

**T.C.  
BOZOK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Doktora Tezi**

**DOĞAL BOYAYLA DUYARLILAŞTIRILMIŞ GÜNEŞ  
PİLİ ÜRETİMİ VE YAPININ SENSÖR  
KARAKTERİSTİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

**Mücella ÖZBAY KARAKUŞ**

**Tez Danışmanı  
Yrd. Doç. Dr. Orhan ER  
Prof. Dr. Hidayet ÇETİN**

**Yozgat 2017**



**T.C.  
BOZOK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Doktora Tezi**

**DOĞAL BOYAYLA DUYARLILAŞTIRILMIŞ GÜNEŞ  
PİLİ ÜRETİMİ VE YAPININ SENSÖR  
KARAKTERİSTİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

**Mücella ÖZBAY KARAKUŞ**

**Tez Danışmanı  
Yrd. Doç. Dr. Orhan ER  
Prof. Dr. Hidayet ÇETİN**

**Bu çalışma, Bozok Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi  
tarafından 2014 FBE/T143 kodlu proje ile desteklenmiştir.**

**Yozgat 2017**

T.C.  
BOZOK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

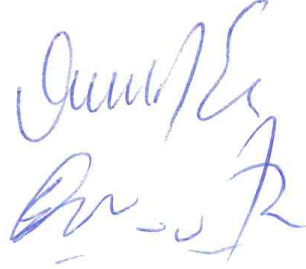
**TEZ ONAYI**

Enstitümüzün Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı Tezli Doktora Programı 70111812001 numaralı öğrencisi Mücella ÖZBAY KARAKUŞ'Un hazırladığı “Doğal Boyayla Duyarlılaştırılmış Güneş Pili Üretimi ve Yapının Sensör Karakteristiklerinin Belirlenmesi” başlıklı tezi ile ilgili tez savunma sınavı, Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri gereğince 26/05/2017 Cuma günü saat 14:00'da yapılmış, tezin onayına oy birliği/oy çokluğu ile karar verilmiştir.

**Başkan** : Prof. Dr. Recep ŞAHİNGÖZ



**Jüri Üyesi (Danışman)** : Yrd. Doç. Dr. Orhan ER



**Jüri Üyesi** : Prof. Dr. Erol KURT

**Jüri Üyesi** : Prof. Dr. Ramazan BAYINDIR



**Jüri Üyesi** : Yrd. Doç. Dr. Davut Erdem ŞAHİN



**ONAY:**

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulu'nun ..19../06..../2017 tarih ve 16.. sayılı Enstitü Yönetim Kurulu Kararı ile onaylanmıştır.



Doç. Dr. Euat KOKSAL  
Müdür

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

ÖZET .....	iii
ABSTRACT .....	v
TEŞEKKÜR .....	vii
TABLOLAR LİSTESİ .....	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	x
KISALTMALAR LİSTESİ .....	xv
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. GENEL BİLGİLER .....</b>	<b>17</b>
2.1. Güneş Enerjisi .....	17
2.2. Fotovoltaik Cihaz Teknolojisi .....	23
2.3. DSSC Yapısı ve Çalışma Prensibi .....	27
2.3.1. TCO Kaplı Cam Plaka .....	35
2.3.2. Yarıiletken Oksit Tabaka ve Fotoelektrot Yapısı .....	36
2.3.3. Fotoduyarlılaştırıcı Boyar Madde .....	39
2.3.4. Doğal Boyalarla Üretilen DSSC'ler .....	40
2.3.5. DSSC'lerde Arka Elektrot.....	44
2.3.6. Redoks Elektroliti .....	44
2.4. Güneş Hücrelerine Ait Temel Tanımlar ve Cihazın Elektriksel Karakteristiğinin Elde Edilmesi .....	45
2.5. Fotodenedektörler .....	47
<b>3. MALZEME ve YÖNTEM .....</b>	<b>51</b>
3.1. DSSC Üretim Prosesi .....	51
3.1.1. Fotoelektrodun Hazırlanması .....	51
3.1.2. Doğal Boyaların Ekstraksiyonu .....	54
3.1.3. Arka Elektrodun Oluşturulması .....	55

3.1.4. Redoks Elektrolitinin Oluşturulması.....	56
3.1.5. Elektrotların Birleştirilmesi ve Pile Son Şeklinin Verilmesi .....	57
3.2. Analiz Yöntemleri .....	57
3.2.1. SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) Analizi .....	57
3.2.2. AFM Analizi .....	59
3.2.3. GC-MS Analizi .....	61
3.3. Ölçüm Sistemleri ve Analitik Hesaplama Yöntemi .....	63
3.3.1. I-V Ölçüm Sistemi .....	63
3.3.2. Aydınlatma Şiddeti ve Termal Cevap Testleri için Kullanılan Fotodedektör Ölçüm Sistemleri .....	64
3.3.3. Tek ve Çift Diyot Modeli Kullanılarak DSSC Karakterizasyonu.....	66
3.3.4. Geçici Fotoakım Cevap Testleri için Fotodedektör Ölçüm Sistemleri ...	74
<b>4. DENEYSEL BULGULAR.....</b>	<b>77</b>
4.1. DSSC'lerin Yapısal Karakterizasyonu.....	77
4.1.1. FTO Tabakasının Karakterizasyonu .....	77
4.1.2. Fotoelektrodu Oluşturan TiO <sub>2</sub> Tabakasının Karakterizasyonu .....	79
4.1.3. Üretilen Doğal Boyaların Karakterizasyonu .....	83
4.2. Üretilen DSSC'lerin Fotovoltaik Performans Karakterizasyonu .....	87
4.3. Fotoduyarlılaştırıcı Boyar Maddeye Uygulanan Refluks İşlemi .....	89
4.4. Refluks İşlemi Sonrası Üretilen DSSC'lerin Fotovoltaik Performans Karakterizasyonu.....	97
4.5. Tek-Diyot ve Çift Diyot Modelleri Kullanılarak DSSC'lerin Analitik Karakterizasyonu.....	102
4.6. Fotoelektrot Yüzey Yapılarının İncelenmesi .....	107
4.7. Üretilen DSSC'lerin Aydınlatma Şiddetine Bağlı Fotovoltaik Performans Karakterizasyonu.....	110
4.8. Üretilen DSSC'lerin Hücre Sıcaklığına Bağlı Fotovoltaik Performans Karakterizasyonu.....	119

4.9. Üretilen DSSC'lerin Geçici Fotovoltaj Performans Karakterizasyonu .....	134
<b>5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>146</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>150</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>170</b>
Ek 1: Doğal boyalarla hazırlanmış DSSC'lere ait karakteristik parametreler ve literatür verisi .....	170
Ek 2: Doğal fotoduyarlılaştırıcı boyalara ait GC-MS Analizi Sonuçları .....	192



# DOĞAL BOYAYLA DUYARLILAŞTIRILMIŞ GÜNEŞ PİLİ ÜRETİMİ VE YAPININ SENSÖR KARAKTERİSTİKLERİNİN BELİRLENMESİ

**Mücella ÖZBAY KARAKUŞ**

**Bozok Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı  
Doktora Tezi**

**2017; Sayfa: 229**

**Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Orhan ER  
Tez II. Danışmanı: Prof. Dr. Hidayet ÇETİN**

## ÖZET

Bu tez çalışmasında boyayla duyarlılaştırılmış fotoaktif kimyasal dönüşüm hücrelerinin güneş pili özellikleri ve ışık dedektör özellikleri incelenmiştir. Boyayla duyarlılaştırılmış güneş pili (DSSC) yapıları aynı cins fakat farklı tür Pelargonium Grandiflorum ve Pelargonium Hortorum bitkilerinin doğal boyaları kullanılarak üretilmiştir. Doğal boyalarla üretilen DSSC yapıları güneş pili araştırmalarında yakın tarihli bir geçmişe sahiptir ve çevreci malzemelerle güneş pili üretimini hedeflemektedir. Aynı cins fakat farklı türde bitkilerin seçilme nedeni bitki içeriklerinin GC-MS analiziyle mukayese edilebilir sonuçlar vermesi ve doğal boya içerisinde güneş pili verimine etki eden bileşenleri saptayabilmektedir. Yapılan GC-MS analizleri ve güneş pili verimlilikleri dikkate alındığında, GC-MS analizleri sonucu ortaya çıkan galik asitin verim arttırıcı bir madde olduğu saptanmıştır. Tek diyot ve çift diyot modeliyle güneş pili karakteristikleri incelendiğinde galik asitin özellikle fotoaktif tabakadaki seri direnci önemli ölçüde azalttığı, sızıntı akımı iyileştirdiği, 1'e daha yakın idealite değerlerine sahip DSSC üretimine neden olduğu, tüm bu parametrelerin de güneş pili verimini olumlu yönde geliştirdiği gözlenmiştir.

Boyayla duyarlılaştırılmış yapıların bir fotodedektör olarak kullanımı yine bu tezde yapılan deneysel araştırmalarla incelenmiştir. Fotodedektör incelemeleri ticari olarak satılan tek-kristal Si (Newport 818-R) fotodedektörle mukayeseli olarak yapılmıştır. 34-2.3 W/m<sup>2</sup>



aralığında nötral yoğunluk filtreleri yardımıyla fototepki ölçümleri yapıldığında DSSC fotodedektörün yüksek kalite c-Si fotodedektöre oranla ortalama 10 kat daha fazla çıkış gücü ve daha yüksek dolum faktörü sağladığı, özellikle düşük ışık şiddetleri için DSSC fotodedektörün üstün özelliklere sahip olduğu gözlenmiştir. Üretilen fotodedektörlerin sıcaklık kararlılıkları ayrıca 298-373 °K aralığında incelenmiştir. Fotodedektörlerde incelenen önemli parametrelerden biri de tepki süresidir. Doğal boya kullanılarak üretilmiş DSSC'lerin tepki süreleri geçici fotoakım ve fotovoltaj yöntemleriyle incelenmiş, DSSC fotodedektörlerin aslen ışıkla etkileştiği ilk birkaç nanosaniye içerisinde bir atım gerçekleştirdiği ancak üretilen atımı ~ 0.1 s civarında sürekli bir akıma (d.c.) dönüştürebildiği gözlenmiştir. Nanosaniye mertebesinde atımın algılanması sonrası 0.1 s mertebesindeki d.c. akım üretimindeki gecikme fotokimyasal hücredeki redoks tepkimelerinin, katalitik aktivite işlemlerinin ve bu esnada sıvı elektrolit içerisinde elektron taşınma hızının toplam sürelerine atfedilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Güneş Pili, Fotodedektör, Tek Diyot Modeli, Çift Diyot Modeli.

# **NATURAL DYE SENSITIZED SOLAR CELL PRODUCTION AND DETERMINATION OF PHOTODETECTOR CHARACTERISTICS**

**Mücella ÖZBAY KARAKUŞ**

**Bozok University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechatronics Engineering  
Postgraduate of Science Thesis**

**2017; Page: 229**

**Thesis Supervisor: Assis. Prof. Dr. Orhan ER  
Prof. Dr. Hidayet ÇETİN**

## **ABSTRACT**

In this thesis, both solar cell properties and light detector properties of dye-sensitized photoactive chemical conversion cells have been examined. The structure of dye-sensitized solar cells (DSSC) have been produced by using natural dyes of the same genus but different species *Pelargonium Grandiflorum* and *Pelargonium Hortorum* plants. DSSC structures produced with the natural dyes have a recent history in solar cell research and that aims to produce solar cells with environment-friendly materials. The reasons for choosing plants of the same genus but different species are likely to give comparable results with the GC-MS analysis of the plant content and determine the components which affect solar cell yield in natural dye. When GC-MS analyzes and solar cell efficiencies are taken into account, the findings from GC-MS analysis reveal that the gallic acid is a substance of yield enhancer. When the solar cell characteristics are examined by single diode and double diode model, it is observed that gallic acid significantly reduces the series resistance in the photoactive layer, improves the leakage current, ensures the ideality factor of the DSSC about to 1 ideal values and all these parameters have also improved the efficiency of the solar cell.

The uses of dye sensitized structures as photodetector have also been examined with the experimental research in this thesis. The photodetector examinations have been performed by comparison with a commercially single-crystal Si (Newport 818-R) photodetector. When

the photoreaction measurement is performed with the help of neutral density filters in the range of 34-2.3 W/m<sup>2</sup>, it has been observed that DSSC photodetector provides about 10 times more output power and higher fill factor compared to high quality c-Si photodetector and the DSSC photodetector has superior characteristics especially for low light intensities. The temperature stability of the produced photodetectors are also examined in the range of 298-373 °K. Another important parameter for photodetectors is the response time. The response times of the DSSCs which have been produced using natural dyes, are examined by transient photocurrent and photovoltage methods. It has been observed that DSSC photodetectors perform a pulse within the first few nanoseconds that originally interacts with light, but it can convert the produced pulse to a continuous flow (d.c.) around ~ 0.1 s. After the perception of the pulse in the nanosecond range, the delay in the d.c. current production in 0.1 s ranking is attributed to the total duration of the redox reactions in the photochemical cell, the catalytic activity processes and the rate of electron transport within the liquid electrolyte during this time.

**Keywords:** Solar Cell, Photodetector, Single Diode Model, Double Diode Model.

## TEŞEKKÜR

Öncelikle, doktora eğitimim boyunca desteğini esirgemeyen danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Orhan ER'e teşekkürü bir borç bilirim. Tez çalışmalarım boyunca laboratuvarında deneysel çalışmama imkan sağlayan, büyük bir titizlik, hoşgörü ve sabırla bana destek olan ve değerli katkılarını esirgemeyen, yapıcı yönlendirmeleri ve ihtiyaç duyduğum her konuda her daim yanımda olan II. danışmanım, değerli hocam sayın Prof. Dr. Hidayet ÇETİN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

SEM analizleri için Bozok Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi müdürü ve çalışanlarına, Cyclic Voltammetry ölçüm ve değerlendirmeleri konusundaengin bilgilerini bizlerle paylaşan Prof. Dr. Atif KOCA'ya ve atomik kuvvet mikroskobu ölçümleri konusundaki yardımlarından dolayı Nanomanyetik Bilimsel Cihazlar Laboratuvarı ve çalışanlarına, Fotoduyarlılaştırıcı boyaların reflüks işlemleri ve FTIR analizlerinde yardımcı olan Doç. Dr. İrfan KOCA ve Arş. Gör. Mehmet YAKAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Akademisyenliğe başladığım ilk günden beri beni yüreklendiren ve çalışma azmine hayran olduğum, her konuda örnek aldığım değerli ağabeyim, hocam Yrd. Doç. Dr. Latif Onur UĞUR'a, her ihtiyaç duyduğumda yardımlarını esirgemeyen sevgili arkadaşım Yrd. Doç. Dr. Güllü KIRAT başta olmak üzere, laboratuvarda birlikte çalışma imkanı bulduğum Tolga ÖNEN'e, birlikte yaptığımız laboratuvar çalışmaları ve okulda geçirdiğim zamanı, muhabbetleri ve destekleriyle anlamlı ve güzel kılan arkadaşlarım Merve EREN YAKIŞIKLIER ve Cansu ERGİN'e teşekkür ederim. Bu sürecin en zorlu zamanlarında, yorulduğum ya da ümitsizliğe kapıldığım her zaman sabırla ve sevgiyle beni motive eden, varlığından güç aldığım eşim Fahri KARAKUŞ'a ve canım kızım İsra Dila KARAKUŞ'a ve son olarak, hayatımın her aşamasında olduğu gibi doktora çalışmam sırasında da desteklerini, maddi ve manevi olanaklarını hiçbir zaman esirgemeyen, hep yanımda olan canım aileme gönülden teşekkür ederim.

## TABLolar LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
<b>Tablo 2.1.</b> ETKB tarafından güneş enerjisi için hedeflenen üretim kapasitesi.....	22
<b>Tablo 4.1.</b> Boya ekstraktında kullanılan bitkilerin, elde edilen boya solüsyonlarının ve bu boyar maddelerle oluşturulan fotoelektrotların fotoğrafları.....	92
<b>Tablo 4.2.</b> Boyar maddelerdeki galik asit oranları.....	95
<b>Tablo 4.3.</b> Boyar maddeye saf galik asit eklendikten sonra elde edilen DSSC'lerden elde edilen karakteristik değerler.....	101
<b>Tablo 4.4.</b> Üretilen DSSC'lerin fotovoltaiik performans parametreleri (oda sıcaklığında 298°K, 1000 W/m <sup>2</sup> aydınlatma altında).....	103
<b>Tablo 4.5.</b> P2 boyasına saf galik asit eklenerek üretilen DSSC lerin fotovoltaiik performans parametreleri (oda sıcaklığında 298°K, 1000 W/m <sup>2</sup> aydınlatma altında).....	106
<b>Tablo 4.6.</b> Galik asit adsorbe edilmiş TiO <sub>2</sub> filmler için FTIR bant değerleri.....	110
<b>Tablo 4.7.</b> P1 boyasıyla üretilen DSSC'nin farklı aydınlatma şiddetlerine bağlı performans değerleri.....	113
<b>Tablo 4.8.</b> P1-A boyasıyla üretilen DSSC'nin farklı aydınlatma şiddetlerine bağlı performans değerleri.....	114
<b>Tablo 4.9.</b> P2 boyasıyla üretilen DSSC'nin farklı aydınlatma şiddetlerine bağlı performans değerleri.....	115
<b>Tablo 4.10.</b> P2-A boyasıyla üretilen DSSC'nin farklı aydınlatma şiddetlerine bağlı performans değerleri.....	116
<b>Tablo 4.11.</b> c-Si sensörün farklı aydınlatma şiddetlerine bağlı performans değerleri.....	118
<b>Tablo 4.12.</b> P1 boyasıyla üretilen DSSC'ye ait farklı hücre sıcaklıklarına bağlı performans değerleri.....	129
<b>Tablo 4.13.</b> P1-A boyasıyla üretilen DSSC'ye ait farklı hücre sıcaklıklarına bağlı performans değerleri.....	130
<b>Tablo 4.14.</b> P2 boyasıyla üretilen DSSC'ye ait farklı hücre sıcaklıklarına bağlı performans değerleri.....	131

<b>Tablo 4.15.</b> P2-A boyasıyla üretilen DSSC'ye ait farklı hücre sıcaklıklarına bağlı performans değerleri.....	132
<b>Tablo 4.16.</b> c-Si sensöre ait farklı hücre sıcaklıklarına bağlı performans değerleri.....	133
<b>Tablo 4.17.</b> DSSC fotodedektörlere ait karakteristik parametreler.....	144
<b>Tablo 1.</b> Çeşitli meyvelerden ekstrakt edilen doğal boyalarla üretilmiş DSSC'lere ait yöntem ve performans verileri.....	170
<b>Tablo 2.</b> Çeşitli Bitkilerin çiçeklerinden ekstrakt edilen doğal boyalarla üretilmiş DSSC'lere ait yöntem ve performans verileri.....	174
<b>Tablo 3.</b> Çeşitli Bitki yapraklarından ekstrakt edilen doğal boyalarla üretilmiş DSSC'lere ait yöntem ve performans verileri.....	182
<b>Tablo 4.</b> Çeşitli Bitki köklerinden ekstrakt edilen doğal boyalarla üretilmiş DSSC'lere ait yöntem ve performans verileri.....	186
<b>Tablo 5.</b> Çeşitli Bitki tohumlarından ekstrakt edilen doğal boyalarla üretilmiş DSSC'lere ait yöntem ve performans verileri.....	188
<b>Tablo 6.</b> Çeşitli meyvelerin kabuklarından ekstrakt edilen doğal boyalarla üretilmiş DSSC'lere ait yöntem ve performans verileri.....	189
<b>Tablo 7.</b> Çeşitli yosun ve maya türlerinden ekstrakt edilen doğal boyalarla üretilmiş DSSC'lere ait yöntem ve performans verileri.....	190
<b>Tablo 8.</b> Çeşitli pH değerlerinde hazırlanan doğal boyalarla üretilmiş DSSC'lere ait performans verileri.....	191

## ŞEKİLLER LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1. Güneşten dünya yüzeyine ulaşan ışınım miktarı .....	18
Şekil 2.2. Güneş ışığının geliş açısına bağlı olarak hesaplanan küresel hava kütlesi tanımları .....	19
Şekil 2.3. AM 1.5 ve AM 0 değerleri için güneş spektrumu .....	20
Şekil 2.4. Dünya güneş enerjisinden elektrik üretimi ve Türkiye'nin üretimdeki yeri.....	21
Şekil 2.5. Türkiye'nin ortalama güneşlenme haritası .....	22
Şekil 2.6. Çeşitli güneş pili teknolojileri için maliyet-verim kıyaslama tablosu .....	25
Şekil 2.7. National Renewable Energy Laboratory of America tarafından hazırlanan araştırmalara konu olmuş güneş pili yapıları ve enerji dönüşüm verimi istatistikleri.....	26
Şekil 2.8. Boyayla duyarlılaştırılmış güneş pilinin şematik gösterimi .....	29
Şekil 2.9. DSSC'lerde duyarlılaştırıcı boya ile TiO <sub>2</sub> tabaka arasında gerçekleşen e <sup>-</sup> aktarımı .....	30
Şekil 2.10. DSSC'lerde gerçekleşen üretim aşamaları .....	33
Şekil 2.11. (a) TiO <sub>2</sub> anataz faz (tetragonal yapı, a = 0.3785 nm, c = 0.9513 nm), (b) rutil faz (tetragonal yapı, a = 0.4593 nm, c = 0.2959 nm), (c) brukit faz (ortorombik yapı, a = 0.9181 nm, b = 0.5455 nm, c = 0.5142 nm).....	38
Şekil 2.12. Galik asitin (3,4,5- trihydroxybenzoic acid) yapısal formülü.....	43
Şekil 2.13. Galik asitin TiO <sub>2</sub> üzerindeki kimyasal adsorpsiyonu ile oluşan yüzey komplekslerinin olası yapıları.....	43
Şekil 2.14. Fotovoltaik hücrenin akım-gerilim karakteristiği .....	46
Şekil 2.15. (a) TiO <sub>2</sub> fotoanot kullanılarak üretilmiş PECC yapısında bir UV-fotodedektör ile DSSC yapısının karşılaştırılması, (b) PECC UV-fotodedektör yapısı.....	48
Şekil 2.16. DSSC yapısıyla oluşturulmuş bir yakın kızılötesi (NIR) fotodedektör .....	49
Şekil 3.1. Deneyler kapsamında kullanılan FTO kaplı cam .....	51
Şekil 3.2. Hach Lange DR 5000 UV-VIS spektrofotometre cihazı.....	52
Şekil 3.3. FTO kaplı cam yüzeyinde oluşturulan TiO <sub>2</sub> film .....	53
Şekil 3.4. Sinterleme işlemlerinde kullanılan tüp fırın .....	54

<b>Şekil 3.5.</b> Pelargonium Grandiflorum (a) ve Pelargonium Hortorum (b) bitkilerine ait fotoğraflar .....	54
<b>Şekil 3.6.</b> Destilasyon cihazı.....	55
<b>Şekil 3.7.</b> İletken yüzey üzerinde oluşturulmuş Pt tabakası.....	56
<b>Şekil 3.8.</b> DSSC’de kullanılmak üzere hazırlanan sıvı redoks elektroliti.....	56
<b>Şekil 3.9.</b> Üretilen DSSC.....	57
<b>Şekil 3.10.</b> Taramalı elektron mikroskobunun içyapısı ve çalışma prensibi .....	58
<b>Şekil 3.11.</b> Taramalı elektron mikroskobunda elektron demeti-numune etkileşimi .....	59
<b>Şekil 3.12.</b> TiO <sub>2</sub> tabakasının SEM görüntülerinin alınmasında kullanılan taramalı elektron mikroskobu .....	59
<b>Şekil 3.13.</b> AFM’nin çalışma prensibi .....	60
<b>Şekil 3.14.</b> FTO ve TiO <sub>2</sub> tabakasının topografi görüntülerinin alınmasında kullanılan AFM yapısının çalışma mantığı .....	60
<b>Şekil 3.15.</b> GC-MS Sistemi .....	62
<b>Şekil 3.16.</b> GC-MS Sistemi analizlerinde kullanılan Shimadzu OP2010 Ultra GC-MS cihazının fotoğrafı.....	62
<b>Şekil 3.17.</b> Keithley 2612 A Multimetre ile I-V ölçümü için kullanılan düzenek.....	64
<b>Şekil 3.18.</b> Newport 818-R tek kristal Si ticari sensör (c-Si sensör) .....	64
<b>Şekil 3.19.</b> Aydınlatma şiddeti değiştirilerek hücre performansının test edilmesi için oluşturulan sistem .....	65
<b>Şekil 3.20.</b> Ortam sıcaklığı değiştirilerek hücre performansının test edilmesi için oluşturulan sistem .....	66
<b>Şekil 3.21.</b> Bir fotovoltaik hücrenin tek (D <sub>1</sub> ) ve çift (D <sub>1</sub> , D <sub>2</sub> ) diyotlu eşdeğer devresi.....	67
<b>Şekil 3.22.</b> Fotovoltaik hücrenin deneysel olarak elde edilen akım-gerilim karakteristiği ve direnç değerlerinin deneysel olarak belirlenmesi.....	68
<b>Şekil 3.23.</b> Geçici fotovoltaik ölçüm sistemi.....	75
<b>Şekil 3.24.</b> Anlık fotoakım ölçüm sistemi .....	76
<b>Şekil 4.1.</b> FTO kaplı camın absorpsiyon eğrisi.....	78
<b>Şekil 4.2.</b> FTO kaplı camın 10x10 µm boyutunda topografi (a) ve faz (b) görüntüleri.....	78
<b>Şekil 4.3.</b> FTO tabakasının 10x10 µm (a), 5x5 µm (b) ve 1x1 µm (c) ebatlarında 3 boyut analizi.....	79



<b>Şekil 4.4.</b> TiO <sub>2</sub> tabakasının 10x10 µm boyutunda topografi (a) ve faz (b) görüntüleri .....	80
<b>Şekil 4.5.</b> TiO <sub>2</sub> tabakasının 1x1 µm boyutunda topografi (a) ve faz (b) görüntüleri .....	80
<b>Şekil 4.6.</b> TiO <sub>2</sub> tabakasının 3 boyutlu analizi 10x10 µm (a), 5x5 µm (b) ve 1x1 µm (c) boyutunda.....	81
<b>Şekil 4.7.</b> TiO <sub>2</sub> tabakasına ait 100 nm (a), 200 nm (b), 500 nm (c) ve 1 µm (d) ölçeklendirmeye alınmış SEM görüntüleri .....	82
<b>Şekil 4.8.</b> FTO ntabakasının ve üzerinde TiO <sub>2</sub> tabakası oluşturulmuş FTO kaplı camın absorpsiyonu .....	83
<b>Şekil 4.9.</b> DSSC üretimi için hazırlanan P1 ve P2 boyar maddelerine ait karşılaştırmalı absorpsiyon grafikleri .....	84
<b>Şekil 4.10.</b> P1 boyasına ait GC-MS analizi sonucu .....	85
<b>Şekil 4.11.</b> P2 boyasına ait GC-MS analizi sonucu .....	86
<b>Şekil 4.12.</b> P1 (a) ve P2 (b) boylarıyla üretilen DSSC'lere ait karanlık-aydınlık durumlarındaki I-V grafikleri.....	87
<b>Şekil 4.13.</b> P1 ve P2 boylarıyla üretilen DSSC'lere ait akım-gerilim grafikleri .....	88
<b>Şekil 4.14.</b> P1 boyasıyla üretilen DSSC'den elde edilen akım-gerilim-güç grafiği .....	88
<b>Şekil 4.15.</b> P2 boyasıyla üretilen güneş pilinden elde edilen akım-gerilim-güç grafiği .....	89
<b>Şekil 4.16.</b> Güneş pili üretimi için hazırlanan boyar maddelerin asetonla reflüks prosesine maruz bırakılmadan önce (P1, P2) ve maruz bırakıldıktan sonraki (P1-A, P2-A) durumlarına ait karşılaştırmalı absorpsiyon grafikleri.....	91
<b>Şekil 4.17.</b> P1-A boyasına ait GC-MS analizi sonucu .....	93
<b>Şekil 4.18.</b> P2-A boyasına ait GC-MS analizi sonucu .....	94
<b>Şekil 4.19.</b> Galik asite ait GC-MS analizi sonucu .....	96
<b>Şekil 4.20.</b> P1-A (a) ve P2-A (b) boylarıyla üretilen DSSC'lere ait karanlık-aydınlık durumlarındaki I-V grafikleri.....	97
<b>Şekil 4.21.</b> P1 ve P1-A boylarıyla üretilen DSSC'lerden elde edilen güç-gerilim grafiklerinin karşılaştırılması .....	98
<b>Şekil 4.22.</b> P2 ve P2-A boylarıyla üretilen DSSC'lerden elde edilen güç-gerilim grafiklerinin karşılaştırılması .....	98
<b>Şekil 4.23.</b> Boyar maddeler asetonla reflüks prosesine maruz bırakıldıktan sonra üretilen DSSC'lerin verim değerlerinde elde edilen artışlar .....	99
<b>Şekil 4.24.</b> Boyar maddeye saf galik asit eklendikten sonra üretilen DSSC'lerden elde edilen I-V grafiklerindeki iyileşme.....	101

<b>Şekil 4.25.</b> 1000X büyütme altında TiO <sub>2</sub> (a), P2 boya adsorbe edilmiş TiO <sub>2</sub> (b), yalnızca galik asit adsorbe edilmiş TiO <sub>2</sub> (c) ve P4 (P2+1mg GA) boya adsorbe edilmiş TiO <sub>2</sub> (d) tabakalarının mikroskop görüntüleri.....	108
<b>Şekil 4.26.</b> TiO <sub>2</sub> (a), P2 boya adsorbe edilmiş TiO <sub>2</sub> (b), P4 (P2+1mg GA) boya adsorbe edilmiş TiO <sub>2</sub> (c) ve yalnızca galik asit adsorbe edilmiş TiO <sub>2</sub> (d) ve tabakalarına ait FTIR spektrumu.....	109
<b>Şekil 4.27.</b> Üretilen DSSC'ler ve c-Si güneş hücresinin farklı aydınlatma şiddetlerine bağlı verim grafikleri .....	111
<b>Şekil 4.28.</b> P1-A boyasıyla üretilen DSSC'nin farklı aydınlatma şiddetlerine bağlı gerilim-maksimum güç üretimi grafiği.....	114
<b>Şekil 4.29.</b> P2 boyasıyla üretilen DSSC'nin farklı aydınlatma şiddetlerine bağlı gerilim-maksimum güç üretimi grafiği.....	115
<b>Şekil 4.30.</b> P2-A boyasıyla üretilen DSSC'nin farklı aydınlatma şiddetlerine bağlı gerilim-maksimum güç üretimi grafiği.....	116
<b>Şekil 4.31.</b> c-Si güneş hücresinin farklı aydınlatma şiddetlerine bağlı gerilim-maksimum güç üretimi grafiği .....	118
<b>Şekil 4.32.</b> DSSC'ler ve c-Si sensörün farklı hücre sıcaklıklarına bağlı karşılaştırmalı V <sub>oc</sub> grafiği.....	120
<b>Şekil 4.33.</b> DSSC'ler ve c-Si sensörün farklı hücre sıcaklıklarına bağlı karşılaştırmalı I <sub>sc</sub> grafiği.....	122
<b>Şekil 4.34.</b> P1 boyasıyla üretilen DSSC'ye ait farklı hücre sıcaklıklarına bağlı performans parametreleri .....	123
<b>Şekil 4.35.</b> P1-A boyasıyla üretilen DSSC'ye ait farklı hücre sıcaklıklarına bağlı performans parametreleri .....	124
<b>Şekil 4.36.</b> P2 boyasıyla üretilen DSSC'ye ait farklı hücre sıcaklıklarına bağlı performans parametreleri .....	125
<b>Şekil 4.37.</b> P2-A boyasıyla üretilen DSSC'ye ait farklı hücre sıcaklıklarına bağlı performans parametreleri .....	126
<b>Şekil 4.38.</b> c-Si sensöre ait farklı hücre sıcaklıklarına bağlı performans parametreleri .....	127
<b>Şekil 4.39.</b> P1 boyasıyla üretilen DSSC'ye ait kırmızı atım sinyaline karşılık gerilim yükselişi .....	135
<b>Şekil 4.40.</b> P1 boyasıyla üretilen DSSC'ye ait kırmızı atım sinyaline karşılık gerilim yükselişi .....	136
<b>Şekil 4.41.</b> P1 boyasıyla üretilen DSSC'ye ait kırmızı ışık atımına ilk anda verilen pikin yükselme zamanı ve gecikme süresi grafiği .....	137

<b>Şekil 4.42.</b> P1-A boyasıyla üretilen DSSC'ye ait kırmızı atım sinyaline karşılık gerilim yükselişi .....	138
<b>Şekil 4.43.</b> P1-A boyasıyla üretilen DSSC'ye ait kırmızı atım sinyaline karşılık gerilim yükselişi .....	138
<b>Şekil 4.44.</b> P1-A boyasıyla üretilen DSSC'ye ait kırmızı ışık atımına ilk anda verilen pikin yükselme zamanı ve gecikme süresi grafiği .....	139
<b>Şekil 4.45.</b> P2 boyasıyla üretilen DSSC'ye ait kırmızı atım sinyaline karşılık gerilim yükselişi .....	140
<b>Şekil 4.46.</b> P2 boyasıyla üretilen DSSC'ye ait kırmızı atım sinyaline karşılık gerilim yükselişi .....	140
<b>Şekil 4.47.</b> P2 boyasıyla üretilen DSSC'ye ait kırmızı ışık atımına ilk anda verilen pikin yükselme zamanı ve gecikme süresi grafiği .....	141
<b>Şekil 4.48.</b> P2-A boyasıyla üretilen DSSC'ye ait kırmızı atım sinyaline karşılık gerilim yükselişi .....	142
<b>Şekil 4.49.</b> P2-A boyasıyla üretilen DSSC'ye ait kırmızı atım sinyaline karşılık gerilim yükselişi .....	142
<b>Şekil 4.50.</b> P2-A boyasıyla üretilen DSSC'ye ait kırmızı ışık atımına ilk anda verilen pikin yükselme zamanı ve gecikme süresi grafiği .....	143

## KISALTMALAR LİSTESİ

kJ	:	Kilo Joule
TW	:	Tera Watt
PV	:	Fotovoltaik
AT&T	:	American Telephone and Telegraph Company
cm <sup>2</sup>	:	santimetrekare
Ge	:	Germanyum
Ru	:	Ruthenium
TiO <sub>2</sub>	:	Titanyum Dioksit
NREL	:	Amerika Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı
ZnO	:	Çinko Oksit
V	:	Volt
I <sub>sc</sub>	:	Kısadevre Akımı
J <sub>sc</sub>	:	Kısadevre Akım Yoğunluğu
V <sub>oc</sub>	:	Açıkdevre Gerilimi
FF	:	Dolum Faktörü
UV	:	Morötesi
VIS	:	Görünür Bölge
IR	:	Kızılötesi/Infrared
GaN	:	Galyum Nitrat
DSSC	:	Dye Sensitized Solar Cell/ Boya Duyarlılaştırılmış Güneş Pili
GC-MS	:	Gaz Kromatografisi- Kütle Spektrometresi (Gas Chromatography-Mass Spectrometry)
H	:	Hidrojen
He	:	Helyum
<i>E</i>	:	Foton Enerjisi
<i>c</i>	:	Işık Hızı
<i>h</i>	:	Planck sabiti
$\lambda$	:	Dalgaboyu
AM	:	Hava Kütlesi (Air Mass)
GWh	:	Gigawatt Saat
kWh/kWp	:	Kilowatt saat/ Kilowatt olarak kurulu panel gücü
CIGS	:	CuInGaSe <sub>2</sub> / Bakır İndiyum Galyum Diselenid

CdTe	: Kadmiyum Tellür
e <sup>-</sup>	: Elektron
GaAs	: Galyum Arsenik
eV	: Elektronvolt
CdS	: Kadmiyum Sülfür
CIS	: CuInSe <sub>2</sub> /bakır indiyum diselenid
NADP <sup>+</sup>	: Nikotinamid Adenin Dinükleotid Fosfat
B	: Boyar Madde
B*	: Uyarılmış Haldeki Boyar Madde
CB	: İletkenlik Bandı
SnO <sub>2</sub>	: Kalay Oksit
PVD	: Fiziksel Buhar Biriktirme
Os	: Osmiyum
HCl	: Hidroklorik Asit
Cu	: Bakır
Ni	: Nikel
Al	: Alüminyum
C	: Karbon
Pt	: Platin
Pd	: Palladyum
Li	: Lityum
TBP	: 4-tert-bütilpiridin
NMBI	: N-metilbenzimidazol
$\eta$	: Enerji dönüşüm verimliliği
SiC	: Silisyum Karbür
PECC	: Fotoelektrokimyasal Hücre
NIR	: Yakın Kızılötesi
mM	: Milimolar
YAM	: Yüzey Aktif Madde
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
mL	: Mililitre
BMI	: M N'butyl-N' methyl-imidazolium iodide
AFM	: Atomik kuvvet mikroskobu
Si <sub>3</sub> N	: Silisyum Nitrat

GA	:	Galik Asit	
Se	:	Selenyum	
LUMO	:	Boş olan en düşük enerjili moleküler orbital (Highest Occupied Molecular Orbital)	
HOMO	:	Dolu olan en yüksek enerjili moleküler orbital (Highest Occupied Molecular Orbital)	
TCO	:	Şeffaf iletken oksit (transparent conductive oxide)	
ITO	:	Indiyum katkılı kalay oksit	
FTO	:	Flor katkılı kalay oksit	



# 1. GİRİŞ

İnsanın var olduğu ilk dönemlerden beri gelişimini sürdüren bilim tarihi insanların her türlü ihtiyaçlarını gidermek ve yaşam şartlarını iyileştirmek için yapılan çalışmalarla doludur. Günümüzde dünya üzerinde elektrik enerjisi ile henüz tanışmamış olarak yaşamını sürdüren toplumlar olmasına karşın teknoloji ve sanayinin gelişmesi, şehirleşme, artan nüfus ve insanların refah düzeyindeki artışın da bir sonucu olarak enerji, insanlık yaşamı ve ülkelerin kalkınması için zorunlu ve vazgeçilmez bir ihtiyaç haline gelmiştir. Bugün hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkelerde gelişmişlik düzeyinin kişi başına üretim için harcanan enerji ile ölçülmesi enerjiye olan talebi hızla arttırmaktadır. Bu sorunun üstesinden gelmek için çoğunlukla tercih edilen fosil yakıtların çevreye verdiği zarar özellikle son dönemlerde dikkat çekmeye başlamıştır. Çevre kirliliği, küresel ısınma, iklim değişiklikleri ve bunlardan kaynaklı hayvan ve bitki türleriyle birlikte insan sağlığında gözlenen olumsuzluklar ve ayrıca fosil yakıtların sınırlı rezervlere sahip olması nedeniyle tükenme tehlikesiyle karşı karşıya kalınması, enerji temininde yenilenebilir, ucuz ve temiz enerji kaynakları kullanılmasını zorunlu hale getirmektedir. Alternatif ya da yenilenebilir enerji kaynakları diye de adlandırılan bu enerji kaynakları rüzgar, okyanus, jeotermal, hidroelektrik, biyokütle, dalga ve güneş şeklinde sıralanabilir. Bilindiği üzere güneş dünya yaşamının kaynağıdır, aynı zamanda yeryüzündeki bölgesel ısı farklılıklarından kaynaklanan rüzgar, dalga gibi diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının hatta petrol, kömür gibi fosil yakıtların ve diğer enerji kaynaklarının da bir kısmının doğrudan bir kısmının ise dolaylı olarak kaynağı olmaktadır. Güneş tükenmez bir enerji kaynağı olmasının yanında fosil yakıtlar gibi herhangi bir çaba ya da maliyet gerektirmeden kendiliğinden yeryüzüne ulaşarak kolayca erişilebilen bir enerji kaynağı olmasıyla da göze çarpmaktadır. Güneşte gerçekleşen nükleer reaksiyonlar sonucu ortaya çıkan birim zamanda  $3.47 \times 10^{24}$  kJ değerindeki büyük enerjinin sadece az bir bölümü dünya yüzeyine ulaşmaktadır [1]. Güneşten gelen bu enerjinin 1 saat içinde dünya yüzeyine ulaşan kısmı dünya enerji ihtiyacını 1 yıl karşılayabilecek miktardadır [2]. Bu nedenle yalnızca güneşten dünyaya gelen enerjinin verimli bir şekilde kullanılmasıyla insanlığın enerji probleminin kolaylıkla hem de çevreye zarar vermeden çözülebileceği düşünülmektedir. Dünya çapında 6.5 milyar insanın günümüzde içinde bulunduğu yaşam şartlarını sürdürebilmesi için yaklaşık 13 TW enerji gerekmektedir. 2050 yılına kadar, mevcut yaşam biçimini korumak için 10 TW daha fazla temiz enerjiye ihtiyaç duyulacağı öngörülmektedir. Bu ihtiyaç yenilenebilir enerji kaynaklarından temin edilmek istenirse mevcut kapasite; hidrolojik kaynaklar için 0.5 TW, gel-git ve okyanus akımlarından elde edilebilecek enerji için 2 TW, jeotermal enerji kaynakları için 12 TW, küresel rüzgar enerjisi

için 2-4 TW ve güneş enerjisi içinse 120 000 TW'dır. Bu seçenekler arasında güneş enerjisi, bahsedilen enerji talebini karşılamak için en uygun seçenek olarak görülmektedir. Böyle bir kapasiteye rağmen, günümüzde güneş enerjisinden elde edilen enerji, toplam enerji talebinin % 0.01'inden daha az durumdadır [3].

Güneş enerjisinden doğrudan elektrik enerjisi elde etmek amacıyla günümüzde güneş panelleri kullanılmaktadır. Güneş enerjisinden elektrik enerjisi elde edilmesi pratik anlamda güneş ışınlarının etkisiyle pil içerisinde oluşan potansiyel farktan kaynaklanmaktadır ve bir nevi foton enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesidir ki bu da fotovoltaik sistemlerle mümkün olabilmektedir [4]. Fotovoltaik (photovoltaic-PV) terimi Yunanca'da ışık anlamına gelen "photos" ve elektriğin öncülerinden olan Alessandro Volta'nın keşfettiği, elektronların hareketini ifade eden "voltaic" kelimelerinin bir araya gelmesiyle ortaya çıkmıştır [5]. Genellikle "Fotovoltaik pil", "fotovoltaik hücre" veya "güneş pili" olarak nitelendirilmektedir [6]. Bu yapıların gelişim süreçleri ve başlıca çalışmalar dikkate alınarak pil teknolojisinin kronolojik gelişimi kısaca şu şekilde özetlenebilir;

**1839 yılında** fotovoltaik etkiyi ilk olarak keşfeden Fransız fizikçi Alexandre Edmond Becquerel [7, 8], asetik asit çözeltisinden oluşan elektrolit içerisine daldırdığı AgCl veya AgBr kaplı platin elektrotlarla ürettiği yapıda elektrolit üzerine düşen ışığa bağlı olarak elektrotlar arasındaki gerilimin değiştiğini gözlemlemiştir. Gözlenen bu fotovoltaik olay, güneş pili çalışmalarının temelini oluşturmuştur [7]. Bu aşamadan sonra fotovoltaik olay ve güneş pili üzerine yapılan çalışmalar daha fazla ilgi çekmeye başlamış, **1916 yılında** Robert Millikan [9] fotoelektrik etkiyi deneysel olarak kanıtlayarak Planck sabitiyle bağlantılı bir şekilde açıklamıştır.

Katı Se kristallerinde benzer bir fotovoltaik etki, katılarda ilk olarak Se esaslı elektrot ışığa tutulduğunda akım üretimi şeklinde gözlemlenmiş ve **1873 yılında** Willoughby Smith [10] Se üzerine çalışırken, Se çözeltisinin de fotovoltaik etki gösterdiğini tespit etmiştir. **1877 yılında** ise William G. Adams ve Richard E. Day yayınladıkları bir çalışmada [11] aktardıkları üzere, Se esaslı yapılar üzerine ay ışığı düştüğünde bir aktivite gerçekleştiğini tespit etmiştir. **1883 yılında** Charles Fritts [12] tarafından Se üzerine yapılan bir diğer çalışmada eritilmiş Se iki metal arasına sıkıştırılıp hızlıca soğutulularak, ilk "ince-film" diye tabir edilen fotovoltaik cihazlar oluşturulmuştur. Denediklerinin arasında en iyisi olduğunu belirttiği ve yakut kırmızısı cam Se diye adlandırdığı yapının çok ince bir tabaka halindeyken ışığı ilettiğini açıklamış ancak bu yapılarda enerji dönüşüm verimliliği düşük değerlerde kalmıştır. Bu durum ilk çalışıldığı dönemlerde fotovoltaik yapıların verim değerleri



açısından bir süre böyle devam etmiştir.

**1891** yılında Aleksandr Stoletov [13] dış fotoelektrik etkiyi matematiksel olarak açıklamış ve bu etkiyi temel alarak ilk güneş hücresini üretmiştir. Sonrasında fotoelektron enerjisinin ışın frekansıyla değiştiğinin gözlemlenmesi **1902** yılında Philipp von Lenard [14] tarafından gerçekleştirilmiştir.

**1905** yılında Albert Einstein [15] foton ile maddedeki elektron arasındaki etkileşimi açıklayarak 1921 yılında Nobel Fizik Ödülünü kazanmıştır.

Pochettino [16] **1906** yılında renksiz bir tür aromatik hidrokarbon olan Antrasenin fotoiletkenliği üzerine çalışmıştır. **1913** yılında William Coblentz [17] güneş hücresi patenti almıştır. Tekli kristal metal üretme tekniğinin geliştirilmesinden sonra, **1917** yılında bu metod, Jan Czochralski [18] tarafından tekli kristal Si üretimine adapte edilmiş ve bu teknik günümüzdeki kristal Si üretiminin temelini oluşturmuştur [19]. Bu gelişmenin ardından **1930'lu** yıllarda Fagen [20] metal-yarıiletken katmanlı güneş pillerini araştırmıştır.

Se üzerine yapılan çalışmaların yoğunlaştırılması gerektiği düşüncesiyle Bergmann [21] tarafından **1931** yılında Se filmler üretilmiştir. Bu filmler kullanılarak üretilen Se esaslı fotovoltaiik cihazlar bakır esaslı cihazlardan daha üstün ve ticari olarak en baskın ürün haline gelmiştir. **1939** yılında Nix ve Treptwo [22] Se ile aynı performansa sahip bir talyum-oksit hücre geliştirmiş ve bu yıllarda en verimli fotovoltaiik cihazlar metal kontaklı Se, Cu<sub>2</sub>O ve Tl<sub>2</sub>S yarıiletken soğurucu tabakalar olmuştur.

Daha sonra yapılan çalışmalarda, yarıiletken/yarıiletken arayüzeylerinin daha iyi verimlerle çalıştığı gözlemlenmiş ve *p-n* eklemine sahip bu hücreler ilk olarak **1948**'de Russel Ohl tarafından [23] Bell Laboratuvarında Si'nin yavaşça katılaştırılması ile elde edilmiştir. Ohl yaptığı bu çalışma neticesinde modern güneş hücrelerinin patentini almıştır. Yarıiletken teknolojisinin geliştirilmesi amacıyla **1950** yılında Gordon Teal [24], Czochralski'nin [18] uyguladığı metodu önce tekli kristal Ge, sonrasında da Si üretmek için geliştirmiş ve bugünküne çok benzer bir sistem haline getirmiştir. Bugünkü Si güneş hücrelerinin müjdecisi olan kristal silisyum malzeme **1954**'te Chapin ve ark. [25] tarafından Bell Laboratuvarlarında üretilmiş ve ilk modern Si güneş hücresinin keşfi duyurulmuştur. Bir kimyager olan Calvin Fuller ve bir fizikçi olan Gerald Pearson ve Chapin, Si güneş pillerinin özelliklerini geliştirme konusunda çalışırken arsenik ve bor üzerine yoğunlaşmış ve bu da yüzeyin yakınında kalan bir *p-n* kavşağı oluşumunu sağlamıştır. Tasarımda bazı iyileştirmeler yaptıktan sonra, "güneş pili" olarak adlandırdıkları bu sistem içerisinde birkaç

güneş pilini birbirine bağlayarak küçük bir oyuncak dönme dolap ve bir güneş enerjili radyo vericisini bu pilleri kullanarak çalıştırmışlardır. Bell Labs'ın 25 Nisan 1954'te New Jersey Murray Hill'de ilan ettiği bu hücreden elde edilen % 6'lık verim değeri o dönemde oldukça büyük bir ilgi uyandırmıştır. Bell laboratuvarlarında üretilmiş olan bu Si esaslı p-n eklem güneş pilleri Ulusal Bilim Akademisi Toplantısında sunulmuştur. O döneme ait en yüksek verimli güneş pili olmasına karşın, üretim maliyetinden dolayı ticari olarak uygulaması olmamış, sonraki yıllarda üretim maliyetini azaltmaya yönelik kristal Si güneş pilleri üzerine çalışmalar devam etmiştir [25, 26].

Fotovoltaik güç sistemleri için çok önemli olan uzay araçlarında kullanılan ilk sistemler bu yıllarda yapılmış ilk olarak **1954** yılında "Vanguard 1" uydusunda kullanılarak uydu teknolojisinde yer almıştır. Bu tarihten itibaren verim değerinin arttırılmasına yönelik çalışmalar yoğunluk kazanmış ve AT&T Assignors **1954** yılında "Solar Energy Converting Apparatus" [27] adıyla cihazın patentini almıştır. Bu aygıt güneş hücresi olarak adlandırılmıştır. **1958** yılında Hoffman Elektronik firması [28] da % 8 enerji dönüşüm verimliliğine sahip bir güneş hücresi ürettiğini duyurmuş ve bu tarihten itibaren neredeyse her uydu sisteminde ve uzay aracında güç üretimi için fotovoltaikler kullanılmıştır [29]. Aynı yıl U.S. Signal Corps Laboratories'de Mandelkorn [30] tarafından radyasyon zararlarına daha dayanıklı ve uzay şartları için daha uygun olan p-n Si güneş hücreleri üretilmiştir. Bu çalışmaların neticesi hemen hissedilmeye başlanmış ve NASA, 1 Ocak **1958**'de güneş panellerini, ilk uzay aracı olan Explorer'da kullanmıştır [31]. **1962** yılında Telstar haberleşme uydusunun enerjisi güneş hücreleri ile sağlanmış ve **1967** yılında Soyuz 1, güneş enerjisiyle çalışan ilk insanlı uzay aracı olmuştur. 1960'ların başlarında %15 değerine ulaşan güneş pili verimliliği ile fotovoltaik güç sistemleri o tarihten bu yana uzay çalışmalarının güvenilir bir kaynağı olmayı sürdürmüştür. **1963** yılında Sharp Corporation tarafından Si güneş hücrelerinden ilk ticari fotovoltaik modüller üretilmiştir [31]. 1960-1970 yılları arasında havacılık sektörü fotovoltaik hücrelerin gelişiminde öncü olmuştur. Si tabanlı güneş pillerinde Alferov, Andreev ve ark. [32] tarafından **1971** yılında ortaya çıkarılan, yansıma kayıplarını azaltmak için en üst yüzeyde kristalografik dokulaştırma (texturing) fikri yeni bir yöntem olarak ortaya çıkmış ve III-V grubu bileşiklerin kullanılması ile oluşturulan çoklu eklemlerden doğrultucu eklemler elde edilmiştir. Alferov'a Nobel ödülü [33] kazandıran bu sonuç, bugüne kadarki en önemli fotovoltaik cihazları doğurmuş ve bunlar bant aralığına uygun foton enerjisini verimli bir şekilde dönüştürebilen, birbirlerinin üzerine oluşturulmuş ikili ve üçlü eklem cihazları oluşturmuştur. Böylece ilk GaAs heteroyapısal güneş hücresi üretimi gerçekleştirilmiştir. Verim değeri anlamında oldukça başarılı sonuçlar elde edilen bu hücreler, gerek maliyet anlamında gerekse fabrikasyon sürecinin oldukça meşakkatli

olmasından dolayı çözülmesi gereken problemlere sahiptir.

Güneş pillerinin uzay şartlarında kullanılmasının yanı sıra elektriksel güç ünitesi olarak kullanımının günlük yaşamda da yaygın hale gelmesi için yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları 1954'lerde başlamış olsa da, 1973 yılındaki "1. Petrol bunalımı" ile ortaya çıkan enerji krizi sonucu çevre bilinci ve duyarlılığı gibi kavramların önem kazanmasının bir sonucu olarak daha ekonomik ve çevreci güneş hücreleri üretilmesi amacıyla bu konuda hem geniş kapsamlı hem de büyük bütçeli Ar-Ge projeleri Amerika, Avrupa ve Japonya'nın öncülüğünde başlatılmıştır [34].

**1984** yılında New South Wales Üniversitesi'ndeki Fotovoltaik Mühendisliği Merkezi tarafından % 20 verimli Si güneş hücresi üretilmiştir [31]. Elverişli görünümünün yanı sıra, sistemin yüksek üretim maliyeti gibi dezavantajları araştırmacıları daha ucuz yöntemler bulmaya teşvik etmektedir. Bu bağlamda araştırmalar polimer ve boyayla duyarlılaştırılmış yapay fotosentez modeli sistemler üzerinde yoğunlaşmıştır.

Her ne kadar Si esaslı güneş pilleri uzay çalışmalarında kullanılarak kendini ispatlamış olsa da bu yapılarda verimliliğin artırılması, yüksek maliyetinden dolayı alternatif arayışı sonucu çok daha az yarıiletken malzemeye ihtiyaç duyduğundan daha düşük maliyetle üretilebilecek ince film yapılar ve boyayla duyarlılaştırılmış güneş pilleri konusundaki çalışmalara hız verilmiş ve böylece ince film güneş pilleri üretilmeye başlanmıştır. İnce film güneş pillerinin getirdiği en önemli avantaj pahalı olan yarıiletken malzemelerin çeşitli kaplama yöntemleriyle taşıyıcı materyaller üzerinde mikron mertebesinde ince filmler halinde büyütülmesi ve böylece güneş pillerinin daha ekonomik hale gelmesidir. Bu bağlamda literatürde III. nesil güneş pilleri diye nitelendirilen polimer güneş pilleri ve boyayla duyarlılaştırılmış güneş pilleri üzerine yapılan akademik çalışmalar yoğunluk kazanmıştır. Bu tür güneş pilleri üzerinde ticarileştirme ve dolayısıyla da verim değerlerini artırmaya yönelik çalışmalar yoğun bir şekilde ilerlemektedir [34].

Günümüzde laboratuvar şartlarında güneş pilleri için enerji dönüşüm verimliliği % 46' ya kadar ulaşmıştır. Ancak bu verim değerlerinin elde edildiği sistemler maliyet ve üretim süreci anlamında çeşitli zorluklara sahip olmasının yanında büyük ölçekli üretimlerden gerek maliyet gerekse teknik açıdan uzaktır.

Ucuz ve kolay elde edilebilen malzemelerle üretilen organik güneş hücresi düşüncesi, organik fotovoltaik malzemelerin gelişimi ile ortaya çıkmıştır. Güneş hücrelerinde kullanılan organik malzemeler; duyarlılaştırıcı olarak kullanılan boyaları, pigmentleri, pil içerisinde

kullanılan elektrolitleri ve sıvı kristalleri içermektedir [35].

Organik güneş hücresi olarak DSSC'lerin en önemli özelliği, pahalı olmayan bileşenlerden oluşması ve aynı zamanda fabrikasyon sürecinde ekonomik ve kolay üretim teknolojilerinin kullanılabilmesi [36]. DSSC'lerin temelleri 1883'te atılmıştır. Vogel'in 1883'te [37] gümüş halid emülsiyonlarının, ışığın daha uzun dalga boylarına karşı duyarlılığının boya eklenerek genişletilebileceğini kanıtlayarak yalnızca mavi renk ve UV bölgeye duyarlı olan bu emülsiyonların spektral duyarlılığının bir boya ilavesiyle yeşil bölgeye kadar genişletilebileceğini keşfetmesinden dört yıl sonra, (1887) Moser [38, 39] gümüş halid elektrotlarda eritrosin boya kullanarak bu elektrotları Becquerel'in [7, 8], ürettiği hücrelere adapte etmiş ve ilk boyayla duyarlılaştırılmış Becquerel hücresini üretmiştir. Böylece boyayla duyarlılaştırılmış hücrelerin üretilmesine öncülük eden kişi 1887 yılında boyayla duyarlılaştırılmış fotoelektrokimyasal ilk hücreyi üretmiş olan Moser [38, 39] olmuştur. Fotoğraf filmlerinde kullanılan gümüş halidlerin yarıiletken doğasından kaynaklı olarak 460 nm'den daha uzun dalga boylarına yani görünür bölgenin bir kısmı ve kırmızı ışığa karşı duyarsız oluşu ve bu konuda yapılan çalışmalar, boya ile duyarlılaştırma işleminin temelini oluşturmuştur. Boyaların hem fotoğrafik hem de fotovoltaik anlamda etkili olduğu Namba ve Hishiki [40] tarafından 1965 yılında siyanin boyalar çinko oksit duyarlılaştırılmasında kullanılarak yeniden ele alınmış ve Chicago'da katıların fotoduyarlılaştırılmasına ilişkin uluslararası bir konferansta duyurularak bu sayede boyar madde ile sağlanan duyarlılıkla ilgili yeni ufuklar açılmıştır. Bu yıllarda duyarlılaştırma sürecinin enerji transferinden ziyade boyadan yarıiletken şarj transferinde etkili olduğu tespit edilmiştir [41, 42]. O tarihe kadar boya kullanılarak yapılan duyarlılaştırma işlemleri bir güneş hücresi üretiminden ZnO gibi yarıiletkenlerin fotoiletkenliğini arttırmak üzerine olmuştur. O dönemde yapılan çalışmalarda, ışık tek bir kristale bağlanan tek tabaka halindeki fotoduyarlılaştırıcı boya madde tarafından absorbe edildiğinden, ölçülen fotoakımlar oldukça düşük seviyelerde kalmıştır. Gerisher [43] 1968 yılında, bengal gülü ve siyanin boyalarını ZnO'yu duyarlılaştırmada kullanmış ve ZnO ve Pt elektrotların kullanıldığı bugünkü DSSC yapısına benzer sıvı elektrolit içeren bir fotogalvanik hücre üretmiştir. Daltrozzo ve Tributch [44], ZnO'ya Rhodamine B boyası tutturarak çeşitli denemeler yapmıştır. Tsubomura ve ark. (1976) [45] elektrot yüzey alanını arttırmak için gözenekli ZnO kullanmış ve 563 nm'de monokromatik aydınlatma altında % 1.5 enerji dönüşüm verimliliği elde etmiştir. 1977'deki çalışmalarında, Spitler ve Calvin [46], ZnO yerine yarıiletken tabaka olarak TiO<sub>2</sub>'yi kullanmışlardır.

Boyayla duyarlılaştırma yöntemi ile fotovoltaik enerji dönüşümüne olan ilgi, 1991 yılında

Michael Grätzel ve Brian O'Regan [47] tarafından École Polytechnique Fédérale de Lausanne araştırma merkezinde rutenyum bipiridil kompleks boyalarla duyarlılaştırılan gözenekli ince film nano kristal yapılı TiO<sub>2</sub> ile ürettikleri boyayla duyarlılaştırılmış güneş pilinden, % 7.1 enerji dönüşüm verimliliği elde ettiklerini duyurmalarından sonra hızla artmıştır. Grätzel ve ekibinin yaptığı ve DSSC alanında devrim niteliğinde olan bu çalışmada TiO<sub>2</sub> nanoyapılar ilk kez kullanılmış ve böylece elektrotlarda elde edilen yüzey alanındaki artış ile enerji dönüşüm verimliliği olağanüstü bir oranda artmıştır. Bu tarihten itibaren DSSC'ler için son birkaç yıl boyunca Rutenyum boya ile duyarlılaştırılmış TiO<sub>2</sub> yarıiletken elektrotlar yaygın şekilde kullanılmıştır. Grätzel'in çalışmalarından sonra bu tarz hücreler ucuz güneş hücreleri olarak anılmaya başlanmıştır. Sistemin maliyet avantajını sağlayan en önemli parametreler kullanılan malzemelerin çok fazla saflık ve temiz üretim şartları gerektirmemesi, genel bir laboratuvar ortamında hazırlanabilir olmasıdır [48]. Bu da Si tabanlı güneş pillerinin üretiminde zorunlu olan temiz oda teknolojisinin yarattığı maliyeti ortadan kaldırmaktadır [49, 50]. Öte yandan, kristal Si güneş pilleri ile karşılaştırıldığında DSSC'ler katı haldeki yarıiletkenlerden ve katı, yarı katı veya sıvı bir elektrolit arabiriminden oluşmakta ve bu yapı kolaylıkla oluşturulabildiğinden, DSSC'lerin hazırlanma süreci de nispeten basit olarak nitelendirilmektedir.

Boyayla duyarlılaştırılmış güneş pilleri üzerine yapılan çalışmalar **1993** yılında Nazeerruddin ve ark. [51] tarafından Ruthenium (Ru) esaslı bir duyarlılaştırıcı boya olarak kullanılan ve N3 diye adlandırılan; cis-di(thiocyanato)bis(2,2'-bipyridyl-4-4' dicarboxylate) ruthenium(II) boyanın keşfedilmesiyle yoğunlaşmıştır. **1995** yılında Grätzel ve ark. [52] Nazeerruddin'in yaptığı N3 boyasını kendi sistemlerine adapte etmiş ve TiO<sub>2</sub> nanokristal yarıiletkenler ve N3 boya kullanarak elde ettikleri boyayla duyarlılaştırılmış güneş hücrelerinin enerji dönüşüm verimini %10.8 yapmayı başarmıştır. Grätzel grubu tarafından üretilen hücreler için enerji dönüşüm verimi küçük aktif alanlarda (<1 cm<sup>2</sup>) % 10.8 olmasına rağmen daha geniş alanlarda (>1 cm<sup>2</sup>) bu verim değerinin % 8.23'e gerilediği ECN grubu (Hollanda Enerji Araştırma Merkezi) tarafından ölçülmüştür.

Ru kompleks boyalar, DSSC uygulamaları için duyarlılaştırıcılar olarak uygunluğu nedeniyle iyi bilinmektedir. Çeşitli araştırmacılar tarafından Ru'nun sentezlenen çeşitli kompleksleri arasında DSSC için yaygın olarak incelenen boyalar; *bis (tetrabutylamonyum) cis-di (tiyosiyano) -bis (4,4'-dikarboksi-2,2'-bipiridin) rutenyum (II)- N719* boya ve *triyosiyano- (4,4' ; 4''- trikarboksi-2,2': 6' ; 2'' - terpiridin) rutenyum (II)- siyah* boyadır [41]. Neredeyse tam dalga boyunda bir foton absorpsiyon bandına sahip olan ve şık emilimini kızılötesi bölgesine kadar uzatabilen N3, N719 ve siyah boya, Ru kompleks

boyaların en tipik örnekleridir, bunlara benzer bir başka boyar madde olan amfifilik Z907 boyası yüksek sıcaklık uygulamalarında daha yüksek kararlılık göstermektedir. Üstün foton yakalama özellikleri ve dayanıklılığının yanı sıra, bu boyaların önemli bir avantajı da, fotoelektrik yükün TiO<sub>2</sub>'ye enjekte edildiği esnada yük transfer geçişinde elektronun devre içinden akma süresinin rekombinasyon süresinden çok daha kısa olmasıdır [53].

**2004** yılında Wang ve ark. tarafından yapılan çalışmada [54], Nazeeruddin ve ark. tarafından üretilen [55] “siyah boya” olarak adlandırılan *tri(thiocyanato)-2,2,2-terpyridyl-4,4,4-tricarboxylate* ruthenium (II) boyar maddesi ile üretilmiş olan DSSC'nin 1000W/m<sup>2</sup> aydınlatma altında verim değeri % 10.5 olarak bulunmuştur. Aynı çalışmada enerji dönüşüm verimliliğinde, fotoelektrodu oluşturan TiO<sub>2</sub> tabakasına ait yüzey porozitesinin ve dolayısıyla da yüzey alanının doğrudan etkili ve hatta oldukça önemli bir parametre olduğu belirtilmiştir. Yüksek verimli boyayla duyarlılaştırılmış güneş pili geliştirmek için, güneş enerjisi dönüşüm verimliliğinin optimizasyonu için TiO<sub>2</sub> fotoelektrot morfolojisi incelenmiştir. İstenen nanoparçacık boyutu ve kalınlıkta 6 farklı yapıya sahip TiO<sub>2</sub> fotoelektrot tasarlanmış ve etkileri araştırılmıştır. Veriler çok katmanlı yapının, tek ve çift katmanlı yapıya göre daha üstün olduğunu göstermiştir. N719 boya ile duyarlılaştırılmış güneş piline ait enerji dönüşüm verimliliğinin, film yapısının tek katmanlıdan çok katmanlı yapıya dönüştürülmesiyle % 7.6'dan % 9.8'e kadar önemli ölçüde geliştirildiği gözlenmiştir. 1000W/m<sup>2</sup> aydınlatma altında % 10.2 değerindeki en iyi verimlilik, hücre yüzeyi üzerinde yansıma önleyici bir TiO<sub>2</sub> tabaka kullanılarak çok katmanlı bir yapı oluşturulmasıyla elde edilmiştir [54].

Yine **2004** yılında Fang ve ark. [56] tarafından, DSSC üretiminde arka elektrot olarak kullanılan FTO ince film üzerindeki Pt tabakası farklı kalınlıklarda hazırlanarak bu kalınlık değerlerinin pil performansına olan etkisi incelenmiştir. Pt tabakasının kalınlığı arttıkça güç dönüşüm veriminde bir artış gözlenmiş ve optimum kalınlık değerinin 415 nm olduğu belirtilmiştir. Pt tabakasının kalınlığının 415 nm olduğu durumda güç dönüşüm verimi % 5.18 olarak hesaplanmıştır.

**2005** yılında Fang ve ark. [57] DSSC'ler için esnek metal ve plastik alt tabakalardan oluşturulmuş arka elektrot türlerinin pil verimlilikleri üzerine etkinliğini araştırmıştır. Çalışmada paslanmaz çelik tabaka, nikel levha ve iletken plastik film üzerine kurulu olan arka elektrotlardan oluşan DSSC'lerden, iletken camla üretilmiş DSSC'ler ile kıyaslanabilecek değerlerde dönüşüm verimlilikleri elde edilmiştir. Paslanmaz çelik ile üretilen arka elektrodun iç direnci azaltarak DSSC'nin dolun faktörünü ve güç dönüşüm verimliliğini iyileştirme vasfına sahip olduğu belirtilmiştir. Esnek DSSC'lerde kullanılmak

üzere araştırılan bu metal ve plastik alt tabakalardan üretilmiş arka elektrotlar arasında polyester film ile üretilen elektrot daha düşük maliyetli çalışmalara elverişli olmasına rağmen en yüksek verim değerinin % 5.3 ile FTO kaplı altlık üzerine Pt kaplama yapıldığında elde edildiği gözlenmiştir. Paslanmaz çelik altlık, polyester film ve ITO-PEN film ile üretilen elektrotlarda iyi kararlılık gözlenirken, nikel levhanın düşük kararlılık gösterdiğini de kaydetmişlerdir. Bu alanda yapılan bir diğer çalışma [58] 2008 yılında Lee ve ark., tarafından gerçekleştirilmiştir. Arka elektrotların güneş pili üzerine olan etkisini incelemek için kaplama materyali olarak C ve Pt kullanılarak farklı iki tip arka elektrot hazırlanmış ve bu elektrotlarla boyayla duyarlılaştırılmış güneş pilleri üretilmiştir. Performans verileri incelendiğinde karbon kaplı arka elektrot ile üretilen pilden elde edilen enerji dönüşüm verimi % 7.56 iken platin kaplı arka elektrot kullanılarak elde edilen verim % 7.61 olarak tespit edilmiştir.

Işığa duyarlı boya veya TiO<sub>2</sub> ince film elektrodu üzerine yapılan araştırmalar, akademik çevrelerde kapsamlı bir çalışma başlatmıştır. Ön ve arka elektrotların revizyonu üzerine çeşitli nanoboyutlu yapıların oluşturulması, yeni tür boyalar ile katı, yarı katı elektrolitler üzerine yapılan çalışmalar halihazırda devam etmektedir. DSSC'lerle ilgili güncel çalışmalarda, DSSC'ler kimyasal sentetik boyalarla duyarlı hale getirilerek enerji dönüşüm verimliliği seviyesi % 14'e ulaştırılmıştır [59, 60]. Bununla birlikte, N3 ve N719 gibi Rutenyum (Ru) esaslı sentetik boyalar Ru'nun nadir bulunan, pahalı ve toksik bir metal olmasından dolayı yüksek üretim maliyetlerine ve çevre kirliliğine neden olması [48, 61] bu alanda daha ucuz ve güvenli boyalarla çalışmasını zorunlu kılmaktadır [62-66].

Buna karşılık, DSSC'lerde moleküler duyarlılaştırıcı olarak çeşitli bitkiler, meyveler, çiçekler ve yapraklardan elde edilen doğal boyaların kullanımına son zamanlarda büyük bir ilgi oluşmuştur [67, 68]. Özellikle son dönemlerde DSSC'lerde doğal, çevreye zarar vermeyen maddeler kullanılarak güneş pili elde etme trendi başlamıştır. Bu anlamda kullanılan meyve ve sebzeler ucuz ve kolaylıkla elde edilebilmesinin yanında bunlardan elde edilen doğal boyalar, geniş kullanılabilirlik ve basit hazırlama tekniklerine sahiptir dahası organikdir, böylece DSSC'lerin hem malzeme tedariği kolaylaşmakta hem de ekonomik ve çevresel avantajlar elde edilebilmektedir [68, 69]. Doğal boyalarla üretilen DSSC'lerin performans değerleri incelendiğinde verimlerinin maksimum % 14 civarlarında olduğu [70] Ru esaslı boyalara nazaran verimlilik ve kararlılıkları açısından her ne kadar istenilen seviyelere ulaşamamış olsa da üretilen ilk güneş pillerinden elde edilen sonuçlar ve bugün gelinen nokta göz önünde bulundurularak bu boyalar ile enerji dönüşüm verimliliğini arttırma ve hücre performansını optimize etme üzerine yapılan her bir çalışma basamağının

çok değerli olacağı unutulmamalıdır. Amerika Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) tarafından DSSC'lerin % 60 gibi yüksek bir enerji dönüşüm verimliliğine ulaşabilme potansiyeline sahip olduğu iddia edilmektedir [71]. Doğal boyalar üzerinde yapılan modifikasyon ve çeşitli ekstraksiyon yöntemlerinin denenmesi ve bu yapıların da çeşitli özelliklerinin iyileştirilmesi anlamında yapılan çalışmalar ve kronolojik olarak gelişimleri şu şekilde özetlenebilmektedir;

Bu yapıların oluşturulması aşamasında ilk olarak doğal fotosentezden esinlenilmiştir [48]. **1972**'de Tributsch tarafından klorofille duyarlılaştırılmış bir çinko oksit (ZnO) elektrotun geliştirilmesinden sonra doğal boyalarla duyarlılaştırılmış güneş pilinin tarihi başlamıştır [71]. Takip eden yıllarda, güneş enerjisi hücresi araştırmalarında cazip bir konu haline gelen DSSC'ler için başlıca ikilem, yüzeyde tek tabaka halinde bulunan boya molekülü katmanının yalnızca % 1'lik foton absorpsiyonu yapabilmesi olmuştur [36]. **1991**'de Grätzel ve ark. [49], ilk olarak TiO<sub>2</sub> nanoyapıları kullanarak geliştirdikleri DSSC'lerin ardından **1993** yılında [37-39], bu yapı içerisinde fotoduyarlılaştırıcı olarak o tarihe kadar fotosentezdeki etkinliğinden dolayı çoğunlukla tercih edilen klorofili kullanmıştır [72]. Kay ve Grätzel [72]'in yaptığı bu çalışmadan sonra fotoduyarlılaştırıcının yapı içerisindeki etkisi anlaşılacak aynı yıl (**1993**) Ru esaslı boya geliştirilmiş [51] ve DSSC üretiminde kullanılmıştır. Bu aşamadan sonra ilgi çoğunlukla sentetik boyalar üzerine kaysa da doğal fotoduyarlılaştırıcılar üzerine yapılan çalışmalar, Ru esaslı sentetik boyaların sahip olduğu dezavantajların tespitinden sonra tekrar gün yüzüne çıkmıştır. Özellikle 2006 yılından sonra bu konu üzerine yapılan çalışmalar hız kazanmıştır.

**1997** yılında Cherepy, Smestad ve Grätzel [73], boyar madde olarak böğürtlenin antosiyanin içeren doğal boyasını, metanol/asetik asit/ su (25:4:21) karışımı kullanarak ekstrakt etmiş ve bu boyayla üretilen güneş pilinin foto elektrokimyasal özelliklerini incelemiştir. Bu çalışmada ortalama büyüklüğü 10-50 nm olan TiO<sub>2</sub> nanoparçacık ile hazırlanan pasta FTO kaplı cam üzerine kaplanarak sinterlenmiş, iki elektrot arasına iyodür-triiyodür çifti içeren sıvı elektrolit doldurularak boyayla duyarlılaştırılmış güneş pili elde edilmiştir. 0.9 cm<sup>2</sup> aktif alana sahip olan pilden alınan ölçümler sonucunda 1000 W/m<sup>2</sup> aydınlatma altında V<sub>oc</sub> değeri; 0.45 V, J<sub>sc</sub> değeri; 2.2 mA/cm<sup>2</sup> olarak ölçülmüş ve enerji dönüşüm verimi % 0.56 olarak hesaplanmıştır (bkz. Ek1).

**2005** yılında Kashyouta ve ark. [74] tarafından yarıiletken tabaka olarak ZnO kullanılmış ve farklı iki tip boyar madde ile boyayla duyarlılaştırılmış güneş pilleri elde edilmiştir. Çalışmada biri ticari, diğeri doğal boyar madde olmak üzere; N3 (Ru) boyar maddesi ve



antosiyenin içeren böğürtlen boyası kullanılarak pil üretimi gerçekleştirilmiştir. Böğürtlen meyvesi sıkılarak hiçbir katkı maddesi kullanılmadan suyu doğal haliyle boyar madde olarak kullanılmıştır. Fotoelektrodu ZnO tabanlı ve arka elektrodu karbon kaplı güneş pilinde N3 boyar maddesi kullanıldığında alınan ölçümler açık devre gerilimi 0.6 V, kısa devre akım yoğunluğu 0.2 mA/cm<sup>2</sup> iken böğürtlen boyar maddesi kullanıldığında açık devre gerilimi 0.55 V, kısa devre akım yoğunluğu ise 30 µA/cm<sup>2</sup> olarak kaydedilmiştir (bkz Ek1).

**2006** yılında ise Polo ve ark. [75], yaptıkları çalışmada sarıçalı (*Calafate*) ve Brezilya üzümünden (*Jaboticaba*) elde edilen doğal boyar maddeleri kullanarak boyayla duyarlılaştırılmış güneş pili üretmiştir. Boyayla duyarlılaştırılmış güneş pilinden alınan ölçüm sonuçlarına göre; Brezilya üzümü boyar maddesiyle üretilen pilden elde edilen kısa devre akım yoğunluğu 9.0 mA/cm<sup>2</sup>, açık devre gerilimi 0.59 V ve dolun faktörü 0.54 olup sarıçalı boyar maddesiyle üretilen pilden alınan ölçüm sonuçlarına göre ise aynı değerler sırasıyla 6.2 mA/cm<sup>2</sup>, 0.47 V ve 0.36 olarak kaydedilmiştir (bkz Ek1).

Hao ve ark. tarafından **2006** yılında yapılan çalışmada [69], pilin enerji dönüşüm verimliliğinin kullanılan boyar madenin kimyasal yapısıyla birebir ilişkili olduğu açıklanmıştır. Doğal boyar maddelerde bulunan materyallerden antosiyenin molekülünün hidroksil ve karbonil gruplarına sahip olması nedeniyle TiO<sub>2</sub> yarıiletken yüzeye kolaylıkla bağlanabildiği fakat klorofil ve karoten içeren boyar maddelerin bu yapılardan dolayı yarıiletken oksit yüzeye tutunamadığı belirtilmiştir. Çalışmada doğal boyar madde olarak, siyah pirinç (black rice), kanarya kuş gülü (rosa xanthina), mercan ağacının kırmızı çiçeği (erythrina), kırmızıbiber (capsium), orkide çiçeği (variegata flower), ve yosun (kelp), alkol ile ekstrakt edilerek boyaları çıkartılmış ve elde edilen boyar maddelerin içerik tayini amacıyla UV spektroskopileri incelenmiştir. İnceleme sonucu kanarya kuş gülü ve siyah pirincin antosiyenin, mercan ağacı çiçeği ve kırmızıbiberin karoten, orkide çiçeği ve yosunun klorofil içerdiği tespit edilmiştir. Performans analizleri sonucunda en iyi fotovoltaiik etki siyah pirinç boyar maddesiyle üretilen pilden kısa devre akım yoğunluğu 1.142 mA/cm<sup>2</sup>, açık devre gerilimi 0.551 V ve dolun faktörü 0.52 şeklinde elde edilmiştir (bkz Ek1).

**2007** yılında doğal boyalar kullanılarak yapılan bir diğer çalışmada [76] Afrika bamyası (*Hibiskus Sabdariffa L.*) ve mavi bezelye çiçeğini (blue pea flower) doğal boyar madde elde etmek için kullanan Wongcharee ve ark. saf su ve etil alkol ile farklı sıcaklıklarda ekstrakt ettikleri doğal boyalar ve bunların karışımlarıyla ürettikleri güneş pillerinin performans analizlerini yapmıştır. Boyar maddeler 100 °C'de su ile ekstrakt edildiğinde enerji dönüşüm verimliliği tek başına rosella özü için % 0.37, yalnızca mavi bezelye ekstraktı için % 0.05 ve

ikisinin karışımı için % 0.15 olarak elde edilmiştir. Çalışmada ayrıca değişen ekstraksiyon sıcaklığı ve ekstrakt çözeltisinin pH değerlerinin etkileri de rapor edilmiştir. Rosella bitkisinden su ile hazırlanan boyanın 100 °C yerine 50 °C'de ekstrakt edildiği ve boya pH'sinin 0.1 M HCl çözeltisi kullanılarak 3.2'den 1.0'a ayarlandığı durumda bu boya ile üretilen DSSC'nin enerji dönüşüm verimliliği % 0.37'den % 0.70'e yükselmiştir (bkz Ek1). Ipomea bitkisinden ekstrakt edilen boya kullanılarak yapılan çalışmada [77] doğal boyaların pH seviyesinin enerji dönüşüm verimine etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada pH değeri düşmesiyle DSSC'lerin performansının açıkça yükseldiği savunulmuştur. pH değeri 3.0'dan 1.0'a düştüğünde, DSSC'lerin fotoelektrik dönüşüm etkinliğinin % 0.253'den % 0.318'e yükseldiğinin belirtildiği çalışmada düşen pH seviyesinin aynı zamanda doğal boya moleküllerinin stabilitesini de arttırabileceğine [78, 79] değinilmiştir (bkz Ek1 Tablo 8).

DSSC üretimi için kırmızı pancardan ekstrakt edilen boyar maddeyi kullanan Zhang ve ark. [80] (2008) fotovoltaik performans verilerinin, kısa devre akım yoğunluğu 2.42 mA/cm<sup>2</sup> ve açık devre gerilimi 0.44 V şeklinde olduğunu kaydetmiştir (bkz Ek1).

Calogero ve ark. [81] (2008) tarafından kırmızı Sicilya portakalı (red Sicilian orange) ve mor patlıcan (purple eggplant) doğal boyar madde eldesinde kullanılarak kırmızı portakal suyu ve patlıcan kabuğundan ekstrakt edilen boyalar ile DSSC üretimi gerçekleştirilmiştir. Alınan ölçüm sonuçlarına göre portakal suyu ile üretilen pil için kısa devre akım yoğunluğu 3.84 mA/cm<sup>2</sup>, açık devre gerilimi 0.340 V ve dolun faktörü 0.50 olup, patlıcan kabuğu boyar maddesiyle üretilen pil içinse aynı değerler sırasıyla 3.40 mA/cm<sup>2</sup>, 0.350 V ve 0.40 olarak elde edilmiştir (bkz Ek1).

Yukarıda bahsi geçen çalışmalardan elde edilen parametreler ve detaylı veriler Ek 1'de sunulmaktadır.

Aslen güneş pilleri ışığa duyarlı, nispeten büyük alanlı fotodetektörlerdir. Fotovoltaik cihazlar, ışık enerjisini yarıiletken materyallerde bir foton-elektron uyarma prosesi ile elektriğe dönüştürürler, bu özellikleri nedeniyle doğal fotodetektörler olarak nitelendirilebilmesinin yanında harici güç kaynakları olmadan, diğer bir deyişle kendi kendine çalışabilen fotodetektörler olarak da nitelendirilmektedir [82-85].

NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organization- Japan)'nun 2012 yılında başlattığı proje ile DSSC'lerin çeşitli üstün özelliklerinden yararlanılması ve DSSC teknolojisinin benzersiz alanlara uygulanması hedeflenmiştir. Yeni bir enerji kullanım teknolojisi olarak, açık/kapalı alanlar için sensör düğümleri ve güç kaynakları gibi

uygulamalara odaklanılmıştır. Ayrıca gerçek dış ortam şartlarında uzun vadeli kararlılık iyileşme ve düşük ışık şiddetinin var olduğu iç ortamlarda verimli bir şekilde çalışma, bu alanda hedeflenen temel görevlerden bir kaçıdır. Fotovoltaik cihazlar çeşitli faktörlerden etkilenmektedir, ancak IEC-61646 standardına dayanan çeşitli dayanıklılık testleri gerçekleştirilerek ortam şartlarına uygunlukları belirlenmektedir [86, 87]. Bu standarda göre yapılan testler ve elde edilen sonuçlar, DSSC'nin dünyada ilk kez 1000 saatlik ısı ve neme maruz kalma testi gibi zorlu dayanıklılık testlerini geçebileceğini göstermiştir [88]. Ayrıca bu özelliklerinin yanı sıra DSSC'ler, geleneksel Si güneş pillerinin en iyi performans değerlerini sürdürmediği çok düşük aydınlatma altında mükemmel performans ile çalışmaktadır ve bu da literatürde çok fazla ilgi çeken bir konudur [86]. Bu ilginin nedeni DSSC'ler üzerine yapılan araştırmalar sonucunda tespit edilen oldukça düşük ışık koşullarında gösterdikleri üstün başarıdır. Literatürde DSSC'lerin performansının ışığın geliş açısına veya ışığın miktarındaki düşmeye bağlı olarak azalma durumunun Si güneş pili ile karşılaştırılması bu bağlamda üzerine yoğunlaşılacak bir konu olmuştur. Bu yönleriyle boyayla duyarlılaştırılmış güneş hücreleri diğer güneş hücresi türlerine göre benzersiz özelliklere sahiptir.

Güneş ışığı spektrumunun yaklaşık yarısı kızılötesi bölgeye aittir. Kristal Si güneş pilleri veya CIGS güneş hücreleri için ışık absorpsiyon sınırı yaklaşık 1000 nm'dir. Diğer yandan, bir DSSC için bu değer kullanılan duyarlılaştırıcıya boyaya göre değişmekte ve örneğin N719 ve kırmızı boya için yaklaşık 775 nm, N749 ve siyah boya için yaklaşık 900 nm olarak belirlenmektedir. Ancak iç mekanlarda kullanımına bakıldığında floresan ve LED aydınlatma kaynakları daha çok ışık spektrumunun görünür bölgesinde ışık yaydıklarından dolayı DSSC'lerin kullanımı iç mekanlarda avantaj sağlamaktadır. Buna ek olarak, DSSC'ler iç mekan kullanımında veya düşük ışık koşullarında gösterdiği güç üretme kapasitesi ile araştırmalara konu olmaya başlamıştır. Yapılan araştırmalara göre DSSC'lerin Si güneş pillerinin aksine düşük ışık şiddetlerinde verim değerlerinin daha iyi olduğu görülmüştür. Tanabe yaptığı çalışmada [86] bir boyayla duyarlılaştırılmış güneş hücresi ile bir polikristal Si güneş pilini güneş ışığının direk gelmediği kuzey yönündeki bir duvar dibine konumlandırarak dış ortamda akım-gerilim ölçümü yapmıştır. DSSC modülünün güneş ışığının direkt olarak gelmediği bir kuzey duvarına yerleştirildiğinde bir polikristal Si güneş piline göre 1.4 kat daha büyük güç ürettiğini göstermiştir. Bu bağlamda DSSC'lerin sabah ve akşamları, bulutlu ve yağmurlu günlerde, bina duvarlarıyla gölgelenen konumlarda olduğu gibi sınırlı ışık koşullarında da avantajları olduğu düşünülmektedir. Yapılan testler sonucu bu tahmini destekleyici veriler elde edilmiştir. Testler sırasında bir DSSC ve aynı çıkış değerlerini sağlayan bir polikristal Si güneş pili, 30° eğimle güney yönüne yerleştirilmiş ve

DSSC'nin 1.2 kat daha yüksek güç ürettiği belirlenmiştir.

Kim ve ark. yaptıkları çalışmada [89] aynı akım yoğunluğu, gerilim ve dolun faktörü şartlarını sağlayacak şekilde  $I_{sc}$ : 44.5 mA,  $V_{oc}$ : 0.82 V, FF: % 75.7 olan DSSC'lerden 6 adet seri bağlayarak ( $I_{sc}$ : 44.5 mA,  $V_{oc}$ : 4.21 V, FF: % 71.2) bu modülü,  $I_{sc}$ : 43.5 mA,  $V_{oc}$ : 4.29 V, FF: % 78.8 olan ticari Si solar modülle dış ortam testlerinde karşılaştırmıştır. Laboratuvar ortamında yapılan testlerde, DSSC'nin ışık şiddetine bağlı üretim grafiği eğiminin ticari Si solar modülün eğiminden daha iyi olduğunu belirtmiş ve düşük ışık şiddetlerinde daha hassas olduğunu vurgulamışlardır. Dış ortam testlerinde ise DSSC modülünün bulutlu hava şartlarında Si solar modülden % 15 daha yüksek elektrik üretimi yaptığını tespit etmişlerdir. Bir bataryayı şarj etme testinde ise DSSC modülünün batarya şarj süresini Si solar modüle göre 4 saat azalttığını gözlemlemişlerdir.

