akım yoğunluğu-gerilim (J–V) karakteristikleri Şekil 24’te, buna karşılık gerilime bağlı üretilen güç (P–V) eğrileri ise Şekil 25’te sunulmaktadır. Doğal alizarin boyası ile duyarlılaştırılmış TiO₂ bazlı BDGP’nin değişen ışık şiddetleri altındaki J-V ve P-V karakteristiklerinin analizi, pilin ışık şiddetine karşı yüksek duyarlılık sergilediğini ve belirgin bir doğrusal fotovoltaik tepki verdiğini ortaya koymaktadır (Mohamed vd., 2015; Nien vd., 2020; Nien vd., 2022; Nawar ve Makhlouf, 2019). Şekil 24, 26 ve Tablo 3’te görüldüğü üzere, kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}), ışık şiddetinin 20 mW/cm²’den 100 mW/cm²’ye değişmesiyle 4,48 mA/cm²’den 9,59 mA/cm²’ye artmıştır. Işık şiddeti ile J_{sc}’de gözlenen bu belirgin artış, alizarin boyasının TiO₂ yüzeyine etkin bir şekilde adsorbe olduğunu, ışık soğurma verimliliğini artırdığını ve buna bağlı olarak foto-enjekte edilen elektron sayısının ışık şiddetiyle doğrusal olarak arttığını göstermektedir.

Tablo 3. FTO/TiO₂/Alizarin/(I⁻/I₃⁻)/Pt/FTO mimarisine sahip bir BDGP’nin değişen ışık şiddetleri altındaki fotovoltaik parametreleri

Işık Şiddeti (mW/cm ²)	FTO/TiO ₂ /Alizarin/(I ⁻ /I ₃ ⁻)/Pt/FTO BDGP				
	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF	η (%)	P _{max} (mW)
20	0,65	4,48	0,65	9,48	0,93
60	0,71	7,80	0,62	5,72	1,69
100	0,76	9,59	0,55	4,01	1,98

Anoua ve ark., hem deneysel hem de hesaplamalı (DFT/TD-DFT) çalışmalarına dayanarak, Alizarin boyasının uygun HOMO-LUMO enerji seviyeleri, görünür bölgede geniş soğurma kapasitesi ve etkili elektron enjeksiyon özellikleri sayesinde TiO₂ tabanlı BDGP’lerde verimli bir duyarlılaştırıcı olarak kullanılabilecek umut verici bir malzeme olduğunu rapor etmişlerdir (Anoua vd., 2022). Huber ve ark., geçici soğurma spektroskopisi kullanarak, alizarinin LUMO

seviyesinden TiO_2 'nin iletim bandına (CB) elektron enjeksiyonunun yaklaşık 6 femtosaniye gibi son derece kısa bir zaman ölçeğinde gerçekleştiğini göstermişlerdir (Huber vd., 2002). P-V karakteristikleri, hücrenin maksimum güç noktası ($P_{\max}$) davranışını açıkça ortaya koymakta ve üretilen gücün artan ışık şiddetiyle birlikte önemli ölçüde yükseldiğini doğrulamaktadır (Şekil 25 ve Tablo 3). Işık şiddetinin 20 mW/cm^2 'den 100 mW/cm^2 'ye değişmesiyle $P_{\max}$ değerinin iki katından fazla artması, daha yüksek ışık şiddeti seviyelerinde yük taşıyıcı toplanma veriminin arttığını göstermektedir. Ayrıca maksimum gücün daha yüksek akım ve gerilim bölgelerinde elde edilmesi, yüksek ışık şiddetlerinde yeniden birleşme kayıplarının daha sınırlı olduğuna işaret etmektedir (Nawar ve Makhoulf, 2019; Ishak vd., 2025). Bu bulgu, alizarin boyasının moleküler yapısının etkin elektron enjeksiyonunu desteklediğini ve fotoanot ile elektrolit arasındaki etkileşimlerin kararlı bir enerji dönüşüm sürecine katkı sağladığını göstermektedir.

Açık devre gerilimi (V_{OC}) değerleri incelendiğinde (Şekil 27 ve Tablo 3), ışık şiddetinin 20 mW/cm^2 'den 100 mW/cm^2 'ye değişmesiyle V_{OC} 'un $0,65 \text{ V}$ 'tan $0,76 \text{ V}$ 'a sınırlı bir artış gösterdiği belirlenmiştir. V_{OC} 'ta gözlenen bu hafif artış, ışık etkisiyle TiO_2 fotoanodunda elektron yoğunluğunun artmasına bağlı olarak Fermi seviyesinin yukarı yönlü kaymasıyla ilişkilendirilmektedir (Mohamed vd., 2015; Nien vd., 2020; Nien vd., 2022; Nawar ve Makhoulf, 2019; Ishak vd., 2025; Kim vd., 2015).

