

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BOYA DUYARLI GÜNEŞ PİLLERİNDE *BERBERIS VULGARIS*  
EKSTRAKTLARININ FOTODUYARLAŞTIRICI OLARAK  
KULLANIMLARININ İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mert CESUR**

**Enstitü Anabilim Dalı : KİMYA**

**Enstitü Bilim Dalı : ANALİTİK KİMYA**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. İlkay ŞİŞMAN**

**Haziran 2019**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BOYA DUYARLI GÜNEŞ PİLLERİNDE *BERBERIS VULGARIS*  
EKSTRAKTLARININ FOTODUYARLAŞTIRICI OLARAK  
KULLANIMLARININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mert CESUR

Enstitü Anabilim Dalı : KİMYA

Enstitü Bilim Dalı : ANALİTİK KİMYA

Bu tez ----- tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr.  
İlkay ŞİŞMAN

Doç. Dr.  
Mehmet NEBİOĞLU

Dr. Öğr. Üyesi  
Hülya DEMİRHAN

Jüri Başkanı

Üye

Üye

## **BEYAN**

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Mert CESUR

09.05.2019

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden ve aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Prof. Dr. İlkey ŞİŞMAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar olanakları konusunda anlayış ve yardımlarını esirgemeyen Sakarya Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Kimya Bölüm Başkanı Prof. Dr. Abdil ÖZDEMİR'e teşekkür ederim.

Son olarak, hayatım boyunca her türlü maddi ve manevi desteğini bir an olsun eksik etmeyen, sevgiyle beni yetiştiren annem Hatice CESUR'a, babam Halil CESUR'a, ablam Meltem CESUR'a, arkadaşlığı ve dostluğu ile çalışmalarına destek veren Açıya YÜKSEL'e ve yüksek lisans çalışmalarım süresince bana her konuda yardımcı olan ve bilgilerini esirgemeyen Ömer Faruk TUTAR'a tüm kalbimle teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışmanın maddi açıdan desteklenmesine olanak sağlayan Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Başkanlığına (Proje No: 2017-02-04-036) teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	v
TABLolar LİSTESİ.....	vi
ÖZET .....	vii
SUMMARY .....	viii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
GÜNEŞ ENERJİSİNİN TARİHSEL GELİŞİMİ.....	7
2.1. Güneş Pillerinin Tarihçesi.....	7
2.2. Güneş Pillerinin Kullanım Alanları .....	11
2.3. Güneş Pillerinin Sınıflandırılması.....	12
2.4. Boya Duyarlı Güneş Pillerinin Çalışma Prensipleri.....	12
2.5. Boya Duyarlı Güneş Filmlerinin Bileşenleri .....	15
2.5.1. Yarıiletken metaloksit film .....	16
2.5.2. Elektrolit çözeltisi .....	16
2.5.3. Boya maddeleri (duyarlaştırıcı) .....	17
2.5.4. Karşıt elektrot.....	18

BÖLÜM 3.	
MATERYAL VE YÖNTEM .....	19
3.1. Materyal .....	19
3.2. Yöntem.....	20
3.2.1. Kullanılan cihazlar .....	20
3.2.2. Boyar maddelerin ekstraksiyonu.....	20
3.2.3. Boya duyarlı güneş pillerini oluşturan tabakaların hazırlanması .....	21
3.2.3.1. Cam alt tabakaların temizlenmesi.....	21
3.2.3.2. TiO <sub>2</sub> yarıiletken tabakasının hazırlanması.....	21
3.2.3.3. Boya adsorpsiyonu.....	22
3.2.3.4. Karşıt elektrot.....	22
BÖLÜM 4.	
ARAŞTIRMA BULGULARI .....	23
4.1. Doğal Boyaların Optik ve Yapısal Karakterizasyonu.....	23
4.2. Doğal Boyaların Elektrokimyasal Özellikleri .....	25
4.3. BDGP' lerin Fotovoltaik Performansı.....	27
4.4. BDGP' lerin Stabilitesi.....	31
BÖLÜM 5.	
TARTIŞMA VE SONUÇ .....	34
KAYNAKLAR .....	36
ÖZGEÇMİŞ .....	41

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

BDGP	: Boya duyarlı güneşpili
CV	: Dönüşümlü voltametri
EDS	: Enerji dağılımlı x-ışını spektroskopisi
FTO	: Flor katkılanmış kalay oksit
IPCE	: Foton-akım verimi oranı
ITO	: İndiyum kalay oksit
N719	: Di-tetrabütülamonyum cis-bis(izotiyosiyanato)bis(2,2'-bipiridil- 4,4'-dikarboksilato)rutenyum(II)
UV	: Ultraviyole
A	: Absorbans
C	: Konsantrasyon
$\epsilon$	: Molar absorpsiyon katsayısı
FF	: Doluluk faktörü
$f_{max}$	: Maksimum frekans
$J_{max}$	: Maksimum akım
$J_{sc}$	: Kısa devre akımı
$\lambda$	: Işın dalga boyu
$l$	: Işın yolu uzunluğu
$P_{in}$	: Gelen ışın şiddeti
$V_{max}$	: Maksimum voltaj
$V_{oc}$	: Açık devre voltajı
EDV	: Enerji dönüşüm verimi
KTM	: Kadıntuzluğu meyvesi
KTK	: Kadıntuzluğu kökü

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Güneş enerjisinden elektrik üretim çeşitleri.....	6
Şekil 2.1.	Güneş pillerinin kullanım alanları.....	11
Şekil 2.2.	Boya duyarlı güneş pillerinin çalışma prensibinin şematik gösterimi.....	14
Şekil 3.1.	Kadıntuzluğu bitkisinin meyve ve kök kısımları.....	19
Şekil 4.1.	KTK ve KTM ekstraktlarının çözeltideki (düz çizgiler) ve TiO <sub>2</sub> filmi üzerindeki (kesikli çizgiler) absorpsiyon spektrumları.....	24
Şekil 4.2.	Antosiyaninin moleküler yapısı (a) ve berberin ile TiO <sub>2</sub> arasındaki muhtemel etkileşim (b).....	24
Şekil 4.3.	Kurutulmuş ekstraktların FT-IR spektrumları.....	25
Şekil 4.4.	Doğal boyaların 1. (düz çizgiler) ve 5. (noktalı çizgiler) tarama sonunda elde edilen dönüşümlü voltamogramları.....	26
Şekil 4.5.	Doğal boyaların, TiO <sub>2</sub> ve elektrolitin (I-/I <sub>3</sub> -) enerji seviyeleri.....	27
Şekil 4.6.	Doğal boyalardan üretilmiş BDGP'lerin J-V eğrileri.....	28
Şekil 4.7.	Doğal boyalardan üretilmiş BDGP'lerin IPCE eğrileri.....	28
Şekil 4.8.	N719'dan imal edilmiş BDGP'nin J-V eğrisi.....	29
Şekil 4.9.	BDGP'lerin Nyquist (a) and Bode (b) grafikleri.....	30
Şekil 4.10.	0, 60 ve 120 saat süresince simüle güneş ışığına maruz bırakılan TiO <sub>2</sub> üzerindeki doğal boyaların absorpsiyon spektrumları.....	31
Şekil 4.11.	TiO <sub>2</sub> fotoanot üzerine adsorbe edilmiş doğal boyaların 0 ve 120 saatlik ışına maruz bırakılmaları sonunda elde edilmiş dijital fotoğrafları.....	32
Şekil 4.12.	Belli sürelerde ışına maruz bırakılan BDGP'lerin ölçülen verimleri.....	32
Şekil 4.13.	BDGP'lerin 120 saatlik ışına sonrası oluşan J-V eğrileri.....	33



## TABLULAR LİSTESİ

Tablo 1.1. Enerji kaynaklarının sınıflandırılması.....	2
Tablo 4.1. Doğal boyaların optik ve elektrokimyasal özellikleri.....	23
Tablo 4.2. Doğal boyalardan yapılan BDGP'lerin fotovoltaiik parametreleri.....	29
Tablo 4.3. BDGP'lerin 120 saatlik ışımaya sonrası fotovoltaiik parametreleri.....	33



## ÖZET

Anahtar Kelimeler: Kadıntuzluğu, antosiyanin, alkaloid, yenilenebilir enerji, boya duyarlı güneş pilleri, kararlılık.

Kadıntuzluğu bitkisinin (*Berberis Vulgaris*) meyvesinden (KTM) ve kökünden (KTK) ekstrakte edilen doğal boyalar, boya duyarlı güneş pillerinde (BDGP) fotoduyarlaştırıcı olarak kullanılmıştır. Tüm ekstraktlar saflaştırma ya da stabilizör eklenmesi gibi modifikasyonlar yapılmaksızın kullanılmıştır. KTM ve KTK ekstraktlarındaki ana bileşiklerin sırasıyla antosiyanin ve izokinolin alkaloid olduğu tespit edilmiştir. KTM, KTK'ya göre daha geniş ışık absorpsiyonu gösterdiği halde KTM esaslı BDGP'nin enerji dönüşüm veriminin (%2,01) KTK'lı olandan (%2,35) daha küçük olduğu görülmüştür. Söz konusu düşük verim, KTK'nın zayıf elektron transfer kabiliyetinden kaynaklanıyor olabilir. Öte yandan 120 saat boyunca güneş ışığına maruz bırakılan BDGP'lerin başlangıç verimlerini KTM ve KTK için sırasıyla %91 ve %54 düzeylerinde korudukları gözlemlenmiştir. Buna göre makul düzeyde fotovoltaik performans ve yüksek kararlılık gösteren antosiyanin içeren ekstraktın düşük maliyetli ve çevre dostu BDGP uygulamaları için uygun olabileceği belirlendi.

# **INVESTIGATION of EXTRACTS from *BERBERIS VULGARIS* as PHOTSENSITIZER for THEIR USE in DYE-SENSITIZED SOLAR CELLS**

## **SUMMARY**

Keywords: Barberry, Anthocyanin, alkaloid, renewable energy, dye-sensitized solar cells, stability

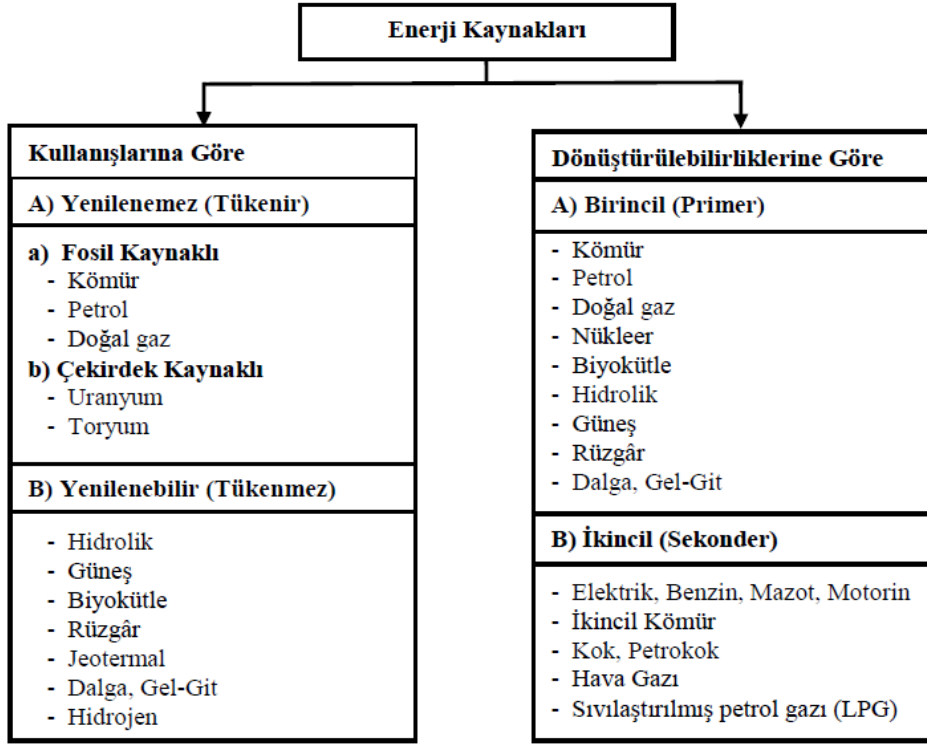
Natural dyes extracted from the fruit (FBV) and root (RBV) of barberry (*Berberis Vulgaris*) were used as photosensitizers for dye-sensitized solar cells (DSSCs). All the extracts were utilized without any modifications, such as purifications or addition of stabilizers. Anthocyanin and isoquinoline alkaloid were determined as the main compounds for FBV and RBV extracts. Although, FBV exhibited broader light absorption compared to RBV, the overall power conversion efficiency (PCE) for the DSSC based on the former (2.01%) is smaller than that of the latter (2.35%). The lowest PCE for FBV can be attributed to poor electron transfer ability, which may cause reduced photocurrent and photovoltage. On the other hand, after 120 h of sunlight irradiation, FBV and RBV retained the PCE values as 91 and 54% of the initial efficiencies. The moderate photovoltaic performance with good photostability for the anthocyanin extract may favorable for low-cost and environmental-friendly DSSC applications.