Yahia [90] tarafından 2.5 ila 130  $mW/cm^2$  arasında değişen farklı aydınlatma yoğunluklarında DSSC'nin akım yoğunluğu-gerilim (J-V) karakteristikleri elde edilmiştir. Cihazın, fotodetektör uygulamalarını destekleyen daha düşük aydınlatmalarda yüksek hassasiyet gösterdiği tespit edilmiştir. Kısa devre akım yoğunluğunun, artan aydınlatma yoğunluğuyla birlikte doğrusal olarak arttığı buna karşın, açık devre voltajındaki artışın, artan aydınlatma yoğunluğu 50  $mW/cm^2$ 'ye ulaştıktan sonra yavaşlamakta olduğu bu durumun da, bu güneş pilinin dağınık ışıkta çalışabileceği anlamına geldiği belirtilmiştir [90, 91].

Si güneş pili, yapısal ve elektriksel özelliklerinden dolayı dağınık ışık veya düşük güçlü ışık altında çalışmamaktadır. Bununla birlikte DSSC, Si güneş pilleri ile karşılaştırıldığında, gün doğumu ve batımı gibi dağınık veya düşük güçlü ışık koşullarında iyi bir performansla çalıştığını ispatlamıştır. Bu karşılaştırma için [89] tarafından 5  $mW/cm^2$  ila 25  $mW/cm^2$  arasında aydınlatma sağlayan çeşitli ışık kaynakları kullanılmıştır. Laboratuvar ortamında ışık şiddeti 5 ila 25  $mW/cm^2$  arasında değiştirilirken pillerin ışık şiddetine bağlı akım yoğunlukları ölçülmüş ve sonuçlar DSSC modülünün çıkış değerinin düşük ışık şiddetlerinde Si solar hücreden daha yüksek olduğunu ve bu durumun ışığın geliş açısından bağımsız olduğunu belirlemişlerdir. DSSC modülü için akım yoğunluğunun eğimi, Si solar hücreden 2.7 kat daha yüksek olarak tespit edilmiş ve bu da DSSC'nin maksimum çıkış değerine Si solar hücreden çok daha hızlı bir şekilde ulaştığını göstermiştir. Gün boyu gerçekleşen ışınım şiddetleri simüle edilerek alınan veriler ışığında DSSC'nin çıkış gücünün Si güneş pilinden %15 daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu bağlamda DSSC modülünün gün boyunca Si modülünden daha fazla elektrik üretimi gerçekleştirdiği sonucuna ulaşılmaktadır. DSSC'nin

özellikle sabah saatlerinde ve öğleden sonra Si güneş piline göre avantajlı olduğu fikri benimsenmektedir.

Bir başka çalışmada [92] çeşitli elektrolit kompozisyonları için DSSC parametrelerinin değişimlerini 5-100 mW/cm<sup>2</sup> aydınlatma şiddetleri için incelemiştir. Diğer çalışmalarla benzer şekilde hücre performansı ve dolayısıyla da enerji dönüşüm verimliliğinin aydınlatma şiddeti azaldıkça arttığı gözlenmiştir.

Çeşitli fotovoltaikler arasında, DSSC'lere benzer bir konfigürasyona sahip olan, ancak boya adsorpsiyonu olmayan ve UV bölgedeki ışığı algılayabilen fotoelektrokimyasal hücre (PECC) yapıları DSSC'lerin [84, 85] bazı avantajlarına sahip olduğu için UV fotodetektör olarak kullanımları umut verici olarak nitelendirilmektedir [82, 85]. Ultraviyole (UV) fotodetektörler, iletişim, kimyasal/biyolojik algılama, çevresel izleme, uzaktan denetim, çeşitli görüntüleme teknikleri ile gelecekteki bellek depolama ve optoelektronik devreler de dahil olmak üzere çeşitli endüstriyel ve bilimsel uygulamalar için önerilmektedir [83, 93-95]. Yang ve ark. [84], omik bir kontak ile Schottky kontağı birleştirerek tek bir Sb katkılı ZnO nanoköprü yapısına dayanan ve % 2200'lük yüksek bir foto tepki hassasiyeti ve 100 ms'den daha kısa bir tepki hızına sahip kendi kendine çalışan bir UV fotodetektörü ürettiklerini rapor etmiştir. Bie ve ark. [83], ZnO/GaN nano ölçekli *p-n* eklem kullanan, kendi kendine çalışan bir UV fotodetektörü sergilemiştir. Bu UV fotodetektör, geleneksel ZnO fotodetektörden çok daha hızlı bir tepki süresi sunmaktadır. Kendi kendine çalışan UV fotodetektörler için gelişmeler, hızlı tepki süresi ve geniş ışık yoğunluğu aralığında ışık hassasiyeti ve geniş ölçekli, düşük maliyetli çevre dostu üretim sürecini hedeflemektedir [96]. PECC, bir güç kaynağı kullanılmadan UV ışığını algılamasının yanında basit ve çevre dostu üretim sürecini yarıiletkenlerin fotoiletkenlik etkisine dayanan geleneksel 1D nanoyapı UV fotodetektörlere göre daha fazla zaman cevabı özelliği bulundurmaktadır [82].

Verim /maliyet oranı diğer güneş pilleri ile mukayese edildiğinde en önde gelen DSSC'lerin bu alanda yapılan araştırmalardaki yeri tartışılmaz bir öneme sahiptir. Grätzel'in öncülüğünde 1991 yılından günümüze kadar farklı boyalar sentezlenip kullanılarak üretilen yapılarda önemli gelişmeler kaydedilmiştir. DSSC hücreleri henüz ticari olarak kullanılmakta olan Si tabanlı güneş hücreleriyle rekabet edememektedir. Fakat diğer güneş hücrelerinden, özellikle de Si esaslı yapılardan farklı olarak DSSC'lerin düşük ışık şiddetlerinde de diğer pillere göre yüksek verimle çalışabilmesi bu güneş pillerini literatürde ön plana taşımaktadır. Ayrıca yeni boyaların sentezlenmesi ve özellikle doğal boyalar ve bu boyaların iyileştirilmesi konusundaki çalışmalar hızla ilerlemekte olup, DSSC hücrelerinde

yüksek verimlere ulaşıldıkça kullanım oranlarının da hızla artacağı düşünülmektedir. Bu nedenle DSSC hücrelerinde istenilen verimlere ulaşabilmek için mevcut olan problemlerin çözüme ulaşması gerekmektedir. Dünyada çevreci enerji kaynaklarının, doğal malzemelerden sağlanması üzerine çalışmaların ve yönelimlerin devam etmesine paralel olacak şekilde, tez kapsamında üretilen güneş pillerinde kullanılan fotoduyarlılaştırıcı doğal boyalar bitkilerden ekstrakt edilmiştir. Bu durum hem maliyetin düşürülmesi hem de üretim kolaylığı sunmasının yanı sıra çevreci üretim yöntemleri de içerdiğinden tercih edilmiştir.

Bu çalışmada doğal boyalarla enerji dönüşüm verimliliğinin nispeten yükseltilmesi ve bunu sağlayan faktörlerin belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu nedenle çalışmada, GC-MS analizi ile elde edilen boya bileşenleri arasındaki farklılığın ve bu farktan kaynaklanan enerji dönüşüm verimliliği değişiminin kolay karşılaştırılmasını sağlamak için aynı bitki cinsinin farklı türlerine mensup olan iki çiçekten elde edilen boyalar tercih edilmiştir. Burada amaç yüksek enerji dönüşüm verimliliğine sahip yeni bir boyar madde üretmek değil, doğal boyalarda enerji dönüşüm verimliliğinde etkin olan materyalin tespitine yönelik bir çalışma yapmanın yanı sıra doğal boyalardan daha iyi verim değerleri elde edilebilmesi için yeni bir yöntem sunmaktır. Bu amaçla ekstraksiyon işleminden sonra DSSC'lerde duyarlılaştırıcı olarak kullanılan boya bileşenlerinin hücre performansları karşılaştırılmış, aralarındaki ilişki sorgulanmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, DSSC'lerde enerji dönüşüm verimliliğini arttırabilecek bir prosedür sunulmuştur. Ayrıca hücrenin bir fotovoltaiik cihaz olarak davranışlarını tanımlamakla birlikte sensör uygulamaları için çeşitli devre ve sistemlere entegrasyonunda yararlanılmak üzere literatürde kullanılan çeşitli elektriksel eşdeğer devre modelleme yöntemleri uygulanarak da incelenmiş ve cihazın ışık şiddeti, ortam sıcaklığı gibi farklı koşullardaki elektriksel davranışlarının, akım-gerilim cevabının, seri ve paralel direnç değerlerinin eldesinde ve tekli kristal yapılı ticari bir Si modülden aynı koşullarda elde edilen değerlerle kıyaslanmasında bu elektriksel eşdeğer devre modelleri kullanılmıştır.

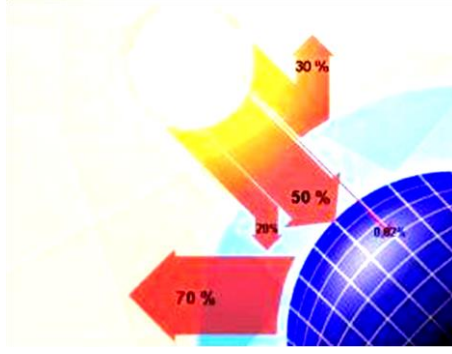
İfade edilen literatür doğrultusunda doğal boyalardan DSSC üretimi, üretilen bu DSSC'lerin çeşitli karakteristik parametreleri elde edilerek bu parametreleri boyar maddenin ve boyar madde içeriğinin nasıl etkilediği incelenmiştir. Ayrıca fotodedektör olarak da kullanılabilen bu yapıların, aydınlatma şiddeti ve pil sıcaklığı değiştirilerek çeşitli çalışma koşullarında incelenmesi ve bu açıdan da karakterize edilmesi hedeflenmiştir. Bu amaç kapsamında üretilen doğal boyalı DSSC'ler ile ticari olarak satın alınan tek kristal Si sensör karşılaştırılmıştır.

## 2. GENEL BİLGİLER

Bu bölümde güneş enerjisi, fotovoltaik yapılarda etkili olan ışınım standartları, fotovoltaik teknolojisi, DSSC'lerin çalışma prensibi, bu yapılarla ilgili temel tanımlar, performanslarını etkileyen parametreler ve DSSC'ler ile üretilen fotodetektörler konusunda bilgi verilmektedir.

### 2.1.Güneş Enerjisi

Dünyaya uzaklığı  $1.5 \times 10^8$  km ve dünyadan 110 kat büyük, 1.4 milyon km çapa sahip olan güneş, yüksek sıcaklık ve basınç değerlerinde, plazma halinde bir yıldızdır. Yüzey sıcaklığı ortalama  $6.000 \text{ }^\circ\text{K}$ 'dir. Güneşte sürekli olarak H atomlarının He atomlarına dönüşmesiyle gerçekleşen füzyon reaksiyonları, ortaya çıkan devasa enerjinin kaynağıdır. Bu reaksiyonlar sırasında 4.032 birim ağırlığa sahip 4 H atomu, 4.003 birim ağırlıktaki 1 He atomuna dönüşmekte ve güneşte bu reaksiyonlar hiç durmadan devam etmektedir. Her bir reaksiyon esnasında Einstein'in kütle-enerji teorisine göre kütleler arasındaki 0.03 birimlik fark enerjiye dönüşmektedir. Bu demektir ki; güneşte 1 saniyede 564 milyon ton H, 560 milyon ton He'ye ve kalan 4 milyon tonluk kütle farkı  $3.9 \times 10^{26}$  J değerinde bir enerjiye dönüşmektedir. Bu enerji ışınım şeklinde uzaya dağılmaktadır. Işınım, belirli bir sıcaklıkta bir ortam veya maddeden elektromanyetik dalgalar veya parçacıklar yayılması anlamına gelmektedir. Güneş uzaya elektromanyetik radyasyon şeklinde morötesi ile kızılötesi dalga boyları arasında, maksimum pikinin 500 nm civarında olduğu  $62 \text{ MW/m}^2$ 'lik bir spektrum ile enerji yaymakta ve bu enerjinin dünya atmosferine vardığı andaki ışınım değeri ortalama  $1376 \text{ W/m}^2$  ( $326.5 \text{ cal/m}^2$ ) olmaktadır. Dünyanın şeklinden dolayı güneş enerjisinin yeryüzündeki dağılımı farklılıklar göstermekte olup, dünyanın farklı bölgelerine gelen ortalama güneş enerjisi 0 ile  $1100 \text{ W/m}^2$  arasında değişmektedir. Güneşten dünyaya kadar gelen ışınımın tamamı yeryüzüne ulaşmamaktadır. Bu ışınımın % 30'u dünya yüzeyine varmadan atmosfer tarafından geri yansıtılırken % 20'si (kızıl ötesi kısmının çoğu bu orana dahildir) atmosferi geçerken karbondioksit, su buharı ve tozlar tarafından saçılmakta ya da absorbe edilmektedir. Böylece Şekil 2.1'de görüldüğü üzere atmosfere kadar ulaşan toplam enerjinin ancak % 50 kadarı atmosferi geçerek dünya yüzeyine ulaşmaktadır. Dünya yüzeyine ulaşan güneş enerjisi sonunda ısıya dönüşerek uzaya geri yayılmaktadır [96].



**Şekil 2.1.** Güneşten dünya yüzeyine ulaşan ışınım miktarı [97].

Güneşten gelip dünya yüzeyine ulaşan ışınımın % 45'i elektromanyetik spektrumun görünür bölgesini, % 46'sı kızıl ötesi bölgesini ve geri kalan % 9'luk kısmı ise mor ötesi bölgesini kapsamaktadır. Elektromanyetik dalga spektrumu frekans değerleri ve 0.1 ila 3 µm arasında değişen dalga boylarıyla birbirinden ayrılmış çeşitli bantlardan oluşmaktadır. Elektromanyetik ışınım uzayda dalga boyu ve frekandan bağımsız olarak sabit ışık hızı ile dalgalar halinde ilerlemektedir.

Işık tayfı da denilen güneş spektrumu; radyo, kızıl ötesi (infrared), görünür ışık (380-720 nm), mor ötesi, x ve gama ışınları şeklinde sıralanmaktadır. Elektromanyetik spektrumda dar bir bölgeyi kapsayan görünür ışık insan gözünün algıladığı ışınımdır. Güneş ışığı maddeler tarafından absorbe edilmekte veya yansıtılmaktadır. Işık madde ile bu şekilde etkileşim halindeyken parçacık gibi davranmakta ve bir noktadan diğerine dalga hareketi ile ilerlemektedir. Işık ışınlarını oluşturan parçacıklara ışınım enerji paketi anlamına gelen foton denmektedir [98]. Bir fotonun enerjisi ( $E$ ); ışık hızı ( $c$ ), Planck sabiti ( $h$ ) ve dalga boyuna ( $\lambda$ ) bağlı olarak;

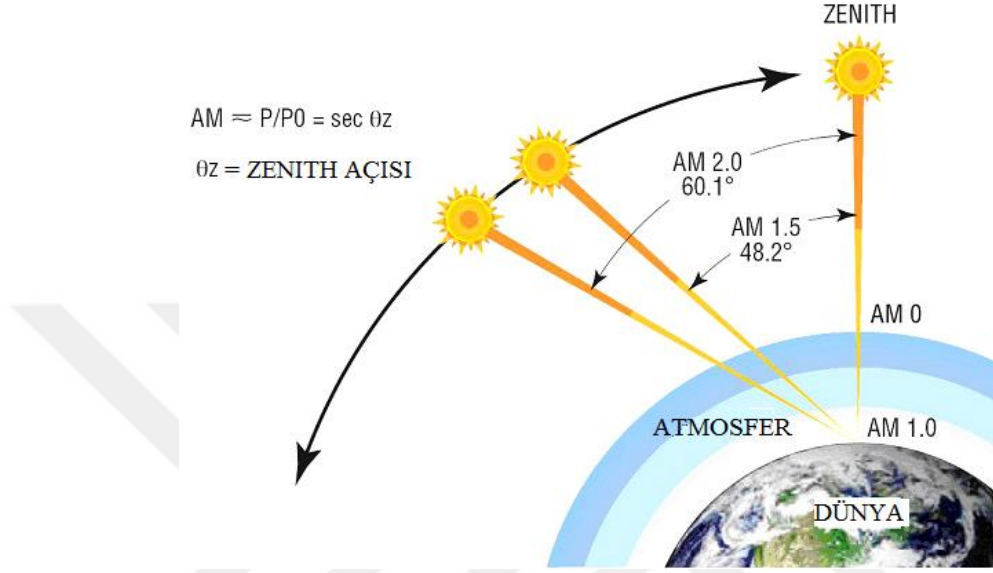
$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (2.1)$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

Güneşten gelen ışık ışınları atmosferden geçerek dünya yüzeyinde herhangi bir noktaya ulaşmaya kadar belirli bir yol izlemektedir. Bu ışınlar dünya üzerinde her noktaya, her saatte dik bir açıyla ulaşmamaktadır. Işık ışınlarının dünya yüzeyindeki herhangi bir noktaya dik olarak ulaşması halinde güneşten itibaren izlediği yola, o nokta için Zenith çizgisi denmektedir. Güneşin hareketiyle bu çizgiye göre sahip olduğu sapma açısı ise Zenith açısı olarak adlandırılmaktadır. Sahip olduğu sapma açısından dolayı güneş ışınlarının yüzeyde ulaştığı noktada ışınım şiddeti, dik gelmesi durumuna göre Zenith açısının kosinüsü oranında



azalmaktadır. Güneş ışınlarının belirli bir açıyla izlediği yolun, aynı noktaya güneş ışınlarının dik olarak ulaşması durumunda izleyeceği yola oranı hava kütlesi- AM diye tanımlanmaktadır. Şekil 2.2’de gösterildiği gibi solar radyasyonun atmosfer dışındaki değeri AM 0 (sıfır) olarak tanımlanmaktadır.



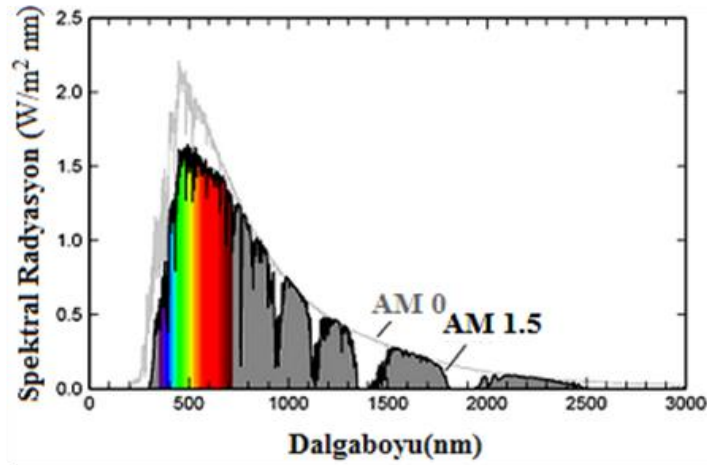
**Şekil 2.2.** Güneş ışığının geliş açısına bağlı olarak hesaplanan küresel hava kütlesi tanımları [99].

Solar radyasyonun dünya yüzeyine dik geldiği noktada oluşturduğu ışınım içinse AM 1 terimi kullanılmaktadır [99].  $\emptyset$  açısı gelme açısı (zenith açısı) olmak üzere

$$AM = \frac{1}{\cos \emptyset} \quad (2.2)$$

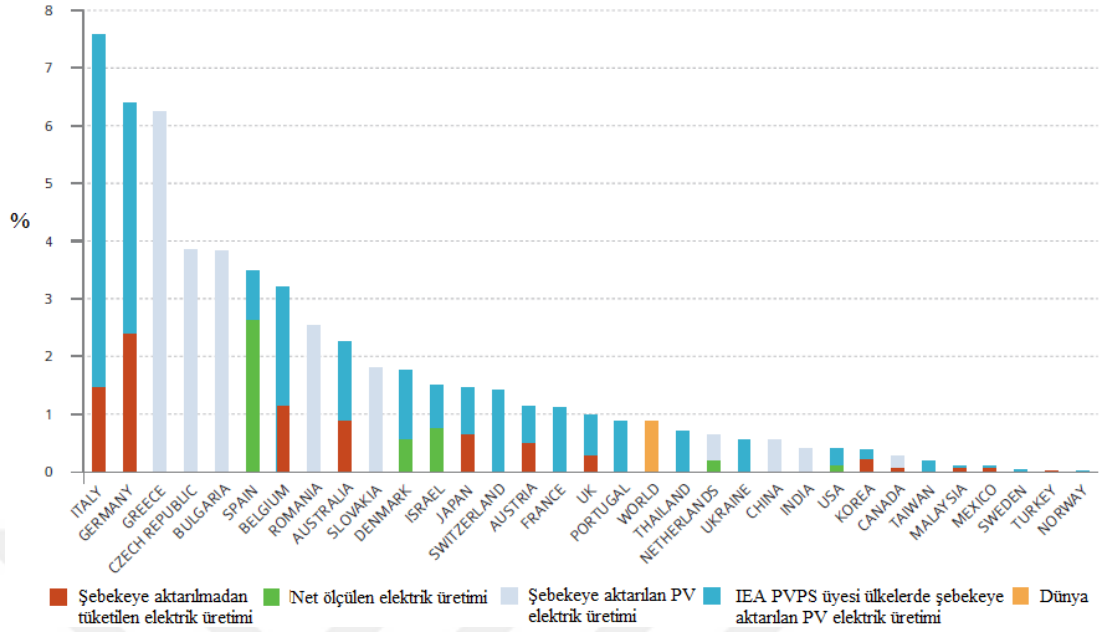
olarak tanımlanmaktadır.  $\emptyset = 48.2$  için  $AM = 1.5$  değerindedir. Bu ışınımın AM 1’den tek farkı yeryüzüne ulaşmaya kadar açısal ( $48.2^\circ$ ) eğiminden dolayı daha uzun bir optik yol izlemesi ve dolayısıyla ışınım şiddetinde bu açısal değerden kaynaklanan düşümedir. AM 2 içinse bu açısal eğim değeri  $60.1^\circ$ ’dir.

Solar simülörlerde ve herhangi bir ışık kaynağı ile yapılan güneş pili ölçümlerinde AM 1.5 şartları ( $1000 \text{ W/m}^2$  veya  $100 \text{ mW/cm}^2$ ) ve Şekil 2.3’te görülen spektrum esas alınmaktadır. Dolayısıyla ölçümlerin standart koşullar altında yapıldığından bahsedilebilmesi için bu şartların sağlanması gerekmektedir.



**Şekil 2.3.** AM 1.5 ve AM 0 değerleri için güneş spektrumu [100].

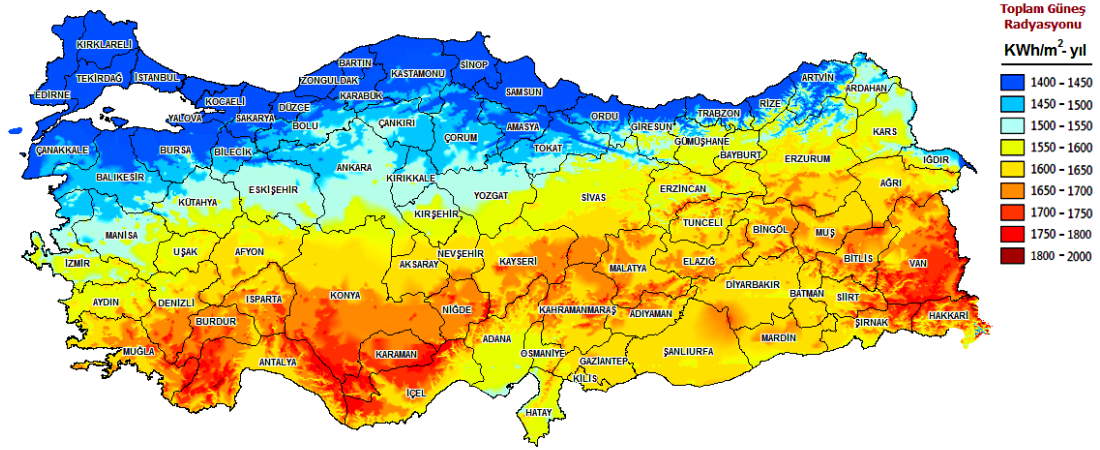
Dünya yüzeyine ulaşan güneş enerjisi miktar olarak ihtiyaç duyulan enerjinin çok daha fazlasını karşılamasına rağmen elektrik enerjisi elde edilmesi anlamında kullanımı ancak son yıllarda fotovoltaik teknolojinin gelişmesiyle popüler hale gelmiştir [101]. Şekil 2.4'te verilen IEA PVPS (International Energy Agency, Photovoltaic Power Systems Programme) üyesi olan ve olmayan ülkelerle ilgili hazırlanan raporda PV üretimin teorik olarak elektrik talebine nasıl katkıda bulunduğu belirtilmektedir. İtalya, 2013 yılındaki kurulumlarının ardından 2014 yılında elektrik üretiminin % 8'ine yakını PV ile üretmiş ve bu alanda ilk sıraya oturmuştur. Almanya % 6.3 değeriyle İtalya'yı izlemiştir. Yine bu raporda IEA PVPS ağı dışındaki üç ülke; Yunanistan (% 6 civarında), Bulgaristan ve Çek Cumhuriyeti'nin, 2013 yılı için elektrik talebinin % 3'ünden fazlasını üretme kapasitesine sahip olduğu açıklanmıştır. Belçika, PV ile elektrik enerjisinin % 3.5'ini üretmiş ve İspanya da yakın değerlerle % 4'ün altında kalmıştır. Romanya ve Avustralya'nın üretimi bu dönemde % 2'nin üzerindedir. Slovakya ve Danimarka % 2 sınırına yaklaşırken, İsrail, Japonya, İsviçre, Avusturya, Fransa ve Birleşik Krallık ancak % 1 değerini aşabilmiştir. Türkiye'nin de içinde bulunduğu diğer birçok ülke ise 2013 yılında daha düşük değerlerde üretim gerçekleştirmiştir [102].



**Şekil 2.4.** Dünya güneş enerjisinden elektrik üretimi ve Türkiye'nin üretimdeki yeri [102].

Yaklaşık 79 milyon nüfusu ile Türkiye, dünyadaki en hızlı büyüyen enerji piyasalarından biridir. Ayrıca, Türkiye'nin en büyük avantajlarından bir tanesi, Avrupa ve Ortadoğu arasında bir enerji merkezi olarak faaliyet göstermesidir. Ekonomik genişleme, kişi başına düşen gelir artışı, olumlu demografik eğilimler ve kentleşmenin hızlanması 2023 yılına kadar yılda yaklaşık % 6 oranında artması beklenen enerji talebinin itici gücü olmaktadır. 73.15 GW'lik elektriksel kurulu gücün ülkedeki artan talebi karşılaması için 2015 yılı sonundan 2023 yılına kadar 125 GW'ye ulaşması hedeflenmektedir. Halihazırda, elektriğin toplam kurulu gücü, kaynaklara göre ayrıştırıldığında % 57.3 termik (doğalgaz, kömür, sıvı yakıtlar vb.), % 35.4 hidroelektrik, % 6.1 rüzgar ve diğer yenilenebilir enerji kaynakları şeklindedir. Türkiye'nin toplam elektrik enerjisi tüketimi 264.137 GWh'ye ulaşırken toplam elektrik üretimi 2015 yılına kadar 259.691 GWh olarak gerçekleşmiştir [103].

Türkiye, güneş enerjisi yönünden zengin bir konuma sahiptir. 36°-42° kuzey enlemleri ve 26°-45° doğu boylamları arasında yer alması ve bir bölümünün güneş kuşağı adı verilen bölgeye dahil olması, ülkemizde güneş enerjisinden elektrik enerjisi elde etme çalışmalarının hızlandırılması için önemli bir nedendir. Ortalama güneş radyasyonu yılda 1.572 kWh/m<sup>2</sup> ve günde 4.2 kWh/m<sup>2</sup>'dir. Türkiye'nin Şekil 2.5'te görülen bölgelere göre toplam güneşlenme süresi yılda yaklaşık 2738 saat ve günde ortalama 7.5 saattir. Bir PV tesisinin enerji verimliliği potansiyeli bu şartlar altında 1300-1600 kWh/kWp (kilowatt saat/ kW olarak kurulu panel gücü)'dir [103].



**Şekil 2.5.** Türkiye'nin ortalama güneşlenme haritası [97].

Türkiye her yıl enerji ithalatına milyonlarca dolar ödemektedir. Bu tabloya rağmen güneş enerjisi, bu maliyeti orta ve uzun vadede olağanüstü boyutta azaltma potansiyeline sahiptir. Yenilenebilir enerjiden elektrik üretimi yöntemlerinden hidroelektrik, rüzgar, jeotermal ve diğerleri için büyük avantajlar da Türkiye'de bol miktarda bulunmakta ve uygun fiyat tarifeleriyle desteklenen politikaların önümüzdeki yıllarda artırılması beklenmektedir. Türkiye 2023 yılına kadar elektrik ihtiyacının en az % 30'unu yenilenebilir enerji kaynakları ile sağlamayı hedeflemektedir. Ülkemizin hedefleri arasında; 34 GW hidroelektrik enerjisi, 20 GW rüzgar enerjisi, 1 GW jeotermal enerji, 1 GW biyokütle (henüz resmi belgelere dahil edilmemiştir) ve 5 GW güneş enerjisi (fotovoltaik ve konsantre güneş enerjisi olarak) görülmektedir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) 2015-2019 Strateji Planını güncellemiş ve 3 Aralık 2014'te kamuoyuna açıklamıştır. Bu plana göre, Tablo 2.1'de verildiği üzere 2019 yılı sonuna kadar üretimde 3.000 MW'a ulaşılması hedeflenmektedir [103].

**Tablo 2.1.** ETKB tarafından güneş enerjisi için hedeflenen üretim kapasitesi [103].

Yıl	2015	2017	2019	2023
<b>Fotovoltaik Enerji Santrali (MW)</b>	300	1800	3000	5000

Bu değerlere göre üretim potansiyeli mevcut üretiminden çok daha yüksek olan ülkemizin güneş enerjisinden elektrik üretimine yöneliminin artırılması zorunlu bir hal almaktadır. Bunun sağlanabilmesi için teknolojik anlamda çeşitli yetkinliklere sahip olunması gerekmektedir. Örneğin günümüz şartlarında güneş enerjisi panellerinin fotovoltaik dönüştürücü kısmı ülkemizde üretilmemektedir. Bu amaçla kullanılacak olan güneş pili

sistemlerinin, üretimlerinin ülkemizde gerçekleştirilmesi esastır. Bu teknolojinin hızlı bir şekilde ilerlemesinin sağlanmasının yanı sıra konu üzerinde bilimsel birikim kazanılması için yoğun çalışmalara ve bu çalışmaların istihdamına ihtiyaç duyulmaktadır.

## 2.2. Fotovoltaik Cihaz Teknolojisi

Güneş enerjisi gibi tükenmez bir kaynaktan gelen enerjiyi kullanılabilir elektrik enerjisine dönüştüren ve bilinen pillerin aksine elektrik enerjisi üretmek için kimyasal reaksiyon yerine güneş enerjisini direkt olarak elektriğe çeviren cihaz ve sistemler fotovoltaik teknolojisini oluşturmaktadır ve bu yapılar güneş pili ya da güneş hücresi diye adlandırılmaktadır. Bu alandaki gelişmeler özellikle son yıllarda ilgi odağı haline gelmiştir. Bu cihaz ve sistemler çeşitlilik göstermekte ve maliyet-verim karşılaştırmaları yapılarak en uygun yöntemler tercih edilmektedir. Güneş pilinin ilk keşfinden bu yana bilim adamları güneşten elektrik enerjisi elde etmek için üretimi daha kolay, daha ucuz, daha verimli yöntemler keşfetmeye çalışmakta ve bu çalışmalar giderek artan bir hızla devam etmektedir. Bu nedenle güneş pillerinin evrimi oldukça hızlı gerçekleşmektedir. Ayrıca, yarıiletken elektroniki, organik elektronik veya nanoteknoloji gibi diğer teknolojilerdeki devrimler de bu çalışmalara entegre edilmektedir [104]. İlk güneş pilleri  $p-n$  eklemleri şeklinde iken günümüzde değişik tiplerde ve değişik özelliklere sahip güneş pilleri mevcuttur [104, 105]. Düşük karbon kaynaklı bir toplum oluşturma hedefini gerçekleştirmede fotovoltaiklerin, gelecekteki enerji üretimi için önemli bir teknoloji olması beklenmektedir. Günümüzde ticarileştirilmiş olanlara ek olarak çeşitli yeni tip güneş pilleri geliştirilmektedir. Örneğin, amorf-Si güneş pilleri gibi ince film güneş pilleri, CuInGaSe<sub>2</sub> (CIGS) ve CdTe hücreleri gibi bileşik yarıiletken güneş pilleri bunlar arasında sayılmaktadır. Boyayla duyarlılaştırılmış güneş pilleri, 1991'de Grätzel'in ilk raporundan bu yana yeni çevre dostu fotovoltaik teknolojisi adaylarından biri olarak aktif olarak geliştirilmekte ve üzerine yapılan çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır [47]. PV sistemleri yapılış şekline, yapımı esnasında kullanılan malzemelere ve teknolojik gelişmelerine göre üç nesil olarak kategorize edilmiştir [104, 105];

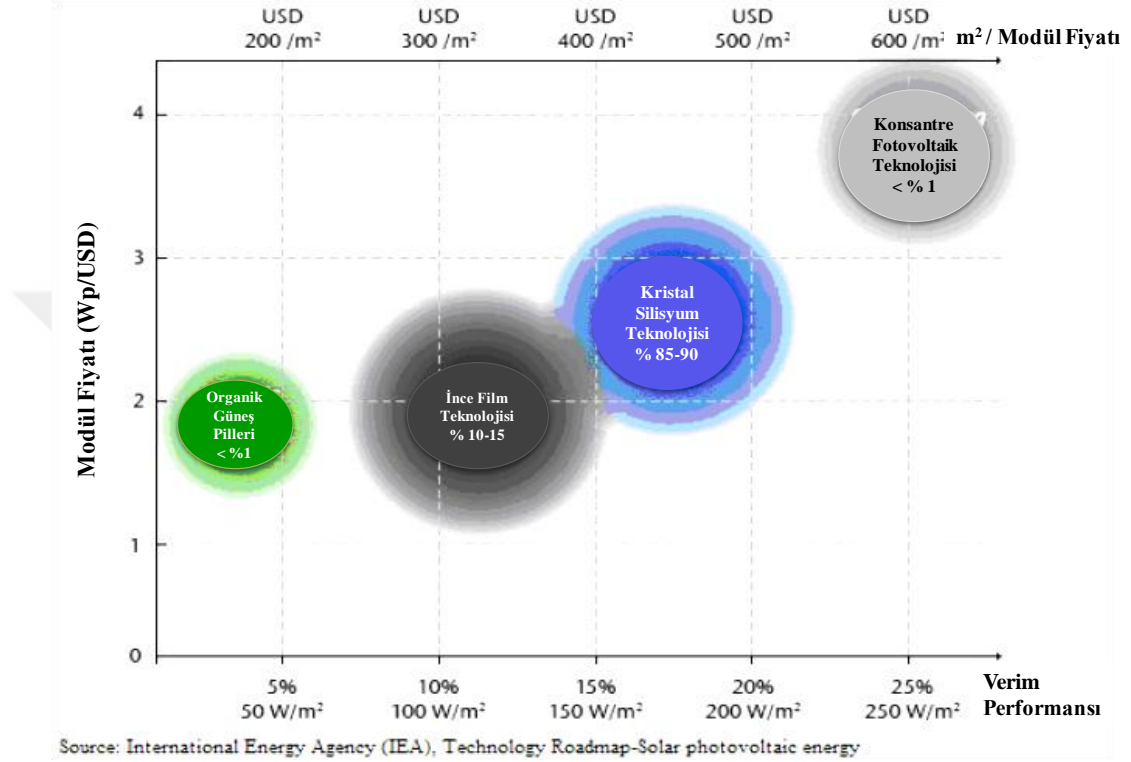
1. nesil fotovoltaik cihazlar;  $p$  ve  $n$  tipi yarıiletkenlerden oluşan heteroeklem yapıdaki hücrelerdir. Bu tip fotovoltaik cihazlar  $p$  ve  $n$  tipi yarıiletkenlerin bir araya getirilmesiyle oluşturulan diyot yapısı içerisinde  $p$  ve  $n$  tipi malzemelerin birleşme bölgesi olan ve eklem diye adlandırılan bölgede foton etkisi ile elektron ( $e^-$ ) - delik (+ yüklü tanecikler) çiftlerinin oluşturulması ilkesine göre çalışmaktadır. Yarıiletken tarafından absorbe edilen fotonların etkisiyle  $n$  bölgesinde serbest hale gelen  $e^-$ 'lar dış devre üzerinden  $p$  bölgesine doğru hareket etmekte ve buna karşılık  $p$  bölgesindeki delikler da  $n$  bölgesine doğru ilerlemektedir. Dolayısıyla cihaz içerisinde oluşan kutuplaşmadan dolayı bir  $e^-$  akışı gerçekleşmekte ve bu

da elektrik akımının oluşmasını sağlamaktadır. Şu ana kadar en yüksek enerji dönüşüm verimliliği değerleri bu nesile dahil olan cihazlarla elde edilmiştir [104]. Bu sınıfa ait güneş pilleri arasında yaygın olarak; tek (monokristal) kristal Si, çoklu (polikristal) kristal Si ve galyum arsenik (GaAs) yapılı güneş pillerine rastlanmaktadır [106].

Tek kristal Si, çok yavaş büyütülmesi yöntemiyle elde edilen düzenli kristal yapısından dolayı en pahalı Si türüdür. Yavaş katılaştırmanın sonucu olarak tek kristal Si en homojen yapıya ve öngörülebilir davranışa sahip Si türü olarak ortaya çıkmaktadır [107]. Çoklu kristal Si daha hızlı büyütülme prosesine sahiptir. Dolayısıyla tek kristal Si'den farklı bir şekilde kristallerin yönü rastgele olmakta ve kristal yapıdaki bu farklılık nedeniyle cihaz verimleri tek kristal Si'den daha düşük elde edilmektedir. Dolayısıyla bu nesil fotovoltaiklerin üretiminde tek kristal Si daha çok tercih edilmektedir. Si esaslı güneş pillerinin dezavantajı, ilgili üretim sürecinin diğer türlere göre nispeten karmaşık ve masraflı kalmasıdır [108]. Dünya kabuğunun % 25.7'sini oluşturan ve oksijenden sonra en zengin ikinci element olan Si için gerekli hammaddenin bol miktarda arzı var gibi görünse de Si ile çalışmanın en büyük dezavantajı, doğada oksitler (kum, kuvars, çakmaktaşı) ve silikatlar (granit, asbest, kil) olarak bulunmasıdır. Bu nedenle, bu elementi saf ve kristal hale getirebilmek için malzemenin işlenmesi ve bunun için de pahalı temiz oda koşullarının kullanılması zorunlu olmaktadır. Yüksek verim değerlerine sahip olması, dayanıklı yapısı ve toksik olmaması gibi nedenlerle güneş pili pazarının hakimi durumunda olsalar ve hatta enerji talebini karşılamak için ideal gibi görünseler de, yüksek üretim ve kurulum maliyetleri bu tip cihazların en büyük dezavantajı haline gelmiş ve dolayısıyla fotonları daha yüksek verim ve daha düşük maliyetle enerji üretiminde kullanmak için yeni sistemler geliştirilmesi ihtiyacı doğmuştur [109]. Bu durumun bir başka nedeni ise tek kristal Si güneş pillerinin maliyetini amorti etme süresinin 4-6 yıl kadar olması ve özellikle dış ortam şartlarının da etkisiyle 20 yıllık bir kullanım süresi içerisinde verim değerinde gözlenen yaklaşık % 7'lik kayıptır. Çoklu kristal Si güneş pillerinin maliyetini amorti etme süresi 2-4 yıl civarında ve yine 20 yıllık kullanım süresinde verim kaybı ortalama % 14 olarak gözlenmektedir [110].

Bant aralığı oda koşullarında 1.4 eV civarında olan Galyum arsenik (GaAs) ile üretilen güneş pillerinde ise oluşturulan yapı, ışığın absorbe edilebilmesi için gereken mesafenin daha uzun olduğu Si yapılara nazaran daha incedir. Daha ince ve dolayısıyla daha az malzeme gerektiren bu uygulamada maliyetin düşmesi beklenirken Ga elementinin yeryüzünde Si kadar yoğun bulunmaması ve yine kristal hale getirilmesi işlemlerinden kaynaklanan yüksek maliyetten dolayı güneş pili yapımında, Si'ye oranla daha az tercih edilmektedir. Yüksek sıcaklık ve radyasyon ortamlarında daha dayanıklı ve kararlı

olmasından dolayı GaAs güneş pilleri, daha çok uzay uygulamalarında tercih edilmektedir [111]. GaAs yapılı güneş pilleri için üretim prosesinin zor ve sıkıntılı, maliyetinin ise Şekil 2.6'dan da görüleceği üzere diğer tüm yapılardan oldukça yüksek olması verim/ maliyet oranlamasını oldukça aşağı çekmektedir.



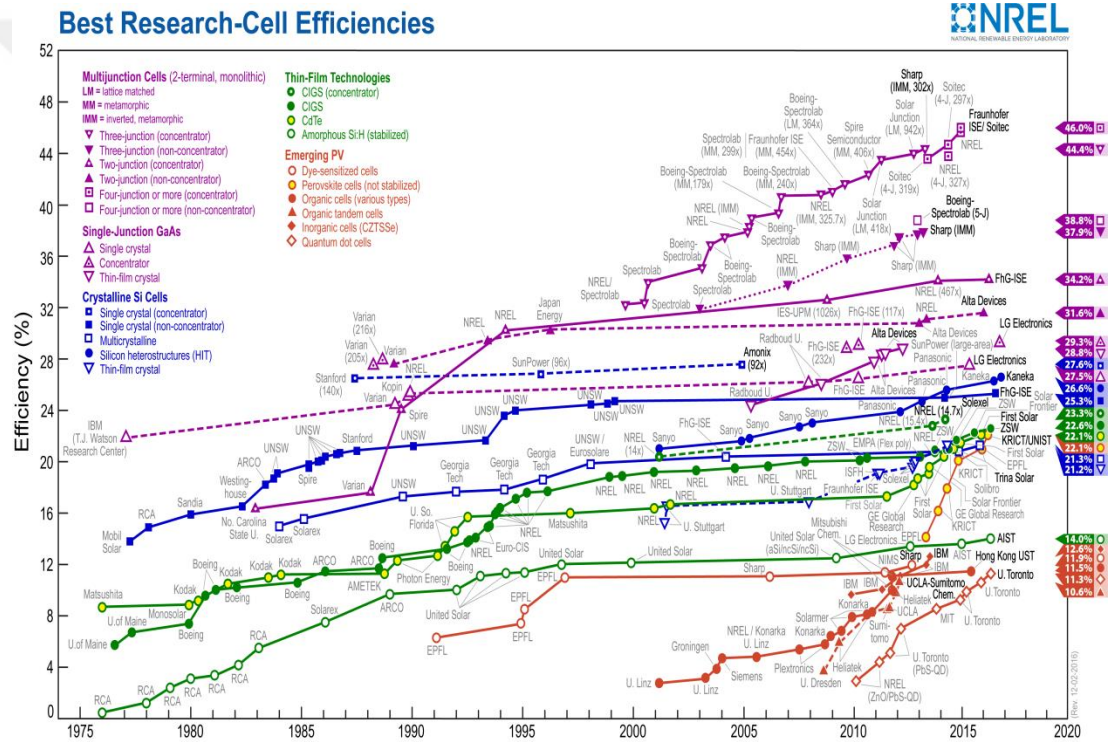
Şekil 2.6. Çeşitli güneş pili teknolojileri için maliyet-verim kıyaslama tablosu [112].

Ayrıca bu nesildeki fotovoltaik cihazlardan özellikle Si esaslı olanlar, güneş enerjisi dönüşümünde kalın bir aktif tabaka gerektirmektedir ve bu da geniş çaplı üretimlerde cihazların maliyetlerinin ekstra yüksek olmasına neden olmaktadır. Bu nedenlerden dolayı bir sonraki nesil fotovoltaik cihazların üretimi gerçekleştirilmiştir.

2. nesil fotovoltaik cihazların üretilmesindeki amaç üretimde ince filmlerin kullanılması yoluyla sarfedilen malzeme miktarını ve dolayısıyla da üretim maliyetini azaltmaktır [113]. İnce filmlerden oluşan ikinci nesil cihazlar amorf Si, kadmiyum sülfür (CdS), kadmiyum tellür (CdTe), bakır indiyum diselenid-CIS (CuInSe<sub>2</sub>) ve bakır indiyum galyum diselenid-CIGS (CuInGaSe<sub>2</sub>) ince film yapıdaki fotovoltaik cihazları kapsamaktadır [114-117]. Bu ince film yapılar fiyatı önemli ölçüde düşürmekle birlikte verimlilik anlamında tek kristal Si esaslı fotovoltaik cihazlarla kıyaslanabilir ve pratik olarak uygulanabilir durumda değildir [37]. Güneş spektrumundan maksimum dönüşümü elde etmek için gereken bant aralığı

değerine en yakın olan 1.5 eV'nin elde edilmesi amaçlanarak üretilen bu yapılar için bant aralıkları; CdTe için 1.5 eV, CdS için 2.4 eV, CIS yapılar 1.4 eV'dan daha düşük ve CIGS yapılar 2.3 eV'dir.

1. ve 2. nesil güneş pillerinde Amorf Si (a-Si), çoklu kristal Si ve tek kristal Si olmak üzere çeşitli teknik özelliklere ve kimyasal yapıya sahip üç tür Si kullanılmaktadır. Bu nesil güneş pillerinin hammaddeleri içerisinde anılan a-Si yapısında atomların diziliminde uzun menzilli bir düzen yoktur. Bazı atomların doymamış bağları bulunmakta, bu da istenmeyen elektriksel davranışlara neden olmaktadır. Şekil 2.7'de çeşitli fotovoltaik yapılar ve bu yapılarla elde edilmiş olan verim değerleri gösterilmektedir.



Şekil 2.7. National Renewable Energy Laboratory of America tarafından hazırlanan araştırmalara konu olmuş güneş pili yapıları ve enerji dönüşüm verimi istatistikleri [118].

Hem 1. hem de 2. nesil hücreler ön yüz aydınlatmasının dik olarak yüzeye gelmesini gerektirdiğinden güneşin konumunu takip etmek için hareketli güneş takip sistemleri ile desteklenme ihtiyacı duymakta veya güneş ışınlarını dik olarak karşılayabilecek şekilde PV parkları diye tanımlanan güneş enerjisi tarlalarında ya da bina çatılarında kurulmaları gerekmektedir [104]. Bunun haricinde 2. nesil hücrelerin kullanım alanları düşük verimlerinden dolayı genellikle hesap makinası veya saat gibi düşük elektriksel güç gerektiren cihazlardır [119].



Şimdilerde hem yüksek verim değerleri sağlayabilen hem de uygun bir maliyetle elde edilebilen üçüncü nesil cihazlar üzerine çalışmalar yoğunlaştırılmaktadır [37].

3. nesil fotovoltaiik cihazlar, nanoteknoloji üzerine kuruludur. Bu tip fotovoltaiik cihazları, organik güneş pilleri ve DSSC'ler oluşturmaktadır [106]. Özellikle iletken polimerlerin üretilmesinden sonra geliştirilen bu yapılar tamamen organik olan veya organik-inorganik materyallerin karışımı olan nano-yapılandırılmış malzemelerden [109] üreilmeye başlanmıştır. Bu nedenle, bu nesil içerisine dahil olan yapılar, sınırsız sayıda malzeme kombinasyon yeteneğini ve esnek tasarım kapasitesini [120], düşük maliyetli ve kolay seri üretim fırsatı ile birleştiren yapılar durumundadır. Bu teknolojilerin amacı ucuz, yaygın ve toksik olmayan materyallerin kullanılması yoluyla iyi bir performans sağlamaktır. Bu bağlamda DSSC'ler, güneş enerjisinin elektriğe dönüşümü için en değerli üçüncü nesil PV teknolojilerinden biri olduğunu kanıtlamıştır [105]. Bu tip hücreler düşük verimlilik kayıtlarına sahip olmasına rağmen Şekil 2.7'de görüldüğü üzere organik güneş pilleri ve DSSC'lerin son yıllardaki verimlilik artışı bu alanda yapılan çalışmalar için umut vaat ediyor görünmektedir [104].

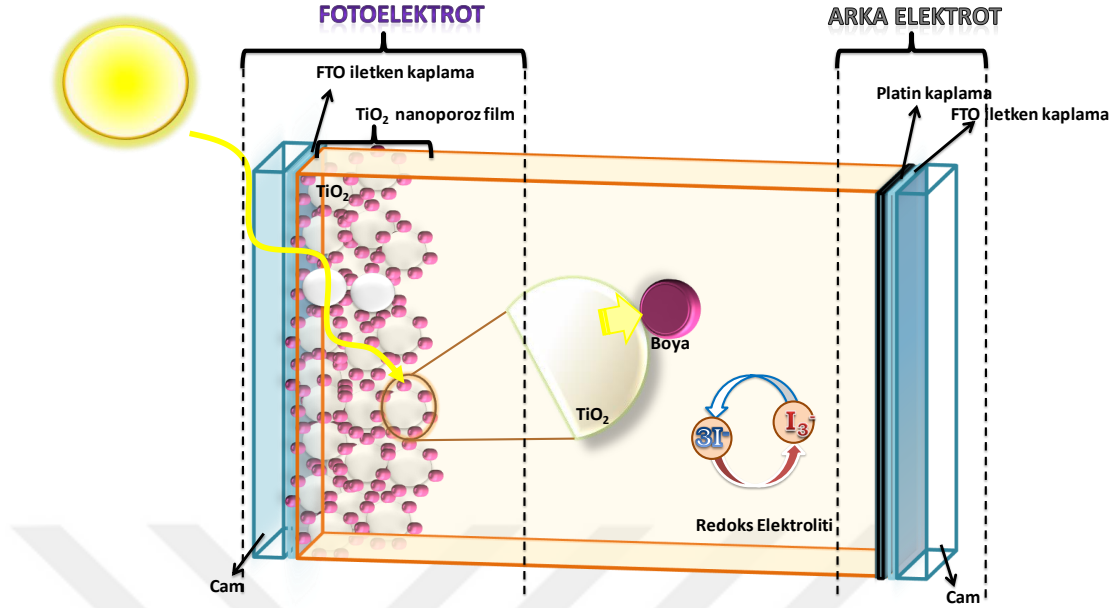
### 2.3. DSSC Yapısı ve Çalışma Prensibi

Güneş enerjisi araştırmalarının ulaştığı son noktayı temsil eden ve üçüncü nesil PV'ler arasında bulunan DSSC'ler orta seviyelerde sayılan enerji dönüşüm verimliliği ve düşük üretim maliyetinin birleştirildiği yapılar olarak şu anda dünya genelinde araştırma konusu haline gelen fotovoltaiik cihazlar konumundadır [109]. DSSC'ler üretim kolaylığı ve diğer güneş pillerinden farklı olarak çok yüksek saflıkta malzeme gereksinimi olmamasından dolayı üretim maliyetleri açısından büyük avantajlar sağlamıştır. Grätzel hücresi diye de bilinen DSSC'ler yoğun bir ilgi uyandırmış ve kısa sürede çok sayıda çalışmaya konu olmuştur [109]. Sandviç yapısında üretilen DSSC'lerde fotoanot denilen ön elektrot, pürüzlü yapıdaki TiO<sub>2</sub> nanoparçacıklardan oluşan film üzerine kaplanmış tek tabaka halindeki boyar maddeden oluşmaktadır. Bir DSSC, toksik olmayan materyallerle basit ve düşük enerji tüketimine sahip bir proses ile imal edilmektedir. Böylece gelecek kuşağın mükemmel temiz enerji kaynakları haline gelme potansiyeline sahiptir. DSSC'nin kendine özgü cihaz yapısına ve geleneksel güneş pillerinden farklı üretim mekanizmasına atfedilen benzersiz özellikleri nedeniyle cihazın yakın gelecekte önemli ölçüde geliştirilmesi beklenmektedir [86]. DSSC'lerin güneş enerjisi dönüşüm verimliliği klasik kristal Si (c-Si) hücrelere nazaran düşük olmasına rağmen verimliliğini artırmak için yüksek bir potansiyele sahip olduğu savunulmuştur. Ayrıca, yapısındaki nanomalzemelerin varlığı DSSC'lerin geliştirilmesinde dikkat çekmektedir [109]. Mezoskopik karakterleri nedeniyle şeffaf hücreler yapmak

mümkündür. Günümüzde bu yapılardan % 14 civarında bir verimlilik elde edilmektedir [121] ve mevcut araştırmalar DSSC'lerin büyük ölçekli uygulamaları [122] ve bu cihazların uzun vadeli kararlılığının geliştirilmesine odaklanmıştır [105].

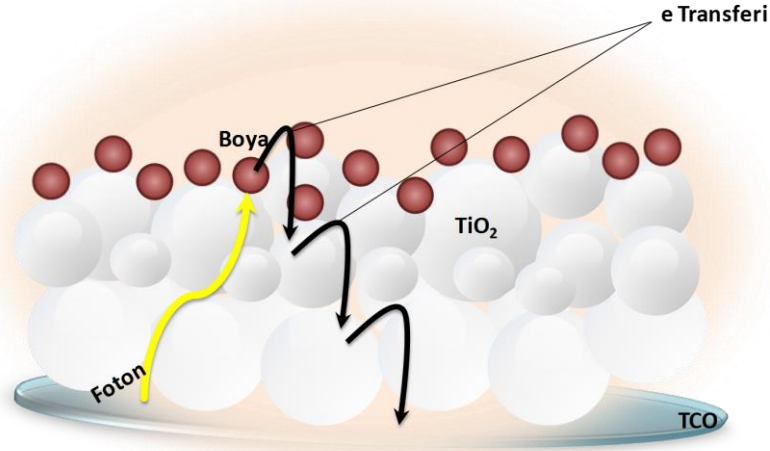
DSSC'nin çalışma prensibi, duyarlılaştırıcı bir boya yardımıyla güneş enerjisini farklı bir enerji türüne dönüştüren yapısı nedeniyle bitki fotosentezine benzetilmektedir [123]. DSSC'ler, güneş ışığı yakalayıp enerjiye dönüştürerek doğal fotosenteze benzer şekilde çalışmakta ve meydana gelen işlemlerin tamamı kapalı bir kimyasal devrede gerçekleşmektedir. Doğal fotosentez ile benzerliği, ışığın absorpsiyonu ile başlamaktadır. Hem fotosentezde hem de DSSC'lerde antosiyanin ve klorofil gibi organik boyalardan (pigmentler) yararlanılabilmektedir. DSSC'lerde, TiO<sub>2</sub> film, fotosentezdeki nikotinamid adenin dinükleotid fosfatın (NADP<sup>+</sup>) yerini alırken, elektron alıcısı, karbon dioksitin yerine geçmektedir. İyodür ve triiyodür (I<sup>-</sup>, I<sub>3</sub><sup>-</sup>) ise elektron verici ve oksidasyon ürünü olarak fotosentezdeki su ve oksijenin yerini almaktadır [124]. Şekil 2.8'de verilen ve boyayla duyarlılaştırılmış güneş pilinin yapısını oluşturan temel bileşenler:

- i. TCO tabaka olarak flor katkılanmış kalay oksit veya indiyum kalay oksit kaplı camlar,
- ii. Fotoelektrodu oluşturan, geniş bant aralığına sahip bir yarıiletken tabaka olarak TiO<sub>2</sub> film,
- iii. Yarıiletken üzerinde tek tabaka halinde ışığa duyarlı boyar madde,
- iv. Arka (counter, karşıt) elektrodu oluşturmak için TCO kaplı cam üzerine kaplanarak katalizör görevi yapan ve genel olarak Platin (Pt), Karbon (C) veya Palladyum (Pd) gibi elementlerden oluşan kaplama,
- v. İki elektrot arasına doldurulan ve redoks tepkimelerinin gerçekleşeceği katı, yarı katı veya sıvı elektrolit,
- vi. İki elektrot arasına konularak aradaki mesafenin, pil alanının ve elektrolit miktarının sabit tutulmasını ve iki elektrodun birbirine yapışmasını sağlayan ve aynı zamanda elektrolit sıvısının sızmasını da engelleyen ısıyla yapışma özelliğine sahip termoplastik film olarak sıralanmaktadır.



**Şekil 2.8.** Boyayla duyarlılaştırılmış güneş pilinin şematik gösterimi

Bu yapı içerisinde TCO kaplı iletken cam üzerinde geniş bant aralığına sahip süngerimsi, nanokristal gözenekli, mezoskopik yapıda bir yarıiletken oksit olan  $\text{TiO}_2$  ile film oluşturulmaktadır.  $\text{TiO}_2$ 'nin, DSSC'nin verimliliği ile ilgili çok önemli bir işlevi bulunmaktadır. Nanokristal  $\text{TiO}_2$ , gözenekli yapısından dolayı büyük bir aktif alana sahiptir (yüzey alanını 1000 katına kadar arttırabilmektedir), bu nedenle aydınlatılan alanı ve dolayısıyla da  $\text{TiO}_2$  yüzeyine tutunan boya miktarını ve boya tarafından yakalanan foton ile üretilen  $e^-$  miktarını da doğrudan etkilemektedir. Şekil 2.9'da gösterildiği gibi duyarlılaştırıcı olarak tek katman halinde  $\text{TiO}_2$  filme bağlanan duyarlılaştırıcı boya, gelen ışığı absorbe ederek yarıiletken oksitin iletkenlik bandına enjekte edilecek elektronları üretmektedir. Elektronlar, difüzyon yoluyla  $\text{TiO}_2$  nanopartikül tabakası boyunca akım toplayıcısına (fotoanot) oradan da şeffaf iletken tabakaya taşınmaktadır [124].



**Şekil 2.9.** DSSC’lerde duyarlılaştırıcı boya ile TiO<sub>2</sub> tabaka arasında gerçekleşen e<sup>-</sup> aktarımı

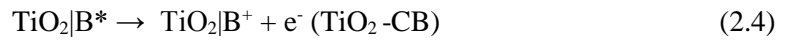
Bu türdeki bir güneş pilinde güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretimi 5 aşamada gerçekleşen bir süreçtir.

1. aşama, Aktivasyon;



Bu aşama güneş enerjisinin aktif tabaka tarafından absorblanması ile başlamaktadır. Işık şeffaf iletken ve yarıiletken TiO<sub>2</sub> tabakasından geçerek boya maddeye ulaştığında boya molekülleri uyarılmaktadır (B→B\*).

2. aşama; (a) Elektron aktarımı;



Bu aşamada (elektron aktarımı) boya tarafından absorbe edilen foton, boyanın moleküler orbital yapısındaki boş olan en düşük enerjili moleküler orbital (Lowest Unoccupied Molecular Orbital-LUMO) seviyesi ile dolu olan en yüksek enerjili moleküler orbital (Highest Occupied Molecular Orbital-HOMO) seviyesi arasındaki enerji farkını sağlayacak yeterli enerjiye sahip ise [86] boyanın yapısında bulunan bir elektron, HOMO seviyesinde + yüklü bir delik bırakarak LUMO seviyesine geçiş yapmaktadır [125]. Böylece yapı içerisinde eksiton denilen, birbirine Coulomb kuvvetiyle bağlı bir elektron-delik çifti oluşmaktadır. Absorbsiyon sonucu elektron-delik çiftlerinin (eksiton) oluşması ancak gelen fotonun enerjisinin boyanın optik bant aralığından (HOMO ve LUMO enerji seviyeleri arasındaki fark) daha büyük olması durumunda

gerçekleşebilmektedir.  $\text{TiO}_2$ 'nin iletim bandı birçok boya maddesinin LUMO seviyesinin altındadır. Böylece soğurulan foton ile uyarılmış haldeki elektronlar daha düşük enerji seviyesine sahip olan  $\text{TiO}_2$ 'nin iletim bandına kolaylıkla geçiş yapmaktadır [124].

2. aşama; (b) *Deaktivasyon*;



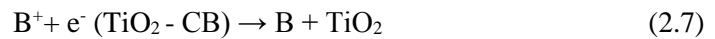
Sonraki süreçte elektronların  $\text{TiO}_2$  tabakasına aktarımı gerçekleşmeden boyanın uyarılmış halinden önceki haline dönmesi şeklinde meydana gelen  $\text{TiO}_2$ 'ye elektron enjeksiyonuyla rekabet halindeki deaktivasyon durumu hücre verimliliğini önemli ölçüde düşürmektedir. Bu durumu en aza indirmek için fotoelektrodu oluşturan yarıiletken tabakanın kalınlığı optimum bir düzeyde olmalıdır. Bu optimum değer pil yüzeyine gelen fotonların büyük kısmını soğurabilecek kadar kalın ancak oluşan  $e^-$ -delik çiftlerinin yeniden birleşmesine fırsat vermeyecek kadar yani  $e^-$ -delik çiftlerinin difüzyon uzunluğundan daha ince veya bu uzunluk civarında olmalıdır. Organik malzemelerin çoğunda bu uzunluğun ortalama 10 nm civarında olduğu ve dolayısıyla  $\text{TiO}_2$  tabaka kalınlığının da minimum 10  $\mu\text{m}$ , maksimum 25  $\mu\text{m}$  civarında olması gerektiği rapor edilmiştir [126].

3. aşama; (a) *Yüklerin toplanması*;



Bu aşamada  $\text{TiO}_2$  tabakasından şeffaf iletken cama ve oradan harici devreye aktarılan  $e^-$ 'lar çevrimin devamında harici devre üzerinden arka elektrota (katot) geçmektedir [124]. Elektronların arka elektrota iletimi ve geride kalan + yüklü boya katyonları (delikler), kapalı devre içerisinde yük dengesinin bozulmasına ve bir elektrik alan oluşumuna yol açmaktadır. Oluşan bu elektrik alan elektrolit içerisinde boya katyonlarını oluşturan delikleri sürüklemeye başlamaktadır.

3. aşama; (b) *Geri elektron transferi*;



1. aşamada ayrılan eksitonların boyanın redoks elektroliti ile indirgenmesinden önce yeniden birleşmesi (rekombinasyon) akım kaybına neden olacağından 2. aşamada gerçekleşen deaktivasyon gibi istenmeyen ikinci bir durumdur.

3. aşama; (c)  $TiO_2$  iletkenlik bandındaki elektronun redoks çifti tarafından yakalanması;



3. aşamada boyadan  $TiO_2$  tabakasına oradan da anot kontağına yani, TCO yüzeyine ulaşan elektronların anot kontağında toplanma verimliliği bir başka rekombinasyon tarafından da engellenmektedir. Bu rekombinasyon durumu elektrolit içerisindeki redoks çifti tarafından,  $TiO_2$  tabakasına kadar ilerlemiş olan  $e^-$ 'nin dış devreye ve Pt tabakaya ulaşması beklenmeden yakalanması şeklinde gerçekleşmektedir.

3. aşamada gerçekleşen bu iki süreç (3(a), 3(b)), iyodürün oksidasyonu ile rekabet halinde ve hücrenin mevcut üretimini azaltma eğilimindedir.

4. aşama, Elektrolitin indirgenmesi;



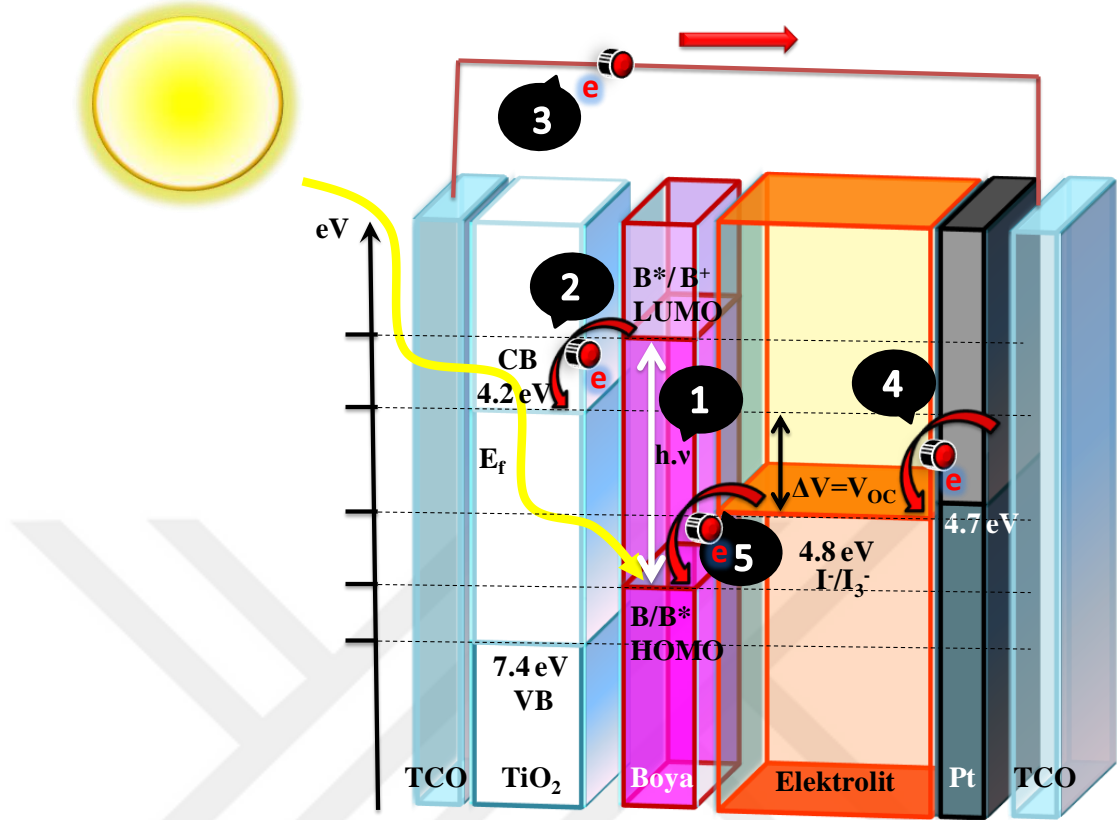
Dış devre üzerinden platinlenmiş arka elektrota, oradan da yükseltgenmiş olan elektrolite aktarılan  $e^-$  ile elektrolit indirgenmektedir. Elektrolit içeriğindeki iyodür tri-iyodüre ( $I_3^-$ ) oksitlenirken boyadaki boş HOMO seviyesi elektrolitteki iyodür ( $I^-$ ) iyonlarından sağlanan elektronlarla doldurulmaktadır.

5. aşama, İyodürün oksidasyonu ve boyanın rejenerasyonu;



5. ve son aşamada uyarılmış haldeki boya molekülü, organik çözücüler içerisinde çözünen, genel olarak iyodür/tri-iyodür olan redoks sistemi ile rejenere edilmekte yani, boya uyarılmadan önceki haline geri dönmektedir. Boyadan ayrılan  $e^-$ 'lerin ardında bıraktığı delikler, redoks çifti içeren elektrolit tarafından nötral hale indirgenerek boya uyarılmadan önceki haline geri dönmektedir [127].

Yukarıda anlatılan 5 aşama Şekil 2.10'da verilmiştir. Şekil 2.10'da  $\Delta V$  ile gösterilen ve açık devre gerilimi ( $V_{oc}$ ) olarak ifade edilen, bir DSSC için ulaşılabilecek maksimum voltaj, elektrolitin redoks çiftinin ( $I^- / I_3^-$ ) sahip olduğu redoks potansiyeli ile yarıiletkenin iletkenlik bandı Fermi seviyesi arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır [128].



**Şekil 2.10.** DSSC’lerde gerçekleşen üretim aşamaları [128]

Tepkimeler neticesinde net yük yine sıfırdır. Dolayısıyla güneş pilinin çalışması esnasında pilde kimyasal bir bozunma meydana gelmemektedir. Bir elektronunu  $\text{TiO}_2$ 'ye veren boya molekülü redoks çifti içeren elektrolit tarafından yeniden nötral hale getirilerek indirgenmektedir. Bu durumda yükseltgenmiş olan elektrolit de Pt tabakasına ulaşan elektron tarafından indirgenmektedir. Platin arka elektrot, elektrolit solüsyonundaki iyonların redoks reaksiyonu için bir katalizör görevi görmekte ve tri-iyodürü iydür'e geri döndürmektedir [89]. Bu sistem içerisinde, duyarlılaştırıcı boya madde, fotonların emiliminde ve elektron-delik çiftlerinin oluşmasında önemli bir rol oynamaktadır. Boyadan kopan elektronlar ve redoks tepkimelerinin aydınlatma sürdüğü müddetçe sürekli bir halde devam etmesi sayesinde oluşan elektron döngüsü pil içerisinde devamlı bir elektron akışına sebep olmaktadır. Böylece foton enerjisinden elektrik akımı meydana gelmektedir [124]. Yüksek güç dönüştürme verimliliği elde etmek için bazı parametrelerin optimize edilmesi gerekmektedir. Örneğin, yakalanan foton miktarı artırılarak daha fazla elektron üretilmesi ve daha sonra üretilen elektronların yüksek bir güç dönüştürme verimliliği elde etmek için verimli bir şekilde dışarıya aktarılması gerekmektedir. DSSC yapısı içerisindeki birkaç arayüz ( $\text{TiO}_2$  film/TCO arayüzü,  $\text{TiO}_2$  film/boya/elektrolit arayüzü ve katot (Pt)/elektrolit

arayüzü), sahip oldukları iletim direnci nedeniyle birbirleri arasındaki elektron transferini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Elektronların en az kayıpla dış devreye aktarılabilmesi için en etkin parametreler, bu arayüzlerin üretim prosesleri, kalınlıkları ve elektrolitin içeriği gibi parametrelerdir. Örnek verilecek olursa  $TiO_2$  tabakanın TCO yüzeye temas kalitesi bu arayüzde bir tabakadan diğerine gerçekleşen elektron transferinin verimini belirlemektedir. Yüksek dönüşüm verimliliği elde etmek için, bu arayüzlerin en iyi koşullarının belirlenmesi çok önemlidir [125].

Yüksek verimlilik ( $> \% 10$ ) ve / veya uzun vadeli kararlılık ile karakterize edilen DSSC'lerin imal edilebilmesi için, daha fazla bilgi ve en son teknoloji kullanılarak DSSC mekanizmasının kilit noktaları aşağıdaki değerlere optimize edilmelidir;

- i. Boyadan  $TiO_2$  elektroduna ultra hızlı elektron enjeksiyonunun ( $< 20$  femtosaniye) sağlanması [129],
- ii. I redüksiyonu ile hızlı boya rejenerasyonunun (beslem voltajı olmaksızın ortalama 100 nanosaniye) sağlanması [130],
- iii.  $TiO_2$  elektrodunda çok uzun lifetime (elektron ömrü) ( $0.7V$  ileri beslem altında,  $> 0.1$  saniye) [131] oluşması,
- iv.  $TiO_2$  elektrotta yüksek pürüzlülük faktörünün ( $> 1600$ ) oluşturulması [132],
- v. Boyar maddenin  $TiO_2$  elektrot üzerinde diyot etkisi oluşturması [132],
- vi. Foton absorpsiyonu,  $TiO_2$  tabakalarının kalınlığı ile kontrol edilmekte olduğundan fotoelektrodun 2 veya 3 tabakalı olarak oluşturulması ve bu tabaka kalınlıklarının optimizasyonu (transparan tabaka,  $d = 20$  nm, 12-14  $\mu m$  kalınlık; saçılma (scattering) tabakası,  $d = 400$  nm, 4-5  $\mu m$  kalınlık) [133],
- vii.  $I/I_3$  redoks çifti için yüksek aktiviteli Pt arka elektrodunun oluşturulması ( $< 8 \Omega$ ) [134],

şeklinde listelenen her nokta, yüksek verimli DSSC'ler için gereklidir. Geniş bant aralıklı yarıiletkenlerin daha yüksek dalga boylarına duyarlılaştırılmasına dayanarak, görünür ışığın elektriğe dönüştürülmesi için üretilen bu yapılarda kilit malzemelerden biri  $TiO_2$  ve duyarlılaştırıcı boyar maddeden oluşan fotoelektrottur.  $TiO_2$  parçacık boyutu ve nanokristal  $TiO_2$  tabakasının kalınlığı fotoakım ve fotovoltaj kontrolüne olanak sağlayacaktır. Böylece, gözenekli  $TiO_2$  elektrodun yapısına göre, duyarlılaştırıcı boya ve elektrolitin tasarımı



optimize edilebilmektedir [135].

### 2.3.1. TCO Kaplı Cam Plaka

Yukarıda maddeler halinde anlatılan enerji üretimi basamakları, DSSC'lerin dış iskeletini oluşturan iki iletken kaplı cam arasında gerçekleşmektedir. Bu iki cam plaka, pil içerisindeki tüm bileşenleri bir arada tutmakta ve aynı zamanda pili dış etkilere karşı da korumaktadır. Fotonların rahatlıkla pil içerisine nüfuz edebilmesi için cam plakanın optik geçirgenliğinin iyi olması gerekmektedir. Aynı zamanda cam yüzeyde iletkenlik sağlanması amacıyla şeffaf iletken bir oksit olan kalay oksit ( $\text{SnO}_2$ ) ince film olarak kaplanmaktadır. TCO kaplama, aynı anda hem ışık geçirgenliği hem de iletken elektrot işlevini yerine getiren bir yapı olarak optoelektronik cihazlarda çok önemli bir rol oynamaktadır. DSSC'lerde kullanılan TCO kaplamanın,  $\text{TiO}_2$  esaslı fotoelektrodun oluşturulması esnasında sinterleme işlemi boyunca maruz kaldığı yüksek sıcaklığa ve kimyasal olarak korozif etki gösteren redoks elektrolitine karşı gösterdiği dayanım ve kararlılık ile elektriksel ve kimyasal olarak stabil olması da istenmektedir. Cam üzerine iletken kaplama yapılırken dikkat edilmesi gereken husus, yük taşımamını ve dolayısıyla iletkenliği arttırmak için yüksek tutulan konsantrasyonun yüzey saydamlığında azalmaya neden olacağına göz önünde bulundurulması gerektiğidir.

TCO kaplama yapılırken cam yüzeyi üzerine genellikle bir element katkılanmış kalay oksit "fiziksel buhar biriktirme (PVD)" tekniğiyle kaplanıp, cam yüzeyinde saydam ve iletken bir tabaka oluşturulmaktadır. TCO çeşitleri katkılanan maddenin ismine göre adlandırılmaktadır [136].

- i. CTO kaplama cam yüzeyine klor katkılı kalay oksit ince film kaplanarak oluşturulmaktadır. Bu kaplamanın iletkenliği nispeten düşüktür ve kolay bulunamamasından dolayı, genellikle deneysel amaçlı çalışmalarda tercih edilmektedir [136].
- ii. ITO kaplama indiyum katkılı kalay oksit kaplamadır. İletkenlik ve saydamlık anlamında en iyi performansa sahip olduğundan bu iki özelliğin artırılması istenen durumlarda tercih edilmektedir [137]. Ancak bu kaplama çeşitli dezavantajlara sahiptir. İletkenlik ve şeffaflık anlamında en iyi performansı sergileyen ITO kaplamanın sahip olduğu dezavantajlardan biri indiyumun yüksek maliyetidir. Ayrıca indiyum kaynaklarının kısıtlı olması, ITO filmlerin kırılma ve esnekliklerinin az olması ve yüksek maliyetli kaplama yöntemleri gerektiriyor olması gibi nedenlere ek olarak DSSC üretimi sırasında maruz kalacağı  $300\text{ }^\circ\text{C}$

üzerindeki sinterleme sıcaklığı karşısında iletkenliğini önemli ölçüde yitiriyor olması bu alanda alternatif arayışlarına yol açmıştır [138].

- iii. FTO diye adlandırılan flor katkılanmış kalay oksit kaplama en yaygın kullanılan TCO kaplamadır ve iletkenliği CTO'dan daha yüksektir [139]. FTO kaplama, şeffaflık anlamında ITO kadar iyi olmasa da iletkenliğinin yüksek sıcaklıktan ITO kadar etkilenmemesi, iyi termal ve kimyasal stabilitesi nedeniyle DSSC'de ITO'dan daha yaygın bir şekilde kullanılmasını sağlamaktadır [140].
- iv. Cam yüzeyinde antimon katkılı kalay oksit tabaka kaplanarak oluşturulan ATO kaplama da yaygın olarak kullanılan bir TCO türüdür [141].
- v. ITO/SnO<sub>2</sub> kaplamalar çift katmanlı ITO/SnO<sub>2</sub> kaplanmış camlardır (In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SnO<sub>2</sub>). En iyi iletkenlik ve en iyi yüksek sıcaklık dayanımı çift katmanlı ITO/SnO<sub>2</sub> camlarda elde edilmiştir [142]. Ancak maliyet konusundaki dezavantajı bu kaplamaların kullanımını kısıtlamaktadır.
- vi. FTO/ITO kaplamalar çift katmanlı yapıda FTO ve ITO kaplamaların her ikisinin de uygulandığı iletken camlardır. Yüksek iletkenlik ve mekanik özellikleri nedeniyle tercih edilmektedir [143]. Ancak ITO yapısından dolayı yüksek sıcaklık değerlerinde bu kaplama da bahsi geçen dezavantajlara sahiptir.

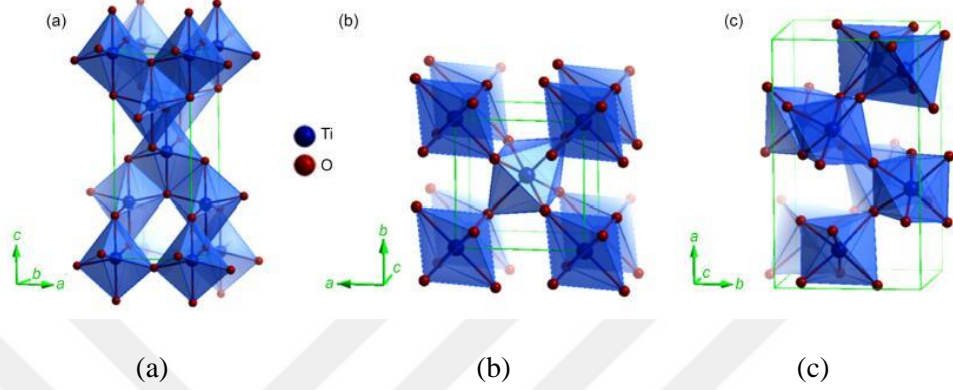
### 2.3.2. Yarıiletken Oksit Tabaka ve Fotoelektrot Yapısı

Fotoduyarılılaştırıcı boyar maddenin tutunması için sundukları geniş aktif alandan dolayı genellikle nanoyapılı metal oksit yarıiletken malzemeler DSSC imalatında tercih edilmektedir [144]. Günümüze kadar DSSC yapımında yarıiletken olarak TiO<sub>2</sub> dışında ZnO, SnO<sub>2</sub>, CdS, WO<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, TaO<sub>5</sub> gibi birçok yarıiletken yapı kullanılmıştır [145]. Diğerlerine göre daha geniş bant aralığına sahip olmalarından dolayı, TiO<sub>2</sub> ve ZnO yarıiletken malzemeler diğerlerinden daha fazla tercih edilmiştir. İletken yüzeydeki boya molekülleri verimli bir enjeksiyon ile % 90 verimlilikle enerji dönüşümü sağlayabilme potansiyeline sahip olmasına karşın boya ortamının tek katmanlı olması nedeniyle foton yakalama şansı düşük olduğundan, fotoakım verimliliğinin % 1'in altında olacağı öngörülmüş ve bu problem TiO<sub>2</sub> elektrotların gözenekli bir yapıda üretilmesiyle nispeten aşılmıştır. Böylece hem yüzey alanı genişletilmiş hem de tutunan boya miktarının artması sağlanarak foton yakalama şansı da arttırılmıştır [53]. Nanokristal filmin yüksek aktif alanı tek tabakada büyük miktarda boyanın tutunma gereksinimini karşılama da kalınlık artışı, uyarılmış elektronların rekombinasyonu ve dolayısıyla akım kaybı için uygun bir ortam

yaratacağından, bu tabakanın 10-25  $\mu\text{m}$  [126, b146] gibi optimum bir değerde tutulması gerektiği unutulmamalıdır. Bununla birlikte, nanoparçacık boyutundaki mezo-gözenekli yarıiletken tabakanın yüzeyine yalıtkan bir materyal kaplamanın arayüzey rekombinasyon sürecini geciktirdiği ve DSSC performansını arttırdığı bildirilmiştir. Ancak bu yapılarda nihai verimlilik % 6'nın altında kalmıştır. Bu açıdan, yalıtkan tabakalar ile yüzey kaplanması konusunda çalışmalar sürerken yarıiletken tabakanın oluşturulmasında farklı boyutlarda  $\text{TiO}_2$  nanoparçacıklarla oluşturulan yansıtıcı, opak ve transparan yapılar kullanılarak çok katmanlı fotoelektrotlar üretilmesi daha etkin bir yöntem olarak göze çarpmaktadır [54]. Sinterleme sonrasında elde edilen filmde yüzey pürüzlülüğünün fazla olması amacıyla oldukça küçük (10-40 nm) nanoboyutlu parçacıklar tercih edilmektedir. Bu boyuttaki nanoparçacıklar tipik olarak sinterlemeden sonra yarı şeffaf bir tabaka oluşturduğundan transparan pasta yapımında kullanılarak FTO yüzeyinin bulanıklığını azaltmak amacıyla ilk tabaka olarak FTO yüzeyine kaplanmaktadır. Tek başına bu yapının DSSC'de kullanılması durumunda elektrodun şeffaflığı, tasarım cazibesi sunmaktadır. Ancak  $\text{TiO}_2$  filmin en önemli görevlerinden biri yüzeye gelen fotonların pil içerisinde dağıtılarak boyar madde tarafından absorbe edilmesini sağlamaktır. Transparan  $\text{TiO}_2$  film tek başına kullanıldığında bu dağıtma işlevini yerine getirememekte ve fotonların önemli bir kısmı güneş hücresinden iş yapmaksızın geçmektedir. Bu durum da enerji dönüşüm veriminin azaltmasına neden olduğundan her zaman istenmeyen bir durumdur. Bu davranış ancak daha büyük titanyum parçacıkları kullanılarak önlenebilmektedir. Işıkla daha iyi etkileşimde bulunma ve gelen fotonları pil içerisine dağıtma [54] özelliğinden dolayı büyük boyutlu (100-125 nm) [147] parçacıklar bazı durumlarda (kullanılan boyar maddeye de bağlı olarak) tercih edilebilmektedir. Genellikle küçük (10-40 nm) ve büyük (100-125 nm) nanoboyutlu parçacıklar, karıştırılarak opak  $\text{TiO}_2$  pasta karışımlarının hazırlanmasında ve transparan tabaka üzerine ikinci tabakanın oluşturulmasında kullanılmaktadır.

DSSC performansı,  $\text{TiO}_2$  nanoparçacıkların doğasına ve boyutuna bağlıdır.  $\text{TiO}_2$  anataz, rutil ve brokit olmak üzere üç farklı kristal yapıya sahiptir. Anataz yapı, güneş enerjisi dönüşümünde rutil ve brokit fazdan daha iyi olduğundan, anataz fazı  $\text{TiO}_2$  nanoparçacıkların hazırlanmasında diğer iki faza nazaran daha çok tercih edilmektedir. Bazı araştırmacılar tarafından rutil ve brokit fazdan kaçınılması gerektiğine [54] değinilmektedir. Anataz yapı, 550  $^{\circ}\text{C}$  ile 1000  $^{\circ}\text{C}$  arasında rutile dönüşmektedir. Brokit fazı ve yüksek sıcaklıklarda rutil faza dönüşen anataz yapılar yarı kararlı iken, rutil en kararlı fazıdır. Şekil 2.11'de yapısı verilen ve piramit benzeri kristaller olarak görülmekte olan anataz fazı, düşük sıcaklıklarda oldukça kararlı olmasına rağmen bu durum yüksek sıcaklık değerlerinde değişmektedir. İğne benzeri yapıdaki rutil kristalleri ise özellikle yüksek sıcaklık işlemlerinde tercih

edilmektedir. Rutil yakın UV bölgesinde, gelen ışığın % 4'ünü soğurmakta ve bant aralığı uyarımında DSSC'lerin uzun vadeli kararlılığını azaltan güçlü oksitleyiciler gibi davranarak + yüklü delikler oluşturmaktadır. Rutil, bu nedenden dolayı brokit ise üretiminin zorluğu nedeniyle DSSC uygulamalarında tercih edilmemektedir [53].



**Şekil 2.11.** (a)  $\text{TiO}_2$  anataz faz (tetragonal yapı,  $a = 0.3785$  nm,  $c = 0.9513$  nm),  
 (b) rutil faz (tetragonal yapı,  $a = 0.4593$  nm,  $c = 0.2959$  nm)  
 (c) brokit faz (ortorombik yapı,  $a = 0.9181$  nm,  $b = 0.5455$  nm,  $c = 0.5142$  nm)  
 [148]

Çoğunlukla spektrumun UV bölgesindeki ışıkla aktif olan  $\text{TiO}_2$  yarıiletkenine ait bant aralığı enerjisi; brokit fazda 3.26 eV, anataz faz için 388 nm dalga boyunda 3.2 eV ve rutil faz içinse 413 nm dalga boyunda 3.03 eV'dir [53]. İletim bandı değeri, boya molekülünün LUMO seviyesinden yarıiletkenine elektronların enjeksiyonu için önemli bir parametredir.  $\text{TiO}_2$ 'de bu değer birçok boya ile ve özellikle de antosiyanin içeren doğal boyalarla uyum içerisindedir.  $\text{TiO}_2$ 'nin anataz fazı için 80 olan yüksek dielektrik sabiti sayesinde doğurduğu elektrostatik etkiyle  $\text{TiO}_2$ , üzerine tutunan boya molekülünden enjekte edilen elektronun iletimini sağlarken, boyanın redoks elektroliti ile indirgenmesinden önce rekombinasyona da fırsat tanımamaktadır. Yine anataz fazı için  $n = 2.5$  değerinde olan kırılma indisi  $\text{TiO}_2$ 'nin foton emilimini önemli derecede arttırmakta ve gözenekli fotoelektrot içerisinde ışığın verimli bir şekilde dağılmasını sağlamaktadır [53].