J_{SC} , V_{OC} ve $P_{\max}$ parametrelerinin analiz edilmesinin ardından, üretilen BDGP'nin enerji dönüşüm performansını daha ayrıntılı biçimde değerlendirmek amacıyla dolum faktörü (FF) ve güç dönüşüm verimi (PCE veya η) değerleri (2.2) ve (2.3) eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır (Mohamed vd., 2015; Patel vd., 2025; Nawar ve Makhoulf, 2019; Ishak vd., 2025):

Değişen ışık şiddetleri altında hesaplanan dolum faktörü (FF) ve güç dönüşüm verimi (η) değerleri Şekil 28, Şekil 29 ve Tablo 3'te sunulmaktadır. Elde edilen sonuçlar, ışık şiddetindeki artışla birlikte hem FF hem de η değerlerinde azalma meydana geldiğini göstermektedir (Nien vd., 2020; Nien vd., 2022; Kim vd., 2015). Özellikle ışık şiddetinin 20 mW/cm^2 'den 100 mW/cm^2 'ye değişmesiyle FF değerinin $0,65$ 'ten $0,55$ 'e, ve η değerinin ise $\%9,48$ 'den $\%4,01$ 'e düştüğü belirlenmiştir. En yüksek güç dönüşüm verimi, 20 mW/cm^2 ışık şiddeti altında elde edilmiştir. Genel olarak, artan ışık şiddetiyle birlikte FF ve η değerlerinde gözlenen eş zamanlı düşüş, yüksek aydınlatma koşullarında TiO_2 tabanlı BDGP performansının ağırlıklı olarak seri

direnç (R_s) ve elektrolit difüzyonuna bağlı sınırlamalar tarafından belirlendiğini ortaya koymaktadır (Mohamed vd., 2015; Nawar ve Makhoul, 2019; Zhai vd., 2016; Chou vd., 2020).

Şekil 30'da, farklı ışık şiddetlerinde periyodik olarak açılıp kapatılan aydınlatma koşulları altında BDGP'nin geçici fotoakım yoğunluğu ($J-t$) tepkisi sunulmaktadır. Işık kaynağı açıldığında fotoakım yoğunluğunun ani bir artış göstermesi, boyanın fotonları soğurması ve elektronların TiO_2 'nin iletkenlik bandına enjeksiyonu sonucu yük taşıyıcılarının hızlı bir şekilde üretildiğini göstermektedir. Işık kaynağı kapatıldığında ise fotoakım yoğunluğunun neredeyse sıfır seviyesine düşmesi, ölçülen akımın sızıntı ya da karanlık akımlardan değil, tamamen fotoindüklenmiş süreçlerden kaynaklandığını doğrulamaktadır (Ayoub vd., 2019; Kim vd., 2019; Barnes vd., 2013; Patel vd., 2025).

Işık şiddetindeki artış, daha yüksek kararlı hâl fotoakım yoğunluklarının elde edilmesine yol açmaktadır (Ito vd., 2006). Bu davranış, foton akısı ile fotojenerasyon sonucu oluşan elektron sayısı arasındaki doğrudan ilişkiyi yansıtmakta ve BDGP tarafından verimli ışık hasadı ve yük toplama işlemini göstermektedir. Işık açık durumdayken gözlenen kararlı ve dikdörtgene yakın fotoakım profilleri, cihazın iyi bir operasyonel kararlılığa ve hızlı yük taşınımına sahip olduğunu göstermektedir. Belirgin bir akım bozulmasının gözlenmemesi ise geçici koşullar altında rekombinasyon kayıplarının görece sınırlı olduğuna işaret etmektedir.