## **BÖLÜM 1. GİRİŞ**

Enerji,tüm canlılar için her zaman vazgeçilmez olan en temel ihtiyaçlarımızı karşılayan bir etmen olmuştur. Asırlar boyunca insanların gereksinimleri sürekli artmakla beraber insanlar yeni şeyleri keşfetme ve hayatı kolaylaştırma yoluna gitmişlerdir. Zamanla sanayileşme, teknolojinin gelişmesi, insanların refah seviyesinin yükselmesi ve dünya nüfusunun artışına paralel olarak enerjiye olan gereksinim, özellikle de fotovoltaik teknoloji geliştikçe çok hızlı bir şekilde artmaktadır. Enerji, üretimde mecburi bir üretim faktörü olmakla birlikte bir ülkenin ekonomik ve sosyal kalkınma potansiyelini yansıtmakta olan temel indikatörlerden biridir.

Yapılan bir araştırmaya göre 2000 yılına göre 2030 yılında dünyanın enerji gereksinimi %70 oranında artacağı öngörülmektedir (Li ve ark. 2006). Bu denli bir artışa enerji ihtiyaçlarının fosil yakıtlardan sağlanması eşlik ettiğinde ortaya çevresel problemler çıkmaktadır. Günümüzde küresel ısınma ve çevre kirliliğinin önlenmesi için artık yenilenebilir ve temiz enerji üretimine ihtiyaç duyulmaktadır. En önemli yenilenebilir enerji kaynağı şüphesiz, çevreci, neredeyse sonsuz bir enerji kaynağı ve kullanım alanı oldukça geniş olan güneştir. Tüm dünya ülkelerinin birbirine bağımlı olmaksızın, ulaştırma sorunu da olmadığı ve tam verimle her yerde kullanabildiği için enerji verimi açısından kesinlikle tercih edilen başlıca enerji kaynağı güneştir. Hem elektrik hem de ısınma sağlayan güneş enerjisi, dünyanın yıllık enerji ihtiyacının yaklaşık 15.000 katı kadardır (Ültanır, 1996; Şen, 200; Fischer & Pigneri, 2011).Enerjiler; jeotermal, nükleer, kimyasal, termal (ısı), mekanik (potansiyel ve kinetik), hidrolik, güneş, rüzgâr, elektrik enerjisi gibi değişik şekillerde bulunabilmekte ve uygun yöntemlerle birbirine dönüştürülebilmektedir (Tablo 1.1).

Tablo 1.1. Enerji kaynaklarının sınıflandırılması (Koç ve ark. 2013)



Dünyamızda tüketilen enerjinin büyük bir kısmı petrol, kömür ve doğal gaz gibi fosil yakıtlardan sağlanmaktadır. Ancak bu yakıtların tüketiminden çıkan  $SO_2$ , azot oksitler ( $NO_x$ ), karbon monoksit (CO), partiküller, hidrokarbonlar, ozon ( $O_3$ ), uçucu organik bileşikler ve toksik metaller (kadmiyum (Cd), arsenik (As), nikel (Ni), krom (Cr) ve berilyum (Be)) gibi çevresel kirleticiler oluşmaktadır. Kömür yanarken asit yağmuru, kentsel ozon ve sera etkisi oluşturarak küresel iklim değişiklikleri ve doğal felaketlerin artması gibi çevre problemleriyle bağlantılı birkaç kirletici unsur açığa çıkmaktadır. Çevre kirliliği, hassas bir denge üzerine kurulan ekosistemin aksamasına ve iklimsel değişikliklere neden olmaktadır. Başka bir deyişle fosil yakıt kullanımı, doğanın zarar görmesine ve yaşayan tüm canlıların dolaylı veya doğrudan etkilenmesine sebep olmaktadır. Ayrıca fosil yakıt rezervleri de hızla tükenmektedir. Bu sebeplerden dolayı hem çevreci hem de sürdürülebilir enerji teknolojilerinin geliştirilmesi zorunlu hale gelmiştir. Bunun için sürdürülebilir kalkınma planı yaparak öngörülen felaketlerin açık kapısını olabildiğince daraltmak gerekmektedir. Sürdürülebilir kalkınma anlayışı, ülkelerin ekonomik ve sosyal gelişme hedeflerinde ortak paydayı “sürdürülebilirlik” olarak belirlemektedir. Geleceği de içine alan bu ortak hedefle, herkesin temel ihtiyaçları

ile daha iyi bir hayata ilişkin beklentilerinin karşılanması amaçlanmaktadır. Ülkemizde tüketilen enerjinin büyük bir kısmını ithal ettiğimiz petrol ve doğal gaz oluşturmaktadır. Örneğin, 2011 yılındaki cari açığın yaklaşık %70'ini enerji ithalatı olmuştur. Kullandığımız elektrik enerjisinin büyük bir kısmı ise kömür, doğal gaz ve su (hidrolik) elde edilen kaynaklardır. Hâlbuki jeotermal, rüzgâr, su, güneş ve biyokütle gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ülkemizin geleceği için çok büyük bir önem arz etmektedir. Fakat ülkemizde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım oranı oldukça alt seviyelerdedir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının Türkiye 'deki profili gözden geçirildiğinde yeri ve önemi açıkça fark edilmektedir. Buna göre yenilenebilir enerji kaynaklarının ülkemizdeki kullanımları oldukça alt seviyelerdedir (%1 ve altında) ve bu enerji türleriyle yeterince ilgilenilmemektedir. Oysa güneş ve rüzgâr enerjisinin kullanılmasıyla Türkiye'nin enerjiye ayırdığı bütçesinde ciddi rahatlamalar olabilir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından doğru ve sağlıklı bir biçimde yararlanılması için gereken tasarı, strateji ve politikaların önemi giderek artmakta olup önem arz eden boyutlara ulaşmaktadır (Öztürel ve ark. 2001) Ülkemizde üretilen enerji kaynakları incelendiğinde, fosil kökenli kaynakların birincil enerji üretiminin yaklaşık olarak yarısını oluşturmakta olduğu görülmektedir. 1998'den beri ülkemizdeki üretilen enerji kaynaklarının içinde, petrol ve doğal gaz %13,5, kömür %48,3, hidrolik ve jeotermal %12,8, ticari olmayan yakıtlar %24,5 ve diğer yenilenebilir kaynaklar ise %0,9 oranında yer almaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan hidrolik enerji, akan suyun gücünü elektriğe dönüştürür. Akan su içindeki enerji miktarını suyun akış veya düşüş hızı belirler. Büyük bir nehirde akan su büyük miktarda enerji taşımaktadır. Ya da su çok yüksek bir noktadan akıtıldığında da yine yüksek miktarda enerji elde edilir. Her iki yolla da kanal yada borular içine alınan su, türbinlere doğru akar, elektrik üretimi için pervane gibi kolları olan türbinlerin dönmesini sağlar. Türbinler jeneratörlere bağlıdır ve mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürürler. Bunun için hidroelektrik santrallerden yararlanır. Fakat dışa bağımlı olmayan bu enerji çeşidinin inşaat süresinin uzunluğu, yatırım maliyetinin yüksek oluşu ve yapıldığı

yerdeki doğal yapıyı bozması gibi dezavantajları bulunmaktadır. Jeotermal enerji ise yer kabuğunun çeşitli derinliklerinde bulunan birikmiş ısının oluşturduğu sıcaklıkların, bölgesel atmosferik ortalama sıcaklığının üzerinde olan ve çevresindeki normal yeraltı ve yerüstü sularına göre daha fazla çözülmüş mineral, çeşitli tuzlar ve gaz içerebilen basınç altındaki sıcak su ve buhar (akışkan) yolu ile yüzeye taşınan ısı olarak tanımlanabilen yenilenebilir enerji çeşididir. Fakat kullanım öncesi jeotermal suların yapılarında bulunan H<sub>2</sub>S ve CO<sub>2</sub> gibi gazların açığa çıkması sebebiyle reenjeksiyon (tekrar basma) gerektirmesi gibi ekstra işlemlere gereksinim duyulmaktadır.

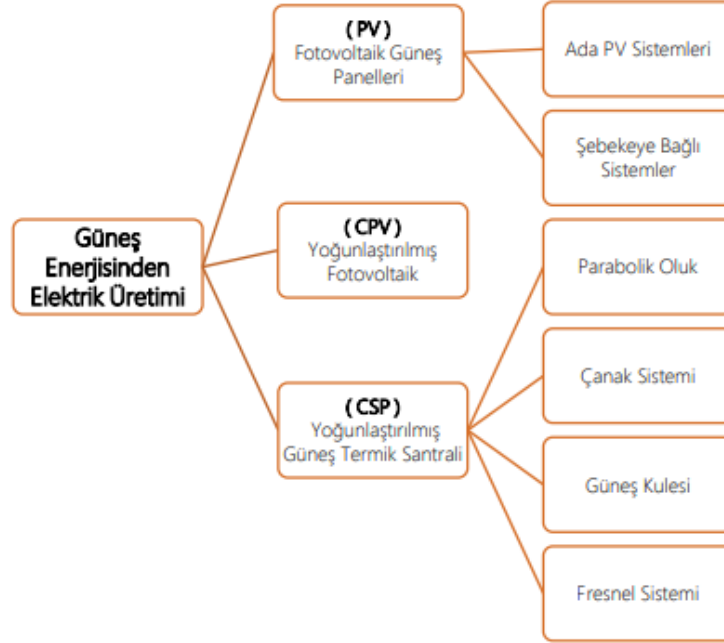
Başka bir yenilenebilir enerji kaynağı ise biyokütle enerjisidir. Biyokütle enerji kaynakları, içerisinde karbonhidrat bileşikleri olan bitkisel kökenli tüm maddeleri içerir. Biyoetanol, biyodizel ve biyogaz olmak üzere üç temel yakıt biyokütle enerji kaynakları kullanılarak elde edilebilmektedir. Biyoyakıtların içerisindeki karbon, bitkilerin havadaki karbondioksiti parçalaması sonucu elde edildiğinden, biyoyakıtların yakılması, dünya atmosferinde net karbondioksit artışına sebep olmaz. Fakat biyokütle enerjisinde verim oldukça düşüktür. Ayrıca tarım arazileri için rakip olduğundan tarım arazilerinin azalmasına sebep olabilir. En önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından biri de rüzgârdır. Ancak rüzgâr enerjisi için oldukça geniş alanlara gerek duyulmaktadır. Ayrıca kurulan rüzgâr türbinleri hem çok gürültülüdürler hem de kuş ölümlerine yol açarlar.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından bir diğeri de güneştir. Güneş enerjisi, güneşin çekirdeğinde yer alan füzyon süreciyle açığa çıkan ışıma enerjisidir. Güneşin enerji kaynağını 4 hidrojen atomunun 1 helyum atomuna dönüşmesi sırasında gerçekleşen reaksiyonlar karşılar. Yani güneşte her saniyede 564 milyon ton hidrojen, 560 milyon ton helyuma dönüşmekte ve kaybolan 4 milyon ton kütle enerjiye dönüşerek ışınım şeklinde uzaya yayılmaktadır. Güneşten yayılan enerjinin yaklaşık 2 milyonda 1'i yeryüzüne ulaşır. Örneğin, bir yıl boyunca gelen güneş ışığı 1,5 x 10<sup>18</sup> kW saat kadardır. Bununla beraber dünyadaki petrol, kömür ve doğal gaz rezervleri sırasıyla 1,75 x 10<sup>15</sup> kW saat, 1,4 x 10<sup>15</sup> kW saat ve 5,5 x 10<sup>15</sup> kW saat kadardır (Sum ve Mathews 2014). Buna göre güneşin dünyaya gelen oldukça küçük bir