Ayrıca  $\text{TiO}_2$  görünür ışık bölgesinde çalışırken de iyi bir kimyasal kararlılığa sahiptir.  $\text{TiO}_2$ 'nin en zor çalışma koşullarında bile fotoelektrokimyasal sistemlerde dengeli bir fotoelektrot olduğu savunulmuştur. Ayrıca ucuz, kolaylıkla temin edilebilir olması ve toksik olmamasından dolayı dış macunu üretimi ve benzer birçok uygulamada beyaz boya olarak da kullanılmaktadır.

### 2.3.3. Fotoduyarlılaştırıcı Boyar Madde

DSSC'lerde elektron kaynağı olarak görev alan bileşen, fotoduyarlılaştırıcı boyar maddedir. Boya üzerine bant aralığına uygun dalga boyunda ışık düştüğünde boya tarafından absorbe edilen bu ışık sayesinde yapısındaki elektronlar elektriksel olarak uyarılmış duruma geçmekte ve böylece elektron-delik çiftleri oluşmaktadır. Bu bağlamda hücrenin performansı esas olarak duyarlılaştırıcı olarak kullanılan boyaya bağlıdır. Boyanın absorpsiyon spektrumu ve boyanın  $TiO_2$  yüzeyine tutunma oranı hücrenin etkinliğini belirleyen önemli parametrelerdir [76]. Literatürde porfirinler [149], ftalosiyaninler [150, 151], platin kompleksleri [152] ve floresan boylarla [153] çeşitli metal kompleksleri ve organik boylar sentezlenmiş ve kullanılmıştır [154]. DSSC'ler için günümüzde en yaygın kullanılan boyar madde yüksek verimlilik ve uzun vadeli kararlılığı nedeniyle Ru (II) [55,155] ve Os (II) [156] esaslı boylar olmuştur [144].

Bu bağlamda fotoduyarlılaştırıcıdan beklenen, güneş ışığının yeterli absorpsiyonuyla etkin elektron enjeksiyonunu, boya rejenerasyonunu, yarıiletken tabakaya güçlü fiziksel tespiti ve uzun süre istikrarlı bir şekilde çalışmayı kolaylaştırmak için yarıiletken oksit tabakayla iyi eşleştirilmiş enerji seviyesini sağlayabilmesidir [140]. Etkin bir boyar maddenin pil performansını maksimum seviyede tutabilmesi için gereken şartlar şu şekilde detaylandırılabilir:

- i. Bir fotoduyarlılaştırıcı boyar madde için olabildiğince geniş absorbans bölgesinde foton soğurabilmesi önemli bir özelliktir. Boyar madde, ışık spektrumunda görünür bölgenin tamamını ve yaklaşık 920 nm dalga boylarına kadarki ışığı soğurabilmelidir [157].
- ii. Enerji kayıplarını en aza indirmek ve üretilen gerilimi olabildiğince arttırmak için, yüzeye tutunan boya molekülünün hem LUMO seviyesinin  $TiO_2$  nanopartiküllerin iletim bandının (CB) üstünde, yaklaşık olarak 1.35-1.4 eV civarında [158] hem de HOMO seviyesinin elektrolitin redoks potansiyeli değerinin altında olacak şekilde seçilmesi gerekmektedir. Ayrıca elektron enjeksiyonu için yeterince yüksek, kuvvetli itici güce sahip olmalı ve uyarılmış halden yarıiletkenin iletkenlik bandına elektron enjeksiyonu, rekombinasyona fırsat vermeyecek derecede hızlı olmalıdır [157].

- iii. Yüzeğe tutunmuş boya molekülü, güneş ışığına maruz bırakıldığı müddetçe uzun yıllar stabilitesini koruyabilmesi için yarıiletken-elektrolit arayüzünde oldukça kararlı olmalıdır [159].
- iv. Boyar maddenin yarıiletken yüzeğe iyi tutunabilmesi (adsorbsiyon) ve yüzeğe tek tabaka halinde olması, topaklanmaması (agregasyon gerçekleşmemesi) gerekmektedir. Bunun için de boya molekülleri çözüldüğü solvent içerisinde iyi çözünmelidir.
- v. Ayrıca DSSC'lerde kullanılabilir iyi bir boya adayı olmak için  $TiO_2$  yüzeyine tutunmayı sağlayacak şekilde -O, -COOH, - $PO_3H_2$ , - $SO_3H$  veya -OH grubu yapılar, bulundurması gerekmektedir. Bu grupların varlığı sayesinde boya yarıiletken yüzeğe güçlü bir şekilde bağlanmaktadır [53,160]. Ayrıca  $H^+$  gibi spesifik katyonların  $TiO_2$  nanopartiküllerine tutunmasının da iletim bandını ve moleküler duyarlılaştırıcının yarıiletkene elektron enjekte etme kabiliyetini etkilediği gösterilmiştir [161].

Ru kompleks boyalar daha iyi verimlilik ve yüksek dayanıklılığın yanında tüm görünür bölgede foton absorpsiyonuna [76] sahip olmalarına rağmen Rutenyum (II) polipiridil kompleksleri çeşitli dezavantajlara sahiptir [162]. Nispeten az miktarda doğal kaynaktan üretilen yüksek maliyetli Ru metallerin kullanımı, zor ve karmaşık sentezlenme süreci, ağır metaller içeren bu yapıların toksik etkilerinden dolayı çevreye verecekleri zarar ve nemin varlığında yapısal bozulmaya maruz kalma eğilimi nedeniyle doğal boyalar gibi alternatif fotoduyarlılaştırıcılar aramak zorunda kalınmıştır [76, 53, 154, 163]. Bu durumda DSSC'lerde duyarlılaştırıcı olarak laboratuvar ortamında üretilen çeşitli metal kompleks boyalar, metalsiz organik boyalar, kuantum noktalar [48, 76] ve doğal boya olarak da antosiyanin, klorofil, tanen ve karoten gibi çeşitli doğal pigmentler ve organik asitler başarıyla kullanılmıştır [48, 72, 164, 73, 75, 165].

#### **2.3.4. Doğal Boyalarla Üretilen DSSC'ler**

Doğal boyalar, Ru komplekslere ve pahalı organik esaslı duyarlılaştırıcılara karşı uygulanabilir bir alternatif oluşturmaktadır [76, 162]. Son zamanlarda, araştırmalar büyük absorpsiyon katsayıları, yüksek foton yakalama özellikleri, düşük maliyetleri, kolay hazırlama teknikleri ve çevre dostu, biyolojik olarak doğada parçalanabilen bu boyalara odaklanmıştır [166, 162, 163]. Fotoduyarlılaştırıcı olarak doğal boya olarak sentetik boyalara göre avantajları kolay temin edilebilirliği, arz fazlalığı, saflaştırma gerektirmeden uygulanabilirliği ve doğal kaynaklardan elde edildiğinden geniş bir kullanılabilirlik

sunmalarının yanında cihaz maliyetini de önemli ölçüde düşürmeleridir [53, 144]. Örneğin, kırmızılahana ile ekstrakt edilen antosiyanin içerikli boya kullanılarak üretilen DSSC'lerin enerji dönüşüm verimliliği ile boya maliyeti arasındaki oranın, Ru kompleksler kullanılan DSSC'lere nazaran 50 kat daha fazla olduğu rapor edilmiştir [167].

Doğada, bazı bitki ve bakteriler, sahip oldukları çeşitli renklerin kaynağı olan ve DSSC'lerde kullanılacak pigmentleri içermektedir. Bitki pigmentasyonu, bitki dokusu tarafından absorbe edilen veya yansıtılan dalga boylarını değiştirmek için güneş ışığıyla etkileşen pigmentin elektronik yapısı nedeniyle oluşmaktadır [53]. Pigmentler, çiçek yaprakları, meyveler, yapraklar, saplar ve kökler de dahil olmak üzere bitkinin farklı bölümlerinde bulunmaktadır ve son yirmi yılda bitkilerin farklı kısımları fotoduyarlılaştırıcı temininde kullanılmıştır [162, 163]. Bitkisel pigmentler arasında siyanin [168], antosiyanin [76, 140, 169, 170], siyanidin [171], tanen [72], klorofil ve türevleri [172, 173, 174], karotenoid [175], betalain [160, 180], calcone [176] ve diğer birçokları [177, 175] DSSC'lerde kullanılan doğal boyaların araştırılması üzerine hazırlanan çeşitli raporlarda sunulmuştur. Farklı tür boya molekülleri kimyasal yapılarına ve fotoelektrodu oluşturan yarıiletken ile aralarındaki etkileşime bağlı olarak farklı enerji dönüşüm verimlilikleri sergilemiştir [69, 53, 178]. Antosiyaninler [73, 75, 81, 179, 180] ve karotenoidler [181] içeren doğal pigmentler için enerji dönüşüm verimliliği % 1'in altında elde edilmiş [163], % 1.70'lik en yüksek enerji dönüşüm verimliliğine ise betalain pigmenti içeren kırmızı şalgam ve siyah pirinç ile ulaşılmıştır [53].

Heera ve Cindrella [182] kafeik asit, ferulik asit, elagik asit, deoksisantalın, resveratrol (bitkisel), karminik asit, kersemik asit, ommatin D (böcek kaynaklı), metoksatin ve kaerpinik asit (mikrop kaynaklı) olmak üzere on doğal pigmenti teorik olarak değerlendirmiştir. DSSC'lerdeki muhtemel uygulamalar için bu pigmentler arasından resveratrol, ferulik asit, kafeik asit ve metoksatinin etkili dalga boyu ve  $TiO_2$  ile uyumlu yapılarından dolayı duyarlılaştırıcı olarak kullanımlarının olumlu sonuçlar doğuracağı savunulmuştur. Bu boyalarda farklı bağlanma gruplarındaki etkileşimin daha iyi olması nedeniyle  $TiO_2$  filme tutunma oranlarının daha iyi olduğu ve böylece DSSC'lerde daha iyi performans sağladığı belirtilmiştir [166].

Modern DSSC araştırmasında sayısız doğal boyalar ekstrakt edilmiş, saflaştırılmış ve test edilmiş olsa da, rapor edilen dönüşüm etkinliklerinin düşük olmasına ve Ru gibi diğer sentetik bazlı boyaların performansı ile henüz rekabet edecek durumda olmamasına [162] rağmen, sonuçlar umut vericidir. Bu durum yeni doğal boyaların araştırılmasına ve bu tür

boyalarla uyumlu güneş pili bileşenlerinin optimizasyonuna yönelik ilave çalışmaları arttırabilecektir [53].

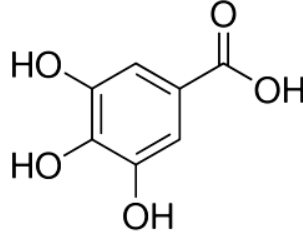
Düşük verimliliğin nedeni pigmentlerle TiO<sub>2</sub> arasındaki etkileşimin az olması ve nanokristal film üzerinde boyanın topaklanması gibi bazı komplikasyonların elektron enjeksiyonuna engel olmasıdır [53]. TiO<sub>2</sub> yüzeyi ile boya molekülleri arasında sterik engel oluşması sonucu gerekli bağlar oluşmadığından bu tür boya moleküllerinden TiO<sub>2</sub> iletim bandına elektron transferi gerçekleşmemektedir. Genel olarak, doğal boyalar düşük V<sub>OC</sub>'den muzdariptir. Doğal boya bazlı DSSC'lerin verimliliğini arttırmak için karboksil grubu gibi fonksiyonel bir grubun dahil edilmesi ve doğal boya yapısının optimize edilmesi gerektiği savunulmaktadır [53]. Örneğin antosiyanin molekülünde, doğası gereği bulunan karbonil ve hidroksil grupları gözenekli TiO<sub>2</sub> film yüzeyine bağlanmayı sağlamaktadır [76]. Elde edilen boya ekstraktlarının tam olarak karakterize edilebilmesi için içerisinde bulunan maddelerin ve bu madde miktarlarının oranını araştırmada kromatografi yönteminin (LC-MS veya GC-MS) kullanılması önerilmektedir [71].

Direkt güneş ışığından korunmuş halde, yaklaşık +4 °C'de düzgün bir şekilde depolanırsa, özellikle asidik doğal boya çözeltileri genelde kararlıdır ve yarılanma süresi 12 aydan uzun bir süredir [53]. Doğal boya solüsyonunun pH'si de, DSSC'lerin performansı üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir. Dumbrava ve ark. yaptığı çalışmada [183] DSSC'nin daha düşük pH'de daha yüksek fotovoltajik enerji dönüşüm verimliliği sergilediğini açıklamıştır. Optimum pH değeri 2'de maksimum verim elde edilmiştir. Aynı çalışmada kırmızı pancar suyu özünden yapılmış fotoanot ile hazırlanan DSSC'lerde pH 2'de en iyi sonuç alınırken, pH'nin artması ile dolun faktörünün ve verimliliğin azaldığı ve hatta nötr özütlerin kullanılmasıyla hücre performanslarının en kötü duruma geldiği sonucuna varılmıştır. Boya kararlılığını arttırmak için sulu özütlerde bazı organik asitler (betanini oksidasyondan korumak için yaygın olarak kullanılan sitrik asitin yanı sıra askorbik asit ve galik asit) kullanılmıştır. Suyla ekstrakt edilmiş, asitlik seviyesi HCl kullanılarak ayarlanan pH = 2 seviyesinde asidik boya solüsyonlarıyla hazırlanan pil performansının aynı pH seviyesinde etanol ve metanolla ekstrakt edilen solüsyonlarla hazırlananlara nazaran daha iyi olduğu gözlenmiştir. Aynı zamanda suyla ekstrakt edilmiş boya solüsyonlarının pH seviyeleri 2, 3 ve 6 olacak şekilde ayarlanarak yapılan gözlemlerde en iyi sonucun pH = 2 seviyesinde alındığı görülmüştür. Aynı çalışmada askorbik asit ve galik asit gibi, bitkilerin yapısında bulunan doğal asitler kullanılarak pH ayarlamasının yapıldığı durumda da asit oranı arttıkça ve dolayısıyla pH seviyesi düşüktüçe performansın iyileştiği gözlenmiştir. Galik asit kullanılarak pH değeri 3.3 olarak ayarlandığında verimlilik tipik olarak HCl ekstraktıyla pH = 2



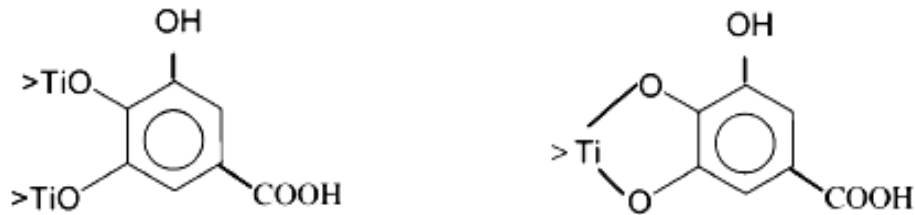
seviyesinde hazırlanan yapıyla karşılaştırılabilir durumda olmaktadır [183].

Çeşitli bitki, meyve ve sebzelerde yaygın olarak bulunduğu bilinen galik asit [184] bitkilerin çeşitli bölümlerinden ekstrakt edilen boya solüsyonlarında bulunmaktadır. Bu özelliği nedeniyle birçok çalışmaya konu olmuştur. Galik asitin (3,4,5- trihydroxybenzoic acid) kimyasal yapısı Şekil 2.12'de görülmektedir.



**Şekil 2.12.** Galik asitin (3,4,5- trihydroxybenzoic acid) yapısal formülü [184].

TiO<sub>2</sub> nanoparçacıklarla oluşturulan fotoelektrot yüzeyindeki TiO<sub>2</sub> kristalleri Ti<sup>4+</sup> iyonlarına sahiptir. Yük transfer kompleksinin yani duyarlılaştırıcı boyar maddenin Ru gibi yabancı bir geçiş metaline sahip olması bu iyonlara sıkıca tutunmasını sağlamaktadır. Bu nedenle TiO<sub>2</sub> yapıyla bu şekilde bağ oluşturacak alternatif kompleksler araştırılmaktadır. Fenolik bileşiklerin ve bu bileşiklerden biri olan galik asitin de yapısındaki OH iyonları sayesinde Ti<sup>4+</sup> iyonları ile kuvvetli bir şekilde kompleks oluşturduğu bilinmektedir. Galik asitin TiO<sub>2</sub> yüzeyindeki kimyasal adsorpsiyonu ile oluşan yüzey komplekslerinin olası yapıları Şekil 2.13'te görülmektedir. Bu bağlamda galik asit gibi fenolik maddelerle duyarlı hale getirilen TiO<sub>2</sub> mikro gözenekli elektrotlarla yüksek fotoakım elde edilebildiği tespit edilmiştir [185].



**Şekil 2.13.** Galik asitin TiO<sub>2</sub> üzerindeki kimyasal adsorpsiyonu ile oluşan yüzey komplekslerinin olası yapıları [186].

Aynı çalışmada [185] TiO<sub>2</sub> tabakası galik asit solüsyonuyla muamele edildiğinde yüzeyde kompleks oluşumu esnasında karakteristik olarak sarımsı kahverengi bir renk oluştuğu ve galik asitle duyarlılaştırılmış fotoelektroda ait absorpsiyon eğrisinin 435 ve 480 nm'de tepe noktalar verdiği gözlenmiştir. Bu durumda üretilen fotoakımın artırılması ve daha geniş bir absorpsiyon bölgesini taraması amacıyla geniş spektrumlu bir boyar madde ile birlikte

kullanılması önerilmiştir.

### **2.3.5. DSSC'lerde Arka Elektrot**

DSSC yapımında kullanılan arka elektrot, TiO<sub>2</sub> kaplı fotoelektrot kadar büyük öneme sahiptir. Arka elektrotun görevi harici devreden gelen elektronları tekrar redoks elektrolitine aktarmaktır. DSSC'de bir materyalin arka elektrot olarak kullanılabilmesinin ön şartı, duyarlılaştırıcı boyanın oksitlenmiş formunun indirgenmesi için düşük bir yük transfer direncine ve redoks çiftinin indirgenmesi için gerekli katalizör etkiye sahip olmasıdır [53]. DSSC'de arka elektrot üzerine kaplanan ve katalizör görevi yapan en yaygın malzeme Pt'dir. Fakat Pt'nin iyot içeren elektrolit sıvısı ile etkileşerek zamanla yapısının bozulması pil verimliliğini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Ayrıca Pt, DSSC verimliliğinde iyi bir performansla sahip olmasına rağmen oldukça pahalıdır. Bu nedenle maliyeti düşürmek için yeni tip arka elektrotlara ihtiyaç duyulmuştur. Bu anlamda yapılan çalışmalarda arka elektrotta, Pt yerine C, bazı polimerler ve paslanmaz çelik, Cu, Ni, Al gibi bazı metallerin ince filmleri kullanılmıştır [187]. Anılan bu materyallerden C, Pt'ye göre daha ucuzdur ve sıvı elektrolitte bulunan iyodun indirgenmesi için gerekli olan yeterli iletkenliğe, pil içindeki korozyon direncine ve elektrokatalizör aktiviteye sahiptir. Fakat bu elektrotlarla elde edilen pil verimliliği Pt kaplı elektrotla elde edilen verimlilikten daha düşük ölçülmüştür.

### **2.3.6. Redoks Elektroliti**

DSSC yapısında hücrenin anot ve katot kısımları arasında redoks elektroliti bulunmaktadır. Redoks elektroliti redoks sistemi içeren bir çözelti olup temel işlevi, uyarılmış boya moleküllerini yeniden indirgemek ve arka elektrotta elektronlarla birleşmek üzere delik transferini gerçekleştirmektir. Elektrolit, redoks reaksiyonu ya da doğrudan delik taşıma yoluyla işlevini yerine getirerek güneş pillerinin kararlılığı ve dönüşüm verimliliği üzerinde etki sahibi olmaktadır. Yapılarına göre sıvı, yarı katı ve katı elektrolit olarak DSSC'lerde kullanılan elektrolitler 3 gruba ayrılmaktadır [188]. Sıvı elektrolitler, organik çözücülü ve iyonik sıvı elektrolit olmak üzere kullanılan çözücüye göre ikiye ayrılmaktadır. Organik çözücülü elektrolitler yüksek akışkanlıkları nedeniyle nanokristal film elektrotta hızlı ve etkili yayılmaları, iyon difüzyonlarının oldukça hızlı oluşu, kolay hazırlanmaları ve yüksek verimlilikleri nedeniyle DSSC'lerde geniş oranda kullanılmakta ve araştırılmaktadır [189]. Organik çözücü sıvı, redoks çiftlerinin çözünmesi ve difüzyonu için ortam sağladığından elektrolitlerin ana bileşenidir. Ayrıca elektrolitin donör (verici) sayısı, akışkanlığı ve dielektrik sabiti gibi fiziksel özellikleri de pil performansını etkilemektedir [190]. Sıvı elektrolit esaslı organik solvent genellikle yüksek iyonik iletkenliğe ve mükemmel arayüzey

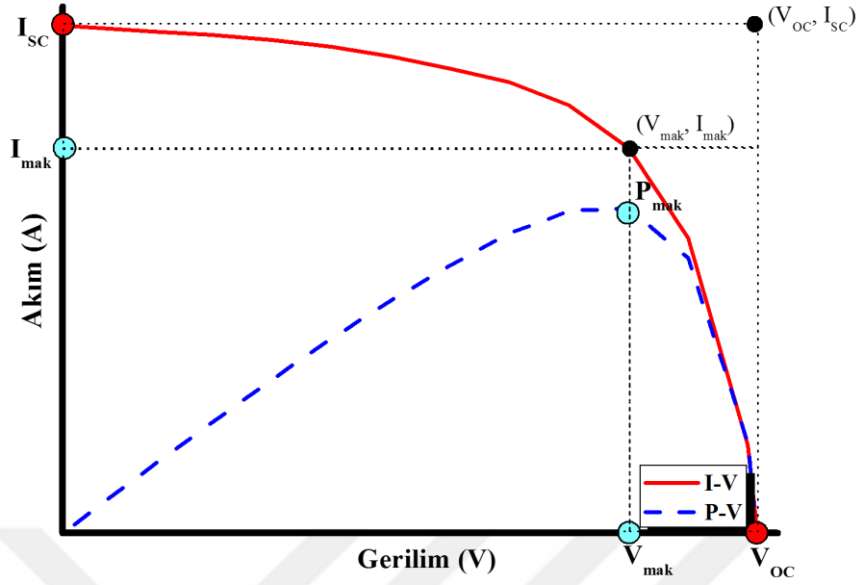
temas özelliğine sahiptir [53]. İyonik sıvı elektrolitler daha iyi kimyasal ve ısıl kararlılığa sahip olmasına rağmen en verimli DSSC'ler, sızıntı riskine rağmen hızlı iyon difüzyonu nedeniyle organik çözücü içeren sıvı elektrolitlerden elde edilmiştir [140, 191].

DSSC'de kullanılan elektrolit çoğunlukla  $TiO_2$  fotoelektrot ile arka elektrot arasındaki elektronlara aracılık eden redoks çiftleri içermektedir. Elektrolitlerde sık kullanılan redoks çiftleri  $I^-/I_3^-$  çiftleridir. Daha yüksek kısa devre akımı elde etmek ve/veya elektron-delik rekombinasyonunu bastırmak için çözücüye, Li iyonu, 4-tert-bütilpiridin (TBP), N-metilbenzimidazol (NMBI) gibi çeşitli katkı maddeleri eklenmektedir [140]. Redoks çifti olarak Co(II) ve Co(III) [192],  $(Br^-/Br_2)$  çifti ve hidrokinon gibi çeşitli elementler DSSC'lerde elektrolit olarak kullanılmak üzere araştırılmış fakat en iyi performans  $I^-/I_3^-$  esaslı redoks elektroliti ile elde edilmiştir [114].

Elektron enjeksiyonunun elektrolitin indirgenme kabiliyetine önemli ölçüde bağlı olması nedeniyle  $J_{SC}$  ve  $V_{OC}$  değerleri elektrolitten önemli ölçüde etkilenmektedir.

#### **2.4. Güneş Hücrelerine Ait Temel Tanımlar ve Cihazın Elektriksel Karakteristiğinin Elde Edilmesi**

Açık devre gerilimi ( $V_{OC}$ ): Akım sıfır olduğu anda devrede görülen ve deneysel olarak akım-gerilim grafiği üzerinde okunan gerilime açık devre gerilimi denmektedir. Bu değer belirli bir aydınlatma altında aygıt tarafından üretilen en yüksek gerilim değeridir. Aktif tabaka olarak kullanılan malzemelerin özelliğine ve TCO kaplamının iletkenliğine bağlı olarak değişim gösterebilmektedir [163]. Bir DSSC'ye ait tipik bir akım-gerilim karakteristiği Şekil 2.14'te verilmiştir.



**Şekil 2.14.** Fotovoltaik hücrenin akım-gerilim karakteristiği

*Kısa devre akımı ( $I_{sc}$ ):* Aydınlatma altında gerilim sıfır olduğu anda devrede oluşan akım değeridir. Işık şiddeti, dalga boyu gibi etmenlere bağlı olmakla birlikte güneş pili tasarımında önemli bir parametredir [163]. Birim alandan elde edilen kısa devre akımı, akım yoğunluğu olarak anılmakta ve  $J_{sc}$  terimi ile ifade edilmektedir.

*Dolum faktörü (FF):* Güneş pilinin kalitesini belirlemek için kullanılan ve I-V eğrisinin şekli ile ilgili olan bir parametredir. Dolum faktörü ideal olarak 1 olmalıdır. Üretilen maksimum gücün ( $I_m \times V_m$ ),  $I_{sc} \times V_{oc}$  çarpımına oranı dolum faktörünü vermektedir. Dolum faktörü 1'e ne kadar yakınsa güneş pili o kadar verimli çalışıyor demektir. Hücrenin dolum faktörü eşitlik (2.11) kullanılarak hesaplanmaktadır [163]:

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad (2.11)$$

*Maksimum güç noktası ( $P_{MAX}$ ):* Güneş pili tarafından üretilen güç,  $P$ ;  $I$  ile  $V$ 'nin çarpımı olarak tanımlanmaktadır. Belirli bir ışık miktarı altında pil tarafından yüke uygulanan akım ve gerilim çarpımının maksimum olduğu noktadır [163]. Bu nedenle belirli bir akım ve gerilim değeri için I-V eğrisi altında kalan dikdörtgenin alanı tanımlanmaktadır [107].

$$P_{MAX} = V_m I_m \quad (2.12)$$

*Verim (Enerji dönüşüm verimliliği -  $\eta$ ):* Maksimum güç noktasındaki elektriksel gücün optik güce oranı olarak tanımlanmaktadır [163]. Bir başka deyişle pilden alınan gücün pile aydınlatma olarak verilen güce oranıdır. Bir güneş pilinin enerji dönüşüm verimliliği, güneş enerjisinden kaynaklanan ışınının ne kadarının elektrik enerjisine dönüştürüldüğünün ve

dolayısıyla güneş hücresinin ne kadar verimli çalıştığının bir ölçüsüdür [107]:

$$\eta(\%) = \frac{P_{MAX}}{P_{in}} 100 = \frac{V_{OC} I_{SC} FF}{P_{in}} 100 \quad (2.13)$$

Güneş pillerini sınıflandırmak için test edilmeleri gerekmektedir. Güneş pilleri, belirli bir hücre sıcaklığında, belli bir spektral dağılımla aydınlatıldığında ürettiği gerilim ve akımla karakterize edilmektedir. Güneş pilini karakterize etmek için bir  $I$ - $V$  eğrisi kullanılmakta ve  $I$  akımı  $V$  geriliminin fonksiyonu olarak görüntülenmektedir. Güneş pillerinin performansı, standart test koşulları (STC) altında değerlendirilmektedir. Standart test koşulları; 25°C'lik hücre sıcaklığı ve AM 1.5 standart spektral enerji dağılımına sahip 1000 W/m<sup>2</sup> yoğunluktaki ışınım koşullarıdır. Bu koşullar 1 SUN olarak nitelendirilmektedir [193].

## 2.5. Fotodedektörler

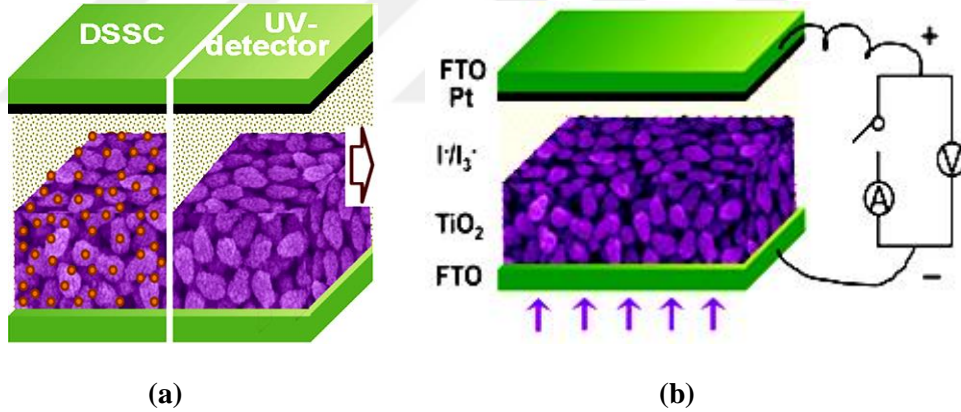
Fotodedektörler temelde aydınlatma altında görünür bölgede veya spesifik olarak hassas oldukları absorpsiyon bölgesinde foton enerjisini elektriksel akım ya da gerilime dönüştüren, bu sayede algılama yapılmasını sağlayan optoelektronik elemanlardır. Fotodedektörler evlerde, endüstride ve akademik araştırmalarda geniş çaplı kullanım alanına sahiptir. Bunlar arasında UV fotodetektörler, kimyasal analiz, su arıtma, alev algılama, erken füze kümeleri algılama gibi çok çeşitli alanlardaki potansiyel uygulamalar için popüler bir araştırma konusu olmuştur [194]. UV sistemlerde olduğu gibi IR bölgeye hassas olan cihazların geliştirilmesi de çeşitli uygulamalarda kullanılmaları nedeniyle önemli bir araştırma alanı olmayı sürdürmektedir [195].

Standart UV fotodedektörlerin kullanılabilmesi için UV dışındaki spektrumu filtreleyecek yapılarla birlikte kullanılması gerekmektedir. Filtrelerin kullanılmasını önlemek için son yıllarda GaN, SiC, ZnO ve TiO<sub>2</sub> [194] gibi geniş bant aralığına sahip yarıiletkenler, fotodedektör yapılarında yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Geleneksel UV fotodedektörlerin tipik örnekleri,  $p$ - $n$  eklemlere,  $p$ - $i$ - $n$  fotodiyotlara, Schottky bariyere, metal-yarıiletken-metal yapılara ve metal-yalıtkan-yarıiletken yapılara dayanmaktadır [196-202]. Bu fotodedektörler, yapı içerisinde üretilen elektron-delik çiftlerinin rekombinasyonunu önlemek için tipik olarak harici bir besleme kaynağı gerektirmektedir. Büyük miktarda UV fotodedektör içeren geniş alanlı sistemler için ana zorluklardan biri ihtiyaç duydukları bu enerji kaynağıdır [194]. Son zamanlarda, harici bir güç kaynağı olmadan kendi kendine çalışabilen sistemler gittikçe daha fazla dikkat çekmektedir [202-205]. Bu nedenle UV-seçici dedektörleri geliştirmek için ucuz ve basit sensör üretimi

araştırmaları devam etmektedir [206].

Diğer yandan yaygın olarak kullanılmakta olan düşük bant aralığına sahip yarıiletkenlerle üretilen klasik yapıdaki IR dedektörler, iyi bir sinyal-gürültü performansı ve çok düşük tepki süreleri sergilemektedir. Bununla birlikte, bu tip dedektörlerde kullanılan yarıiletken bileşenler de termoelektrik soğutmaya ihtiyaç duymaktadır. Bu dezavantajları giderecek yeni yöntemler bulunması konusunda çalışmalar sürmektedir.

Güneş hücresi gibi fotovoltaik cihazlar, ışık enerjisini yarıiletken malzemelerdeki bir foton-elektron uyarma prosesi ile elektriğe dönüştürürler, bu nedenle harici güç kaynakları olmadan çalışabilen doğal fotodedektörlerdir [196]. Çeşitli fotovoltaikler arasında, DSSC'lere benzer bir konfigürasyona sahip fakat boya adsorpsiyonu gerektirmeyen UV bölgeye hassas, fotoelektrokimyasal hücreler (PECC), DSSC'lerle aynı avantajlara sahip olduğu için umut vericidir. Hatta Şekil 2.15'ten de açıkça görüldüğu üzere DSSC yapısında bulunan fotoduyarlılaştırıcı boyar maddeye ihtiyaç duymadığından dolayı daha ekonomiktir [206].

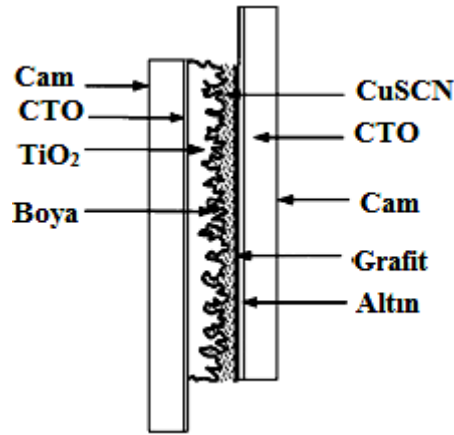


**Şekil 2.15.** (a) TiO<sub>2</sub> fotoanot kullanılarak üretilmiş PECC yapısında bir UV-fotodedektör ile DSSC yapısının karşılaştırılması, (b) PECC UV-fotodedektör yapısı [196]

PECC yapıları duyarlılaştırıcı boyar madde haricinde standart DSSC tasarımına sahiptir. PECC'ler, DSSC'lerde olduğu gibi aydınlatıldığında fotovoltaj üreten ve harici kapalı devre üzerinden fotoakım akıtan yarıiletken ve elektrolit esaslı cihazdır [206]. Bir güç kaynağı gerektirmeden kendi kendine çalışan, UV ışığı algılayan bir fotodedektör olan nanokristal TiO<sub>2</sub> film tabanlı PECC yapısının çalışması bir DSSC'nin çalışma prensibiyle benzerdir [206]. PECC üretiminde kullanılan TiO<sub>2</sub> hem yapısından dolayı hem de geniş bir bant aralığına sahip olduğu için doğal olarak UV bölgeye hassastır böylece bu sistemlerde harici UV filtrelere ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu durum, geleneksel Si dedektörlere kıyasla PECC fotodedektörlerin maliyetini daha da düşürmektedir. PECC türü cihazlar harici besleme

kaynağı gerektirmediğinden fotodedektör olarak kullanıldıklarında ihtiyaç duyulan elektrik devresi de büyük ölçüde basitleşmektedir. Bu tür fotodedektörlerin hassasiyetlerinin artırılması amacıyla üretiminde yarıiletken tabakaya katılan çeşitli nanoyapılar da kullanılabilir [194]. Literatürde özellikle son 10 yılda kendine araştırma alanı bulabilmiş olan bu konuda az sayıda çalışmaya rastlanabilmektedir.

DSSC'lerin IR fotodedektör olarak kullanılması da bu alanda çeşitli avantajlar sağlamaktadır. Ancak bu konuyla ilgili de yapılmış olan az sayıda çalışma incelendiğinde IR bölgeye hassas duyarlılaştırıcılar (anyonik IR 783, IR820 ve katyonik IR 792, IR 1040, ... gibi) kullanılarak üretilen (Şekil 2.16) DSSC'lerin bu alanda da fotodedektör olarak kullanılmaya imkan sağladığı görülmüştür. Boyayla duyarlılaştırılmış yapılarda elektron enjeksiyonu için boya molekülünün, IR bölgeye hassas olması ve yarıiletkenin iletkenlik bandının üzerinde bir LUMO seviyesine sahip olması yeterlidir. Spektrumun yakın kızıl ötesi (NIR) bölgesinde foton absorbe eden boyalar, ticari duyarlılaştırıcılar veya lazer boyalar olarak kullanılabilir [195]. Son zamanlarda NIR duyarlılığa sahip organik fotodedektörler araştırılmaya başlanmıştır [207]. Çözeltiler, duyarlılaştırıcı boyar maddeler ve yarıiletkenler de dahil olmak üzere organik materyallerden oluşan fotodedektörler, geniş alanlı üretimlerde düşük maliyet potansiyeli nedeniyle araştırma konusu olarak kayda değer bir ilgi çekmesine rağmen [208] bu konudaki çalışmalar henüz deneme aşamasında ve oldukça azdır.



**Şekil 2.16.** DSSC yapısıyla oluşturulmuş bir yakın kızılötesi (NIR) fotodedektör [195]

Termal gürültüye hassas olmayan yarıiletkenlerin kullanılması ve boya seçimi ile spektral tepkime esnekliği kazanması DSSC'lerin bu anlamda avantajlarıdır [195]. Yapılan araştırmalar sonucunda tespit edilen DSSC'lerin performansının oldukça düşük ışık koşullarında ve ışığın geliş açısına bağlı olarak azalma durumunun Si güneş piline karşı

gösterdikleri üstün başarı [88] fotodetektör olarak kullanılmaları için ilgi çeken bir konu olmuştur. Bu yönleriyle DSSC'ler diğer güneş hücresi türlerine göre benzersiz özelliklere sahiptir. Daha önce de bahsedildiği üzere Si güneş hücresi, yapısal ve elektriksel özelliklerinden dolayı dağınık ışık veya düşük ışık şiddeti altında çalışmamaktadır. Ancak aynı şartlar altında DSSC'ler iyi bir performansla çalıştığını ispatlamıştır. Bu çalışma kapsamında doğal boyalardan üretilen ve fotodetektör olarak da kullanılabilir olan DSSC'lerin, aydınlatma şiddeti ve ortam sıcaklığı değiştirilerek çeşitli çalışma koşullarında incelenmesi ve bu açıdan da karakterize edilmesi hedeflenmiştir. Bu amaç kapsamında üretilen doğal boyalı DSSC'ler ile ticari olarak satın alınan tek kristal Si sensör aynı şartlar altında performans açısından karşılaştırılmıştır.





### 3. MALZEME ve YÖNTEM

Bu bölümde, yapılan deneysel çalışmalarda kullanılan malzemeler, teknikler ve izlenen yöntemler verilmektedir. İlk olarak DSSC üretim süreci açıklanmakta daha sonra güneş hücrelerine ait karakteristik parametrelerin belirlenmesinde önemli rol oynayan ölçüm teknikleri üzerinde durulmaktadır.

#### 3.1. DSSC Üretim Süreci

Aşağıda başlıklar halinde detayları verilen DSSC üretim basamakları; fotoelektrodun üretimi, doğal boya ekstraktlarının hazırlanması, arka elektrodun oluşturulması ve iki elektrodun elektrolit sıvısı içeren sandviç yapıda birleştirilmesi işlemleri şeklindedir.

##### 3.1.1. Fotoelektrodun Hazırlanması

Tez kapsamında Şekil 3.1'de gösterilen AGC SOLAR-AN 10 elektriksel iletken ve optik geçirgen FTO kaplı, direnci  $R_s = 10 \Omega/\text{sq}$  değerinde (bulanıklık değeri  $> \% 10$ ), 3.2 mm kalınlığında ve 25x75 mm ebatlarında mikroskop camlar kullanılarak çalışmalar yürütülmüştür.



**Şekil 3.1.** Deneysel çalışmada kullanılan FTO kaplı cam

Pil üretimleri ilk olarak elektrotları oluşturacak olan camların kesilmesi ve temizlenmesi ile başlamaktadır. Yaklaşık 25x25 mm ebatlarında kesilen FTO kaplı camlar ultrasonik banyoda trikloretilen, aseton, metanol ve de-iyonize suyla beşer dakika yıkanarak kimyasal temizlikleri yapıldıktan sonra azot gazıyla kurutulmuştur.

Yüzey pürüzlülüğünün belirlenmesi amacıyla FTO kaplı cama ait yüzey görüntüleri Bölüm 3.6.2'de açıklanan yöntem kullanılarak AFM ile elde edilmiştir. Ayrıca iletken kaplı camların optik geçirgenliklerinin de belirlenmesi amacıyla Şekil 3.2'de görülen Hach Lange Dr 5000 UV-VIS spektrofotometre cihazı ile elde edilen absorbanans grafiği incelenmiştir.



**Şekil 3.2.** Hach Lange DR 5000 UV-VIS spektrofotometre cihazı

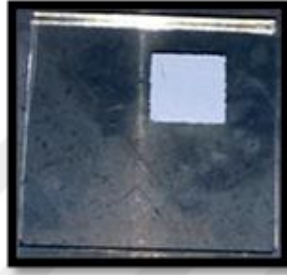
TiCl<sub>4</sub>, de-iyonize su ile karıştırılarak 40 mM TiCl<sub>4</sub> çözeltisi hazırlanmıştır. Hazırlanan bu çözeltiye daldırılan FTO kaplı camlar 70 °C’de 30 dk bekletilmiştir. Daha sonra ilk sinterleme işlemi; fırın sıcaklığı 100-200-300-350 °C’ye kademeli olarak artırılarak 300 °C’de 5 dk, 350 °C’de 5 dk, 450 °C’de 15 dk ve 550 °C’de 15 dk olmak suretiyle atmosfer ortamında gerçekleştirilmiştir. Bu işlem TiO<sub>2</sub> tabakası ile FTO yüzeyi arasındaki temasın artmasını sağlaması açısından önemli bir basamaktır.

TiCl<sub>4</sub> aşamasından sonra FTO kaplı camların iletken yüzeyi avometre ile tespit edilerek bu yüzey üzerinde TiO<sub>2</sub> tabakasının oluşturulacağı karesel alan bantlar yardımıyla belirlenmiştir. İstenilen kalınlıklarda yarıiletken nanoyapılı TiO<sub>2</sub> ince filmler üretilirken, kimyasal solüsyon şeklinde hazırlanan TiO<sub>2</sub> pastanın cam altlıklara kaplanmasında kullanılan yaygın teknikler arasında spin kaplama, daldırma, doktor-blade, serigrafî, elektroforetik çökeltme ve bant döküm yöntemleri bulunmaktadır [53]. Bu çalışmada yöntem olarak doctor-blade tercih edilmiştir. İletken yüzey üzerinde bantlar yardımıyla hazırlanan 6x6 mm (36 mm<sup>2</sup>)’lik karesel alana bir miktar TiO<sub>2</sub> pasta konularak cam bir çubuk veya ağzı düz bir bıçak yardımıyla yayılması şeklindeki proses doctor-blade yöntemi olarak tanımlanmaktadır. Bu işlem TiO<sub>2</sub> pasta ile homojen bir yüzey elde edilinceye kadar tekrarlanmıştır.

Üretilen DSSC’lerde *n*-tipi elektrot görevini yapan TiO<sub>2</sub> tabakanın oluşturulması için TiO<sub>2</sub> pasta literatürde bulunan değişik tarifler doğrultusunda hazırlanmış, ancak aşağıda ifade edilen tarif konusunda daha verimli sonuçlar elde edildiği görülmüştür. TiO<sub>2</sub> pastanın tarifi; Titanium (IV) oxide, rutile (Sigma-Aldrich), Triton X100 (Merck 10860), Noniyonik YAM (1,07 g/ml) ve % 32.5 saflıkta nitrik asit kullanılarak koyu bulamaç kıvamında hazırlanacak şekilde tatbik edilmiştir. Verimin artırılması amacıyla oluşturulan TiO<sub>2</sub> pastanın hazırlanması aşamasında değişik asitler ve çeşitli kimyasallar da ilave edilmiştir. Fakat daha sonrasında literatür verilerine göre anataz formdaki TiO<sub>2</sub> ile hazırlanan pasta kullanıldığında daha yüksek verim değerleri elde edildiği belirlenerek, Titania Paste Active Opaque (Sigma

Aldrich)  $TiO_2$  pasta ile çalışmalar sürdürülmüştür.

Çerçeveyi oluşturan bantlar çıkarılarak  $125\text{ }^\circ\text{C}$ ' de 6 dk süreyle ısıtıcı tabla üzerinde  $TiO_2$  pasta kurutulduktan sonra ikinci sinterleme işlemine geçilmiştir. Sinterleme işlemi; fırın sıcaklığı  $100-200-300-350\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kademeli olarak arttırılarak ve sonrasında  $300\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 5 dk,  $350\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 5 dk,  $450\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 15 dk ve  $550\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 15 dk bekletilmek suretiyle atmosfer ortamında gerçekleştirilmiştir. İşlem sonunda cam slayt üzerinde oluşturulan  $TiO_2$  film Şekil 3.3'te görülen hali almıştır.



**Şekil 3.3.** FTO kaplı cam yüzeyinde oluşturulan  $TiO_2$  film

$TiO_2$  filmler üretilirken dikkat edilmesi gereken en önemli noktalardan biri; pasta hazırlanırken kullanılan çeşitli kimyasallar, organik kalıntılar ve diğer kontaminasyon ürünleriyle birlikte, nemin ortamdan tamamen uzaklaştırılmasının sağlanması ve en önemlisi de yüzey pürüzlülüğünün (porozite) arttırılması amacıyla alttık üzerinde hazırlanan ince filmlerin ortalama  $450-500\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıkta sinterlenmesidir. Sinterleme süresi kabaca 10-15 dk arasındadır.  $TiO_2$  tabaka, beyaz renkten kahverengimsi bir renge dönüştükten sonra sinterleme işleminin başarılı bir şekilde sona ermesinin ardından eski doğal beyaz renge geri dönmektedir. Tabakanın çatlamasına, ayrılmasına veya yapraklanmasına neden olabilecek aşırı termal streslerden kaçınmak için sinterleme işlemi yavaş yavaş ilerletilmeli ve sinterlemeden sonra hazırlanan elektrot ortalama  $50-60\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklığa gelinceye kadar kendi halinde ısıtıcı içerisinde ağır ağır soğutulmalıdır. Şekil 3.4'te sinterleme işlemlerinde kullanılan tüp fırın görülmektedir.



**Şekil 3.4.** Sinterleme işlemlerinde kullanılan tüp fırın

Oluşturulan TiO<sub>2</sub> tabakasının yüzey görüntüleri Bölüm 3.2.1’de açıklanan SEM (taramalı elektron mikroskobu) yöntemi kullanılarak alınmış ve incelenmiştir.

### 3.1.2. Doğal Boyaların Ekstraksiyonu

Bu tez çalışmasında duyarlılaştırıcı boyar madde üretmek amacıyla Şekil 3.5’te görülen iki farklı tür pelargonium bitkisine ait taze çiçekler toplanmış, çiçeklerin taç yaprakları deiyonize suyla yıkandıktan sonra çöpleri ayıklanmış ve çiçekler karanlık bir ortamda oda sıcaklığında kurutulmuştur.



(a)

(b)

**Şekil 3.5.** Pelargonium Grandiflorum (a) ve Pelargonium Hortorum (b) bitkilerine ait fotoğraflar

Havan yardımıyla toz haline getirildikten sonra duyarlılaştırıcı boyar madde ekstraktı elde edilmesi için 5 g pelargonium çiçek tozu, 50 mL de-iyonize suya ilave edilmiş ve yaklaşık 100 °C’ye kadar ısıtılmıştır. Gece boyunca yaklaşık 10 saat yine karanlık bir ortamda, oda sıcaklığında bekletilmiştir. Bu özütlerden berrak boya çözeltileri elde edilmesi için çiçek tozlarından oluşan katı tortu süzülmüştür.

Koyu mor ve kırmızı renkte elde edilen ekstraktların suyundan arındırılması gerekmektedir birlikte doğal ve organik bir madde olduğundan yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmamalıdır. Bu amaçla elde edilmiş olan su bazlı boya solüsyonu balon jojeye konularak yaklaşık 40-50 °C sıcaklıktaki su içerisinde sürekli döndürülerek vakum etkisiyle içerisindeki suyun buhar olarak elde edilip yoğunlaştırıldığı sistem olan damıtma (destilasyon) sistemi (Şekil 3.6) yardımıyla tamamen suyundan arındırılarak katı halde yine koyu mor ve kırmızı renkte boyar maddeler elde edilmiştir.



**Şekil 3.6.** Destilasyon cihazı

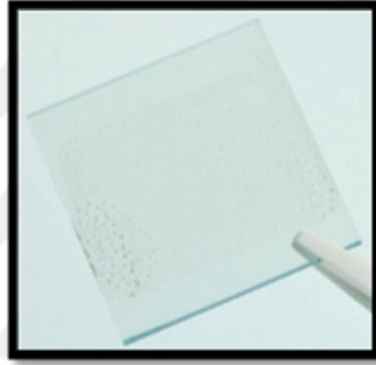
Katı boyar maddeler, GS-MS analizleri ve DSSC'lerin imalatı için etanol içerisinde çözülmüştür. Shimadzu OP2010 Ultra GC-MS cihazıyla boyar maddelerin içerik tayinleri yapılmıştır.

Boyar madde solüsyonları Pelargonium Grandiflorum için P1, Pelargonium Hortorum için P2 olarak kodlanmıştır. Etanolde çözülmüş olan boya solüsyonları içerisine, sinterleme işleminden sonra 50 °C'ye kadar soğumuş olan, üzerinde TiO<sub>2</sub> tabaka oluşturulmuş camlar daldırılmış ve 24 saat karanlık bir ortamda oda sıcaklığında bekletilmiştir. TiO<sub>2</sub> nanopartiküllü tabakanın başarılı bir şekilde boyandığı gözlenmiştir. Dikkatlice etanolla yıkanarak boyar maddenin fazlalıklarından arındırılan ve fotoelektrot olarak kullanılmaya hazır olan numune sıcak havayla kurutulmuştur.

### **3.1.3. Arka Elektrodun Oluşturulması**

Arka elektrot; FTO kaplı cam üzerine karbon veya platin pasta kaplanarak oluşturulmaktadır. Kaplama istenirse sinterleme işlemine tabi tutulabilmektedir. Pt pasta olarak Sigma Aldrich firmasından temin edilen Screen printable-Platinum paste, kullanılarak çalışmalar sürdürülmüştür. FTO kaplı cam yüzeyine sürülen Pt pasta 125 °C' de 6 dk süreyle ısıtıcı

tabla üzerinde kurutulduktan sonra sinterleme işlemine geçilmiştir. Sinterleme işlemi; fırın sıcaklığı 100-200-300-350 °C'ye kademeli olarak artırılarak ve sonrasında 300 °C'de 5 dk, 350 °C'de 5 dk ve 420 °C'de 15 dk bekletilmek suretiyle atmosfer ortamında gerçekleştirilmiştir. İşlem sonunda cam altlık üzerinde şeffaf bir hal alan Pt film Şekil 3.7'de görülmektedir. Kaplamanın elektriksel direnci Keithley 2100 serisi çoklu ölçerle incelenmiş 1 cm'lik aralıkta 1 ohm'dan daha küçük olduğu gözlenmiştir. Elde edilen elektrot için en önemli parametre katalitik aktivite olduğundan Pt tabakanın katalitik aktivitesi elektrot üzerine damlatılan % 30 sulu çözelti halindeki bir damla hidrojen peroksit ile test edilebilmektedir. Yüzeyde oluşan kabarcıklar, Pt tabakanın uygun şekilde oluşturulduğunu ve katalitik aktiviteye sahip olduğunu göstermektedir.



**Şekil 3.7.** İletken yüzey üzerinde oluşturulmuş Pt tabakası

#### **3.1.4. Redoks Elektrolitinin Oluşturulması**

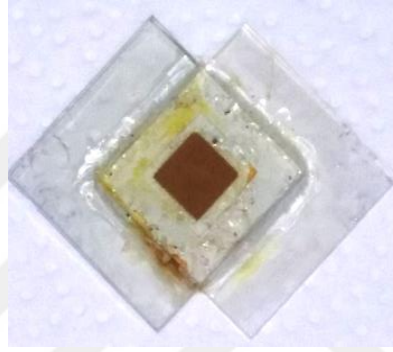
Bu çalışmada DSSC'lerde kullanılmak üzere hazırlanan Şekil 3.8'deki sıvı elektrolit, asetonitril ve valeronitril karışımına manyetik karıştırıcıda 6 M N'butyl-N'methylimidazolium iodide (BMII), 0.1 M LiI, 0.5 M 4-tert-butylpyridine (TBP) ve 0.05 M I<sub>2</sub> eklenerek [209] oluşturulmuştur.



**Şekil 3.8.** DSSC'de kullanılmak üzere hazırlanan sıvı redoks elektroliti

### 3.1.5. Elektrotların Birleştirilmesi ve Pile Son Şeklinin Verilmesi

Organik- doğal boyar maddeyle boyanan fotoelektrotta boyalı, karesel kısım boş bırakılmak üzere (aktif alan 36 mm<sup>2</sup>) çerçeve şeklinde hazırlanan, ısıyla yapışma özelliğine sahip termoplastik malzeme (Meltonix 1170-60 sealing film) cam üzerine yerleştirilip, Pt kaplı arka elektrotla sandviç geometride birleştirilerek, ortada kalan boş kısma LiI katkılı elektrolit çözeltisi enjekte edilmiştir. Termoplastik malzeme ısıtılarak elektrotlar birbirine sabitlenmiştir. Termoplastik malzeme elektrotları birbirine tuttururken aralarındaki mesafenin sabit kalmasını da sağlamaktadır. Üretilen DSSC Şekil 3.9'da gösterilmiştir.

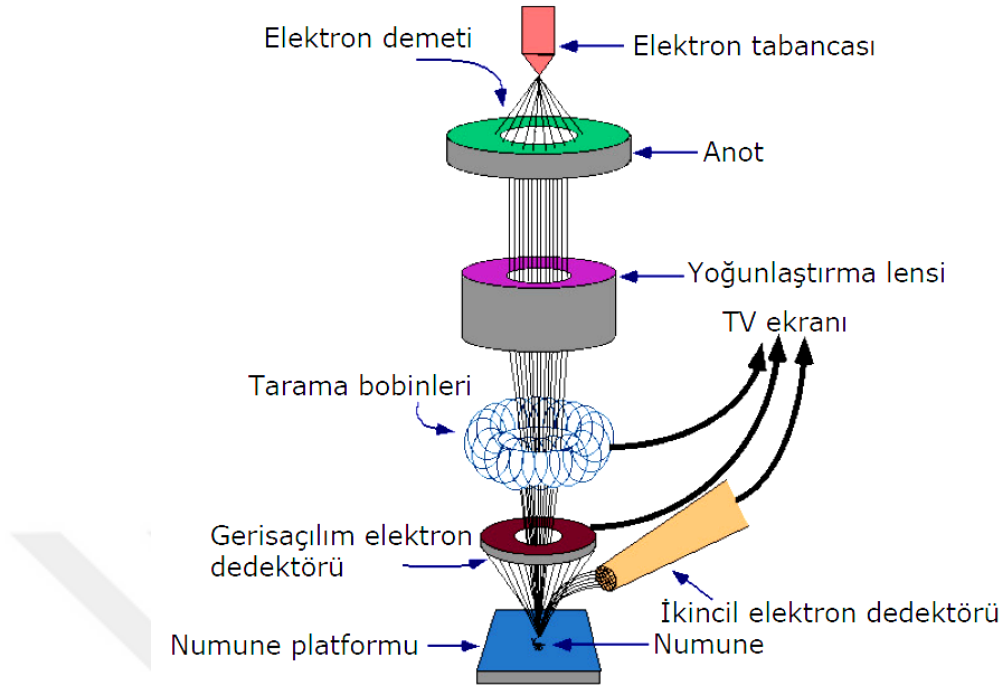


Şekil 3.9. Üretilen DSSC

## 3.2. Analiz Yöntemleri

### 3.2.1. SEM Analizi

Yüzeyin topografik yapısının elde edilebilmesi için Şekil 3.10'da içyapısı ve çalışma prensibi verilen taramalı elektron mikroskopu kullanılmaktadır. Taramalı elektron mikroskopu (SEM) çok küçük alanlarda ve yüzey derinliklerinde, çukur ve tümsek yüzey şekillerinin görüntülenmesi için kullanılan bir yöntemdir.

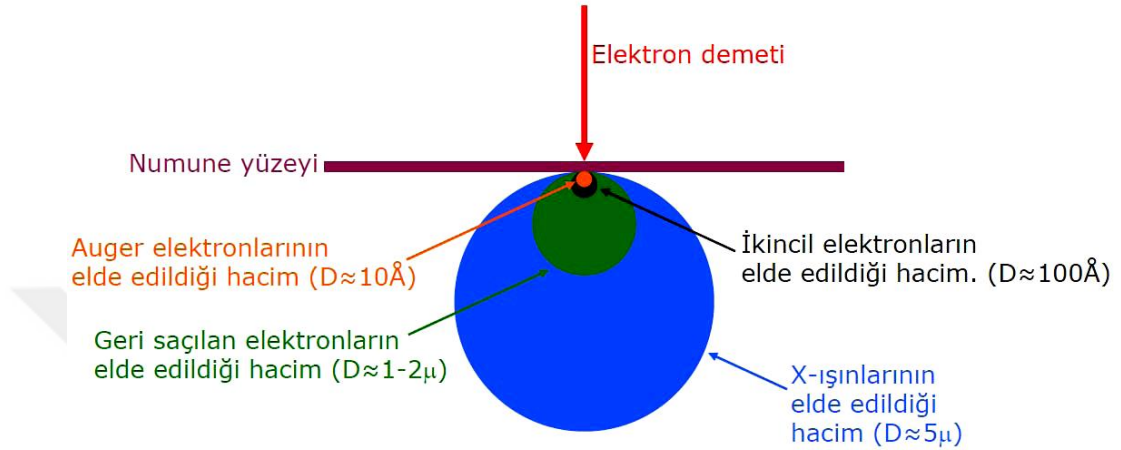


**Şekil 3.10.** Taramalı elektron mikroskobunun içyapısı ve çalışma prensibi [210]

SEM ölçümü esnasında düşük basınçta vakum altında çalışılmaktadır. Bunun nedeni elektromanyetik lensler kullanılarak inceltmiş ve belirli bir bölgeye odaklanmış olan elektron demetinin kaynak noktası olan elektron tabancası çevresinde oluşabilecek kontaminasyonun  $10^{-4}$  Pa kadarlık bir vakum etkisiyle önlenmesi ve yüzey yapısının daha net bir şekilde elde edilmesini sağlamaktır. Düşük basınç ise elektron tabancasının korozyona uğramadan rahatlıkla çalışması için gereklidir. Bu basınç değeri flaman türüne bağlı olarak  $10^{-5}$  ila  $10^{-9}$  Torr arasında değişmektedir. SEM analizi yapılabilmesi ve görüntü alınabilmesi için numunenin elektriksel olarak iletken olması ya da elektriksel iletkenliğe sahip olmayan numunelerin altın gibi iyi iletken bir elementle kaplanması gerekmektedir. Flaman elektrik akımı uygulanarak ısıtılmakta ve flamanın uç kısmında bu ısı etkisiyle elektron bulutu oluşmaktadır. Numuneye doğru dikey doğrultuda yönelen elektron bulutu mercekle sistemleri ve elektromanyetik etkiyle inceltirilerek 1 keV ile 40 keV arasında enerji değerlerine sahip olan bu elektronlar numune üzerinde belirli bir noktaya odaklanmaktadır. Numune yüzeyine çarpan elektronlar Şekil 3.11’de gösterildiği gibi numune yüzeyinden yansıyan ikincil elektronları, geri yansıyan elektronları ve x-ışınlarını oluşturmaktadır ve bunlardan yararlanılarak analiz yapılmaktadır. Malzeme yüzeyinin 10 nm veya daha düşük derinliklerinden yansıyan yaklaşık 10 eV gibi düşük bir enerjiye sahip ikincil elektronlar ve ışınlar, dedektörler ve manyetik bobinler tarafından taranan yüzeyden algılanarak sinyal çoğaltıcıları ve katot ışın tüp ekranı sayesinde görüntü haline getirilmekte ve topografik



yapı görüntü olarak verilmektedir. Yüzey şekilleri özellikle ikincil elektronlardan gelen veriler ışığında belirlenmektedir. Bunun nedeni farklı derinliklerden gelen ikincil elektronların şiddetinin birbirine göre farklılık göstermesi ve böylece çukur ve tümsek bölgelerin belirlenmesidir [210].



**Şekil 3.11.** Taramalı elektron mikroskobunda elektron demeti-numune etkileşimi [210]

Oluşturulan TiO<sub>2</sub> tabakasının yüzey görüntüleri Şekil 3.12’de görülen FEI Quanta 450 FEG Alan Emisyonlu-Çevresel Taramalı Elektron Mikroskobu-Enerji Dağılım Spektrometresi (FE-ESEM-EDS) kullanılarak alınmıştır.

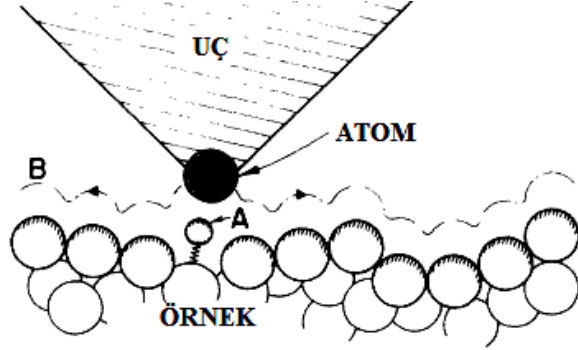


**Şekil 3.12.** TiO<sub>2</sub> tabakasının SEM görüntülerinin alınmasında kullanılan taramalı elektron mikroskobu

### 3.2.2. AFM Analizi

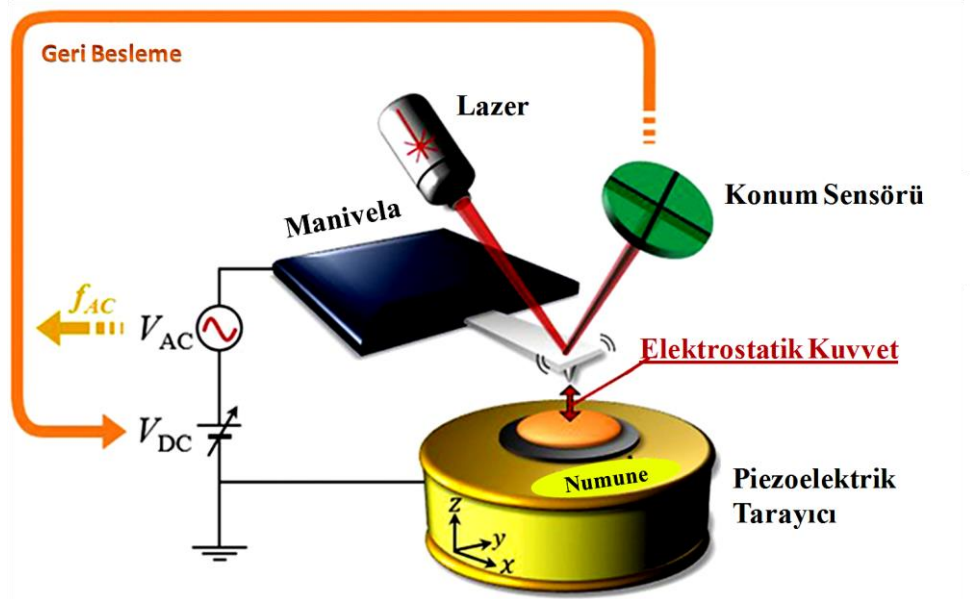
Atomik kuvvet mikroskobu (AKM-AFM) yüzey morfolojisinin tayininde ve ölçümünde nano boyutta görüntüleme yapabilen çok yüksek çözünürlüklü bir mikroskoptur. AKM 1980’de Binnig ve Rohrer [211] tarafından bulunmuştur. Şekil 3.13’te görüldüğü şekilde elmas bir gezici uç ve bu gezici ucun yatay yönde hareket ederken yüzeydeki çukur ve tümseklerle karşılaşması durumunda bağlı olduğu Si veya Si<sub>3</sub>N yapıları manivelaya yansıyan

nanonewton büyüklüğündeki kuvvetin miktarı ile derinlik ve yüksekliğin ölçülmesi mantığına dayanmaktadır.



Şekil 3.13. AFM'nin çalışma prensibi [211]

Uç yatay yönde hareket ederken bir tümsekle karşılaştığında bu kuvvet artmakta, tersi durumda ise kuvvet azalmaktadır. Cihazın çalışma prensibi bu kuvveti sabit tutma mantığına dayanmaktadır. Böylece manivelanın bu kuvveti sabit tutmak için tümsekler karşısında yukarı, çukurlar karşısında aşağı doğru yaptığı hareketle aldığı pozisyon ve hareket miktarı tümseklerin nisbi yüksekliğinin ve çukurların nisbi derinliğinin ölçüsüdür. Bu kuvvetlerin niceliği piezoelektrik malzeme kullanılarak elde edilmektedir. Şekil 3.14'te görülen yapıda, manivela üzerine gönderilen lazer ışınının manivelanın düşey yöndeki hareketiyle pozisyon sensörü üzerinde farklı bölgelere yansması sonucu hareket bilgisi ve miktarı bu pozisyon sensöründen alınmaktadır.



Şekil 3.14. FTO ve TiO<sub>2</sub> tabakasının topografi görüntülerinin alınmasında kullanılan AFM yapısının çalışma mantığı [212]

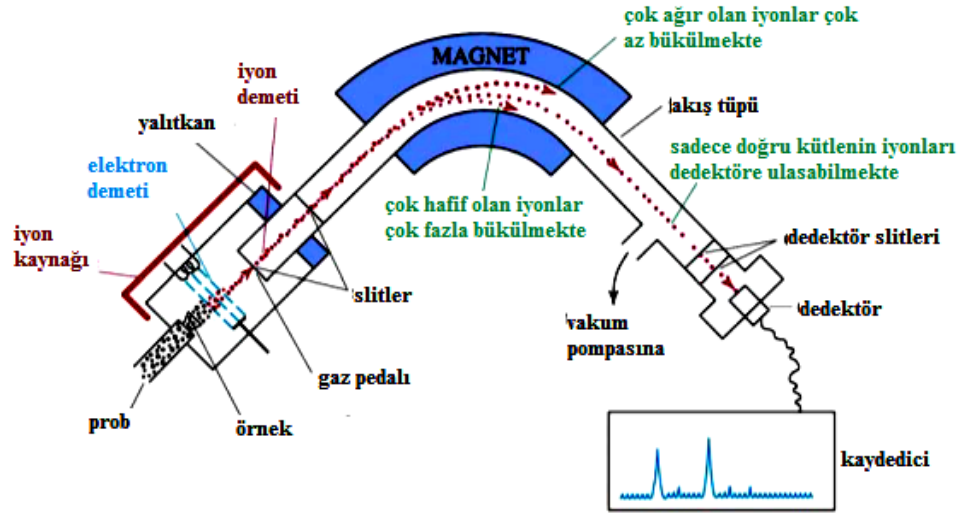
Bu yapı statik modda iş yapma mantığıyla çalışmaktadır. Daha ileri çalışmalarda dinamik çalışma modu ortaya çıkarılmış ve akustik veya manyetik yollarla pozisyonlandırılan bu yapıya, numune yüzeyine temas olmadan da ölçüm yapabilme yeteneği kazandırılmıştır. Bu yöntem yumuşak yüzeyli numunelerde numuneye hasar vermeden ölçüm yapma avantajı sağlamaktadır.

### **3.2.3. GC-MS Analizi**

Gaz kromatografisi (GC) ve kütle spektrometresi (MS) birbirinden farklı özelliklere sahip iki ayrı sistemdir. (GC/MS) cihazı ise bu iki sistemin birbirine göre avantajları birleştirilerek oluşturulmuş, kimyasal karışımları ayırt eden (GC bileşeni) ve bileşenleri moleküler düzeyde tanımlayan (MS bileşeni) iki güçlü analitik tekniğin kombinasyonuyla yapı analizi ve moleküler düzeyde miktar tayininde kullanılan bir cihazdır. MS birçok uçucu ve yarı uçucu bileşiği seçerek algılamasına rağmen aralarında ayırım yapamazken, GC karışımdaki bileşenleri ayırt ederek her bir bileşenin yapısal olarak tanımlanmasında yardımcı olmaktadır.

GC-MS sistemi çok bileşenli karışımlarda, düşük miktarlardaki elementlerin belirlenmesinde, gaz fazında bulunan ya da gazlaştırılabilen numunelerin, uçucu organik bileşiklerin, Royal Demolition Explosive (RDX) ve Trinitrotoluene (TNT) gibi patlayıcı bileşiklerin moleküler yapı tayinlerinde, alkaloidler, terpenler, steroidler ile petrol ürünlerinin nitel ve nicel analizinde kullanılabilen bir tekniktir. Ayrıca hızlı oluşu, ayırma gücünün yüksekliği, nitel- nicel analiz yapabilmesi ve hassasiyetin yüksekliği gibi önemli avantajları bulunan bu yöntem, adli tıpta ve uyuşturucu madde analizinde de sıkça kullanılmaktadır. Detaylı gıda analizleri, yağ analizleri ve ilaç sektörünün kalitatif ve kantitatif analizlerinde de yoğunlukla tercih edilmektedir.

Şekil 3.15'te yapısı verilen sistemde karışımdaki bileşenler birbirinden ayrıldıktan sonra iyonlaştırılarak, kütlelerine göre GC'de element tayini yapılmaktadır. MS ise karışımın ısıtılmasıyla yapısındaki bileşenlerin farklı sıcaklık değerlerinde birbirinden ayrılması prensibi üzerine çalışmaktadır.



Şekil 3.15. GC-MS Sistemi [213]

Isıtılmış gazlar, He gibi inert bir gaz akışı ile sütun boyunca sürülmektedir. Sıcaklık etkisiyle farklı zamanlarda kolona doğru hareket eden maddeler kolon açıklığından çıktıkça MS içine akmaktadır. MS, bileşikleri analit molekülünün kütlesi ile tanımlamaktadır. Bilinen kütle spektrumlarının binlerce bileşik içeren "kütüphanesi" sistemin bağlı olduğu bilgisayarda saklanmaktadır. GC'den ayrılarak MS'ye gönderilen bileşiklerin kromatogramları alınmakta ve her bir bileşiğin kütle spektrumu çekilerek kalitatif tayin çok daha kesin olarak yapılabilmektedir. MS dedektör ile örneğin tüm kromatogramı izlenerek kolonda alıkonma zamanı görülmekte ve en önemlisi her pikin kütle spektrumu belirlenebilmektedir [213, 214].



Şekil 3.16. GC-MS Sistemi analizlerinde kullanılan Shimadzu OP2010 Ultra GC-MS cihazının fotoğrafı

Katı boyar maddeler, GS-MS analizleri ve DSSC'lerin imalatı için etanol içerisinde

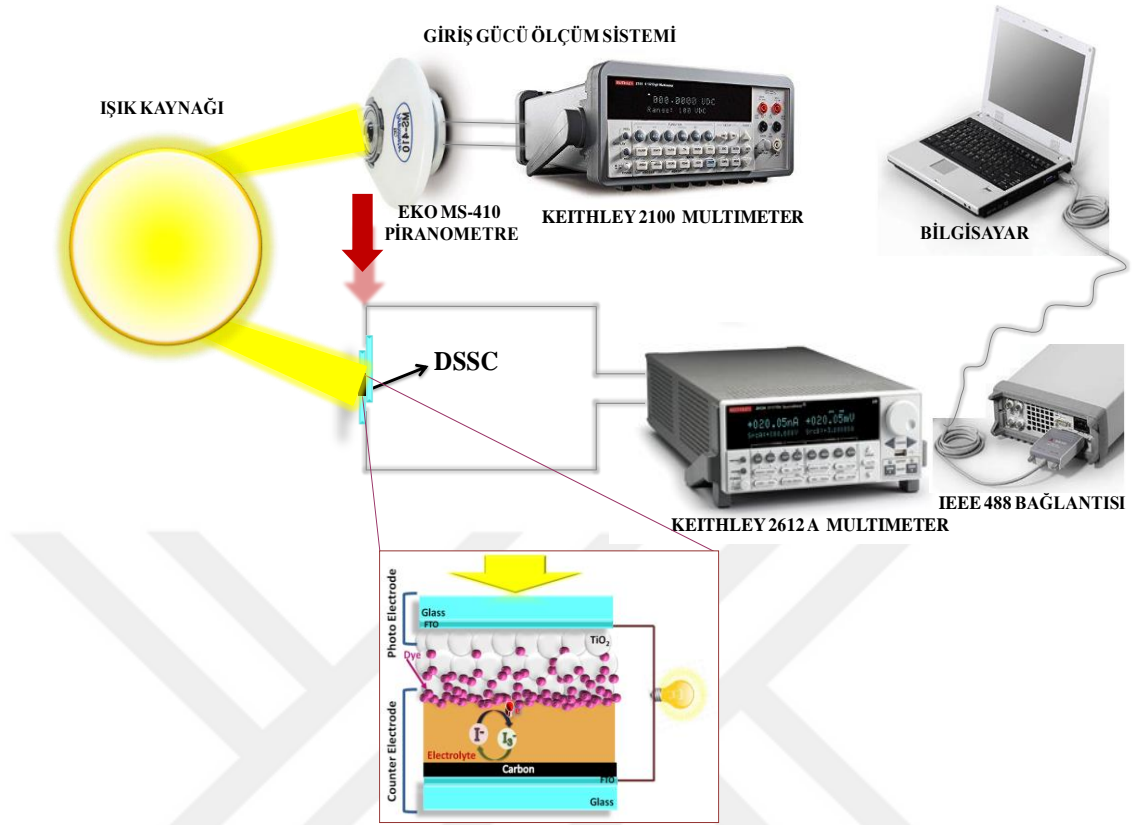
çözölmüş ve Şekil 3.16'da görölen Shimadzu OP2010 Ultra GC-MS cihazıyla boyar maddelerin içerik tayinleri yapılmıştır.

### **3.3. Ölçüm Sistemleri ve Analitik Hesaplama Yöntemi**

#### **3.3.1. I-V Ölçüm Sistemi**

Üretilen DSSC'lerin performans analizleri için I-V eğrilerinin elde edilmesinde Keithley 2612 A Multimeter cihazı kullanılmıştır. Her iki elektrottan kontaklar alınarak I-V grafiklerinin çizdirilmesi ve cihazın elektriksel karakteristiğinin belirlenmesi amaçlanmıştır. DSSC hücrelerinin kısa devre akım yoğunluğu, açık devre gerilimi, dolum faktörü, maksimum gücü, maksimum akım yoğunluğu ( $J_m$ ), maksimum gerilimi ( $V_m$ ), ve % verim gibi karakteristik parametreleri multimetreden alınan I-V eğrilerinden yararlanılarak elde edilmiştir.

Ölçümler laboratuvar ortamında oda sıcaklığında  $100 \text{ mW/cm}^2$  ışık şiddeti şartını sağlayacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.17'de görölen sistemde Keithley 2612 A Multimeter cihazı, güneş hücresi tarafından üretilen akım ve gerilimi ölçebilmektedir. Fotoelektrot ve arka elektrotlardan alınan kontak uçları yardımıyla hücre ölçüm sistemine bağlanmaktadır. GBIP IEEE 488 arabirimi aracılığıyla bilgisayara bağlanan Keithley 2612 A Multimeter bilgisayar yazılımı ile kontrol edilmektedir. Belirli aralıklarla hücrenin iki elektrodu arasındaki potansiyel değiştirilip bu değerlere karşılık hücre içinden geçen akım ölçölmektedir. Multimeter cihazı ile bu akım ve gerilim değerleri izlenebilmekte ve yine arabirim aracılığıyla bilgisayara aktararak kaydedilebilmektedir.



Şekil 3.17. Keithley 2612 A Multimeter ile I-V ölçümü için kullanılan düzenek

### 3.3.2. Aydınlatma Şiddeti ve Termal Cevap Testleri için Kullanılan Fotodedektör Ölçüm Sistemleri

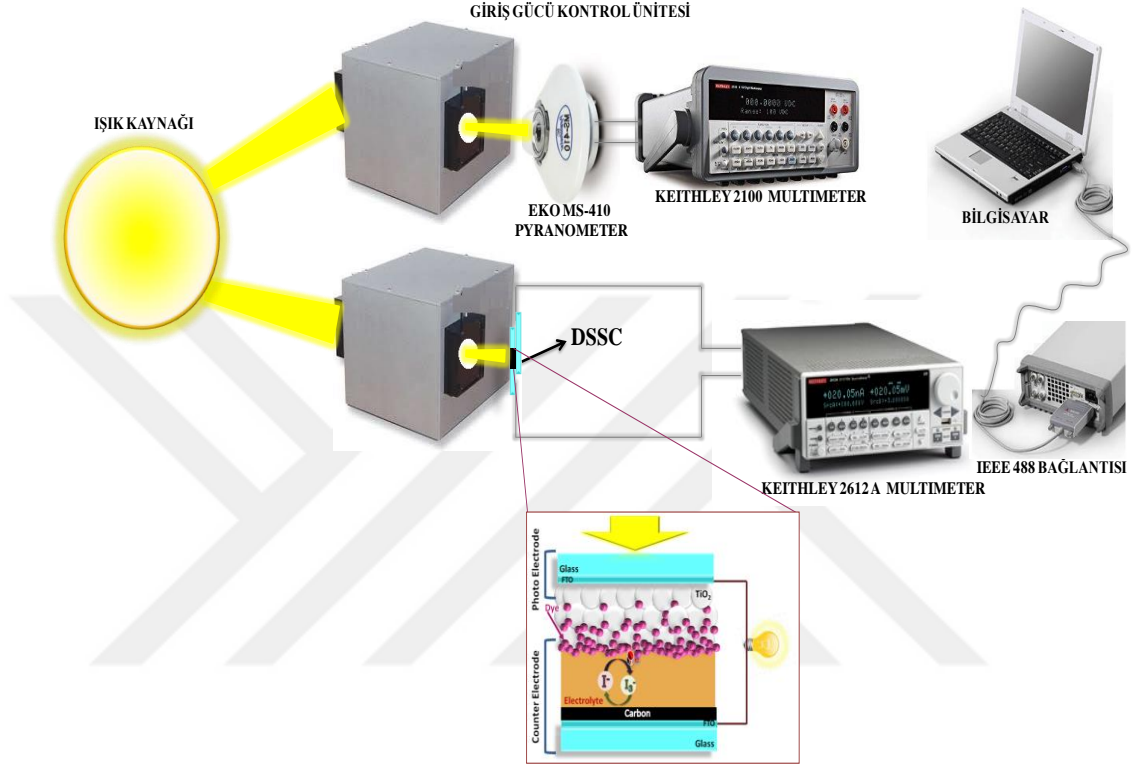
Fotodedektör olarak da kullanılabilen DSSC'lerin sensör karakterizasyonlarının yapılması ve ticari olarak satın alınan Newport 818-R tek kristal Si sensör (Şekil 3.18) ile tepkilerinin kıyaslanması amacıyla laboratuvar ortamında aydınlatma şiddeti ve pil sıcaklığı değiştirilerek çeşitli çalışma koşullarında incelenmesi ve bu açıdan da karakterize edilmesi hedeflenmiştir.



Şekil 3.18. Newport 818-R tek kristal Si ticari sensör (c-Si sensör)

DSSC'lerin fotodedektör olarak test edilmesinde Şekil 3.19'da görülen sistem kullanılarak

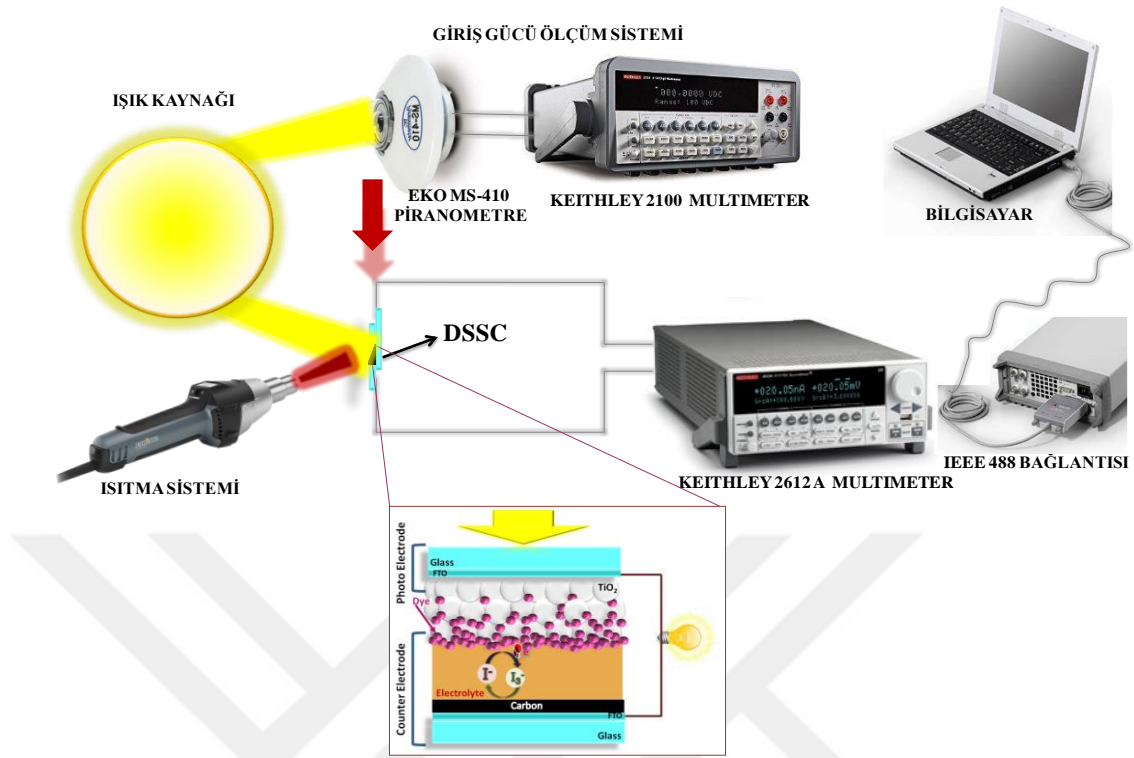
sıcaklık 298 °K (25 °C)'de sabit tutulup aydınlatma şiddetleri, giriş gücü kontrol ünitesi içerisine yerleştirilmiş olan nötral yoğunluk filtreleri kullanılarak sırasıyla 34, 21.2, 17.4, 9.8, 6.8, 4.5 ve 2.3 W/m<sup>2</sup> olacak şekilde kademeli olarak düşürülmüş ve her ışık şiddeti için ölçümler gerçekleştirilmiştir. Böylelikle hücreye ait karakteristik parametreler belirlenmiştir.



**Şekil 3.19.** Aydınlatma şiddeti değiştirilerek hücre performansının test edilmesi için oluşturulan sistem

Dışardan sisteme ışık sızmasını engelleyecek şekilde tamamen karanlık bir ortam oluşturan giriş gücü kontrol ünitesi içerisindeki filtreler tarafından ayarlanan ve piranometreden faydalanılarak miktarı belirlenen ışık şiddeti DSSC'ye ve c-Si sensöre uygulanmaktadır. Uygulanan aydınlatma miktarına bağlı olarak her basamakta I-V ölçümleri Bölüm 3.3.1'de açıklandığı şekilde multimetre ile alınmış ve fotodedektör performansı incelenmiştir.

Bunun dışında çalışmanın bir diğer aşaması olarak Şekil 3.20'de görülen sistemle aydınlatma şiddeti 1000 W/m<sup>2</sup>'de sabit tutularak ortam sıcaklığı 298 °K (25 °C)'den başlayacak şekilde harici bir ısıtıcı tarafından 398 °K (100 °C)'ye kadar 15 °K'lik aralıklarla kademeli olarak yükseltilmiş, her sıcaklık değerinde DSSC ve c-Si sensörün I-V ölçümleri Bölüm 3.3.1'de açıklandığı şekilde multimetre ile alınarak performans analizi yapılmıştır. DSSC ve c-Si sensör üzerine yerleştirilen termal çiftle ölçülen sıcaklık değerleri sıcaklık kararlılığı  $\pm 3$  °C olan üfleme bir ısıtıcı kullanılarak ayarlanmıştır.



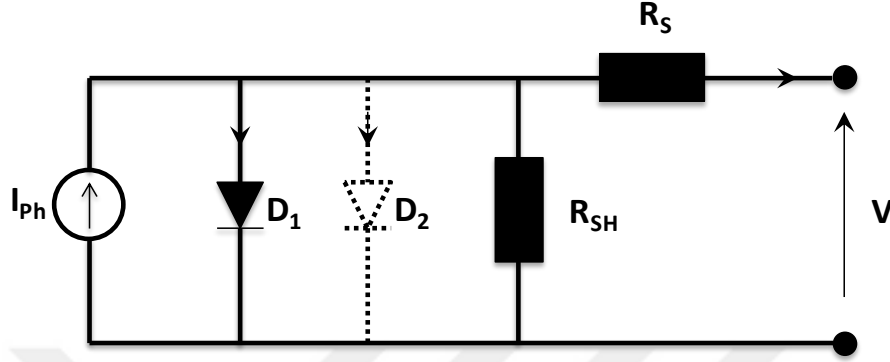
**Şekil 3.20.** Ortam sıcaklığı değiştirilerek hücre performansının test edilmesi için oluşturulan sistem

### 3.3.3. Tek ve Çift Diyot Modeli Kullanılarak DSSC Karakterizasyonu

DSSC'nin elektriksel parametreleri eşdeğer bir devre kullanılarak hesaplanabilmektedir. Bu yöntemde deneysel I-V karakteristiği elde edildikten sonra verilere tek diyotlu ve çift diyotlu eşdeğer devre modelleri uygulanmaktadır. Literatürde pek çok elektriksel eşdeğer devre modelleme şekli bulunmaktadır [215-218]. Bu modellerin çoğu Schottky diyotlara, paralel ve seri dirençlere ve bunlara ek olarak devrenin akımında ışığa duyarlı olarak gerçekleşen değişimi modelleyen fotoakım kaynağına sahiptir. Genel olarak, güç çıkışı elde edilebilmesi için bir güneş pilinin eşdeğer devrede diyot benzeri bir elemana sahip olması gerekmektedir. Diyot, akım kaynağı ve dirençlerden oluşan bu eşdeğer devrede DSSC'lerin verimliliğini artırmak için dahili direnç azaltılmalıdır [219]. İdeal bir eşdeğer devrede teorik olarak  $R_s, 0$  ve  $R_{SH}, \infty$  olduğunda üretilen DSSC ideal bir karakteristik gösterecek ve bu durumda FF, 1 olacaktır. Ancak pratikte üretilen güneş hücreleri için böyle bir durum söz konusu değildir. Dolayısıyla elde edilen deneysel sonuçlar, gerçek seri, paralel direnç ve diyot idealite faktörü değerlerinin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Bu seri ve paralel direnç değerleri, üretilen DSSC dolum faktörünün 0.26-0.47 aralığında olmasının da nedenidir [220].