Genel olarak, bu bulgular, düşük maliyetli ve çevre dostu doğal bir duyarlaştırıcı olan alizarinin, iyi yapılandırılmış bir TiO_2 fotoanot ile birleştirildiğinde umut vadeden verimlilik sağlayabileceğini göstermektedir. Bu tez çalışması, çevre dostu ve ticari olarak uygulanabilir BDGP'lerin geliştirilmesine dair değerli bilgiler sunmakta olup, boya-yarı iletken etkileşimlerinin ve elektrolit stabilitesinin daha da optimize edilmesi, gelecekteki çalışmalarda daha da büyük performans iyileştirmelerine katkıda bulunabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKÇA

- Abou Elmaaty, T., Sayed-Ahmed, K., Magdi, M., & Elsisy, H. (2023). An eco-friendly method of extracting alizarin from *Rubia tinctorum* roots under supercritical carbon dioxide and its application to wool dyeing. *Scientific Reports*, 13, Article 30.
- Adhikari, S. G., Gascooke, J. R., Kloo, L., & Andersson, G. G. (2025). *Unveiling the aging effect at the interface of N719 dye-sensitized solar cells*. *Advanced Materials Interfaces*, 12(14), Article 2400746.
- Akila, Y., Muthukumarasamy, N., Agilan, S., Mallick, T. K., Senthilarasu, S., & Velauthapillai, D. (2016). *Enhanced performance of natural dye sensitised solar cells fabricated using rutile TiO₂ nanorods*. *Optical Materials*, 58, 76–83.
- Alegbe, E. O., & Uthman, T. O. (2024). *A review of history, properties, classification, applications and challenges of natural and synthetic dyes*. *Heliyon*, 10(13), e33646.
- Ali, M. M., Pervez, W., Ghann, W., & Uddin, J. (2019). Photophysical studies of ruthenium-based complexes and the performance of nanostructured TiO₂ based dye sensitized solar cells. *Journal of Nanomedicine & Nanotechnology*, 10(6), 538.
- Aliah, H., Bernando, B., Puspitasari, F., Setiawan, A., Pitriana, P., Nuryadin, B. W., & Ramdhani, M. A. (2018). *Dye sensitized solar cells (DSSC) performance reviewed from the composition of titanium dioxide (TiO₂)/zinc oxide (ZnO)*. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 288(1), 012070.
- Anitha, S., Kayathiri, C., Karthika, M., Suganya, M., & Balu, A. R. (2021). *Potential suitability of NiO–CuO nanocomposite for photoconductive sensor, soft magnetic materials applications and as antimicrobial agent*. *Materials Science and Engineering: B*, 268, 115143.
- Anoua, R., Touhtouh, S., Rkhis, M., & el Jouad, M. (2022). Optical and electronic properties of the natural Alizarin dye: Theoretical and experimental investigations for DSSCs application. *Optical Materials*, 127, 112113.
- Ardila-Leal, D., Ramírez-Bastidas, J. J., & Bolívar-Suárez, Y. (2021). *Natural dyes from plants, algae and fungi: A review*. *Dyes and Pigments*, 190, 109369.
- Ardila-Leal, L. D., Poutou-Piñales, R. A., Pedroza-Rodríguez, A. M. ve Quevedo-Hidalgo, B. (2021). A brief history of dyes and the environmental impact of synthetic dyes. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 44857–44871.

- Arifin, Z., Suyitno, S., Hadi, S., & Sutanto, B. (2018). *Improved performance of dye-sensitized solar cells with TiO₂ nanoparticles/Zn-doped TiO₂ hollow fiber photoanodes*. *Energies*, 11, 2922.
- Atlı, A. (2023). *Fabrication and analysis of a dye sensitized solar cell: Hydrothermally grown hybrid photoanode and opaque Pt counter electrode* (Doctoral dissertation, pp. 117). Ankara Yıldırım Beyazıt University, Graduate School of Natural and Applied Sciences.
- Ayoub, J. P., Tractz, G. T., Dias, B. V., Banczek, E. P., & Rodrigues, P. R. P. (2019). *Comparative study of Curcuma longa and beta extracted dye applied on dye sensitized solar cells*. *Revista Virtual de Química*, 11(6), 1908–1919.
- Barnes, P. R. F., Miettunen, K., Li, X., Anderson, A. Y., Bessho, T., Grätzel, M., & O'Regan, B. C. (2013). *Interpretation of optoelectronic transient and charge extraction measurements in dye-sensitized solar cells*. *Advanced Materials*, 25, 1881–1922.
- Boz, O. H. (2011). *Günümüzün alternatif enerji kaynağı: Fotovoltaik güneş pilleri* (Yüksek lisans tezi, 76 s.). Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, Türkiye.
- Calogero, G., Di Marco, G., Cazzanti, S., Caramori, S., Argazzi, R., Bignozzi, C. A., & Di Carlo, A. (2008). *Natural dyes for dye-sensitized solar cells: Red Sicilian orange and purple eggplant*. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92(11), 1341–1346.
- Calogero, G., Yum, J.-H., Sinopoli, A., Di Marco, G., Grätzel, M. ve Nazeeruddin, M. K. (2012). Anthocyanins and betalains as light-harvesting pigments for dye-sensitized solar cells. *Solar Energy*, 86(5), 1563–1575.
- Cao, C., Hu, C., Wang, X., Wang, S., Tian, Y., & Zhang, H. (2011). *UV sensor based on TiO₂ nanorod arrays on FTO thin film*. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 156, 114–119.
- Cebeci, S. (2017) *Türkiyede Güneş Enerjisinden Elektrik Üretim Potansiyelinin Değerlendirilmesi*. (Yayımlanmış Uzmanlık Tezi). T.C. Kalkınma Bakanlığı, Ankara.
- Chang, Y., Wang, X., Li, J., Zhang, H. ve Zhao, Y. (2013). Bio-inspired design of dye-sensitized solar cells based on natural photosynthesis. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 16, 1-18.
- Cherian, S., Wamser, C. C. ve Ford, W. E. (2005). Porphyrin dyes for dye-sensitized solar cells. *Journal of Physical Chemistry B*, 109(33), 15820-15827.
- Chinnarani, M., Prabu, K. M. ve Suresh, S. (2023). Plasmonic silver loaded anatase titanium dioxide nanospheres photoanode for dye-sensitized solar cell. *Results in Chemistry*, 5, 100835.
- Chou, J.-C., Ko, C.-C., Chang, J.-X., Nien, Y.-H., Lai, C.-H., Kuo, P.-Y., Chen, H.-H., Hsu, H.-H. ve Hu, G.-M. (2020). Photovoltaic properties of an rGO/Pt counter electrode with