kısmı bile, diğer enerji kaynaklarından kat kat fazladır. Güneş enerjisinden fotovoltaik güneş panelleri, yoğunlaştırılmış fotovoltaikler ve yoğunlaştırılmış güneş termik santralleriyle elektrik enerjisi üretilmektedir (Şekil 1.1). Uluslararası Enerji Ajansı'na (IEA) göre, yeryüzüne 90 dakikada vuran güneş ışığı, tüm dünyanın bir yıllık enerji ihtiyacını karşılayacak orandadır. Başka bir deyişle güneş enerjisini elektrik enerjisine çeviren güneş pilleri ya da panelleri sayesinde yeryüzüne ulaşan güneş ışığının sadece %0,1'inin kullanılması halinde bile dünyamızın enerji ihtiyacı karşılanabilmektedir (Gratzel 2001). IEA'ya göre 2050 yılında küresel elektrik enerjisi üretiminin %11 gibi bir oranının güneş enerjisinden sağlanacağı öngörülmektedir. Bunun açık bir göstergesi olarak, başta Çin, ABD ve Japonya olmak üzere 2013 yılına göre 2014 yılında güneş enerjisi için yapılan yatırımlar dünya genelinde %25 oranında artmıştır. Güneş enerjisinde oldukça ileri seviyede olan Almanya, 2014 yılı sonunda güneş enerjisi kurulu gücünü 38200 MW'a çıkarmış durumdayken güneş kuşağı içinde yer alan ülkemizde yaklaşık 50 MW gücünde güneş santrali bulunmaktadır. Güneş enerjisi kollektörler sayesinde ülkemizde çoğunlukla kullanım sularının ısıtılmasında kullanılmaktadır. Oysa petrol ve doğal gaz bakımından büyük oranda dışa bağımlı olan ülkemizde söz konusu enerji kaynaklarına alternatif olarak güneş enerjisinden elektrik üretimi üzerine dönüşüm sağlandığı takdirde hem ekonomik hem de çevre bakımından olumlu kazanımlar elde edilecektir. Günümüzde güneş enerjisi genellikle silisyum esaslı fotovoltaik güneş panelleriyle elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Ancak bu panellerin üretimi oldukça maliyetli olduğu için geniş çaplı kullanıma uygun değildirler. Öte yandan boya duyarlı güneş pillerinde (BDGP) fotoduyarlayıcı olarak kullanılan sentetik boyalardan metal içerikli olanlar yüksek maliyetleri ve toksisiteleri sebebiyle silisyuma alternatif olamamaktadırlar. Metal içermeyen sentetik boyalar ise silisyuma göre ekonomik ve çevreci olmaları sebebiyle alternatif olabilir. Bitkilerin değişik kısımlarından elde edilen doğal boyalar şüphesiz metal içermeyen sentetik boyalara göre daha ekonomik ve onlar gibi çevre dostudurlar. Bu yüzden ekonomik ve çevre dostu BDGP üretiminde öncelikle doğal boyaların fotoduyarlayıcı olarak kullanılmaları oldukça uygun bir yaklaşım olabilir. Bu amaç doğrultusunda sunulan tez çalışması kapsamında kadıntuzluğu (*Berberis Vulgaris*) bitkisinin kök ve meyvesinden



sırasıyla izokinolin alkaloid (berberin) ve antosiyanin içeren doğal boyalar ekstrakte edilerek ilk kez BDGP'lerde fotoduyarlaştırıcı olarak kullanılmışlardır.



Şekil 1.1. Güneş enerjisinden elektrik üretim çeşitleri (Eskin ve ark. 2018)

## **BÖLÜM 2. GÜNEŞ ENERJİSİNİN TARİHSEL GELİŞİMİ**

### **2.1. Güneş Pillerinin Tarihçesi**

Dünya’da bulunan enerji şekilleri arasında en sürdürülebilir ve yenilenebilir olan birincil kaynak güneş enerjisidir. Güneş ışığı; ısı, hareket, elektrik enerjisi veya fotosentez enerjisi gibi çeşitli enerji şekillerine dönüşebilmektedir.

Biri anot biri katot olmak üzere iki zıt kutuptan oluşan ve güneşten gelen ışınları elektrik enerjisine dönüştüren cihazlara, güneş pili veya fotovoltaik panel denir. Güneş ışıklarını kullanarak elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik paneller, temiz enerjinin üretilmesinde, yenilenebilir ve sürdürülebilir kaynaklar arasında ümit veren aygıtlarındandır (Green, 2000; Yamaguchi, 2001).

Güneş enerjisi kullanımının tarihsel gelişimi 1800’lü yıllara dayanmaktadır. 1839 yılında Fransız fizikçi Alexandre Edmond Becquerel fotovoltaik etkiyi ilk kez elektrolit içerisine daldırılmış elektrotlar arasındaki gerilimin, elektrolit üzerine düşen ışığa bağımlı olduğunu gözlemlemesiyle keşfetmiştir (Prevenslik, 2003). Bu araştırma Becquerel’in metal halojenür tuzu içeren bir çözelti içerisine iki platin elektrot daldırılarak akım üretilmesiyle hız kazanmıştır.

G.W. Adams ve R. E. Day, 1876 yılında selenyum (Se) kristallerinde fotovoltaik olayının gözlemlenmesiyle katı maddelerin de fotovoltaik etki oluşturabileceğini kanıtlamışlardır (Smith, 1873). Charles Fritts 1883 yılında, Se’i çok ince bir altın tabakasıyla kaplayarak %1,1 verimi bulan ilk fotovoltaik hücreyi üretmiştir. Sonraki yıllarda fotovoltaik etkiler bakır-bakır oksit (Cu-CuO) ince film yapılarda da gözlenmiştir (Würfel, 2005).

Bu alandaki en kapsamlı çalışmayı 1904 yılında Albert Einstein yapmıştır. Robert Milikan ise 1916 yılında Einstein'ın teorik çalışmasını denemiş ve 1932 yılında Cd–Se yapısında fotovoltaik etkiyi gözlemlemiştir. Chapin, Fuller ve Pearson ise 1954 yılında yaptıkları fotovoltaik hücreden %6 verim elde etmişlerdir (Chapin ve ark. 1954).

Bu tarihten sonraki araştırmalar ve yapılan ilk tasarımlar, uzay araçlarında kullanılacak güç sistemleri esas alınarak yapılmıştır. Silisyumlu fotovoltaik panellerden elektrik üretiminin ilk teknik uygulaması ise 1958 yılında Amerikan Vanguard uydusunun kontrol, kumanda ve haberleşme sistemleri için gereken enerjisinin uydunun kanatlarındaki fotovoltaik panellerden elde edilmesi şeklinde olmuştur. Nitekim silisyum fotovoltaik hücreler 1960'lı yıllarda geniş çapta kullanılmaya başlanmış ve günümüzde de bu sistemler uzay çalışmalarında güvenle kullanılmaya devam etmektedir.

İlk bulunuşundan sonra silisyum kristal tabanlı güneş pillerinin verimliliğini artırma çabalarına ve bunlara alternatif olmak üzere çok daha az yarı iletken malzemeye gereksinim duyulan ve bu nedenle maliyeti çok daha makul fiyata üretilebilecek ince film güneş pilleri üzerindeki çalışmalara hız verilmiştir. Uzay çalışmalarında kullanılan fotovoltaik hücre teknolojisinde verim 1960'lı yılların başında %15'e ulaşmıştır. Fotovoltaik hücre teknolojisinin kullanımı uzay çalışmalarıyla birlikte hızla artarak fotovoltaik hücre teknolojisinin gelişimine olanak sağlamıştır ve 1960'ların başında verim %15'lere çıkarmıştır. Amerika, Avrupa ve Japonya'da 1973 yılındaki "Petrol Krizinde" ise fotovoltaik teknoloji ile ilgili büyük bütçeli ve geniş kapsamlı araştırma ve geliştirme projeleri yürütülmeye başlanmıştır.

1980'li yıllarda enerji dönüşüm verimi %20'nin üstünde olan silisyum güneş pilleri üretilmesine rağmen aynı dönemde silisyuma alternatif olarak çift eklemlili GaAs katkılı güneş hücrelerinden %24 civarında verim elde edilmiştir (Ishaibashi, 1985).

Tang ve arkadaşları tarafından 1986 yılında ilk organik güneş pili Kodak firması tarafından üretilmiştir (Tang, 1986). Bu pilin verimliliği oldukça düşük olmasına rağmen (%1), yapılan çalışma diğerlerine alternatif teşkil etmesi bakımından oldukça önemli kabul edilmiştir.

1995 yılında Yu ve arkadaşları indiyum kalay oksit (ITO) üzerine hazırladıkları poli[2-metoksi-5-(2-etil-heksiloksi)-1,4-fenilen vinilen] ile ürettikleri organik güneş pilinden %2,9 verim bulmuşlardır (Yu ve diğ. 1995). Pilin açık devre voltajının ise 0,82 V olduğu tespit edilmiştir.

2000'li yılların başlarında Alan McDiarmid, Alan Heeger ve Hideki Shirakawa adlı bilim insanlarının iletken polimerleri keşfinden sonra yarı iletken konjuge polimerlerin kullanıldığı organik güneş pili araştırmaları artmıştır (Macdiarmid ve diğ., 1977).

Takahashi ve arkadaşları 2000'li yıllarda farklı organik malzemeler deneyerek ve analiz ederek bu güç dönüşümünü yaklaşık %3,51 olarak belirlemiştir. Çalışmalarında açık devre voltajını 0,34 V ve doluluk faktörünü (FF) ise 0,51 olarak hesaplamışlardır. Bu sonuçlarla, üç tabakalı Al/PV/HD/MC/Au yapısının iyi bir güneş pili özelliği gösterdiğini belirlemiştir (Takahashi ve diğ., 2000).

2002 yılında Yakimov ve Forrest tarafından perilen tetrakarboksilik kullanılarak tek ve iki katlı olmak üzere iki farklı güneş pili üretilmiştir. Üretilen tek katlı güneş pilinde verimin %1,1 olduğu iki katlı güneş pilinde de ise verimin %2,5 olduğu hesaplanmıştır (Yakimov ve Forrest 2002).

2005 yılında ise Drechsel ve arkadaşları elde ettikleri tek katlı güneş pilinin verimini %2,1'e, çift katlı güneş pilinin verimini ise %3,8'e çıkartmayı başarmışlardır. Ancak uyarılan elektronların büyük çoğunluğunun ara yüzeyde kolayca yeniden birleştiğini (rekombinasyon) tespit etmişlerdir (Drechsel ve diğ., 2005).

2007 yılında Lungenschmied ve arkadaşları esnek yüzeylere kaplanabilen oldukça uzun ömürlü ve çok geniş kullanım alanlarına sahip olan poli(3,4-etilendioksitiyofen ile polistirensülfonatın birlikte kullanıldığı bir güneş pilinin veriminin %1,5 olduğunu tespit etmişlerdir (Lungenschmied ve diğ., 2007).

2008 yılında Kuwabara ve arkadaşları ise ITO / poli(3–heksiltiyofen) / poli(3,4–etilendioksiltiyofen) : poli(4-stirensülfonikası) / Au şeklindeki güneş pilinin açık devre voltajını 0,52 V, doluluk faktörünü 0,38 ve verimini %2,47 olarak bulmuşlardır (Kuwabara ve diğ., 2008).

Kim ve arkadaşları, organik tabanlı P3HT / PCBM heteroeklem şeklindeki güneş pilinin verimini %1,35 olarak bulmuşlar (Kim ve diğ., 2009).

Günümüzde verimli organik güneş pillerinin üretimi için yoğun çalışmalar devam etmektedir.

Liang ve arkadaşları tarafından thienol [3, 4 – b ) tiyofen ve benzo ditiyofenile üretilen güneş pilindeki verim %7,4 olarak ölçülmüştür (Liang ve diğ., 2009).

Amerika’lı yarı iletken malzeme üretim şirketi Polyera, organik tabanlı güneş pilinde polimer malzeme (PEDOT – PSS) kullanarak verimi %9,1 olarak bulduklarını 2012 yılında duyurmuşlardır (Hong ve diğ. 2008). Yine bu yılda Alman güneş enerjisi teknoloji şirketi olan Heliatek, iki katmanlı absorpsiyon tabakası içeren organik güneş pilinde %12 verim elde edildiğini bildirmişlerdir (Kumar ve diğ. 2016).

Günümüzde fotovoltaik piyasanın büyük bir kısmı silisyum gibi inorganik malzemelerden yapılan pillerden oluşmaktadır. Ancak özellikle silisyumun üretim aşamalarının zaman alması bilim insanlarını sentetik ya da doğal organik boyalara yöneltmiştir.

## 2.2. Güneş Pillerinin Kullanım Alanları

Güneş pillerinin bu kadar çok önemli olmasının nedenlerinden biri de her geçen gün artan uygulama alanlarıdır. Elektrik hatlarının ulaşmadığı kırsal kesimlerden enerjiye ulaşmanın olanaksız olduğu haberleşme uydularına kadar geniş bir uygulama alanı bulan güneş pilleri, elektrik enerjisinin ihtiyaç olduğu her uygulama alanında kullanılabilir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Güneş pillerinin kullanım alanları (Akman ve ark. 2013)

Bu sistemler, özellikle yerleşim yerlerinden uzak kırsal yörelerde, elektrik şebekesi olmayan, jeneratöre yakıt taşımının zor ve pahalı olduğu durumlarda kullanılırlar.

Güneş pillerinin günümüzdeki başlıca kullanım alanları;

- Aydınlatma sistemlerinde
- Sulama sistemlerinde,
- Kurutmada,
- Toprak dezenfeksiyonunda,
- Uydu ve uzay araştırmalarında,
- Çatı sistemlerinde,
- Ulaşım araçlarında,

- Alarm ve güvenlik sistemlerinde,
- Köprülerin, kulelerin ve benzeri metal yapıların korozyondan korunmasında ve bunun gibi birçok alanda kullanılabilir durumdadır (Tsoutsos, 2005).

### 2.3. Güneş Pillerinin Sınıflandırılması

Güneş pillerinde; uygulama alanları, kullanılan malzemenin türü, optik karakteristikleri veya teknolojik gelişim aşamaları gibi birçok sınıflandırma yapabiliriz. Güneş pillerinin günümüze kadar olan teknolojik gelişimi ele alarak sınıflandırırsak,

- Birinci Nesil (kristal silisyum, galyum arsenik güneş pilleri)
- İkinci Nesil (ince filmler: CuInSe<sub>2</sub>, CdTe, a-Si güneş pilleri)
- Üçüncü Nesil (boya duyarlı güneş pilleri, organik güneş pilleri)

olmak üzere üç başlık altında inceleyebiliriz.