Şekil 3.21’de gösterilen tek ve çift diyotlu eşdeğer devre, deneysel sonuçların değerlendirilmesinde teorik model [220] olarak kullanılmaktadır. Tek diyot modeli için D1 ve çift diyot modeli içinse D1,D2 diyotlarının birlikte bulunduğu eşdeğer devre verilmiştir.



**Şekil 3.21.** Bir fotovoltaik hücrenin tek ( $D_1$ ) ve çift ( $D_1, D_2$ ) diyotlu eşdeğer devresi

Güneş pillerinde toplam seri direnç ( $R_s$ ), iletken alt tabaka (TCO)/fotoelektrot ( $TiO_2$ ) film arayüzündeki temas direnci, TCO/elektrolit arayüzündeki şarj transfer direnci, birbirine bağlı  $TiO_2$  nanopartiküllerinden oluşan fotoelektrotta film kalınlığına bağlı elektron taşıma direnci, Pt /TCO arayüzündeki şarj transfer direnci, TCO’ların levha direnci,  $I_3$  iyonlarının difüzyon direncinden kaynaklanan elektrolit direnci ve ayrıca arayüzler arasındaki zayıf bağlantı ve elektriksel kontaklardan kaynaklanan dirençlerin toplamıdır [220, 221, 222]. Bunların yanında  $R_s$ ’nin TCO ve Pt arka elektrot arasındaki mesafe ile orantılı olduğu da bildirilmiştir. Ayrıca  $R_s$ ’nin arka elektrot yüzeyindeki taşıyıcı iletim direnciyle de ilişkili olduğu ve arka elektrotun pürüzlülük faktörü arttıkça azaldığı tespit edilmiştir. Bu bağlamda  $J_{SC}$  ve  $FF$ ’nin arka elektrot pürüzlülük faktörü artırılarak iyileştirildiği gözlenmiştir. Direnç unsurlarını azaltmak için Pt arka elektrotun pürüzlülük faktörünü, hücre kalınlığını ve elektrolit kompozisyonunu optimize etmek gerekmektedir [219].

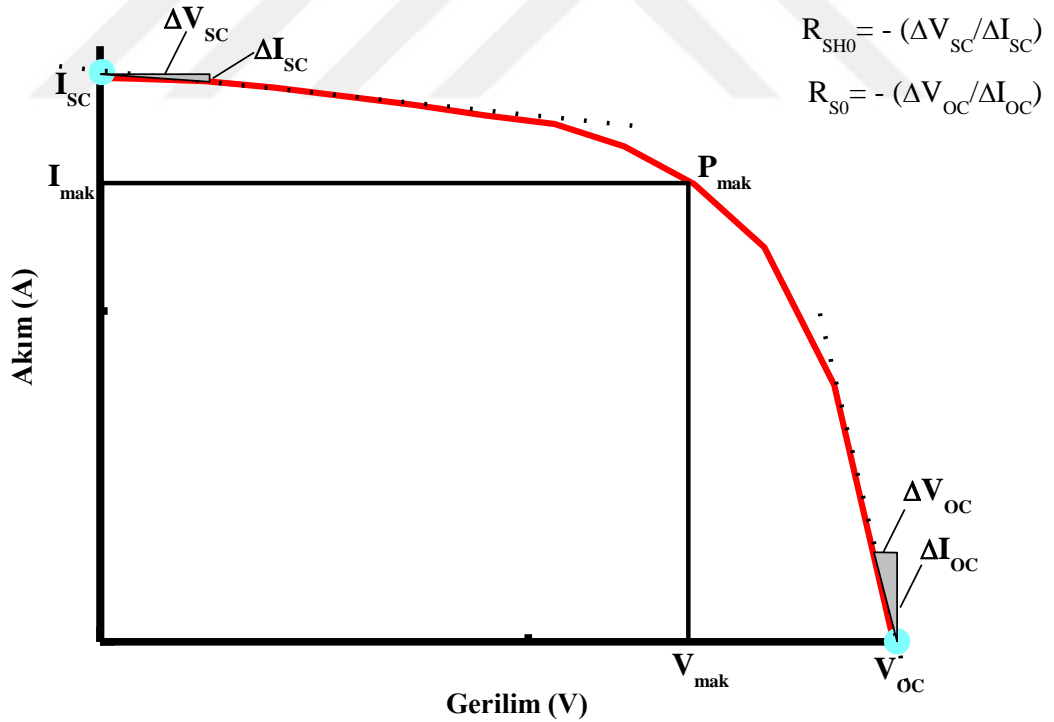
Paralel direnç  $R_{SH}$ , yarıiletken malzemedeki kristal kusurlarına bağlı olarak  $TiO_2$ /boya/elektrolit arayüzündeki şarj transfer (rekombinasyon) direnciyle ilişkilidir [220]. Bu direnç değerinin düşük olması,  $e^-$ ’ların hücreyi geçmek için istenen yol (dış devre) dışında alternatif yollar bulduğunu, örneğin  $TiO_2$  elektrodun arka elektrot ile neredeyse doğrudan temas ettiğini göstermektedir [221].

İdeal diyotun, diyot idealite faktörü  $n$ , 1’e eşittir. Bununla birlikte,  $n$  için elde edilen değer, bir güneş pili için 1 ile 5 arasında olmalıdır [220]. DSSC’nin aktif alanının azaltılması, hücrenin toplam performansında bir iyileşme ile sonuçlanmaktadır. Bu azalma, esas olarak, düşük  $R_s$  ve yüksek  $R_{SH}$  oluşması nedeniyle hücrede daha düşük sızıntı akımı ve şarj

rekombinasyonu gerçekleşmesine bağlanmaktadır.

Yukarıda bahsedilen devre parametreleri doğrudan DSSC'nin I-V eğrisinin şeklini ve akım-gerilim değerlerini, FF'yi ve dolayısıyla verimliliği etkilemektedir. Buna ek olarak rekombinasyon direnci, açık devre gerilimini etkilerken, TCO/elektrolit arayüzündeki şarj transfer direnci, foto elektrottan elektrolite kaçağı engelleyecek kadar yüksek olmalıdır. [223]

Şekil 3.22'de güneş pilinden deneysel olarak elde edilen karakteristik üzerinden seri ve paralel direnç değerlerinin nasıl belirleneceği konusunda bilgi verilmektedir. Buna göre I-V eğrisinin  $I_{SC}$ 'nin maksimum olduğu ( $V_{OC}$  değerinin sıfır olduğu) noktadaki eğiminin tersi paralel direnci ( $R_{SH0}$ ),  $V_{OC}$ 'nin maksimum olduğu ( $I_{SC}$  değerinin sıfır olduğu) noktadaki eğiminin tersi ise seri direnci ( $R_{S0}$ ) vermektedir [224]. İki diyotlu (Şekil 3.21) model, birçok durumda güneş pilinin daha iyi tanımlanmasını sağlamakta bu nedenle ikinci bir diyot, birinci diyota paralel bağlanmaktadır. Her iki diyot da farklı doyma akımları ve diyot idealite faktörlerine sahiptir [220].



**Şekil 3.22.** Fotovoltaik hücrenin deneysel olarak elde edilen akım-gerilim karakteristiği ve direnç değerlerinin deneysel olarak belirlenmesi

Deneysel verilerden elde edilen direnç, akım ve gerilim değerleri kullanılarak DSSC'nin elektriksel parametreleri, tek ve çift diyot modelleri için eşitlik 3.1'den itibaren

hesaplanmaktadır [224].

$$I = I_{ph} - \frac{V + I R_S}{R_{SH}} - I_S \left( \frac{\exp(V + I R_S)}{n V_t} - 1 \right) \quad (3.1)$$

Burada  $I_{ph}$ ; fotoakım (A),  $I_S$ ; diyot doyma akımı (A),  $n$ ; diyot idealite faktörü,  $R_S$ ; seri direnç ( $\Omega$ ),  $R_{SH}$ ; şönt direnç ( $\Omega$ ) ve  $V_t = kT / q$  ( $q$ ; elementer yük,  $k$ ; Boltzmann sabiti ve  $T$ ; Kelvin cinsinden sıcaklıktır). Bu durumda  $n$ ,  $I_S$ ,  $R_S$  ve  $I_{ph}$  şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$n = \frac{V_m + I_m R_{S0} - V_{OC}}{\ln \left( I_{SC} - \frac{V_m}{R_{SH0}} - I_m \right) - \ln \left( I_{SC} - \frac{V_{OC}}{R_{SH}} \right) + \frac{I_m}{I_{SC} - \left( \frac{V_{OC}}{R_{SH0}} \right)}} \left. \right\} V_t \quad (3.2)$$

$$I_S = \left( I_{SC} - \frac{V_m}{R_{SH0}} \right) \exp \frac{-V_{OC}}{n V_t} \quad (3.3)$$

$$R_S = R_{S0} - \frac{n V_t}{I_S} \exp \left( \frac{-V_{OC}}{n V_t} \right) \quad (3.4)$$

$$R_{SH} = R_{SH0} \quad (3.5)$$

$$I_{ph} = I_{SC} \left( 1 + \frac{R_S}{R_{SH}} \right) + I_S \left( \exp \frac{-I_{SC} R_S}{n V_t} - 1 \right) \quad (3.6)$$

Burada  $V_{OC}$ ,  $I_{SC}$ ,  $V_m$ ,  $I_m$ ,  $R_{S0}$  ve  $R_{SH0}$ ; Şekil 3.22'den elde edilen giriş parametreleridir [224].

Çift diyot modeli için I-V karakteristiği;

$$I = I_{ph} - I_{S1} \left( \exp \frac{V + I R_S}{V_t} - 1 \right) - I_{S2} \left( \exp \frac{V + I R_S}{2 V_t} - 1 \right) - \frac{V + I R_S}{R_{SH}} \quad (3.7)$$

eşitliği ile verilmektedir. Burada,  $I_{S1}$  and  $I_{S2}$ ; eşdeğer devredeki birinci ve ikinci diyotlar için diyot doyma akımları (amper),  $V = 0$ ,  $I = I_{SC}$  noktası için;

$$I_{SC} = I_{ph} - I_{S1} \left( \exp \frac{I_{SC} R_S}{V_t} - 1 \right) - I_{S2} \left( \exp \frac{I_{SC} R_S}{2 V_t} - 1 \right) - \frac{I_{SC} R_S}{R_{SH}} \quad (3.8)$$

$V = V_{OC}$ ,  $I = 0$  noktası için;

$$I_{ph} = I_{S1} \left( \exp \frac{V_{OC}}{V_t} - 1 \right) + I_{S2} \left( \exp \frac{V_{OC}}{2 \cdot V_t} - 1 \right) + \frac{V_{OC}}{R_{SH}} \quad (3.9)$$

$I_{ph}$ 'i yok etmek için;

$$I_{SC} = I_{S1} \left( \exp \frac{V_{OC}}{V_t} - \exp \frac{I_{SC} R_S}{V_t} \right) + I_{S2} \left( \exp \frac{V_{OC}}{2V_t} - \exp \frac{I_{SC} R_S}{2V_t} \right) + \frac{V_{OC} - I_{SC} R_S}{R_{SH}} \quad (3.10)$$

(3.7)'ye göre türev alındığında;

$$\begin{aligned} & -\frac{dV}{dI} \left( \frac{I_{S1}}{V_t} \exp \frac{V + I R_S}{V_t} + \frac{I_{S2}}{2V_t} \exp \frac{V + I R_S}{2V_t} + \frac{1}{R_{SH}} \right) \\ & = 1 + \frac{I_{S1} \cdot R_S}{V_t} \exp \frac{V + I R_S}{V_t} + \frac{I_{S2} R_S}{2V_t} \exp \frac{V + I R_S}{2V_t} + \frac{R_S}{R_{SH}} \end{aligned} \quad (3.11)$$

$I = 0$ ,  $V = V_{OC}$  noktasında,  $-(dV/dI) = R_{S0}$  olduğundan;

$$R_{S0} - R_S \left( \frac{I_{S1}}{V_t} \exp \frac{V_{OC}}{V_t} + \frac{I_{S2}}{2V_t} \exp \frac{V_{OC}}{2V_t} + \frac{1}{R_{SH}} \right) - 1 = 0 \quad (3.12)$$

$V = 0$ ,  $I = I_{SC}$  noktasında,  $-(dV/dI) = R_{SH0}$  olduğundan;

$$R_{SH0} - R_S \left( \frac{I_{S1}}{V_t} \exp \frac{I_{SC} R_S}{V_t} + \frac{I_{S2}}{2V_t} \exp \frac{I_{SC} R_S}{2V_t} + \frac{1}{R_{SH}} \right) - 1 = 0 \quad (3.13)$$

Maksimum güç noktası değerleri  $I = I_m$  ve  $V = V_m$  (3.7)'de yerine yazılarak (3.9)'dan  $I_{ph}$  ;

$$\begin{aligned} I_m \left( 1 + \frac{R_S}{R_{SH}} \right) & = I_{S1} \left( \exp \frac{V_{OC}}{V_t} - \exp \frac{V_m + I_m R_S}{V_t} \right) + I_{S2} \left( \exp \frac{V_{OC}}{2V_t} - \exp \frac{V_m + I_m R_S}{2V_t} \right) \\ & + \frac{V_{OC} - V_m}{R_{SH}} \end{aligned} \quad (3.14)$$

$I_{S1}$ ,  $I_{S2}$ ,  $R_S$  ve  $R_{SH}$  Newton-Raphson yöntemi ile (3.10), (3.12), (3.13) ve (3.14) çözülerek belirlenebilmektedir.  $I_{ph}$  (3.9)'dan elde edilebilmektedir. Bununla birlikte, bu yöntem yoğun hesaplama ve yinelemelerin bir araya gelmesi için iyi tahminler gerektirmekte olduğundan, gerekli parametrelerin analitik çözümlerinin elde edilebileceği bir yöntem aşağıdaki analiz ile gösterilmektedir. Aydınlatma altındaki çoğu hücrede aşağıdaki yaklaşımlar yapılabilmektedir [224]:

$n=1$  veya  $2$  için;

$$\exp\left(\frac{V_{OC}}{nV_t}\right) \gg \exp\left(\frac{I_{SC}R_S}{nV_t}\right) \quad (3.15)$$

$$R_{SH}, R_{SH0} \gg R_S \quad (3.16)$$

içinse;

$$\left(\frac{I_{S1}}{V_t}\right) \exp\left(\frac{I_{SC}R_S}{V_t}\right), \left(\frac{I_{S2}}{2V_t}\right) \exp\left(\frac{I_{SC}R_S}{2V_t}\right) \ll \frac{1}{R_{SH0}} \quad \text{ve} \quad I_{SC} \cdot R_S \ll V_{OC} \quad (3.17)$$

Eşitlik (3.10), (3.12), (3.14) ve (3.13) sırasıyla;

$$I_{S1} \exp\left(\frac{V_{OC}}{V_t}\right) + I_{S2} \exp\left(\frac{V_{OC}}{2V_t}\right) - I_{SC} + \left(\frac{V_{OC}}{R_{SH}}\right) = 0 \quad (3.18)$$

$$R_{S0} - R_S \left( \frac{I_{S1}}{V_t} \exp\left(\frac{V_{OC}}{V_t}\right) + \frac{I_{S2}}{2V_t} \exp\left(\frac{V_{OC}}{2V_t}\right) \right) - 1 = 0 \quad (3.19)$$

$$I_{S1} \exp\left(\frac{V_{OC}}{V_t}\right) + I_{S2} \exp\left(\frac{V_{OC}}{2V_t}\right) - I_{S1} \exp\left(\frac{V_m + I_m R_S}{V_t}\right) - I_{S2} \exp\left(\frac{V_m + I_m R_S}{2V_t}\right) + \frac{V_{OC} - V_m}{R_{SH}} - I_m = 0 \quad (3.20)$$

$$R_{SH} = R_{SH0} \quad (3.21)$$

(3.18)-(3.20)'de  $I_{S1}$  ve  $I_{S2}$ 'yi yok ederek  $R_S$  için ölçülen parametreler açısından doğrusal olmayan denklem (3.21)'i kullanarak;

$$I_{SC} - I_m - \frac{V_m}{R_{SH0}} - \left( \frac{V_{OC}}{R_{SH0}} - I_{SC} + \frac{2V_t}{R_{S0} - R_S} \right) \exp\left(\frac{V_m - V_{OC}}{V_t}\right) \exp\left(\frac{I_m R_S}{V_t}\right) - 2 \left( I_{SC} - \frac{V_{OC}}{R_{SH0}} - \frac{V_t}{R_{S0} - R_S} \right) \exp\left(\frac{V_m - V_{OC}}{2V_t}\right) \exp\left(\frac{I_m R_S}{2V_t}\right) = 0 \quad (3.22)$$

1 )  $R_S$ 'nin Kübik Çözümü: Daha doğru bir çözüm, (3.23)'te bir terim daha eklenerek elde edilebilmektedir [224];

$$k = \frac{I_m}{V_t} \quad \text{ve} \quad \frac{I_m}{2V_t} \quad \text{için;} \quad \exp(kR_S) = 1 + kR_S + \frac{k^2 R_S^2}{2} \quad (3.23)$$

$R_S$  için kübik çözüm sonucu;

$$\alpha = I_{SC} - \frac{V_{OC}}{R_{SH0}} \quad (3.24)$$

$$\beta = I_{SC} - I_m - \frac{V_m}{R_{SH0}} \quad (3.25)$$

$$\gamma = \exp \frac{V_m - V_{OC}}{2V_t} \quad (3.26)$$

$$\delta = \frac{I_m}{V_t} \quad (3.27)$$

olmak üzere;

$$A = \alpha\gamma\delta^2(1 - 2\gamma) \quad (3.28)$$

$$B = 4\alpha\gamma\delta(1 - \gamma) + \alpha\gamma\delta^2 R_{S0}(2\gamma - 1) + \gamma\delta^2 V_t(1 - 4\gamma) \quad (3.29)$$

$$C = 4\alpha\gamma(2 - \gamma) + 4\alpha\gamma\delta R_{S0}(\gamma - 1) + 4\gamma\delta V_t(1 - 2\gamma) - 4\beta \quad (3.30)$$

$$D = 4\alpha\gamma R_{S0}(\gamma - 2) + 8\gamma V_t(1 - \gamma) - 4\beta R_{S0} \quad (3.31)$$

Kübik denklemler için analitik çözümler [225]'de tanımlanmıştır ve aşağıda özetlenmiştir [224];

Eşitlik (3.18) ve (3.19)'dan  $I_{S1}$ ,  $I_{S2}$ ,  $R_{SH}$ , ve  $I_{ph}$ ;

$$I_{S1} = \left( \frac{V_{OC}}{R_{SH0}} - I_{SC} + \frac{2V_t}{R_{S0} - R_S} \right) \exp \left( - \left( \frac{V_{OC}}{V_t} \right) \right) \quad (3.32)$$

$$I_{S2} = 2 \left( I_{SC} - \frac{V_{OC}}{R_{SH0}} - \frac{V_t}{R_{S0} - R_S} \right) \exp \left( - \left( \frac{V_{OC}}{2V_t} \right) \right) \quad (3.33)$$

Eşitlik (3.13)'den;

$$R_{SH} = \left[ \frac{1}{R_{SH0} - R_S} - \frac{I_{S1}}{V_t} \exp \left( \frac{I_{SC} R_S}{V_t} \right) - \frac{I_{S2}}{2V_t} \exp \left( \frac{I_{SC} R_S}{2V_t} \right) \right]^{-1} \quad (3.34)$$

Eşitlik (3.9)'dan;

$$I_{ph} = I_{S1} \left( \exp \left( \frac{V_{OC}}{V_t} \right) - 1 \right) + I_{S2} \left( \exp \left( \frac{V_{OC}}{2V_t} \right) - 1 \right) + \frac{V_{OC}}{R_{SH}} \quad (3.35)$$

Böylece,  $R_5$  için bir değer bulunarak, kuadratik ya da kübik çözüm yardımıyla, diğer dört parametre de elde edilebilmektedir [224].

Kübik çözüm için kökler;

$$Ax^3 + Bx^2 + Cx + D = 0 \quad (3.36)$$

$$x = y - \frac{B}{3A} \quad (3.37)$$

$$y^3 + py + q = 0 \quad (3.38)$$

Burada;

$$p = \frac{1}{3} \left[ 3 \left( \frac{C}{A} \right) - \left( \frac{B}{A} \right)^2 \right] \quad (3.39)$$

$$q = \frac{1}{27} \left[ 2 \left( \frac{B}{A} \right)^3 - 9 \left( \frac{B}{A} \right) \left( \frac{C}{A} \right) + 27 \left( \frac{D}{A} \right) \right] \quad (3.40)$$

$A$ ,  $B$ ,  $C$  ve  $D$ 'nin gerçekteğerleri için, çözümlerin yapısı aşağıdaki parametreler  $\Delta$  ile belirlenmektedir [224].

$$\Delta = \left( \frac{p}{3} \right)^3 + \left( \frac{q}{2} \right)^2 \quad (3.41)$$

$\Delta > 0$ ; bir gerçekteğer ve iki eşlenik imajiner kök (3.42)

$\Delta = 0$ ; en az ikisi eşit olan 3 gerçekteğer kök (3.43)

$\Delta < 0$ ; eşit olmayan 3 gerçekteğer kök (3.44)

Çözümler;

$$x_1 = u + v - \frac{B}{3A} \quad (3.45)$$

$$x_2 = -\frac{u+v}{2} - \frac{B}{3A} + \frac{u-v}{2} i\sqrt{3} \quad (3.46)$$

$$x_3 = -\frac{u+v}{2} - \frac{B}{3A} - \frac{u-v}{2} i\sqrt{3} \quad (3.47)$$

şeklindedir. Burada;

$$u = \sqrt[3]{\frac{-q}{2} + \sqrt{\Delta}} \quad (3.48)$$

$$v = \sqrt[3]{\frac{-q}{2} - \sqrt{\Delta}} \quad (3.49)$$

$\Delta < 0$  ise, çözümler aşağıdaki gibi trigonometrik biçimde ifade edilebilmektedir:

$$x_1 = -\frac{B}{3A} + 2\sqrt{\frac{|p|}{3}} \cos \frac{\phi}{3} \quad (3.50)$$

$$x_2 = -\frac{B}{3A} - 2\sqrt{\frac{|p|}{3}} \cos \frac{\phi + \pi}{3} \quad (3.51)$$

$$x_3 = -\frac{B}{3A} - 2\sqrt{\frac{|p|}{3}} \cos \frac{\phi - \pi}{3} \quad (3.52)$$

Burada;

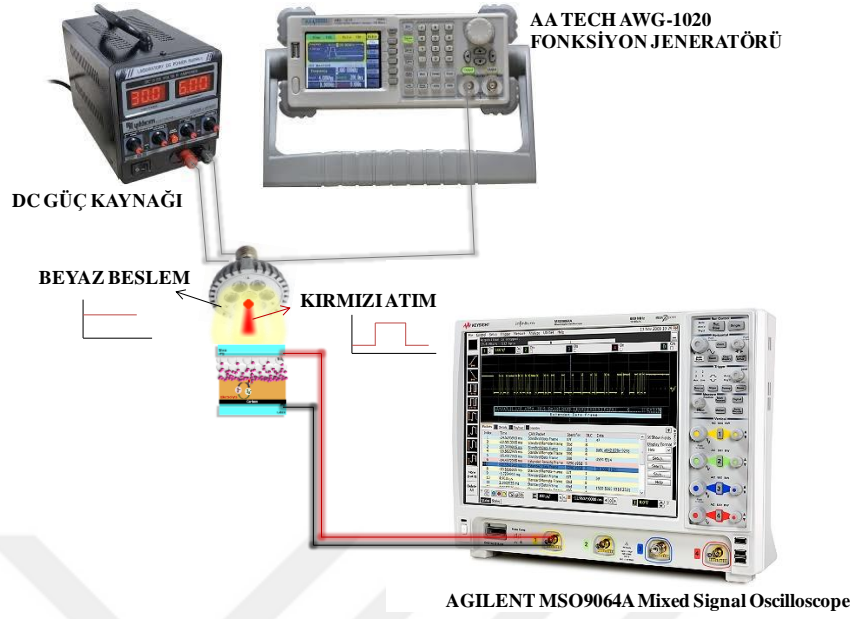
$$\phi = \cos^{-1} \frac{-q/2}{\sqrt{|p|^3/27}} \quad (3.53)$$

Elde edilen parametreler DSSC'nin karakteristik parametreleri olup elektriksel olarak karakterize edilmesinde I-V eğrisinden sonra yararlanılacak ikinci bir kaynaktır. Aynı zamanda farklı şartlar altında DSSC'lerden elde edilen veriler için de bu yöntem uygulanmış ve güneş pillerinin aydınlatma ve ortam sıcaklığı şartlarının değiştirilmesine karşı gösterdikleri tepkiler elektriksel eşdeğer parametreleri açısından da incelenmiştir.

### 3.3.4. Geçici Fotoakım Cevap Testleri için Fotodedektör Ölçüm Sistemleri

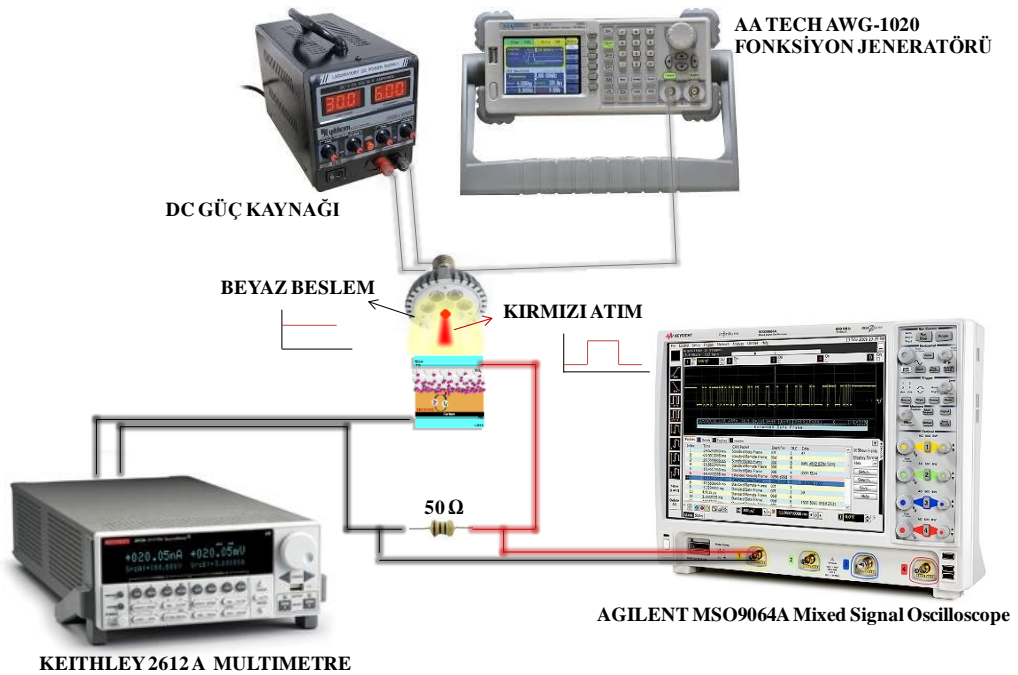
Fotodedektör karakterizasyonu için akım ve gerilimin yükselme ve bozulma zamanlarının tayininde fotovoltaj ve fotoakımın geçici durum analizleri, literatürde rapor edilen [226] yöntemler izlenerek ölçülmüştür. Fotovoltajın geçici durum analizinin ölçümü için Şekil 3.23'te görülen deney düzeneği hazırlanmıştır. Üretilen DSSC'lerde, fotovoltaj üretimini sağlamak için sürekli halde beyaz ışık yayan LED'lere sabit gerilim uygulanarak DSSC'ler sabit bir beyaz belsem ışığına maruz bırakılmıştır. AA Tech AWG-1020 sinyal jeneratörü tarafından periyodu 1 saniye ve darbe genişliği (pulse width) 800 ms olan bir ışık palsı kırmızı ışık yayan bir LED'e uygulanmıştır. Böylece DSSC'nin fotovoltaj değerinde gözlenen küçük bir artışla yükselme ve bozulma süresi, AGILENT MSO 9064A serisi osiloskop ile izlenmiştir.





**Şekil 3.23.** Geçici fotovoltaj ölçüm sistemi [226]

Şekil 3.24,  $V_{OC}$  ve  $I_{SC}$ 'nin ölçülmesiyle geçici fotoakım değerinin belirlenmesinde kullanılan deney sistemini göstermektedir. Bu kurulumda, DSSC'nin beyaz beslem ışığı altındaki  $V_{OC}$  değerine eşit ve ters yönlü sabit bir gerilim Keithley Multimeter ile DSSC'ye uygulanmıştır. AA Tech AWG-1020 sinyal jeneratörü tarafından periyodu 1 saniye ve darbe genişliği 800 ms olan bir ışık pulsı kırmızı ışık yayan LED'e uygulanmış ve bu ışık pulsı ile DSSC'nin ürettiği akımın harici yük ( $50 \Omega$ ) üzerinden akması sağlanmıştır.  $50 \Omega$ 'luk dirençteki akım değişimi AGILENT MSO 9064A serisi osiloskop ile kaydedilmiştir.



**Şekil 3.24.** Anlık fotoakım ölçüm sistemi [226]



## **4. DENEYSEL BULGULAR**

Bu tez kapsamında üretilen DSSC'lerin karakterize edilmesi için öncelikle yapıyı oluşturan parametreler incelenmiştir. Ardından fotovoltaiik performans ve fotodedektör özelliklerinin belirlenmesi maksadıyla bir takım deneyler gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

İlk olarak DSSC'leri oluşturan yapısal parametreler ayrı ayrı incelenmiş ve elde edilen veriler başlıklar halinde sunulmuştur. Devamında hücre sıcaklığı belirli bir değerde sabit tutularak aydınlatıldığı (belli bir spektral dağılımla) sürece gerilim ve akım üreten DSSC yapıları, elektriksel olarak karakterize edilmiştir. Güneş pillerinin elektriksel karakterizasyonunda üretilen V geriliminin fonksiyonu olarak I akımını gösteren bir I-V eğrisi kullanılmaktadır. Çalışmalar kapsamında deneysel olarak elde edilen I-V eğrilerinden faydalanılarak, üretilen DSSC'ler elektriksel karakterizasyonu ile ilgili elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Ayrıca tek ve çift diyotlu eşdeğer devre modelleri, deney sonuçlarının değerlendirilmesinde teorik model olarak kullanılmıştır. Bu model, diyot veya diyotlara seri ve paralel şekilde bağlı, hücre kayıplarını temsil eden dirençlerle yapılandırılmaktadır [114]. Deneysel olarak elde edilen grafiklerin analiz sonuçları ve analitik modeller kullanılarak hesaplanan değerler tablolar halinde verilmiştir.

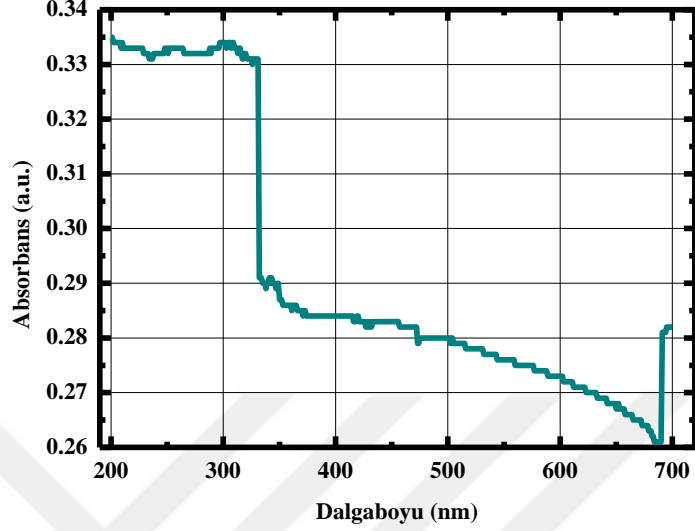
### **4.1. DSSC'lerin Yapısal Karakterizasyonu**

Oluşturulan fotoaktif yapıda hücre performansını belirleyen her bir tabakaya ait morfolojik özelliklerin incelenmesi öncelik verilmesi gereken bir konudur. DSSC'leri oluşturan yapısal parametrelerin karakterize edilmesi amacıyla her bir yapı tek tek incelenmiş ve deneysel bulgular başlıklar halinde sunulmuştur.

#### **4.1.1. FTO Tabakasının Karakterizasyonu**

FTO kaplı iletken cam altlıklar elektrot yapılarının ana malzemesini oluşturmaktadır. Fotonların DSSC içerisine rahatlıkla girebilmesi için cam altlığın ve üzerine kaplanmış FTO tabakanın olabildiğince şeffaf olması gerekmektedir. Her ikisinin de kalınlığı ve yapısı ışık geçirgenliğini ve aynı zamanda pil içerisine nüfuz ederek enerji üretimini sağlayacak olan ışığın dalga boyunu ve miktarını sınırlayacağından pilin performansı açısından büyük önem arz etmektedir. Cam altlıkların kalınlıkları ve cam üzerine kaplanan iletken tabakanın bulanıklık oranı değiştikçe difüzyona izin verilen absorpsiyon bölgesi ve foton miktarı

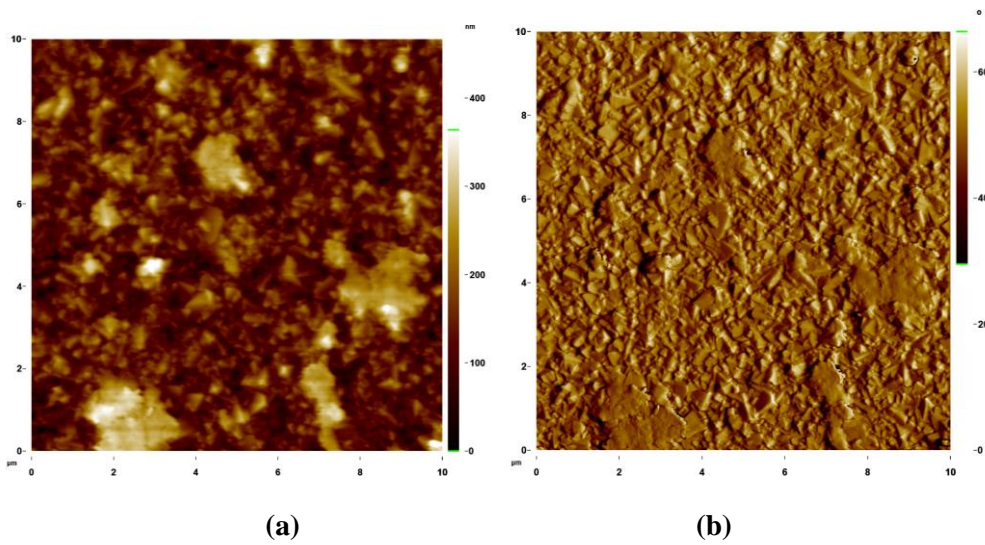
değişmektedir. Dolayısıyla çalışmalara FTO kaplı camın absorpsiyon eğrisi ölçülerek başlanmıştır. FTO kaplı cama ait absorpsiyon eğrisi Şekil 4.1’de verilmiştir.



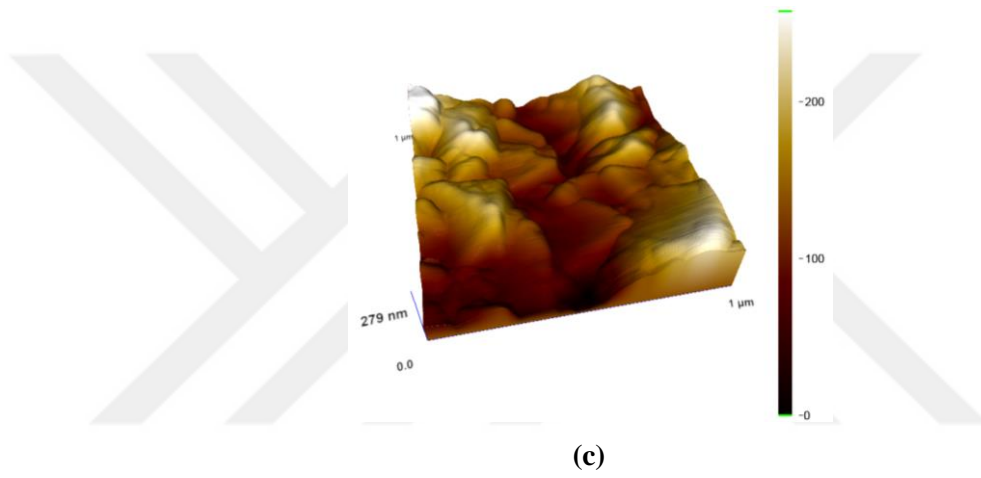
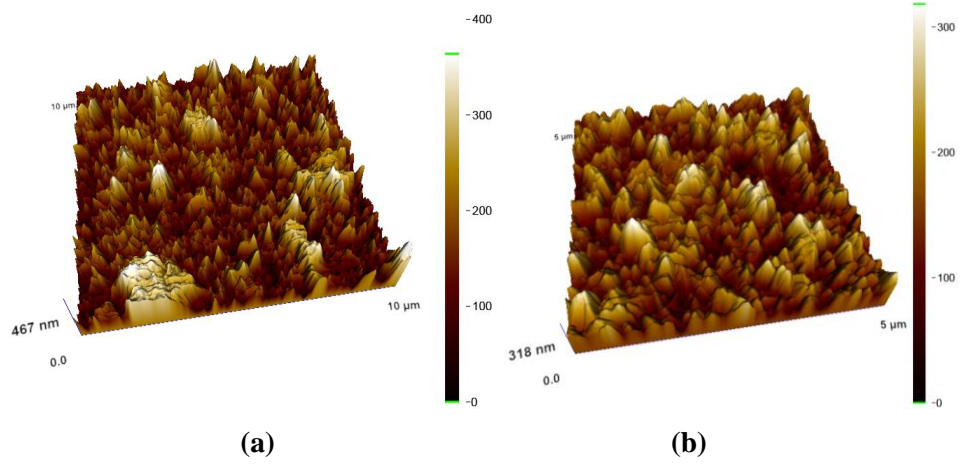
Şekil 4.1. FTO kaplı camın absorpsiyon eğrisi

FTO kaplı cama ait absorpsiyon eğrisi incelendiğinde UV bölgede ortalama 350 nm dalgaboyuna kadar ve IR bölgede ise ortalama 700 nm’den sonra ışığın pil içerisine girişinin FTO kaplı cam tarafından sınırlandırıldığı açıkça görülmektedir.

FTO tabakanın karakterize edilmesi işleminin devamında bu yapıya ait yüzey görüntüleri AFM ile elde edilmiş, Şekil 4.2’de FTO tabakasının 10x10  $\mu\text{m}$ ’lik bölgesindeki topografi ve faz görüntüleri, Şekil 4.3’te ise farklı ebatlarda 3 boyut analizleri verilmiştir.



Şekil 4.2. FTO kaplı camın 10x10  $\mu\text{m}$  boyutunda topografi (a) ve faz (b) görüntüleri



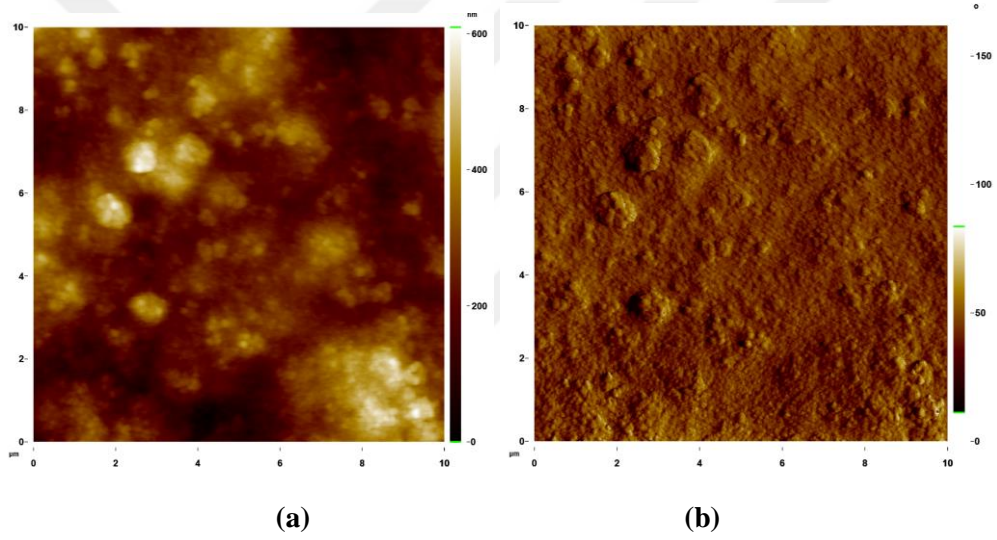
**Şekil 4.3.** FTO tabakasının 10x10  $\mu\text{m}$  (a), 5x5  $\mu\text{m}$  (b) ve 1x1  $\mu\text{m}$  (c) ebatlarında 3 boyut analizi

AFM ile elde edilen topografi ve faz görüntüleri incelendiğinde FTO tabakası yüzeyindeki pürüzlü yapı dikkati çekmektedir. Bu pürüzlülük FTO tabaka üzerinde oluşturulacak olan  $\text{TiO}_2$  nanoparçacıklarla aradaki iletişimi kuvvetlendirerek elektron difüzyonunu kolaylaştırmasının yanı sıra arka elektrotta da birkaç atom kalınlığında olan Pt filmin pürüzlü olmasını ve böylece redoks elektrolitiyle katalizör tabakanın etkileşimini de arttıracaktır. Bu da pil performansını pozitif yönde etkileyen bir parametredir.

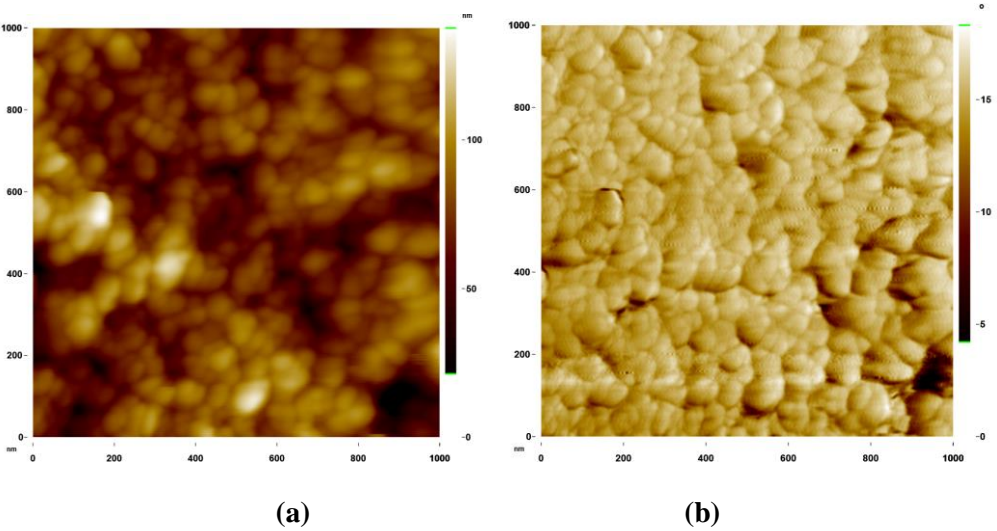
#### 4.1.2. Fotoelektrodu Oluşturan $\text{TiO}_2$ Tabakasının Karakterizasyonu

$\text{TiO}_2$  fotoelektrot, yüzeyi ışığa duyarlı boya molekülleri ile kaplanmış bir yapıdır. Nano yapıdaki yarıiletken kaplamanın temel görevi, yüksek miktarda boya molekülünü taşıyabilmesi için gerekli geniş yüzey alanını sağlamak ve boya moleküllerinden enjekte edilen elektronları iletken cama aktarmaktır.  $\text{TiO}_2$  filmin yüksek yüzey alanına sahip olması hücrenin verimi açısından en kritik parametredir. Nano boyuttaki partiküller, kaplandıktan sonra 350-550  $^{\circ}\text{C}$  sıcaklık aralığında sinterlenerek, pürüzlü bir yapı oluşturulmaktadır. Bu

pürüzlü yapı, redoks elektrolitinin bütün boşluklara etkin bir şekilde yayılmasıyla çok geniş bir elektrolit-boyar madde arayüzünün oluşmasını sağlamaktadır. Fakat bu yöntemle üretilen filmlerin en önemli dezavantajı, düzensiz yapı nedeniyle elektron transferi sırasında difüzyon mesafesini arttırmasıdır. Bu nedenle iki nanokristal arasında hareket eden elektronun saçılma şansı artmakta ve mobilitesi düşmektedir. Pil performansının, yüzey alanının genişliğiyle doğru orantılı olarak değiştiği düşünüldüğünde yüzey pürüzlülüğünün belirlenmesi bir ihtiyaç olarak ortaya çıkmıştır. FTO kaplı cam üzerinde oluşturulan TiO<sub>2</sub> tabakasının yüzey pürüzlülüğünün belirlenmesi amacıyla AFM ile yüzey görüntüleri elde edilmiş, Şekil 4.4 ve 4.5'te TiO<sub>2</sub> tabakasının topografî ve faz görüntüleri, Şekil 4.6'da ise 3 boyut analizi verilmiştir.

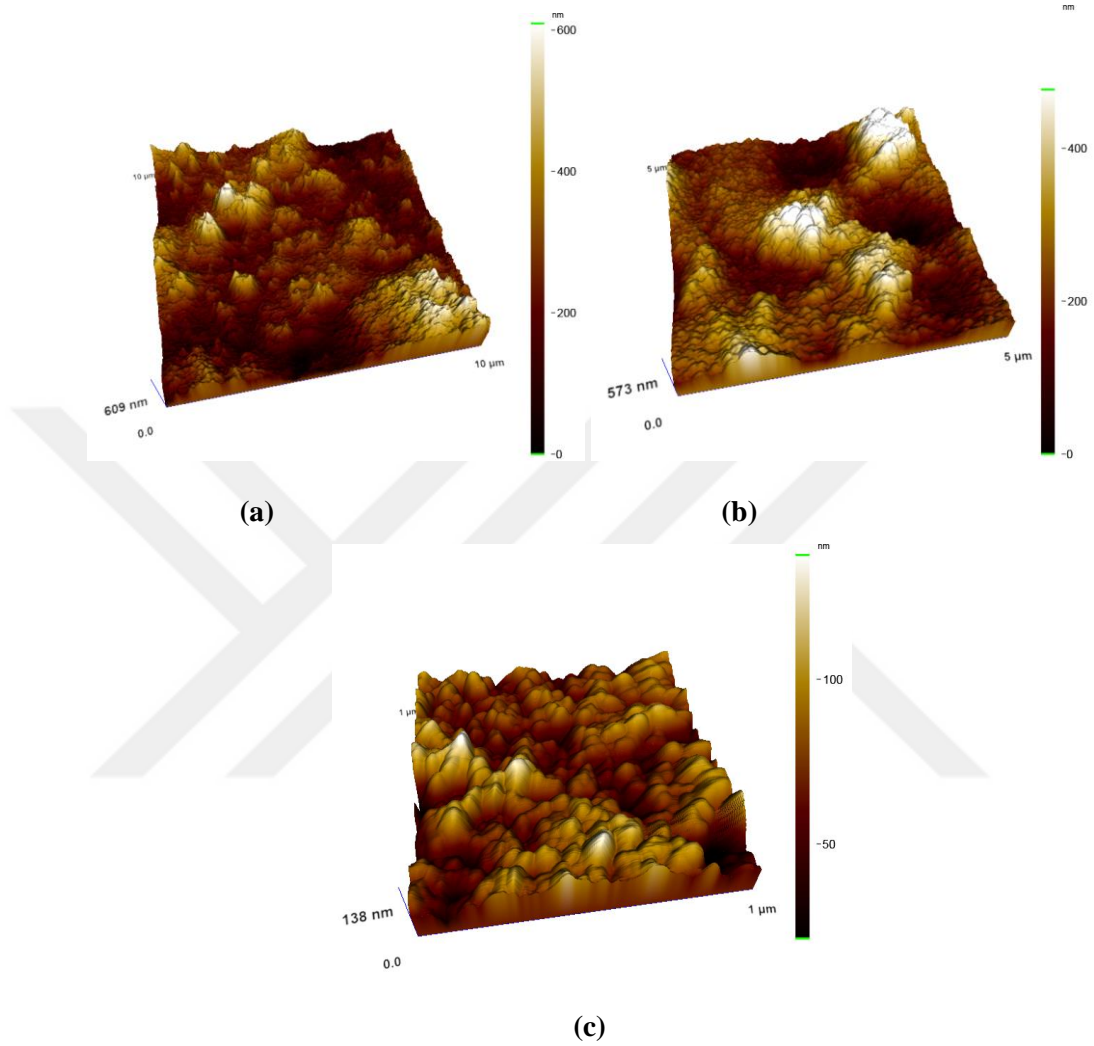


Şekil 4.4. TiO<sub>2</sub> tabakasının 10x10 µm boyutunda topografî (a) ve faz (b) görüntüleri



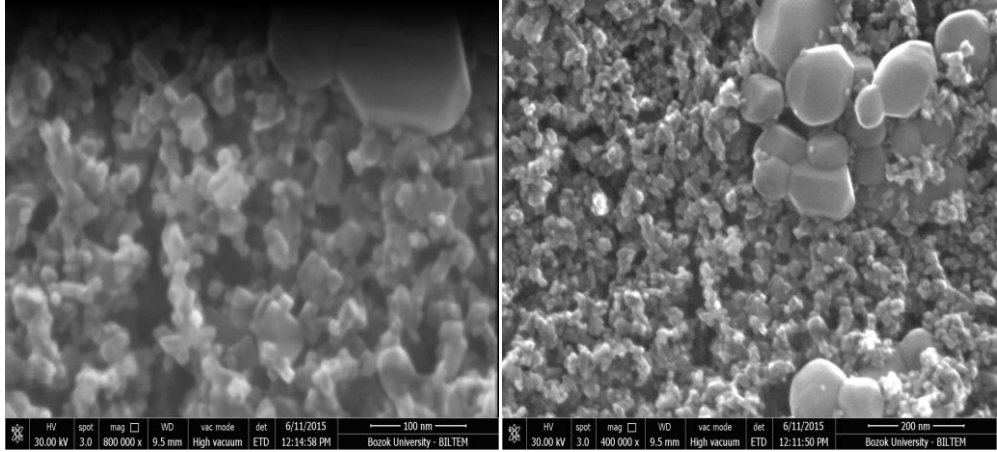
Şekil 4.5. TiO<sub>2</sub> tabakasının 1x1 µm boyutunda topografî (a) ve faz (b) görüntüleri

Şekil 4.4, 4.5 ve 4.6'da gösterildiği gibi TiO<sub>2</sub> tabakaya ait görüntüler pürüzlü bir yapıya işaret etmektedir.



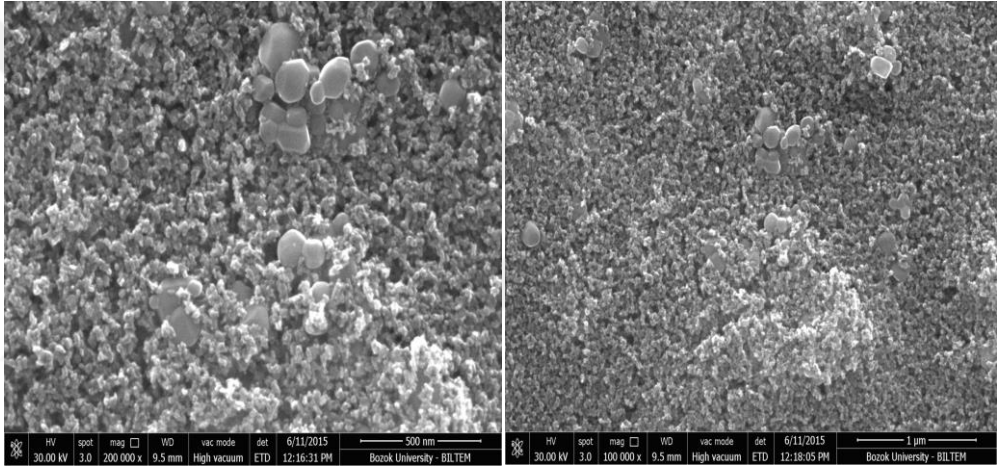
**Şekil 4.6.** TiO<sub>2</sub> tabakasının 3 boyutlu analizi 10x10 µm (a), 5x5 µm (b) ve 1x1 µm (c) boyutunda

Aynı amaçlar doğrultusunda yüzey şeklinin ve nanoparçacık yapısının belirlenmesi amacıyla TiO<sub>2</sub> ince film tabakanın SEM görüntüleri elde edilmiştir. Şekil 4.7'de 100, 200, 500 nm ve 1 µm ölçeklendirmeye alınmış olan SEM görüntüleri yine bu pürüzlü yapıyı destekleyici veriler içermektedir.



(a)

(b)



(c)

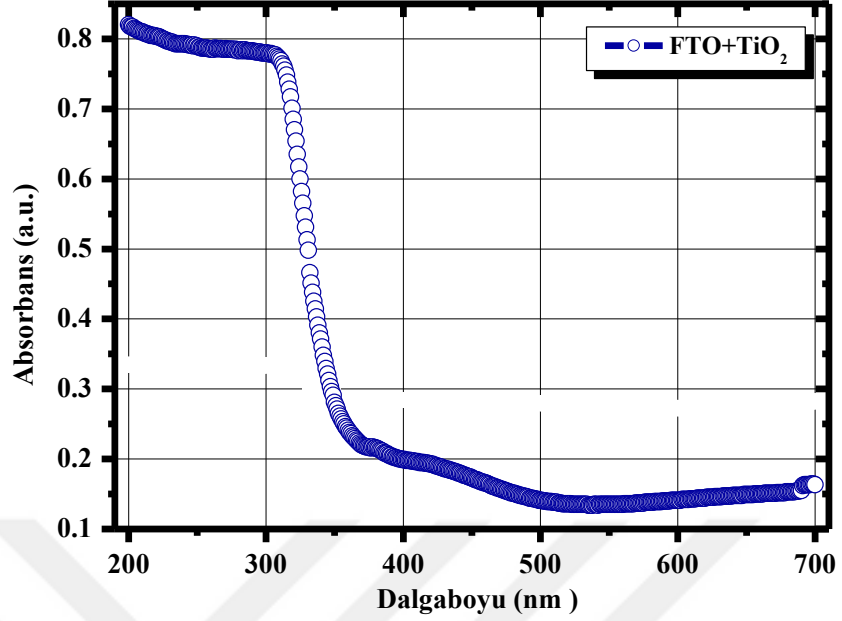
(d)

**Şekil 4.7.** TiO<sub>2</sub> tabakasına ait 100 nm (a), 200 nm (b), 500 nm (c) ve 1 µm (d) ölçeklendirmeye alınmış SEM görüntüleri

Yüzey alanı ve boya tutma potansiyeli anlamında pilin çalışma performansı için çok önemli olan pürüzlülük parametresi bu nedenle her iki yöntem de uygulanarak incelenmiş ve alınan birbirini destekleyici sonuçlar yarıiletken tabaka oluşturma prosesinin ve sinterleme işleminin başarısını göstermektedir.

Fotoduyarlılaştırıcı boyar maddeye kadar ulaşabilen foton miktarının sırasıyla önce cam tabakanın sonra FTO tabakanın ve en son da TiO<sub>2</sub> tabakanın izi verdiği absorpsiyon bölgesine ve foton sayısına bağlı olduğu unutulmamalıdır. Boyar madde tabakasına kadar ulaşabilen ışığın dalga boyunu tespit etmek amacıyla cam üzerinde TiO<sub>2</sub> ince film tabaka oluşturulduktan sonra absorbans ölçümü alınmış ve Şekil 4.8’de verilen bu grafik Şekil 3.2’deki UV-Visible spektrofotometre cihazı ile elde edilmiştir.



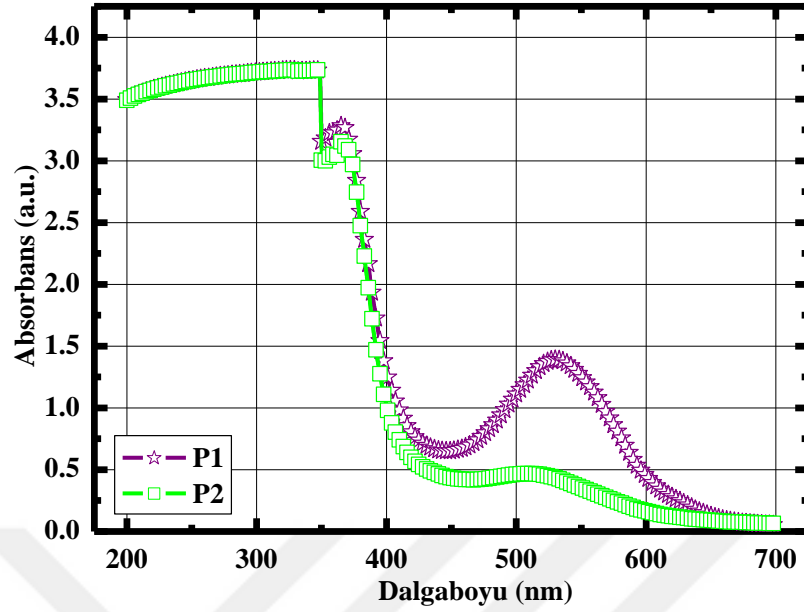


**Şekil 4.8.** FTO ntabakasının ve üzerinde TiO<sub>2</sub> tabakası oluşturulmuş FTO kaplı camın absorpsiyon eğrisi

FTO kaplı cam üzerinde oluşturulan TiO<sub>2</sub> tabakasına ait Şekil 4.8’de verilen absorpsiyon eğrisi incelenmiştir. Buna göre TiO<sub>2</sub> tabakasının UV bölgede ortalama 350 nm dalgaboyuna kadar ışığın boyar maddeye kadar ulaşmasını sınırladığı açıkça görülmektedir. Bu durumda fotoduyarlılaştırıcı boyar maddenin özellikle görünür bölgede etkin olması hücre performansı açısından elzemdir. Bu nedenle tez kapsamında doğal materyallerden üretilen fotoduyarlılaştırıcı boyar maddelerin de absorpsiyon parametreleri incelenmiştir.

#### 4.1.3. Üretilen Doğal Boyaların Karakterizasyonu

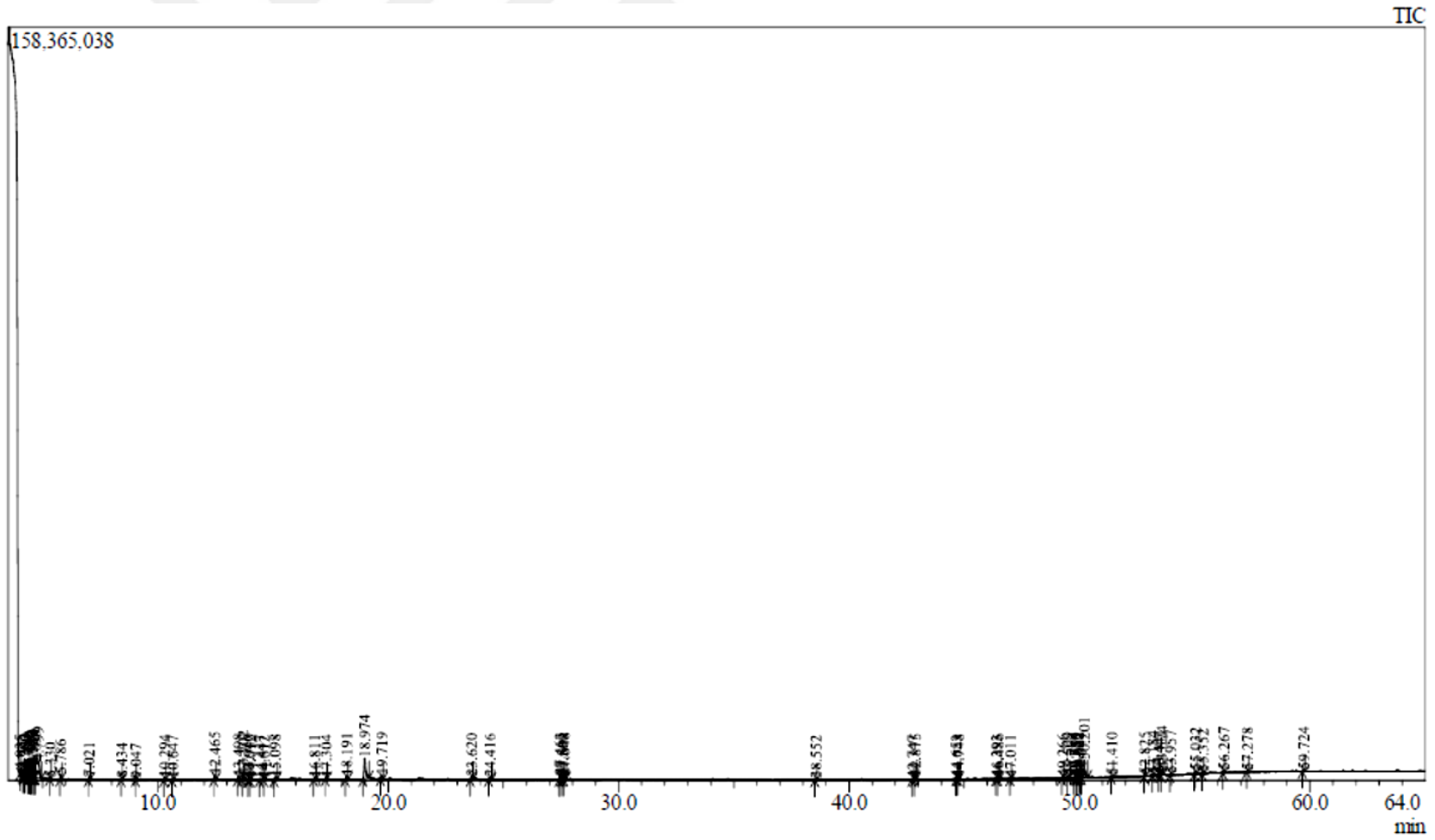
DSSC’lerde kullanılmak üzere hazırlanan doğal boyar maddelerin optik özelliklerinin incelenmesi amacıyla öncelikle UV-Vis absorpsiyon yöntemi kullanılmış ve absorpsiyon eğrileri Şekil 3.2’deki UV-Visible spektrofotometre cihazı ile elde edilmiştir. Bitkilerden üretilen P1 ve P2 doğal boyalarına ait absorpsiyon grafikleri Şekil 4.9’da karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



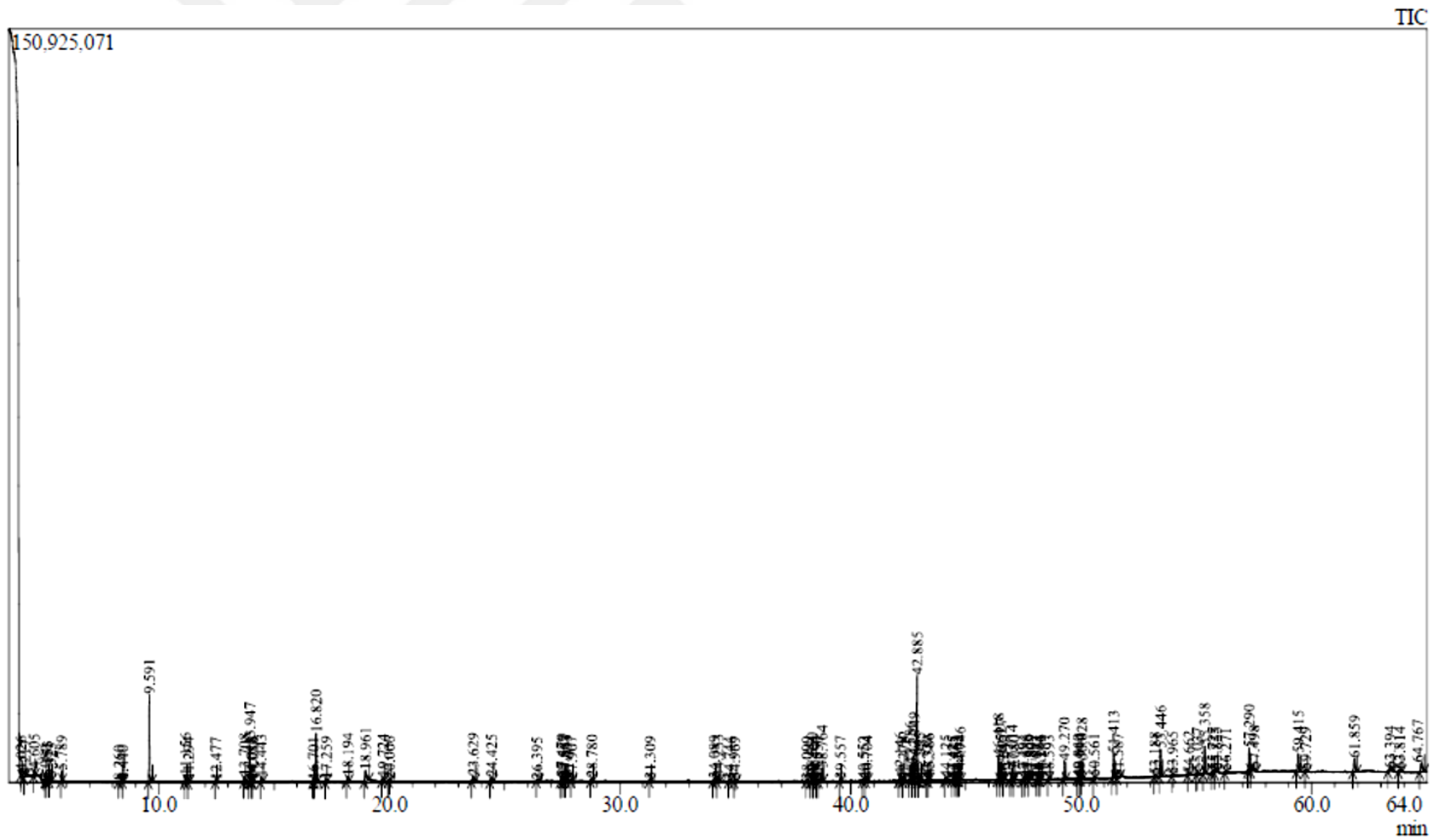
**Şekil 4.9.** DSSC üretimi için hazırlanan P1 ve P2 boyar maddelerine ait karşılaştırmalı absorpsiyon grafikleri

Her iki boya da 400 nm'nin altında benzer absorpsiyon özellikleri sergilemesine rağmen 450-600 nm arasında P1 boyası nispeten kuvvetli bir absorpsiyona sahipken P2 boyası sözü edilen bölgede küçük bir tepe noktası oluşturmaktadır. Güneş pilleri yalnızca soğurulan ışıqla enerji üretebildiğinden doğal boyar maddelerin görünür bölgedeki absorpsiyon grafikleri, DSSC'lerde boyar madde olarak kullanılacaklarını göstermektedir. Yalnızca absorpsiyon açısından tahmin yapılacak olursa, P1 boyası ile hazırlanan DSSC'nin daha geniş absorpsiyon spektrumu nedeniyle daha yüksek etkinliğe sahip olabileceği düşünülebilir. Ancak bu konuda kesin bir yargıya sahip olunabilmesi için bu boyalarla üretilen DSSC'lerin akım-gerilim üretim parametrelerinin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Üretilen P1 ve P2 boyar maddelerinin içeriklerinin belirlenmesi amacıyla boyalar GC-MS yöntemi ile analiz edilmiştir. GC-MS analizi sonuçlarının detayları Ek.2'de verilmiştir. Şekil 4.10 ve 4.11'deki GC-MS grafiklerine bakıldığında, P1 ve P2 boyalarında birçok organik bileşene rastlanmakta, bu bileşenler arasından bitkilerde yaygın olarak bulunduğu bilinen [184, 227] galik asitten  $\text{CO}_2$ 'nin elimine edilmesiyle elde edilen 1,2,3-Benzenetriol'ün, her iki boyanın yapısında da ortak olan en yüksek orandaki materyal olduğu görülmektedir.



Şekil 4.10. P1 boyasına ait GC-MS analizi sonucu



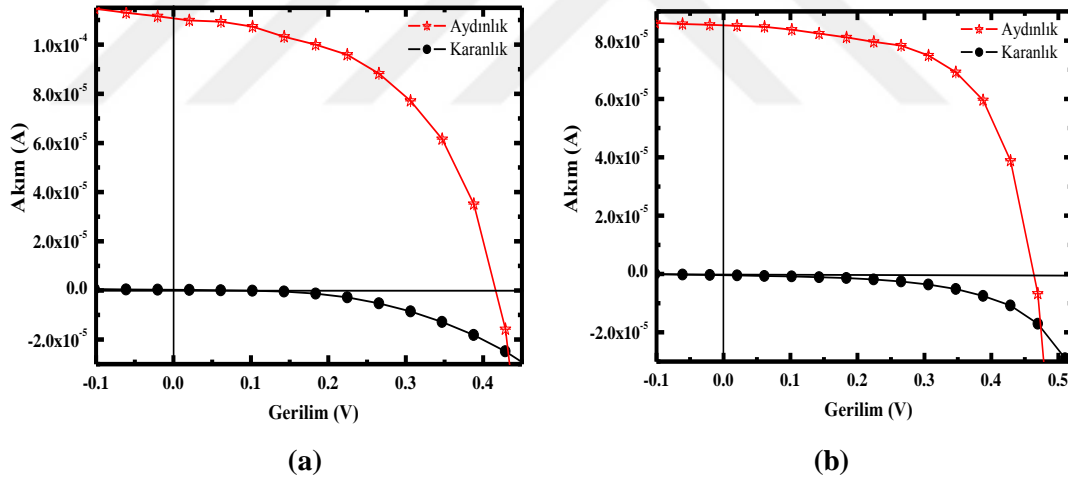
Şekil 4.11. P2 boyasına ait GC-MS analizi sonucu

Bununla birlikte, DSSC hücre performansında etkin bir materyal olduğu da bilinen [185] galik asiti P1 boyasının % 11.90, P2 boyasının ise % 2.46 oranında içerdiği tespit edilmiştir.

## 4.2. Üretilen DSSC'lerin Fotovoltaik Performans Karakterizasyonu

Boyar madde olarak her iki türde Pelargonium bitkisinden elde edilen P1 ve P2 boyar maddeleriyle DSSC üretimi gerçekleştirilerek boya içeriklerinin fotovoltaik performans üzerindeki etkisinin incelenmesi için bu iki yapının elektriksel karakteristikleri karşılaştırılmıştır.

Bölüm 3'te Şekil 3.17'de verilen deney düzeneği kullanılarak DSSC'lerin oda sıcaklığında,  $1000 \text{ W/m}^2$  aydınlatma altında, yapılan testler sonucu elde edilen I-V grafikleri verilmiştir. Şekil 4.10'da gösterilen karanlık-aydınlık durumlarındaki I-V grafikleri, DSSC'lerin iç yapısındaki kimyasal reaksiyonlar sonucu aydınlatma olmaksızın herhangi bir enerji üretimi yapmadıklarını yalnızca aydınlatma altında fotovoltaik özelliklerinden dolayı böyle bir üretimin gerçekleştiğini ortaya koymaktadır.

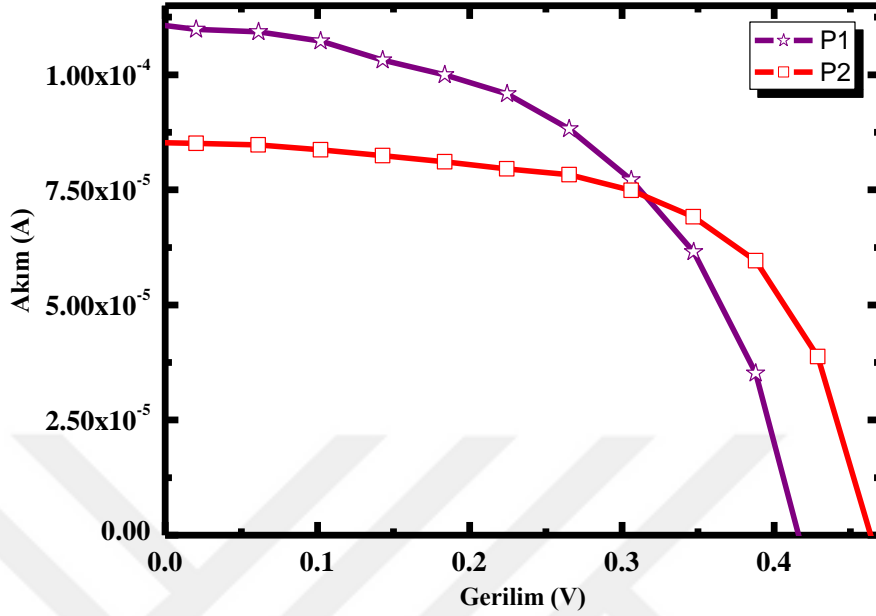


Şekil 4.12. P1 (a) ve P2 (b) boyalarıyla üretilen DSSC'lere ait karanlık-aydınlık durumlarındaki I-V grafikleri

Şekil 4.12'deki elektriksel karakteristik dikkatle incelendiğinde, akım-gerilim üretiminin yapının bir batarya gibi davranmasından değil pilin üzerine foton düşmesi durumunda enerji üretimini gerçekleştiren bir eleman olmasından kaynaklandığı açıkça görülmektedir. Aksi halde pilin karanlık ortamda da bir batarya gibi davranarak akım üretmesi beklenirdi. Oysa karanlık ortamda gerilim sıfırlanırken akımın da tam olarak sıfırdan geçtiği yani, herhangi bir şekilde üretim gerçekleştirilmediği şekilden görülebilmektedir.

DSSC'lere ait karakteristiklerin belirlenmesi ve üretilen yapının elektriksel performans

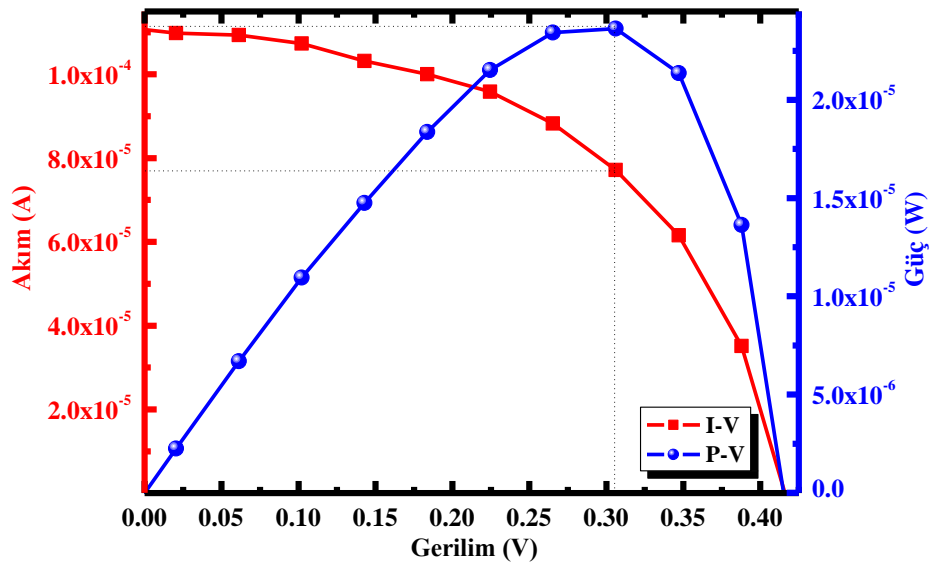
değerlendirmesi için;  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ , %  $\eta$  ve FF gibi cihaz karakteristikleri incelenmiştir.



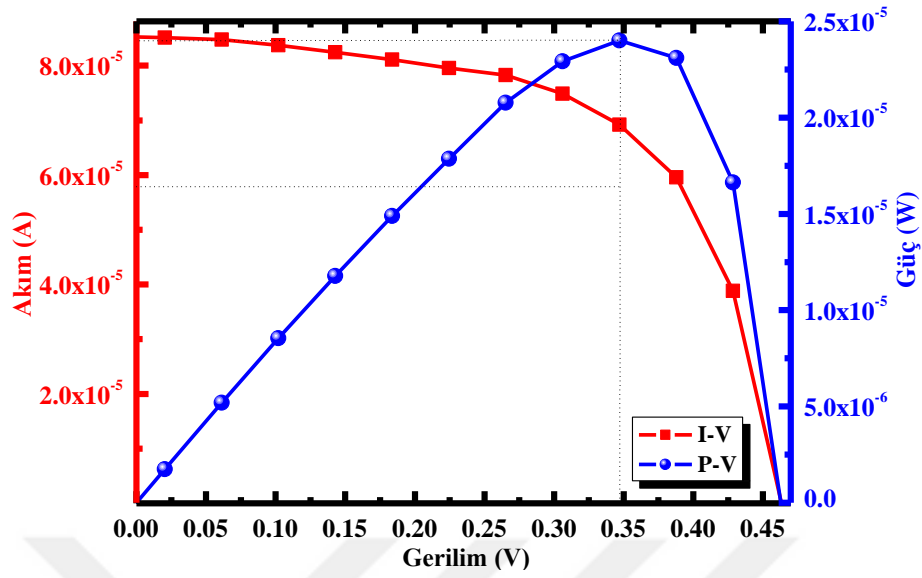
Şekil 4.13. P1 ve P2 boylarıyla üretilen DSSC'lere ait akım-gerilim grafikleri

Şekil 4.13'te verilen P1 ve P2 boylarıyla hazırlanmış DSSC'lerin karşılaştırmalı I-V grafikleri incelendiğinde P1 boyasıyla hazırlanan DSSC'nin P2'ye göre daha yüksek kısa devre akımı ve daha düşük açık devre gerilimi ürettiği görülmektedir.

Ayrıca Şekil 4.14 ve 4.15'te üretilen DSSC'lere ait akım-gerilim-güç grafikleri verilmektedir.



Şekil 4.14. P1 boyasıyla üretilen DSSC'den elde edilen akım-gerilim-güç grafiği



Şekil 4.15. P2 boyasıyla üretilen güneş pilinden elde edilen akım-gerilim-güç grafiği

Pelargonium bitkisinden hazırlanan doğal boyalarla üretilen DSSC'lere ait grafikler (Şekil 14, Şekil 15) üzerinden bu pillere ait maksimum güç noktası ve bu noktadaki akım-gerilim değerleri elde edilmektedir. DSSC'lere ait %  $\eta$ , FF gibi karakteristik parametrelerin hesaplanmasında da bu grafiklerden elde edilen değerler kullanılmaktadır. Hesaplanan karakteristik parametreler ilerleyen kısımlarda detaylı olarak verilmektedir.

### 4.3. Fotoduyarlılaştırıcı Boyar Maddeye Uygulanan Refluks İşlemi

Ekstrakt edilmiş olan P1 ve P2 kodlu doğal boyaların içeiğinde, fotoakım üretiminde etkisiz kalan organik bileşikler azaltmak ve hatta çoğunu ortadan kaldırmak için, katı halde elde edilen bu boyalara asetonla refluks (düşük sıcaklıkta kaynatma) işlemi uygulanmıştır. Asetonla refluks işlemi fotoduyarlılaştırıcı boyar maddenin moleküler veya kimyasal yapısında değişime sebep olabilmektedir. Dolayısıyla boya içerisindeki çeşitli materyal veya elementlerin asetonla refluks prosesi sayesinde artması, azalması veya farklı tür materyallere dönüşmesi sağlanmaktadır. P1 ve P2 boyalarının GC-MS analizleri sonucu elde edilen içeriklerinden faydalanılarak sahip oldukları galik asit oranlarını arttırmak amacıyla asetonla refluks işlemine tabi tutulmaları kararlaştırılmıştır.

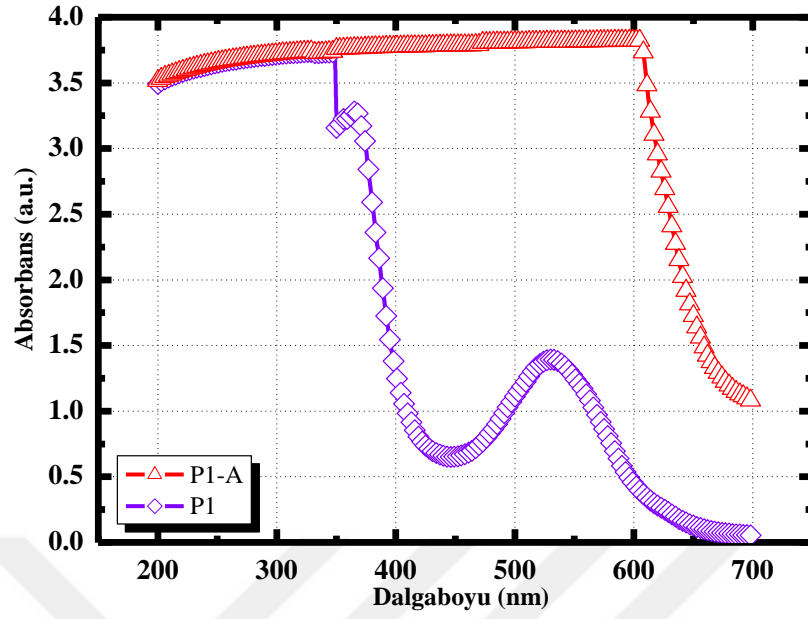
Asetonla refluks işlemi destilasyon mantığına dayanan bir işlemdir. Şekil 3.6'da görülen sistemde reaksiyona maruz bırakılacak olan katı haldeki boyar madde balon jöjeye konulmuş ve üzerine eklenen çözücünün kaynama noktasına kadar ısıtılarak kondenserin içinden akan soğuk suyun etkisiyle buharlaşması ve çözücünün kondenserin yüzeyi üzerinde yoğunlaşarak ortamdan uzaklaştırılması sağlanmıştır. Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen refluks

işleminde çözücü olarak aseton kullanılmıştır. Asetonun kaynama noktası yaklaşık olarak 56 °C'dir. Katı haldeki boyar madde üzerine 50 mL aseton konularak bu çözücüler tamamen ortamdan uzaklaştırılıp katı halde boyar madde elde edilmesiyle sonuçlanacak olan 24 saatlik refluks işlemi başlatılmıştır. 24 saat sonunda asetonun ortamdan tamamen uzaklaştırılması için boyar maddeler tekrar katı hale gelinceye kadar asetonun kaynama noktası olan ortalama 55-56 °C'ye ayarlanan destilasyon cihazında asetonun tamamen giderilmesi sağlanmıştır. P1 ve P2 boyalarının refluksu sonucu elde edilen yeni boyalar P1'den elde edilen için P1-A ve P2'den elde edilen için P2-A olarak kodlanmıştır. Katı haldeki boyar maddeler yine etanolle çözümlenerek karakterize edilmiştir.

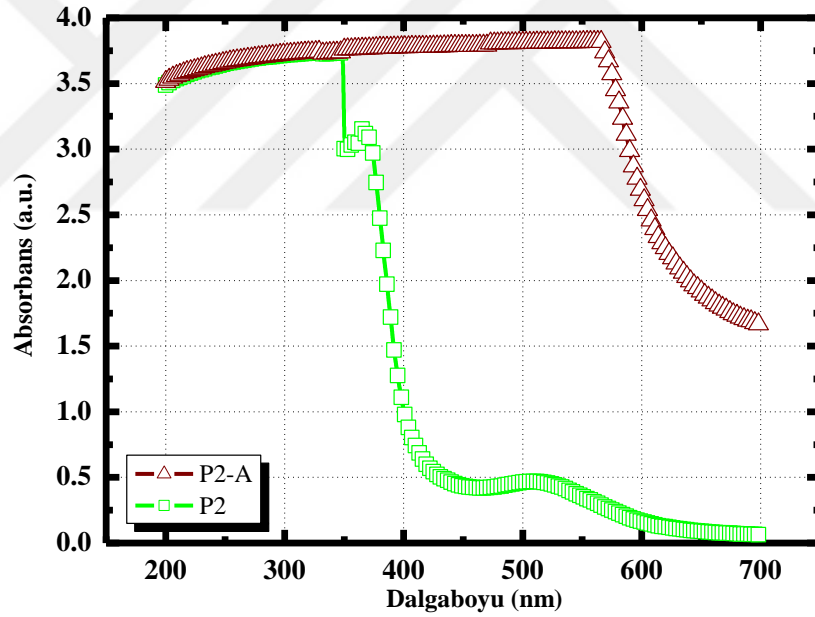
Aynı cinsin iki farklı türüne mensup bitkinin çiçeklerinden elde edilen boya ekstraktlarının asetonla refluks edilmesiyle farklı özelliklerde 4 adet doğal boyar madde elde edilmiştir. Kıyaslama anlamında avantaj sağlaması açısından aynı bitkinin iki farklı türü seçilmiş ve asetonla refluks işleminden sonra boyar madde içeriğindeki değişim belirlenmiştir. Reflüks işlemi sonrasında elde edilen doğal boyaların optik özelliklerinin karakterize edilmesi amacıyla absorpsiyon ölçümleri ve içeriklerinin belirlenmesi için de GC-MS analizleri yapılmıştır. Bu duyarlılaştırıcı boyar maddelerle üretilen güneş pillerinin akım-gerilim üretimi ve enerji dönüşüm verimliliği incelenmiştir. Ayrıca boyar madde içeriğinin performans verilerinde neden olduğu değişimin de belirlenmesiyle boya içeriklerinin performans üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla 4 farklı boyar madde ile üretilen DSSC'lerin performans değerlendirilmesi için;  $V_{OC}$ ,  $I_{SC}$ , akım yoğunluğu ( $J_{SC}$ ), %  $\eta$  ve FF gibi cihaz karakteristikleri incelenmiş, refluks işleminden önce ve sonraki durumları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Boyalara ait absorpsiyon grafikleri Şekil 3.2'de verilen UV-VIS spektrofotometre cihazı ile alınarak muhtemel performansı hakkında fikir edinilmesi amaçlanmıştır. Asetonla refluks prosedürünün ardından absorpsiyon eğrileri elde edilerek P1 ile P1-A boyaları için Şekil 4.16 (a)'da, P2 ile P2-A boyaları içinse Şekil 4.16 (b)'de karşılaştırılmıştır.