- AZO photoanode for dye-sensitized solar cells under low light intensity. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 33(1), 121-127.
- Cömert, B. (2015) “TiO₂ ince film gaz sensörlerinin geliştirilmesi” Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 20-23.
- Cullity, B. D. ve Stock, S. R. (2001). *Elements of X-Ray Diffraction* (3. Baskı). Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Çelik, K. B. (2013) “İndiyum oksit ve galyum katkılı indiyum oksit ince filmlerin optik ve mikroyapısal özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze, 12-17.
- Çorlu, T., Karaduman, I., Yıldırım, M. A., Ateş, A. and Acar, S. (2017) “ Effect of doping materials on the low-level NO gas sensing properties of ZnO thin films”, *Journal of Electronic Materials*, 46(7), 3995-4002.
- Dai, Z., Moser, J.-E., Zakeeruddin, S. M. ve Grätzel, M. (2004). Nanostructured TiO₂ electrodes for dye-sensitized solar cells. *Journal of Physical Chemistry B*, 108, 18679–18685.
- Dayan, O., Imer, A. G., Tercan, M., Dere, A., Al-Sehemi, A. G., Al-Ghamdi, A. A. ve Yakuphanoglu, F. (2021). Dye sensitized solar cell-based optoelectronic device using novel [Ru(L1)(L2)(NCS)₂] complex. *Journal of Molecular Structure*, 1238, 130464.
- Demir, A. (2022). *Kompozit yarı iletken fotoanotların boya duyarlı hibrit güneş pili performansına etkisi*. (Yüksek lisans tezi), Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Dongale, T. D., Shinde, S. S., Kamat, R. K. ve Rajpure, K. Y. (2014). Nanostructured TiO₂ thin film memristor using hydrothermal process. *Journal of Alloys and Compounds*, 593, 267–270.
- Eastaugh, N., Walsh, V., Chaplin, T. ve Siddall, R. (2007). *Pigment compendium: A dictionary of historical pigments*. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann.
- Engin, D. (1996). Yaprak büyüklüğünü belirleyen bir ölçme sisteminin geliştirilmesi. Ege Üniversitesi.
- Ernando, M. ve Senadeera, G. K. R. (2008). Natural dye-sensitized solar cells based on anthocyanin pigments. *Current Applied Physics*, 8(3–4), 424–428.
- Eşgin, H., *ZnO:Cu ve ZnO:Mn tabanlı boya duyarlı güneş pillerinin fabrikasyonu ve karakterizasyonu*, Doktora Tezi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Eskişehir, 2021.
- Fritts C. E., (1883). “On a new form of selenium cell, and some electrical discoveries made by its use”, *Am. J. Sci.*, sayı 156, ss. 465–472, doi: 10.2475/AJS.S3-26.156.465.