### 2.4. Boya Duyarlı Güneş Pillerinin Çalışma Prensibi

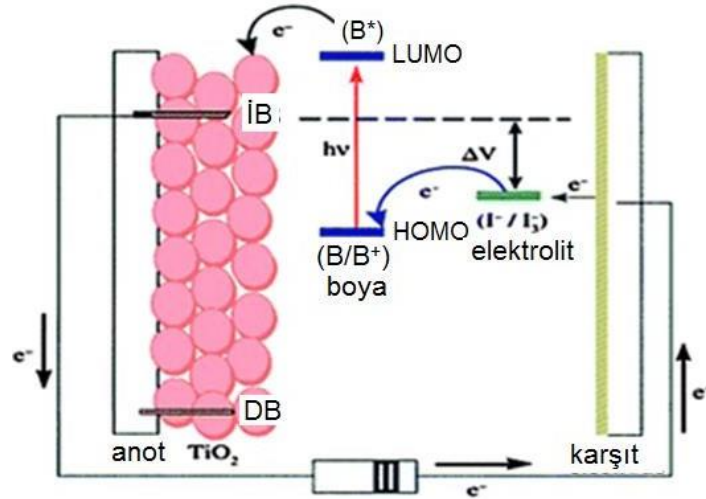
Boya duyarlı güneş pillerinin (BDGP) çalışma prensi, doğadaki fotosentez olayına benzer şekilde gerçekleşir (Sauvage ve ark., 2010). Klorofil pigmentleri tarafından yakalanan güneş ışıkları canlı yeşil bitkilerin yapraklarında bulunan kloroplast organelinde, CO<sub>2</sub> gazını, suyla karbonhidrat (glukoz) ve oksijene çevirir. BDGP’de ise fotosentezde gerçekleşen bu temel durum örnek alınarak gerçekleştirilmektedir. Buna göre bir BDGP’de boya molekülleri absorpladıkları ışık yardımıyla, pozitif ve negatif yükler oluşturarak enerji üretimi gerçekleşir.

Klasik bir BDGP, cam veya optik geçirgenliği olan flor katkılı kalay oksit (FTO) kaplı karşılıklı 2 tane cam ile hazırlanır (Hagfeldt, 1995; Grätzel, 2000). Camlardan biri, nanokristal yarı iletken elektrotun (çoğunlukla TiO<sub>2</sub> yapılı) yüzeyine tutunmuş boyarmaddelerden oluşurken (anot), diğeri ise genellikle platinle kaplanmış ve elektrolite (I<sup>-</sup>/I<sub>3</sub><sup>-</sup>) elektron transferini sağlayan bir karşıt elektrot ya da katottur. BDGP’lerin çalışma prensibini Şekil 2.2’de verilen görselle açıklarsak; güneş ışınları ilk olarak optik geçirgenliği yüksek olan FTO’dan geçerek TiO<sub>2</sub> üzerine

adsorplanmış fotoduyarlaştırıcılara (boyar maddelere) ulaşır. Gelen güneş ışınları boyar malzeme tarafından absorplanır ve fotonlar boya malzemesindeki elektronları uyarırlar. Uyarılan bu elektron  $\text{TiO}_2$  moleküllerinin iletim bandına ulaşırlar. İletim bandındaki bu elektron difüzyon yoluyla FTO'ya ulaşır. Sonra FTO'dan geçerek karşıt elektrota giderek elektroliti ( $\text{I}^-/\text{I}_3^-$ ) indirger. Bu esnada elektron kaybetmiş olan boya molekülü başlangıç durumuna dönmek için elektrolitten elektron alır ve sistem döngüsü tamamlanmış olur (Matsui, 2004; Polo ve Iha, 2006; Chaoyan ve ark., 2007; Zhang ve ark., 2008; Chang ve Lo, 2010; Zhou ve ark., 2011; Park, ve ark., 2013).







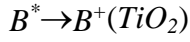
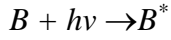
Şekil 2.2. Boya duyarlı güneş pillerinin çalışma prensibinin şematik gösterimi (Thomas ve ark., 2014)

BDGP sisteminde kullanılan karşıt elektrot, dış devreden gelen elektronların tekrardan redoks işlemini sağlayan elektrolit sıvısına iletilmesini sağlayan bir yapıdır. Elektrolit olarak adlandırılan ve genellikle içerisinde  $I^-/I_3^-$  iyonları bulunan çözelti bu iki elektrotun arasına ilave edilir (Polo ve ark., 2004). BDGP'ler için elektronik iletkenliği sağlayan ve yüzeyinde nano boyutta parçacıklar içeren oksit tabaka önemlidir. ZnO ve SnO<sub>2</sub> oksitler geniş bant aralığına sahip olmasına rağmen, TiO<sub>2</sub> düşük maliyetli olması, elektriksel ve optiksel özelliğinin uygun olması ve üretiminin kolay olmasından dolayı en çok tercih edilen malzemedir (Tennakone ve ark., 1999; Sayama ve ark.,1998).

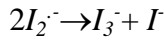
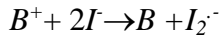
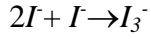
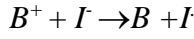
Boya duyarlı güneş pilinden verimli bir fotovoltaik enerji elde edebilmek pil içinde gerçekleşen kimyasal reaksiyonları adım adım takip etmek, elektron yük transfer mekanizmasını ve oluşan kinetik süreçleri bilmek gerekir.

BDGP düzeneğinin belli bir dalga boyunda gelen ışığa maruz kalması ile gerçekleşen reaksiyonlar aşağıdaki sıra ile meydana gelir. Öncelik ile anottaki (veya fotoanotta) boya molekülü (B) üzerine gelen ışık ( $h\nu$ ) ile uyarılmış hale ( $B^*$ ) geçer. Daha sonra uyarılan boya elektronunu TiO<sub>2</sub>'ye aktarır (Mishra ve ark., 2009; Thomas ve ark., 2014). Böylece uyarılmış haldeki boya molekülü elektronunu TiO<sub>2</sub>'nin iletim bandına aktararak uyarılmamış formuna geri döner (Şekil 2.2).

Anot:

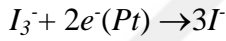


Bu esnada yükseltgenmiş boya ile elektrolit arasında şu reaksiyonlar gerçekleşir.



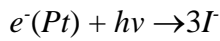
Daha sonra metal oksitteki elektron karşıt elektroda (veya katot) giderek elektrolitin indirgenmesini sağlar.

Katot:



Boya duyarlı güneş pillerinde herhangi bir kimyasal üretim veya kayıp söz konusu değildir. Bundan dolayı oksitlenen boyalar tekrar eski hallerine dönüp tekrardan uyarılarak elektron vermeye devam ederler.

Hücre:



Benzer şekilde elektrolit hem elektron aldığı hem de verdiği için değişmeden ortamda kalır (Pelet ve ark., 2000; Boschloo ve Hagfeldt, 2009).

## 2.5. Boya Duyarlı Güneş Pillerinin Bileşenleri

Boya duyarlı güneş pilleri, yarı iletken oksit film, elektrot, duyarlaştırıcı boya, karşıt elektrot ve elektrolitten oluşur.

### 2.5.1. Yarıiletken metaloksit film

Boya duyarlı güneş pillerinde kullanılacak yarı iletken oksit filmin genellikle görünür bölgede saydamlık sağlamak için geniş bant aralığı ve bant uyarılması durumunda foto-korozyona karşı kararlılık göstermesi istenir. BDGP'lerde kullanılan yarı iletken oksitler titanyum dioksit ( $\text{TiO}_2$ ) (Haiying, 2004; Greg, 1998), çinko oksit ( $\text{ZnO}$ ) (Law, 2005; Doh, 2011), niyobyum oksit ( $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ) (Toru, 2012), kalay dioksit ( $\text{SnO}_2$ ) (Tosun, 2012), vb. malzemelerdir. Fakat düşük maliyetli olması, piyasada bol miktarda bulunması, toksik yapıda olmaması ve ayrıca diğer yarıiletken oksitlerden daha yüksek performans göstermesinden dolayı en çok tercih edilen geniş bant aralığına ( $E_g \approx 3,2 \text{ eV}$ ) sahip yarıiletken  $\text{TiO}_2$ 'dir (Nwanya, 2011).

### 2.5.2. Elektrolit çözeltisi

Boya duyarlı güneş pillerinin düzenli olarak çalışabilmesi için, elektrolit tarafından boyar maddeye düzenli olarak elektron transferi sağlanması gerekmektedir. Boya duyarlı güneş pillerinde en çok kullanılan elektrolit, karşıt elektrot ile fotoelektrot arasındaki elektron transferini sağlayan  $\text{I}^-/\text{I}_3^-$  redoks iyonlarını içeren bir çözeltidir. Bu elektron transferi, iyot-iyodür dönüşümü ile sağlanmaktadır.

Boya duyarlı güneş hücrelerinin bazı dezavantajları vardır. Bunlardan biri elektrolitlerin sıvı formlarda kullanılmasıdır. Sıvı haldeki elektrolitlerde sıcaklık değişimlerine bağlı olarak kararlılık problemleri görülmektedir. Düşük sıcaklıklarda elektrolit donabilir, enerji üretimi durabilir ve potansiyel olarak fiziksel sorunlar oluşabilir. Yüksek sıcaklıklarda ise sıvı elektrolitte genleşme olabilir ve buda üretilen panellerde hasarlar meydana getirebilir (Grätzel, 2001). Bu ve bunun gibi problemlerin üstesinden gelmek amacıyla araştırmalar sıvı yerine katı organik çözeltiler ve bunların karışımlarından oluşan yeni katı elektrolitler üzerine yönelmektedir. Grätzel ve arkadaşlarının yaptıkları bir araştırmada üç farklı katının belli miktarda karıştırılmasıyla mükemmel kararlılık ve verim sağlanan eriyik bir elektrolitin elde edildiği bildirilmiştir (Deb, 2005).

### 2.5.3. Boyar maddeler (duyarlaştırıcılar)

Bir BDGP'nin fotovoltaik performansı, ışını absorplayan boyaya (duyarlaştırıcı) bağlıdır (Abdou, 2013). Bu boya, duyarlaştırıcı olarak adlandırılır. Bir diğer ifade ile duyarlaştırıcıların, boya duyarlı güneş pillerindeki rolü, görünür ışığı soğurma ve kimyasal bağlar ile bağlandığı yarıiletken katmana ( $TiO_2$ ) elektron sağlamaktır. N3 ve N719 olarak adlandırılan ve rutenyum adlı elementin komplekslerini içeren boyalardan elde edilen boya duyarlı güneş pillerinden oldukça yüksek verimler elde edilmektedir (Lai ve ark., 2008). Ancak bu boyaların yapımında kullanılan rutenyum elementi doğada nadir bulunuşundan dolayı pahalıdır. Aynı zamanda başka dezavantajları da mevcuttur. Örneğin, düşük sentez verimleri ve metal kirliliğine sebep olmalarından dolayı BDGP'lerde geniş çaplı kullanımları kısıtlıdır (Huang ve ark., 2016). Bu noktada doğal boyalar ekonomik olmaları ve çevre dostu özelliklerinden dolayı metal içeren boyalara göre avantajlıdır. Doğal boyalar metal içeren boyalara alternatif olarak düşünülebilir. Fakat doğal boyalardan elde edilen boya duyarlı güneş pillerinin en önemli dezavantajlarından birisi ise enerji dönüşüm verimlerinin düşük olmasıdır (Chang ve ark., 2010). Fakat verime göre maliyet kıyaslaması yaptığımız zaman rutenyum içeren boyalara göre doğal boyaların maliyeti düşük çıkmaktadır (Furukawa ve ark., 2009).

Etkin bir boyar maddenin görünür bölgede gelen ışığı yoğun soğurması, yarı iletken yüzeyine güçlü tutunabilmesini, yarı iletken iletim bandı içine etkili elektron transferi (Tokumato, 1999), yüzeye tutunan boya molekülleri ışığa maruz bırakıldığında uzun süre dayanabilmesi ve yeterince kararlı olması gibi bazı özelliklere sahip olması istenir (Hagfeldt, 2000). Bu bağlamda doğal boyalardaki başlıca problem, ışın altında kolayca bozulmalarıdır (Dumbrava ve ark., 2012). Bu problemin çözümü için genellikle elde edilen ekstraktlara antioksidan ekleme işlemleri yapılmaktadır (Dumbrava ve ark., 2012). Ancak söz konusu işlemler BDGP üretiminde maliyeti artırmaktadır. Literatürde herhangi bir müdahale olmadan ışın altında doğal boyaların kararlılıklarının tespit edildiği az sayıda çalışma vardır (Calogero ve ark., 2012; Fernando ve ark., 2008).