(a)












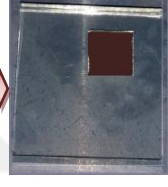
(b)

**Şekil 4.16.** Güneş pili üretimi için hazırlanan boyar maddelerin asetonla reflüks prosesine maruz bırakılmadan önce (P1, P2) ve maruz bırakıldıktan sonraki (P1-A, P2-A) durumlarına ait karşılaştırmalı absorpsiyon grafikleri

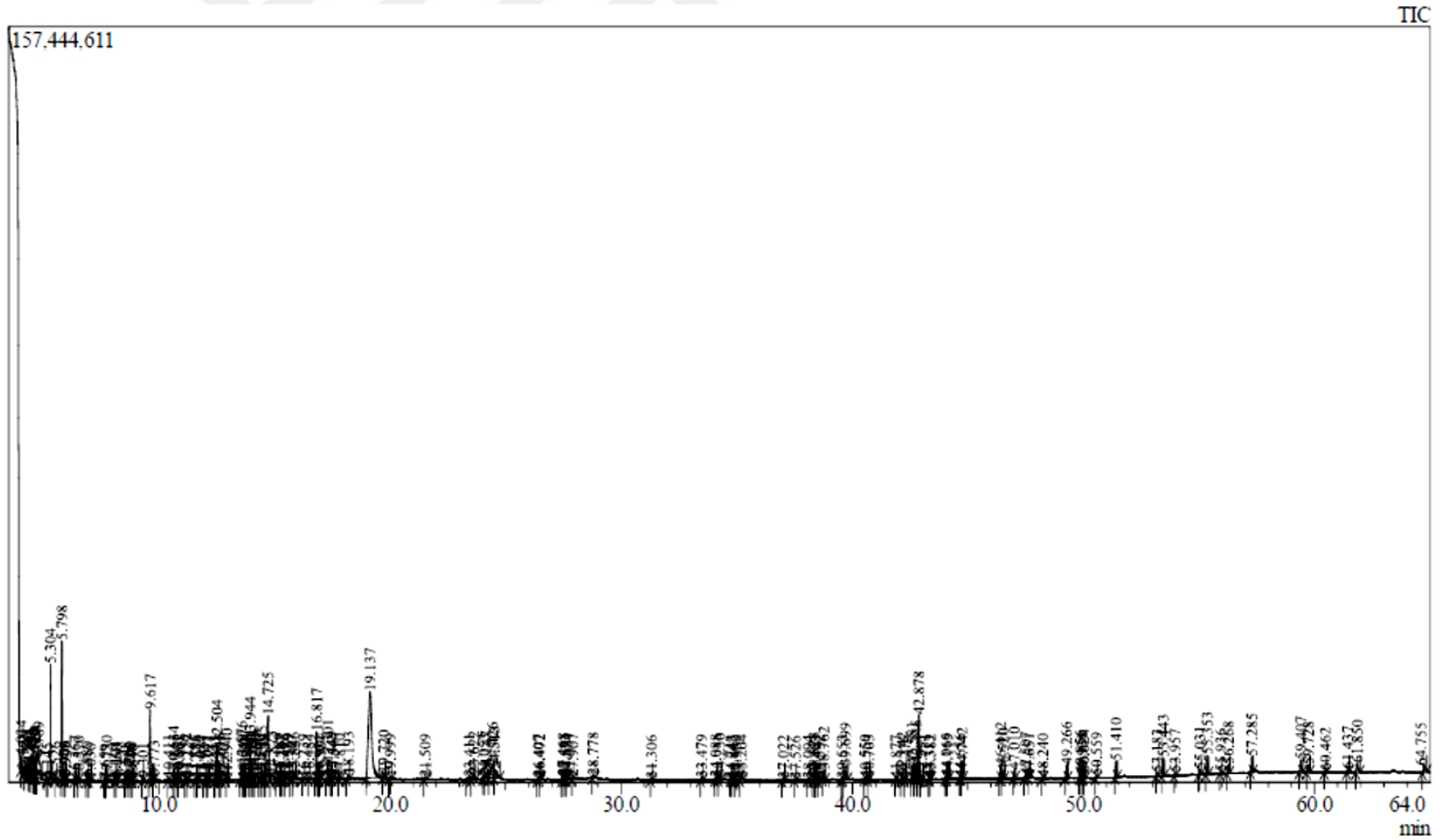
Şekil 4.16'da verilen grafikler incelendiğinde asetonla reflüks prosesinin absorpsiyon spektrumu üzerinde hem P1 hem de P2 boyaarı için daha geniş bir soğurma spektrumu oluşturduğu bariz bir şekilde görülmektedir. Bununla birlikte DSSC'ler için daha geniş bir bölgede dalga boyu absorpsiyonunun pil performansını arttırabileceği [53], bununla birlikte daha geniş absorpsiyon bölgesinin tek başına daha yüksek verim anlamına gelmediği de

bilinmektedir. Karakterizasyon için, reflüks işlemi sonrasında P1-A ve P2-A olarak adlandırılan yeni boyalarla da hazırlanan fotoelektrotlar kullanılarak DSSC'ler üretilmiş ve elektriksel olarak karakterize edilerek önceki boyalarla üretilen DSSC'ler arasında hücre performanslarındaki değişimler incelenerek karşılaştırılmıştır. Elde edilen boya solüsyonları ve bu solüsyonlarla boyanmış haldeki TiO<sub>2</sub> fotoanot fotoğrafları Tablo 4.1'de verilmektedir.

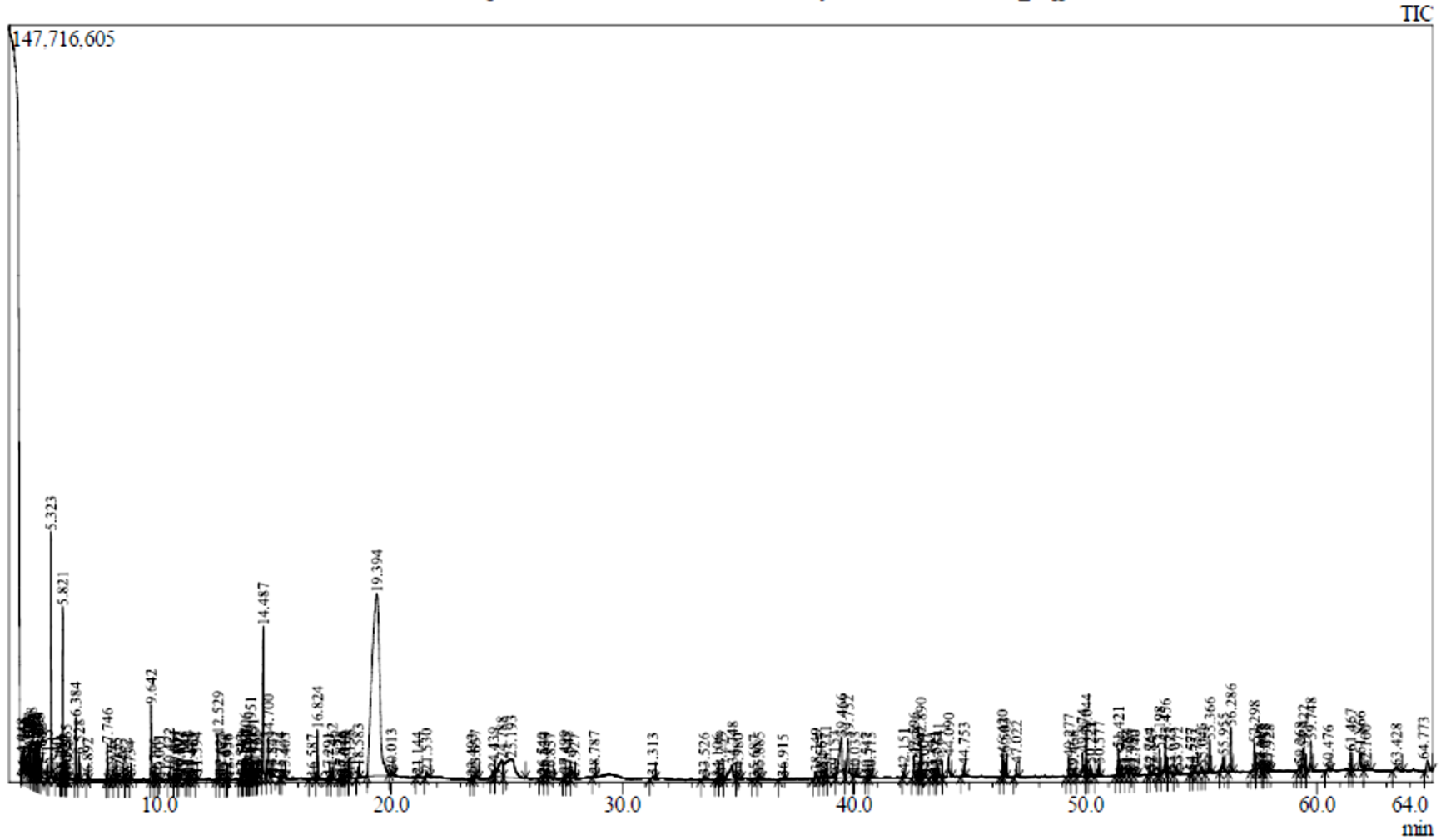
**Tablo 4.1.** Boya ekstraktında kullanılan bitkilerin, elde edilen boya solüsyonlarının ve bu boyar maddelerle oluşturulan fotoelektrotların fotoğrafları

Bitki türü	Boya ekstrakt edilen bitki (çiçek)	Ekstrakt edilen boya	Üretilen Fotoelektrot	Reflüks sonrası elde edilen boya	Üretilen Fotoelektrot
Pelargonium Grandiflorum					
Pelargonium Hortorum					

Boya içeriklerinin belirlenmesi ve boya içeriğinde asetonla reflüks prosedürü sonrasında meydana gelen değişimin belirlenmesi amacıyla P1-A (Şekil 4.17) ve P2-A (Şekil 4.18) boya GC-MS yöntemi ile analiz edilmiştir. GC-MS analizi sonuçlarının detayları Ek 2'de verilmiştir.



Şekil 4.17. P1-A boyasına ait GC-MS analizi sonucu



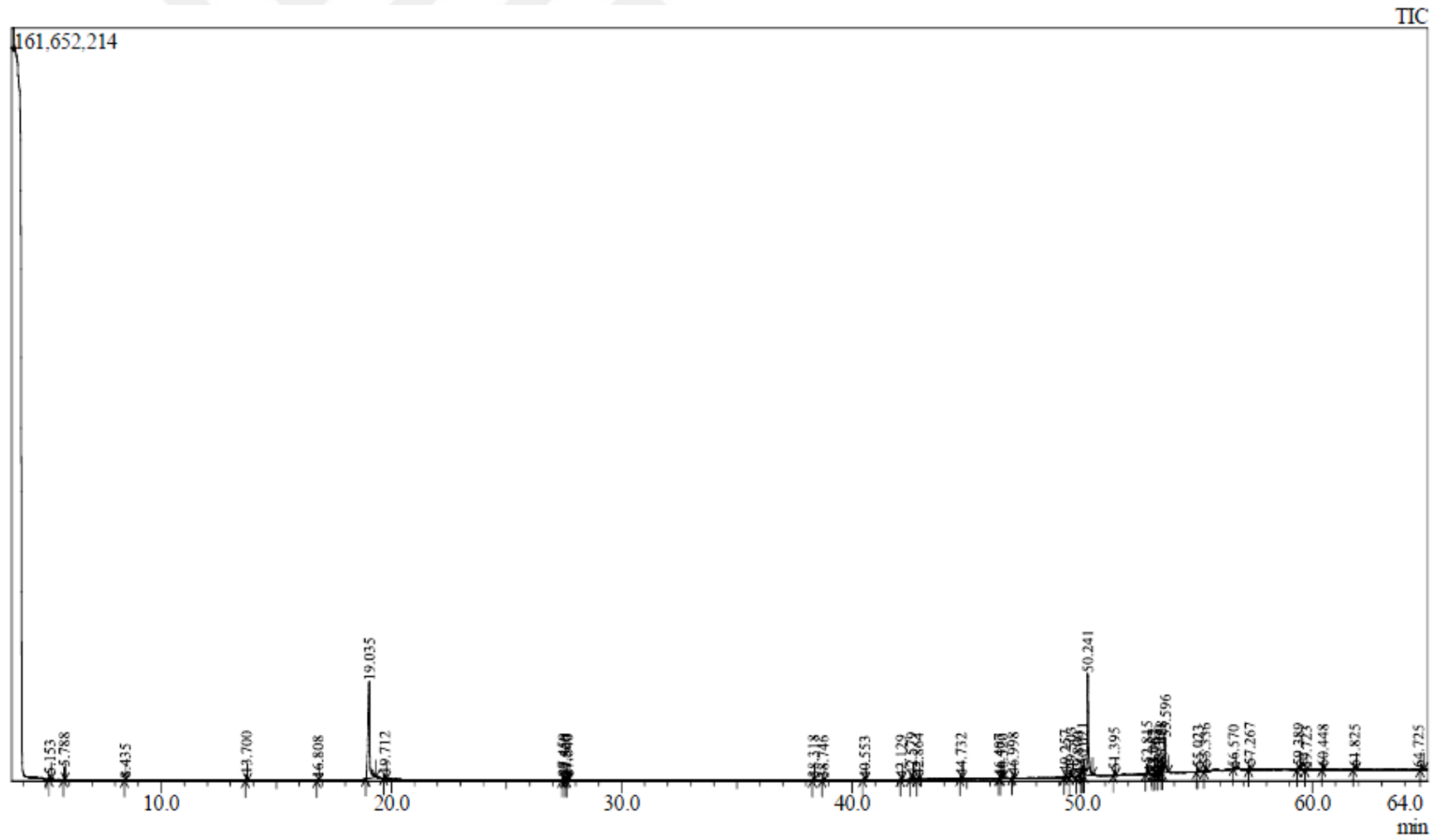
Şekil 4.18. P2-A boyasına ait GC-MS analizi sonucu

Şekil 4.17 ve 4.18’de verilen GC-MS sonuçları incelendiğinde asetonla refluks işleminin hedefine ulaştığı ve galik asit oranlarının her iki boya için de Tablo 4.2’de verildiği şekilde artış gösterdiği belirlenmiştir.

**Tablo 4.2.** Boyar maddelerdeki galik asit oranları

<b>Boyar Madde</b>	<b>Galik asit (%) (GC-MS)</b>
<b>P1</b>	11.90
<b>P1-A</b>	19.09
<b>P2</b>	2.46
<b>P2-A</b>	33.57

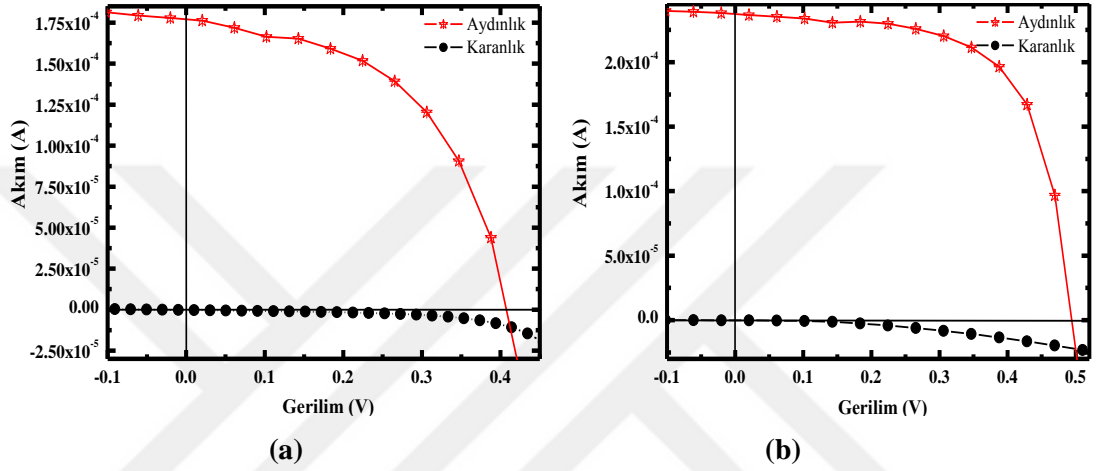
Saf galik asit çözeltisi hazırlanarak bu solüsyonun GC-MS analizi yapılmış ve Şekil 4.19’da verilen analiz sonucuna göre doğal boyalarda olduğu gibi saf galik solüsyonunda da GC-MS analizi sırasında 19. saniye civarında oluşan pik, doğal boyalarda gözlenen pikin galik asite ait olduğunu göstermiştir.



Şekil 4.19. Galik asite ait GC-MS analizi sonucu

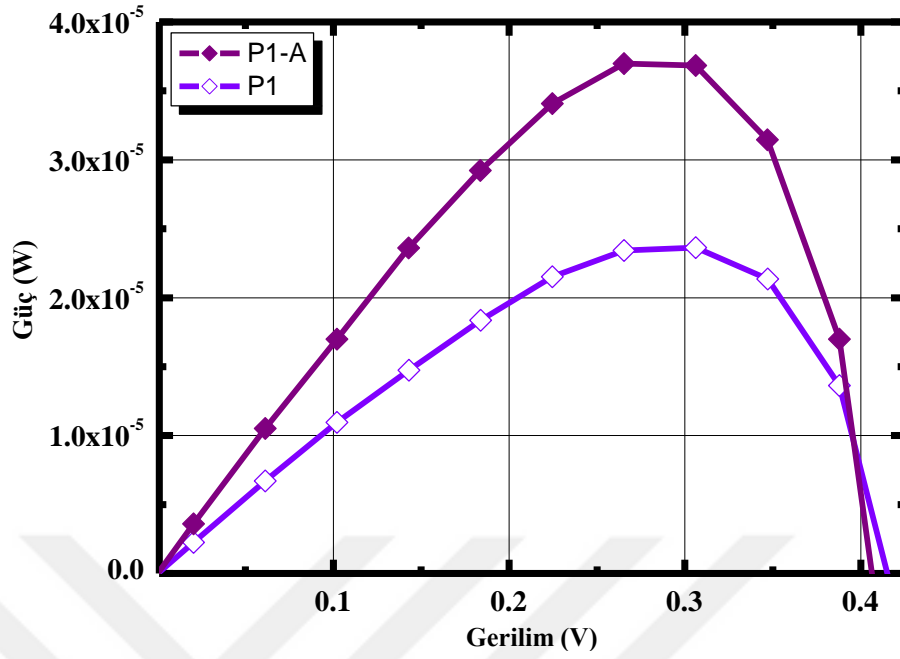
#### 4.4. Refluks İşlemi Sonrası Üretilen DSSC'lerin Fotovoltaik Performans Karakterizasyonu

P1 ve P2 boylarının asetonla refluks işlemine tabi tutulması sonucu elde edilen yeni P1-A ve P2-A boyları ile üretilen DSSC'ler için elektriksel özellikler (I-V grafikleri) daha önce belirtilen koşullar altında elde edilmiş ve P1-A için Şekil 4.20 (a)'da, P2-A içinse Şekil 4.20 (b)'de verilmiştir.

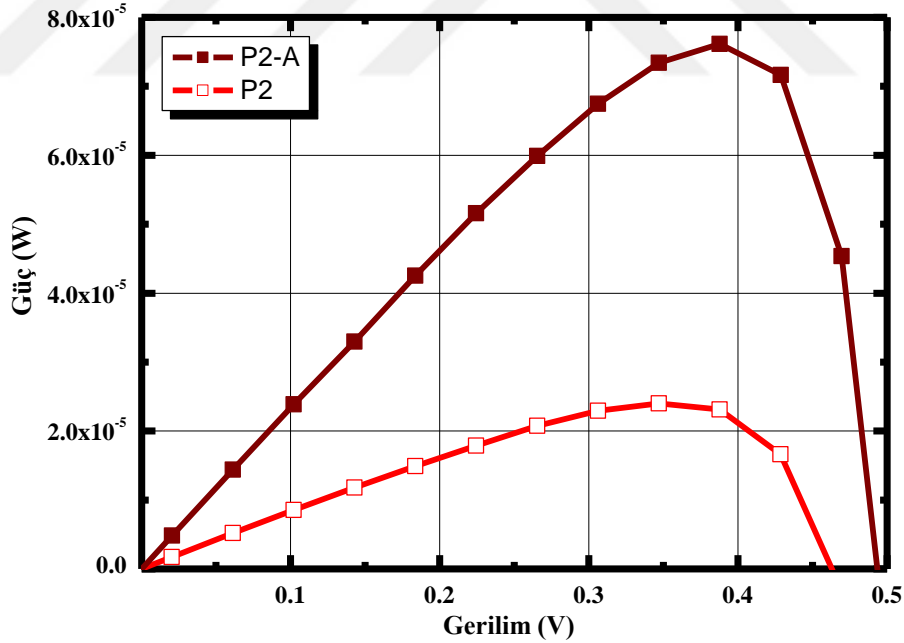


Şekil 4.20. P1-A (a) ve P2-A (b) boylarıyla üretilen DSSC'lere ait karanlık-aydınlık durumlarındaki I-V grafikleri

Şekil 4.20 incelendiğinde refluks işlemi sonrası DSSC üretiminde kullanılan boyların önceki durumlarına benzer şekilde pil içerisinde batarya etkisi oluşturarak elektriksel üretime neden olmadığı, fotoduyarlılaştırıcı olarak işlev gördüğü açıkça görülmüştür. Yeni tür boyar maddelerle üretilen bu DSSC'ler ve asetonla refluks işleminden önceki halleriyle üretilenlerden  $1000 \text{ W/m}^2$  aydınlatma altında elde edilen  $P_{\text{MAK}}-V$  grafikleri P1 ve P1-A için Şekil 4.21'de, P2 ve P2-A içinse Şekil 4.22'de karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.21. P1 ve P1-A boylarıyla üretilen DSSC'lerden elde edilen güç-gerilim grafiklerinin karşılaştırılması



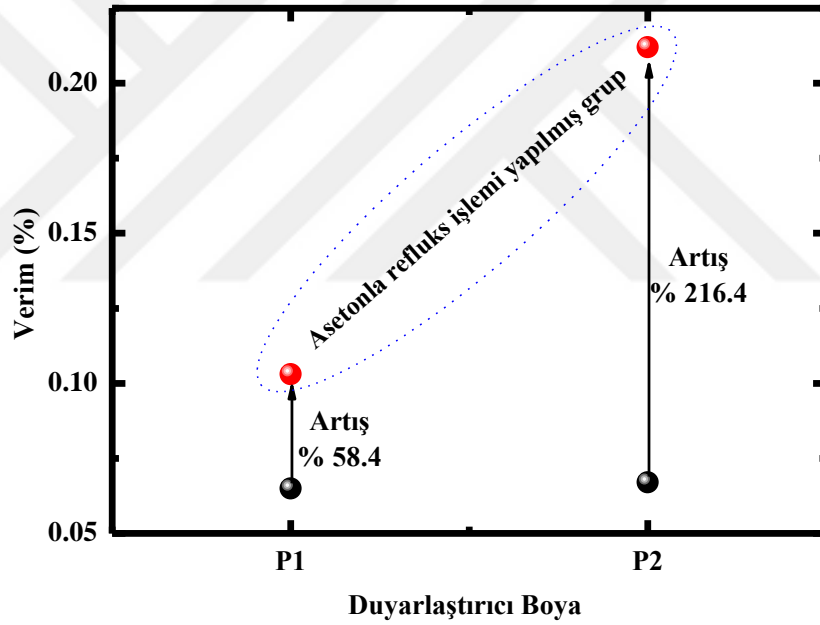
Şekil 4.22. P2 ve P2-A boylarıyla üretilen DSSC'lerden elde edilen güç-gerilim grafiklerinin karşılaştırılması

Şekil 4.21 ve 4.22'de verilen P1-A ve P2-A boylarıyla hazırlanmış DSSC'lerden elde edilen veriler incelendiğinde asetonla reflüks işleminden sonra pillerin fotoakım ve dolayısıyla güç üretimi performanslarında artış olduğu gözlenmiştir. İlk durumda P1 boyası için  $1.11 \times 10^{-4}$  A olan  $I_{SC}$  değeri P2 boyası için  $8.5 \times 10^{-5}$  A değerinde ve P1'den daha düşük elde edilmesine



rağmen asetonla refluks işleminden sonra P1 boyası için akım değeri 1.6 kat artarak  $1.77 \times 10^{-4}$  A değerine (P1-A), P2 boyası içinse 2.75 kat artarak  $2.34 \times 10^{-4}$  A değerine (P2-A) ulaşmıştır. Dolayısıyla bu durumun enerji dönüşüm verimi değerlerinde de artış sağlayacağı açıkça görülmektedir.

Boyaların asetonla refluks işleminden önceki ve sonraki halleriyle üretilen DSSC'lerin performans parametrelerinden enerji dönüşüm verimleri hesaplanarak Şekil 4.22'de, grafiksel olarak sunulmuştur. Nitekim Şekil 4.21 ve 4.22'de verilen fotoakım değerlerindeki artışlar Şekil 4.23'te görüldüğü üzere verim seviyelerinde de izlenmektedir. P2-A boyar maddesiyle üretilen DSSC'de P2'ye göre gerilim üretimi 463 mV'den, 494 mV'ye yükselirken P1-A'da P1'e göre 9 mV'lik az miktarda bir düşüşle 408 mV değerinde kalmaktadır.



**Şekil 4.23.** Boyar maddeler asetonla refluks prosesine maruz bırakıldıktan sonra üretilen DSSC'lerin verim değerlerinde elde edilen artışlar

Şekil 4.23'ten de görüldüğü üzere asetonla refluks prosedürü sayesinde boyalardan elde edilen performans artışı dikkat çekici derecededir. P1 ve P2 fotoduyarlılaştırıcılarla üretilen DSSC'lerden verim değerleri birbirine çok yakın elde edilirken asetonla refluks işleminden sonra verimlilikte P1 boyası için 1.58 kat, P2 boyası içinse 3.16 kat artış meydana gelmektedir.

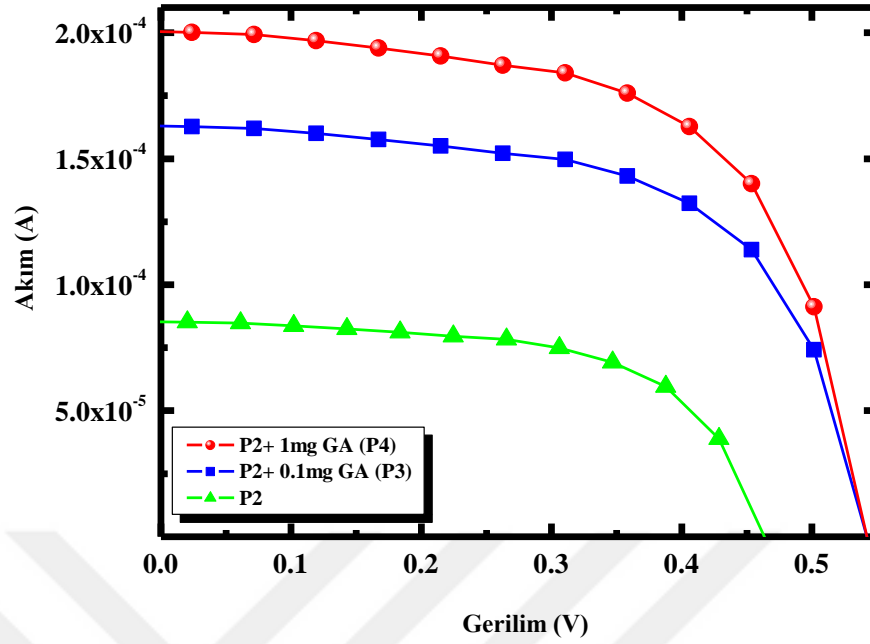
Bu durumda fotoakım üretimi ve enerji dönüşüm verimliliği anlamında asetonla refluks işleminden her boyar maddenin farklı şekilde ve oranlarda etkilendiği ancak her iki boyar

madde için de bu işlemin fotovoltaiik etkinliği arttırdığı net bir şekilde görölmektedir.

GC-MS analizi sonuçlarına bakılarak boyar maddeler içerisindeki galik asit oranları karşılaştırıldığındaysa P1 boyası için bu oranın (% 11.90'dan % 19.09'a) % 7.19'luk, P2 boyası içinse (% 2.46'dan % 33.57'ye) % 31.11'lik bir artış gösterdiği tespit edilmiştir. Boyaların ilk durumlarıyla son durumları arasındaki galik asit oranındaki artışla, verim seviyelerindeki artış birbirleriyle ilişkilidir.

GC-MS analizleri (şekil 17,18), Tablo 4.2 şekil 4.21 ve şekil 4.22 birlikte incelendiğinde birbirinden farklı fotoduyarlılaştırıcılar olan P1 ve P2'nin akım-gerilim üretimi gerçekleştirmekte olduğu, ancak bu durumda tek etken maddenin galik asit olmadığı, GC-MS analizlerinden gözlendiği üzere boyar maddeler içerisinde bulunan çok sayıda bileşenden fotovoltaiik performansa etki eden galik asit dışında başka bileşenler de olduğu açıktır. Boyar maddelerin içeriklerinde galik asit haricindeki diğer etken maddelerin de etkisiyle ilk durumda P1 ve P2 boyaları galik asit oranlarındaki farklılığa rağmen yaklaşık seviyelerde verim değerleri sergilemiş olsalar da galik asit artışıyla münferit olarak her boyada gerçekleşen performans artışı galik asitin bu olayda etken maddelerden biri olduğunu kanıtlamıştır. Bu çalışmada boyar madde içeriğindeki galik asit artışının fotovoltaiik performansa etkisi ve asetonla refluks yöntemi kullanılarak galik asit oranının arttırılması konusu üzerine yoğunlaşılmıştır.

Asetonla refluks işlemi doğal boyalarda sadece inaktif organik bileşikleri elimine etmekle kalmamakta aynı zamanda galik asit miktarını da arttırmaktadır. Ayrıca asetonla refluks işleminin DSSC yapılarının pozitif yönde etkilendiği ve fotovoltaiik performanslarının iyileştiği yadsınamaz bir gerçektir. Deneysel veriler neticesinde verim artışına sebep olduğu gözlenen asetonla refluks prosedürünün doğal boyar maddelerin fotovoltaiik performansında iyileşme sağladığı aşıkardır. Bu iyileşmeye paralel olarak enerji dönüşüm verimliliğindeki artışın boyar madde yapıları içerisinde galik asit oranında gözlenen artıştan kaynaklandığı kanısını doğrulamak amacıyla ilave deneyler tasarlanmıştır. Bu deneyde 10'ar mL P2 boyar maddesine ticari olarak satın alınan saf galik asit (Merck) 0.1 mg eklenerek P3, 1 mg eklenerek P4 kodlu boya solüsyonları hazırlanmıştır. Bu boyalarla üretilen DSSC'ler de daha önekilerde olduğu gibi karakterize edilmiş ve sonuçlar şekil 4.24'te verilmiştir.



**Şekil 4.24.** Boyar maddeye saf galik asit eklendikten sonra üretilen DSSC'lerden elde edilen I-V grafiklerindeki iyileşme

Haricen galik asit eklenmiş P3 ve P4 boya larıyla üretilen DSSC'lere ait Şekil 4.24'te verilen I-V grafiklerine göre Tablo 4.3'ten de görüldüğü üzere, boyar maddeye eklenen saf galik asitin de verim artışına neden olduğu tespit edilmiştir. Böylece asetonla refluks prosedürü ile elde edilen performans artışının galik asit artışıyla olan bağlantısı kesinlik kazanmaktadır. Şekil 4.24'teki akım-gerilim karakteristikleri incelendiğinde P2 boyası için galik asit miktarının artmasıyla özellikle akım değerindeki artış gözle görülür şekilde gerçekleşmiştir.

**Tablo 4.3.** Boyar maddeye saf galik asit eklendikten sonra elde edilen DSSC'lerden elde edilen karakteristik değerler

Boya kodu	J <sub>sc</sub> (A/m <sup>2</sup> )	V <sub>oc</sub> (mV)	J <sub>m</sub> (A/m <sup>2</sup> )	V <sub>m</sub> (mV)	FF	Verim (%)
P2	2.361	464	1.917	345	0.604	0.067
P2+0.1 mg GA (P3)	4.528	542	3.889	376	0.596	0.146
P2+1 mg GA (P4)	5.583	543	4.917	357	0.579	0.176

Boya içerisindeki galik asitin boya moleküllerinin TiO<sub>2</sub>'ye bağlanmasını optimize edebildiği ve böylece DSSC içerisinde gerçekleşen yük taşıma işleminin nispeten kolaylaşmasıyla üretimi arttırdığı düşünülmektedir. Ancak bu noktada enerji dönüşüm verimliliği ile galik asit oranı arasında her ne kadar bir doğru orantı tespit edilmiş olsa da galik asit oranındaki artışın da asidik boya solüsyonları hazırlanmasında olduğu gibi optimum bir değerde (galik asit için pH 3.3) [167] tutulması gerektiği unutulmamalıdır. Şekil 4.24'te, boya solüsyonuna

eklenen 0.1 mg'lık galik asitin etkisiyle P3 boyası için akım ve gerilim değerlerinde gerçekleşen artış P2'ye göre akım yoğunluğunda 1.9 kat, gerilimde ise 1.2 kat olarak gerçekleşmiştir. Galik asit oranı 10 katına çıkarılarak 1 mg eklendiğindeyse (P4 boyası) gerilim P3 boyasına göre neredeyse sabit kalmaktadır. P4 boyasıyla elde edilen akım yoğunluğu P2'ye göre 2.4 kat, P3'e göreyse 1.2 kat artmaktadır. Dolayısıyla galik asit ilavesindeki 10 katlık artışa karşılık elde edilen performans aynı seviyede yükselmemektedir. Bu bağlamda galik asit artışının maksimum performans için her boyaya özgü olarak farklı optimum miktarlar gerektirdiği ortadadır.

#### **4.5. Tek-Diyot ve Çift Diyot Modelleri Kullanılarak DSSC'lerin Analitik Karakterizasyonu**

DSSC'nin elektriksel parametreleri, deneysel I-V karakteristiğinden elde edilen verilere tek-diyotlu ve çift-diyotlu eşdeğer devre modelleri uygulanarak analitik yöntemle de karakterize edilebilmektedir.

Bu çalışmada deneysel olarak elde edilen güneş pili parametrelerinin analitik yöntemle de analiz edilebilmesi ve karşılaştırılabilmesi amacıyla tek-diyot ve çift-diyot eşdeğer devre modelleri uygulanmıştır. Bu modellerden faydalanılarak güneş pillerine ait seri direnç, paralel direnç, diyot idealite faktörü, diyot saturasyon akımı gibi parametreler hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 4.4'te verilmiştir.

**Tablo 4.4.** Üretilen DSSC'lerin fotovoltaik performans parametreleri (oda sıcaklığında 298°K, 1000 W/m<sup>2</sup> aydınlatma altında)

Boya kodu	Grafik Analiz Sonuçları							Tek Diyot Modeli					İki Diyot Modeli- Kübik Çözüm					Verim (%)	
	J <sub>sc</sub> (A/m <sup>2</sup> )	V <sub>oc</sub> (mV)	J <sub>m</sub> (A/m <sup>2</sup> )	V <sub>m</sub> (mV)	R <sub>s</sub> (Ω)	R <sub>SH</sub> (Ω)	Mak. Güç (mW)	n	J <sub>ph</sub> (A/m <sup>2</sup> )	R <sub>s</sub> (Ω)	R <sub>SH</sub> (Ω)	J <sub>s</sub> (A/m <sup>2</sup> )	J <sub>ph</sub> (A/m <sup>2</sup> )	R <sub>s</sub> (Ω)	R <sub>SH</sub> (Ω)	J <sub>s1</sub> (A/m <sup>2</sup> )	J <sub>s2</sub> (A/m <sup>2</sup> )		FF
<b>P1</b>	3.08	<b>417</b>	2.53	<b>256</b>	800.00	<b>24238</b>	0.023	<b>2.88</b>	3.172	<b>799.98</b>	24000	<b>0.011</b>	3.081	<b>799.99</b>	23200	<b>5.062*10<sup>-7</sup></b>	-7.641*10 <sup>-4</sup>	<b>0.504</b>	0.065
<b>P1-A</b>	4.92	<b>408</b>	3.86	<b>265</b>	446.43	<b>26625</b>	0.037	<b>3.53</b>	4.937	<b>445.98</b>	27000	<b>0.054</b>	4.911	<b>445.99</b>	26550	<b>8.331*10<sup>-7</sup></b>	-5.776*10 <sup>-4</sup>	<b>0.510</b>	0.103
<b>P2</b>	2.36	<b>463</b>	1.92	<b>345</b>	892.86	<b>144093</b>	0.024	<b>2.28</b>	2.374	<b>892.99</b>	144000	<b>0.0009</b>	2.360	<b>892.99</b>	143100	<b>5.936*10<sup>-8</sup></b>	-1.951*10 <sup>-4</sup>	<b>0.606</b>	0.067
<b>P2-A</b>	6.49	<b>494</b>	5.50	<b>386</b>	256.41	<b>32006</b>	0.076	<b>1.88</b>	6.663	<b>255.99</b>	32000	<b>0.0003</b>	6.610	<b>255.99</b>	31740	<b>5.82*10<sup>-8</sup></b>	-4.247*10 <sup>-4</sup>	<b>0.660</b>	0.212

Tablo 4.4 incelendiğinde, tek ve çift diyot modelleri kullanılarak yapılan hesaplamaların elde edilen grafik analiz sonuçlarını destekler nitelikte olduğu görülmektedir. Ayrıca tek diyot ve çift diyot modelleriyle hesaplanan parametrelerin birbiriyle de uyum içerisinde olduğu gözlenmektedir. Tablo 4.4'te, P1 ve P1-A boya için seri direnç değeri 800  $\Omega$ 'dan 446  $\Omega$ 'a, P2 ve P2-A boya içinse 892  $\Omega$ 'dan 256  $\Omega$ 'a düşerken fotoakım yoğunluğu değerleri artmaktadır. Bu durumda  $R_s$  değerleri reflüks işleminden sonra P1 boyası için % 44.3, P2 boyası içinse % 71.3 oranında azaltmakta, buna karşılık fotoakım yoğunluğu değerleri P1'de 1.6 kat, P2'deyse 2.75 kat artmaktadır (bkz. Şekil 4.21, Şekil 4.22). Daha önceki bölümlerde belirtildiği üzere seri direnç; DSSC'de akım akışına karşı gösterilen mevcut zorluğun bir ölçüsü olarak FTO ve arka elektrodun levha direnci, fotoanot üzerinden elektron taşıma direnci, iyon taşıma direnci ve arka elektrottaki yük transfer direncinden [220, 221, 222] oluşmaktadır. DSSC üretiminde diğer unsurlar sabit tutularak yalnızca duyarlılaştırıcı boyar maddeler değiştirilmiştir. Seri direnç bu koşullar altında böyle büyük bir değişim gösteriyorsa, değişim yalnızca fotoanot üzerinden elektron taşıma direncine atfedilebilir demektir. Doğal boyaların ilk halleriyle üretilen DSSC'lerde seri direnç değerleri birbirine benzerken, açık devre gerilimi ve paralel direnç değerleri P2 boyasıyla P1'e nazaran daha yüksek değerde elde edilmiştir. Ayrıca, P1 boya ile üretilen DSSC P2'ye göre daha yüksek fotoakım yoğunluğu, ancak daha düşük gerilim değerinden dolayı daha düşük enerji dönüşüm verimliliği sergilemiştir.

Paralel direnç için, P1-A duyarlılaştırıcı boyayla üretilen DSSC'de P1'e göre 24238  $\Omega$  seviyesinden 26625  $\Omega$  seviyesine bir iyileşme gözlenirken, P2-A duyarlılaştırıcı boyayla üretilen DSSC için  $R_{SH}$  değerinin düşmekte olduğu dikkati çekmektedir. Bu direnç değeri 144093  $\Omega$  değerinden 32006  $\Omega$  değerine doğru 4.5 kat azalarak kötüye gitmesine rağmen, verimlilikteki iyileşme, 32.000  $\Omega$  değeriyle P1 ve P1-A boya için nazaran yüksek olan paralel direnç değerinin hala enerji dönüşüm verimliliği üzerinde etkin olduğunu göstermektedir.

Asetonla reflüks işlemi sonunda DSSC'lerin diyot idealite faktörleri de 1.88-3.53 aralığında olup, bu değerlerin literatürle [220, 228, 229] uyumlu olduğu belirlenmiştir.

FF değerleri incelendiğindeyse her iki tür boyada da asetonla reflüks işlemi sonrası gerçekleşen fotovoltaik performans artışına paralel olarak doluluk faktörünün de artış gösterdiği görülmektedir.

Tüm bu veriler doğrultusunda, boyar maddeler için daha geniş absorpsiyon bölgesine sahip olmanın (bkz. Şekil 4.9) tek başına güneş enerjisi performansı üzerinde etkili olmadığı kanısına varılmıştır.

Tek-diyot ve çift-diyot eşdeğer devre modelleri P2 boyasına saf galik asit eklenerek hazırlanan DSSC'lere ait performans verilerinin analitik olarak hesaplanmasında da kullanılmış ve elde edilen grafik analiz sonuçlarıyla eşdeğer devre modellerinden hesaplanan sonuçlar Tablo 4.5'te verilmiştir.



**Tablo 4.5.** P2 boyasına saf galik asit eklenerek üretilen DSSC lerin fotovoltaik performans parametreleri (oda sıcaklığında 298°K, 1000 W/m<sup>2</sup> aydınlatma altında)

Boya kodu	Grafik Analiz Sonuçları							Tek Diyot Modeli					İki Diyot Modeli- Kübik Çözüm					Verim (%)	
	J <sub>sc</sub> (A/m <sup>2</sup> )	V <sub>oc</sub> (mV)	J <sub>m</sub> (A/m <sup>2</sup> )	V <sub>m</sub> (mV)	R <sub>s</sub> (Ω)	R <sub>SH</sub> (Ω)	Mak. Güç (mW)	n	J <sub>ph</sub> (A/m <sup>2</sup> )	R <sub>s</sub> (Ω)	R <sub>SH</sub> (Ω)	J <sub>s</sub> (A/m <sup>2</sup> )	J <sub>ph</sub> (A/m <sup>2</sup> )	R <sub>s</sub> (Ω)	R <sub>SH</sub> (Ω)	J <sub>s1</sub> (A/m <sup>2</sup> )	J <sub>s2</sub> (A/m <sup>2</sup> )		FF
<b>P2</b>	2.361	464	1.917	345	892.86	144094	0.024	2.282	2.374	892.99	144000	0.0009	2.360	892.99	143100	5.936*10 <sup>-8</sup>	-1.951*10 <sup>-4</sup>	0.604	0.066
<b>P3</b>	4.528	542	3.889	376	549.45	81063	0.053	2.784	4.556	548.98	81063	8.363*10 <sup>-8</sup>	4.528	548.99	80510	3.738*10 <sup>-9</sup>	-2.245*10 <sup>-5</sup>	0.596	0.146
<b>P4</b>	5.583	543	4.917	357	446.43	71630	0.063	2.963	5.613	445.99	71630	1.610*10 <sup>-7</sup>	5.583	445.99	71180	4.179*10 <sup>-9</sup>	-1.735*10 <sup>-5</sup>	0.579	0.176



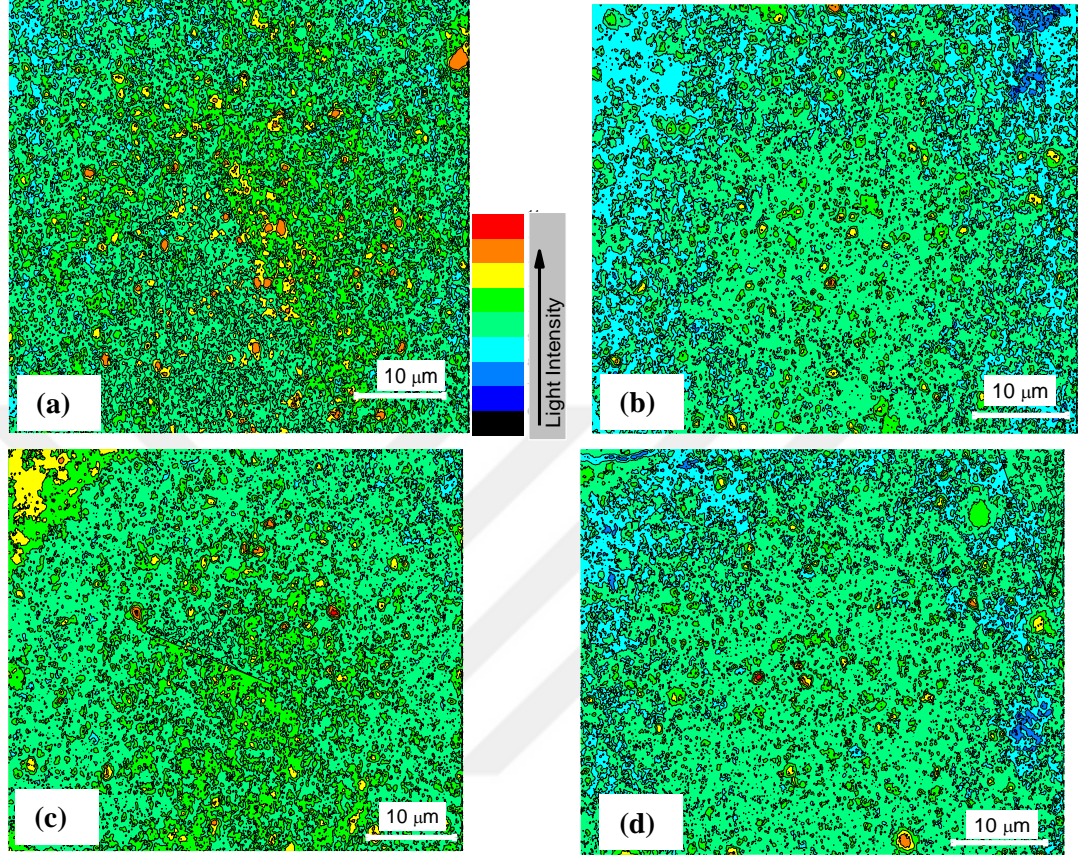
Tablo 4.5 dikkatle incelendiğinde galik asit eklenmesiyle fotoakım yoğunluğu, doyma akım yoğunluğu, seri direnç ve güneş hücresinin enerji dönüşüm veriminde dikkate değer gelişmeler gözlenmektedir. Üretim parametrelerine bakıldığında fotoakım yoğunluğu ve seri direnç değerleri için de benzer yorumlar yapılabilmektedir.  $R_s$  değeri ilk aşamada (P3 boyası için) % 38 oranında azalmış, ikinci galik asit ilavesiyle de % 19 oranında azalarak 446  $\Omega$  seviyesine düşmüştür. Galik asit eklenmesiyle seri dirençteki azalmaya paralel olarak fotoakım yoğunluğunda daha önce de bahsedilen artış, Dumbra ve ark. [167]'in bulguları tarafından desteklenmektedir. Bu bulgulara göre yüksek fotoakım değerleri, galik asit gibi fenolik maddelerle duyarlılaştırılmış olan  $TiO_2$  ile elde edilebilmektedir [185]. Galik asit artışı ile idealite faktörü gittikçe artarak, paralel direnç ve FF ise her adımda düşerek kötüleşen değerler almaktaysa da idealite faktörünün halen DSSC için makul olan 2-3 aralığında [220, 228, 229] olduğu ve akım yoğunluğunda izlenen çok iyi seviyelerdeki artışın bu değerleri tolere ettiği gözlenmiştir. Ayrıca maksimum güç üretimi değeri de ilk adımda 2.2 kat, ikinci adımdaysa 2.6 kat artmıştır. P2 boyasına saf galik asit eklenerek hazırlanan P3 boyasıyla enerji dönüşüm verimliliğinde % 0.067'den % 0.146'ya 2 kattan daha büyük bir artış gözlenirken, P4 boyasıyla P2'ye göre 2.7 kat, P3'e göreyse 1.2 katlık bir artışla % 0.176 değerinde bir enerji dönüşüm verimliliği gözlenmiştir.

Asetonla reflüks işlemi sonucu galik asit oranındaki artışla izlenen performans artışının doğal fotoduyarlılaştırıcı boyar maddeye saf galik asit ilavesiyle de elde edilebiliyor olması savunulan yöntemin doğruluğunu kanıtlamaktadır.

#### **4.6. Fotoelektrot Yüzey Yapılarının İncelenmesi**

Galik asitin boya içerisinde hem pH ayarlaması yaparak hem de  $TiO_2$  yüzeye tutunmayı artırarak sağladığı avantajların görsel olarak belirlenmesi amacıyla boyar maddeyle muamele sonrasında fotoelektrotların yüzey yapıları da incelenmiştir. Galik asitin  $TiO_2$  yüzey üzerine tutunmasını gözlemek için boya ve galik asit adsorpsiyonu metalurjik mikroskop görüntüleri ile incelenmiş ve Şekil 4.25'te  $TiO_2$ 'nin ayrıntılı morfolojik analizleri verilmiştir. Biriktirilen  $TiO_2$  filmlerinin yüzey morfolojisi, Nikon Eclipse LV 150 metalurjik mikroskop ile incelenmiştir. Yüzeyden CCD kamera piksellerine yansıyan ışık yoğunluklarını göstermekte olan görüntüler yükseklik ve çukurları daha belirgin hale getirmek için kontur çizimi şekline dönüştürülmüştür. Görüntüler alınmadan önce, yüzeye tutunmayan boya, galik asit veya boya-galik asit kalıntılarını uzaklaştırmak için örnekler etanol ile yıkanmıştır. Böylece elde edilen görüntülerin yüzeye adsorbe olmuş boyalar ve

galik asite ait olması sağlanmıştır.

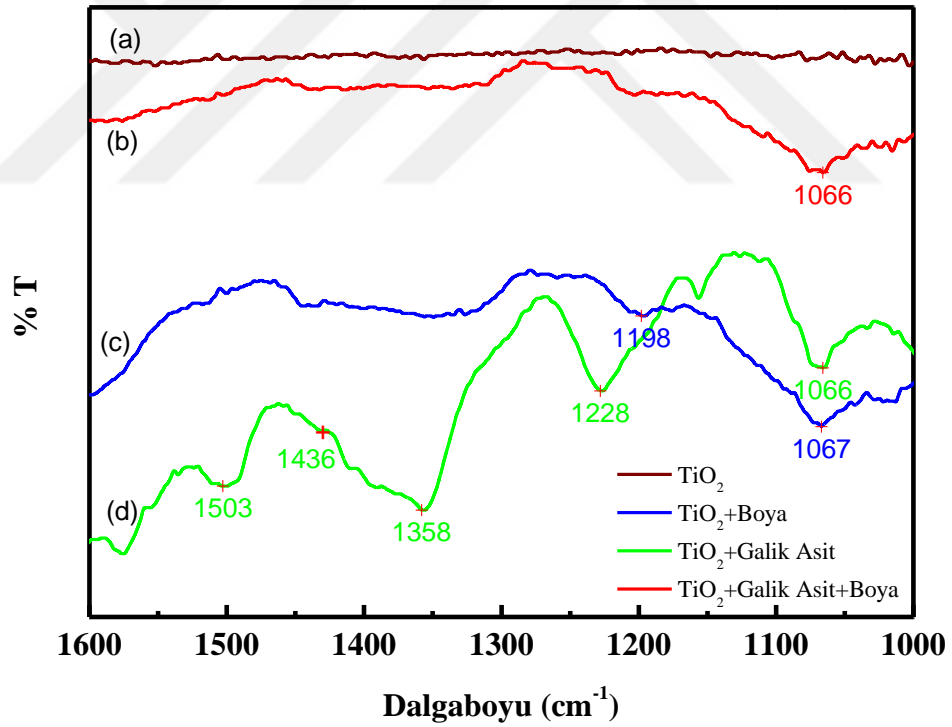


**Şekil 4.25.** 1000X büyütme altında TiO<sub>2</sub> (a), P2 boya adsorbe edilmiş TiO<sub>2</sub> (b), yalnızca galik asit adsorbe edilmiş TiO<sub>2</sub> (c) ve P4 (P2+1mg GA) boya adsorbe edilmiş TiO<sub>2</sub> (d) tabakalarının mikroskop görüntüleri

TiO<sub>2</sub> yüzeyine, etanolle solüsyon haline getirilmiş galik asit adsorbe edilmiş TiO<sub>2</sub>, P2 ve galik asit eklenmiş haldeki P4 boya adsorbe edilmiş TiO<sub>2</sub> ve yalnız TiO<sub>2</sub> tabakalarının mikroskop görüntüleri 1000X büyütme altında alınmıştır. Şekil 4.25 (a) görüntüsü TiO<sub>2</sub> katman yüzeyini göstermektedir. Boyasız TiO<sub>2</sub> yüzeyi, yüksek yüzey porozitesi nedeniyle yansıyan çok yüksek ve düşük ışık yoğunluklarına sahiptir. Yüzeydeki çukurlar veya boşluklar siyah noktalar olarak görülmektedir. Şekil 4.25 (b) görüntüsü P2 boya adsorbe edilmiş TiO<sub>2</sub> yüzeyini göstermektedir. Bu iki görüntü karşılaştırıldığında; Şekil 4.25 (b) görüntüsü Şekil 4.25 (a) görüntüne nazaran, boyanmış TiO<sub>2</sub> tabakadan veya boyar maddenin TiO<sub>2</sub> yüzeyindeki boşlukları doldurmasından kaynaklanabilecek daha az gözenekliliğe sahiptir. Şekil 4.25 (c) görüntüsü galik asit adsorbe edilmiş TiO<sub>2</sub> yüzeyi içindir. Şekil 4.25 (a) görüntüsü ile karşılaştırıldığında; galik asitin TiO<sub>2</sub> tarafından adsorbe edildiği Şekil 4.25 (a) ve (c) arasındaki kontrast farkı yardımıyla söylenebilmektedir. Şekil 4.25 (d) görüntüsü

ise, P4 boya adsorplanmış TiO<sub>2</sub> içindir. Şekil 4.25 (d) görüntüsü Şekil 4.25 (b) ile karşılaştırıldığında, galik asit katkılı boya adsorbe edilmiş TiO<sub>2</sub> tabakanın farklı yansıma değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Elde edilen bu veriler, boya, galik asit, galik asit katkılı boyar maddelerin TiO<sub>2</sub> yüzeyince adsorbe edilebildiğini göstermektedir. Yüzeyde gerçekleşen yansıma değişikliği haricinde boyaya galik asit ilavesiyle yüzey morfolojisinde herhangi bir değişiklik olmadığı gözlenmiştir.

Daha detaylı analiz için galik asit ve boyanın TiO<sub>2</sub> yüzey üzerine tutunmasını araştırmak amacıyla örnek yüzeylerden FTIR ölçümleri alınmıştır. FTIR spektrumu, oda sıcaklığında Perkin-Elmer Spectrum Two FT-IR modeli Spektrometre ile ATR yöntemi kullanılarak kaydedilmiştir. Şekil 4.26, TiO<sub>2</sub>, P4 boya adsorbe edilmiş TiO<sub>2</sub>, P2 boya adsorbe edilmiş TiO<sub>2</sub> ve galik asit adsorbe edilmiş TiO<sub>2</sub> yüzeylerinden elde edilen FTIR-ATR spektrumlarını göstermektedir.



**Şekil 4.26.** TiO<sub>2</sub> (a), P2 boya adsorbe edilmiş TiO<sub>2</sub> (b), P4 (P2+1mg GA) boya adsorbe edilmiş TiO<sub>2</sub> (c) ve yalnızca galik asit adsorbe edilmiş TiO<sub>2</sub> (d) ve tabakalarına ait FTIR spektrumu

Galik asit adsorbe edilmiş TiO<sub>2</sub> filmleri için pik değerleri Tablo 4.6'da sunulmuştur ve bu sonuçlar literatürle iyi uyum içindedir [186, 230]. Bahsedilen dört spektrum incelendiğinde, boyanın (P2), galik asitin ve galik asit katkılı boyanın (P4) TiO<sub>2</sub> yüzeyine bağlanabildiği

açıkça görülmektedir. Dahası, FTIR sonuçları doğal boyar maddede (P2) GC-MS analiziyle gözlemlenen galik asit varlığını da doğrulamaktadır.

**Tablo 4.6.** Galik asit adsorbe edilmiş TiO<sub>2</sub> filmler için FTIR bant değerleri

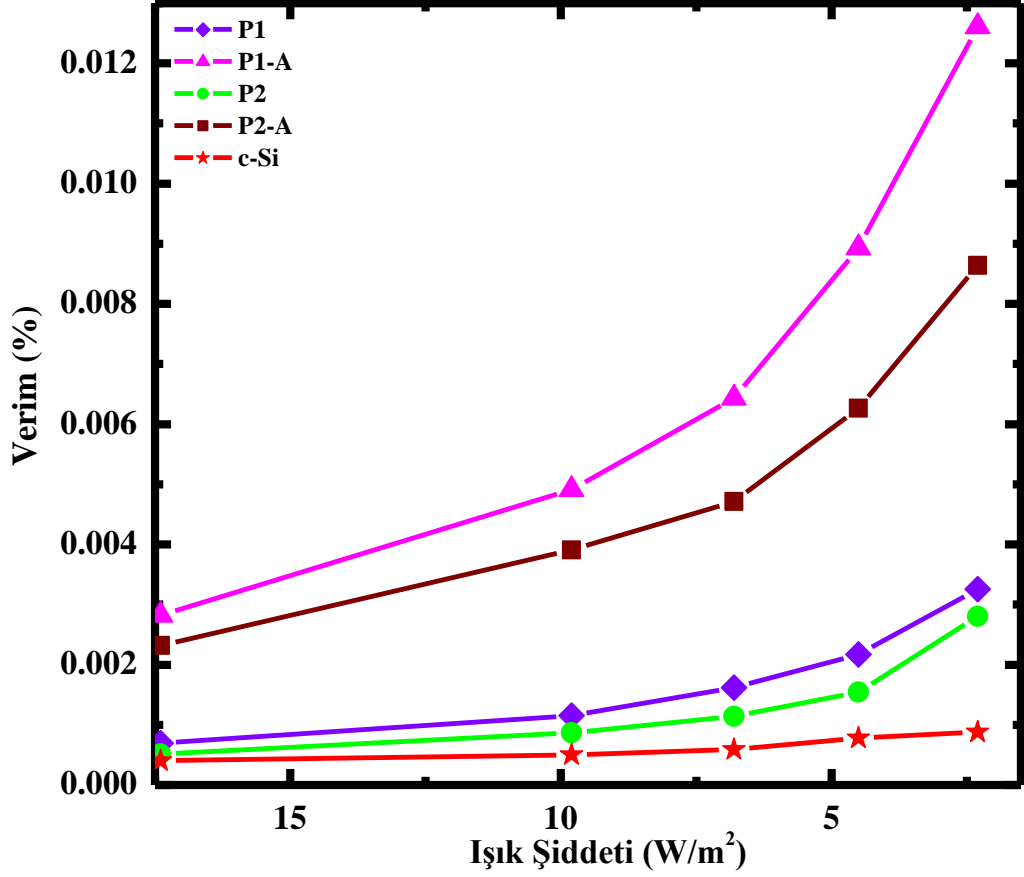
Dalga Sayısı (cm <sup>-1</sup> )	Durum
1066-1067	$\delta(C - H)$
1228	$\nu(Ph - O)/OH$ deformasyon titreşimi
1358	$\delta(Ph - O - H, C - O)$
1436	$\nu(C - O, gerilme)$
1503	$\nu(-C = C-, -C - C-)$

#### 4.7. Üretilen DSSC'lerin Aydınlatma Şiddetine Bağlı Fotovoltaik Performans Karakterizasyonu

Tezin bu bölümünde deneyler laboratuvar koşullarında ölçülebilecek minimum ışık şiddetlerinde yapılmış, böylece doğal boyalarla üretilmiş DSSC'lerin fotodetektör olarak kullanılma durumlarında tepki verebildiği en düşük ışık şiddeti değerlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca değişen ışık şiddeti şartlarında gösterdikleri performans da zamansal olarak test edilmiştir. DSSC'lerin test edilmesi sırasında sıcaklık 298°K (25°C)'de sabit tutulup şiddetleri sırasıyla 34, 21.2, 17.4, 9.8, 6.8, 4.5 ve 2.3 W/m<sup>2</sup> olacak şekilde değiştirilerek her aydınlatma değeri için hücre performansları ölçülmüştür. DSSC'ler ile karşılaştırmak için yüksek kalitede, ticari tek kristal Si sensör (bkz. Şekil 3.18) kullanılmıştır. Tez içerisinde bu sensörden c-Si olarak bahsedilmektedir. Aşağıda bu testlerden elde edilen sonuçlar açıklanmaktadır.

DSSC ve Si sensörün performans özelliklerinin farkını anlamak için iyi tasarlanmış deneylerin geliştirilmesi ve deney sonuçlarının analizi gerekmektedir. Tez kapsamındaki çalışmalar, DSSC parametrelerinin performansının ışık şiddetine bağımlılığı hakkında bilgi sahibi olmak amacıyla deneysel verilere dayandırılmıştır. Performans özellikleri, değişik hava koşullarında veya iç mekanlarda maruz kaldıkları aydınlatma parametreleri simüle edilerek denenmiştir. Biri DSSC diğeri c-Si sensör olmak üzere iki farklı fotovoltaik yapının gerçek çalışma koşullarındaki hücre performanslarının değerlendirilmesi amacıyla karşılaştırmalı testleri, DSSC'lerin ve c-Si sensörün laboratuvarında sağlanan ideal ve kontrollü koşullardaki testleri gerçekleştirilerek oluşturulmuştur.

P1, P1-A, P2, ve P2-A olmak üzere 4 farklı boyar maddeyle üretilmiş DSSC fotodenedektörler ile c-Si güneş hücresinin farklı aydınlatma şiddetlerinde gösterdikleri performans verilerinin karşılaştırılması amacıyla değişen ışık şiddetlerinde her adım için I-V grafikleri elde edilmiş ve aydınlatma şiddetine bağlı enerji dönüşüm verimi değişimleri Şekil 4.27’de verilmiştir.



Şekil 4.27. Üretilen DSSC’ler ve c-Si güneş hücresinin farklı aydınlatma şiddetlerine bağlı verim grafikleri

İncelenen DSSC fotodenedektörlerin değişen koşullar altında farklı elektriksel davranışlar gösterdikleri görülmüştür. Işık şiddetindeki düşüş P1-A boyasıyla üretilen DSSC’de enerji dönüşüm verimi anlamında en iyi değerlerde elde edilmiştir.

Tek diyot modeline göre hücre parametreleri arasında eşitlik (4.1) ve eşitlik (4.2)’deki ilişki mevcuttur [114].

$$I = I_L - I_0 \left[ e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right] \quad (4.1)$$

$$V_{OC} = \frac{nkT}{q} \ln \left( \frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (4.2)$$

Burada  $I_L$  ışıkla üretilen akım (amper) ( $V_{OC}=0$  ise  $I_L=I_{SC}$ ),  $I_0$ , karanlık doyma akımı (amper),  $n$ ; diyot idealite faktörü,  $q$ ; elementer yük,  $k$ ; Boltzmann sabiti ve  $T$ ; Kelvin cinsinden sıcaklıktır. Eşitlik (4.1) ve (4.2)'de hücre tarafından üretilen kısa devre akımı  $I_{SC}$ 'nin aydınlatma şiddeti ile doğru orantılı olduğu, açık devre gerilimi  $V_{OC}$ 'nin ise artan ışık şiddetiyle logaritmik olarak arttığı görülmektedir. Dolayısıyla %  $\eta$  değerinin hücrede üretilen gücün, hücreye verilen güce oranı (bkz. Eşitlik 2.13) olarak hesaplanırken dikkate alınan (aydınlatma şiddetine direkt olarak bağlı olan)  $I_{SC}$  ve (aydınlatma şiddetiyle logaritmik olarak azalan)  $V_{OC}$  değerlerinin, düşmekte olan giriş gücüne bölünmesiyle verim değerinde logaritmik bir değişim izlenmektedir. Enerji dönüşüm verimi; hücreye uygulanan aydınlatma şiddetine karşılık üretilen gücün oranı olduğundan verim değerindeki artış fotoakım ya da gerilimdeki mutlak artış anlamına gelmemektedir. Tam tersine uygulanan ışık şiddetindeki azalma üretim anlamında akım ve gerilim değerlerinde oluşan doğal bir düşüşle ortaya çıkacaktır. Düşen akım ve gerilim değerlerine rağmen enerji dönüşüm verimliliği hesabında bölüm durumunda olan giriş gücünün de düşmesiyle %  $\eta$  değerinde bir artış gözlenmektedir.

Buna karşılık c-Si sensörün bu aydınlatma şiddetlerinde gösterdiği enerji dönüşüm verimi DSSC'lerin hepsinden daha düşük değerde ve neredeyse stabil durumdadır. Bu da c-Si sensörün, bu seviyelerde aydınlatma değerlerine yanıt vermekte güçlük çektiğini, ışığın varlığına tepki göstermesinin yanı sıra miktarına karşı duyarsız kaldığını ortaya koymaktadır. Grafiklerden de görüldüğü üzere DSSC performansı daha düşük aydınlatma koşullarından c-Si sensöre nazaran daha az etkilenmektedir. Aynı şartlardaki DSSC'ler aydınlatma miktarındaki değişimin her basamağına farklı tepkiler göstererek bu konudaki hassasiyetlerini kanıtlamaktadır.

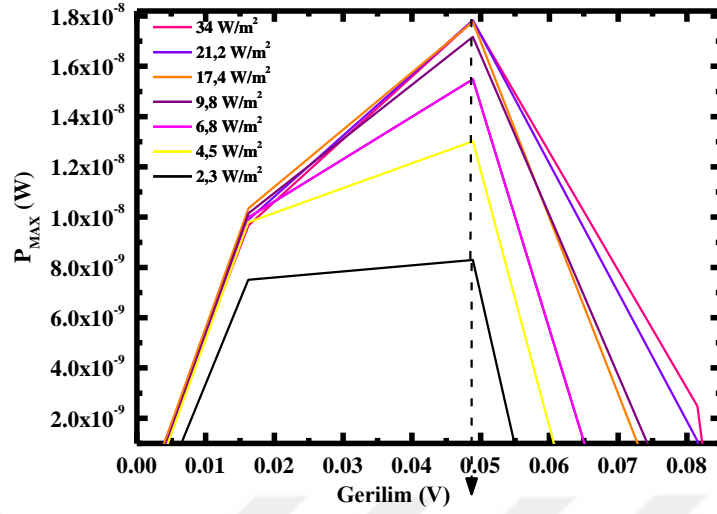
Dört farklı boyar madde ile üretilen DSSC fotodedyektörler ve c-Si optik sensör üzerinde oda sıcaklığında yürütülen testler sonucunda deneysel olarak elde edilen I-V grafiklerinden saptanan elektriksel karakteristik değerleri her bir DSSC ve c-Si hücre için ayrı ayrı tablolar halinde Tablo 4.7 ile Tablo 4.11 arasında ve bununla birlikte farklı aydınlatma şiddetlerine bağlı gerilim-maksimum güç üretimi grafikleri de Şekil 4.28 ile Şekil 4.31 arasında verilmiştir.

**Tablo 4.7.** P1 boyasıyla üretilen DSSC'nin farklı aydınlatma şiddetlerine bağlı performans değerleri

Boyar Madde	Işık Şiddeti	$J_{sc}$	$V_{oc}$	$J_m$	$V_m$	FF	Verim
	( $W/m^2$ )	( $A/m^2$ )	(mV)	( $A/m^2$ )	(mV)		(% $\eta$ )
P1	34	0.202	3	0.11	1.3	0.243	0.0004
	21.2	0.201	3	0.10	1.4	0.259	0.0007
	17.4	0.185	3	0.09	1.3	0.253	0.0007
	9.8	0.187	3	0.09	1.2	0.242	0.0012
	6.8	0.186	2	0.09	1.2	0.246	0.0016
	4.5	0.172	2	0.09	1.1	0.247	0.0022
	2.3	0.154	2	0.08	1.0	0.244	0.0033

Tablo 4.7'den de açıkça görüldüğü üzere P1 boyasıyla üretilen DSSC'lerde düşük seviyelerdeki aydınlatma şiddetleri altında üretilen ve ışık şiddetine paralel şekilde azalma eğiliminde olan akım yoğunluğu ( $J_{sc}$ ,  $J_m$ ) ve gerilim üretimi ( $V_{oc}$ ,  $V_m$ ) değerlerinin aksine dolum faktörü (FF) 0.25 civarında stabile yakın veriler sunarken, ışık şiddetinin düşüşüne karşılık enerji dönüşüm verimliliği (%  $\eta$ ) seviyeleri artış trendindedir. Aydınlatma şiddeti yaklaşık 15 kat azaltıldığında akım yoğunluğu değeri yalnızca 1.3 kat azalırken fotovoltaj üretimi de 1.5 kat azalmaktadır. Giriş gücündeki büyük düşüşe rağmen akım ve gerilim üretiminde meydana gelen bu durum enerji dönüşüm verimliliği değerinde 8.25 kat artış şeklinde gözlenmektedir.

P1-A boyasıyla üretilen DSSC'ye ait elektriksel karakterizasyon parametreleri Şekil 4.28 ve Tablo 4.8'de verilmektedir.



**Şekil 4.28.** P1-A boyasıyla üretilen DSSC'nin farklı aydınlatma şiddetlerine bağlı gerilim-maksimum güç üretimi grafiği

**Tablo 4.8.** P1-A boyasıyla üretilen DSSC'nin farklı aydınlatma şiddetlerine bağlı performans değerleri

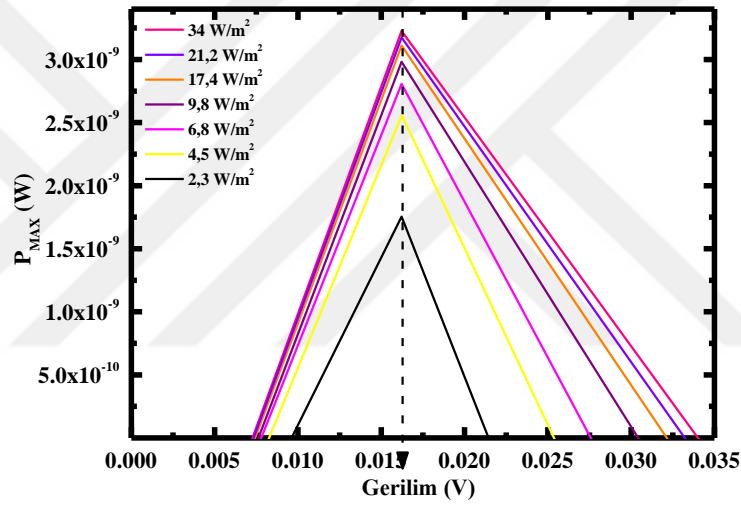
Boyar Madde	Işık Şiddeti (W/m <sup>2</sup> )	J <sub>sc</sub> (A/m <sup>2</sup> )	V <sub>oc</sub> (mV)	J <sub>m</sub> (A/m <sup>2</sup> )	V <sub>m</sub> (mV)	FF	Verim (% η)
	34	0.0196	83	0.012	40	0.285	0.0014
	21.2	0.0204	83	0.011	43	0.290	0.0023
	17.4	0.0212	77	0.011	43	0.302	0.0028
	9.8	0.0213	78	0.0011	42	0.298	0.0049
	6.8	0.0209	70	0.012	37	0.292	0.0064
	4.5	0.0209	66	0.0011	36	0.265	0.0089
	2.3	0.0185	59	0.009	34	0.261	0.0126

Şekil 4.28 ve Tablo 4.8 incelendiğinde P1-A boyasıyla üretilen DSSC'de 15 kat azaltılan düşük seviyelerdeki aydınlatma şiddetleri altında üretilen ve ışık şiddetine paralel şekilde azalma eğiliminde olan akım yoğunluğu yalnızca 1.05 kat, gerilim üretimi (V<sub>oc</sub>, V<sub>m</sub>) değerleri ise 1.4 kat azalmaktadır. Aksine dolun faktörü 0.26-0.3 aralığında stabile yakın veriler sunarken ışık şiddetinin düşüşüne karşılık % η değeri ilk adımla son adım arasında 9 kat artmıştır. P1 boyasıyla P1-A arasında mukayese yapılacak olursa ilk adımda (34 W/m<sup>2</sup> aydınlatmada) üretilen fotovoltaj değerleri arasında çok büyük farklılık gözlenmekte, P1'de yalnızca 3 mV olan V<sub>oc</sub> değeri P1-A'da 83 mV değerinde gözlenmektedir. Fotovoltaj değerinde son adıma kadar düşme miktarları hemen hemen aynı oranda fakat P1'de 2 mV'a düşen bu değer P1-A'da 59 mV olarak ölçülmektedir. Akım yoğunluğuyse tam tersine ilk adımda P1-A'da P1'e nazaran 10 kat daha düşük bir değer almaktadır. Bunun yanında her bir



adımdaki FF değerleri P1-A'da P1'e göre nispeten daha yüksek sonuçlar vermektedir. Enerji dönüşüm verimliliği değerleri ise, aydınlatma şiddetinin giderek azaltıldığı ilk adımdan son adıma kadar her basamakta P1 boyasına göre, P1-A boyasıyla üretilen DSSC'de 3 kat yüksek seyretmektedir. Bu durumun nedeni de P1-A'daki P1'e göre ortalama 28 kat fazla üretilen fotovoltajdan kaynaklanmaktadır. Bu durum asetonla reflüks işleminin ve artan galik asit miktarının P1 boyası için aydınlatma şiddeti düşüşüne karşı doğurduğu olumlu sonucun etkisidir.

P2 boyası kullanılarak hazırlanan DSSC'nin karakteristik değerleri Şekil 4.29 ve Tablo 4.9'da verilmiştir.



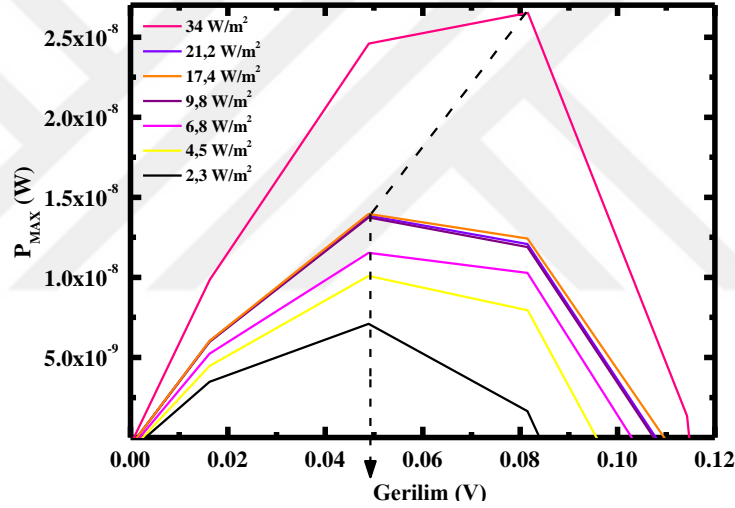
Şekil 4.29. P2 boyasıyla üretilen DSSC'nin farklı aydınlatma şiddetlerine bağlı gerilim-maksimum güç üretimi grafiği

Tablo 4.9. P2 boyasıyla üretilen DSSC'nin farklı aydınlatma şiddetlerine bağlı performans değerleri

Boyar Madde	Işık Şiddeti (W/m <sup>2</sup> )	J <sub>sc</sub> (A/m <sup>2</sup> )	V <sub>oc</sub> (mV)	J <sub>m</sub> (A/m <sup>2</sup> )	V <sub>m</sub> (mV)	FF	Verim (% η)
	34	0.010	42	0.0050	19	0.226	0.0003
	21.2	0.010	41	0.0050	14	0.174	0.0003
	17.4	0.010	41	0.0050	18	0.227	0.0005
	9.8	0.010	39	0.0050	17	0.224	0.0009
	6.8	0.009	36	0.0049	16	0.234	0.0011
	4.5	0.009	34	0.0046	15	0.230	0.0015
	2.3	0.008	27	0.0040	16	0.296	0.0028

Şekil 4.29 ve Tablo 4.9 incelendiğinde P2 boyasıyla üretilen DSSC’de de aydınlatma şiddetinin düşürülerek her bir adımda akım yoğunluğu ( $J_{sc}$ ,  $J_m$ ), gerilim üretimi ( $V_{oc}$ ,  $V_m$ ) ve FF değerleri incelenmiştir. Buna göre aydınlatma şiddetinin yaklaşık 15 kat düşürülmesi halinde P2 boyasıyla elde edilen akım yoğunluğu 1.25 kat ve fotovoltaj değeri de diğer DSSC’lere benzer şekilde 1.5 kat azalmaktadır. FF 0.17-0.3 aralığında yine stable yakın veriler sunarken ışık şiddetinin düşüşüne karşılık %  $\eta$  seviyeleri 2.3 W/m<sup>2</sup> aydınlatma şiddetine kadar 9.3 kat artış sergilemektedir.

P2 boyasının asetonla reflüks işleminden sonraki performansının incelenmesi için P2-A boyasıyla hazırlanan DSSC’den elde edilen elektriksel üretim parametreleri de Şekil 4.30 ve Tablo 4.10’da verilmektedir.



**Şekil 4.30.** P2-A boyasıyla üretilen DSSC’nin farklı aydınlatma şiddetlerine bağlı gerilim-maksimum güç üretimi grafiği

**Tablo 4.10.** P2-A boyasıyla üretilen DSSC’nin farklı aydınlatma şiddetlerine bağlı performans değerleri

Boyar Madde	Işık Şiddeti (W/m <sup>2</sup> )	$J_{sc}$ (A/m <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (mV)	$J_m$ (A/m <sup>2</sup> )	$V_m$ (mV)	FF	Verim (% $\eta$ )
P2-A	34	0.018	115	0.011	68	0.378	0.002
	21.2	0.011	110	0.007	56	0.317	0.002
	17.4	0.011	111	0.007	57	0.324	0.002
	9.8	0.011	108	0.007	56	0.319	0.004
	6.8	0.010	106	0.006	52	0.298	0.005
	4.5	0.009	98	0.006	50	0.320	0.006
	2.3	0.007	85	0.004	48	0.320	0.009

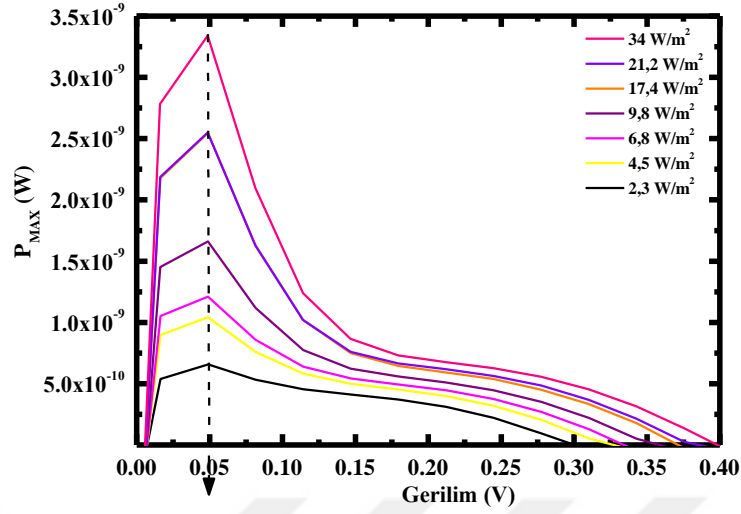
Şekil 4.30 ve Tablo 4.10 incelendiğinde P2-A boyasıyla üretilen DSSC’de giderek düşen aydınlatma şiddetine karşı akım yoğunluğu anlamında verilen cevap 2.6 kat, fotovoltaj üretimi anlamında verilen cevapsa diğer DSSC’lerdekine benzer şekilde 1.4 kat düşme şeklinde gözlenmektedir. FF, bu DSSC için de 0.3 civarında yine stabile yakın veriler sunarken ışık şiddetinin düşüşüne karşılık %  $\eta$  seviyesi 4.5 kat artmaktadır.

P2 boyasıyla üretilen DSSC ile mukayese edilecek olursa P2-A’da yaklaşık 2 kat yüksek olan başlangıçtaki akım yoğunluğu değeri sonraki basamaklarda P2’den daha hızlı bir düşüş sergileyerek son adımda her ikisi için de yakın değerlere ulaşmaktadır. Fotovoltaj değeri ise P2-A’da P2’ye nazaran her adımda ortalama 3 kat daha yüksek olacak şekilde üretilmiştir. Enerji dönüşüm verimliliği değerleri ise P2-A’da P2’ye göre ilk adımda ortalama 7 kat daha yüksek olan fark aydınlatma şiddetinin düşüşüyle son adıma kadar azalmış ve yaklaşık 3 katlık farkla sona ermiştir. Enerji dönüşüm verimlilikleri arasında böyle bir farkın oluşma nedeni de P2-A’daki P2’ye göre ortalama 2 kat fazla olan fotoakım ve 3 kat fazla üretilen fotovoltajdır.

Bu durum asetonla reflüks işleminin ve artan galik asit miktarının P1 boyasında olduğu gibi P2 boyası için de aydınlatma şiddeti düşüşüne karşı doğurduğu olumlu sonucun etkisidir.

Genel anlamda bu DSSC fotodedektörler için  $2.3 \text{ W/m}^2$  aydınlatma şiddetine kadar tepki vermeye devam ettikleri söylenebilmektedir. P1-A ve P2-A boyalarıyla üretilen fotodedektörlerin P1 ve P2’ye nazaran gerilim üretimi, %  $\eta$  ve FF değerlerinin daha yüksek oluşu asetonla reflüks prosedürü sayesinde doğal fotoduyarlılaştırıcıların ve bu duyarlılaştırıcılarla üretilen cihazların aydınlatma şiddetinin çok düşük olduğu seviyelere karşı daha iyi tepki oluşturmasını sağladığı açıkça görülmektedir.

Ticari c-Si sensörle aynı şartlarda alınan elektriksel parametreler de Şekil 4.31 ve Tablo 4.11’de verilmiştir.



Şekil 4.31. c-Si güneş hücresinin farklı aydınlatma şiddetlerine bağlı gerilim-maksimum güç üretimi grafiği

Tablo 4.11. c-Si sensörün farklı aydınlatma şiddetlerine bağlı performans değerleri

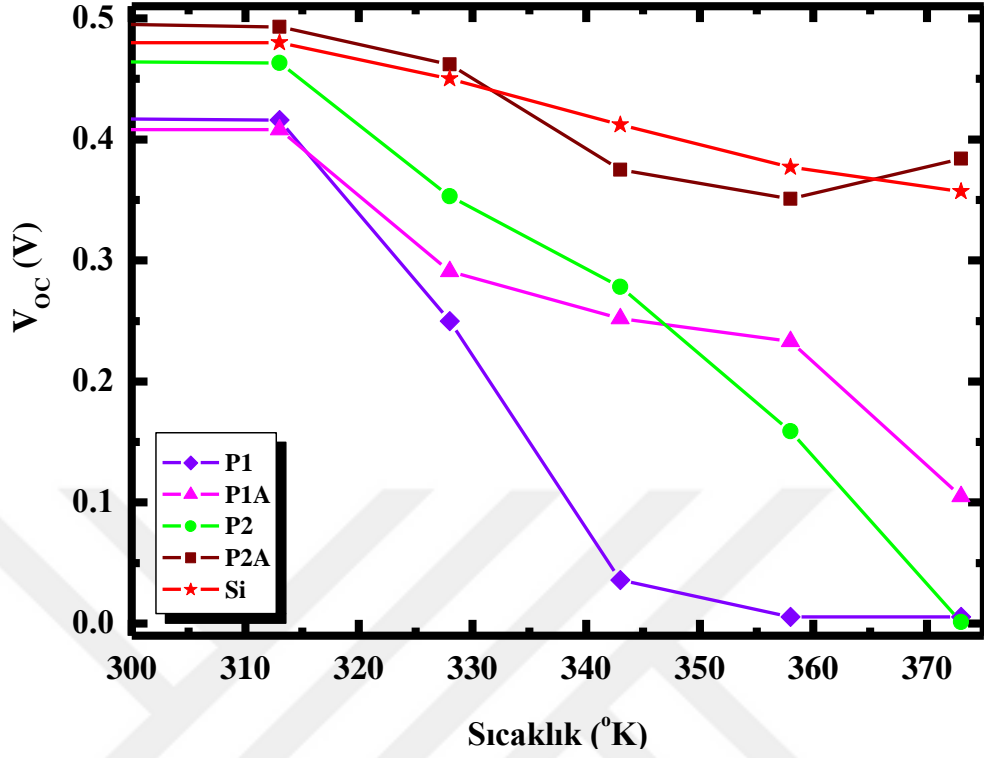
	Işık Şiddeti (W/m <sup>2</sup> )	J <sub>sc</sub> (A/m <sup>2</sup> )	V <sub>oc</sub> (mV)	J <sub>m</sub> (A/m <sup>2</sup> )	V <sub>m</sub> (mV)	FF	Verim (% η)
	34	0.0075	400	0.0015	63	0.031	0.0003
	21.2	0.0061	370	0.0013	54	0.031	0.0003
	17.4	0.0061	340	0.0013	56	0.034	0.0004
	9.8	0.0042	310	0.0011	46	0.038	0.0005
	6.8	0.0031	310	0.0010	41	0.042	0.0006
	4.5	0.0028	300	0.0009	38	0.043	0.0008
	2.3	0.0016	276	0.0007	30	0.046	0.0009

Şekil 4.31 ve Tablo 4.11 incelendiğinde düşük seviyelerdeki aydınlatma şiddetleri altında üretilen ve ışık şiddetine paralel şekilde % verim değeri sıfıra yakın düşük seviyelerde ve diğer tüm parametreler azalma eğilimindedir. Düşük ışık koşullarında DSSC'ler daha yüksek enerji dönüşüm verimliliğine sahipken tam tersi c-Si hücre için en yüksek dönüşüm verimliliği yüksek aydınlatma şiddetlerinde görülmektedir. Düşük aydınlatma seviyelerinde c-Si sensör için özellikle en belirgin şekilde kısadavre akım yoğunluğu (J<sub>sc</sub>) ve açık devre gerilimi (V<sub>oc</sub>) düşmektedir. DSSC'lere nazaran fotovoltaik üretimi bariz bir şekilde yüksek olmasına rağmen c-Si sensörün ürettiği akım yoğunluğu değeri ilk adımda, 34 W/m<sup>2</sup> aydınlatma altında en yüksek akım yoğunluğu performansını gösteren DSSC'ye (P1) göre 27 kat, en düşük akım yoğunluğu performansını gösteren DSSC'ye (P2) göre ise 1.33 kat daha düşük akım yoğunluğuna sahiptir. Yine akım yoğunluğu anlamında son adımda, 2.3 W/m<sup>2</sup> aydınlatma altında c-Si sensörün üretimi P1'e göre 96 kat, P2'ye göre ise 5 kat daha düşük

olarak gözlenmektedir. Enerji dönüşüm verimi değeri ise ilk adımda yine bu parametre için en düşük değeri üreten P2 ile aynı (% 0.0003) olmasına karşın P2'nin son adıma kadar yükselmekte olan %  $\eta$  değeri 0.0028 seviyesine çıkarken c-Si sensör aynı aydınlatma şiddetinde % 0.0009 seviyesinde kalmıştır ki bu değer P2'nin enerji dönüşüm veriminin ancak 3'te biridir. Enerji dönüşüm verimi anlamında en iyi performansa sahip olan P2-A ile kıyaslandığındaysa c-Si sensöre nazaran P2-A ilk adımda 6.66 kat, son adımdaysa 10 kat daha yüksek enerji dönüşüm verimliliği sergilemiştir. Dolayısıyla giderek düşürülen aydınlatma şiddeti şartlarından DSSC yapılarının c-Si yapıya nazaran daha az etkilendiği aşikardır.