- Fytronix, (2026). "9000 Full Automatic Solar Simulator Product Catalog", internet adresi: fytronix.com, [Erişim Tarihi: 12 Mart 2026].
- Garcia, C. G., Polo, A. S. ve Iha, N. Y. M., 2003. Fruit Extracts and Ruthenium Polypyridinic Dyes for Sensitization of TiO₂ in Photoelectrochemical Solar Cells. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 160(1), 87-91.
- Gebeyehu, D., Brabec, C. J. ve Sariciftci, N. S., 2002. Solid-State Organic/Inorganic Hybrid Solar Cells Based on Conjugated Polymers and Dyesensitized TiO₂ Electrodes. *Thin Solid Films*, 403, 271-274.
- Griffiths, P. R., & de Haseth, J. A. (2007). *Fourier transform infrared spectrometry*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Gholamrezaei, S. ve Salavati-Niasari, M. (2016). Natural sensitizer for low cost dye sensitized solar cell based on strontium titanate nanoparticles. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 27, 2467–2472.
- Güngör, M. (2021). Boya Duyarlı Güneş Pilleri İçin Yeni Boya Oluşturulması Ve Elektronik Özelliklerinin Hesaplanması. Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi.
- Hao, S., Wu, J., Huang, Y., Lin, J., Natural dyes as photosensitizers for dye sensitized solar cell. *Solar Energy*, 80, 209-214, 2006.
- Hara, K., Sayama, K., Ohga, Y., Shinpo, A., Suga, S., & Arakawa, H. (2003). A coumarin dye for efficient dye-sensitized solar cells. *Chemical Communications*, 2003(5), 569–570.
- Huber, R., Moser, J.-E., Grätzel, M. ve Wachtveitl, J. (2002). Real-time observation of photoinduced adiabatic electron transfer in strongly coupled dye/semiconductor colloidal systems with a 6 fs time constant. *Journal of Physical Chemistry B*, 106, 6494–6499.
- Ishak, N. N., Ali, M. S. M. ve Bsoul, A. (2025). Nanostructured materials for highly efficient dye-sensitized solar cells: A review. *Advanced Materials Technologies*, 10, 2401519.
- Ito, S., Zakeeruddin, S. M., Humphry-Baker, R., Liska, P., Charvet, R., Comte, P., Nazeeruddin, M. K., Péchy, P., Takata, M., Miura, H., Uchida, S. ve Grätzel, M. (2006). High-efficiency organic-dye-sensitized solar cells controlled by nanocrystalline TiO₂ electrode thickness. *Advanced Materials*, 18, 1202–1205.
- Kakiage, K., Aoyama, Y., Yano, T., Oya, K., Fujisawa, J., & Hanaya, M. (2015). Highly efficient dye-sensitized solar cells with collaborative sensitization by silyl-anchor and carboxy-anchor dyes. *Chemical Communications*, 51(88), 15894–15897.
- Kalasina, S., Amornsakchai, T. ve Asawapirom, U. (2015). Nanocomposite TiO₂ xerogel film for DSSC photoelectrode via simple modified sol–gel process. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 75, 63–73.