#### 2.5.4. Karşıt elektrot

Karşıt elektrot, dış devreden gelen elektronların redoks elektrolitine aktarılması için kullanılan bir transfer edicidir. Buna göre karşıt elektrotlardan güneş pilleri üzerinden fotoakımı taşımak için iyi biri letkenlik ve redoks çiftlerinin indirgenmesi için düşük bir gerilim sergilemeleri beklenir. Başka bir deyişle, BDGP'lerde tercih edilen karşıt elektrotlarda aranılan özellikler, yüksek değişim akım yoğunluğuna ve düşük yük transfer direncine sahip olmalarıdır. Karşıt elektrotlarda platin (Pt),  $I_3^-$  indirgenmesi için uygun bir katalizör olmasından dolayı sıklıkla tercih edilir. Son dönemlerde, boya duyarlı güneş pillerinde (BDGP) karşıt elektrot olarak kullanılabilen çok düşük maliyetiyle platine alternatif olarak sunulabilecek malzemeler arasında, çok güçlü mekanik dayanımı, oldukça yüksek elektrik ve ısı iletkenliği, geniş bir yüzey alanı ve yüksek optik geçirgenliği özellikleriyle grafen dikkat çekmektedir (Akman ve ark.,2013).

## BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM

### 3.1. Materyal

Çalışma kapsamında Artvin'in Yusufeli ilçesinden özel olarak alınan kadıntuzluğu (*Berberis vulgaris*) bitkisinin meyvelerinden (KTM) ve kökünden (KTK) ekstraksiyon yolu ile elde edilen pigmentler, boya duyarlı güneş pillerinde (BDGP) fotoduyarlastırıcı olarak kullanılabilmesi için  $TiO_2$  üzerine adsorbe edilmişlerdir (Şekil 3.1). Tüm ekstraktlar saflaştırma ya da stabilizör eklenmesi gibi herhangi bir modifikasyon yapılmaksızın doğrudan kullanılmıştır. Ekstrakte edilen pigmentlerin karakterizasyonları ve onlardan üretilen pillerin fotoelektrokimyasal testleri ile ilgili kısımlar sonraki kısımlarda detaylı bir şekilde açıklanmıştır.



Şekil 3.1.Kadıntuzluğu bitkisinin meyve ve kök kısımları

## 3.2. Yöntem

### 3.2.1. Kullanılan teknikler

Ekstraktların elektrokimyasal analizi için PARSTAT 2273 model potansiyostat/galvanostat (Princeton Applied Research) kullanılmıştır. Ekstraktlardaki fonksiyonel grupların analizi için Perkin-Elmer FT-IR spektrofotometresi kullanılmıştır. Ekstraktların görünür bölgedeki absorpsiyon davranışları ise Shimadzu UV 2600 marka spektrofotometre ile alınmıştır. BDGP'lerin akım-voltaj ( $J-V$ ) ya da fotovoltaj karakterizasyonu yukarıda belirtilen potansiyostat/galvanostat ile bir güneş simülatöründen (96000, Newport, ABD) AM 1.5G aydınlatma altında ( $100\text{mWcm}^{-2} = 1$  güneş) yapılmıştır. Foto-akım dönüşüm verimliliği (IPCE) spektrumları ise monokromatör (74004, Oriel, ABD) kullanılarak elde edilmiştir. Fotovoltaj ölçümler sırasında BDGP yüzeyine siyah bir maske ( $0.196\text{ cm}^2$ ) takılarak ölçümlerdeki difüze ışıklardan kaynaklanabilecek hatalı ölçümler engellenmiştir. BDGP'lerin elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) analizi ise karanlık koşullar altında oda sıcaklığında  $0,1-10^5$  Hz aralığında potansiyostat/galvanostat ile gerçekleştirilmiştir.

### 3.2.2. Boyar maddelerin ekstraksiyonu

Kadıntuzluğu bitkisinin (*Berberis vulgaris*) ana vatanı Türkiye olup, söz konusu bitkinin meyve ve kökleri Artvin'in Yusufeli ilçesinden getirilmiştir. Bitkilerin laboratuvar ortamında meyveleri ve kökleri özenle ayrılmıştır. Bitkinin meyveleri ve kökleri ayrı ayrı saf su ile yıkanarak,  $40^\circ\text{C}$ 'de kurutulmuştur. Daha sonra 15 g kurutulmuş ve toz haline getirilmiş kadıntuzluğu bitkisi kökleri, 200 mL etanol içerisinde 8 saat süreyle sokslet metoduyla ekstrakte edildi. Kadıntuzluğu meyvesi ekstraktları ise ilgili kaynaklardan alınan öğütülmüş 15 g'lık tartımların %90'luk 200 mL etanol içerisinde 3 gün süresince bekletilmesi ve sonrasında süzülmesiyle elde edildi. Elde edilen ekstraktlardaki katı tortular süzülerek saf boya çözeltisi elde edilmiştir. Boyar maddelerin yapıları, FT-IR ve UV-vis spektrometri yöntemleri ile aydınlatılmıştır.

### 3.2.3. Boya duyarlı güneş pillerini oluşturan tabakaların hazırlanması

#### 3.2.3.1. Cam alt tabakaların temizlenmesi

Boya duyarlı güneş pillerinin performansını etkilediğinden dolayı alt tabakaları oluşturan flor katkılanmış kalay oksit (FTO) kaplı camların temizliği oldukça önemlidir. Bundan dolayı kullanılan tabakaların temizliğine dikkat edilmelidir. Bu çalışmada ince film tabakası olarak Solaronix (TCO22-15,  $15 \Omega \text{ cm}^{-2}$ ) marka FTO kaplı camlar kullanılmıştır. 16x25 mm boyutlarında kesilen camlar, sırasıyla 0,1 M HCl, aseton ve izopropanol içerisinde ultrasonik işlemle temizlenmiş ve daha sonra de iyonize su ve etanol ile yıkanmıştır.

#### 3.2.3.2 TiO<sub>2</sub> yarı iletken tabakasının hazırlanması

Önce camların FTO kaplı (iletken) yüzeyine  $0,196 \text{ cm}^2$  alan ve yaklaşık  $50 \mu\text{m}$  derinliğe sahip bir yapışkan bant (Scotch™, 3M) yapıştırılmıştır. Bant kaplı substratlar,  $70^\circ\text{C}$ 'de 30 dakika boyunca  $0,04 \text{ M}$ 'lik sulu  $\text{TiCl}_4$  çözeltisinde bekletilmiş ve de iyonize su ile durulanıp kurumaya bırakılmıştır. Daha sonra, bu alana bir  $\text{TiO}_2$  macunu (Solaronix Ti-Nanoxide T/SP) cam bağıet yardımıyla homojen şekilde (doctor blade) sıyırma yöntemi ile yayım işlemi yapılmıştır (Hu ve ark. 2017; Karaca ve ark. 2018). Bir süre beklenildikten sonra üzerindeki bant çıkarılmış ve  $\text{TiO}_2$  kaplı film düzenli sıcaklık artışları ile  $500^\circ\text{C}$ 'ye çıkarılmış ve bu sıcaklıkta 30 dakika boyunca bekletilmiştir.  $\text{TiO}_2$  kaplı filmler oda sıcaklığına gelinceye kadar beklenmiş ve çift katmanlı  $\text{TiO}_2$  filmi elde etmek için yayma ve ısıtma işlemleri tekrarlanmıştır. Çift katmanlı  $\text{TiO}_2$  filminin ortalama kalınlığı profilometre cihazı (KLA Tencor P6) ile yaklaşık  $12 \mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. Son olarak  $\text{TiO}_2$  filmi oda sıcaklığına soğutulmuş ve  $70^\circ\text{C}$ 'de 30 dakika boyunca  $0,04 \text{ M}$ 'lik sulu  $\text{TiCl}_4$  çözeltisinde bekletilmiş ve 30 dakika süresince  $500^\circ\text{C}$ 'de tutulmuştur (Şişman ve ark. 2017; Günsel ve ark. 2017).



### 3.2.3.3. Boya adsorpsiyonu

Bu aşamada  $TiO_2$  kaplı fotoanotlar,  $80^\circ C$ 'ye kadar ısıtılarak, kadıntuzluğu meyvelerinden ve kökünden ekstrakte edilen boyar madde çözeltilerine daldırılmış ve oda sıcaklığında 18 saat bekletilmiştir. Süre sonunda boya içerisindeki substratlar etanol ile yıkanarak  $TiO_2$  yüzeyine tutunmayan boya molekülleri uzaklaştırılmış ve oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır. Böylelikle BDGP'lerin anot kısmı tamamlanmıştır.

### 3.2.3.4. Karşıt elektrot üretimi

BDGP'lerde karşıt elektrot olarak kullanılmak üzere temiz FTO üzerine  $H_2PtCl_6$  çözeltisi (Platisol T, Solaronix) damlatılmış ve  $450^\circ C$ 'ye kızdırılarak Pt kaplanmış FTO kaplı cam substratlar elde edilmiştir. Fotoanot ve karşıt elektrot arasında oluşabilecek kısa devreyi önlemek için ayırıcı olarak  $25 \mu m$  kalınlığındaki bir polimerfilm (Solaronix, Meltonix 1170-25) ve bir redoks çifti (Solaronix, Iodolyte HI-30) kullanılarak fotoanot ve karşıt elektrot birleştirilmiştir. Fotokararlılık testleri için ise söz konusu yapı  $100^\circ C$ 'de tutularak sandviç haline getirilmiştir.

## BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

### 4.1. Doğal Boyaların Optik ve Yapısal Karakterizasyonu

Ekstrakte edilen doğal boya çözeltilerinin absorpsiyon spektrumları ve bunlara karşılık gelen optik değerleri sırasıyla Şekil 4.1 ve Tablo 4.1’de verilmiştir. Şekil 4.1.’de kadıntuzluğu meyvesi (KTM) ve kökü (KTK) sırasıyla 522 ve 427 nm dalga boylarında verdiği maksimum absorpsiyon değerleri gösterilmiştir. KTM için 522 nm’de görülen yayvan pik antosiyanin (Şekil 4.1) olarak siyanidin 3-glukozitin varlığını gösterirken KTK için 427 nm’deki pik ise berberinin karakteristik  $n-\pi^*$  geçişine karşılık gelmektedir (Longo ve Vasapollo 2006). Buna göre, gözlenen absorpsiyon değerlerinin literatürde yer alan kadıntuzluğu bitkisinden elde edilen absorpsiyon sonuçları ile uyum halinde olduğu söylenebilir.

Tablo 4.1. Doğal boyaın optik ve elektrokimyasal özellikleri

Boya	$\lambda_{\text{maks}}$ (nm) <sup>a</sup>	$\lambda_{\text{baş}}$ (nm) <sup>b</sup>	$\lambda_{\text{maks}}$ (nm) <sup>c</sup>	HOMO (V vs. NHE) <sup>d</sup>	$E_{0-0}$ (eV) <sup>e</sup>	LUMO (V vs. NHE) <sup>f</sup>
<b>KTM</b>	522	587	559	1,06	2,11	- 1,05
<b>KTK</b>	427	477	456	1,16	2,60	- 1,44

<sup>a</sup> Boya çözeltilsinin absorpsiyon maksimum dalga boyu ( $\lambda_{\text{maks}}$ ).

<sup>b</sup> Boya çözeltilsinin absorpsiyon başlangıç dalga boyu ( $\lambda_{\text{baş}}$ ).

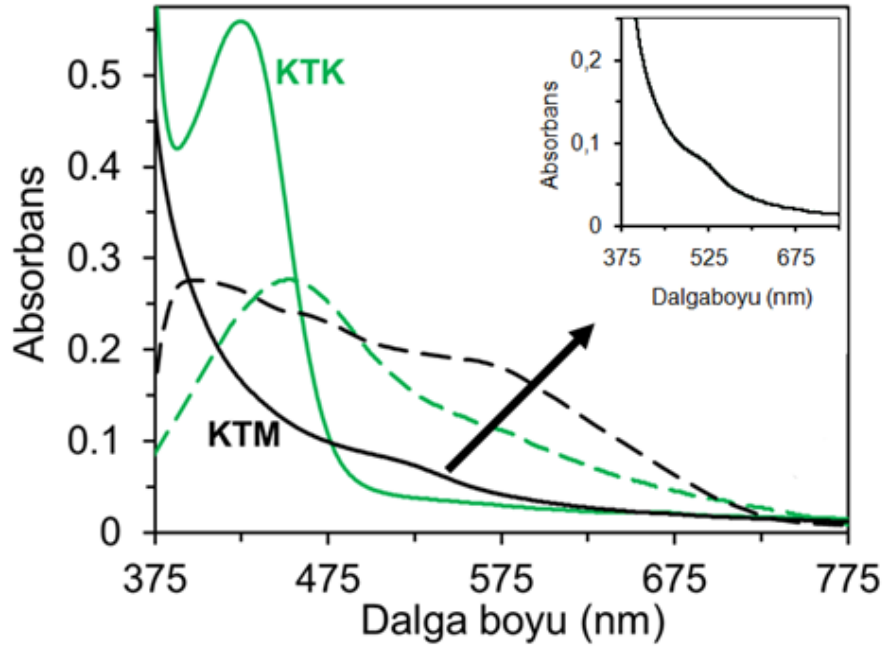
<sup>c</sup> TiO<sub>2</sub> filmine adsorbe olan boyanın absorpsiyon maksimum dalga boyu ( $\lambda_{\text{maks}}$ ).