#### **4.8. Üretilen DSSC'lerin Hücre Sıcaklığına Bağlı Fotovoltaik Performans Karakterizasyonu**

Tezin bu bölümünde DSSC'lerin fotodetektör olarak kullanılma durumlarında tepki verebildiği en yüksek sıcaklık değerlerinin belirlenmesi amaçlanmış ayrıca bu sıcaklık şartlarında gösterdikleri performans test edilmiştir. Biri DSSC diğeri c-Si sensör olmak üzere iki yapının gerçek çalışma koşullarındaki hücre performanslarının değerlendirilmesi amacıyla karşılaştırmalı testleri, laboratuvarında sağlanan ideal ve kontrollü koşullarda DSSC ve c-Si sensör deneyleri gerçekleştirilerek oluşturulmuştur. Uygulanan testler sırasında sıcaklık 298 °K (25 °C)'den başlayarak 398 °K (100 °C)'ye kadar 15 °K'lik aralıklarla yükseltilmiş ve her sıcaklık için hücre performansları 1000 W/m<sup>2</sup> aydınlatma altında ölçülmüştür. DSSC'ler ile karşılaştırmak için yüksek kalitede, ticari tek kristal Si sensör (bkz. Şekil 3.18) kullanılmıştır. Performans verilerine dair grafikler Şekil 4.32 ve Şekil 4.33'te verilmiştir.



**Şekil 4.32.** DSSC'ler ve c-Si sensörün farklı hücre sıcaklıklarına bağlı karşılaştırmalı  $V_{OC}$  grafiği

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde hücre sıcaklığının kademeli olarak artırılmasıyla hem DSSC'lerin hem de c-Si sensörün  $V_{OC}$  değerlerinde genel anlamda bir düşüş gerçekleşmektedir. Ancak Şekil 4.32'de görülen grafik incelendiğinde P2-A boyasıyla üretilen DSSC'nin  $V_{OC}$  değerindeki salınımı diğer DSSC'lere nazaran daha azdır. 333 °K'e kadar c-Si sensörden daha yüksek gerilim üretmekte, bu değerden daha yüksek sıcaklıklarda da c-Si sensöre oldukça yakın değer ve performans göstermektedir. Ayrıca P2-A'nın 358°K'den sonra ürettiği gerilim değerinin artışı oldukça dikkat çekicidir. Son basamakta sıcaklık 373 °K'e çıktığı noktada  $V_{OC}$  değerinde en iyi performans aseonla reflüks işleminden geçmiş olan P1-A ve P2-A tarafından sergilenmektedir. Hatta bu noktada P2-A'nın üretmiş olduğu 384 mV'lik gerilim değeri c-Si sensörden (357 mV) daha yüksektir.

Genel olarak c-Si sensörlerde, bilindiği üzere hücre sıcaklığının artışıyla,  $I_{SC}$  üzerinde az miktarda bir artış meydana gelmektedir. Çalışma sıcaklığının artışıyla kısa devre akımındaki değişimin eşitlik (4.3)'te verildiği şekilde olduğu tahmin edilmektedir [107]:

$$\frac{1}{I_{SC}} \times \frac{dI_{SC}}{dT} \approx +0.0006/^\circ C \quad (4.3)$$

Artan hücre sıcaklığının ana etkisi, eşitlik (4.4)'te verildiği üzere  $V_{oc}$ 'de doğrusal olarak azalma şeklinde ortaya çıkmaktadır:

$$\frac{dV_{oc}}{dT} \approx -0.002 \text{ V}/^{\circ}\text{C} \quad (4.4)$$

$V_{oc}$ 'deki azalmadan dolayı c-Si sensörde, FF değerinde de eşitlik (4.5)'teki gibi göreceli bir düşüş gözlenmektedir:

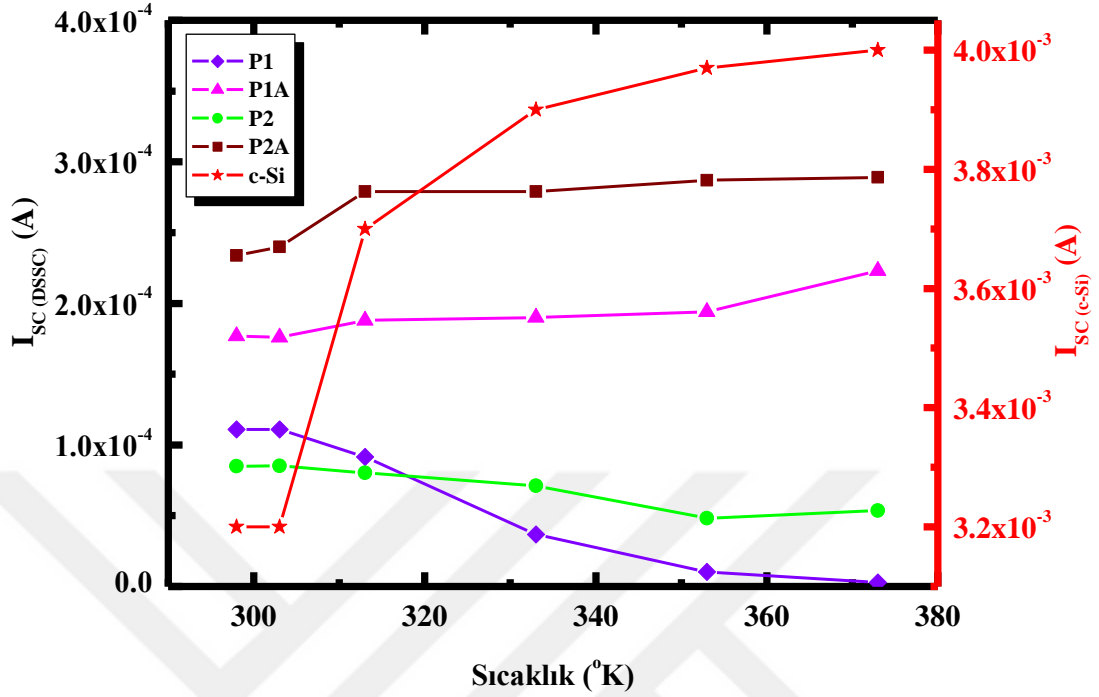
$$\frac{1}{FF} \times \frac{dFF}{dT} \approx -0.0015 / ^{\circ}\text{C} \quad (4.5)$$

Bir c-Si sensör için hücre sıcaklığının genel etkisi, eşitlik (4.6)'da verildiği şekilde enerji dönüşüm verimliliğinde doğrusal bir azalma ile [232] ortaya çıkmaktadır:

$$\frac{d\eta}{dT} \approx -0.06 \% / ^{\circ}\text{C} \quad (4.6)$$

Teori, hücre sıcaklığı ve enerji dönüşüm verimi arasında negatif doğrusal bir ilişki ortaya koymaktadır. Ticari modüller, deneysel ölçümlerden elde edilen doğrusal bir negatif sıcaklık katsayısı ile belirtilmektedir.

Fotovoltaik bir cihazın çalışma sıcaklığı, iletken malzeme içindeki kimyasal reaksiyonların hızını ve oranını arttırıcı bir şekilde etkilemektedir [107]. Çoğu fotokimyasal reaksiyonlar sıcaklık duyarlı olmamakla birlikte, tipik müteakip ikincil reaksiyonlar sıcaklık tarafından yönlendirilebilmekte bazen de foton etkisiyle başlamış olan bir reaksiyon ışığın kesilmesi durumunda da devam edebilmektedir [231]. Foton absorpsiyonundan bağımsız bir şekilde ısı etkisiyle gerçekleşen bu tür kimyasal reaksiyonlar sonucu karanlık doyma akımı  $I_0$ , hücre sıcaklığı arttıkça artmaktadır [232]. Bu bağlamda c-Si için bilinen bu kavramların DSSC'de nasıl bir tepki oluşturacağına araştırılması amacıyla bu deney tasarlanmıştır.

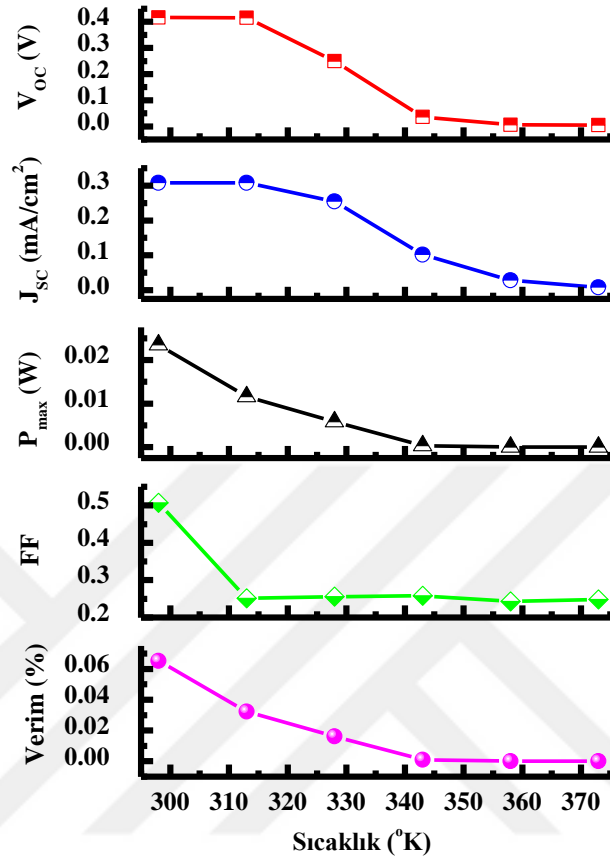


**Şekil 4.33.** DSSC'ler ve c-Si sensörün farklı hücre sıcaklıklarına bağlı karşılaştırmalı Isc grafiği

Şekil 4.33'te kademeli olarak yükseltelen çalışma sıcaklıklarına özellikle asetonla reflüks prosedüründen geçirilen P1-A ve P2-A boylarıyla üretilmiş DSSC'ler ve c-Si güneş hücresi pozitif bağımlılık gösterirken, diğer DSSC'lerin fotoakım üretimleri hücre sıcaklığının artmasıyla düşme eğilimi göstermiştir. Bu durumda asetonla reflüks işleminin DSSC üretiminde sıcaklığa karşı daha iyi bir kararlılık sağladığı bariz bir şekilde ortaya çıkmaktadır.

Üretilen DSSC'ler için sıcaklığa bağlı olarak her bir parametrenin değişimi P1 boyası için Şekil 4.34'te, P1-A boyası için Şekil 4.35'te, P2 boyası için Şekil 4.36'da ve P2-A boyası için Şekil 4.37'de, c-Si sensör içinse Şekil 4.38'de verilmiştir.

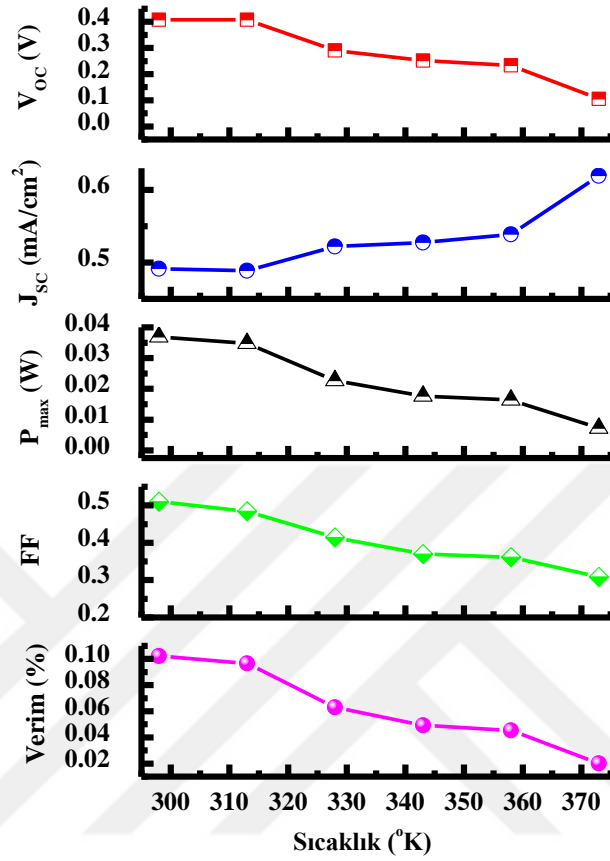




**Şekil 4.34.** P1 boyasıyla üretilen DSSC'ye ait farklı hücre sıcaklıklarına bağlı performans parametreleri

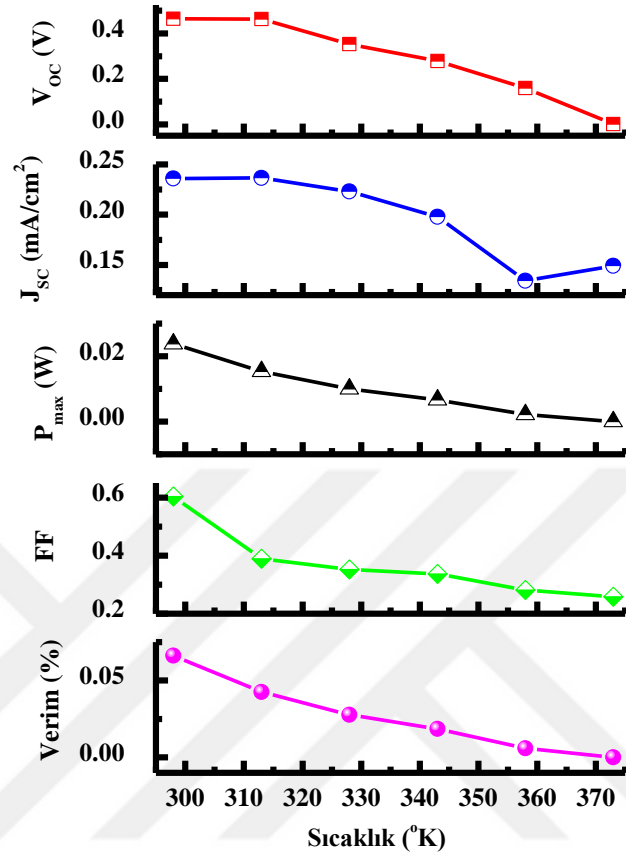
Şekil 4.34'te görüldüğü üzere P1 boyası için her bir parametre yükselen sıcaklık değeriyle düşme eğilimindedir. Diğer boyar maddelerle üretilen DSSC'lere nazaran özellikle 343 °K'e kadar tüm parametrelerde hızlı bir düşüş gerçekleşmekte ve bu sıcaklıktan sonra neredeyse herbiri yaklaşık sıfır değerine kadar düşmektedir.

İlk basamakta 417 mV olan  $V_{OC}$  değeri ve %  $\eta$  değeri son basamağa kadar çok büyük bir oranda düşerek sırasıyla 0.5 mV ve %  $1 \times 10^{-5}$  değerine inmektedir. Aynı şekilde akım yoğunluğu 3.08 A/m<sup>2</sup>'den 0.08 A/m<sup>2</sup> değerine düşmektedir. Dolum faktörü ise oda 298 °K'de 0.507 iken bir sonraki basamakta 313 °K sıcaklıkta yarı yarıya düşmüş ancak son basamağa kadar bu değerinde neredeyse stabil kalmıştır.



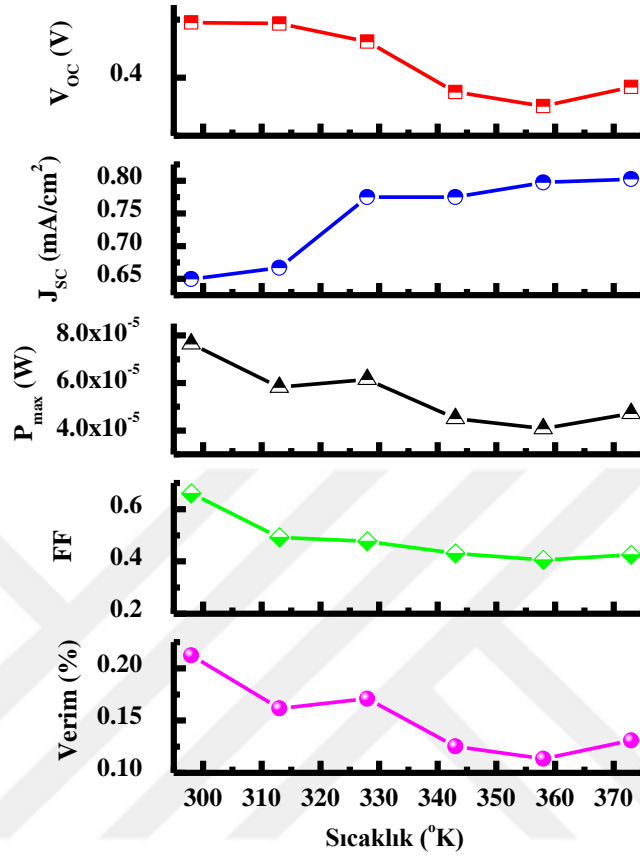
**Şekil 4.35.** P1-A boyasıyla üretilen DSSC'ye ait farklı hücre sıcaklıklarına bağlı performans parametreleri

Şekil 4.35'te verilen grafiklerde P1-A boyası için  $J_{SC}$  haricindeki diğer dört parametre yükselen sıcaklık değeriyle düşme trendindeyken  $J_{SC}$  yükselme eğilimindedir. İlk basamakta  $4.917 \text{ A/m}^2$  olan akım yoğunluğu son basamağa kadar 1.26 kat artarak  $6.197 \text{ A/m}^2$  değerine ulaşmıştır. Bu da bu boyar maddenin  $J_{SC}$  anlamında sıcaklık artışını daha iyi tolere ettiğini göstermektedir. Bu durum c-Si sensör için verilen eşitlik (4.3)'ü akla getirmekte ve boyar maddenin asetonla reflüks işleminin etkisiyle sıcaklık artışına karşı pozitif bağımlılık kazandığını göstermektedir. P1 boyasıyla üretilen DSSC'yle kıyaslanacak olursa diğer parametrelerdeki düşüşler daha yavaş gerçekleşmekte ve P1'dekinin aksine sıfır seviyesine kadar düşmemektedir. İlk basamakta P1'e göre daha düşük olan  $408 \text{ mV}$ 'lik  $V_{OC}$  değeri son basamağa gelindiğinde 3.9 kat azalarak  $105 \text{ mV}$  seviyesine inmiştir ki bu değer P1'in aynı sıcaklıktaki  $V_{OC}$  üretiminin 210 katıdır.  $\% \eta$  değeri ise zaten başlangıçta P1'e göre 1.6 kat daha yüksek elde edilmiş, son basamağa kadar 5 kat azalmış olsa da bu değer, P1'in aynı noktadaki enerji dönüşüm verimliliğinden 2000 kat daha yüksektir.



**Şekil 4.36.** P2 boyasıyla üretilen DSSC'ye ait farklı hücre sıcaklıklarına bağlı performans parametreleri

Şekil 4.36'da görüldüğü üzere P2 boyası için her bir parametre P1 boyasına benzer şekilde yükselen sıcaklık değeriyle düşme trendindedir. Ancak P1'e nazaran düşüş daha yavaş bir hızla gerçekleşmekte ve P1'e benzer şekilde neredeyse sıfır değerine kadar inmektedir. İlk basamakta P1 ve P1-A'ya göre daha yüksek olan 464 mV'lik  $V_{OC}$  değeri son basamağa kadar çok büyük oranda düşüş göstermiş, son basamakta bu değer ölçülememiştir. Akım yoğunluğu ise 2.36 A/m<sup>2</sup>'den 1.492 A/m<sup>2</sup> değerine düşmektedir. Bu değer aynı sıcaklıkta akım yoğunluğu 0.08 A/m<sup>2</sup> olan P1'den daha yüksektir. Oda sıcaklığında nispeten yüksek kabul edilebilecek seviyede olan (0.604) FF değeri de son basamağa kadar 2.3 kat düşerek 0.258 değerine inmiştir. %  $\eta$  değeri P1' benzer şekilde son basamağa kadar çok büyük bir oranda düşerek %  $5 \times 10^{-5}$  değerine gelse de bu değer P1'in aynı noktadaki değerinin 5 katıdır.

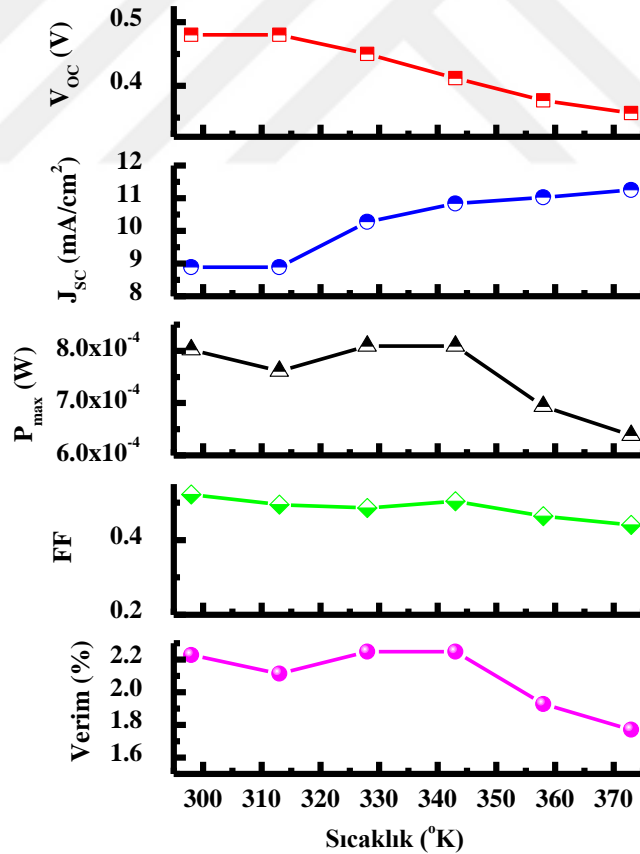


**Şekil 4.37.** P2-A boyasıyla üretilen DSSC'ye ait farklı hücre sıcaklıklarına bağlı performans parametreleri

Şekil 4.37'de görüldüğü gibi P2-A boyası akım yoğunluğu haricindeki diğer dört parametre yükselen sıcaklık değeriyle gitgide düşerken  $J_{SC}$  değeri P1-A boyasındakine benzer şekilde yükselme eğilimindedir. İlk basamakta diğer tüm DSSC'ler arasında en yüksek olan 6.494 A/m<sup>2</sup> değerindeki akım yoğunluğu son basamağa kadar P1-A'ya benzer şekilde 1.24 kat artarak 8.028 A/m<sup>2</sup> değerine ulaşmıştır. Bu da P2-A'nın diğer DSSC'ler arasında  $J_{SC}$  anlamında sıcaklık artışını en iyi tolere eden yapı olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla boyar maddede asetonla reflüks işleminin etkisiyle sıcaklık artışına karşı en iyi kararlılığı kazanan boyar maddenin P2-A olduğu açıktır. P2 boyasıyla üretilen DSSC'yle kıyaslanacak olursa diğer parametrelerdeki düşüşler daha yavaş gerçekleşmektedir. İlk basamakta 495 mV'lik  $V_{OC}$  değeri son basamağa gelindiğinde yalnızca 1.3 kat azalarak 384 mV seviyesine inmiştir ki bu değer diğer DSSC'ler arasında aynı sıcaklıktaki en yüksek  $V_{OC}$  üretimine sahip olan P1-A'nın (105 mV) yaklaşık 3.7 katıdır. Diğer DSSC'ler arasında ilk basamakta 0.660 ile en yüksek FF değerine sahip olan P2-A son basamağa kadar 1.55 kat azalarak 0.425 değerine ulaşmıştır. Son basamaktaki bu değer de DSSC'ler arasında yine en yüksek

değerdir. %  $\eta$  değeri ise zaten başlangıçta P2'ye göre 3.2, P1-A'ya göre 2 kat daha yüksek elde edilmiş, son basamağa kadar 1.6 kat azalarak % 0.131 değerine inmiştir. Bu değer son basamakta P1-A'nın 6.6 katı, P2'ninse 2426 katıdır.

Bu da P1-A gibi P2-A boyar maddelerinin her ikisinin de akım yoğunluğu anlamında sıcaklık artışını daha iyi tolere ettiğini, bunlar arasında da en iyi toleransa P2-A'nın sahip olduğunu göstermektedir. Diğer boyalarla üretilen DSSC'lerle kıyaslanacak olursa parametrelerdeki düşüşler daha yavaş gerçekleşmekte ve en kötü değerleri dahi diğerlerine nazaran yüksek seviyelerde kalmaktadır. Özellikle %  $\eta$  değeri bu konuda göze çarpmaktadır. Böylece tez kapsamında önerilen doğal boya ekstraksiyon yöntemi ve asetonla reflüks prosedürü sayesinde fotoduyarlılaştırıcı yapısında artan galik asit miktarının üretilen DSSC'lerde akım yoğunluğu anlamında sıcaklık artışına karşı iyileşmeye neden olduğu kesinlik kazanmıştır.



Şekil 4.38. c-Si sensöre ait farklı hücre sıcaklıklarına bağlı performans parametreleri

DSSC'lerle c-Si sensör kıyaslanacak olursa açık devre gerilimi sıcaklık artışıyla tüm yapılarda düşme eğiliminde olsa da bu durum P1 ve P2 boyalarıyla üretilmiş olanların aksine asetonla refluks prosedüründen geçen P1-A ve P2-A boyalarıyla üretilmiş DSSC'lerde, c-Si hücreye benzer şekilde daha yavaş seyretmektedir. Özellikle P2-A'nın  $V_{OC}$  değeri sıcaklık artışıyla ilk basamakla son basamak arasında yalnızca % 22 oranında düşerken bu değer c-Si sensörde yaklaşık % 26 oranında düşmektedir. Ayrıca yükselen sıcaklık değeriyle düşme eğiliminde olan  $V_{OC}$ 'nin etkisiyle bağlantılı olarak (bkz. eşitlik 4.4) genel anlamda düşme eğiliminde olan FF'nin DSSC'lerde belirgin bir şekilde düştüğü ancak bu durumun c-Si sensörle kıyaslanabilecek şekilde P2-A boyalı DSSC'de daha az hissedilir olduğu görülmektedir.

Enerji dönüşüm verimliliğine bakıldığında ilk aşamada % 2.228'lik verim değerine sahip olan c-Si sensör son basamağa kadar 1.25 kat düşüş göstermiş, ancak P2-A'da bu düşüş 1.6 kat şeklinde olmuştur.

Tek-diyot ve çift-diyot modellerinden faydalanılarak farklı boyalarla üretilen DSSC'ler ve c-Si sensör için değişen sıcaklık koşullarında elde edilen deneysel sonuçların analitik olarak yapılan analizleri P1 için Tablo 4.12'de, P1-A için Tablo 4.13'te, P2 için Tablo 4.14'te, P2-A için Tablo 4.15'de ve c-Si için Tablo 4.16'da verilmiştir. Güneş pili eşdeğer devre modellerinden elde edilen sonuçlar çerçevesinde asetonla refluks işlemi ile galik asitin performans verilerinde ve enerji dönüşüm verimliliğinde sıcaklık değişimine karşı gösterdiği etki ayrıntılı olarak tartışılmıştır.

**Tablo 4.12.** P1 boyasıyla üretilen DSSC'ye ait farklı hücre sıcaklıklarına bağlı performans değerleri

Boya kodu	Sıcaklık (°K)	Grafik Analiz Sonuçları							Tek Diyot Modeli					İki Diyot Modeli- Kübik Çözüm					Verim (%)	
		$J_{sc}$ (A/m <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (mV)	$J_m$ (A/m <sup>2</sup> )	$V_m$ (mV)	$R_s$ (Ω)	$R_{SH}$ (Ω)	Mak. Güç (mW)	n	$J_{ph}$ (A/m <sup>2</sup> )	$R_s$ (Ω)	$R_{SH}$ (Ω)	$J_s$ (A/m <sup>2</sup> )	$R_s$ (Ω)	$R_{SH}$ (Ω)	$J_{s1}$ (A/m <sup>2</sup> )	$J_{s2}$ (A/m <sup>2</sup> )	$J_{ph}$ (A/m <sup>2</sup> )		FF
P1	298	3.08	417	2.14	305	800.00	24238	0.024	2.096	3.378	684.98	11000	0.0004	684.99	10300	$2.529 \cdot 10^{-8}$	$-8.475 \cdot 10^{-5}$	3.180	0.507	0.065
	313	3.08	416	1.51	213	-	-	0.012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.251	0.032
	328	2.54	250	1.29	126	-	-	0.006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.256	0.016
	343	1.02	36	0.50	19	-	-	$3 \cdot 10^{-4}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.258	0.001
	358	0.28	0.6	0.15	0.25	-	-	$1.37 \cdot 10^{-5}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.243	$3.8 \cdot 10^{-5}$
	373	0.08	0.5	0.04	0.25	-	-	$3.75 \cdot 10^{-6}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.248	$1.0 \cdot 10^{-5}$

(-) Grafik analizde elde edilememiş ya da analitik modeller tarafından hesaplanamamıştır.

**Tablo 4.13.** P1-A boyasıyla üretilen DSSC'ye ait farklı hücre sıcaklıklarına bağlı performans değerleri

Boya kodu	Sıcaklık (°K)	Grafik Analiz Sonuçları							Tek Diyot Modeli					İki Diyot Modeli- Kübik Çözüm					Verim (%)	
		J <sub>sc</sub> (A/m <sup>2</sup> )	V <sub>oc</sub> (mV)	J <sub>m</sub> (A/m <sup>2</sup> )	V <sub>m</sub> (mV)	R <sub>s</sub> (Ω)	R <sub>SH</sub> (Ω)	Mak. Güç (mW)	n	J <sub>ph</sub> (A/m <sup>2</sup> )	R <sub>s</sub> (Ω)	R <sub>SH</sub> (Ω)	J <sub>s</sub> (A/m <sup>2</sup> )	J <sub>ph</sub> (A/m <sup>2</sup> )	R <sub>s</sub> (Ω)	R <sub>SH</sub> (Ω)	J <sub>s1</sub> (A/m <sup>2</sup> )	J <sub>s2</sub> (A/m <sup>2</sup> )		FF
P1-A	298	4.917	408	3.944	265	446.43	26625	0.037	3.526	4.937	445.98	27000	0.054	4.911	445.99	26600	8.331*10 <sup>-7</sup>	-5.776*10 <sup>-4</sup>	0.510	0.102
	313	4.889	408	3.500	245	564.97	22949	0.035	5.709	4.663	564.97	22949	0.346	4.890	564.99	22380	1.660*10 <sup>-6</sup>	-6.206*10 <sup>-4</sup>	0.484	0.097
	328	5.222	291	3.389	180	591.72	7124	0.023	2.421	5.581	591.99	7124	0.075	5.261	591.99	6532	4.069*10 <sup>-4</sup>	-0.039	0.415	0.063
	343	5.278	252	3.389	145	628.93	3488	0.018	2.233	6.113	628.99	3488	0.116	5.417	628.99	2859	3.062*10 <sup>-3</sup>	-0.142	0.369	0.049
	358	5.389	233	3.583	134	671.14	2514	0.016	0.456	6.827	670.99	2514	3.486*10 <sup>-7</sup>	5.896	670.99	1843	0.015	-0.511	0.362	0.045
	373	6.194	105	0.644	56	214.59	304	0.007	-	-	-	-	-	3.860	215.07	889	-0.273	2.608	0.309	0.020

(-) Grafik analizde elde edilememiş ya da analitik modeller tarafından hesaplanamamıştır.



**Tablo 4.14.** P2 boyasıyla üretilen DSSC'ye ait farklı hücre sıcaklıklarına bağlı performans değerleri

Boya kodu	Sıcaklık (°K)	Grafik Analiz Sonuçları							Tek Diyot Modeli					İki Diyot Modeli- Kübik Çözüm					Verim (%)	
		$J_{sc}$ (A/m <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (mV)	$J_m$ (A/m <sup>2</sup> )	$V_m$ (mV)	$R_s$ (Ω)	$R_{sh}$ (Ω)	Mak. Güç (mW)	n	$J_{ph}$ (A/m <sup>2</sup> )	$R_s$ (Ω)	$R_{sh}$ (Ω)	$J_s$ (A/m <sup>2</sup> )	$J_{ph}$ (A/m <sup>2</sup> )	$R_s$ (Ω)	$R_{sh}$ (Ω)	$J_{s1}$ (A/m <sup>2</sup> )	$J_{s2}$ (A/m <sup>2</sup> )		FF
P2	298	2.361	464	1.917	345	892.86	144093.88	0.024	2.282	2.374	892.99	144000	0.0009	2.360	892.99	143100	$5.936 \cdot 10^{-8}$	$-1.951 \cdot 10^{-4}$	0.604	0.066
	313	2.367	463	1.586	269	2450.10	16338.96	0.015	3.447	2.706	2450	16339	0.016	2.367	2450	13890	$9.472 \cdot 10^{-8}$	$-5.524 \cdot 10^{-5}$	0.389	0.043
	328	2.231	353	1.322	210	2183.04	9704.50	0.010	4.699	2.576	2183	9705	0.157	2.233	2183	7522	$1.249 \cdot 10^{-5}$	$-2.044 \cdot 10^{-3}$	0.353	0.028
	343	1.978	278	1.178	157	2267.35	9435.83	0.007	3.864	2.279	2267	9436	0.174	1.997	2267	7169	$3.401 \cdot 10^{-4}$	-0.019	0.336	0.018
	358	1.342	159	0.722	83	2651.18	3990.96	0.002	-	-	2651	3991	-	0.679	2651	1340	-0.046	0.709	0.281	0.006
	373	1.492	-	0.700	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.486	1.963	0.258	-

(-) Grafik analizde elde edilememiş ya da analitik modeller tarafından hesaplanamamıştır.

**Tablo 4.15.** P2-A boyasıyla üretilen DSSC'ye ait farklı hücre sıcaklıklarına bağlı performans değerleri

Boya kodu	Sıcaklık (°K)	Grafik Analiz Sonuçları						Mak. Güç (mW)	Tek Diyot Modeli					İki Diyot Modeli- Kübik Çözüm					Verim (%)	
		J <sub>sc</sub> (A/m <sup>2</sup> )	V <sub>oc</sub> (mV)	J <sub>m</sub> (A/m <sup>2</sup> )	V <sub>m</sub> (mV)	R <sub>s</sub> (Ω)	R <sub>SH</sub> (Ω)		n	J <sub>ph</sub> (A/m <sup>2</sup> )	R <sub>s</sub> (Ω)	R <sub>SH</sub> (Ω)	J <sub>s</sub> (A/m <sup>2</sup> )	J <sub>ph</sub> (A/m <sup>2</sup> )	R <sub>s</sub> (Ω)	R <sub>SH</sub> (Ω)	J <sub>s1</sub> (A/m <sup>2</sup> )	J <sub>s2</sub> (A/m <sup>2</sup> )		FF
P2-A	298	6.494	495	5.500	386	256.41	32005.84	0.076	1.879	6.663	255.99	32000	0.0003	6.610	255.99	31740	5.82*10 <sup>-8</sup>	-4.247*10 <sup>-4</sup>	0.660	0.212
	313	6.667	493	4.889	331	595.24	26463.01	0.058	3.199	6.795	594.99	26463	0.0220	6.667	594.99	25870	9.76*10 <sup>-8</sup>	-1.794*10 <sup>-4</sup>	0.492	0.162
	328	7.750	462	5.389	317	568.18	15058.77	0.061	2.138	8.039	567.99	15059	0.0037	7.757	567.99	14490	9.058*10 <sup>-7</sup>	-9.824*10 <sup>-4</sup>	0.477	0.171
	343	7.750	375	5.111	245	564.97	8894.26	0.045	1.838	8.234	564.99	8894	0.0078	7.761	564.99	8329	4.360*10 <sup>-5</sup>	-0.011	0.431	0.125
	358	7.972	351	4.889	232	512.82	5691.16	0.041	2.417	8.618	512.99	5691	0.0720	8.010	512.99	5178	2.207*10 <sup>-4</sup>	-0.038	0.405	0.113
	373	8.028	384	4.694	279	401.61	6314.93	0.047	3.191	8.348	401.99	6315	0.1910	8.102	401.99	5913	2.414*10 <sup>-4</sup>	-0.074	0.425	0.131

**Tablo 4.16.** c-Si sensöre ait farklı hücre sıcaklıklarına bağlı performans değerleri

Pil kodu	Sıcaklık (°K)	Grafik Analiz Sonuçları							Tek Diyot Modeli					İki Diyot Modeli- Kübik Çözüm					FF	Verim (%)
		$J_{sc}$ (A/m <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (mV)	$J_m$ (A/m <sup>2</sup> )	$V_m$ (mV)	$R_s$ (Ω)	$R_{sh}$ (Ω)	Mak. Güç (mW)	n	$J_{ph}$ (A/m <sup>2</sup> )	$R_s$ (Ω)	$R_{sh}$ (Ω)	$J_s$ (A/m <sup>2</sup> )	$J_{ph}$ (A/m <sup>2</sup> )	$R_s$ (Ω)	$R_{sh}$ (Ω)	$J_{s1}$ (A/m <sup>2</sup> )	$J_{s2}$ (A/m <sup>2</sup> )		
c-Si	298	88.889	480	66.111	0.337	22	568	0.802	2.651	92.254	21.99	568	0.078	88.892	22	546	9.160*10 <sup>-7</sup>	-0.003	0.522	2.228
	313	88.889	480	66.667	0.317	22	568	0.761	3.412	91.959	21.99	568	0.373	88.891	22	546	8.281*10 <sup>-7</sup>	-0.002	0.495	2.113
	328	102.778	450	80.556	0.279	22	495	0.809	2.917	107.091	21.99	495	0.254	102.781	22	473	2.990*10 <sup>-6</sup>	-0.003	0.486	2.248
	343	108.333	412	80.556	0.279	21	433	0.809	2.479	113.418	20.99	433	0.168	108.348	21	412	1.693*10 <sup>-5</sup>	-0.015	0.504	2.248
	358	110.278	377	72.222	0.267	21	444	0.694	3.794	113.185	20.99	444	2.309	110.342	21	423	8.884*10 <sup>-5</sup>	-0.064	0.464	1.928
	373	112.500	357	69.444	0.255	24	439	0.638	3.769	115.827	23.99	439	2.823	112.632	24	415	2.321*10 <sup>-4</sup>	-0.132	0.441	1.771

Tablo 4.12, 4.13, 4.14, 4.15 ve 4.16 incelendiğinde, tek ve çift diyot modelleri yardımıyla yapılan hesaplama sonuçlarının birbiriyle ve deneysel verilerden elde edilen grafik analiz sonuçlarıyla uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

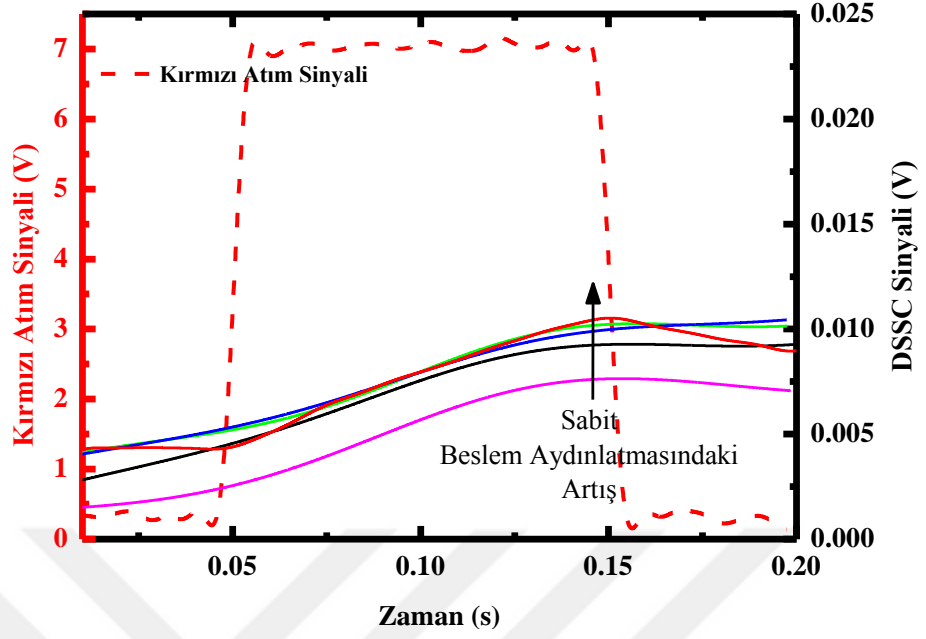
Doğal boyalarla üretilen DSSC'lerde birbirine benzer şekilde sıcaklık artışına paralel olarak artış eğiliminde olan seri direnç değeri c-Si sensörde stabile yakın değerlerdedir. Paralel direnç değerleri ise DSSC'lerde sıcaklık artışıyla c-Si sensöre nazaran hızlı bir şekilde düşmektedir.

Tablolarda verilmekte olan DSSC'lere ait diyot idealite faktörleri literatürde fotovoltaik yapılar için 1 ila 5 arasında olması uygun kabul edilen makul aralıkta olup, elde edilen bu değerlerin literatürle uyumlu olduğu belirlenmiştir [220, 228, 229]. Kısadevre akım yoğunluğu incelendiğinde ise P1 ve P2 boyalarıyla üretilen DSSC'lerde hızla düşmekte olan bu değerlerin, P1-A ve P2-A boyalarıyla üretilen DSSC'lerde yükseliyor olması Şekil 4.34 ile Şekil 4.37 arasında verilen grafikleri destekler nitelikte olup bu durumun analitik yöntemle de bir ispatı niteliğindedir. Dolayısıyla asetonla reflüks prosedürü sonrası elde edilen boyaaların sıcaklığa karşı toleransı bu şekilde analitik yöntemle de bir kez daha kanıtlanmış olmaktadır.

#### **4.9. Üretilen DSSC'lerin Geçici Fotovoltaaj Performans Karakterizasyonu**

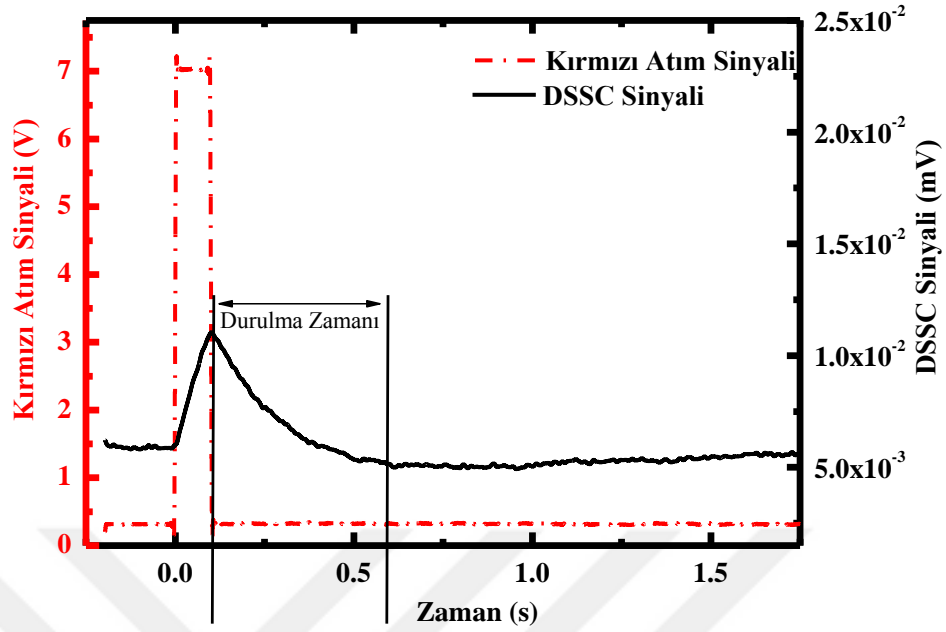
Fotodetektör karakterizasyonunda aydınlatma altında ani yükselme ve karanlığa geçiş durumunda düşme zamanlarının tayininde fotovoltaaj değerinin geçici durum analizleri Şekil 3.23'te (bkz. Bölüm 3.3.4) görülen ve çalışması detaylı şekilde anlatılmış olan deney düzeneği kullanılarak ölçülmüştür. Üretilen DSSC'lerde, fotovoltaaj üretimini sağlamak için sürekli halde ışık yayan LED'lere sabit gerilim uygulanarak DSSC'ler beyaz beslem ışığına maruz bırakılmıştır. Periyodu 1 saniye ve darbe genişliği 800 ms olan kırmızı ışık atımı yardımıyla DSSC'nin fotovoltaaj değerinde gözlenen yükselme ve kırmızı ışık atımının ortadan kalkmasıyla eski haline dönüş hızı yani beslem ışığıyla ürettiği gerilim değerine düşme süresi izlenmiştir.

Kırmızı lede uygulanan atımla gerçekleşen gerilim yükselişi P1 boyası için Şekil 4.39'da verilmiştir.



**Şekil 4.39.** P1 boyasıyla üretilen DSSC'ye ait kırmızı atım sinyaline karşılık gerilim yükselişi

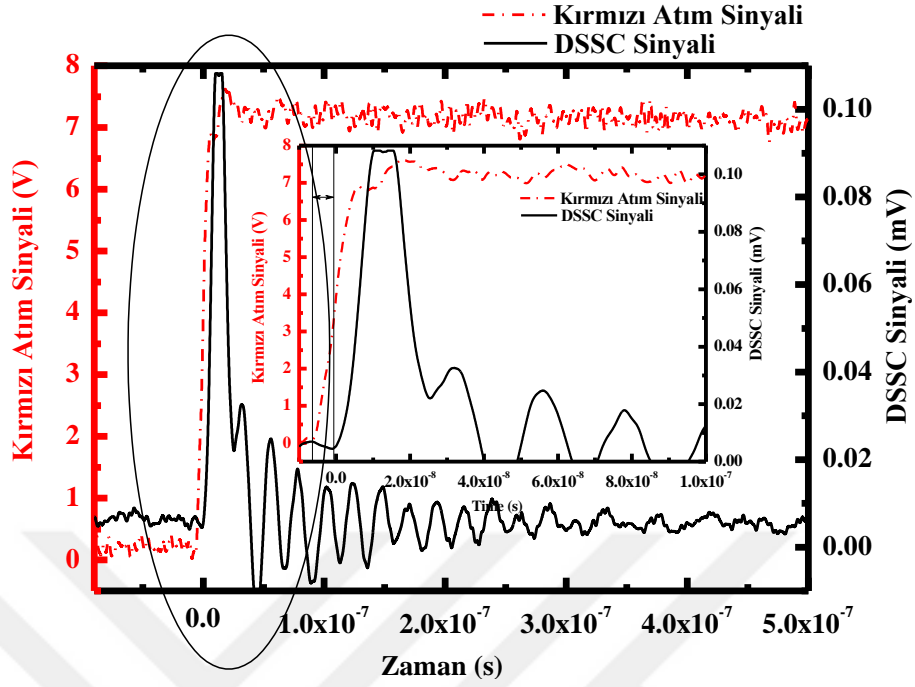
P1 boyasıyla üretilmiş olan DSSC fotodetektör, beslem ışığını sağlayan lede uygulanan gerilim 2.8 V ile 3.6 V arasında kademeli olarak yükseltmek koşuluyla aydınlatılmış ve kırmızı ışık atımının uygulandığı andan itibaren kesildiği ana kadar verdiği gerilim tepkisi beslem aydınlatmasının her kademesi için izlenmiştir. Aynı şekilde kırmızı ışık atımının ortadan kalkmasıyla DSSC'nin beslem ışığıyla ürettiği gerilim değerine düşme süresi de P1 boyası için Şekil 4.40'ta verilmektedir.



**Şekil 4.40.** P1 boyasıyla üretilen DSSC'ye ait kırmızı atım sinyaline karşılık gerilim yükselişi

3.6 V'luk gerilim ile sağlanan beslem ışığına 5.8 mV gerilim üretimi şeklinde yanıt veren DSSC'nin 0.1 s'lik kırmızı atım sinyaline gösterdiği tepki 5.2 mV'luk bir artışla 11 mV seviyesine çıkma şeklinde olmuştur. Bu durum Şekil 4.39 ve 4.40'ta açıkça görülmektedir. Ayrıca Şekil 4.40'a bakıldığında kırmızı atım ışığının kesilmesiyle bu DSSC yapısı yaklaşık 0.5 s içerisinde beslem ışığıyla ürettiği gerilim seviyesine dönmektedir.

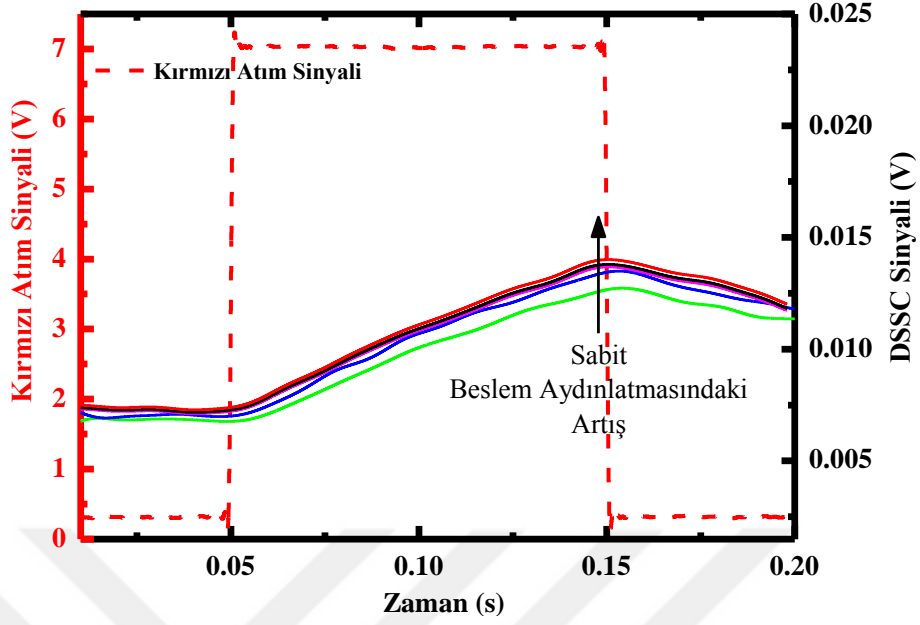
Şekil 4.41'de ise kırmızı ışık atımının yükselmeye başladığı ilk andan itibaren osiloskopta frame sayısı artırılarak ve zaman skalası genişletilerek ns mertebesinde inceleme yapılmıştır. Kırmızı ışık atımıyla ilk anda DSSC bir pik oluşturmuş ancak bu piki içyapısındaki materyallerin tepki hızı veya direnç değerleri nedeniyle devam ettiremeyerek tekrar düşmüş ve atım süresince belirli bir salınımla yavaş yavaş yükselmeye başlamıştır. Bu durumun nedeni ilk anda kırmızı ışık atımının etkisiyle fotoduyarlılaştırıcı boyar maddeden kopan elektronun  $TiO_2$  tabakasına, oradan dış devreye aktarıldıktan sonra Pt tabakaya ulaşması ve elektrolitin boyar maddeye verdiği elektronun yerini doldurması için geçen sürenin ilk kırmızı atım anında gerçekleşen pikin devamını getiremeyecek kadar uzun olmasıdır (bkz. Bölüm 2.3). Bu arada geçen süre her bir tabakanın direnci, elektrolitin redoks potansiyeli ve Pt tabakanın katalizleme hızı gibi birçok parametreye bağlıdır. [130, 131, 132]. DSSC tarafından üretilen mV seviyesindeki bu pik Şekil 4.40'ta gerilim skalası V mertebesinde olduğu için görüntülenememiştir. Bu nedenle Şekil 4.41 düzenlenmiştir.



**Şekil 4.41.** P1 boyasıyla üretilen DSSC'ye ait kırmızı ışık atımına ilk anda verilen pikin yükselme zamanı ve gecikme süresi grafiği

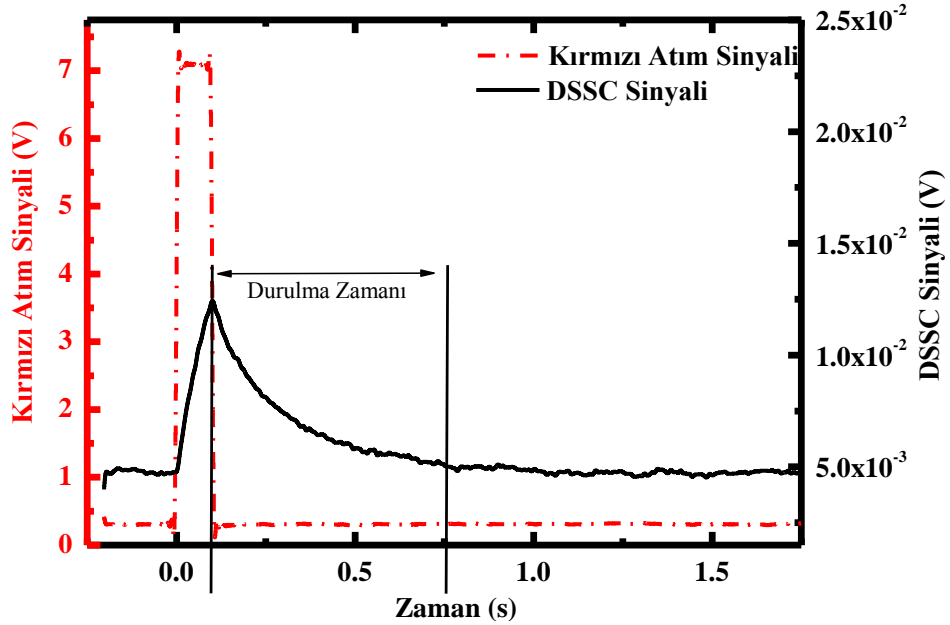
Kırmızı ışık atımı maksimum noktaya çıkana kadar geçen ortalama 18-20 ns'lik sürede DSSC'nin verdiği tepki ilk andaki pik için 5.84 ns'lik gecikmeyle yükselmeye başlamakta ve 16. ns civarında tepe noktaya ulaşmaktadır.

P1-A boyasıyla üretilmiş olan DSSC fotodetektörün, sürekli olarak uygulanan ve kademeli olarak yükseltilebilir gerilimle beslem ışığının sağladığı sabit gerilim üretimi ve kırmızı ışık atımının uygulandığı andan itibaren kesildiği ana kadar verdiği gerilim tepkisi bu DSSC için de beslem aydınlatmasının her kademesi için izlenmiştir. Aynı şekilde kırmızı ışık atımının ortadan kalkmasıyla DSSC'nin beslem ışığıyla ürettiği gerilim değerine düşme süresi de P1-A boyası için Şekil 4.42'de verilmektedir.



**Şekil 4.42.** P1-A boyasıyla üretilen DSSC'ye ait kırmızı atım sinyaline karşılık gerilim yükselişi

Şekil 4.42 ve Şekil 4.43'te görüldüğü üzere 3.6 V'luk besleme ile sağlanan beslem ışığına 7 mV gerilim üretimi şeklinde yanıt veren cihazın 0.1 s'lik kırmızı atım sinyaline gösterdiği tepki 7 mV'luk bir artışla 14 mV seviyesine çıkma şeklindedir.

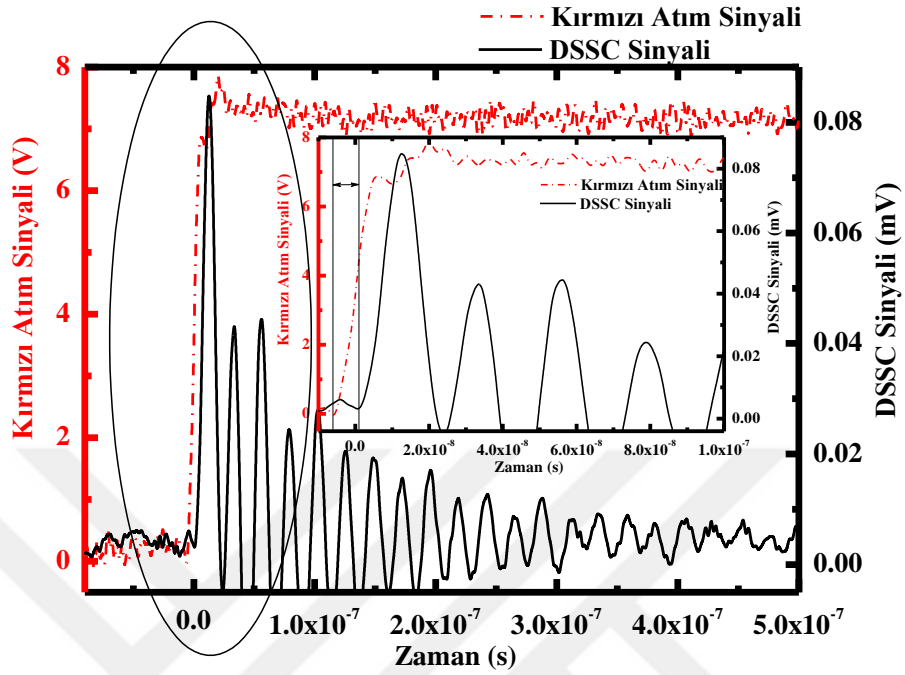


**Şekil 4.43.** P1-A boyasıyla üretilen DSSC'ye ait kırmızı atım sinyaline karşılık gerilim yükselişi

Ayrıca Şekil 4.43 incelendiğinde kırmızı atım ışığının ortadan kalkmasıyla bu DSSC yapısı 0.6 s içerisinde atım sinyali öncesinde beslem ışığıyla ürettiği gerilim seviyesine



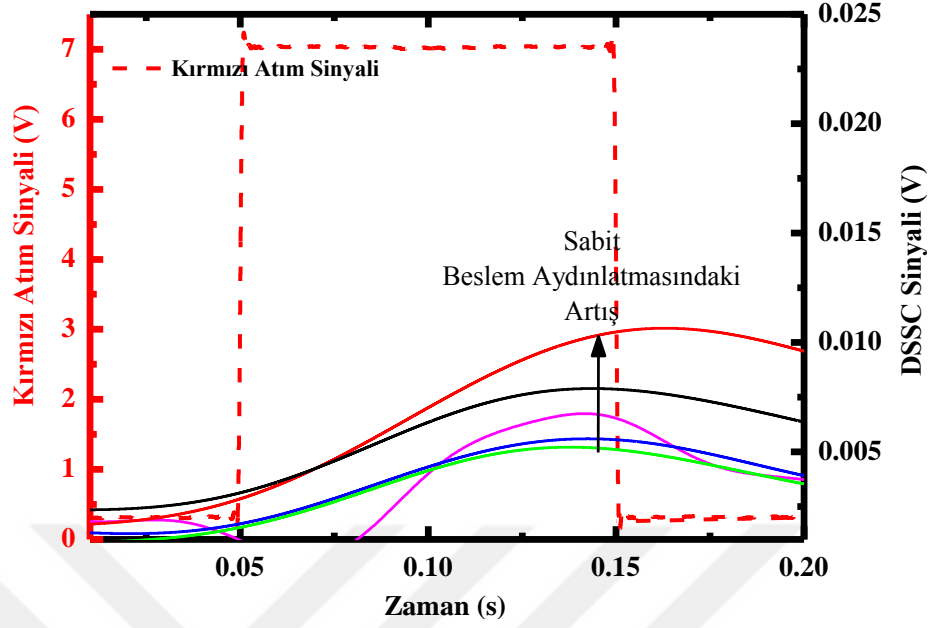
dönmektedir.



**Şekil 4.44.** P1-A boyasıyla üretilen DSSC'ye ait kırmızı ışık atımına ilk anda verilen pikin yükselme zamanı ve gecikme süresi grafiği

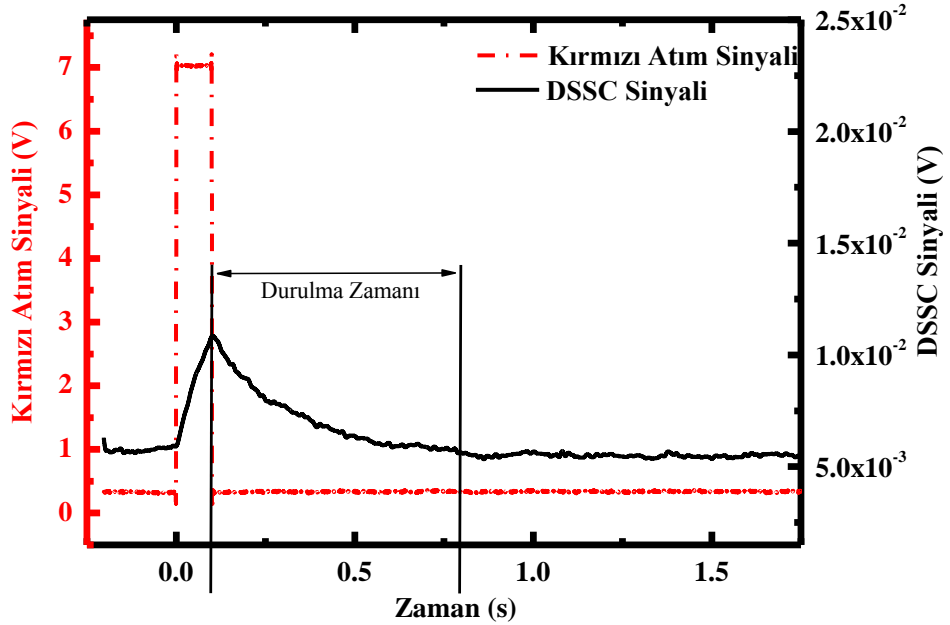
Şekil 4.44'te kırmızı ışık atımının yükselmeye başladığı ilk anda DSSC P1 fotoduyarlılaştırıcısıyla üretilene benzer şekilde bir pik oluşturmuştur. Ancak bu yapı da pikle başlattığı artışı içyapısındaki materyallerin hızı veya direnç değerleri nedeniyle devam ettiremeyerek belirli bir salınımla tekrar düşmüş ve atım süresince yavaş yavaş yükselmiştir. Kırmızı ışık atımı maksimum noktaya çıkana kadar geçen ortalama 18-20 ns'lik sürede DSSC'nin verdiği tepki ilk andaki pik için 7.07 ns'lik gecikmeyle yükselmeye başlamakta ve 9 ns civarında tepe noktaya ulaşmaktadır.

Diğerlerinde olduğu gibi P2 boyasıyla üretilmiş olan DSSC fotodetektörün, sürekli olarak uygulanan beslem ışığıyla ürettiği sabit gerilim ve kırmızı ışık atımına verdiği gerilim tepkisi beslem aydınlatmasının her adımı için incelenmiştir. Aynı şekilde kırmızı ışık atımının ortadan kalkmasıyla DSSC'nin beslem ışığıyla ürettiği gerilim değerine düşme süresi de P2 boyası için Şekil 4.45'te verilmektedir.



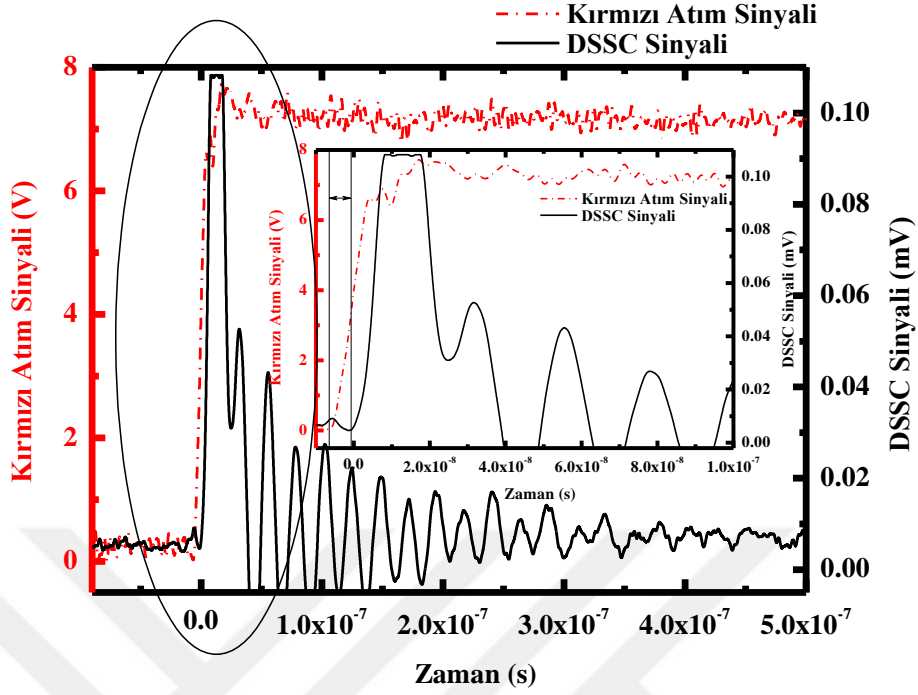
**Şekil 4.45.** P2 boyasıyla üretilen DSSC'ye ait kırmızı atım sinyaline karşılık gerilim yükselişi

Şekil 4.45 ve 4.46'da verilen grafiklere bakıldığında 3.6 V'luk besleme ile sağlanan beslem ışığına 2.86 mV gerilim üretimi şeklinde yanıt veren cihaz 0.1 s'lik kırmızı atım sinyaline karşılık 7.14 mV'luk bir artışla 10 mV seviyesine yükselerek tepki vermiştir.



**Şekil 4.46.** P2 boyasıyla üretilen DSSC'ye ait kırmızı atım sinyaline karşılık gerilim yükselişi

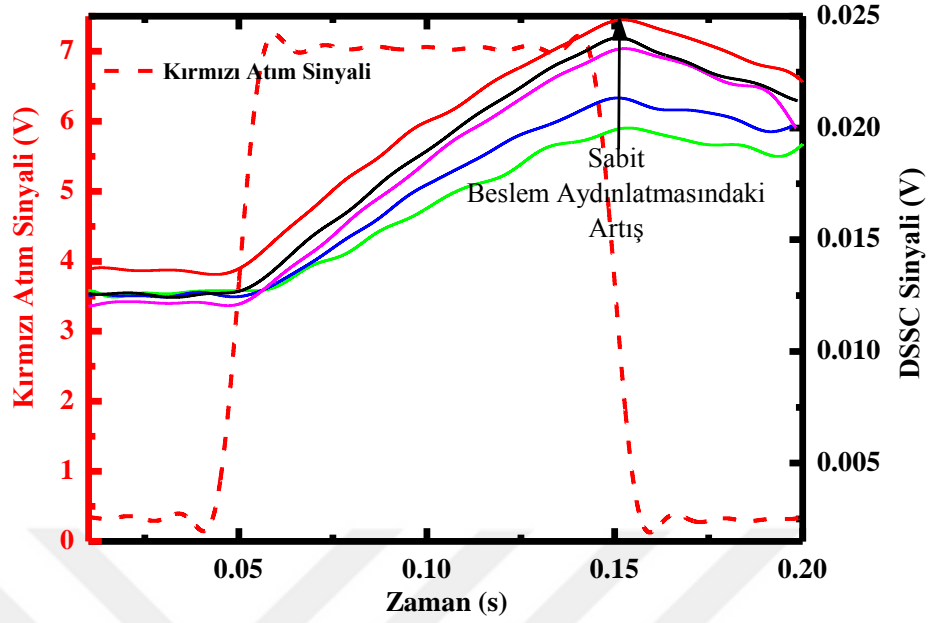
Şekil 4.46'da kırmızı atım ışığının ortadan kalkmasıyla bu DSSC yapısının yaklaşık 0.7 s içerisinde ilk gerilim seviyesine dönmekte olduğu gözlenmektedir.



**Şekil 4.47.** P2 boyasıyla üretilen DSSC'ye ait kırmızı ışık atımına ilk anda verilen pikin yükselme zamanı ve gecikme süresi grafiği

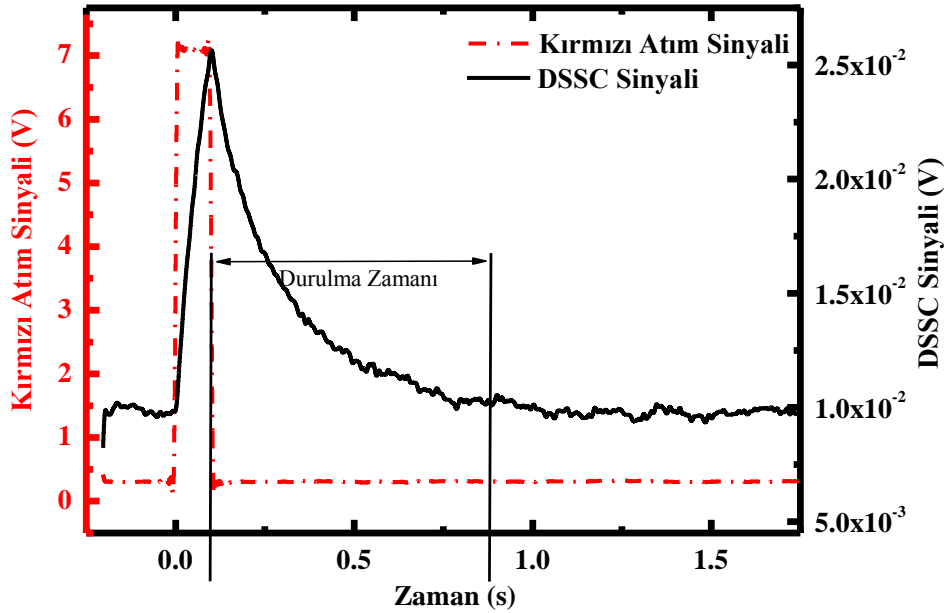
Şekil 4.47'de kırmızı ışık atımının yükselmeye başladığı ilk anda DSSC'nin oluşturduğu pik diğer DSSC'lerde olduğu gibi belirli bir salınımla tekrar düşmüş ve atım süresince yavaş yavaş yükselmiştir. Kırmızı ışık atımı maksimum noktaya çıkana kadar geçen sürede DSSC'nin verdiği tepki ilk andaki pik için 7.12 ns'lik gecikmeyle yükselmeye başlamakta ve 12 ns civarında tepe noktaya ulaşmaktadır.

Diğer üç DSSC'de olduğu gibi P2-A boyasıyla üretilen DSSC fotodedektörün de, beslem ışığıyla ürettiği sabit gerilim ve kırmızı ışık atımına karşı verdiği gerilim tepkisi beslem aydınlatması için izlenmiştir. Kırmızı ışık atımının ortadan kalkmasıyla DSSC'nin beslem ışığıyla ürettiği gerilim değerine düşme süresi de P2-A boyası için Şekil 4.48'de verilmektedir.



**Şekil 4.48.** P2-A boyasıyla üretilen DSSC'ye ait kırmızı atım sinyaline karşılık gerilim yükselişi

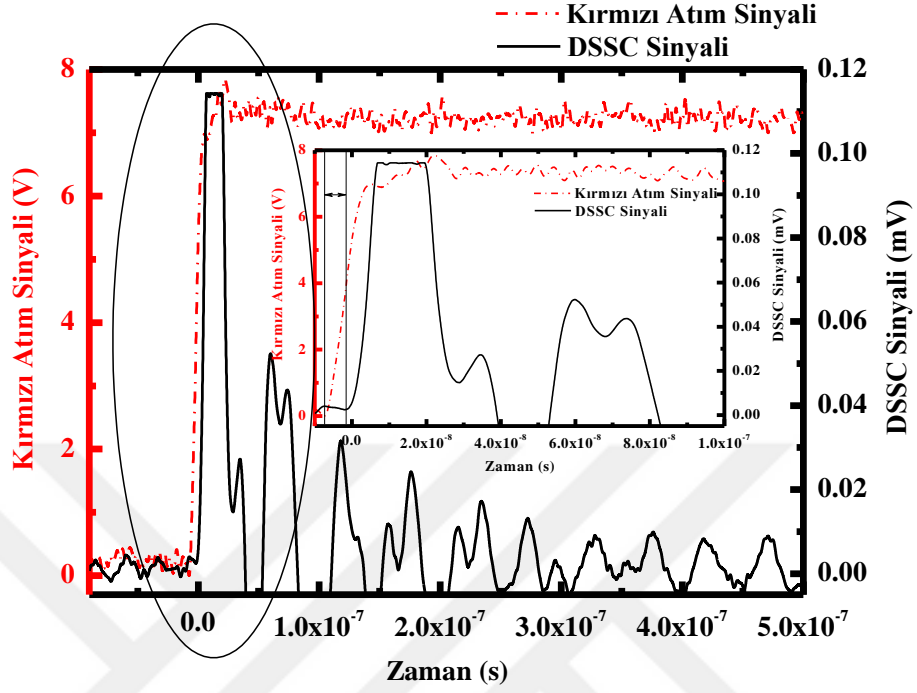
Şekil 4.48 ve 4.49'da verilen grafiklerde beslem ışığına 13.6 mV gerilim üretimi şeklinde yanıt veren cihazın 0.1 s'lik kırmızı atım sinyaline gösterdiği tepki 11.4 mV'luk bir artışla 25 mV seviyesine çıkması olarak gözlenmektedir.



**Şekil 4.49.** P2-A boyasıyla üretilen DSSC'ye ait kırmızı atım sinyaline karşılık gerilim yükselişi

Ayrıca Şekil 4.49'da görüldüğü üzere kırmızı atım ışığının kesilmesinden sonra bu DSSC yapısı 0.9 s içerisinde atım sinyali öncesinde beslem ışığıyla ürettiği gerilim seviyesine

dönmektedir.



**Şekil 4.50.** P2-A boyasıyla üretilen DSSC'ye ait kırmızı ışık atımına ilk anda verilen pikin yükselme zamanı ve gecikme süresi grafiği

Şekil 4.50 incelendiğinde kırmızı ışık atımının yükselmeye başladığı ilk anda DSSC diğer üçünde de olduğu gibi bir pik oluşturmuş ancak bu pik o da devam ettirememiştir. Kırmızı atım sinyalinin ilk yükseliş anında gerçekleşen bu pik değerini tespit edebilecek ekipmanlarla birlikte kullanılması halinde bu DSSC yapılarının çok hassas bir fotodedektör olarak kullanılabilceği net bir şekilde ortadadır. Kırmızı ışık atımı maksimum noktaya çıkana kadar geçen sürede DSSC'nin verdiği tepki ilk andaki pik için 9 ns'lik gecikmeyle yükselmeye başlamakta ve 12 ns civarında tepe noktaya ulaşmaktadır.

Tablo 4.17'de doğal fotoduyarlılaştırıcılarla üretilen DSSC fotodedektörlere ait anlık fotovoltaj üretimi, cevap hızı, düzelme zamanı gibi çeşitli karakteristik parametreler verilmektedir.

**Tablo 4.17.** DSSC fotodedektörlere ait karakteristik parametreler

Fotoduyarlılaştırıcı Boyaz Madde Kodu	Sabit Beslem gerilimi (mV)	Atım tepki genliği (mV)	Gecikme süresi(ns)	Tepe tepki süresi (ns)	Durulma zamanı (s)
P1	5.8	11	5.84	16	0.5
P1-A	7	14	7.07	9	0.65
P2	2.86	10	7.12	12	0.8
P2-A	13.6	25	9	12	0.85

Tablo 4.17’de sabit belsem gerilimi, mV cinsinden sabit beyaz ışığa karşı DSSC’nin üretmiş olduğu gerilim değeridir. Atım tepki genliği, mV cinsinden kırmızı led yandığı andan itibaren sönünceye kadar DSSC tarafından üretilen maksimum gerilim değeridir. Gecikme süresi, ns cinsinden kırmızı led yandığı andan itibaren DSSC’nin gerilim üretimine başladığı ana kadar geçen süredir. Tepe tepki süresi DSSC gerilimini atım sinyaliyle maksimum noktaya çıkmasına kadar geçen süredir. Durulma zamanı ise s cinsinden kırmızı led söndüğü andan itibaren DSSC’nin yalnızca belsem ışığıyla ürettiği gerilim seviyesine inmesine kadar geçen süredir.

Elde edilen bu karakteristik parametrelere göre sürekli olarak sağlanan beslem ışığına karşı verilen tepkilerde asetonla refluks prosedürü ve galik asit miktarındaki artışın performans üzerindeki pozitif etkisi bariz bir şekilde görülmektedir. Daha önce sunulan sonuçlar da incelendiğinde sabit ışık kaynağına karşılık üretimin en yüksek olması beklenen P2-A fotoduyarlılaştırıcılı DSSC’nin bu beklentiyi karşıladığı ve 13.6 mV değerindeki en yüksek belsem gerilimini ürettiği gözlenmektedir, P2-A’yı 7 mV ile yine asetonla refluks işleminden geçmiş olan P1-A izlemektedir. Bu durumda beslem kaynağından sağlanan sabit aydınlatma ve kırmızı atım ışığı ile üretilen fotovoltajın ve dolayısıyla verilen tepkinin en yüksek olduğu yapıların asetonla refluks işleminden geçmiş olan grup olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla kırmızı atım sinyaline karşı verilen en yüksek gerilim tepkilerinin de olması beklendiği şekilde P1-A (14 mV) ve P2-A (25 mV) ile elde edilmesi bu yapılar entegre edilerek fotodedektör devreleri üretilmesi halinde gerilim değişimi tespitini kolaylaştıracaktır.

Şekil 41, 42, 47 ve 50’de kırmızı led yandığı andan itibaren DSSC’lerin tepki vermeye başladığı ana kadar geçen süreler dikkatle incelendiğinde en düşük gecikme süresine 5.84 ns ile P1’in, bu parametrede en uzun süreye ise 9 ns ile P2-A’nın sahip olduğu görülmektedir. Ancak kırmızı atım sinyaline verilen tepkinin başladığı andan tepe noktasına ulaşana kadar geçen süre (tepe tepki süresi) konusunda en iyi performans 9 ns ile P1-A’ya aittir.

DSSC fotodedektörlerin kırmızı atım sinyalinin oluşması anında ürettikleri pikler incelendiğinde ise tepki süresinin en kısa olduğu (9 s) yapı yine asetonla refluks prosedüründen geçmiş olan P1-A boyasıyla üretilen DSSC'dir. Aynı boyayla üretilen DSSC fotodedektörün durulma zamanı da diğerleri arasında 0.5 s ile en hızlı olan P1'den sonra 0.65 s ile ikinci sırada gelmektedir. Fotodedektör performansları incelendiğinde genel manada asetonla refluks prosedürü ve galik asit artışının DSSC performansında olduğu gibi fotodedektör performansında yadsınamayacak bir avantaj sağladığı açıkça görülmüştür.



## 5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Doğal boyalarla üretilen DSSC yapıları güneş pili araştırmalarında yakın tarihli bir geçmişe sahip olmakla birlikte bilim dünyasındaki genel eğilim DSSC yapılarının tamamen çevreci ve doğal malzemelerle üretilmeleridir. Bu bağlamda doğal boyalarla üretilen DSSC'lerde verime etki eden faktörlerin saptanması son derece önemlidir. Yapılan bu tez çalışmasında ise öncelikle doğal boya kullanımında verime etki eden faktörlerin belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu maksatla Pelargonium cinse mensup Pelargonium Grandiflorum ve Pelargonium Hortorum türlerine ait iki adet bitkinin çiçekleri DSSC'lerde kullanılmak üzere doğal fotoduyarlılaştırıcı boyar madde yapımında kullanılmıştır. Aynı cins fakat farklı türde bitkilerin hemen hemen aynı içeriğe sahip olacağı veya içeriklerinin mukayese edilebileceği düşünülerek bitkilerin içerikleri GC-MS analiziyle belirlenmiş, elektriksel karakteristiklerle yapılan mukayeseler kimyasal aktif türler hakkında bilgi sağlamıştır. Çalışmamızdaki amacın yeni bir fotoduyarlılaştırıcı boyar madde üretmek değil, boyar madde içeriğindeki moleküler bileşenleri ve bu bileşenlerin DSSC parametreleri üzerindeki etkilerini araştırmak olduğunu belirtmek gerekmektedir. Diğer taraftan ucuz ve kolay üretimin mümkün olabildiği, tez kapsamında ortalama 1 TL civarında bir maliyetle üretilmiş olan DSSC'lerin bir fotodetektör olarak kullanımı yine bu tezde deneysel verilerle sorgulanmıştır. Elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir;

Öncelikle bitkilerden elde edilen P1 ve P2 kodlu fotoduyarlılaştırıcı boyar madde ekstraktlarına ait absorpsiyon eğrileri elde edilmiştir. Şekil 4.9'da gösterildiği üzere P1 boyar maddesi P2'ye göre 530 nm civarında daha yüksek absorpsiyona sahiptir. DSSC'ler için görünür bölgedeki soğurma spektrumunun daha yüksek olmasının bu boyalardan beklenen performansı arttırabileceği bilinmektedir [14]. DSSC performansını tam olarak tanımlayabilmek için elektriksel karakteristikleri ve absorpsiyon eğrileri birlikte değerlendirilmelidir. Şekil 4.13'teki I-V eğrileri incelendiğinde P1 boyası ile hazırlanan DSSC, P2 boyasıyla hazırlanana nazaran  $0,72 \text{ A/m}^2$  daha yüksek fotoakım yoğunluğuna sahip olmasına rağmen açık devre geriliminin P2'den 46 mV daha düşük olması, boyar maddenin UV-VIS spektrumunda kapsadığı absorpsiyon bölgesinin, hücre performansında tek başına etkili olmadığını göstermiştir. Fotoduyarlılaştırıcı performansında absorpsiyon dışında etkili olabilecek diğer parametrelerin değerlendirilmesi maksadıyla boyar madde içerikleri GC-MS analizi yöntemiyle elde edilmiş ve değerlendirilmiştir. Şekil 4.10 ve 4.11'deki P1 ve P2 boyar maddelerine ait GC-MS grafiklerine bakıldığında, boyar madde içeriklerinde rastlanan birçok organik bileşen arasından P1 boyasında % 11.90, P2 boyasında ise % 2.46 oranında bulunduğu tespit edilen galik asitin her iki boyanın yapısında da ortak olduğu ve



diğer bileşenlere göre miktarca fazla olduğu saptanmıştır. Galik asit miktarının güneş pili parametreleri üzerindeki etkisi sorgulandığında Şekil 4.12, 4.13 ve Tablo 4.4'ten görülebileceği gibi galik asit miktarı fazla olan boyayla DSSC üretildiğinde  $0.72 \text{ A/m}^2$  kadar daha yüksek bir akım yoğunluğuyla karşılaşılmıştır. Galik asit oranının artışıyla elde edildiği savunulan bu iyileşmenin diğer boyar madde bileşenleri dışında yalnızca galik asit kaynaklı olduğu kanısını doğrulamak amacıyla ilave deneyler tasarlanmıştır. Bu deneyde  $10^3$  ar mL P2 boyar maddesine ticari olarak satın alınan saf galik asit 0.1 mg eklenerek P3, 1 mg eklenerek P4 kodlu boya solüsyonları hazırlanmıştır. Bu boyalarla üretilen DSSC'ler de daha öncekilerde olduğu gibi karakterize edilmiş ve sonuçlar Şekil 4.24'te verilmiştir. Doğal fotoduyarlılaştırıcı boyar maddeye eklenen saf galik asitin Tablo 4.3'te verildiği üzere %  $\eta$  değerinde P3 ve P4 için P2'ye göre sırasıyla 2.2 ve 2.6 kat fotovoltaj performans artışına neden olduğu tespit edilmiştir.