- Kang, H. C., Yoo, K., Kim, J. C., Asiam, F. K., Kaliyamurthy, A. K., Park, J., Lee, J. J. (2025). Scalable fabrication of RGB-color, semi-transparent DSSC modules enabled by a printable compact TiO₂ blocking layer. *Materials Today Energy*, 53, 101987.
- Kashyout, A.B., Soliman, M., Gamal, M. El., Fathy, M., Preparation and characterization of nano particles ZnO films for dye-sensitized solar cells. *Materials Chemistry and Physics*, 90, 230–233, 2005.
- Kato R., Furube A., Barzykin A.V., Arakawa H., Tachiya M., Kinetics and mechanism of electron injection and charge recombination in dye-sensitized nanocrystalline semiconductors, *Coordination Chemistry Reviews* 248 (2004)1195–1213.
- Kaur, R. (2024). *Small organic molecules absorbing low energy photons for dye-sensitized solar cells and biological imaging*. (Doktora tezi), The University of Mississippi, ABD.
- Kavan, L., Grätzel, M., Gilbert, S. E., Klemenz, C., & Scheel, H. J. (1996). Electrochemical and photoelectrochemical investigation of single-crystal anatase. *Journal of the American Chemical Society*, 118(28), 6716–6723.
- Kay, A., & Grätzel, M., “Artificial photosynthesis. 1. Photosensitization of TiO₂ solar cells with chlorophyll derivatives and related natural porphyrins,” *Journal of Physical Chemistry*, 97(23), 6272–6277, 1993.
- Keis, K., Bauer, C., Boschloo, G., Hagfeldt, A., Westermarck, K., Rensmo, H., & Siegbahn, H. (2002). Nanostructured ZnO electrodes for dye-sensitized solar cell applications. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 148(1–3), 57–64.
- Kılıç, B. (2010). Çinko oksit (ZnO) nanoyapılar üzerinde boya ile duyarlı hale getirilmiş güneş pillerinin üretilmesi. (Doktora tezi), Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Kim, J. H., Moon, K. J., Kim, J. M., Lee, D. ve Kim, S. H. (2015). Effects of various light-intensity and temperature environments on the photovoltaic performance of dye-sensitized solar cells. *Solar Energy*, 113, 251–257.
- Kim, J., Lee, H., Kim, D. Y., Kim, S. ve Seo, Y. (2019). Cobalt-based electrolytes for efficient flexible dye-sensitized solar cells. *MRS Advances*, 4, 481–489.
- Köse, S. (1986). Yarıiletken Güneş Pilleri ve Verimlilikleri. Anadolu Üniversitesi.
- Krawczak, E. ve Zdyb, A. (2019). The influence of the dye adsorption time on the DSSC performance. *E3S Web of Conferences*, 100, 00040.
- Krawczak, E., Zdyb, A., Lapinski, M., N.-Wiercinska, A. ve Gazdowicz, G. (2025). Phenylfluorone and alizarin as metal-free sensitizers in dye sensitized solar cells. *Materials Science and Engineering B*, 320, 118390.

- Kumar, T. R. N., Yuvaraj, S., Kavitha, P., Sudhakar, V., Krishnamoorthy, K. ve Neppolian, B. (2020). Aromatic amine passivated TiO₂ for dye-sensitized solar cells (DSSC) with ~9.8% efficiency. *Solar Energy*, 201, 965–971.
- Küpeli A.Ö. (2005). Güneş Pilleri ve Verimleri. Osmangazi Üniversitesi.
- Larsson, L. F. G., de L. Andrade, J., de F. Oliveira, M., Peron, A. P., do P. Banczek, E. ve Tractz, G. T. (2025). Photovoltaic and thermodynamic analysis of *Maytenus ilicifolia* as a natural dye for DSSC. *Chemical Papers*, 79, 6627–6634.
- Lin, Y.-S. ve Chen, W.-H. (2025). Dye-sensitized solar cells with modified TiO₂ scattering layer produced by hydrothermal method. *Materials*, 18(2), 278, 1–13.
- Lofrumento, C., Ricci, M., Platania, E., Becucci, M. ve Castellucci, E. (2013). SERS detection of red organic dyes in Ag-agar gel. *Journal of Raman Spectroscopy*, 44(1), 47–54.
- Ma'arifah, A., Sholeha, N., Pujiarti, H., Diantoro, M., Hidayat, A. ve Osman, Z. (2025). The effect of RF sputtering power variation on blocking layer TiO₂ on the performance of DSSC. *Results in Surfaces and Interfaces*, 18, 100456.
- Mohamed, N. M., Khatani, M., Hamid, N. H., Sahmer, A. Z. ve Zaine, S. N. A. (2015). Performance analysis of dye solar cell with additional TiO₂ layer under different light intensities. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 38, 381–386.
- Mutlu, S. (2016). *Biyo-malzeme duyarlı güneş pili* (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karaman.
- Müezzinoğlu, E. D., Tuna Yıldırım, S., Çağırtekin, A. O., Ateş, A., Acar, S. ve Yıldırım, M. A. (2024). CO gas sensing properties of Cd(OH)₂/CdO thin films synthesized by SILAR method. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 109, 639–653.
- Nair, B. G., Rahman, H., John, A. K., Keerthi, K., Shaji, S., Okram, G. S., Sharma, V. ve Philip, R. R. (2020). Calcium incorporated copper indium oxide thin films – a promising candidate for transparent electronic applications. *Thin Solid Films*, 693, 137673.
- Nataraj, D. (2012). *Natural dyes in dye-sensitized solar cells*. In: S. Sharma (Ed.), *Solar Cells – Dye-Sensitized Devices*. Rijeka: InTech.
- Nawar, A. M. ve Makhoul, M. M. (2019). Electrical and photovoltaic responses of an Au/Coumarin 337/n-Si/Sb-Au hybrid organic–inorganic solar cell. *Journal of Electronic Materials*, 48(9), 5771–5784.
- Nazeeruddin, M. K., Kay, A., Rodicio, I., Humphry-Baker, R., Müller, E., Liska, P., Vlachopoulos, N. ve Grätzel, M. (1993). Conversion of light to electricity by cis-