<sup>d</sup> HOMO seviyesi O<sub>1</sub> pikinin  $E_{1/2}$ 'sinden hesaplandı. Fc/Fc<sup>+</sup>'nin  $E_{1/2}$ 'si 0,35 V (vs. Pt disk) olarak bulundu. Buna göre O<sub>1</sub> pik potansiyelinden 0,35 V çıkarıldı ve çıkan değere Fc/Fc<sup>+</sup>'in normal hidrojen elektroda (NHE) göre değeri olan 0,63 V eklendi.

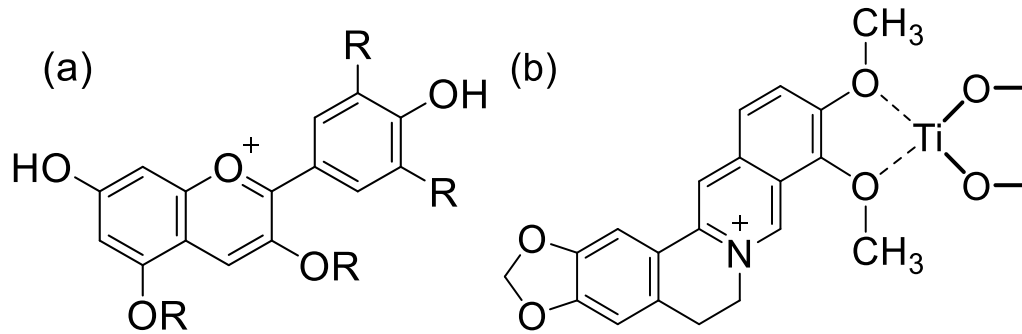
<sup>e</sup>  $E_{0-0}$  (bant aralığı enerjisi)  $E_{0-0} = 1240/\lambda_{\text{baş}}$  eşitliğinden hesaplandı.

<sup>f</sup> LUMO değeri LUMO = HOMO -  $E_{0-0}$  eşitliğinden bulundu.

İki boyanın  $TiO_2$  üzerindeki absorpsiyon spektrumları ayrıca Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Bu ölçümler için, çift katman  $TiO_2$  tabakası yerine, tek katman  $TiO_2$  tabakası kullanılmıştır. Adsorbe KTM'nin spektrumu incelendiğinde çözelti spektrumuna göre absorpsiyon pik maksimumunu daha uzun dalga boyuna (kırmızıya) kaymaktadır. Bu durum açıkça antosiyaninin  $TiO_2$  ile bağ yaptığını göstermektedir. Benzer bir şekilde kırmızıya kayma adsorbe KTK'de de açıkça görülmektedir. Buna göre berberindeki metoksi gruplarıyla  $TiO_2$  arasında bir etkileşim olduğu söylenebilir (Şekil 4.1). Söz konusu etkileşim, konjügasyonu artırır ve böylece boya molekülünün enerji seviyesini azalacağı için absorpsiyonun daha uzun dalga boylarında olmasına yol açar.

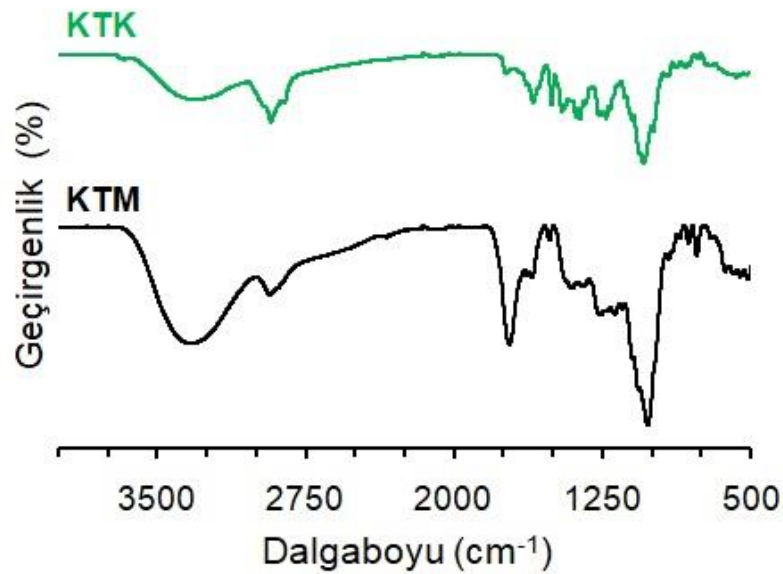


Şekil 4.1. KTK ve KTM ekstraktlarının çözeltideki (düz çizgiler) ve  $TiO_2$  filmi üzerindeki (kesikli çizgiler) absorpsiyon spektrumları



Şekil 4.2. Antosiyaninin moleküler yapısı (a) ve berberin ile  $TiO_2$  arasındaki muhtemel etkileşim (b).

Kadıntuzluğu meyve ve kök kısımlarının kurutulmuş ekstraktların FT-IR spektrumları Şekil 4.3’de verilmiştir. KTK’nin spektrumunda 3339, 2934, 1721, 1631, 1068 ve 1024  $\text{cm}^{-1}$ ’lerde yer alan pikler sırasıyla OH fonksiyonel gruplarını, metil gruplarının simetrik  $-\text{CH}$  gerilme titreşimlerini, karbonil grubunu ( $\text{C}=\text{O}$ ),  $\text{C}=\text{C}$  aromatik halka gerilme titreşimlerini, ester bağı ve  $\text{C}-\text{O}$  titreşimini göstermektedir. Sonuçlar açıkça antosiyaninin fonksiyonel gruplarına karşılık gelmektedir (Maurya ve ark., 2016; Nasrollahzadeh ve ark., 2016; Ramamoorthy ve ark., 2016). KTK’nin spektrumunda ise  $-\text{OH}$  grupları 3310  $\text{cm}^{-1}$ ’de,  $4^\circ \text{N}^+$  2923 ve 2854  $\text{cm}^{-1}$ ’de,  $\text{C}=\text{C}$  bağı 1600, 1507 ve 1385  $\text{cm}^{-1}$ ’de,  $-\text{CH}_2-$  1454  $\text{cm}^{-1}$ ’de,  $\text{C}-\text{H}$  1362  $\text{cm}^{-1}$ ’de,  $\text{C}-\text{N}$  1340, 1271, 1231, 1140 ve 1040  $\text{cm}^{-1}$ ’de ve  $\text{C}-\text{O}$  gerilmesi ise 1100  $\text{cm}^{-1}$ ’de görülmektedir. Sonuçlar ekstraktaki berberinin varlığını ortaya koymaktadır (Maurya ve ark., 2016).

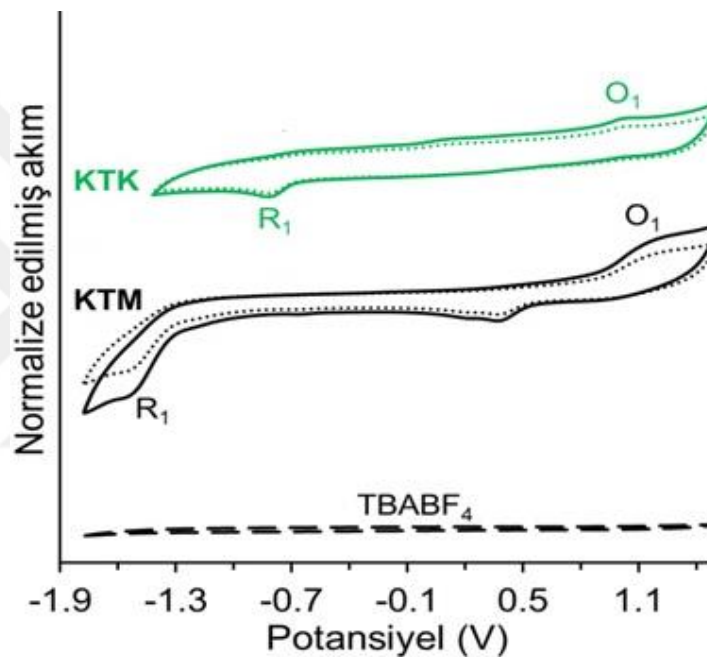


Şekil 4.3 Kurutulmuş ekstraktların FT-IR spektrumları

## 4.2. Doğal Boyaların Elektrokimyasal Özellikleri

Doğal boyaların elektrokimyasal özellikleri, redoks kararlılığı ve boya moleküllerinin uyarılmış halden yarı iletkenin ( $\text{TiO}_2$ ) iletkenlik bandına elektron transfer kabiliyeti ve boya rejenerasyonu dönüşümlü voltametri ile incelenmiştir. Dönüşümlü voltamogramlar (DV) Şekil 4.4’te ve optik özellikleri ile birlikte

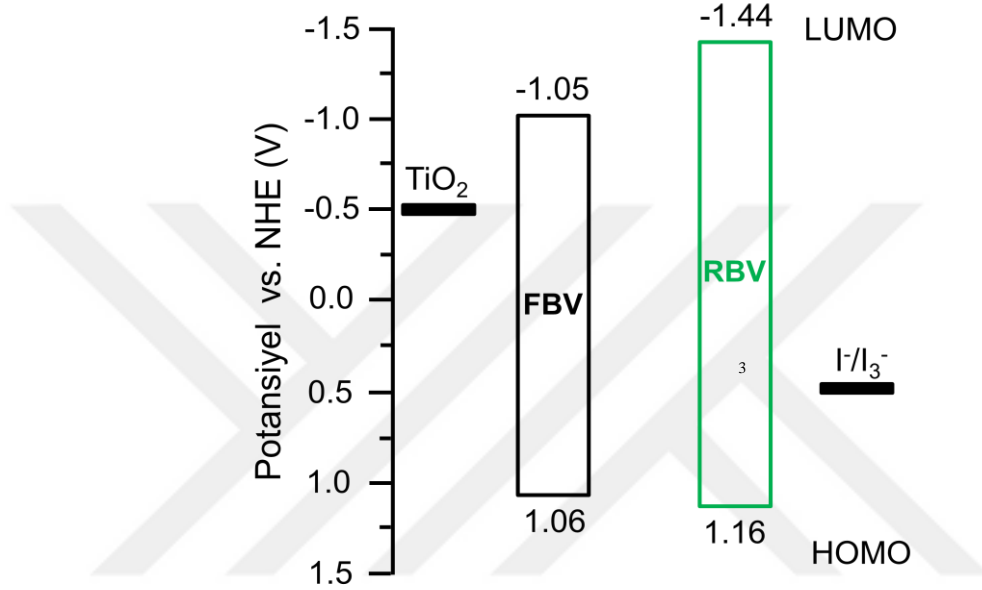
normal hidrojen elektroda (NHE) karşı oksidasyon potansiyelleri ise Tablo4.1’de verilmiştir. Söz konusu şekilde karşılaştırma amacıyla kör çözelti olarak sadece tetrabutilamonyum tetraflüroborat (TBABF<sub>4</sub>) içeren çözeltisinde voltamogramı gösterilmektedir. Her iki doğal boyada, birer tane oksidasyon (O<sub>1</sub>) ve redüksiyon (R<sub>1</sub>) piki görülmektedir. Redoks kararlılığı BDGP’lerinin sürdürülebilirliği için gereklidir (Velusamy ve ark., 2015). DV eğrilerinin 5 döngüden sonra neredeyse hiç değişmeden kalması bu boyaların redoks kararlılıklarının iyi düzeyde olduğunu göstermektedir (Wu ve Zhu,2013).



Şekil 4.4. Doğal boyaların 1. (düz çizgiler) ve 5. (noktalı çizgiler) tarama sonunda elde edilen dönüşümlü voltamogramları

Doğal boyaların en yüksek enerjili dolu moleküler orbital (HOMO) ve en düşük enerjili boş moleküler orbital (LUMO) enerji seviyeleri, oksidasyon potansiyelleri ve optik bant aralığı enerjileri sırasıyla hesaplanmıştır. Bu sonuçlara dayanarak, her iki boyanın da HOMO ve LUMO’sunu gösteren enerji şeması, Şekil 4.5’te sunulmuştur. Boyaların LUMO’su, etkili elektron enjeksiyonu elde etmek için NHE’ye göre, TiO<sub>2</sub>’nin iletkenlik bandından daha negatif olmalıdır (Ooyama ve Harima, 2012). Öte yandan, etkin bir boya rejerasyonu için, boyanın HOMO’su elektrolitin (I<sup>-</sup>/I<sub>3</sub><sup>-</sup>) redoks potansiyelinden en az 0,2-0,3 V daha pozitif olmalıdır

(Ooyama ve Harima, 2012). Açıkça görülmektedir ki, tüm boyaların HOMO seviyeleri, elektrolitin potansiyelinden (NHE'ye göre 0,4 V) yeterince pozitifdir. Bu da oksitlenmiş boyaların elektrolit tarafından elektronunu tekrar kazanmasını mümkün kılar. Boyaların LUMO seviyeleri ise  $\text{TiO}_2$ 'nin iletkenlik bandına (NHE'ye göre -0,5 V) göre yeterince negatif olduğu için elektron enjeksiyon işleminin kendiliğinden gerçekleşebileceğini gösterir.