Üretilen DSSC'lerin performansı, yapı içerisinde kullanılan boyar maddenin performansına büyük ölçüde bağlıdır [76]. Bu nedenle tez kapsamında, üretilen doğal fotoduyarlılaştırıcıların galik asit miktarını arttıracak ve fotoakım üretiminde etkisiz organik bileşiklerin sayısını azaltacak bir yöntem deneyler sonucunda tespit edilmiştir. Bu yöntem asetonla reflüks işlemini içermektedir. P1 ve P2 boyalarına asetonla reflüks işlemi uygulanmış ve bu işlem sonucu elde edilen yeni P1-A ve P2-A boya ile DSSC'ler üretilmiştir. Deneyler kapsamında kullanılan boyar maddeler ve önerilen asetonla reflüks işlemi literatürde daha önce denenmemiş ve dolayısıyla benzer bir çalışmaya rastlanmamış olduğundan üretilen yapılar birbirleriyle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Tez çalışmaları esnasında Pelargonium çiçeği boya ile uygulanan bu işlemin başka bitki ekstraktlarına uygulanabilir olması da ayrıca önemlidir.

Asetonla reflüks işleminin boyar maddeler üzerindeki etkisi konusunda fikir edinebilmek için P1-A, P2-A boyar maddelerinin absorpsiyon eğrileri elde edilmiş ve incelenmiştir. Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de görüldüğü üzere asetonla reflüks işlemi sayesinde P1-A ve P2-A boya ile absorpsiyon bölgesinin P1 ve P2'ye göre daha yüksek dalga boyu bölgesine, sırasıyla 600 nm ve 560 nm civarına kadar uzandığı gözlenmiştir. Daha geniş absorpsiyon bölgesinin tek başına enerji dönüşüm performansı üzerinde etkili olmadığı bilindiğinden, enerji dönüşüm verimi ile GC-MS'ten elde edilen veriler değerlendirilerek reflüks işlemi sonrası P1 boyasında % 7.19, P2 boyasında ise % 31.11 oranında artmakta olan galik asitin Şekil 4.22'de de verildiği üzere ilk pilde % 58.4, ikinci pilde ise % 216.4 oranında verim artışına neden olduğu gözlenmiştir. Böylece boyar madde içeriğinde galik asit oranındaki artışın hücre performansında verim artırıcı bir özellik gösterdiği açıkça görülmüştür.

Galik asitin DSSC yapısına nasıl etkidiğini ortaya koymak amacıyla tek diyot ve çift diyot modelleri kullanılarak güneş pili karakteristikleri analitik olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre galik asitin özellikle fotoaktif tabakadaki seri direnci P1 için 1.8, P2 için 3.5 oranında önemli ölçüde azalttığı, sızıntı akımını iyileştirdiği, 1'e daha yakın idealite değerlerine sahip DSSC üretimine neden olduğu ve dolayısıyla tüm bu parametrelerin de güneş pili verimini olumlu yönde geliştirdiği gözlenmiştir.

Ayrıca çalışma kapsamında tercihe bağlı olarak güneş hücresi ya da fotodedektör olarak kullanılabilir, boyayla duyarlılaştırılmış fotoaktif kimyasal dönüşüm hücrelerinin fotodedektör özellikleri de incelenmiştir. Fotodedektör uygulamaları konusunun araştırılması amacıyla DSSC'ler aydınlatma şiddeti, sıcaklık etkisi ve tepki süreleri açısından incelenmiştir.

Düşük ışık şiddeti koşullarında DSSC'lerin karakteristik parametreleri, bir ticari c-Si sensör ile karşılaştırılmıştır. Nötral yoğunluk filtreleri yardımıyla ayarlanan 34-2.3 W/m<sup>2</sup> aralığındaki ışık şiddetlerinde fototepki ölçümleri yapıldığında DSSC fotodedektörün yüksek kalite c-Si fotodedektöre oranla özellikle düşük ışık şiddetleri için ortalama 10 kat daha fazla çıkış gücü ve daha yüksek dolum faktörü sağladığı gözlenmiştir.

Refluks işleminin özellikle düşük aydınlanma şiddetlerinde çok daha hassas fotoalgılayıcıya neden olduğu Şekil 4.26'dan bariz bir şekilde görülmüştür. Bu durumda elde edilmiş olan fotovoltaik cihaz karakteristikleri üretilen DSSC'lerin 2.3 W/m<sup>2</sup>'ye kadar düşük ışık şiddetlerinde fotodedektör olarak kullanılabilmesinin yanı sıra sabah, akşam saatlerinde, bina içine monte edilme gibi sınırlı ışık koşullarında veya bulutlu ve yağışlı günlerde karşılaşılan belirgin zayıf ışıkta hatta gece ay ışığında daha avantajlı olduğunu kanıtlamıştır.

Bunun dışında üretilen DSSC fotodedektörlerin sıcaklık kararlılıkları da 298-373 °K aralığında incelenmiştir. Fotodedektör ölçümlerinin değişen ortam sıcaklıklarına bağlı olarak yürütülen testlerinde ise P2-A boyasıyla üretilen DSSC'de V<sub>OC</sub> değerindeki salınımın diğerlerine nazaran az olması, c-Si hücreye her işlem basamağında oldukça yakın değer ve performans göstermesi ve 358°K'den sonra ise V<sub>OC</sub> değerinin artışı oldukça dikkat çekicidir (bkz. Şekil 4.32, 4.37). Kademeli olarak yükseltelen çalışma sıcaklıklarına karşı özellikle asetonla refluks prosedüründen geçirilen P1-A gibi P2-A boyar maddelerinin her ikisinin de akım yoğunluğu anlamında sıcaklık artışını daha iyi tolere ettiğini, bunlar arasında da en iyi toleransa P2-A'nın sahip olduğunu göstermiştir. Diğer boyalarla üretilen DSSC'lerle kıyaslanacak olursa P2-A'da parametrelerdeki düşüşler daha yavaş gerçekleşmekte ve en kötü değerleri dahi diğerlerine nazaran yüksek seviyelerde kalmaktadır. Özellikle % η değeri

bu konuda göze çarpmaktadır. Böylece tez kapsamında önerilen doğal boya ekstraksiyon yöntemi ve asetonla refluks prosedürü sayesinde fotoduyarlılaştırıcı yapısında artan galik asit miktarının üretilen DSSC'lerde akım yoğunluğu anlamında sıcaklık artışına karşı iyileşmeye neden olduğu kesinlik kazanmıştır.

Fotodedektörlerde bir diğer önemli parametre ise tepki süresidir. Doğal boya kullanılarak üretilmiş DSSC'lerin tepki süreleri geçici fotoakım ve fotovoltaj yöntemleriyle incelenmiştir. Elde edilen karakteristik verilere göre sürekli olarak sağlanan beslem ışığına karşı verilen tepkilerde asetonla refluks prosedürü ve galik asit miktarındaki artışın performans üzerindeki pozitif etkisi bariz bir şekilde görülmüştür. Bu durumda beslem kaynağından sağlanan sabit aydınlatma ve kırmızı atım ışığına karşı verilen tepkinin en yüksek olduğu yapıların asetonla refluks işleminden geçmiş olan grup olduğu belirlenmiştir. DSSC fotodedektörlerin aslen ışıkla etkileştiği ilk birkaç nanosaniye içerisinde bir atım gerçekleştirdiği ancak üretilen atımı  $\sim 0.1$  s civarında sürekli bir akıma (d.c.) dönüştürebildiği gözlenmiştir. Nanosaniye mertebesinde atımın algılanması sonrası 0.1 s mertebesindeki d.c. akım üretimindeki gecikme fotokimyasal hücredeki redoks tepkimelerinin, katalitik aktivite işlemlerinin ve bu esnada sıvı elektrolit içerisinde elektron taşınma hızının toplam sürelerine atfedilmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] Şen, Z., Solar energy in progress and future research trends, Progress in Energy and Combustion Science, 30(4), 367-416, 2004.
- [2] Whitesides, G.M., Crabtree, G.W., Don't Forget Long-Term Fundamental Research in Energy, Science, 315, 796-798, 2007.
- [3] Kamat, P. V., Meeting the clean energy demand: nanostructure architectures for solar energy conversion. The Journal of Physical Chemistry, 111, 2834-2860, 2007.
- [4] Nelson, J., The physics of solar cells, s.329, Imperial College Press, 2003.
- [5] Würfel, P., Physics of solar cells : from principles to new concepts, s.106, Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2005.
- [6] Graf, R.F., Modern dictionary of electronics, Butterworth-Heinemann, A.B.D., 1999.
- [7] Becquerel, A.E., Recherches sur les effets de la radiation chimique de la lumiere solaire au moyen des courants electriques, Comptes Rendus de L'Academie des Sciences, 9, 145-149, 1839.
- [8] Becquerel, A.E., Memoire Sur Les Effets Électriques Produits Sous l'influence Des Rayons Solaires. C.R. Acad. Sci., 9, 561 – 567, 1839.
- [9] Millikan, R.A., Photoelectric Determination of Planck's "h.", Physical Review, Vol. 7, Second Series, 355-388, 1916.
- [10] Smith, W., The Action of Light On Selenium, The Twelfth Ordinary General Meeting, 32, 1873.
- [11] Adams, W.G., Day, R.E., The action of light on selenium, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 167, 313-349, 1877.
- [12] Fritts, C.E., A New Form Of Selenium Cell, Am. Jour. Sci, Third Series, 26(156), 30, 1883.
- [13] Stoletov, A., Joukovsky, N., Nekrassov, P., Kovalevskaya, S.V., Mat, Sb., 16(1), 1-38, 1891.
- [14] Lenard, P., Ueber die lichtelektrische Wirkung, Annalen der Physik, 8, 149-198, 1902.
- [15] Einstein, A., Concerning an Heuristic Point of View Toward the Emission and Transformation of Light, 17, 132, 1905.
- [16] Pochettino, A., Photo-electric properties of anthracene, Lincei Rendic, 15, 171-179, 1906.
- [17] Coblenz, W., Thermal generator, US Patent 1077219 A, October 28, 1913.

- [18] Czochralski, J., Ein neues verfahren zur messung der kristallisations geschwindigkeit der metalle, Z. Phys. Chemie., 92, 219-221, 1918.
- [19] Müller, G., Review: The Czochralski Method - where we are 90 years after Jan Czochralski's invention, Cryst. Res. Technol. 42(12), 1150-1161, 2007.
- [20] Fagen, M.D., A History of Engineering and Science in the Bell System, Voll, Bell Labs, 1975.
- [21] Bergmann, L., Über Eine Neue Selen-Sperrschicht Photozelle, Physikalische Zeitschrift, 32, 286, 1931.
- [22] Nix, F.C., Treptwo, A.W., A Thallous Sulphide Photo EMF Cell, Journal Opt. Society of America, 29, 457, 1939.
- [23] Ohl, R.S., Light-Sensitive Electric Device, US Patent 2443542, June 15, 1948.
- [24] Teal, G.K., Little, J.B., Growth of germanium single crystals, Physical review, 78, 5, One Physics Ellipse, College Pk, Md 20740-3844 USA, American Physical Soc., 1950.
- [25] Chapin, D.M., Fuller, C.S., Pearson, G.L., "A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power", Journal of Applied Physics, 25, 676-677, 1954.
- [26] Fraas, L., Paratin, L., "Solar Cells and Their Applications", Second Edition, John Wiley, 3-5, 2010.
- [27] AT&T assignors (Gerald L. Pearson, Daryl M. Chapin, and Calvin S. Fuller), Bell Telephone Labor Inc, "Solar Energy Converting Apparatus." US patent US2780765, February 5, 1954.
- [28] Ross, B., Hoffman Electronics Corporation, "Light Sensitive Device and Method of Making the Same." US patent US2862160 A November 25, 1958.
- [29] David, A., Kleinman, Plainfield, NJ., Solar Energy Converting Apparatus, US Patent US 3175929 A, Mart 30, 1965.
- [30] Mandelkorn, J., "Dual Display System For Measuring Lifetime In Silicon Using Photoconductivity Decay." Journal Of The Electrochemical Society, 105(12), 1958.
- [31] Kınacı, B., III-V Grubu Güneş Hücre Yapılarının Epitaksial Büyütülmesi ve Karakterizasyonu, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2013.
- [32] Alferov, Z.I., Andreev, V.M., Kagan, M.B., Protasov, I.I., Trofim, V.G., Solar Energy Converters Based on p-n Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-2x</sub>As- GaAs Heterojunctions, Sov. Phys. Semicond., 4, 2047, 1971.
- [33] Alferov, Z.I., The Double Heterostructure: The Concept and its Applications in Physics, Electronics, and Technology (Nobel Lecture), Chem. Phys. Chem., 2, 500-513, 2001.

- [34] Kazmerski, L.L., Solar photovoltaics R&D at the tipping point: A 2005 technology overview, *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 150, 105-135, 2006.
- [35] Sariciftci, N.S., Smilowitz, L., Heeger, A.J., Wudl, F., Photoinduced electron transfer from a conducting polymer to buckminsterfullerene, *Science*, 258, 1474-1476, 1992.
- [36] Dai, S., Weng, J., Sui, Y., Shi, C., Huang, Y., Chen, S., Pan, X., Fang, X., Dye-sensitized solar cells: from cell to module, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 84, 125-133, 2004.
- [37] Rokesh, K., Pandikumar A. and Jothivenkatachalam K., Dye Sensitized Solar Cell: A Summary, *Materials Science Forum*, 77(1-24), 2014.
- [38] Moser, J., Notiz über die Verstärkung photoelectrischer Ströme durch optische Sensibilisierung. *Monatsh. Chem.*, 8, 373, 1887.
- [39] Wenger, S., Strategies to Optimizing Dye-Sensitized Solar Cells: Organic Sensitizers, Tandem Device Structures, and Numerical Device Modeling, *École Polytechnique Fédérale De Lausanne, Doctorate Thesis*, 2010.
- [40] Namba, S., Hishiki, Y., Color sensitization of zinc oxide with cyanide dyes. *J. Phys. Chem.*, 69, 774-779, 1965.
- [41] Gerischer, H., Tributsch, H., Electrochemische Untersuchungen zur spectraleu sensibilisierung von ZnO-Einkristallen. *Ber. Bunsenges. Phys. Chem.*, 72, 437-445, 1968.
- [42] Hauffe, K., Danzmann, H.J., Pusch, H., Range, J., Volz, H., New Experiments on the sensitization of zinc oxide by means of the electrochemical cell technique. *J. Electrochem. Soc.*, 117, 993-999, 1970.
- [43] Gerischer, H., Michel-Beyerle, M.E., Rebentrost, F., Tributsch, H., Sensitization of charge injection into semiconductors with large band gap, *Electrochim. Acta*, 13, 1509-1515, 1968.
- [44] Tributsch, H., Daltrozzo, E., On the mechanism of spectral sensitization: Rhodamin B sensitized electron transfer to zinc oxide, *Photogr. Sci. Eng.*, 19, 308-314, 1975.
- [45] Tsubomura, H., Matsumura, M., Nomura, Y., Amamiya, T., Dye sensitised zinc oxide: aqueous electrolyte: platinum photocell. *Nature*, 261, 402-403, 1976.
- [46] Spitler, M.T., Calvin, M., Electron transfer at sensitized TiO<sub>2</sub> electrodes, *J. Chem. Phys.*, 66, 4294-4306, 1977.
- [47] O'Regan, B., Grätzel, M., A Low-Cost, High-Efficiency Solar-Cell Based On Dye-Sensitized Colloidal TiO<sub>2</sub> Films. *Nature*, 353, 737-740, 1991.
- [48] Chang, H., Kao, M.J., Chen, T.L., Chen, C.H., Cho, K.C., Lai, X.R., Characterization of Natural Dye Extracted from Wormwood and Purple Cabbage for Dye-Sensitized Solar Cells, *International Journal of Photoenergy*, 1-8, 2013.

- [49] O'Regan, B., Grätzel, M., Fitzmaurice D., Optical electrochemistry I: steady-state spectroscopy of conduction-band electrons in a metal oxide semiconductor electrode, *Chemical Physics Letters*, 183(1), 89-93, 1991.
- [50] Sastrawan, R., Photovoltaic modules of dye solar cells, Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Fakultät für Mathematik und Physik der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau, 2006.
- [51] Nazeeruddin, M.K., Kay, A., Rodicio, I., Baker, H., Muller, E., Liska, P., Vlachopoulos, N., Grätzel, M., 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 titanium dioxide electrodes, *Journal of the American Chemical Society*, 115(14), 6382-6390, 1993.
- [52] Péchy, P., Rotzinger, F.P., Nazeeruddin, M.K. Kohle, O., Zakeeruddin, Z.M., Baker, R.H., Grätzel M., Preparation of phosphonated polypyridyl ligands to anchor transition-metal complexes on oxide surfaces: application for the conversion of light to electricity with nanocrystalline TiO<sub>2</sub> films, *Journal of the Chemical Society, Chemical Communications*, 1, 65-66, 1995.
- [53] Narayan, M.R., Review: Dye Sensitized Solar Cells Based On Natural Photosensitizers, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 208-215, 2012.
- [54] Wang, Z.S., Kawauchi, H., Kashima, T., Arakawa, H., Significant influence of TiO<sub>2</sub> photoelectrode morphology on the energy conversion efficiency of N719 dye-sensitized solar cell, *Coordination Chemistry Reviews*, 248, 1381-1389, 2004.
- [55] Nazeeruddin, M. K., Pechy, P., Renouard, T., Zakeeruddin, S. M., Baker, R. H., Comte, P., Liska, P., Cevey, L., Costa, E., Shklover, V., Spiccia, L., Deacon, G. B., Bignozzi, C. A., Grätzel, M., Engineering of Efficient Panchromatic Sensitizers for Nanocrystalline TiO<sub>2</sub>-Based Solar Cells, *J. Am. Chem. Soc.*, 123, 1613-1624, 2001.
- [56] Fang, X., Ma, T., Guan, G., Akiyama, M., Abe, E., Performances characteristics of dye-sensitized solar cells based on counter electrodes with Pt films of different thickness *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 164, 179-182, 2004.
- [57] Fanga, X., Maa, T., Akiyama, M., Guana, G., Tsunematsua, S., Abe, E., Flexible counter electrodes based on metal sheet and polymer film for dye-sensitized solar cells, *Thin Solid Films* 472, 242-245, 2005.
- [58] Lee, W.J., Ramasamy, E., Lee, D.Y., Song, J.S., Performance variation of carbon counter electrode based dye-sensitized solar cell. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92, 814-818, 2008.
- [59] Chiba, Y., Islam, A., Watanabe, Y., Komiya, R., Koide, N., Han, L.Y., "Dye-sensitized solar cells with conversion efficiency of 11.1%," *Japanese Journal of Applied Physics*, 45(24-28), L638-L640, 2006.
- [60] Buscaino, R., Baiocchi, C., Barolo, C., et al., "A mass spectrometric analysis of

sensitizer solution used for dye-sensitized solar cell,” *Inorganica Chimica Acta*, 361(3), 798–805, 2008.

- [61] Shanmugam, V., Manoharan, S., Anandan, S., Murugan, R., “Performance of dye-sensitized solar cells fabricated with extracts from fruits of ivy gourd and flowers of red frangipani as sensitizers,” *Spectrochimica Acta A*, 104, 35–40, 2013.
- [62] Campbell, W.M., Burrell, A.K., Officer, D.L., Jolley, K.W., *Coord. Chem. Rev.* 248, 1363-1379, 2004.
- [63] Hara, K., Kurashige, M., Dan-oh, Y., Kasada, C., Shinpo, A., Suga, S., Sayama, K., Arakawa, H., *New J. Chem.*, 27, 783-785, 2003.
- [64] Ito, S., Zakeeruddin, S.M., Humphry-Baker, R., Liska, P., Charvet, R., Comte, P., Nazeeruddin, M.K., Pechy, P., Takata, M., Miura, H., Uchida, S., Grätzel, M., *Adv. Mater.*, 18, 1202-1205, 2006.
- [65] Koumura, N., Wang, Z.S., Mori, S., Miyashita, M., Suzuki, E., Hara, K. J., *Am. Chem. Soc.*, 128, 14256-14257, 2006.
- [66] Campbell, W.M., Jolley, K.W., Wagner, P., Wagner, K., Walsh, P.J., Gordon, K.C., Mende, L.S., Nazeeruddin, M.K., Wang, Q., Grätzel, M., Officer, D.L., Highly Efficient Porphyrin Sensitizers for Dye-Sensitized Solar Cells, *Journal of Physical Chemistry C*, 111(32), 11760-11762, 2007.
- [67] Hara, K., Sato, T., Katoh, R., Furube, A., Ohga, Y., Shinpo, A., Suga, S., Sayama, K., Sugihara, H. Arakawa, H., *J. Phys. Chem., B* 107, 597, 2003.
- [68] Dumbrava, A., Georgescu, A., Badea, G., Enache, I., Orrea, C., Girtu, M.A., Dye-sensitized solar cells based on nanocrystalline TiO<sub>2</sub> and natural pigments. *J. Optoelectron Adv Mater*, 10, 2996–3002, 2008.
- [69] Hao, S., Wu, J., Huang, Y., Lin, J., Natural dyes as photosensitizers for dye sensitized solar cell. *Solar Energy*, 80, 209-214, 2006.
- [70] Green, M.A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W., Dunlop, E.D., *Solar Cell Efficiency Tables (version 45)*, *Progress In Photovoltaics: Research and Applications*, 23, 1–9, 2015.
- [71] Nataraj, N.M., A Comparative Study Of The Photovoltaic (PV) Response Of Anthocyanin Dyes From Different Natural Sources, United States Army Research Laboratory Composites And Hybrid Materials Branch Materials Division, 2012.
- [72] Kay, A., Grätzel, M., “Artificial photosynthesis. 1. Photosensitization of TiO<sub>2</sub> solar cells with chlorophyll derivatives and related natural porphyrins,” *Journal of Physical Chemistry*, 97(23), 6272–6277, 1993.
- [73] Cherepy, N.J., Smestad, G.P., Grätzel, M., Zhang, J.Z., Ultrafast electron injection: implications for a photoelectrochemical cell utilizing an Antosiyanin dye-sensitized TiO<sub>2</sub> nanocrystalline electrode, *The Journal of Physical Chemistry B*, 10(45), 9342-9351, 1997.



- [74] 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.
- [75] Polo, A.S., Iha, N.Y.M., “Blue sensitizers for solar cells: natural dyes from Calafate and Jaboticaba,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90(13), 1936–1944, 2006.
- [76] Wongcharee, K., Meeyoo, V., Chavadej, S., Dye sensitized solar cell using natural dyes extracted from rosella and blue pea flowers. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 91, 566-571, 2007.
- [77] Chang, H., Wu, H.M., Chen, T.L., Huang, K.D., Jwo, C.S., Lo, Y.J., Dye-sensitized solar cell using natural dyes extracted from spinach and ipomoea. *Journal of Alloys and Compounds*, 495, 606–610, 2010.
- [78] Bakowska, A., Kucharska, A.Z., Oszmianski, J., The effects of heating, UV irradiation, and storage on stability of the anthocyanin–polyphenol copigment complex, *Food Chemistry*, 81, 349-355, 2003.
- [79] Hao, S., Wu, J., Fan, L., Huang, Y., Lin, J., Wei, Y., The influence of acid treatment of TiO<sub>2</sub> porous film electrode on photoelectric performance of dye-sensitized solar cell, *Solar Energy*, 76, 745–750, 2004.
- [80] Zhang, D., Lanier, S.M., Downing, J.A., Avent, J.L., Lum, J., McHale, J.L., Betalain pigments for dye-sensitized solar cells. *J. Photochem. Photobiol. A* 195, 72-80, 2008.
- [81] Calogero, G., Marco, G.D., Red Sicilian orange and purple eggplant fruits as natural sensitizers for dye-sensitized solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92, 1341-1346, 2008.
- [82] Li, X., Gao, C., Duan, H., Lu, B., Pan, X., Xie, E., Nanocrystalline TiO<sub>2</sub> film based photoelectrochemical cell as self-powered UV-photodetector, *Nano Energy*, 1, 640–645, 2012.
- [83] Bie, Y.O., Liao, Z.M., Zhang, H.Z., Li, G.R., Ye, Y., Zhou, Y.B., Xu, J., Qin, Z.X., Dai, L. Yu, D.P., Self-Powered, Ultrafast, Visible-Blind UV Detection and Optical Logical Operation based on ZnO/GaN Nanoscale p-n Junctions, *Advanced Materials*, 23, 649–653, 2011.
- [84] Yang, Y., Guo, W., Qi, J., Zhao, J., Zhang, Y., Self-powered ultraviolet photodetector based on a single Sb-doped ZnO nanobelt, *Applied Physics Letters*, 97, 223113, 2010.
- [85] Gao, C., Li, X., Wang, Y., Chen, L., Pan, X., Zhang, Z., Xie, E., Titanium dioxide coated zinc oxide nanostrawberry aggregates for dye-sensitized solar cell and self-powered UV-photodetector, *Journal of Power Sources*, 239, 458-465, 2013.
- [86] Tanabe, N., Dye-Sensitized Solar Cell for Energy Harvesting Applications, *Fujikura Technical Review*, 109-113, 2013.

- [87] Berginc, M., Topic, M., Krasovec, U.O., Recovery of dye sensitized solar cell's performance by heat treatment, Royal Society of Chemistry- Phys. Chem. Chem. Phys., 16, 12940-12948, 2014.
- [88] Matsui, H., Okada, K., Kitamura, T., Tanabe N., Thermal stability of dye sensitized solar cells with current collecting grid, Solar Energy Materials and Solar Cells, 93, 1110-1115, 2009.
- [89] Kim, H.J., Kim, Y.C., Hong, J.T., Kim, M.J., Seo, H.W., Park, J.W., Choi, J.Y., A Study of the Photo-Electric Efficiency of Dye-Sensitized Solar Cells Under Lower Light Intensity, Journal of Electrical Engineering & Technology, 2(4), 513-517, 2007.
- [90] Yahia, I.S., AlFaify, S., Al-ghamdi Attieh, A., Hafez, H.S., El-Bashir, S., Al-Bassam, A., El-Naggar, A.M, Yakuphanoglu, F., Synthesis and characterization of DSSC by using Pt nano-counter electrode: photosensor applications, Appl. Phys. A 122, 569, 2016.
- [91] Bastianini, M., Vivani, R., Nocchetti, M., Costenaro, D., Bisio, C., Oswald, F., Meyer, T.B., Marchese, L., Effect of iodine intercalation in nanosized layered double hydroxides for the preparation of quasi-solid electrolyte in DSSC devices, Solar Energy, 107, 692-699, 2014.
- [92] Lan, J.L., Wei, T.C., Feng, S.P., Wan, C.C., Cao, G., Effects of Iodine Content in the Electrolyte on the Charge Transfer and Power Conversion Efficiency of Dye-Sensitized Solar Cells under Low Light Intensities, The Journal of Physical Chemistry, C 116, 25727-25733, 2012.
- [93] Hoffman, A., Sessler, T., Rosbeck, J., Acton, D., Raytheon Vision Systems, Goleta, California, Martin Ettenberg; Sensors Unlimited, Inc, Megapixel InGaAs Arrays for Low Background Applications, Proc. of SPIE, 5783, 2005.
- [94] Tian, B., Zheng, X., Kempa, T.J., Fang, Y., Yu, N., Yu, G., Huang, J., Lieber, C.M., Coaxial silicon nanowires as solar cells and nanoelectronic power sources, Nature, 449, 885-890, 2007.
- [95] Tian, B., Lieber, C.M., Design, synthesis, and characterization of novel nanowire structures for photovoltaics and intracellular probes, Pure and Applied Chemistry, 83(12), 2153-2169, 2011.
- [96] Li, X., Gao, C., Wang, J., Lu, B., Chen, W., Song, J., Zhang, S., Zhang, Z., Pan, X., Xie, E., TiO<sub>2</sub> films with rich bulk oxygen vacancies prepared by electrospinning for dye-sensitized solar cells, Journal of Power Sources, 214, 244-250, 2012.
- [97] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı resmi sitesi, [http://www.eie.gov.tr/yenilenebilir/g\\_enj\\_tekno.aspx](http://www.eie.gov.tr/yenilenebilir/g_enj_tekno.aspx), son erişim: 15.02.2017
- [98] Report of World Energy Council Turkish National Committee 2009, ISBN: 978-605-89548-2-3
- [99] Pagliaro, M., Palmisano, G., Ciriminna, R., Flexible Solar Cells, Wiley-Vch Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, ISBN: 978-3-527-32375-3, 2008.

- [100] [https://www2.pvlighthouse.com.au/resources/courses/altermatt/The%20Solar%20OSpectrum/The%20global%20standard%20spectrum%20\(AM1-5g\).aspx](https://www2.pvlighthouse.com.au/resources/courses/altermatt/The%20Solar%20OSpectrum/The%20global%20standard%20spectrum%20(AM1-5g).aspx)
- [101] Green, M. A., “Photovoltaics: technology overview”, *Energy Policy* 28, 989-998, 2000.
- [102] Nowak, S. (chairman), Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2013, The International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Technology Collaboration Programme, Trends 2014 in Photovoltaic Applications, 2014.
- [103] Nowak, S. (chairman), Annual Report, The International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Technology Collaboration Programme, 2015.
- [104] Stathatos, E., Dye Sensitized Solar Cells: A New Prospective to the Solar to Electrical Energy Conversion. Issues to be Solved for Efficient Energy Harvesting. *J. of Engin. Sci. and Tech. Review*, 5, no. 4, pp. 9 -13, 2012.
- [105] Bella, F., Polymer electrolytes and perovskites: lights and shadows in photovoltaic devices, *Electrochimica Acta* 175, 151–161, 2015.
- [106] Green, M.A., “Third generation photovoltaics: solar cells for 2020 and beyond”, *Physica E* 14, 65-70, 2002.
- [107] Wenham, S.R., Green, M.A., Watt, M.E., *Applied Photovoltaics*, Centre for PhotoVoltaic Devices and Systems, University of NSW, ISBN 0 86758 909 4, 1996.
- [108] Mauk, M.G., “Silicon solar cells: Physical metallurgy principles,” *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society* 55 (5), 38-42, 2003.
- [109] Wang, H., Hu, Y.H., Graphene as a counter electrode material for dye-sensitized solar cells, *Energy & Environmental Science*, 5, 8182-8188, 2012.
- [110] Kelzenberg, M.D., Daniel, B., Turner, E., Breandan, M., Micheal, G., Morgan, C., Nathan, L., Photovoltaic measurements in single-nanowire silicon solar cells. *Nano Letters*, 8, 710-714, 2008.
- [111] Conway, E.J., Walker, G.H., Hembockel, J.H., A Thermochemical model of radiation damage and annealing applied to GaAs Solar Cells. *Fifteenth IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 1, 38-44, 1981.
- [112] Chu, Y., *Review and Comparison of Different Solar Energy Technologies*, Global Energy Network Institute, 2011.
- [113] Brown, G.F., Wu, J., Third generation photovoltaics, *Laser and Photonics Reviews* 3, No. 4, 394-405, 2009.
- [114] Luque, A., Hegedus, S., *Handbook of photovoltaic science and engineering*. The Netherlands: Elsevier, Chapter 15, p. 663, John Wiley & Sons, 2003.
- [115] Zhao, J. Wang, A. Green, M.A., “24.5% Efficiency Silicon PERT Cells On MCZ Substrates and 24.7% Efficiency PERL Cells On FZ Substrates,” *Progress*

in Photovoltaics, 7, 471-274, 1999.

- [116] Hoffert, M.I., Caldeira, K., Jain, A.K., et al., "Energy implications of future stabilization of atmospheric CO<sub>2</sub> content," *Nature*, vol. 395, no. 6705, pp. 881–884, 1998.
- [117] Jasim, K.E., Aldallal, S., Hassan, A.M., Henna (*Lawsonia inermis* L.) Dye-Sensitized Nanocrystalline Titania Solar Cell, Hindawi Publishing Corporation *Journal of Nanotechnology*, 1-6, 2012.
- [118] [http://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency\\_chart.jpg](http://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency_chart.jpg), son erişim: 13.02.2017
- [119] Matsumoto, Y., Hirata, G., Takakura, H., Okamoto, H., Hamakawa, Y. A new type of high efficiency with a low-cost solar cell having the structure of a  $\mu\text{c-SiC}$ /polycrystalline silicon heterojunction. *Journal of Applied Physics*, 67, 6538-6543, 1990.
- [120] Faccio, R. Fernández-Werner, L. Pardo, H. Mombrú, A.W., Current trends in materials for dye sensitized solar cells. *Recent Patents on Nanotechnology*, 5, 46-61, 2011.
- [121] Mathew, S., Yella, A., Gao, P., Humphry-Baker, R., Curchod, B.F.E., Ashari-Astani, N., Tavernelli, I., Rothlisberger, U., Nazeeruddin, M.K., Grätzel, M., Dye sensitized solar cells with 13% efficiency achieved through the molecular engineering of porphyrin sensitizers, *Nat. Chem.* 6, 242, 2014.
- [122] Hagfeldt, A., Boschloo, G., Sun, L., Kloo, L., Pettersson, H., Dye-sensitized solar cells, *Chem. Rev.* 110, 6595, 2010.
- [123] Kato, N., Takeda, Y., Higuchi, K., Takeichi, A., Sudo, E., Tanaka, H., Motohiro, T., Sano, T., Toyoda, T., Degradation Analysis of Dye-Sensitized Solar Cell Module After Long-Term Stability Test under Outdoor Working Condition, *17th International PhotoVoltaic Science and Engineering Conference*, 3-7 December 2007, Fukuoka, Japan.
- [124] Tobin, L. L., O'Reilly, T., Zerulla, D., Sheridan, J. T., Characterising dye-sensitised solar cells, *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 122 (14), 1225-1230, 2011.
- [125] Lan, J.L., Wei, T.C., Feng, S.P., Wan, C.C., Cao, G., Effects of Iodine Content in the Electrolyte on the Charge Transfer and Power Conversion Efficiency of Dye-Sensitized Solar Cells under Low Light Intensities, *The Journal of Physical Chemistry C*, 116, 25727–25733, 2012.
- [126] Halls, J.J.M., Pichler, K., Friend, R.H., Moratti, S.C., Holmes, A.B., "Exciton diffusion and dissociation in a PPV/C60 heterojunction photovoltaic cell", *Applied Physics Letters*, 68, 3120-3122, 1996.
- [127] Lee, C. P., Chen P. Y., Ho, K. C., Ionic Liquid Based Electrolytes for Dye-Sensitize Solar Cells, *Ionic Liquids: Theory, Properties, New Approaches*, Prof. Alexander Kokorin (Ed.), ISBN: 978-953-307-349-1, 2011.

- [128] Hug, H., Bader, M., Mair, P., Glatzel, T., Biophotovoltaics: Natural pigments in dye-sensitized solar cells, *Applied Energy* 115, 216-225, 2014.
- [129] Wenger, B., Grätzel, M., Moser, J.E., “Rationale for kinetic heterogeneity of ultrafast light-induced electron transfer from Ru(II) complex sensitizers to nanocrystalline TiO<sub>2</sub>,” *Journal of the American Chemical Society*, 127(35), 12150-12151, 2005.
- [130] Haque, S.A., Tachibana, Y., Klug, D.R., Durrant, J.R., “Charge recombination kinetics in dye-sensitized nanocrystalline titanium dioxide films under externally applied bias,” *Journal of Physical Chemistry B*, 102(10), 1745-1749, 1998.
- [131] Bisquert, J., Zaban, A., Greenshtein, M., Mora-Sero, I., “Determination of rate constants for charge transfer and the distribution of semiconductor and electrolyte electronic energy levels in dye-sensitized solar cells by open-circuit photovoltage decay method,” *Journal of the American Chemical Society*, 126(41), 13550–13559, 2004.
- [132] Ito, S., Liska, P., Comte, P., et al., “Control of dark current in photoelectrochemical (TiO<sub>2</sub>/I<sup>-</sup>/I<sup>3-</sup>) and dye-sensitized solar cells,” *Chemical Communications*, 34, 4351–4353, 2005.
- [133] Ito, S., Murakami, T.N., Comte, P., et al., “Fabrication of thin film dye sensitized solar cells with solar to electric power conversion efficiency over 10%,” *Thin Solid Films*, 516(14), 4613–4619, 2008.
- [134] Ito, S., Ha, N.L.C., Rothenberger, G., et al., “High-efficiency (7.2%) flexible dye-sensitized solar cells with Ti-metal substrate for nanocrystalline-TiO<sub>2</sub> photoanode,” *Chemical Communications*, 38, 4004–4006, 2006.
- [135] Ito, S., Nazeeruddin, M.K., Zakeeruddin, S.M., Pechy, P., Comte, P., Grätzel, M., Mizuno, T., Tanaka, A., Koyanagi, T., Study of Dye-Sensitized Solar Cells by Scanning Electron Micrograph Observation and Thickness Optimization of Porous TiO<sub>2</sub> Electrodes, *International Journal of Photoenergy*, 1-8, 2009.
- [136] Granqvist, C.G., Transparent conductors as solar energy materials: A panoramic review, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 91, 1529-159, 2007.
- [137] Chebotareva, A.B., Untila, G.G., Kost, T.N., Jorgensen, S., Ulyashin, A.G., ITO deposited by pyrosol for photovoltaic applications, *Thin Solid Films*, 515, 8505–8510, 2007.
- [138] Wu, C., Adsorption of reactive dye onto carbon nanotubes: Equilibrium, kinetics and thermodynamics, *Journal of Hazardous Materials*, 144, 93-100, 2007.
- [139] Pietron, J.J., Stux A.M., Compton R.S., Rolison D.R., Dye-sensitized titania aerogels as photovoltaic electrodes for electrochemical solar cell, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 91,1066-1074, 2007.
- [140] Yang, R. Y., Chen, H. Y., Lai, Performance Degradation of Dye-Sensitized Solar Cells Induced by Electrolytes, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2012, 1-4, 2012.

- [141] Elangovan, E., Ramamurthi, K., A study on low cost-high conducting fluorine and antimony-doped tin oxide thin films, *Applied Surface Science*, 249, 183-196, 2005.
- [142] Ngamsinlapasathian, S., Sreethawong, T., Suzuki, Y., Yoshikawa, S., Doubled layered ITO/SnO<sub>2</sub> conducting glass for substrate of dye-sensitized solar cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90, 2129-2140, 2006.
- [143] Kawashima, T., Ezure, T., Okada, K., Matsui, H., Goto K., Tanabe, N., FTO/ITO double-layered transparent conductive oxide for dye-sensitized solar cells, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 164, 199-202, 2004.
- [144] Taya, S.A., El-Agez, T.M., El-Ghamri, H.S., Abdel-latif, M.S., Dye-sensitized solar cells using fresh and dried natural dyes. *Int. J. Mater Sci. Appl.* 2, 37-42, 2013.
- [145] Hagfeldt, A., Grätzel, M., Light-Induced Redox Reactions in Nanocrystalline Systems, *Chemical Reviews*, 95(1), 49-68, 1995.
- [146] Halls, J.J.M., Pichler, K., Friend, R.H., Moratti, S.C., Holmes, A.B., "Exciton diffusion and dissociation in a PPV/C60 heterojunction photovoltaic cell", *Applied Physics Letters*, 68, 3120-3122, 1996.
- [147] Lee, J.K., Jeong, B.H., Jang, S., Kim, Y.G., Jang, Y.W., Lee, S.B., Kim, M.R., Preparations of TiO<sub>2</sub> pastes and its application to light-scattering layer for dye-sensitized solar cells, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 15, 724-729, 2009.
- [148] Guo, Q., Zhou, C.Y., Ma, Z.B., Ren, Z.F., Fan, H.J., Yang, X.M., Fundamental Processes in Surface Photocatalysis On TiO<sub>2</sub>, *Acta Phys.-Chim. Sin.*, 32(1), 28-47, 2016.
- [149] Odobel, F., Blart, E., Lagrée, M., Porphyrin Dyes For TiO<sub>2</sub> Sensitization, *J. Mat. Chem.*, 13, 3, 502-510, 2003.
- [150] Nazeeruddin, M.K., Humphry-Baker, R., Grätzel, M., Würle, D., Schnurpfeil, G., Schneider, G., Hirth, A., Trombach, N., Efficient Near-IR Sensitization Of Nanocrystalline TiO<sub>2</sub> Films By Zinc And Aluminum Phthalocyanines, *Journal Of Porphyrins And Phthalocyanines*, 3, 230-237, 1999.
- [151] He, J., Hagfeldt, A., Lindquist, S.E., Phthalocyanine-Sensitized Nanostructured TiO<sub>2</sub> Electrodes Prepared by a Novel Anchoring Method, *Langmuir*, 17, 2743-2747, 2001.
- [152] Islam, A., Sugihara, H., Hara, K., Singh, L.P., Katoh, R., Yanagida, M., Takahashi, Y., Murata, S., Arakawa, H., Dye Sensitization of Nanocrystalline Titanium Dioxide with Square Planar Platinum(II) Diimine Dithiolate Complexes *Inorganic Chemistry*, 40(2)1, 5371-5380, 2001.
- [153] Rehm, J.M., McLendon, G.L., Nagasawa, Y., Yoshihara, K., Moser, J., Grätzel, M., Femtosecond Electron-Transfer Dynamics at a Sensitizing Dye-Semiconductor (TiO<sub>2</sub>) Interface, *J. Phys. Chem.*, 100, 23, 9577-9588, 1996.

- [154] Hernandez-Martinez A.R., Vargas S, Estevez M, Rodriguez R. Natural pigment based dye-sensitized solarcells, *Journal of Applied Research and Technology*, 10(1), 38-47, 2012.
- [155] Wang, P., Klein, C., Humphry-Baker, R., Zakeeruddin S.H., Grätzel, M.A., "High Molar extinction coefficient sensitizer for stable dye-sensitized Solar Cells," *J. Am. Chem. Soc.*, 127, 808-809, 2005.
- [156] Altobello, S., Argazzi, R., Caramori, S., Contado, C., Da Fre, S., Rubino, P., Chone, C., Larramona G., Bignozzi, C.A., "Sensitization of nanocrystalline TiO<sub>2</sub> with black absorbers based on os and Ru polypyridine complexes," *J. Am. Chem. Soc.*, 127, 15342-15343, 2005.
- [157] Ünver, E., Karanfil, G., Akın, S., Sönmezoğlu, S., *Boya Duyarlı Güneş Pilleri, Trakya Univ J Sci*, 14(1), 31-58, 2013.
- [158] Green, Ma., *Solar Cells, Operating Principles, Technology, And System Applications*, Englewood Cliffs, Nj: Prentice-Hall, 1982.
- [159] Hagfeldt, A., Grätzel, M., *Molecular Photovoltaics. Acc. Chem. Res.* 33, 269–277, 2000.
- [160] Calogero, G., Yum, J.H., Sinopoli, A., Marco, G.D., Grätzel, M., Nazeeruddin, M.K., *Anthocyanins and betalains as light-harvesting pigments for dyesensitized solar cells. Solar Energy*, 86, 1563-1575, 2012.
- [161] Robertson, N., *Optimizing Dyes For Dye-Sensitized Solar Cells, Angew. Chem. Int. Ed.* 45, 2338 – 2345, 2006.
- [162] NT., M. R., *Pigments for Generating Electric Power - An Overview, Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences* 6,1, 691-698, 2015.
- [163] Maurya, I.C., Srivastava, P., Bahadur, L., *Dye sensitized solar cell using extract from petals of male flowers Luffa cylindrica L. as a natural sensitizer, Optical Materials* 52, 150-156, 2016.
- [164] Espinosa, R., Zumeta, I., Santana, J.L., Martinez-Luzardo, F., Gonzalez, B., Docteur, S., Vigil, E., *Nanocrystalline TiO<sub>2</sub> photosensitized with natural polymers with enhanced efficiency from 400 to 600nm. Sol. Energ. Mat. Sol. Cells*, 85, 359-369, 2005.
- [165] Kumara, G.R.A., Kaneko, S., Okuya, M., Onwona-Agyeman, B., Konno, A., Tennakone, K., "Shiso leaf pigments for dyesensitized solid-state solar cell," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90(9), 1220–1226, 2006.
- [166] Shahid, M., Islam, S., Mohammad, F., *Recent advancements in natural dye applications: a review, Journal of Cleaner Production*, 53, 310-331, 2013.
- [167] Dumbrava, A., Enache, I., Oprea, C.I., Georgescu, A., Girtu, M.A., *Toward a more efficient utilisation of betalains as pigments for dye-sensitized solar cells, Dig. J. Nanomater. Biostruct.* 7, 339-351, 2012.

- [168] Sirimanne, P.M., Senevirathna, M.K.I., Premalal, E.V.A., Pitigala, P.K.D.D.P., Sivakumar, V., Tennakone, K., Utilization of natural pigment extracted from pomegranate fruits as sensitizer in solid-state solar cells. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 177, 324–327, 2006.
- [169] Fernando, J.M.R.C., Senadeera, G.K.R., Natural anthocyanins as photosensitizers for dye-sensitized solar devices. *Current Science.*, 95, 663-666, 2008.
- [170] Zhu, H., Zeng, H., Subramanian, V., Masarapu, C., Hunga, K.H., Wei, B., Anthocyanin-sensitized solar cells using carbon nanotube films as counter electrodes, *Nanotechnology*, 19, 465204-465208, 2008.
- [171] Senthil, T.S., Muthukumarasamy, N., Velauthapillai, D., Agilan, S., Thambidurai, M., Balasundaraprabhu, R., Natural dye (cyanidin 3-O-glucoside) sensitized nanocrystalline TiO<sub>2</sub> solar cell fabricated using liquid electrolyte/quasi-solidstate polymer electrolyte, *Renewable Energy*, 36, 2484-2488, 2011.
- [172] Wang, X.F., Zhan, C.H., Maoka, T., Wada, Y., Koyama, Y., Fabrication of dye-sensitized solar cells using chlorophylls c1 and c2 and their oxidized forms c1 and c2 from *Undaria pinnatifida* (Wakame), *Chemical Physics Letters*, 447, 79–85, (2007).
- [173] Chang, H., Lo, Y.J., Pomegranate leaves and mulberry fruit as natural sensitizers for dye-sensitized solar cells, *Solar Energy* 84,1833–1837, 2010.
- [174] Calogero, G., Marco, G.D., Caramori, S., Cazzanti, S., Argazzi, R., Bignozzi, C.A., Natural dye sensitizers for photoelectrochemical cells. *Energy and Environmental Science*, 2, 1162–1172, 2009.
- [175] Yamazaki, E., Murayama, M., Nishikawa, N., Hashimoto, N., Shoyama, M., Kurita, O., Utilization of natural carotenoids as photosensitizers for dye-sensitized solar cells. *Sol. Energ.*, 81, 512-516, 2007.
- [176] Agarkar, S.A., Kulkarni, R.R., Dhas, V.V., Chinchansure, A.A., Hazra, P., Joshi, S.P., Ogale, S.B., Isobutrin from *Butea monosperma* (flame of the forest): a promising new natural sensitizer belonging to chalcone class. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 3, 2440-2444, 2011.
- [177] Ito, S., Saitou, T., Imahori, H., Uehara, H., Hasegawa, N., Fabrication of dye sensitized solar cells using natural dye for food pigment: *Monascus yellow*. *Energy Environ. Sci.*, 3, 905-909, 2010.
- [178] Zhou, H., Wu, L., Gao, Y., Ma, T., Dye-sensitized solar cells using 20 natural dyes as sensitizers. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 219, 188-194, 2011.
- [179] Tennakone, K., Kumarasinghe, A.R., Kumara, G.R.R.A., Wijayantha, K.G.U., Sirimanne, P.M., Nanoporous TiO<sub>2</sub> photoanode sensitized with the flower pigment cyanidin. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 108, 193-195, 1997.



- [180] Dai, Q., Rabani, J., Photosensitization of nanocrystalline TiO<sub>2</sub> films by anthocyanin dyes, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 148, 17-24, 2002.
- [181] Gao, F.G. Bard, A.J. Kispert, L.D. Photocurrent generated on a carotenoid-sensitized TiO<sub>2</sub> nanocrystalline mesoporous electrode, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 130, 49-56, 2000.
- [182] Heera, T.R., Cindrella, L., Molecular orbital evaluation of charge flow Dynamics in natural pigments based photosensitizers. *J. Mol Model*, 16, 523–533, 2010.
- [184] Oboh, G., Ogunsuyi, O. B., Ogunbadejo, M. D., Adefegha, S. A., Influence Of Gallic Acid On A-Amylase And A-Glucosidase Inhibitory Properties Of Acarbose, *J. Food Drug Anal.*, 24, 627-663, 2016.
- [185] Tennakone, K., Kumara, G.R.R.A., Kumarasinghe, A.R., Sirimanne, P.M., Wijayantha, K.G.U., Efficient Photosensitization Of Nanocrystalline TiO<sub>2</sub> Films By Tannins And Related Phenolic Substances, *J. Photochem. Photobiol. A Chem.* 94, 217-220, 1996.
- [186] Araujo, P. Z., Morando, P. J., Blesa, M. A., Interacition of Catechol And Gallic Acid With Titanium Dioxide In Aqueous Suspensions. 1. Equilibrium studies, *Langmuir*, 21, 3470-3474, 2005.
- [187] Suzuki, K., Yamaguchi, M., Kumagai, M., Yanagida, S., Application of Carbon Nanotubes to Counter Electrodes of Dye-sensitized Solar Cells. *Chemistry Letter.* 32, 28, 2003.
- [188] Nwanya, A.C., Ezema, F.I., Ejikeme, P.M., Dyed sensitized solar cells: A technically and economically alternative concept to p-n junction photovoltaic devices. *International Journal of the Physical Sciences*, 6, 2011.
- [189] Baik, C., Kim, D., Kang, M.S., Kang, S.O., Ko, J., Nazeeruddin, MK., Grätzel, M. Organic dyes with a novel anchoring group for dye-sensitized solar cell applications. *J. Photochem. Photobiol. A: Chemistry*, 201, 168-174, 2009.
- [190] Wu, J., Lan, Z., Hao, S., Li, P., Lin, J., Huang, M., Progress on the electrolytes for dyesensitized solar cells. *Pure and Applied Chemistry.* 80, 2241-2258, 2008.
- [191] Kuang, D., Klein, C., Snaith, H.J., Humphry-Baker, R., Zakeeruddin, S.M., Grätzel, M., A new ion-coordinating ruthenium sensitizer for mesoscopic dyesensitized solar cells. *Inorganica Chimica Acta.* 361, 699-706, 2008.
- [192] Cameron, P.J., Peter, L.M., Zakeeruddin, S.M., Grätze, M., Electrochemical studies of the Co(III)/Co(II)(dbbip)<sub>2</sub> redox couple as a mediator for dye-sensitized nanocrystalline solar cells. *Coordination Chem. Rev.*, 248: 1447–1453, 2004.
- [193] Bücher, K., Kleiss, G., Batzner, D., Photovoltaic Modules in Buildings: Performance and Safety *Renewable Energy*, 15, 545-551, 1998.
- [194] Xie, Y., Wei, L., Wei, G., Li, Q., Wang, D., Chen, Yan, S., Liu, G., Mei, L.,

- Jiao, J., "A self-powered UV photodetector based on TiO<sub>2</sub> nanorod arrays", *Nanoscale research letters* 8.1, 188, 2013.
- [195] Jayaweera, P. V. V., Perera, A. G. U., Senevirathna, M. K. I., Pitigala, P. K. D. D. P., Tennakone, K., Dye-Sensitized Near-Infrared Room-Temperature Photovoltaic Photon Detectors, *Applied Physics Letters*, Vol. 85, No. 23, 5754-5756, 2004.
- [196] Alivov, Y.I., Özgür, U., Doğan, S., Johnstone, D., Avrutin, V., Onojima, N., Liu, C., Xie, J., Fan, Q., Morkoc, H., Photoresponse of n-ZnO/p-SiC Heterojunction Diodes Grown By Plasma-Assisted Molecular-Beam Epitaxy, *Appl Phys Lett*, 86:241108, 2005.
- [197] Chang, K.H., Sheu, J.K., Lee, M.L., Tu, S.J., Yang, C.C., Kuo, H.S., Yang, J.H., Lai, W.C., Inverted Al<sub>0.25</sub>Ga<sub>0.75</sub>N/GaN Ultraviolet p-i-n Photodiodes Formed on p-GaN Template Layer Grown by Metalorganic Vapor Phase Epitaxy, *Appl Phys Lett*, 97:013502, 2010.
- [198] Liang, S., Sheng, H., Liu, Y., Huo, Z., Lu, Y., Shen, H., ZnO Schottky Ultraviolet Photodetectors, *J Cryst Growth*, 225:110, 2001.
- [199] Cheng, G., Wu, X.H., Liu, B., Li, B., Zhang, X.T., ZnO Nanowire Schottky Barrier Ultraviolet Photodetector With High Sensitivity And Fast Recovery Speed, *Appl Phys Lett*, 99:203105, 2011.
- [200] Endo, H., Sugibuchi, M., Takahashi, K., Goto, S., Sugimura, S., Hane, K., Kashiwaba, Y., Schottky Ultraviolet Photodiode Using A ZnO Hydrothermally Grown Single Crystal Substrate, *Appl Phys Lett*, 90:121906, 2007.
- [201] Xue, H.L., Kong, X.Z., Liu, Z.R., Liu, C.X., Zhou, J.R., Chen, W.Y., TiO<sub>2</sub> Based Metal-Semiconductor-Metal Ultraviolet Photodetectors, *Appl Phys Lett*, 90:201118, 2007.
- [202] Chen, C.H., Tsai, C.M., Cheng, C.F., Yen, S.F., Su, P.Y., Tsai, Y.H., Tsai, C.N., GaN-Based Metal-Insulator-Semiconductor Ultraviolet Photodetectors With CSF Current-Suppressing Layer, *Jpn J Appl Phys*, 51, 2012.
- [203] Xu, S., Qin, Y., Xu C., Wei, Y.G., Yang, R.S., Wang, Z.L., Self-powered Nanowire Devices, *Nat Nanotechnol*, 5:366, 2010.
- [204] Yang, Y., Guo, W., Qi, J.J., Zhao, J., Zhang, Y., Self-powered ultraviolet photodetector based on a single Sb-doped ZnO nanobelt, *Appl Phys Lett*, 97,223113, 2010.
- [205] Bai, Z.M., Yan, X.Q., Chen, X., Liu, H.S., Shen, Y.W., Zhang, Y., ZnO Nanowire Array Ultraviolet Photodetectors With Self-Powered Properties, *Current Applied Physics*, 13:165, 2013.
- [206] Vigil, E., Peter, L. M., Forcade, F., Jennings, J. R., González, B., Wang, H., Dunn, H. An Ultraviolet Selective Photodetector Based On A Nanocrystalline TiO<sub>2</sub> Photoelectrochemical Cell, *Sensors and Actuators A: Physical*, 171(2), 87-92, 2011.

- [207] Zhang, H., Jenatsch, S., De Jonghe, J., Nüesch, F., Steim, R., Véron, A. C., Hany, R., Transparent Organic Photodetector Using A Near-Infrared Absorbing Cyanine Dye, *Scientific Reports*, 5, 9439, 2015.
- [208] Osedach, T. P., Iacchetti, A., Lunt, R. R., Andrew, T. L., Brown, P. R., Akselrod, G. M., Bulović, V., Near-Infrared Photodetector Consisting Of J-Aggregating Cyanine Dye And Metal Oxide Thin Films, *Applied Physics Letters*, 101(11), 113303, 2012.
- [209] Nazeeruddin, M. K., Zakeeruddin, S.M., Lagref, J.J., Liska, P., Comte, P., Barolo, C., Viscardi, G., Schenk, K., Grätzel, M., Stepwise Assembly of Amphiphilic Ruthenium Sensitizers And Their Applications In Dye-Sensitized Solar Cell, *Coordination Chemistry Reviews*, 248, 1317-1328, 2004.
- [210] Özerden, E., Metal/Organik/İnorganik Yarıiletken Yapıların Sıcaklığa Bağlı Olarak Elektriksel Ve Optik Parametrelerinin Belirlenmesi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Doktora Tezi, 2014.
- [211] Binning, G., Quate, C. F., Atomic Force Microscope, *Physical Review Letters*, 56, 9, 930-933, 1986.
- [212] Lee, W., Lee, H., Lee, G., Yoon, D. S. Advances in AFM Imaging Applications for Characterizing the Biophysical Properties of Amyloid Fibrils, 2016.
- [213] Hussain, S. Z., Maqbool, K., GC-MS: Principle, Technique and its application in Food Science, *J. CURR Science*, 13, 116-126, 2014)
- [214] Sneddon, J., Masuram, S., Richert, J. C. Gas Chromatography-Mass Spectrometry-Basic Principles, Instrumentation and Selected Applications for Detection of Organic Compounds, *Analytical letters*, 40(6), 1003-1012, 2007.
- [215] Halme, B. J., Vahermaa, P., Miettunen, K., Lund, P., Device Physics of Dye Solar Cells, *Advanced Energy Materials* 22, 22910-22934, 2010.
- [216] Sarker, S., Seo, H. W., Kim, D. M. Calculating Current Density-Voltage Curves Of Dye-Sensitized Solar Cells: A Straight-Forward Approach, *Journal of Power Sources*, 248, 739-744, 2014.
- [217] Cheknane, A., Hilal, H. S., Djeflal, F., Benyoucef, B., Charles, J. P., An Equivalent Circuit Approach To Organic Solar Cell Modelling, *Microelectronics Journal*, 39 (10), 1173-1180, 2008.
- [218] Hashmi, S. G., Towards metal free counter electrodes for dye-sensitized solar cells, Aalto University publication series, Doctoral Dissertations, 2014.
- [219] Han, L., Koide, N., Chiba, Y., Islam, A., Mitate, T. Modeling of an Equivalent Circuit For Dye-Sensitized Solar Cells: Improvement Of Efficiency Of Dye-Sensitized Solar Cells By Reducing Internal Resistance, *Comptes Rendus Chimie*, 9 (5), 645-651, 2006.
- [220] Kyaw, H. H., Bora, T., Dutta, J., One-diode Model Equivalent Circuit Analysis For ZnO Nanorod-Based Dye-Sensitized Solar Cells: Effects Of Annealing And Active Area, *IEEE Transactions On Nanotechnology*, 11(4), 763-768, 2012.

- [221] Abdel-Latif, M. S., Abuiriban, M. B., Dahoudi, N. A., Al-Kahlout, A. M., Taya, S. A., El-Agez, T. M., El-Ghamri, H. S., Dye-Sensitized Solar Cells Using Fifteen Natural Dyes As Sensitizers Of Nanocrystalline TiO<sub>2</sub>, *Sci. Technol. Dev*, 34(3), 135-139, 2015.
- [222] Yang, R. Y., Chen, H. Y., & Lai, F. D., Performance degradation of dye-sensitized solar cells induced by electrolytes, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2012.
- [223] Hashmi, S. G., Towards metal free counter electrodes for dye-sensitized solar cells, Aalto University publication series, Doctoral Dissertations, 2014.
- [224] Chan, D.S.H., Phang, J.C.H., Analytical Methods For The Extraction Of Solar-Cell Single- And Double-Diode Model Parameters From I-V Characteristics, *IEEE T. Electron De.*, 34, 268-293, 1987.
- [225] J. V. Upensky, *Theory of Equations*. New York: Mc Graw-Hill, 1948.
- [226] Wang, X., Karanjit, S., Zhang, L., Fong, H., Qiao, Q., Zhu, Z., Transient Photocurrent And Photovoltage Studies On Charge Transport In Dye Sensitized Solar Cells Made From The Composites Of TiO<sub>2</sub> Nanofibers And Nanoparticles, *Applied Physics Letters*, 98 (8), 082114, 2011.
- [227] Adefegha, S. A., Oboh, G., Ejakpovi, I. I., Oyeleye, S. I., Antioxidant and Antidiabetic Effects Of Gallic And Protocatechuic Acids: A Structure–Function Perspective, *Comp. Clin. Pathol.* 24, 1579-1585, 2015.
- [228] Saadaoui, S., Torchani, A., Youssef, M. A. B., Gharbi, R., Fabrication, Modeling And Electrical Characterization Of natural Dye Sensitized Solar Cell Under Different Thermalstress Conditions, *Optik* 127, 10058-10067, 2016.
- [229] Kyaw, H. H., Bora, T. , Dutta, J., One-diode Model Equivalent Circuit Analysis for ZnO Nanorod-Based Dye-Sensitized Solar Cells: Effects Of Annealing And Active Area, *IEEE Trans. Nanotechnol.* 11, 763-768, 2012.
- [230] Silverstein, R. M., Bassler, G. C., Morrill, T. C., *Spectrometric Identification of Organic Compounds*, 5th ed. John Wiley & Sons Inc., New York, p.110, 1991.
- [231] Quill, J., Fedor, G., Brennan, P., Everett, E., Quantifying the Indoor Light Environment Testing for Light Stability in Retail & Residential Environments, *Technical Bulletin of Q-Lab Corporation-LX-5026*, 2007.
- [232] Gonzalez, M. C., Carroll, J. J., Solar Cells Efficiency variations with varying atmospheric conditions, *Solar Energy*, vol. 53, no. 5, pp. 395-402, 1994.
- [233] Zhu, H., Zeng, H., Subramanian, V., Masarapu, C., Hunga, K.H., Wei, B., Antosyanin-Sensitized Solar Cells Using Carbon Nanotube Films As Counter Electrodes 19, 465204-465208, 2008.
- [234] Luo, P., Niu, H., Zheng, G., Bai, X., Zhang, M., Wang, W., From Salmon Pink to Blue Natural Sensitizers For Solar Cells: *Canna indica L.*, *Salvia Splendens*, *Cowberry* And *Solanum Nigrum L.* *Spectrochim. Acta A* 74, 936-942, 2009.

- [235] Patrocínio, A.O.T., Mizoguchi, S.K., Paterno, L.G., Garcia, C.G., Iha, N.Y.M., Efficient and Low Cost Devices For Solar Energy Conversion: Efficiency And Stability Of Some Natural-Dye-Sensitized Solar Cells. *Synth. Met.* 159, 2342-2344, 2009.
- [236] Riyaz A.M.A, Nayan N. Fabrication and Analysis Of Dye-Sensitized Solar Cell Using Natural Dye Extracted From Dragon Fruit, *International Journal of Integrated Engineering*, 2: 55-62, 2010;.
- [237] Calogero, G., Marco, G.D., Cazzanti, S., Caramori, S., Argazzi, R., Carlo, A.D., Bignozzi, C.A., Efficient Dye-Sensitized Solar Cells Using Red Turnip And Purple Wild Sicilian Prickly Pear Fruits, *Int. J. Mol. Sci.* 11, 254-267, 2010.
- [238] Thambidurai, M., Muthukumarasamy, N., Velauthapillai, D., Arul, N.S., Agilan, S., Balasundaraprabhu, R., Dye-sensitized ZnO Nanorod Based Photoelectrochemical Solar Cells With Natural Dyes Extracted From *Ixora Coccinea*, Mulberry And Beetroot, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, 22, 1662-1666, 2011.
- [239] Jasim, K.E., Aldallal, S., Hassan, A.M., Natural Dye-Sensitized Photovoltaic Cell Based On Nanoporous TiO<sub>2</sub>, *Int J. Nanopart*, 4, 359-682, 2011.
- [240] Alhamed, M., Issa, A.S., Doubal, A.W., Studying of Natural Dyes Properties as Photo-Sensitizer For Dye Sensitized Solar Cells (DSSC). *J. Electron Devices*, 16, 1370-1383, 2012.
- [241] Nishantha, M.R., Yapa, Y.P.Y.P., Perera V.P.S., Sensitization of Photoelectrochemical Solar Cells With A Natural Dye Extracted From *Kopsia Flavida* Fruit, *Proc Tech Sessions*, 28: 54-58, 2012.
- [242] Shanmugam, V., Manoharan, S., Anandan, S., Murugan, R., Performance of dye-sensitized solar cells fabricated with extracts from fruits of ivy gourd and flowers of red frangipani as sensitizers. *Spectrochim. Acta A* 104, 35-40, 2013.
- [243] Boyo, A.O., Abdulsalami, I.O, Oluwa, T., Oluwole, S.O., Umar, A., Development of Dye Sensitized Solar Cells Using Botuje Gren Leaves (*Jathopa curcas linn*), *Sci J Phys* 182, 4, 2013.
- [244] Kumara, N.T.R.N., Ekanayake, P., Lim, A., Liew, L.Y.C., Iskandar, M., Ming, L.C., et al., Layered Co-Sensitization For Enhancement Of Conversion Efficiency Of Natural Dye Sensitized Solar Cells, *J Alloys Compd*, 581:186-191, 2013.
- [245] Monzir, S. A. L., Mahmoud, B. A., Dahoudi, N. A., Kahlout, A. M. A. , Taya, S. A., El-Agez T. M., Hatem, S. E.G., Dye-Sensitized Solar Cells Using Fifteen Natural Dyes as Sensitizers of Science, Technology and Development 34 (3): 135-139, 2015
- [246] Grünwald, R., Tributsch, H., Mechanisms of Instability in Ru-Based Dye Sensitized Solar Cells. *J Phys Chem*, 101:2564-2575, 1997.
- [247] Lai, W.H., Su, Y.H., Teoh, L.G., Hon, M.H., Commercial and Natural Dyes As Photosensitizers For A Water-Based Dye-Sensitized Solar Cell Loaded With

Gold Nanoparticles, *J. Photochem. Photobiol. A: Chem*, 195, 307-313, 2008.










- [248] Narayan, M., Raturi, A., Investigation of Some Common Fijian Flower Dyes As Photosensitizers For Dye Sensitized Solar Cells Abstract, *Applied Solar Energy*, Vol. 47, No. 2, pp. 112-117, 2011.
- [249] Hemalatha, K.V., Karthick, S.N., Justin, R.C., Hong, N.Y., Kim, S.K., Kim, H.J., Performance of *Kerria Japonica* And *Rosa Chinensis* Flower Dyes As Sensitizers For Dye-Sensitized Solar Cells, *Spectrochim Acta, PartA: Mol Biomol Spectrosc*, 96: 305–309, 2012.
- [250] Moustafa, K.F., Rekaby, M., El Shenawy, E.T., Khattab, N.M., Green Dyes As Photosensitizers For Dye-Sensitized Solar Cells., *J Appl Sci Res*, 84393-84404, 2012.
- [251] Park, K.H., Kim, T.Y., Park, J.Y., Jin, E.M., Yim, S.H., Fisher, J.G., Lee, J.W., Photochemical Properties Of Dye-Sensitized Solar Cell Using Mixed Natural Dyes Extracted From *Gardenia Jasminoide* Ellis, *J. Electroanal. Chem.* 689, 21-25, 2013.
- [252] Godibo, D. J., Anshebo, S. T., Anshebo, T.Y., Dye Sensitized Solar Cells Using Natural Pigments from Five Plants and Quasi-Solid State Electrolyte, *J. Braz. Chem. Soc.*, Vol. 26, No. 1, 92-101, 2015.
- [253] Suhaimi, S., Shahimin, M.M., Alahmed, Z.A., Chysky, J., Reshak, A.H., Materials for Enhanced Dye-Sensitized Solar Cell Performance: Electrochemical Application. *Int J Electrochem Sci*;10, 2859-2871, 2015.
- [254] Maabong, K., Muiva, C. M., Monowe, P., Sathiaraj, T. S., Hopkins, M., Nguyen, L., Malungwa, K., Thobega, M., Natural Pigments as Photosensitizers for Dye-Sensitized Solar Cells with TiO<sub>2</sub> Thin Films, *International Journal Of Renewable Energy Research*, Vol.5, No.1, 54-60, 2015.
- [255] Furukawa, S., Iino, H., Iwamoto, T., Kukita, K., Yamauchi, S., Characteristics of Dye-Sensitized Solar Cells Using Natural Dye, *Thin Solid Films* 518, 526-529, 2009.
- [256] Aduloju, K.A., Mohamed, B.S., Simiyu, J., Effect of Extracting Solvents On The Stability And Performances Of Dye-Sensitized Solar Cell Prepared Using Extract From *Lawsonia Inermis*, *Fundam J Mod Phys*, 1:261-268, 2011.
- [257] Jasim, K.E., Natural Dye-Sensitized Solar Cell Based On Nanocrystalline TiO<sub>2</sub>. *Sains Malaysiana*, 41,1011-1016, 2012.
- [258] Daoyong, Y., Guoliang, Z., Shuang, L., Baosheng, G., Huang, F., Photocurrent Activity Of Light-Harvesting Complex II Isolated From Spinach And its Pigments in Dye Sensitized TiO<sub>2</sub> Solar Cell, *Int J Hydrogen Energy* 38, 16740-16748, 2013.
- [259] Tekerek, S., Kudret, A., Alver, U., Dye-Sensitized Solar Cells Fabricated With Black Raspberry, Black Carrot And Rosella Juice. *Indian J Phys*,85, 1469-1476, 2011.

- [260] Sandquist, C., Mc Hale, J.L., Improved Efficiency Of Betanin-Based Dye-Sensitized Solar Cells, *J. Photochem. Photobiol. A: Chem*, 221, 90-97, 2011.
- [261] Oprea, C.I., Dumbrava, A., Enache, I., Georgescu, A., Girtu, M. A., A Combined Experimental And Theoretical Study Of Natural Betalain Pigments Used In Dyesensitized Solar Cells, *J. Photochem. Photobiol. A*, 240, 5-13, 2012.
- [262] El-Agez, T.M., El Tayyan, A. A., Al-Kahlout, A., Taya, S.A., Abdel-Latif, M.S., Dye-Sensitized Solar Cells Based On ZnO Films And Natural Dyes. *Int J Mater Chem*, 2:105-110, 2012.
- [263] Calogero, G., Citro, I., Marco, G.D., Minicante, S.A., Morabito, M., Genovese, G., Brown Sea Weed Pigment As A Dye Source For Photoelectrochemical Solar Cells, *Spectrochim Acta, Part A Mol Biomol Spectrosc*, 117,702-706, 2014.

## EKLER

### Ek 1: Doğal boyalarla hazırlanmış DSSC'lere ait karakteristik parametreler ve literatür verisi

**Tablo 1.** Çeşitli meyvelerden ekstrakt edilen doğal boyalarla üretilmiş DSSC'lere ait yöntem ve performans verileri

Boya	Çözücü	Bitki Meyvesi	Moleküler Yapı	Mak. Absorbans (nm)	Fotoelektrot	Arka elektrot	Elektrolit Bileşimi	Elektrolit çözücüsü	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	Voc (V)	FF	η (%)	Kaynak/Yıl
Black berry	Metanol/ asetik asit/ su		Antosiyanin		TiO <sub>2</sub> kaplı FTO				2.2	0.45			[73] 1997
Chaste tree meyvesi	Etanol			553	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı ITO	LiI/I <sub>2</sub>	Asetonitril /3-methyl-2- oxazolidinone	1.06	0.39	0.48		[80] 2003
Mulberry	Etanol		Antosiyanin	553	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı ITO	LiI/I <sub>2</sub>	Asetonitril /3-methyl-2- oxazolidinone	0.86	0.422	0.43		
Cabbage Palm Meyvesi	Etanol		Antosiyanin	545	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı ITO	LiI/I <sub>2</sub>	Asetonitril /3-methyl-2- oxazolidinone	0.37	0.442	0.61		
Capsicum	Etanol		Karotenoid	455	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	KI/I <sub>2</sub>	Etilen glikol/ Asetonitril	0.225	0.412	0.63		[69] 2006
Jaboticaba (Myrtus cauliflora)	Su		Antosiyanin	520	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	LiI/I <sub>2</sub>	Asetonitril /3- metil-2- oxazolidinon	9	0.59	0.54		[75] 2006
Calafate (Berberies buxifolia)	Su		Antosiyanin	525	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	LiI/I <sub>2</sub>	Asetonitril /3- metil-2- oxazolidinon	6.2	0.47	0.36		
Gardinia meyvesi			Crocin	421, 442, 471	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı ITO	KI/I <sub>2</sub>	Etilen karbonat /asetonitril	2.84	0.43	0.46	0.56	[175] 2007
	0.1 M HCl		Crocetin	414, 436, 463	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı ITO	KI/I <sub>2</sub>	Etilen karbonat /asetonitril	0.45	0.58	0.6	0.16	











**Tablo 1. devamı**










Boya	Çözücü	Bitki Meyvesi	Moleküler Yapı	Mak. Absorbans (nm)	Fotoelektrot	Arka elektrot	Elektrolit Bileşimi	Elektrolit çözücüsü	J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	V <sub>oc</sub> (V)	FF	η (%)	Kaynak/ Yıl
Allium cepa (Kırmızı soğan)	Su, metanol, HCl		Antosiyanin	532	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	TG-50, Solaronix		0.51	0.44	0.48	0.14	[68] 2008
Citrus sinensis (Red sicilian)			Siyanidin-3-glikozid	515	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	KI/I <sub>2</sub>	Etilen glikol/ Asetonitril	3.84	0.34	0.5	0.66	[81] 2008
Black berry	Metanol/ CH <sub>3</sub> COOH /su (25:4:21)		Antosiyanin	-	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	*SWNT kaplı FTO	KI/I <sub>2</sub>	Anhidroz etilen glikol	10.6	0.33	0.42	1.46	[233] 2008
Solanum nigrum			Antosiyanin						1.01	0.54	0.51	0.31	[234] 2009
Cowberry			Cyanidin-3-galactoside						0.4	0.556	0.54	0.13	
Morus alba			Antosiyanin		TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	LiI/I <sub>2</sub> /pridin	Asetonitril /propionitril	6.1	0.49	0.52		[235] 2009
Vaccinium myrtillus			Antosiyanin						1	0.59	0.61		
Mirtus caulifora			Antosiyanin						3.9	0.45	0.56		
Punica granatum (Nar yaprağı)	Alkol		Klorofil	412, 665	TiO <sub>2</sub> kaplı ITO	Pt kaplı FTO	LiI/I <sub>2</sub>	Asetonitril	2.05	0.56	0.52	0.59	[173] 2010
Mulberry extract	Alkol		Antosiyanin						1.89	0.555	0.49	0.55	
Nar yaprağı/ Mulberry	Alkol		-						2.8	0.53	0.49	0.72	

\*SWNT: single-walled carbon nanotube










Tablo 1. devamı

Boya	Çözücü	Bitki Meyvesi	Moleküler Yapı	Mak. Absorbans (nm)	Fotoelektrot	Arka elektrot	Elektrolit Bileşimi	Elektrolit çözücüsü	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	Voc (V)	FF	η (%)	Kaynak/ Yıl	
Hylocereus costaricensis (Dragon meyvesi)	Su		Antosiyanin	535	TiO <sub>2</sub> kaplı ITO	Pt kaplı ITO	KI/I <sub>2</sub>	-	0.2	0.22	0.30	0.22	[236] 2010	
Bixa arellana L. (Achiote)			Bixin		TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	DMPImi/LiI/I <sub>2</sub> /TBP	Methoxy propionitrile	1.1	0.57	0.59	0.37	[76] 2010	
			Norbixin		ZnO kaplı FTO				0.38	0.53	0.64	0.13		
			Bixin						0.087	0.32	0.37	0.01		
			Norbixin						0.15	0.34	0.34	0.017		
Opuntia ficus indica	Etanol/ HCl/ Asorbik asit		-	-	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	LiI/I <sub>2</sub>	3-Methoxy propionitrile	2.7	0.375	0.54	0.5	[237] 2010	
Wild sicilian prickly pear (Opuntia engelmannii)			-	-						9.4	0.35	0.38		1.26
-			-						7.32	0.40	0.41	1.21		
Betalain			465	TiO <sub>2</sub> (solgel) kaplı FTO	8.2				0.38	0.38	1.19			
Fructus lycii	Etanol		-	447, 425	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	DMPIImi/LiI/I <sub>2</sub> /GT/TBP	Asetonitril	0.53	0.689	0.466	0.17	[178] 2011	
Mangosteen pericarp	Etanol		-	-					2.69	0.686	0.633	1.17		
Mulberry	Etanol		Antosiyanin	-	ZnO nanorod kaplı ITO	Pt kaplı ITO	LiI/I <sub>2</sub>	Asetonitril	2.9	0.23	0.3	0.41	[238] 2011	
Cheries			Betasiyanin	500	TiO <sub>2</sub>	Pt kaplı FTO	LiI/I <sub>2</sub>	Asetonitril	0.46	0.303	8.3	0.18	[239] 2011	
Eugenia jambolana	Etanol/ HCl		Antosiyanin	543	TiO <sub>2</sub> kaplı ITO	Pt kaplı ITO	LiI/I <sub>2</sub>	Asetonitril	1.49	0.35	0.48	0.505	[171] 2011	
							TiO <sub>2</sub> LiI/I <sub>2</sub> /PEO/TBP Polimer elektrolit		1.58	0.30	0.46	0.444		











Tablo 1. devamı

Boya	Çözücü	Bitki Meyvesi	Moleküler Yapı	Mak. Absorbans (nm)	Fotoelektrot	Arka elektrot	Elektrolit Bileşimi	Elektrolit çözücüsü	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	Voc (V)	FF	η (%)	Kaynak/ Yıl
Raspberries	Methanol/ acetic acid/su (25:4:21)		Betacyanin	540	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	LiI/I <sub>2</sub>	Asetonitril	0.26	0.426	0.65	1.5	[240] 2012
Shami berries			Betacyanin	534	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	LiI/I <sub>2</sub>	Asetonitril	0.19	0.419	0.59	0.96	
Grapes (Üzüm)			Betacyanin	560	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	LiI/I <sub>2</sub>	Asetonitril	0.09	0.346	0.61	0.38	
Kopsia flavida			Antosiyanin	550	TiO <sub>2</sub>		I/I <sub>3</sub>		1.2	0.52	0.62		[241] 2012
İvy gourd meyvesi			β - Karoten	458, 480	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	LiI/I <sub>2</sub> /TBP	2-Metoksi propionitril	0.24	0.644	0.49	0.076	[242] 2013
Jathopha curcas Linn (Botuje)	Etanol/ H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		Flavonoid	400	TiO <sub>2</sub>	-	I/I <sub>3</sub>	-	0.69	0.05	0.87	0.12	[243] 2013
Canarium odontophyllum	Etanol		Antosiyanin	-	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	TBAI/I <sub>2</sub>	Asetonitril /etilen karbonat	2.45	385	0.59	0.62	[244] 2013
Carob meyvesi	Etanol		-	662	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	-	KI/I <sub>2</sub>	Asetonitril/ Propilen karbonat	0.41	0.58	0.43	0.1	[245] 2015
Eggplant pulp	Etanol		-	668					0.35	0.63	0.39	0.09	











**Tablo 2.** Çeşitli Bitkilerin çiçeklerinden ekstrakt edilen doğal boyalarla üretilmiş DSSC'lere ait yöntem ve performans verileri

Boya	Çözücü	Bitki Çiçeği	Moleküler Yapı	Mak. Absorbans (nm)	Fotoelektrot	Arka elektrot	Elektrolit Bileşimi	Elektrolit çözücüsü	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	Voc (V)	FF	η (%)	Kaynak/ Yıl
Rosella(Hibiscus sabdariffa L.)			Antosiyanin	520	TiO <sub>2</sub>		I/I <sub>3</sub>		1.63	0.4	0.57	0.37	[246] 1997
Blue pea flower (Clitoria ternatea)			Antosiyanin	580	TiO <sub>2</sub>		I/I <sub>3</sub>		0.37	0.37	0.33	0.05	
Erythrina variegata	Etanol		Karotenoid	451	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt	KI/I <sub>2</sub>	Etilen glikol/ Asetonitril	0.776	0.484	0.55	-	[69] 2006
Rosa xanthina	Etanol		Antosiyanin	560	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt	KI/ I <sub>2</sub>	Etilen glikol/ Asetonitril	0.637	0.492	0.52	-	
Rosella	Su		Antosiyanin	-	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt	DMPIImi/LiI /I <sub>2</sub> /GT/TBP	Asetonitril	1.63	0.404	0.57	0.37	[76] 2007
Rosella	Su+0.1 M HCl		Antosiyanin	-	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt	DMPIImi/LiI /I <sub>2</sub> /GT/TBP	Asetonitril	2.72	0.408	0.63	0.70	
Blue pea	Su		Antosiyanin	-	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt	DMPIImi/LiI /I <sub>2</sub> /GT/TBP	Asetonitril	0.37	0.372	0.330	0.05	
Rosella+ Blue pea	Su		Antosiyanin	-	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt	DMPIImi/LiI /I <sub>2</sub> /GT/TBP	Asetonitril	0.82	0.382	0.47	0.15	
Bogainvillea brasiliensis	Etanol		-	-	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Ag kaplı ITO	C230 <sup>+/3+</sup>	Etanol/Su	5	0.249	0.364	0.454	[247] 2008







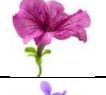



**Tablo 2. devam**

Boya	Çözücü	Bitki Çiçeği	Moleküler Yapı	Mak. Absorbans (nm)	Fotoelektrot	Arka elektrot	Elektrolit Bileşimi	Elektrolit çözücüsü	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	Voc (V)	FF	η (%)	Kaynak/ Yıl
Hibiscus surattensis	Etanol+ HCl		Antosiyanin	545	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	TBAI/I <sub>2</sub>	Asetonitril /etilen karbonat	5.45	0.392	0.535	1.14	[169] 2008
Sesbania grandiflora	Etanol+ HCl		Antosiyanin	544	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	TBAI/I <sub>2</sub>	Asetonitril /etilen karbonat	4.4	0.406	0.569	1.02	
Hibiscus rosasinensis	Etanol+ HCl		Antosiyanin	534	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	TBAI/I <sub>2</sub>	Asetonitril /etilen karbonat	4.04	0.4	0.633	1.02	
Nerium oleander	Etanol+ HCl		Antosiyanin	539	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	TBAI/I <sub>2</sub>	Asetonitril /etilen karbonat	2.46	0.408	0.591	0.59	
İxora macrothyrsa	Etanol+ HCl		Antosiyanin	537	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	TBAI/I <sub>2</sub>	Asetonitril /etilen karbonat	1.31	0.403	0.568	0.30	
Rhododendron arboretum zeylanicum	Etanol+ HCl		Antosiyanin	538	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	TBAI/I <sub>2</sub>	Asetonitril /etilen karbonat	1.15	0.402	0.637	0.29	
Canna indica L.			Siyanidin-3-scillabiose		TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	DMPIImi/LiI /I <sub>2</sub> /TBP	Asetonitril /valeronitril	0.82	0.54	0.59	0.29	[234] 2009
Salvia splendens			Salvianin						0.7	0.558	0.61	0.26	
İpomea	Etanol/ Su		Klorofil	410	TiO <sub>2</sub> kaplı ITO	Pt kaplı ITO	I/I <sub>3</sub>	-	0.91	0.54	0.56	0.28	[77] 2010
Bougainvillea	0.1 M HCl		-	-	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	LiI/I <sub>2</sub>	3-Methoxy propionitrile	2.1	0.3	0.57	0.36	[237] 2010









Tablo 2. devamı

Boya	Çözücü	Bitki Çiçeği	Moleküler Yapı	Mak. Absorbans (nm)	Fotoelektrot	Arka elektrot	Elektrolit Bileşimi	Elektrolit çözücüsü	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	Voc (V)	FF	η (%)	Kaynak/ Yıl
Butea monosperma	Metanol		İsobutrin	370	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	DMPIImi/LiI /I <sub>2</sub> /TBP	Asetonitril	4.67	0.58	0.641	1.8	[176] 2011
Delonix regia	Etanol		Siyanidin	543	TiO <sub>2</sub> kaplı ITO	Pt kaplı ITO	LiI/I <sub>2</sub>	Asetonitril	1.33	0.3	0.39	0.317	[171] 2011
					TiO <sub>2</sub> kaplı ITO	Pt kaplı ITO	TiO <sub>2</sub> LiI/I <sub>2</sub> /PEO/TBP Polimer elektrolit	0.84	0.3	0.48	0.245		
Íxora coccinea	Etanol		-	-	ZnO nanorod kaplı ITO	Pt kaplı ITO	LiI/I <sub>2</sub>	Asetonitril	2.65	0.21	0.29	0.33	[238] 2011
Hibiscus flowers	Su		Antosiyenin	-	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Grafit kaplı FTO	I/I <sub>3</sub>	-	0.289	0.403	0.525	0.035	[124] 2011
Cosmos sulphureus	Metanol		Flavonoid	442	TiO <sub>2</sub> kaplı Al tabla	Pt kaplı TEC (Dyesol)	Iodolyte AN 50 (Solaronix)		1.041	0.447	0.61	0.54	[248] 2011
Allamanda cathartic (Golden trumpet)	Metanol		Karotenoid	325					0.878	0.405	0.54	0.40	
Bougainvillea	Metanol		Betasiyanin	383					0.898	0.359	0.52	0.38	
Rose	Su		-	-	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	DMPIImi/LiI /I <sub>2</sub> /GT/TBP	Asetonitril	0.97	0.595	0.659	0.38	[178] 2011
Lily	Su		-	-	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	DMPIImi/LiI /I <sub>2</sub> /GT/TBP	Asetonitril	0.51	0.498	0.667	0.17	
Lithospermum	Etanol		-	520	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	DMPIImi/LiI /I <sub>2</sub> /GT/TBP	Asetonitril	0.14	0.337	0.585	0.03	

Tablo 2. devamı










Boya	Çözücü	Bitki Çiçeği	Moleküler Yapı	Mak. Absorbans (nm)	Fotoelektrot	Arka elektrot	Elektrolit Bileşimi	Elektrolit çözücüsü	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	Voc (V)	FF	η (%)	Kaynak/ Yıl
Begonia	Etanol		-	540	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	DMPIImi/LiI /I <sub>2</sub> /GT/TBP	Asetonitril	0.63	0.537	0.722	0.24	[178] 2011
Rhododendron	Etanol		-	540	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	DMPIImi/LiI /I <sub>2</sub> /GT/TBP	Asetonitril	1.61	0.585	0.609	0.57	
Marigold	Etanol		-	487	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	DMPIImi/LiI /I <sub>2</sub> /GT/TBP	Asetonitril	0.51	0.542	0.831	0.23	
Perilla	Etanol		-	665	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	DMPIImi/LiI /I <sub>2</sub> /GT/TBP	Asetonitril	1.36	0.522	0.696	0.5	
China İropetal	Etanol		-	665	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	DMPIImi/LiI /I <sub>2</sub> /GT/TBP	Asetonitril	0.84	0.518	0.626	0.27	
Yellow rose	Etanol		-	487	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	DMPIImi/LiI /I <sub>2</sub> /GT/TBP	Asetonitril	0.74	0.609	0.571	0.26	
Flower knotweed	Etanol		-	435	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	DMPIImi/LiI /I <sub>2</sub> /GT/TBP	Asetonitril	0.6	0.554	0.627	0.21	
Petunia	Etanol		-	665	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	DMPIImi/LiI /I <sub>2</sub> /GT/TBP	Asetonitril	0.85	0.616	0.605	0.32	
Violet	Etanol+ 0.1 M HCl		-	546	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	DMPIImi/LiI /I <sub>2</sub> /GT/TBP	Asetonitril	1.02	0.498	0.645	0.33	
Chinese rose	Etanol+ 0.1 M HCl		-	516	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	DMPIImi/LiI /I <sub>2</sub> /GT/TBP	Asetonitril	0.9	0.483	0.619	0.27	