- X₂bis(2,2'-bipyridyl-4,4'-dicarboxylate)ruthenium(II) charge-transfer sensitizers (X = Cl⁻, Br⁻, I⁻, CN⁻, and SCN⁻) on nanocrystalline TiO₂ electrodes. *Journal of the American Chemical Society*, 115(14), 6382–6390.
- Negi, A. (2025). Natural dyes and pigments: sustainable alternatives to synthetic dyes. *Atmosphere*, 6(3), 23.
- Nelson J. (2003). The physics of solar Cells. Imperial College Press.
- Nien, Y.-H., Hu, G.-M., Rangasamy, M., Yong, Z.-R., Chou, J.-C., Lai, C.-H., Kuo, P.-Y., Chang, J.-X. ve Lin, Y.-C. (2020). Investigation on photoanode modified with TiO₂–ZnO–Ag nanofibers in dye-sensitized solar cell under different intensities of illuminations. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 67(11), 4983–4989.
- Nien, Y.-H., Yong, Z.-R., Chou, J.-C., Lai, C.-H., Kuo, P.-Y., Ho, C.-S., Lin, Y.-C., Wu, Y.-T. ve Syu, R.-H. (2022). The photovoltaic performance of the DSSC with the photoanode modified by γ -Fe₂O₃/TiO₂ nanofibers under low illumination. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 12(2), 618–624.
- Oktik, S. (2001). Güneş Elektrik Dönüşümleri Fotovoltaik Güneş Gözeleri ve Güç Sistemleri. Ankara Temiz Enerji Vakfı Yayınları.
- Oral, M. (1979). Güneş Pilleri. İzmir: İlker Matbaası.
- O'Regan, B. ve Grätzel, M. (1991). A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films. *Nature*, 353, 737–740.
- Patel, H., Singh, S., Srivastav, N., Singh, Y. ve Srivastava, P. (2025). Green synthesis of titanium dioxide (TiO₂) using *Vitex negundo* (Nirgundi) leaf extract potentially leading to improved efficiency in DSSC. *Ionics*, 31, 8357–8372.
- Patel, H., Sharma, S., Singh, S., Srivastav, N., Singh, Y., Rai, A. ve Srivastava, P. (2025). *Tagetes erecta* (marigold) flower extract in the different solvents used as a capping agent and sensitizer for TiO₂ photoanode based DSSC. *Next Materials*, 8, 100875.
- Peker, A. (1999). *I–III–VI₂ grubu yarıiletken bileşiklerin yapısal ve optik özellikleri* (Yayımlanmamış doktora tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Polo, A. S. ve İha, N. Y. M. (2006). Blue sensitizers for solar cells: Natural dyes from calafate and jaboticaba. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90(13), 1936–1944.
- Rabenau, A. (1985). The role of hydrothermal synthesis in preparative chemistry. *Angewandte Chemie International Edition in English*, 24(12), 1026–1040.
- Ramaripa, P. S., Modibane, K. D., Makgopa, K., Seerane, O. A., Maubane-Nkadimeng, M. S., Makhado, E. ve Pandey, S. (2023). Influence of phthalocyanine nanowire dye on the