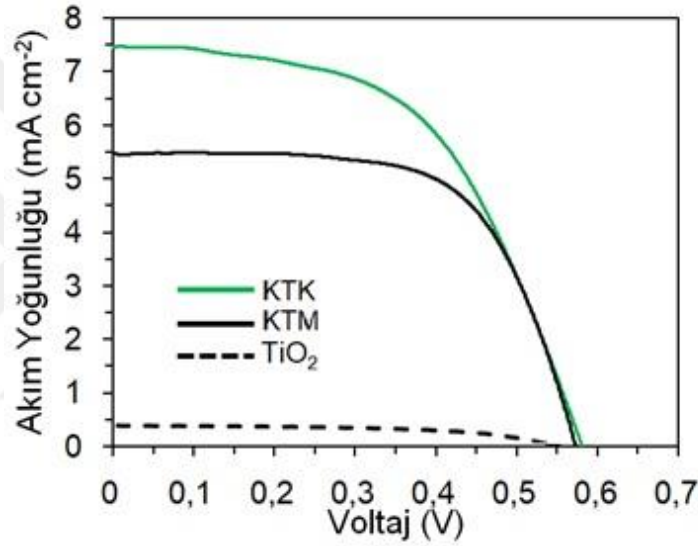


Şekil 4.5. Doğal boyaların,  $\text{TiO}_2$  ve elektrolitin ( $\text{I}^-/\text{I}_3^-$ ) enerji seviyeleri.

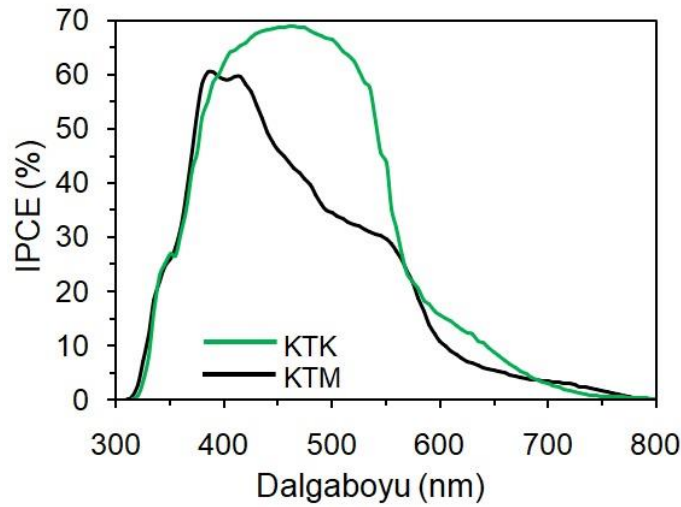
### 4.3. BDGP'lerin Fotovoltaik Performansı

Söz konusu doğal boyalarla hazırlanan BDGP'lerinin  $J-V$  ve IPCE eğrileri Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de ve fotovoltaik parametreleri ise Tablo 4.2'de verilmiştir. Boya içermeyen  $\text{TiO}_2$  güneş pilinin fotovoltaik performansı da karşılaştırma amacıyla test edilmiştir. Buna göre KTM ve KTK esaslı pillerin kısa devre akım yoğunluğu ( $J_{SC}$ ), açık devre gerilimi ( $V_{OC}$ ) ve pillerin dolun faktörü (FF) sırasıyla 5,19-7,37  $\text{mA cm}^{-2}$ , 0,574-0,583V, 0,64-0,54 FF aralıklarındadır. Doğal boyaların enerji dönüşüm verimleri (EDV) %2,01-2,35'e karşılık gelirken, ticari N719 boyası ile hazırlanan BDGP için bu değer %8,06 olarak ölçülmüştür (Şekil 4.8). Doğal boyaların N719'a kıyasla gösterdikleri düşük verimler, doğal boya moleküllerindeki pozitif yüklerin ( $\text{O}^+$  ve  $\text{N}^+$ ) elektron rekombinasyonunu artırmasından kaynaklanıyor olabilir (Kisserwan ve ark., 2012). Pil performanslarını optimize etmek için, duyarlılık

deneyleri ayrıca saf metanol, saf etanol, %10-20 deiyonize su içeren etanol ve pH'ı 1,0 ve 4,0 olan etanol çözeltileri gibi farklı çözelti şartlarında yapılmıştır. Ancak, bu şartlarda üretilen pillerin Kısım 3.2.2'de ekstrakte edilen boylarla hazırlananlara göre daha düşük performans gösterdiği bulunmuştur. Ayrıca, TiO<sub>2</sub> fotoanot'un boya çözeltilisine daldırma süresinin bir fonksiyonu olarak EDV'ler değerlendirilmiştir. Buna göre 3 saatlik daldırma sonunda elde edilen verimlerin 18 saat sonunda elde edilen verimlerden düşük olduğu tespit edilmiştir. Öte yandan 18 saatten sonra elde edilen verimlerin ise azaldığı bulunmuştur. Bu nedenle, boyalar için en uygun daldırma süresinin 18 saat olduğu anlaşılmıştır.



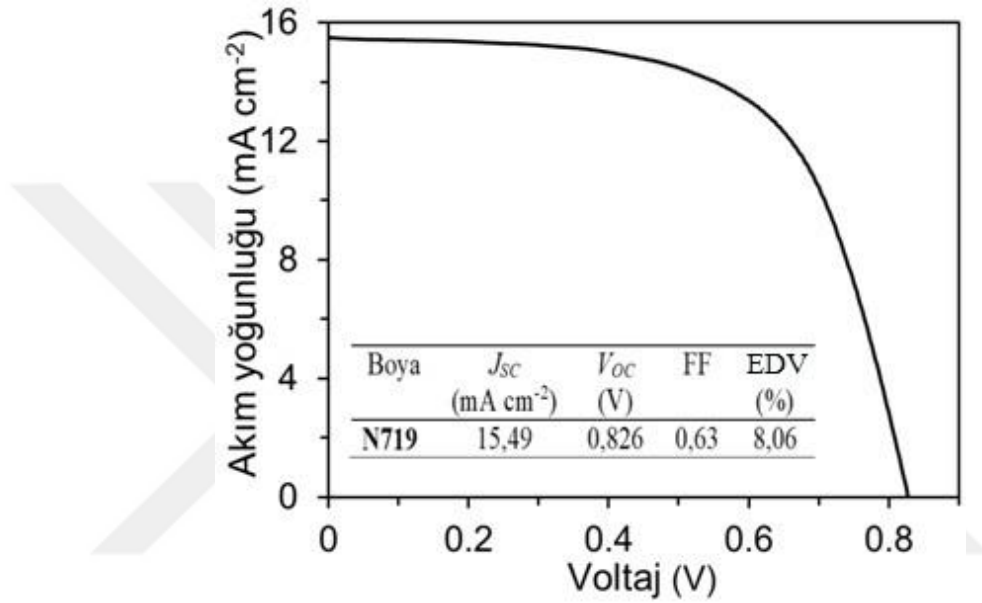
Şekil 4.6. Doğal boyalardan üretilmiş BDGP'lerin J-V eğrileri



Şekil 4.7. Doğal boyalardan üretilmiş BDGP'lerin IPCE eğrileri

Tablo 4.2. Doğal boyalardan yapılan BDGP'lerin fotovoltaiik parametreleri

Boya	IPCE'den integre edilen akım yoğunluğu (mA cm <sup>-2</sup> )	$J_{sc}$ (mA cm <sup>-2</sup> )	$V_{oc}$ (V)	FF	EDV (%)
<b>KTM</b>	5,19	5,47	0,574	0,64	2,01
<b>KTK</b>	7,37	7,46	0,583	0,54	2,35



Şekil 4.8. N719'dan imal edilmiş BDGP'nin J-V eğrisi

Öte yandan, KTM'nin KTK'ye göre daha geniş absorpsiyon göstermesine rağmen veriminin düşük olması ise antosiyanindeki oksonyum (=O<sup>+</sup>-) iyonunun berberindeki nitronyumdan (=N<sup>+</sup>-) daha fazla elektron çekici olmasıyla ilgili olabilir. Bu da doğal olarak elektron aktarımını azaltacağı için düşük EDV elde edilmesi kaçınılmaz olabilir.

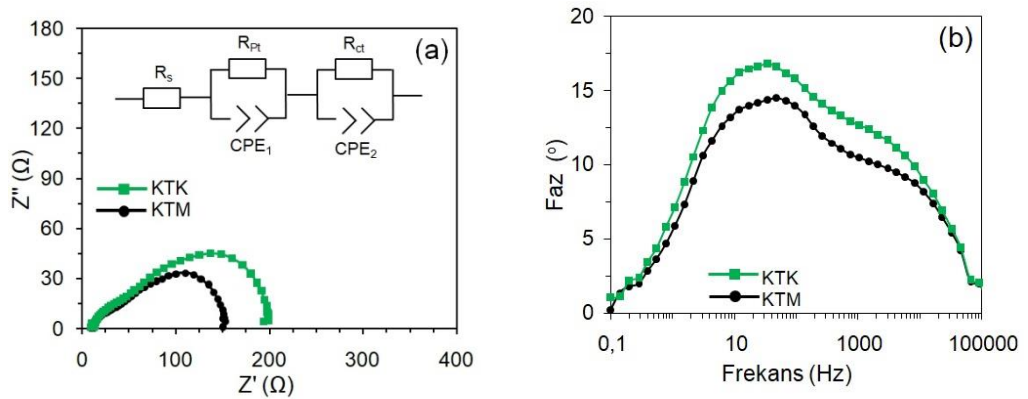
Doğal boyalarla hazırlanan BDGP'lerin IPCE spektrumları Şekil 4.7'de gösterilmiştir. KTM ve KTK için başlangıç dalga boyları sırasıyla 610 ve 580 nm'dir. BDGP'lerin IPCE spektrumları, boyaların TiO<sub>2</sub> filmi üzerindeki absorpsiyon davranışları ile uyum içindedir. KTK ile hazırlanan BDGP'lerin IPCE değeri (460 nm'de %68), KTM ile hazırlanana (420 nm'de %59 ve 555 nm'de %29) kıyasla daha yüksektir. Beklendiği gibi, IPCE spektrumlarından entegre edilen  $J_{sc}$  değerleri,



$J-V$  analizlerinden elde edilen değerlere yakındır (Tablo 4.2). Sonuç olarak, IPCE sonuçları fotovoltaik sonuçların güvenilir olduğunu göstermektedir.

TiO<sub>2</sub>/boya/elektrolit ve Pt karşıt elektrot/elektrolit olmak üzere iki ara yüzde yük transferlerini araştırmak için, EIS çalışması karanlıkta bir yanlılık (-0,55 V) altında gerçekleştirildi. Nyquist ve Bode grafikleri ve BDGP'ler için eşdeğer devre Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Nyquist grafikleri, seriler direnci ( $R_s$ ), yüksek ve düşük frekanslarda yarım daireler içerir. Bu yarım daireler sırasıyla Pt karşıt elektrot/elektrolit ( $R_{Pt}$ ) ve TiO<sub>2</sub>/boya/elektrolitin ( $R_{ct}$ ) yük transfer dirençleridir. Bildiği üzere, karanlıkta TiO<sub>2</sub>'deki elektronlar elektrolitle reaksiyona girer (rekombinasyon). Bu esnada  $I^-$ , Pt karşıt elektrotta  $I_3^-$ 'e oksitlenir. Buna göre  $R_{ct}$  değerinin büyümesi enjekte edilen elektronlarla elektrolit arasındaki rekombinasyonun azalması ve böylece fotovoltajin artması anlamına gelir (Lee ve ark. 2008).

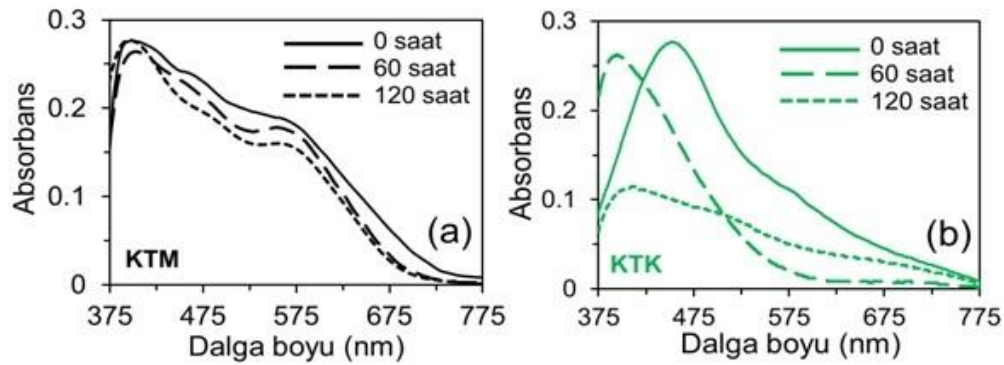
Şekil 4.9 incelendiğinde boyaların  $R_{ct}$  değerlerinin KTM (87,3  $\Omega$ ) < KTK (132,6  $\Omega$ ) şeklindeki sıralaması söz konusu boyaların  $V_{oc}$  değerlerinin KTM (0,574 V) < KTK (0,583 V) şeklindeki sıralamasıyla örtüşmektedir. Sonuçlar KTM'den imal edilmiş BDGP'de KTK'ya göre daha çok elektron rekombinasyonu gerçekleştiğini göstermektedir. Benzer şekilde Bode eğrilerinden  $\tau_e = 1/(2\pi f)$  ( $\tau_e$ = elektron ömrü) formülü ile hesaplanan elektron ömürlerinin de KTK (4,67 ms) ve KTM (3,31 ms) söz konusu  $V_{oc}$  değerleri ile doğru orantılı olduğu görülmektedir.