**Tablo 2. devamı**








Boya	Çözücü	Bitki Çiçeği	Moleküler Yapı	Mak. Absorbans (nm)	Fotoelektrot	Arka elektrot	Elektrolit Bileşimi	Elektrolit çözücüsü	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	Voc (V)	FF	η (%)	Kaynak/ Yıl
Rose	Su		-	-	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	DMPImi/LiI /I <sub>2</sub> /GT/TBP	Asetonitril	0.97	0.595	0.659	0.38	[178] 2011
Lily	Su		-	-	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	DMPImi/LiI /I <sub>2</sub> /GT/TBP	Asetonitril	0.51	0.498	0.667	0.17	
Lithospermum	Etanol		-	520	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	DMPImi/LiI /I <sub>2</sub> /GT/TBP	Asetonitril	0.14	0.337	0.585	0.03	
Tagetes erecta	Metanol		Xanthophyll	465	TiO <sub>2</sub> kaplı ITO	C kaplı ITO	LiI/I <sub>2</sub>	3-Methoxy propionitrile	2.891	0.475	0.606	0.8	[182] 2012
Red Bougainvillea glabra	Metanol		Betaxanthin, Betasiyanin	483	TiO <sub>2</sub> kaplı ITO	C kaplı ITO	LiI/I <sub>2</sub>	3-Methoxy propionitrile	2.34	0.26	0.74	0.45	
Violet Bougainvillea glabra	Metanol/HCl		Betaxanthin, Betasiyanin	547	TiO <sub>2</sub> kaplı ITO	C kaplı ITO	LiI/I <sub>2</sub>	3-Methoxy propionitrile	1.86	0.23	0.71	0.31	
Red Bougainvillea spectabilis	Metanol/HCl		Betaxanthin, Betasiyanin	480	TiO <sub>2</sub> kaplı ITO	C kaplı ITO	LiI/I <sub>2</sub>	3-Methoxy propionitrile	2.29	0.28	0.76	0.48	
Violet Bougainvillea spectabilis	Metanol/HCl		Betaxanthin, Betasiyanin	535	TiO <sub>2</sub> kaplı ITO	C kaplı ITO	LiI/I <sub>2</sub>	3-Methoxy propionitrile	1.88	0.25	0.73	0.35	









**Tablo 2. devamı**

Boya	Çözücü	Bitki Çiçeği	Moleküler Yapı	Mak. Absorbans (nm)	Fotoelektrot	Arka elektrot	Elektrolit Bileşimi	Elektrolit çözücüsü	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	Voc (V)	FF	η (%)	Kaynak/ Yıl
Kerria japonica	/ Şeker		Xanthophyll		TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	Iodolyte AN 50 (Solaronix)		0.5597	0.5839	0.6775	0.22	[249] 2012
Rosa chinensis	/ Şeker		Antosiyenin		TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO			0.8017	0.5433	0.664	0.29	
Khella	Su		Antosiyenin	466	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	KI/I <sub>2</sub>	Etilen glikol	0.384	0.437	0.47	0.05	[250] 2012
Alkanet	Aseton		Carotenoid	535	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	KI/I <sub>2</sub>	Etilen glikol	0.268	0.372	0.46	0.03	
Gardenia yellow	Su		Karoten	450	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	LiI/I <sub>2</sub>	3-Methoxy propionitrile	0.96	0.54	0.62	0.32	[251] 2013
Gardenia blue	Su		Karotenoid	600	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	LiI/I <sub>2</sub>	3-Methoxy propionitrile	0.53	0.44	0.69	0.16	
Red frangipani flowers			Siyanidin						0.94	0.495	0.65	0.301	[242] 2013
Ixora sp.			Antosiyenin						6.26	351	0.96	0.44	[244] 2013
Canarium odontophyllum + Ixora sp.	Etanol/ HCl		Antosiyenin	-	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	TBAI/I <sub>2</sub>	Asetonitril /etilen karbonat	6.26	384	1.13	0.47	









**Tablo 2. devamı**

Boya	Çözücü	Bitki Çiçeği	Moleküler Yapı	Mak. Absorbans (nm)	Fotoelektrot	Arka elektrot	Elektrolit Bileşimi	Elektrolit çözücüsü	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	Voc (V)	FF	η (%)	Kaynak/ Yıl
Anethum graveolens	Etanol		Klorofil	666	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	LiI/I <sub>2</sub>	Asetonitril /propilen karbonat	0.96	0.57	40	0.22	[168] 2013
Bougainvillea spectabilis	Etanol+ 0.1 M HCl		-	485, 532	TiO <sub>2</sub> kaplı ITO	PEDOT kaplı ITO	Polimer jel elektrolit  NaI/ polyvinyl pyrrolidone	Asetonitril /3-methyl-2-oxazolidinon	0.648	470	0.54	0.164	[252] 2015
Bougainvillea spectabilis	Etanol		-	433, 469, 608, 664					1.11	500	0.586	0.325	
Bougainvillea spectabilis	0.1 M HCl		-	-					0.081	450	0.483	0.018	
Delonix regia	0.1 M HCl		-	510					0.114	470	0.579	0.031	
Nerium oleander	0.1 M HCl		-	-					0.046	500	0.575	0.013	
Spathodea campanulata	0.1 M HCl		-	-					0.013	460	0.44	0.003	
Amaranthus caudatus	Etanol		-	433, 466, 618, 664					1.82	550	0.61	0.610	
Amaranthus caudatus	0.1 M HCl		-	530					0.102	530	0.61	0.033	
Amaranthus caudatus	Etanol+ 0.1 M HCl		-	-					0.44	450	0.58	0.114	
Sumac/Rhus	Etanol		Antosiyanin	650					TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	PEO	-	











**Tablo 2. devamı**

Boya	Çözücü	Bitki Çiçeği	Moleküler Yapı	Mak. Absorbans (nm)	Fotoelektrot	Arka elektrot	Elektrolit Bileşimi	Elektrolit çözücüsü	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	Voc (V)	FF	η (%)	Kaynak/ Yıl
Bougainvillea	Etanol		-	666	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	-	KI/I <sub>2</sub>	Asetonitril/ Propilen karbonat	0.8	0.57	0.38	0.18	[245] 2015
Mint flower	Etanol		-	664	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	-	KI/I <sub>2</sub>	Asetonitril/ Propilen karbonat	0.45	0.56	0.38	0.09	
Basil flower	Etanol		-	664	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	-	KI/I <sub>2</sub>	Asetonitril/ Propilen karbonat	1.12	0.6	0.4	0.27	
Royal poinciana	Etanol		-	448	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	-	KI/I <sub>2</sub>	Asetonitril/ Propilen karbonat	0.84	0.63	0.42	0.22	
Red Bougainvillea	Aseton		-	475, 550, 675	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	C kaplı FTO	KI/I <sub>2</sub>	-	0.335	0.492	0.25	0.023	[254] 2015
Orange Bougainvillea	Aseton		-	-	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	C kaplı FTO	KI/I <sub>2</sub>	-	0.320	0.465	0.06	0.005	








**Tablo 3.** Çeşitli Bitki yapraklarından ekstrakt edilen doğal boyalarla üretilmiş DSSC'lere ait yöntem ve performans verileri

Boya	Çözücü	Bitki Yaprığı	Moleküler Yapı	Mak. Absorbans (nm)	Fotoelektrot	Arka elektrot	Elektrolit Bileşimi	Elektrolit çözücüsü	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	Voc (V)	FF	η (%)	Kaynak/ Yıl
Vernonia amygdalin (Bitterleaf)			Klorofil	400	TiO <sub>2</sub>		I/I <sub>3</sub>		0.07	0.34	0.81	0.69	[71] 1972
Shisho leaves			Shisonin		TiO <sub>2</sub> kaplı FTO				3.56	0.55	0.51	1.01	[165] 2006
			Klorofil						3.52	0.432	0.39	0.59	
			Shisonin + Klorofil						4.8	0.534	0.51	1.31	
Brassicaolercea (Redcabbage)	HCl		Antosiyenin	537	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	TG-50, Solaronix		0.5	0.37	0.54	0.13	[68] 2008
Ficus Reusa Linn.	Etanol		Klorofil	670	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Ag kaplı ITO	C230 <sup>+3+</sup>	Etanol/Su	7.85	0.52	0.29	1.18	[247] 2008
Rhoeo spathacea	Etanol		Klorofil	670	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Ag kaplı ITO	C230 <sup>+3+</sup>	Etanol/Su	10.9	0.5	0.27	1.49	
Garcinia subelliptica	Etanol		Klorofil	670	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Ag kaplı ITO	C230 <sup>+3+</sup>	Etanol/Su	6.48	0.32	0.33	0.69	
Red perilla			Shisonin						0.39	0.51	0.67	0.27	[255] 2009
Spinach	Etanol/Su		Klorofil	437	TiO <sub>2</sub> kaplı ITO	Pt kaplı ITO	I/I <sub>3</sub>	-	0.47	0.55	0.51	0.13	[77] 2010











**Tablo 3. devamı**

Boya	Çözücü	Bitki Yaprağı	Moleküler Yapı	Mak. Absorbans (nm)	Fotoelektrot	Arka elektrot	Elektrolit Bileşimi	Elektrolit çözücüsü	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	Voc (V)	FF	η (%)	Kaynak/ Yıl
Spinach extract	Etanol/Su		Klorofil	666	TiO <sub>2</sub> kaplı ITO	Pt kaplı FTO	Li/I <sub>2</sub>	Asetonitril	0.467	0.55	0.51	0.131	[173] 2010
Ipomea leaf extract	Etanol/Su		Klorofil	666	TiO <sub>2</sub> kaplı ITO	Pt kaplı FTO	Li/I <sub>2</sub>	Asetonitril	0.914	0.54	0.563	0.278	
Pomegranate leaf extract	Etanol/Su		Klorofil	666	TiO <sub>2</sub> kaplı ITO	Pt kaplı FTO	Li/I <sub>2</sub>	Asetonitril	2.05	0.56	0.52	0.597	
Herba artmisiae scopariae	Etanol/Su		-	669	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	DMPIImi/LiI <sub>2</sub> /GT/TBP	Asetonitril	1.03	0.484	0.682	0.34	[178] 2011
Bauhinia tree	Etanol/Su		-	665	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	DMPIImi/LiI <sub>2</sub> /GT/TBP	Asetonitril	0.96	0.572	0.66	0.36	
Broadleaf holly leaf	Etanol/Su		-	666	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	DMPIImi/LiI <sub>2</sub> /GT/TBP	Asetonitril	1.19	0.607	0.654	0.47	
Lawsonia inermis (Henna)	Etanol/Su		Antosiyenin	518	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	KI/I <sub>2</sub>	Etilen glikol/Asetonitril	1.87	0.61	0.58	0.66	[256] 2011
Festuca ovina	Metanol / HCl		Klorofil	421	TiO <sub>2</sub> kaplı ITO	C kaplı ITO	Li/I <sub>2</sub> /TBP	3-methoxy propionitril	1.18	0.54	0.69	0.46	[182] 2012
Bahraini henna	Metanol		Klorofil	-	TiO <sub>2</sub>	Grafit	I/I <sub>2</sub>	-	0.368	0.4262	4.6	0.128	[257] 2012
Yemeni henna	Metanol		Klorofil	-	TiO <sub>2</sub>	Grafit	I/I <sub>2</sub>	-	0.407	0.306	28.1	0.117	









**Tablo 3. devamı**

Boya	Çözücü	Bitki Yaprağı	Moleküler Yapı	Mak. Absorbans (nm)	Fotoelektrot	Arka elektrot	Elektrolit Bileşimi	Elektrolit çözücüsü	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	Voc (V)	FF	η (%)	Kaynak/ Yıl	
Bloodleaf	Su		Betacyanin	460	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	KI/I <sub>2</sub>	Etilen glikol	0.26	0.267	0.46	0.04	[250] 2012	
Limon yaprağı	Metanol		Klorofil	476	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	KI/I <sub>2</sub>	Etilen glikol	0.286	0.539	0.74	0.05		
Wormwood	Etanol		Klorofil	666	TiO <sub>2</sub> kaplı ITO	Pt kaplı ITO	Li/I <sub>2</sub>	Asetonitril	1.96	0.585	0.47	0.538	[48] 2013	
Purple cabbage	Etanol		Antosiyenin	-	TiO <sub>2</sub> kaplı ITO	Pt kaplı ITO	Li/I <sub>2</sub>	Asetonitril	2.08	0.66	0.53	0.75		
Wormwood + Purple cabbage (1:1)	Etanol		-	-	TiO <sub>2</sub> kaplı ITO	Pt kaplı ITO	Li/I <sub>2</sub>	Asetonitril	3.16	0.66	0.62	1.29		
Wormwood + Purple cabbage (1:1)	Etanol		-	-	TiO <sub>2</sub> kaplı ITO	Pt kaplı ITO	Li/I <sub>2</sub>	Asetonitril	2.55	0.675	0.67	1.15		
Wormwood + Purple cabbage (1:1)	Etanol		-	-	TiO <sub>2</sub> kaplı ITO	Pt kaplı ITO	Li/I <sub>2</sub>	Asetonitril	1.98	0.635	0.52	0.652		
Wormwood + Purple cabbage (1:1)	Etanol			-	-	TiO <sub>2</sub> kaplı ITO	Pt kaplı ITO	Li/I <sub>2</sub>	Asetonitril	2.82	0.605	0.53		0.896
Wormwood + Purple cabbage (1:1)	Etanol		-	-	TiO <sub>2</sub> kaplı ITO	Pt kaplı ITO	Li/I <sub>2</sub>	Asetonitril	2.01	0.585	0.52	0.612		
Light-harvesting complex (LHCII) From Spinach			-	436, 473, 652, 678	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	Li/I <sub>2</sub>	Asetonitril	0.8	0.59	0.58	0.27	[258] 2013	
LHCII pigments			-	430, 452, 645, 661	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	Li/I <sub>2</sub>	Asetonitril	2.26	0.53	0.69	0.79		

**Tablo 3. devamı**





Boya	Çözücü	Bitki Yaprağı	Moleküler Yapı	Mak. Absorbans (nm)	Fotoelektrot	Arka elektrot	Elektrolit Bileşimi	Elektrolit çözücüsü	Jsc (mA /cm <sup>2</sup> )	Voc (V)	FF	η (%)	Kaynak/ Yıl
Parsley(Petroselinumcrispum)	Etanol		Klorofil	666	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	LiI/I <sub>2</sub>	Asetonitril /propilen karbonat	0.53	0.44	34	0.07	[168] 2013
Arugula	Etanol		Klorofil	666	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	LiI/I <sub>2</sub>	Asetonitril /propilen karbonat	0.788	0.596	0.42	0.20	
Ispanak (Spinach Oleracea)	Etanol		Klorofil	666	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	LiI/I <sub>2</sub>	Asetonitril /propilen karbonat	0.332	0.590	0.42	0.08	
Black tea leaves	Etanol		-	666	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	-	KI/I <sub>2</sub>	Asetonitril/ Propilen karbonat	0.39	0.55	0.4	0.08	[245] 2015
Green tea leaves	Etanol		-	410, 666	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	-	KI/I <sub>2</sub>	Asetonitril/ Propilen karbonat	0.22	0.47	0.26	0.03	
Henna leaves	Etanol		-	410, 666	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	-	KI/I <sub>2</sub>	Asetonitril/ Propilen karbonat	0.3	0.49	0.35	0.05	
Fig leaves	Etanol		-	432, 666	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	-	KI/I <sub>2</sub>	Asetonitril/ Propilen karbonat	1.6	0.67	0.45	0.49	
Schinus terebinthifolius leaves	Etanol		-	414, 666	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	-	KI/I <sub>2</sub>	Asetonitril/ Propilen karbonat	2.4	0.68	0.44	0.73	
Lemon leaves	Aseton		Klorofil	-	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	C kaplı FTO	KI/I <sub>2</sub>	-	1.08	0.592	0.10	0.036	[254] 2015
(Scelerocarya birrea) Morula	Aseton		Klorofil	-	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	C kaplı FTO	KI/I <sub>2</sub>	-	0.059	0.472	0.05	0.0008	

**Tablo 4.** Çeşitli Bitki köklerinden ekstrakt edilen doğal boylarla üretilmiş DSSC'lere ait yöntem ve performans verileri





Boya	Çözücü	Bitki Kökü	Moleküler Yapı	Mak. Absorbans (nm)	Fotoelektrot	Arka elektrot	Elektrolit Bileşimi	Elektrolit çözücüsü	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	Voc (V)	FF	η (%)	Kaynak/ Yıl
Red beet roots	Etanol+ 0.1 M HCl		Betanin	-	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	LiI/I <sub>2</sub> /TBP	3-methoxy propionitrile	2.42	0.44	0.63	0.67	[80] 2008
			Betaxanthin	-	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	LiI/I <sub>2</sub>	Asetonitril	2	0.22	0.51	0.19	
Red cabbage: curcumine					TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı ITO	LiI/I <sub>2</sub> /DMPI mi/TBP	Propylene carbonate	0.81	0.53	0.69	0.6	[255] 2009
Red cabbage								0.56	1.55	0.67	1.17		
Beta vulgaris rubra	0.1 M HCl		Betanin	536	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	LiI/I <sub>2</sub>	3-Methoxy propionitrile	9.5	0.425	0.37	1.7	[237] 2010
Beetroot	Etanol		-	-	ZnO nanorod kaplı ITO	Pt kaplı ITO	LiI/I <sub>2</sub>	Asetonitril	2.3	0.2	0.3	0.28	[238] 2011
Black carrot(Daucus carota L)			Antosiyanin	540	TiO <sub>2</sub>		I/I <sub>3</sub>		1.302	0.4	0.47	0.25	[259] 2011
Beet root	Ptasyum fosfat buffer solüsyon		Betanin	536	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı- FTO	LiI/I <sub>2</sub>	Asetonitril	13.91	0.36	0.56	2.71	[260] 2011
			Betanin	-	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı- FTO	LiI/I <sub>2</sub>	3- Methoxypro prionitrile	8.61	0.44	0.61	2.22	
Beet root			Betalain		TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	KI/I <sub>2</sub>	Ethylene glycol/Aseto nitril	2.95	0.357	0.3	0.402	[261] 2012








**Tablo 4 devamı**

Boya	Çözücü	Bitki Kökü	Moleküler Yapı	Mak. Absorbans (nm)	Fotoelektrot	Arka elektrot	Elektrolit Bileşimi	Elektrolit çözücüsü	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	Voc (V)	FF	η (%)	Kaynak/ Yıl
Rhubarb	Su /Etilen glikol		Klorofil	410	ZnO kaplı FTO	Grafit kaplı FTO	I/I <sub>3</sub>	-	0.82	0.238	0.44	0.01	[262] 2012
Madder	Su		Anthraquinone	540	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	KI/I <sub>2</sub>	Etilen glikol	0.54	0.389	0.69	0.1	[250] 2012
Turmeric	Aseton		Carotenoids	525	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	KI/I <sub>2</sub>	Etilen glikol	0.288	0.529	0.48	0.03	
Curcuma longa	Etanol		Carotenoid	450	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	PEO	-	0.2	0.28	0.65	0.36	[253] 2015







**Tablo 5.** Çeşitli Bitki tohumlarından ekstrakt edilen doğal boyalarla üretilmiş DSSC'lere ait yöntem ve performans verileri

Boya	Çözücü	Bitki Tohumu	Moleküler Yapı	Mak. Absorbans (nm)	Fotoelektrot	Arka elektrot	Elektrolit Bileşimi	Elektrolit çözücüsü	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	Voc (V)	FF	η (%)	Kaynak/ Yıl
Siyah Pirinç	Etanol		Antosiyanin	560	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	KI/I <sub>2</sub>	Etilen glikol/ Asetonitril	1.142	0.551	0.52	-	[69] 2006
Kahve	Su		-	-	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	DMPImi/LiI /I <sub>2</sub> /GT/TBP	Asetonitril	0.85	0.559	0.687	0.33	[178] 2011
Ceviz	Su /Etilen glikol		Karotenoid	510	ZnO kaplı FTO	Grafit kaplı FTO	I/I <sub>3</sub>	-	0.73	0.3	40.39	0.01	[262] 2012
Clove grain	Etanol		-	666	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	-	KI/I <sub>2</sub>	Asetonitril/ Propilen karbonat	0.6	0.55	0.42	0.14	[245] 2015


**Tablo 6.** Çeşitli meyvelerin kabuklarından ekstrakt edilen doğal boyalarla üretilmiş DSSC'lere ait yöntem ve performans verileri

Boya	Çözücü	Meyve Kabuğu	Moleküler Yapı	Mak. Absorbans (nm)	Fotoelektrot	Arka elektrot	Elektrolit Bileşimi	Elektrolit çözücüsü	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	Voc (V)	FF	η (%)	Kaynak/ Yıl
Solanum melongena (Patlıcan kabuğu)	Etanol, %1 CH <sub>3</sub> COOH, %2 HCl		Nasunin	522	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	KI/I <sub>2</sub>	Etilen glikol/ Asetonitril	3.4	0.35	0.4	0.48	[81] 2008
Mandalina kabuğu	Etanol		-	446	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	DMPImi/LiI <sub>2</sub> /GT/TBP	Asetonitril	0.74	0.592	0.631	0.28	[178] 2011
Nar kabuğu	Metanol/ HCl		Flavonoid	400	TiO <sub>2</sub> kaplı ITO	C kaplı ITO	LiI/I <sub>2</sub> /TBP	3-methoxy propionitril	3.341	0.716	0.776	1.86	[182] 2012
Passion meyvesi kabuğu	Etanol		-	666	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	-	KI/I <sub>2</sub>	Asetonitril/ Propilen karbonat	0.78	0.63	0.39	0.19	[245] 2015
Soğan kabuğu	Etanol		-	-	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	-	KI/I <sub>2</sub>	Asetonitril/ Propilen karbonat	0.45	0.55	0.47	0.12	
Patlıcan kabuğu	Etanol		-	416, 664	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	-	KI/I <sub>2</sub>	Asetonitril/ Propilen karbonat	0.23	0.53	0.29	0.04	

**Tablo 7.** Çeşitli yosun ve maya türlerinden ekstrakt edilen doğal boyalarla üretilmiş DSSC'lere ait yöntem ve performans verileri

Boya	Çözücü	Boya Materyali	Moleküler Yapı	Mak. Absorbans (nm)	Fotoelektrot	Arka elektrot	Elektrolit Bileşimi	Elektrolit çözücüsü	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	Voc (V)	FF	η (%)	Kaynak/ Yıl
Kelp (yosun)	Etanol		Klorofil	460	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt	KI/I <sub>2</sub>	Etilen glikol/ Asetonitril	0.433	0.441	0.62	-	[69] 2006
Kelp (yosun)	Etanol		Klorofil	430	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Ag kaplı ITO	C230 <sup>+3+</sup>	Etanol/Su	9.51	0.308	0.241	0.705	[247] 2008
Monascus purpureus (Kırmızı maya)	-		Xanthomonas cin-A	-	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	LiI/BMII/I <sub>2</sub> /TBP	Asetonitril/valeronitrile	6.1	0.57	0.66	2.3	[177] 2010
Yeşil alg	-		Klorofil	666	ZnO kaplı FTO	Pt kaplı FTO	DMPImi/LiI /I <sub>2</sub> /TBP	Methoxy propionitrile	0.08	0.32	0.37	0.01	[76] 2010
				666	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO				0.13	0.412	1	0.01	
Yeşil alg	Etanol		Klorofil	666	TiO <sub>2</sub> kaplı FTO	Pt kaplı FTO	LiI/I <sub>2</sub>	Asetonitril /propilen karbonat	0.134	0.416	0.21	0.01	[168] 2013
Undaria pinnatifida (yosun)			Klorofil	665	TiO <sub>2</sub>				0.8	0.36	0.69	0.178	[263] 2014

**Tablo 8.** Çeşitli pH değerlerinde hazırlanan doğal boyalarla üretilmiş DSSC'lere ait performans verileri

Boya	Bitki Çiçeği	pH	Foto elektrot	Arka elektrot	Elektrolit Bileşimi	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	Voc (V)	FF	η (%)	Kaynak/ Yıl
Ipomea		3.0	TiO <sub>2</sub> kaplı ITO	Pt kaplı ITO	I/I <sub>3</sub>	0.915	0.510	0.552	0.25	[77] 2010
		2.0				0.982	0.543	0.564	0.29	
		1.0				1.12	0.565	0.592	0.32	

## Ek 2: Doğal fotoduyarlılaştırıcı boyalara ait GC-MS Analizi Sonuçları

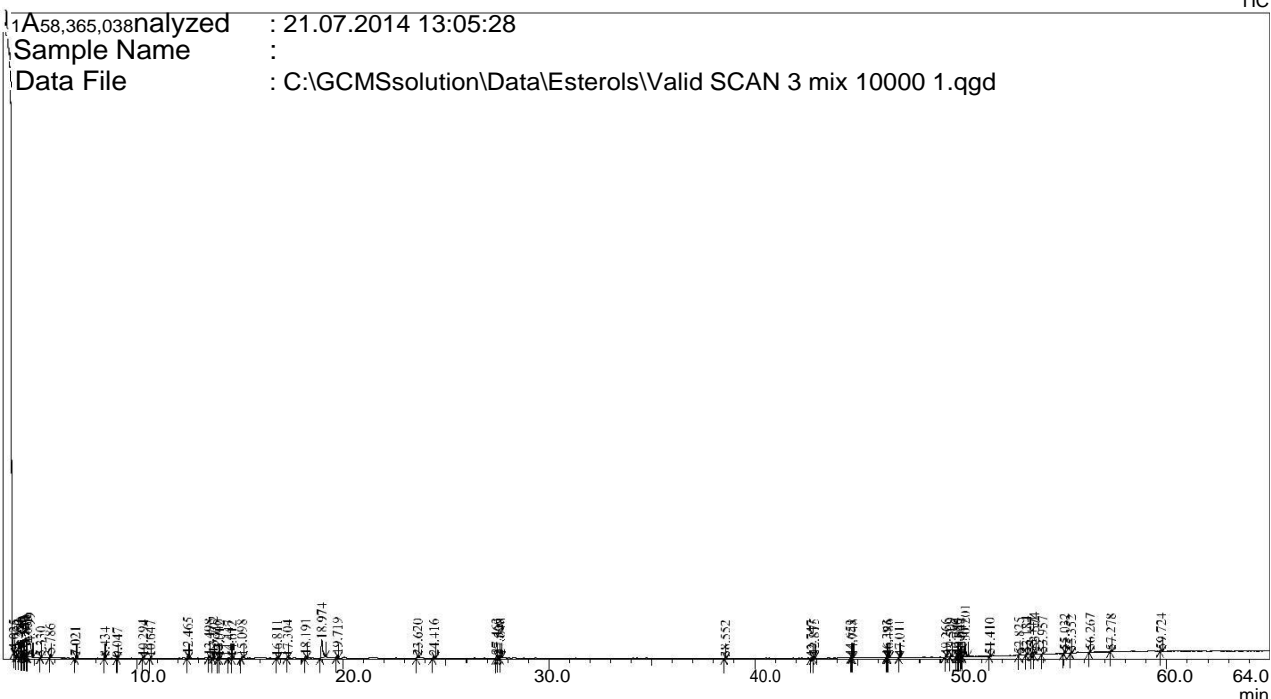
### BOZOK ÜNİVERSİTESİ

### BİLİM VE TEKNOLOJİ UYGULAMA VE ARAŞTIRMA MERKEZİ

02112016

Chromatogram P1 C:\GCMSsolution\Data\Project1\Esential oil\P1\_14.qgd

TIC



Peak Report TIC

Peak#	R.Time	Area	Area%	Name
1	4.025	916504	0.49	Acetic acid
2	4.200	4995492	2.67	Propane, 2,2-diethoxy-
3	4.253	15061775	8.04	Propane, 2,2-diethoxy-
4	4.380	8014021	4.28	Oxazolidin-2-one
5	4.460	6889238	3.68	Propane, 2,2-diethoxy-
6	4.520	7462490	3.98	Propane, 2,2-diethoxy-
7	4.553	11929159	6.37	1,2-Butanediol (CAS)
8	4.659	8587284	4.58	Propane, 2,2-diethoxy- (CAS)
9	4.799	37519119	20.02	Propane, 2,2-diethoxy-
10	5.330	162203	0.09	1,1-Diethoxypropanal
11	5.786	1363186	0.73	2-Pentanone, 4-hydroxy-4-methyl- (CAS)
12	7.021	646037	0.34	Ethanol, 2,2-diethoxy-
13	8.434	436729	0.23	1-Decene (CAS)
14	9.047	234464	0.13	.DELTA.3-Carene
15	10.294	616384	0.33	Propane, 1,1,3-triethoxy-
16	10.647	532944	0.28	Butanoic acid, 3-oxo-, ethyl ester (CAS)
17	12.465	2098985	1.12	4H-Pyran-4-one, 2,3-dihydro-3,5-dihydroxy-6-methyl-
18	13.498	993935	0.53	2-Acetyl-octanoic acid, ethyl ester
19	13.702	2546559	1.36	1-Dodecene
20	13.940	766117	0.41	Dodecane (CAS)
21	14.012	285522	0.15	Terpineol <alpha->
22	14.447	708784	0.38	2,3-DIHYDRO-BENZOFURAN
23	14.612	381095	0.20	Poly[oxy(methyl-1,2-ethanediyl)], .alpha.-butyl-.omega.-hydroxy- (CAS)
24	15.098	1367637	0.73	1,2,3-Propanetriol, 1-acetate
25	16.811	870277	0.46	Tridecane
26	17.304	630130	0.34	2-Methoxy-4-vinylphenol
27	18.191	1824140	0.97	2,5-Dimethylhexane-2,5-dihydroperoxide

Peak#	R.Time	Area	Area%	Name
28	18.974	22291614	11.90	1,2,3-Benzenetriol
29	19.719	2299793	1.23	Cetene
30	23.620	1667000	0.89	Benzene, 3-pentenyl-
31	24.416	1900501	1.01	Phenol, 2,6-bis(1,1-dimethylethyl)-4-methyl- (CAS)
32	27.463	2270634	1.21	Diethyl Phthalate
33	27.560	1910717	1.02	Diethyl Phthalate
34	27.648	1706427	0.91	E-14-Hexadecenal
35	38.552	502670	0.27	Tricyclo[7.1.0.0[1,3]]decane-2-carbaldehyde
36	42.747	487955	0.26	cis-9-Hexadecenal
37	42.875	1383739	0.74	6-Octadecenoic acid, methyl ester, (Z)-
38	44.653	288876	0.15	1-Docosanol (CAS)
39	44.748	752216	0.40	1H-Purin-6-amine, [(2-fluorophenyl)methyl]- (CAS)
40	46.393	327626	0.17	1-Hexadecanol
41	46.486	677525	0.36	Tricosane (CAS)
42	47.011	316273	0.17	EICOSAMETHYLCYCLODECASILOXANE
43	49.266	567122	0.30	SILICONE OIL
44	49.509	1134121	0.61	Hexadecanoic acid, 2,3-bis[(trimethylsilyl)oxy]propyl ester
45	49.780	655264	0.35	
46	49.855	649874	0.35	n-Nonadecanol-1
47	49.942	1409259	0.75	Heptacosane
48	50.047	1609388	0.86	
49	50.201	13038853	6.96	Hexadecanoic acid, 2-hydroxy-1-(hydroxymethyl)ethyl ester
50	51.410	835648	0.45	GC septum bleed P1362
51	52.825	472130	0.25	
52	53.184	622164	0.33	Tetracosane
53	53.441	707594	0.38	1H-Purin-6-amine, [(2-fluorophenyl)methyl]- (CAS)
54	53.574	3235323	1.73	Octadecanoic acid, 2,3-dihydroxypropyl ester
55	53.957	664520	0.35	1,3-Benzenedicarboxylic acid, bis(2-ethylhexyl) ester
56	55.032	1668824	0.89	Squalene
57	55.352	743348	0.40	SILICONE OIL
58	56.267	1097587	0.59	Eicosane (CAS)
59	57.278	578678	0.31	SILICONE OIL
60	59.724	1055465	0.56	Heptacosane
		187368938	100.00	

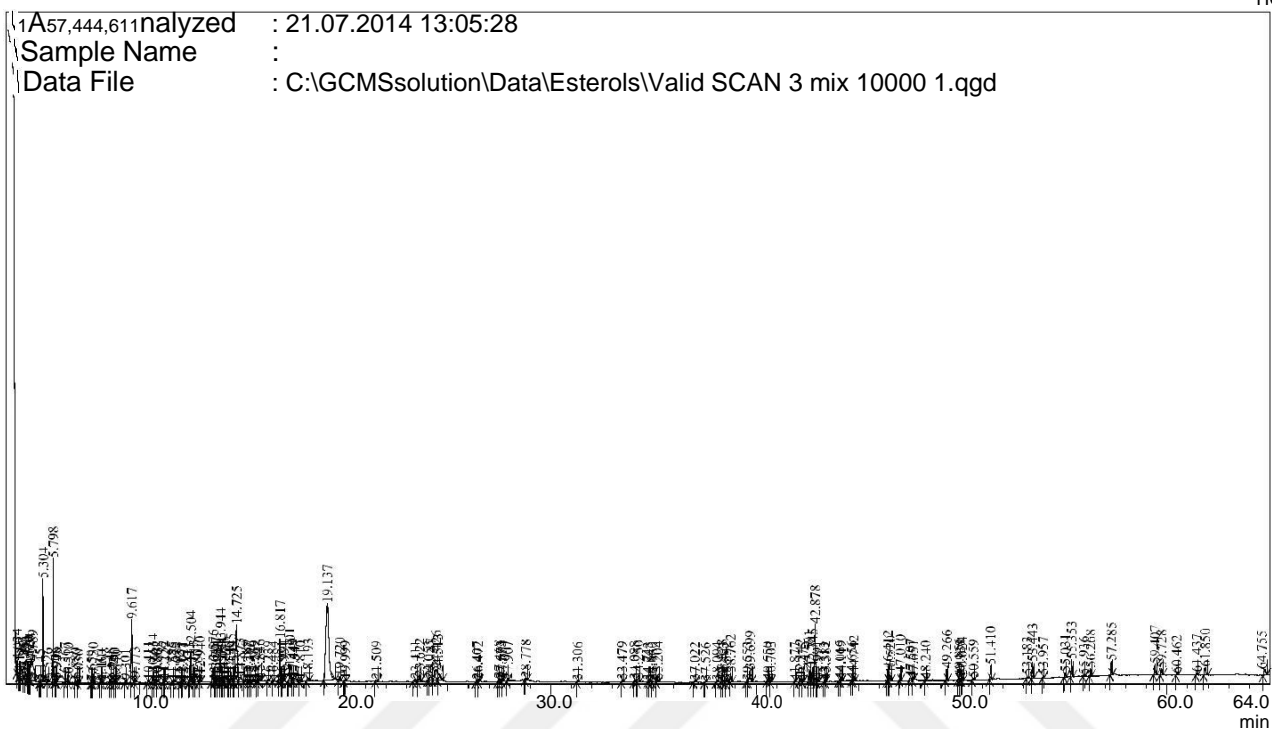
# BOZOK ÜNİVERSİTESİ

## BİLİM VE TEKNOLOJİ UYGULAMA VE ARAŞTIRMA MERKEZİ

02112016

Chromatogram P1-A C:\GCMSsolution\Data\Project1\Essential oil\P1-A\_12.qgd

TIC



Peak Report TIC

Peak#	R.Time	Area	Area%	Name
1	4.034	3466034	0.35	Acetic acid
2	4.153	1567890	0.16	Acetic acid, ethyl ester (CAS)
3	4.307	12025009	1.22	Butane, 2-methoxy-3-methyl- (CAS)
4	4.361	10301560	1.05	ACETIC ACID, METHYL ESTER
5	4.473	15768434	1.60	Ethanone, 1-cyclopropyl-
6	4.570	7735085	0.79	Propane, 2,2-diethoxy-
7	4.620	7706016	0.78	2-Propanol, 1-(2-ethoxypropoxy)-
8	4.664	11284849	1.15	Ethane, 1,1-diethoxy- (CAS)
9	4.789	38862040	3.95	Ethene, tetramethoxy-
10	5.145	678049	0.07	Formamide, N,N-dimethyl-
11	5.304	33834632	3.44	3-Penten-2-one, 4-methyl-
12	5.526	1021669	0.10	2-Pentanone, 4-hydroxy-
13	5.798	47201942	4.80	2-Pentanone, 4-hydroxy-4-methyl- (CAS)
14	5.906	1584298	0.16	Maleic anhydride
15	5.948	837869	0.09	2-Pentanone, 5-chloro- (CAS)
16	6.367	2971721	0.30	5-Hexen-2-one
17	6.510	3014983	0.31	4-Ethoxy-2-pentanone
18	6.880	1642757	0.17	Butane, 1,1-diethoxy-
19	7.030	701462	0.07	Ethanol, 2,2-diethoxy-
20	7.659	433205	0.04	Diisopropyl sulfide
21	7.730	3562219	0.36	2-Butanol, 2,3-dimethyl-, acetate
22	8.104	1611313	0.16	Oxybenzene
23	8.160	373841	0.04	1,4-Diacetyl-3-acetoxymethyl-2,5-methylene-l-rihamnitol
24	8.548	1815431	0.18	Benzene, ethoxy- (CAS)
25	8.721	530891	0.05	4 - hydroxy - 5,6 - dihydro - (2H) - pyran - 2 - one
26	8.790	1280177	0.13	1-Butene, 4,4-diethoxy-2-methyl-
27	8.840	361364	0.04	Propanoyl chloride, 3-chloro-



Peak#	R.Time	Area	Area%	Name
28	9.301	948546	0.10	7-Oxabicyclo[2.2.1]hept-5-en-2-one
29	9.617	37782563	3.84	2-Pyrrolidinone, 1-methyl-
30	9.773	2175049	0.22	Pentanoic acid, 4-oxo-
31	10.411	968660	0.10	2-Furaldehyde diethyl acetal
32	10.634	4891574	0.50	Acetoacetate <ethyl->
33	10.801	604697	0.06	2-Furancarboxylic acid, hydrazide
34	10.862	1084478	0.11	2,3-Dihydro-5-hydroxy-6-methyl-4H-pyran-4-one
35	11.152	1450033	0.15	Henecane
36	11.229	870217	0.09	1-Nonanethiol
37	11.586	830289	0.08	trans-2,3-Epoxy-nonane
38	11.675	1121140	0.11	Phenethyl alcohol
39	11.927	344162	0.04	Allyl isovalerate
40	12.071	1161605	0.12	2-acetyl-2-hydroxy-.gamma.-butyrolactone
41	12.127	561146	0.06	
42	12.413	486659	0.05	Ethyl orthoformate
43	12.504	21134262	2.15	4H-Pyran-4-one, 2,3-dihydro-3,5-dihydroxy-6-methyl-
44	12.613	2074524	0.21	Cycloheptanone, 4-methyl-, (R)-
45	12.807	1460398	0.15	Benzoic acid (CAS)
46	12.940	3755305	0.38	Dehydromevalonic lactone
47	13.576	10480501	1.07	2-Acetyl-octanoic acid, ethyl ester
48	13.640	523745	0.05	
49	13.707	3629479	0.37	1-Dodecene (CAS)
50	13.813	3390833	0.35	Propane, 2-methyl-1-(propylthio)-
51	13.944	19999284	2.04	Dodecane (CAS)
52	14.021	4665503	0.47	3-Cyclohexene-1-methanol, .alpha.,.alpha.,4-trimethyl-, (S)- (CAS)
53	14.086	4710391	0.48	Oxazole, trimethyl- (CAS)
54	14.176	9146411	0.93	3-Dimethylaminoacrylonitrile
55	14.346	950186	0.10	5-Diethoxymethyl-3-ethoxy-4,5-dihydro-isoxazole
56	14.445	6145180	0.63	2,3-DIHYDRO-BENZOFURAN
57	14.578	1003436	0.10	L-Histidine, 1-methyl-
58	14.725	70611092	7.19	Hydroxy methyl furfural
59	14.873	10345098	1.05	2H-Azepin-2-one, hexahydro- (CAS)
60	15.189	3448750	0.35	Benzeneacetic acid, hexyl ester
61	15.287	621244	0.06	Ethyl 2,4-dioxovalerate
62	15.396	1399401	0.14	2-Buten-1-ol, acetate
63	15.569	2628510	0.27	3-Dimethylaminoacrylonitrile
64	15.747	1325612	0.13	
65	15.846	2752855	0.28	
66	16.239	674162	0.07	Octane, 1,1-diethoxy-
67	16.484	722694	0.07	Carbamimidiothioic acid, 1-methylethyl ester
68	16.817	24374303	2.48	Tridecane
69	16.921	765761	0.08	Acetic acid, trichloro-, 1,1-dimethylethyl ester (CAS)
70	16.994	1483026	0.15	2-Propylfuran
71	17.301	13410069	1.36	2-Methoxy-4-vinylphenol
72	17.449	3114058	0.32	Benzene, (2,2-diethoxyethyl)-
73	17.544	5435072	0.55	2-Methyltetrahydropyrazine
74	17.810	1096814	0.11	2,2,6-Trimethyl-6-(2-oxopropyl)tetrahydropyran
75	18.193	3069244	0.31	2,5-Dimethylhexane-2,5-dihydroperoxide
76	19.137	187570983	19.09	1,2,3-Benzenetriol
77	19.720	2833178	0.29	1-TETRADECENE
78	19.999	987560	0.10	Tetradecane
79	21.509	1549059	0.16	Benzaldehyde, 2-hydroxy-4-methyl-
80	23.411	2850300	0.29	Benzhydrazide, 4-hydroxy-N2-(4,5,6,7-tetrahydro-5-hydroximinobenzofurazan-
81	23.622	4204342	0.43	5-Phenyl-2-pentene
82	24.053	750250	0.08	
83	24.147	7000281	0.71	Tetradecane (CAS)
84	24.426	24557546	2.50	
85	24.513	13062949	1.33	.beta.-D-Glucopyranose, 1,6-anhydro-
86	26.407	1501145	0.15	Decanoic acid (CAS)
87	26.472	1105645	0.11	Isobutyl-2-heptenone

Peak#	R.Time	Area	Area%	Name
88	27.468	2515746	0.26	Diethyl Phthalate
89	27.573	2007613	0.20	Diethyl Phthalate
90	27.651	2172773	0.22	Cetene
91	27.907	633552	0.06	Hexadecane
92	28.778	1149876	0.12	Cyclooctasiloxane, hexadecamethyl-
93	31.306	847618	0.09	Octadecane (CAS)
94	33.479	1222545	0.12	Tetradecanoic acid
95	34.088	1272888	0.13	3-Isopropyl-6a,10b-dimethyl-8-phenethyldodecahydrobenzo[f]chromen-7-one
96	34.250	2859316	0.29	Cyclononasiloxane, octadecamethyl-
97	34.743	676070	0.07	1-Octadecene
98	34.847	475806	0.05	9,12,15-Octadecatrienoic acid, phenylmethyl ester, (Z,Z,Z)-
99	34.960	355443	0.04	Heptadecane
100	35.204	1714442	0.17	Benzoic acid, 4-hydroxy-3,5-dimethoxy-
101	37.022	1160709	0.12	3-Hydroxy-4-methoxycinnamic acid
102	37.526	494012	0.05	Carbonic acid, ethyl tetradecyl ester
103	38.094	696098	0.07	Nonadecane
104	38.328	2620923	0.27	7,9-Di-tert-butyl-1-oxaspiro(4,5)deca-6,9-diene-2,8-dione
105	38.403	702769	0.07	Decane, 1-iodo-
106	38.552	839044	0.09	10-Benzyloxytricyclo[4.4.0.0(3,8)]decan-4-ol
107	38.762	5988226	0.61	Hexadecanoic acid, methyl ester
108	39.553	788422	0.08	Octadecane (CAS)
109	39.699	10572279	1.08	Palmitic acid
110	40.550	417272	0.04	1-Nonadecene (CAS)
111	40.703	967153	0.10	Eicosane
112	41.877	443427	0.05	3-(2-Butenyl)-2-cyclohepten-1-one
113	42.142	2373513	0.24	EICOSAMETHYLCYCLODECASILOXANE
114	42.275	446858	0.05	9,12,15-Octadecatrienoic acid, phenylmethyl ester, (Z,Z,Z)-
115	42.581	8032245	0.82	1-Octadecanol (CAS)
116	42.745	9091407	0.93	9,12-Octadecadienoic acid (Z,Z)-, methyl ester (CAS)
117	42.878	36005105	3.66	9-Octadecenoic acid (Z)-, methyl ester
118	42.991	1491667	0.15	10-Octadecenoic acid, methyl ester
119	43.313	618616	0.06	Tetracosane
120	43.382	954161	0.10	Methyl stearate
121	44.065	1453669	0.15	Octadecanoic acid
122	44.119	1400526	0.14	Docosane (CAS)
123	44.656	585012	0.06	1-Hexacosene
124	44.742	4188543	0.43	SILICONE OIL
125	46.412	6878231	0.70	acrylic acid tetradecanyl ester
126	46.520	4986864	0.51	cis-11-Eicosenoic acid, methyl ester
127	47.010	4207506	0.43	1H-Purin-6-amine, [(2-fluorophenyl)methyl]- (CAS)
128	47.507	3322402	0.34	
129	47.651	491675	0.05	Citronellol epoxide (R or S)
130	48.240	671703	0.07	Tetracosane
131	49.266	6814806	0.69	1H-Purin-6-amine, [(2-fluorophenyl)methyl]- (CAS)
132	49.856	2477664	0.25	Heptadecyl alcohol
133	49.938	1113350	0.11	Heptadecane
134	50.024	2684248	0.27	13-Docosenoic acid, methyl ester, (Z)-
135	50.559	1343110	0.14	1,2-Benzenedicarboxylic acid, bis(2-ethylhexyl) ester (CAS)
136	51.410	8694535	0.88	1H-Purin-6-amine, [(2-fluorophenyl)methyl]- (CAS)
137	53.183	1809883	0.18	Heptacosane
138	53.443	10171315	1.04	1H-Purin-6-amine, [(2-fluorophenyl)methyl]- (CAS)
139	53.957	1576744	0.16	1,3-Benzenedicarboxylic acid, bis(2-ethylhexyl) ester
140	55.031	2684595	0.27	Squalene
141	55.353	10463634	1.06	1H-Purin-6-amine, [(2-fluorophenyl)methyl]- (CAS)
142	55.936	570222	0.06	Pentafluoropropionic acid, heptadecyl ester
143	56.268	4897695	0.50	Hexacosane
144	57.285	9495237	0.97	GC septum bleed P1362
145	59.407	8895626	0.91	GC septum bleed P1362
146	59.728	4992464	0.51	Hexacosane
147	60.462	688317	0.07	

Peak#	R.Time	Area	Area%	Name
148	61.437	1848698	0.19	Octadecanoic acid, hexyl ester
149	61.850	8255134	0.84	GC septum bleed P1362
150	64.755	6617714	0.67	GC septum bleed P1362
		982664715	100.00	



BOZOK ÜNİVERSİTESİ

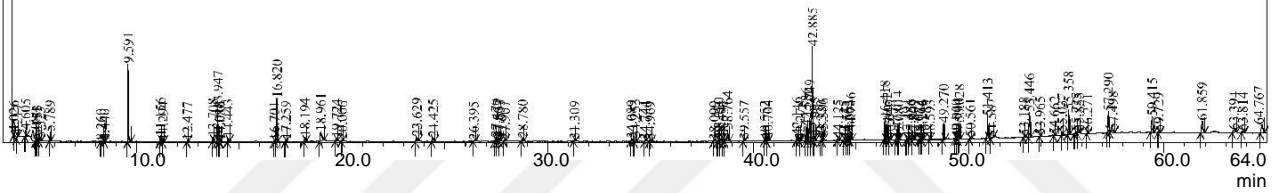
BİLİM VE TEKNOLOJİ UYGULAMA VE ARAŞTIRMA MERKEZİ

02112016

Chromatogram P2 C:\GCMSsolution\Data\Project1\Esential oil\P2\_8.qgd

TIC

1A50,925,071analyzed : 21.07.2014 13:05:28  
 Sample Name :  
 Data File : C:\GCMSsolution\Data\Esterols\Valid SCAN 3 mix 10000 1.qgd



Peak Report TIC

Peak#	R.Time	Area	Area%	Name
1	4.026	980274	0.24	ACETIC ACID
2	4.217	878491	0.21	Propane, 1,1-diethoxy- (CAS)
3	4.605	1602170	0.39	Silane, dimethoxydimethyl-
4	5.080	211262	0.05	Pentanenitrile
5	5.153	1583846	0.38	Propanal, 3-ethoxy- (CAS)
6	5.323	1220738	0.29	Capronaldehyde
7	5.789	2971122	0.72	2-Pentanone, 4-hydroxy-4-methyl- (CAS)
8	8.260	271420	0.07	2,4-Dihydroxy-2,5-dimethyl-3(2H)-furan-3-one
9	8.440	316130	0.08	1-Decene (CAS)
10	9.591	38169943	9.22	2-Pyrrolidinone, 1-methyl-
11	11.156	2491561	0.60	Hendecane
12	11.294	568465	0.14	Nonanal
13	12.477	399329	0.10	4H-Pyran-4-one, 2,3-dihydro-3,5-dihydroxy-6-methyl-
14	13.708	1978039	0.48	1-Dodecene
15	13.947	15335974	3.71	Dodecane (CAS)
16	14.018	649563	0.16	.alpha.-Terpineol
17	14.080	270156	0.07	2,5-Dimethylhexane-2,5-dihydroperoxide
18	14.443	2217647	0.54	2,3-DIHYDRO-BENZOFURAN
19	16.701	732837	0.18	2(5H)-Furanone, 3,5,5-trimethyl-
20	16.820	23930431	5.78	Tridecane
21	17.259	1016156	0.25	5-Acetoxytridecane
22	18.194	2702717	0.65	2,5-Dimethylhexane-2,5-dihydroperoxide
23	18.961	10160548	2.46	1,2,3-Benzenetriol
24	19.724	2108008	0.51	1-Tridecene
25	20.006	635012	0.15	Tetradecane
26	23.629	3688684	0.89	1,1-Dibenzoyloxy-4,4-dimethyl-2-pentyne
27	24.425	3214867	0.78	Phenol, 2,6-bis(1,1-dimethylethyl)-4-methyl- (CAS)

Peak#	R.Time	Area	Area%	Name
28	26.395	655901	0.16	9-Octadecenoic acid (Z)-, phenylmethyl ester
29	27.470	2589855	0.63	Phthalate <diethyl->
30	27.567	2350626	0.57	1,2-Benzenedicarboxylic acid, diethyl ester (CAS)
31	27.653	1591895	0.38	Cetene
32	27.907	639897	0.15	Hexadecane (CAS)
33	28.780	1731978	0.42	Cyclooctasiloxane, hexadecamethyl-
34	31.309	800672	0.19	Hexadecane
35	34.089	1540015	0.37	3-Isopropyl-6a,10b-dimethyl-8-phenethyldodecahydrobenzo[f]chromen-7-one
36	34.253	3124178	0.75	Cyclononasiloxane, octadecamethyl-
37	34.744	527914	0.13	1-Octadecene
38	34.969	714696	0.17	Nonadecane (CAS)
39	38.099	631270	0.15	Nonadecane (CAS)
40	38.330	3240651	0.78	7,9-Di-tert-butyl-1-oxaspiro(4,5)deca-6,9-diene-2,8-dione
41	38.404	1001400	0.24	Docosane (CAS)
42	38.557	930492	0.22	10-Benzyloxytricyclo[4.4.0.0(3,8)]decan-4-ol
43	38.764	8484126	2.05	Hexadecanoic acid, methyl ester
44	39.557	865052	0.21	Eicosane
45	40.552	396201	0.10	Cyclooctacosane
46	40.704	1138785	0.28	Docosane (CAS)
47	42.146	2802613	0.68	EICOSAMETHYLCYCLODECASILOXANE
48	42.278	359964	0.09	6,9,12-Octadecatrienoic acid, phenylmethyl ester, (Z,Z,Z)-
49	42.586	8386175	2.03	1-Octadecanol (CAS)
50	42.749	13796351	3.33	9,12-Octadecadienoic acid (Z,Z)-, methyl ester
51	42.885	58649264	14.17	9-Octadecenoic acid (Z)-, methyl ester
52	42.995	2681790	0.65	9-Octadecenoic acid, methyl ester, (E)-
53	43.320	772057	0.19	Docosane (CAS)
54	43.386	1659554	0.40	Methyl stearate
55	44.125	1140203	0.28	Eicosane
56	44.425	286279	0.07	Octadecane (CAS)
57	44.563	271575	0.07	7-Hexadecenal, (Z)-
58	44.663	654840	0.16	9-Tricosene, (Z)-
59	44.746	5230318	1.26	SILICONE OIL
60	46.418	11920003	2.88	acrylic acid tetradecanyl ester
61	46.527	9930593	2.40	cis-11-Eicosenoic acid, methyl ester
62	46.640	391809	0.09	Cyclopropaneoctanoic acid, 2-hexyl-, methyl ester
63	47.014	6743823	1.63	1H-Purin-6-amine, [(2-fluorophenyl)methyl]- (CAS)
64	47.080	399563	0.10	Octadecane (CAS)
65	47.494	1006338	0.24	Benzyl butyl phthalate
66	47.656	1266202	0.31	3-Hexadecanol
67	47.809	793192	0.19	Docosane (CAS)
68	48.073	151402	0.04	
69	48.164	175943	0.04	Heptadecyl trifluoroacetate
70	48.246	576718	0.14	Tetracosane
71	48.593	493967	0.12	Oleoyl chloride
72	49.270	9590000	2.32	1H-Purin-6-amine, [(2-fluorophenyl)methyl]- (CAS)
73	49.860	611085	0.15	n-Pentadecanol
74	49.944	860367	0.21	Tetratetracontane
75	50.028	9135111	2.21	13-Docosenoic acid, methyl ester, (Z)-
76	50.561	1035196	0.25	Diisooctyl phthalate
77	51.413	12777851	3.09	1H-Purin-6-amine, [(2-fluorophenyl)methyl]- (CAS)
78	51.587	60253	0.01	Heneicosane
79	53.188	751105	0.18	Tetracosane
80	53.446	14495945	3.50	1H-Purin-6-amine, [(2-fluorophenyl)methyl]- (CAS)
81	53.965	455536	0.11	1,3-Benzenedicarboxylic acid, bis(2-ethylhexyl) ester
82	54.662	457624	0.11	Octadecane (CAS)
83	55.037	1955004	0.47	Squalene
84	55.358	14967809	3.62	1H-Purin-6-amine, [(2-fluorophenyl)methyl]- (CAS)
85	55.725	2356725	0.57	GC septum bleed P1362
86	55.855	1587880	0.38	GC septum bleed P1362
87	56.271	862172	0.21	Octacosane

Peak#	R.Time	Area	Area%	Name	
88	57.290	14234519	3.44	GC septum bleed	P1362
89	57.498	4470836	1.08	GC septum bleed	P1362
90	59.415	12941011	3.13	GC septum bleed	P1362
91	59.729	721117	0.17	Hexatriacontane (CAS)	
92	61.859	11438973	2.76	GC septum bleed	P1362
93	63.394	3552657	0.86	GC septum bleed	P1362
94	63.814	1434043	0.35		
95	64.767	9262045	2.24	GC septum bleed	P1362
		413816394	100.00		



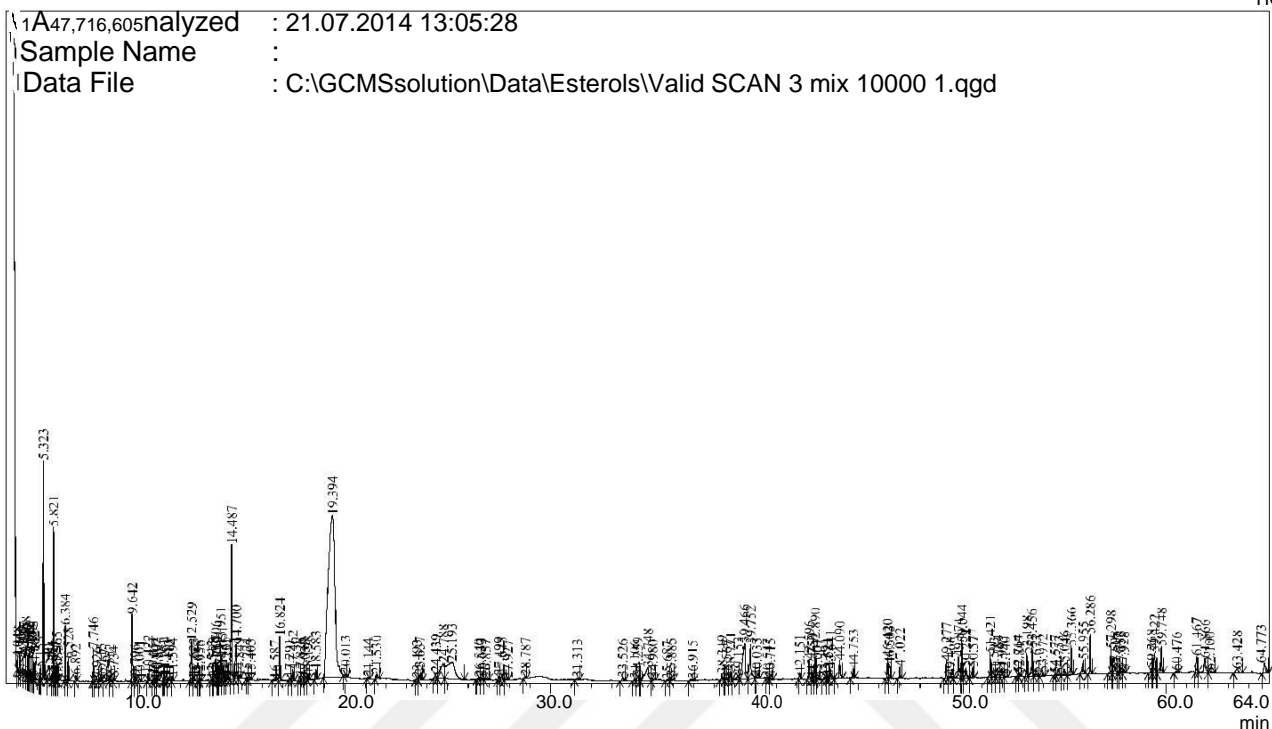
# BOZOK ÜNİVERSİTESİ

## BİLİM VE TEKNOLOJİ UYGULAMA VE ARAŞTIRMA MERKEZİ

02112016

Chromatogram P2-A C:\GCMSsolution\Data\Project1\Esential oil\P2-A\_5.qgd

TIC



Peak Report TIC

Peak#	R.Time	Area	Area%	Name
1	4.048	3134808	0.13	Acetic acid
2	4.166	7074273	0.29	Ethyl(dimethyl)ethoxysilane
3	4.300	20764982	0.85	Propane, 2,2-diethoxy-
4	4.377	28059357	1.15	4-Ethoxy-2-butanone
5	4.468	29651356	1.22	Propanoic acid, 2-oxo-
6	4.547	7015487	0.29	Propanamide, 2-methoxy-N-methyl-
7	4.622	24609738	1.01	Propane, 2,2-diethoxy- (CAS)
8	4.676	15148263	0.62	Ethane, 1,1-diethoxy- (CAS)
9	4.763	20060726	0.83	1-Propanol, 3-ethoxy- (CAS)
10	4.803	20301055	0.84	Ethylidene acetone
11	4.882	5490867	0.23	4-Penten-2-one, 4-methyl- (CAS)
12	5.155	4247253	0.17	Formamide, N,N-dimethyl-
13	5.323	76385547	3.14	3-Penten-2-one, 4-methyl- (CAS)
14	5.540	2597000	0.11	2-Pentanone, 4-hydroxy-
15	5.751	3577330	0.15	2-FURANCARBOXALDEHYDE
16	5.821	62924672	2.59	2-Pentanone, 4-hydroxy-4-methyl- (CAS)
17	5.927	3953175	0.16	Maleic anhydride
18	5.965	6827738	0.28	Methyl Isobutyl Ketone
19	6.035	2485170	0.10	Propanoic acid, 2-hydroxy- (CAS)
20	6.384	19771666	0.81	5-Hexen-2-one (CAS)
21	6.528	7832268	0.32	4-Ethoxy-2-pentanone
22	6.892	2946961	0.12	2H-Pyran, 2-(ethylthio)tetrahydro-
23	7.746	12544347	0.52	2-Butanol, 2,3-dimethyl-, acetate
24	7.926	2664996	0.11	Hydroperoxide, 1-ethylbutyl
25	8.113	3962755	0.16	Oxybenzene
26	8.267	1343350	0.06	4,5-DIMETHYL-2-ISOBUTYLOXAZOLE
27	8.552	3329598	0.14	2H-Pyran-2,6(3H)-dione

Peak#	R.Time	Area	Area%	Name
28	8.734	1466660	0.06	4 - hydroxy - 5,6 - dihydro - (2H) - pyran - 2 - one
29	9.642	44525518	1.83	2-Pyrrolidinone, 1-methyl-
30	9.796	3575434	0.15	Pentanoic acid, 4-oxo-
31	10.001	1947023	0.08	2-Furancarboxylic acid (CAS)
32	10.422	3280136	0.13	2-Furaldehyde diethyl acetal
33	10.651	3499448	0.14	Butanoic acid, 3-oxo-, ethyl ester (CAS)
34	10.802	2459344	0.10	5-METHYL-2-FURFURYL MERCAPTAN
35	10.897	3315768	0.14	Ethyl 2,2-diethoxypropionate
36	11.161	1232363	0.05	Henecane
37	11.234	4100354	0.17	Cyclopentan-1,2-dione <3,4-dimethyl->
38	11.413	2526592	0.10	
39	11.594	2142763	0.09	Levoglucosenone
40	12.529	26114473	1.07	4H-Pyran-4-one, 2,3-dihydro-3,5-dihydroxy-6-methyl-
41	12.623	2704087	0.11	2-Azaquinolidone-3
42	12.858	2295424	0.09	Pentaethylene glycol
43	12.956	1239926	0.05	1,2-Dioxolan-3-one, 5-methyl-4-methylene-
44	13.513	1633726	0.07	3-Ethoxy-1,2-propanediol
45	13.598	2928989	0.12	4H-Pyran-4-one, 3,5-dihydroxy-2-methyl-
46	13.706	17620132	0.72	2-Acetyl-octanoic acid, ethyl ester
47	13.767	2655926	0.11	1-(4-Fluorophenyl)-2-methyl-2-propanol
48	13.819	4211370	0.17	Propane, 2-methyl-1-(propylthio)-
49	13.951	19538265	0.80	Dodecane (CAS)
50	14.051	13416165	0.55	Ethyl hydrogen fumarate
51	14.165	2609046	0.11	
52	14.251	1500852	0.06	
53	14.487	94395856	3.88	2,3-DIHYDRO-BENZOFURAN
54	14.700	27580506	1.13	Hydroxy methyl furfural
55	14.849	1556789	0.06	2H-Azepin-2-one, hexahydro- (CAS)
56	15.224	1388032	0.06	Propanedioic acid, phenyl-
57	15.403	1414743	0.06	Acetic acid, hexyl ester (CAS)
58	16.587	1760167	0.07	Malic Acid
59	16.824	24614834	1.01	Tridecane
60	17.291	1783572	0.07	1-(1'-ACETYL)-2-(2-OXOPROPYL)CYCLOPENTANONE
61	17.462	6599935	0.27	Benzene, (2,2-diethoxyethyl)-
62	17.828	3982772	0.16	7-Octen-3-ol, 2,3,6-trimethyl-
63	17.940	5957402	0.25	4-Heptanone, 2,3:5,6-diepoxy-2,6-dimethyl-
64	18.033	4568323	0.19	
65	18.198	3739685	0.15	2,5-Dimethylhexane-2,5-dihydroperoxide
66	18.583	6066616	0.25	Phenol, 2-methoxy-3-(2-propenyl)-
67	19.394	815833384	33.57	1,2,3-Benzenetriol (CAS)
68	20.013	1537013	0.06	Hexadecane
69	21.144	1485948	0.06	2-Propenoic acid, 3-phenyl- (CAS)
70	21.530	4713274	0.19	Benzaldehyde <2-hydroxy-, 4-methyl->
71	23.493	2488948	0.10	2H-1-Benzopyran-2-one, 6-hydroxy-
72	23.637	5312706	0.22	5,8,11,14-Eicosatetraenoic acid, phenylmethyl ester, (all-Z)-
73	24.439	6393058	0.26	Phenol, 2,6-bis(1,1-dimethylethyl)-4-methyl- (CAS)
74	24.788	48394670	1.99	Salicylic acid <para->
75	25.193	105169284	4.33	D-Allose
76	26.540	2107862	0.09	6-Methyl-5-hepten-2-one
77	26.633	2726162	0.11	Benzoic acid, 4-hydroxy-3-methoxy-
78	26.857	2081469	0.09	Isobutyl-2-heptenone
79	27.499	3454771	0.14	Diethyl Phthalate
80	27.645	5093824	0.21	1,2-Benzenedicarboxylic acid, diundecyl ester
81	27.927	1537725	0.06	Hexadecane (CAS)
82	28.787	1801681	0.07	Cyclooctasiloxane, hexadecamethyl-
83	31.313	2066104	0.09	Docosane (CAS)
84	33.526	2690231	0.11	Tetradecanoic acid (CAS)
85	34.106	1510614	0.06	LIMONENE DIOXIDE 4
86	34.259	4128296	0.17	Cyclononasiloxane, octadecamethyl-
87	34.748	33565266	1.38	2-Propenoic acid, 3-(4-hydroxyphenyl)- (CAS)



Peak#	R.Time	Area	Area%	Name
88	34.980	2115589	0.09	Octadecane (CAS)
89	35.687	1786971	0.07	Isopropyl myristate
90	35.885	3027029	0.12	p-Hydroxycinnamic acid, ethyl ester
91	36.915	2273104	0.09	1,2-Benzenedicarboxylic acid, bis(2-methylpropyl) ester (CAS)
92	38.349	5238458	0.22	7,9-Di-tert-butyl-1-oxaspiro(4,5)deca-6,9-diene-2,8-dione
93	38.567	2396346	0.10	
94	38.771	7463884	0.31	1H-Purin-6-amine, [(2-fluorophenyl)methyl]- (CAS)
95	39.153	7809252	0.32	Oleic Acid
96	39.466	78568130	3.23	Ethyl gallate
97	39.752	44439490	1.83	n-Hexadecanoic acid
98	40.033	3004461	0.12	Nonane, 5-(1-methylpropyl)-
99	40.547	1242779	0.05	1-Octadecanethiol (CAS)
100	40.715	1859957	0.08	Docosane (CAS)
101	42.151	3593926	0.15	EICOSAMETHYLCYCLODECASILOXANE
102	42.596	11887271	0.49	1-Hexadecanol
103	42.759	4901438	0.20	9,12-Octadecadienoic acid (Z,Z)-, methyl ester (CAS)
104	42.890	20116801	0.83	9-Octadecenoic acid (Z)-, methyl ester
105	43.007	1218257	0.05	10-Octadecenoic acid, methyl ester
106	43.394	2241545	0.09	Methyl stearate
107	43.521	2332537	0.10	9,12-Octadecadienoic acid (Z,Z)-
108	43.641	8259828	0.34	cis,cis,cis-7,10,13-Hexadecatrilal
109	44.090	17107801	0.70	Octadecanoic acid
110	44.753	6421545	0.26	1H-Purin-6-amine, [(2-fluorophenyl)methyl]- (CAS)
111	46.420	12023569	0.49	2-Propenoic acid, pentadecyl ester
112	46.503	13468661	0.55	Hexacosane
113	47.022	7751898	0.32	1H-Purin-6-amine, [(2-fluorophenyl)methyl]- (CAS)
114	49.277	10311561	0.42	1H-Purin-6-amine, [(2-fluorophenyl)methyl]- (CAS)
115	49.468	3236025	0.13	Hexadecanoic acid (CAS)
116	49.874	23514466	0.97	1-Heneicosanol
117	50.044	22419784	0.92	13-Docosenoic acid, methyl ester, (Z)-
118	50.221	9340985	0.38	Hexadecanoic acid, 2-hydroxy-1-(hydroxymethyl)ethyl ester
119	50.577	7278457	0.30	1,2-Benzenedicarboxylic acid, bis(2-ethylhexyl) ester (CAS)
120	51.421	14713768	0.61	1H-Purin-6-amine, [(2-fluorophenyl)methyl]- (CAS)
121	51.593	1848559	0.08	Octadecane
122	51.784	6451354	0.27	GC septum bleed P1362
123	51.993	5219755	0.21	Stigmast-4-en-3-one
124	52.140	1526923	0.06	.beta.-Amyrin
125	52.764	2615385	0.11	9-Hexacosene
126	52.847	1584218	0.07	Trifluoroacetoxy hexadecane
127	53.198	13168090	0.54	Hexacosane
128	53.456	20277649	0.83	1H-Purin-6-amine, [(2-fluorophenyl)methyl]- (CAS)
129	53.673	3378026	0.14	Tetracosanoic acid, methyl ester (CAS)
130	53.972	2357462	0.10	1,3-Benzenedicarboxylic acid, bis(2-ethylhexyl) ester
131	54.577	1189597	0.05	
132	54.753	1994416	0.08	Tetracosane
133	55.046	4114926	0.17	Squalene
134	55.366	18532813	0.76	1H-Purin-6-amine, [(2-fluorophenyl)methyl]- (CAS)
135	55.955	12569253	0.52	Octacosanol
136	56.286	24937075	1.03	Hexacosane
137	57.298	18674874	0.77	GC septum bleed P1362
138	57.508	7015874	0.29	GC septum bleed P1362
139	57.647	1185170	0.05	Docosanoic acid
140	57.753	2514255	0.10	Octadecanoic acid, butyl ester (CAS)
141	57.928	2075308	0.09	Nonacosane
142	59.268	4251288	0.17	Octacosanol
143	59.422	20647690	0.85	GC septum bleed P1362
144	59.748	21465776	0.88	Tetratetracontane
145	60.476	1520000	0.06	Clionasterol -H2O @P1182
146	61.467	13035794	0.54	Octadecanoic acid, hexyl ester
147	61.866	18852422	0.78	GC septum bleed P1362

Peak#	R.Time	Area	Area%	Name
148	62.100	4005743	0.16	
149	63.428	7238849	0.30	GC septum bleed P1362
150	64.773	12133192	0.50	GC septum bleed P1362
		2430493353	100.00	



BOZOK ÜNİVERSİTESİ

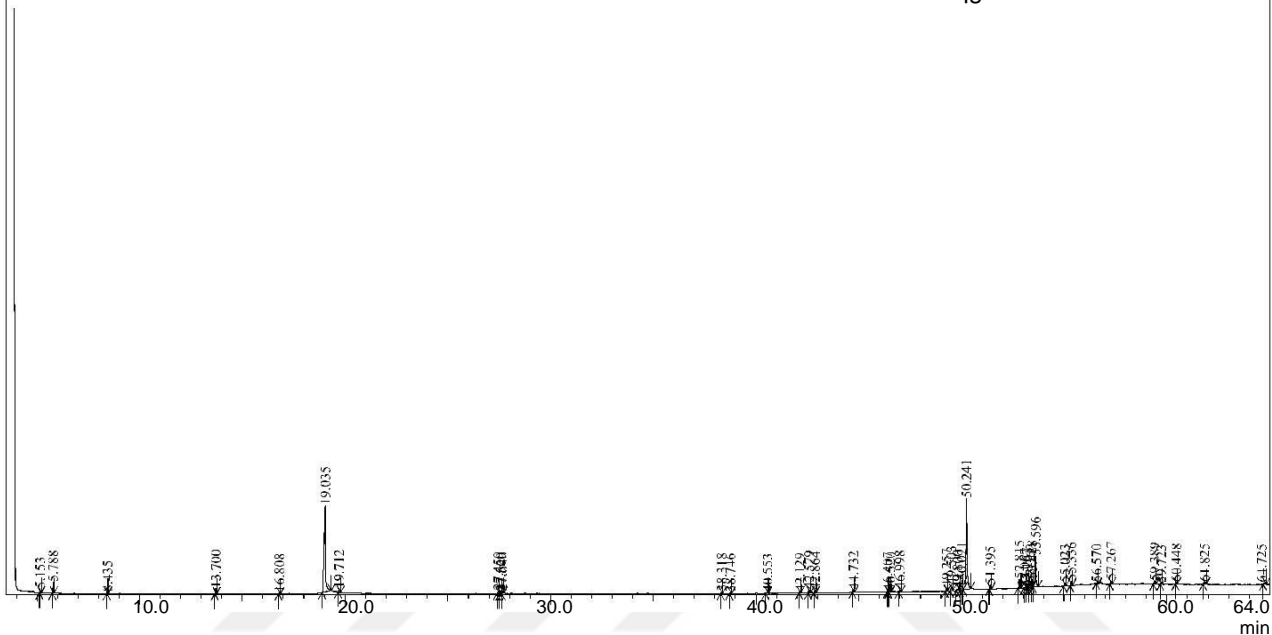
BİLİM VE TEKNOLOJİ UYGULAMA VE ARAŞTIRMA MERKEZİ

02112016

Chromatogram Galic acid st C:\GCMSsolution\Data\Project1\Esential oil\Galic acid st\_22.qgd

TIC

1A61,652,214analyzed : 21.07.2014 13:05:28  
 Sample Name :  
 Data File : C:\GCMSsolution\Data\Esterols\Valid SCAN 3 mix 10000 1.qgd



Peak Report TIC

Peak#	R.Time	Area	Area%	Name
1	5.153	1516335	0.47	Propanal, 3-ethoxy- (CAS)
2	5.788	3814254	1.19	2-Pentanone, 4-hydroxy-4-methyl- (CAS)
3	8.435	418140	0.13	1-Decene
4	13.700	2562443	0.80	1-Dodecene
5	16.808	730578	0.23	Tridecane
6	19.035	110721181	34.59	1,2,3-Benzenetriol
7	19.712	2285912	0.71	1-Tridecene
8	27.459	2185719	0.68	Diethyl Phthalate
9	27.560	1698131	0.53	1,2-Benzenedicarboxylic acid, diethyl ester (CAS)
10	27.640	1814704	0.57	E-15-Heptadecenal
11	38.318	1007777	0.31	7,9-Di-tert-butyl-1-oxaspiro(4,5)deca-6,9-diene-2,8-dione
12	38.746	623829	0.19	EICOSAMETHYLCYCLODECASILOXANE
13	40.553	826914	0.26	
14	42.129	623092	0.19	EICOSAMETHYLCYCLODECASILOXANE
15	42.579	2335987	0.73	1-Octadecanol (CAS)
16	42.864	1429135	0.45	9-Octadecenoic acid (Z)-, methyl ester
17	44.732	1331460	0.42	SILICONE OIL
18	46.407	479607	0.15	1-Hexadecanol (CAS)
19	46.520	688914	0.22	CIS-10-HEPTADECENOIC ACID ME
20	46.998	1551132	0.48	EICOSAMETHYLCYCLODECASILOXANE
21	49.257	2252222	0.70	1H-Purin-6-amine, [(2-fluorophenyl)methyl]- (CAS)
22	49.503	4076752	1.27	
23	49.800	4197731	1.31	
24	50.021	14104347	4.41	Hexanoic acid, octadecyl ester
25	50.241	90974111	28.42	Hexadecanoic acid, 2-hydroxy-1-(hydroxymethyl)ethyl ester
26	51.395	2700351	0.84	1H-Purin-6-amine, [(2-fluorophenyl)methyl]- (CAS)
27	52.815	5817477	1.82	

Peak#	R.Time	Area	Area%	Name
28	53.067	415640	0.13	
29	53.167	795262	0.25	
30	53.360	5343595	1.67	
31	53.428	7102129	2.22	1H-Purin-6-amine, [(2-fluorophenyl)methyl]- (CAS)
32	53.596	28226722	8.82	Octadecanoic acid, 2,3-dihydroxypropyl ester
33	55.023	2206848	0.69	Squalene
34	55.336	3037326	0.95	1H-Purin-6-amine, [(2-fluorophenyl)methyl]- (CAS)
35	56.570	489228	0.15	
36	57.267	2415837	0.75	GC septum bleed P1362
37	59.389	2489140	0.78	GC septum bleed P1362
38	59.723	390537	0.12	
39	60.448	1284818	0.40	Clionasterol -H2O @P1182
40	61.825	1830589	0.57	GC septum bleed P1362
41	64.725	1308780	0.41	GC septum bleed P1362
		320104686	100.00	



## ÖZGEÇMİŞ



1984 yılında Elazığ'da doğan Mücella ÖZBAY KARAKUŞ, orta öğrenimini Elazığ Anadolu Lisesinde tamamladıktan sonra 2002 yılında kazandığı Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nü 2007 yılında başarıyla bitirmiştir.

2008 yılında yüksek lisans eğitimine Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında başlamıştır. Yrd. Doç. Dr. Melih Cevdet İNCE danışmanlığında hazırladığı “GÖRÜNTÜ İYİLEŞTİRME VE ONARMA TEKNİKLERİ” başlıklı teziyle 2010 yılında mezun olmuştur.

2008-2012 yılları arasında Ahi Evran Üniversitesi Kaman M. Y. O.'da, 2012 yılından bu yana da Bozok Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümünde Öğretim Görevlisi olarak çalışmakta olan Mücella ÖZBAY KARAKUŞ, evli ve 1 çocuk annesidir.

Yaptığı çalışmalar hakkında detaylı bilgi aşağıdaki başlıklar altında sıralanmaktadır.

### Uluslar Arası Bildiriler

1. ÖZBAY KARAKUŞ M., ÖNEN T., ÇETİN H., “Organic Dyes For TiO<sub>2</sub> Dye-Sensitized Solar Cells”, BSW 2016 Fifth Bozok Science Workshop: Nano Carbon Materials and Their Applications, (sözlü bildiri, pp.23), Yozgat, Türkiye, Nisan 2016.
2. ÖZBAY KARAKUŞ M., KOCA İ., KOCA A., GÜMÜŞ M., ER O., ÇETİN H., “Dyes Extracted From Pelargonium Flowers: A Solar Cell Application and Dyes Ingredients Analysis Study”, First International Underground Resources and Energy Conference, pp.65, 2016.
3. ÖNEN T., ÖZBAY KARAKUŞ M., COŞKUN R., EREN YAKIŞIKLIER M., ÇETİN H., “New Type Gels for Dye Sensitized Solar Cells”, First International Underground Resources and Energy Conference, pp.63, 2016.
4. ÖZBAY KARAKUŞ M., ÇETİN H., “A New Natural Dye Source-Pelargonium Flowers For Dye-Sensitized Solar Cells”, 9th International Physics Conference of the Balkan Physical Union (BPU'9), (sözlü bildiri, pp. 226), İstanbul, Türkiye, Ağustos 2015.
5. ÖZBAY KARAKUŞ M., ÇETİN H., “CO Sensing Properties of Polyaniline-Based Sensor”, 9th International Physics Conference of the Balkan Physical Union (BPU'9), (sözlü bildiri, pp. 255), İstanbul, Türkiye, Ağustos 2015.

6. ÖZBAY KARAKUŞ M., ER O., “Learning of Robot Navigation Tasks By Probabilistic Neural Network”, ICAITA ‘2013 Second International Conference on Advanced Information Technologies and Applications, (sözlü bildiri, pp. 23-34, ISSN: 2231-5403, ISBN: 978-1-921987-15-1, DOI: 10.5121/csit.2013.3803), Dubai, Birleşik Arap Emirlikleri, Kasım 2013.
7. ÖZBAY KARAKUŞ M., UMYOS’ 11 (2. Uluslar arası 6. Ulusal Meslek Yüksekokulları Sempozyumu 2011), Teknik Laboratuvar Çalışmalarında Mikrodenetleyici Deney Seti Kullanımının Önemi, (Sözlü Bildiriler No:178), Mayıs 2011, Aydın, Türkiye.
8. ÖZBAY KARAKUŞ M., ÖZBAY E., 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS’11), “Visual C# İle Görüntü İşleme Üzerine Yeni Bir Uygulama”, (sözlü bildiri, Electrical and Electronics Papers, pp. 110-113), Mayıs 2011, Elazığ, Türkiye.
9. ÖZBAY M., UĞUR L. O., UMYOS 2009 (1. Uluslar arası 5. Ulusal Meslek Yüksekokulları Sempozyumu 2009) “Meslek Yüksekokullarının Tanıtımında Bir Araç Olarak Web Sitesi Kullanımı: Kaman MYO Uygulama Örneği “ sözlü bildiri (bildiri özetleri kitabı cilt: 1, pp.516-518), Konya, Türkiye.

### **Ulusal Bildiriler**

1. ÖZBAY KARAKUŞ M., ER O., ALTIN C., YEKSEM ‘2013 Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, “Su Altı Akıntısından Faydalanarak Elektrik Enerjisi Üretilirliği”, (sözlü bildiri, s. 14.), Ekim 2013, Girne, Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti.
2. ÖZBAY KARAKUŞ M., ALTIN C., ER O., TOK ‘2012 Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi Ulusal Toplantısı, “Yapay Sinir Ağları ile Banka Pazarlama Kampanyalarının Performans Tahmini”, (sözlü bildiri, s. 14, pp. 1001-1004), Eylül 2013, Malatya, Türkiye.
3. ALTIN C., BAŞÇIL M.S., ÖZBAY KARAKUŞ M., ER O., ELECO ‘2012 Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, “Sentetik Açıklıklı Odaklanma Tekniği ile Ultrasonik Konum Netleştirme-Ultrasonic Location Clarification Using Synthetic Aperture Focusing Technique”, (poster bildiri, s. 14, pp. 650-653), Kasım 2012, Bursa, Türkiye.
4. ALTIN C., BAŞÇIL M.S., ÖZBAY KARAKUŞ M., ER O., Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, “Akıllı Sulama Sistemi”, (sözlü bildiri, s. 13, pp. 235-238), Ekim 2012, Niğde Üniversitesi, Niğde, Türkiye.
5. ALTIN C., ÖZBAY KARAKUŞ M., ER O., İlk Bildiriler Konferansı, “Kalman Filtresi ve LQG Kontrolcüsü ile Esnek Eklem Kontrolü”, (sözlü bildiri, s.1, pp. 63-67), Haziran 2012, Ankara, Türkiye.
6. ÖZBAY KARAKUŞ M., BSW 2012 Third Bozok Science Workshop: Computational Studies on Structure and Dynamics from Nuclei to Biological Molecules, “An Approach Based on Neural Network for Yield of Hydropower Plant Depend on the Climatic Data”, (poster bildiri, pp. 32), Mayıs 2012, Yozgat, Türkiye.
7. ÖZBAY KARAKUŞ M., Anadolu Enerji Sempozyumu, “Hidroelektrik Santrallerde Enerji Veriminin İklim Şartlarına Bağlı Olarak Değişiminin Yapay Sinir Ağıyla Analizi, Hirfanlı Barajı Uygulama Örneği”(sözlü bildiri, pp. 662-671), Haziran 2011, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye.

### **Proje Çalışmaları**

1. Boyayla Duyarlılaştırılmış Güneş Pillerinde Toplayıcı Elektrot Yapılarının Empedans Analiz Yöntemi İle İncelenmesi, Bozok Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projesi, Proje Kodu: 6602-c, Araştırmacı, (2017 - devam ediyor).
2. Bazı Polimer/Yarıiletken Heteroeklem Yapılarda Fotovoltaik Cihaz Tasarımı ve Aygıt Karakteristiklerinin Belirlenmesi, Bozok Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projesi, Proje No: 2014FBE/T143, Araştırmacı, (2014 - devam ediyor).
3. Organik Tabanlı Doğal Boyalardan Güneş Pili Üretimi ve Karakterizasyonu, Bozok Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projesi, Proje No: 2015FEF/A175, Araştırmacı, (2015-2016).

### **TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR**

#### **SCI Kapsamında Uluslar arası Hakemli Dergide Yayınlanan Makale**

1. ÖZBAY KARAKUŞ M., KOCA İ., ER O., ÇETİN H., “Dye Ingredients and Energy Conversion Efficiency at Natural Dye Sensitized Solar Cells”, Optical Materials 66, Pp.552-558, 2017.

### **Proje Çalışmaları**

2. Bazı Polimer/Yarıiletken Heteroeklem Yapılarda Fotovoltaik Cihaz Tasarımı ve Aygıt Karakteristiklerinin Belirlenmesi, Bozok Üniversitesi, **Bilimsel Araştırma Projesi**, Proje No: 2014FBE/T143, Araştırmacı, (2014 - devam ediyor).
3. Organik Tabanlı Doğal Boyalardan Güneş Pili Üretimi ve Karakterizasyonu, Bozok Üniversitesi, **Bilimsel Araştırma Projesi**, Proje No: 2015 FEF/A175, Araştırmacı, (2015-2016).

### **Uluslar Arası Bildiriler**

4. ÖZBAY KARAKUŞ M., KOCA İ., KOCA A., GÜMÜŞ M., ER O., ÇETİN H., “Dyes Extracted From Pelargonium Flowers: A Solar Cell Application and Dyes Ingredients Analysis Study”, First International Underground Resources and Energy Conference, pp.65, 2016.

### **İletişim Bilgileri**

Adres: Bozok Üniversitesi Erdoğan AKDAĞ Kampüsü, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü Divanlı Yolu 10. km.

66100 YOZGAT

Telefon: (354) 242 10 42

Faks: (354) 242 10 44

E-posta: mucella-ozbay@hotmail.com