- performance of titanium dioxide–metal organic framework nanocomposite for dye-sensitized solar cells. *Chemical Engineering Journal Advances*, 14, 100485.
- Razaghizadeh, A., Rafee, V., Nakhaei, R. ve Ameri, F. (2025). Effect of silver nanoparticles embedding in mesoporous TiO₂ layer on the performance enhancement of dye-sensitized solar cells using natural dyes. *Plasmonics*, 20, 7951–7965.
- Rosu, M.-C., Suci, R.-C., Lazar, M. D. ve Bratu, I. (2013). The influence of alizarin and fluorescein on the photoactivity of Ni-, Pt- and Ru-doped TiO₂ layers. *Materials Science and Engineering B*, 178, 383–390.
- Roy, R. (1994). “Hydrothermal processing of materials.” *Journal of Materials Science*, 29, 3747–3754.
- Sekar, N. ve Gehlot, V. Y. (2010). Metal complex dyes for dye-sensitized solar cells: recent developments. *Resonance*, 15(9), 819–831.
- Sharma, K., Sharma, V. ve Sharma, S. S. (2018). Dye-sensitized solar cells: Fundamentals and current status. *Nanoscale Research Letters*, 13, 381.
- Sivula, K. ve van de Krol, R. (2016). Semiconducting materials for photoelectrochemical energy conversion. *Nature Reviews Materials*, 1, 15010.
- Smestad, G. P. & Grätzel, M. (1998). Demonstrating electron transfer and nanostructured interfaces in dye-sensitized solar cells. *Journal of Chemical Education*, 75(6), 752–756.
- Somiya, S. ve Roy, R. (2000). *Hydrothermal synthesis of materials*. Oxford: Elsevier.
- Söyleyici, M. (2011). *Ir katkılı ZnO filmlerinin üretilmesi ve bazı fiziksel özelliklerinin incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 78–81.
- Sönmezoğlu, S., Akyürek, C. ve Akın, S. (2012). High-efficiency dye-sensitized solar cells using ferrocene-based electrolytes and natural photosensitizers. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 45(42), 051001.
- Sönmezoğlu, S., Akyürek, C. ve Akış, H. (2014). Modification of juglon dye as a sensitizer in dye-sensitized solar cells. *IET Optoelectronics*, 8(6), 270–276.
- Sun, C., Li, Y., Qi, D., Li, H. ve Song, P. (2016). Optical and electrical properties of purpurin and alizarin complexone as sensitizers for dye-sensitized solar cells. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 27, 8027–8039.
- Sun, C., Li, Y., Han, J., Cao, B., Yin, H. ve Shi, Y. (2019). Enhanced photoelectrical properties of alizarin-based natural dye via structure modulation. *Solar Energy*, 185, 315–323.

- Stuart, B. (2004). *Infrared spectroscopy: Fundamentals and applications*. Chichester: John Wiley & Sons.
- Tamotsu, H., Miura, H. ve Uchida, S. (2004). Highly efficient metal-free organic dyes for dye-sensitized solar cells. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 164, 29–32.
- Tekerek, S. (2009). *TiO₂ tabanlı doğal boyar maddeli güneş pili yapımı* (Yüksek lisans tezi). Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
- Tennakone, K., Bandara, J., Bandaranayake, P. K. M., Kumara, G. R. A. ve Konno, A. (1997). Dye-sensitized solid-state photovoltaic cells based on TiO₂ films. *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions*, 93(3), 469–473.
- Tomar, N., Agrawal, A., Dhaka, V. S. ve Surolia, P. K. (2020). Ruthenium complexes based dye sensitized solar cells: Fundamentals and research trends. *Solar Energy*, 207, 59–76.
- Tributsch, H. (1972). “Dye sensitization of ZnO electrodes and a model for photosynthesis.” *Nature*, 238, 82–83.
- Ünverdi, A. (2020). *Study of morphology and dye effects on the efficiency of CdS-based hybrid solar cells* (Yüksek lisans tezi). Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Fen ve Mühendislik Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Vankar, P. S., Shanker, R., & Wijayapala, S. (2008). *Natural dyes for textiles: Sources, chemistry and applications*. Woodhead Publishing, Cambridge.
- Wongcharee, K., Meeyoo, V. ve Chavadej, S. (2007). Dye-sensitized solar cell using natural dyes extracted from rosella and blue pea flowers. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 91(7), 566–571.
- Yamazaki, E., Murayama, M., Nishikawa, N., Hashimoto, N., Shoyama, M. ve Kurita, O. (2007). Utilization of natural carotenoids as photosensitizers for dye-sensitized solar cells. *Solar Energy*, 81(4), 512–516.
- Yıldırım, M. Ali (2010). *SILAR tekniği ile büyütülen ZnO ve CdO ince filmlerinin karakterizasyonu ve sandviç yapılarda kullanılması* (Doktora tezi). Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Yoshimura, M. & Suda, T. (1994). Hydrothermal synthesis of ceramic materials. *Journal of Materials Science*, 29, 3399–3405.
- Zhai, P., Lee, H., Huang, Y. T., Wei, T. C. ve Feng, S. P. (2016). Study on the blocking effect of a quantum-dot TiO₂ compact layer in dye-sensitized solar cells with ionic liquid electrolyte under low-intensity illumination. *Journal of Power Sources*, 329, 502–509.

Zhang, D., Lanier, S. M., Downing, J. A., Avent, J. L., Lum, J. ve McHale, J. L. (2008). Betalain pigments for dye-sensitized solar cells. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 195, 72–80.

Zhou, H., Wu, L., Gao, Y. ve Ma, T. (2011). Dye-sensitized solar cells using 20 natural dyes as sensitizers. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 219, 188–194.