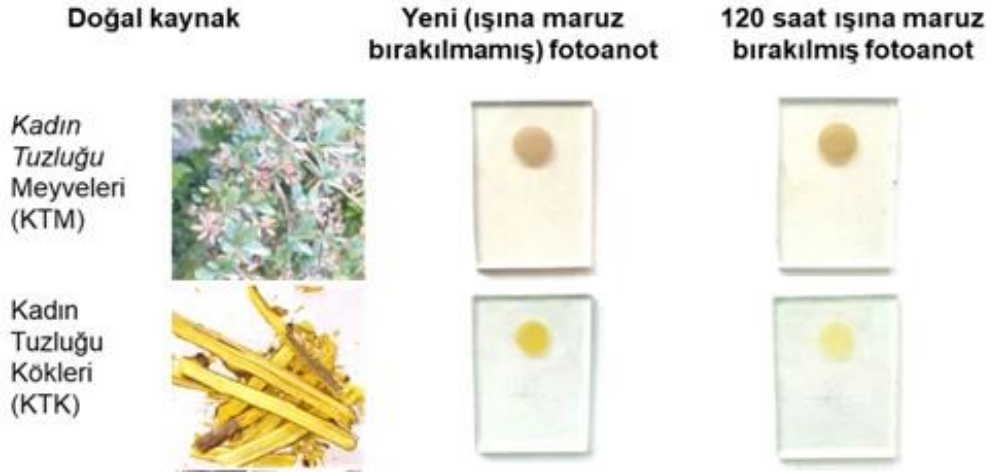
Şekil 4.9. BDGP'lerin Nyquist (a) and Bode (b) grafikleri.

#### 4.4. BDGP'lerin Kararlılığı

Doğal boyaların en önemli dezavantajı ışık altında kolayca bozunmalarıdır. Fotoanot üzerindeki duyarlaştırıcının güneş ışığına maruz kaldıktan sonra renginin solması doğal boyaların düşük fotokararlılığının kanıtlarından biri olarak kabul edilmektedir. Buda muhtemelen  $TiO_2$ 'nin katalitik bozulmasından kaynaklanmaktadır (Calogero ve ark., 2010; Dumbrava ve ark., 2012). Diğer bir ifade ile, bir fotokatalizör olan  $TiO_2$  güneş ışığını absorplar ve yakınında bulunan boyayı parçalayan serbest radikaller meydana getirir (Prabavathy ve ark., 2017). Her iki boyanın da fotokararlılığını inceleyebilmek için  $TiO_2$  fotoanotu üzerindeki absorpsiyon spektrumları, güneş ışığı simülatörü kullanılarak belli süreler boyunca boyaların ışına maruz bırakılmaları sonrasında kaydedildi. Simüle edilmiş güneş ışığına maruz kalan  $TiO_2$  üzerine adsorbe edilmiş doğal boyaların absorpsiyon spektrumları Şekil 4.10'da gösterilmektedir. Görüldüğü üzere, KTK'nin absorpsiyon spektrumu simüle edilmiş güneş ışığına 120 saat maruz kaldıktan sonra neredeyse kaybolmuştur. KTK'nin ışımaya maruz kaldıktan sonra fotokatalitik bozulması fotoanot renginin solmasıyla doğrulanmıştır (Şekil 4.11). Bu kararlılık testleri sonucu KTK'nin BDGP'leri uygulamalarına elverişli olmadığı görülmüştür. Öte yandan KTM'nin absorpsiyon spektrumu, simüle edilmiş güneş ışığına 120 saat maruz bırakıldıktan sonra neredeyse aynı kalmıştır. KTM'nin ışımaya maruz kaldıktan sonra fotoanot renginin solmadığı yani fotokatalitik bozulmaya uğramadığı anlaşılmaktadır. Bu kararlılık testleri, KTM'nin BDGP uygulamaları için elverişli olabileceğini göstermektedir.

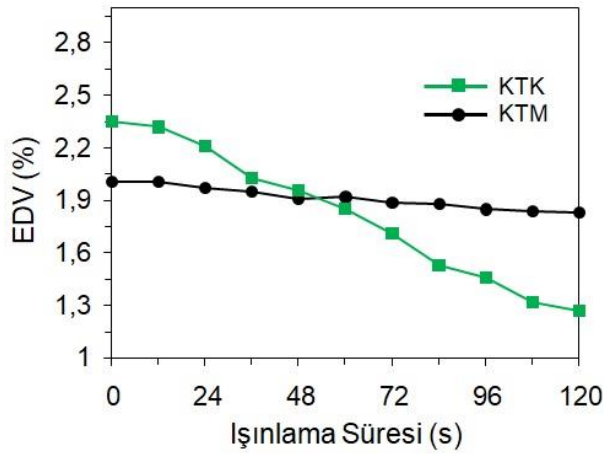


Şekil 4.10. 0,60 ve 120 saat süresince simüle güneş ışığına maruz bırakılan  $TiO_2$  üzerindeki doğal boyaların absorpsiyon spektrumları.

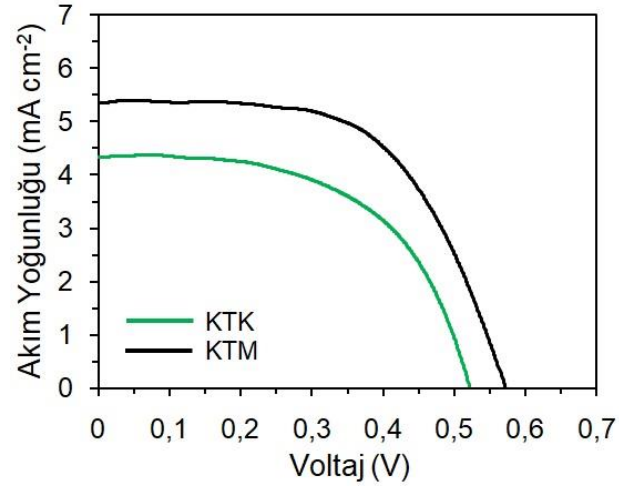


Şekil 4.11.  $TiO_2$  fotoanot üzerine adsorbe edilmiş doğal boyaların 0 ve 120 saatlik ışına maruz bırakılmaları sonunda elde edilmiş dijital fotoğrafları.

Şekil 4.12, doğal boyalarla duyarlaştırılmış güneş pillerinin belli ışına süreleri sonunda ölçülen % EDV değerlerini göstermektedir. BDGP'lerin 120 saat ışığa maruz kaldıktan sonra gösterdikleri  $J-V$  eğrileri ve bunlara karşılık gelen fotovoltajik parametreler ise Şekil 4.13 ve Tablo 4.3'de verilmektedir. Görüldüğü üzere 120 saat süresince ışına maruz kaldıktan sonra başlangıç performanslarına göre KTK esaslı BDGP'nin verimi %46 oranında azalırken KTM esaslı BDGP'nin fotovoltajik performansı ise sadece %9 civarında düşmüştür. Bu sonuçlar KTM ekstraktlarının fotokararlılığını bir kez daha teyit etmektedir.



Şekil 4.12. Belli sürelerde ışına maruz bırakılan BDGP'lerin ölçülen verimleri



Şekil 4.13. BDGP'lerin 120 saatlik ışımaya sonrası oluşan J-V eğrileri

Tablo 4.3. BDGP'lerin 120 saatlik ışımaya sonrası fotovoltaik parametreleri

Boya	$J_{SC}$ (mA cm <sup>-2</sup> )	$V_{OC}$ (V)	FF	EDV(%)
<b>KTM</b>	5,34	0,571	0,60	1,83
<b>KTK</b>	4,32	0,525	0,56	1,27

## BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Söz konusu tez çalışması kapsamında ticari silisyum ve metal içeren sentetik boyalara göre hem ekonomik hem de çevre dostu olan doğal boyalarla BDGP üretimi ve bunların fotovoltaiik karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir. Doğal boya kaynakları olarak seçilen kadıntuzluğu (*Berberis vulgaris*) bitkisinin meyve ve kök kısımları ile henüz BDGP üretimi ile ilgili literatürde bir çalışma söz konusu olmadığı için gerçekleştirilen tez çalışması özgündür.

Öncelikle bitkinin kök ve meyvelerinden ekstraksiyon metoduyla doğal boyalar elde edilmiştir. Gerçekleştirilen yapı analizlerine göre kadıntuzluğunun meyvesinde (KTM) ve kökünde (KTK) başlıca bileşenlerin sırasıyla başlıca antosiyanin ve izokinolin alkaloid (berberin) türevleri olduğu tespit edilmiştir. Yapılan optik ve elektrokimyasal çalışmalar BDGP'ler için söz konusu doğal boyaların uygun olabileceklerini ortaya koymuştur. Nitekim söz konusu doğal boyalardan elde edilen güneş pillerinin verimleri KTK için %2,35 olurken KTM için ise %2,01 olarak belirlenmiştir. Elde edilen fotovoltaiik performanslar sentetik olanlara göre düşük olsa da doğal boyaların ekonomik ve çevreci olmaları sebebiyle sürdürülebilir güneş pilleri için uygun olabilecekleri düşünülmektedir. Üstelik antosiyanin içeren (KTM) ekstraktan yapılan BDGP'nin uzun süreli güneş ışığına maruz bırakılmasına rağmen fotovoltaiik performansında neredeyse hiç düşüş görülmemiştir. Buna göre hem ekonomik ve çevreci hem de kararlı BDGP uygulamaları için antosiyanin içeren doğal boyaların duyarlaştırıcı olarak kullanılmalarının uygun olduğu ortaya çıkmıştır.

Berberine göre antosiyanin ekstraktının kararlılığına etkiyen faktör ya da faktörler belirlendiği takdirde kararlı BDGP üretiminde doğal boyaların kullanımları artabilir. Bu amaç doğrultusunda çalışmalarımız devam etmektedir.

Sonuç olarak tez çalışması kapsamında güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürebilen yeni doğal boyalar ortaya çıkarılmış ve böylece düşük maliyetli ve evre dostu yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılabilirliklerine katkıda bulunulmuştur. Ayrıca tez kapsamında yapılan çalışmalar uluslararası bilimsel bir dergide yayımlanarak ülkemizin söz konusu alanda bilimsel etkinliği pekiştirilmiş oldu (Güzel ve ark., 2018).



## KAYNAKLAR

- Abdou, E.M., Hafez, H.S., Bakir, E., Abdel-Mottaleb, M.S.A., 2013. Photostability of lowcost dye-sensitized solar cells based on natural and synthetic dyes. *Spectrochim. ActaA* 115, 202–207.
- Akman, E., Akın, S., Karanfil, G., & Sönmezoğlu, S. (2013). Organik Güneş Pilleri. *Trakya University Journal of Engineering Sciences* June, 14(1).
- Ambre, R.B., Chang, G.F., Zanwar, M.R., Yao, C.F., Diau, E.W.G., Hung, C.H., 2013. New dual donor-acceptor (2D–2A) porphyrin sensitizers for stable and cost-effective dyesensitized solar cells. *Chem. Asian J.* 8 (9), 2144–2153.
- Boschloo, G., & Hagfeldt, A. (2009). Characteristics of the iodide/triiodide redox mediator in dye-sensitized solar cells. *Accounts of chemical research*, 42(11), 1819-1826.
- Cai, Y., Sun, M., Wu, H., Huang, R., & Corke, H. (1998). Characterization and quantification of betacyanin pigments from diverse *Amaranthus* species. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 46(6), 2063-2070.
- Calogero, G., Di Marco, G., 2008. Red Sicilian orange and purple eggplant fruits as naturalsensitizers for dye-sensitized solar cells. *Sol. Energ. Mat. Sol. C.* 92 (11), 1341–1346.
- Calogero, G., Di Marco, G., Cazzanti, S., Caramori, S., Argazzi, R., Di Carlo, A., Bignozzi, C.A., 2010. Efficient dye-sensitized solar cells using red turnip and purple wild Sicilian prickly pear fruits. *Int. J. Mol. Sci.* 11 (1), 254–267.
- Calogero, G., Yum, J.H., Sinopoli, A., Di Marco, G., Gratzel, M., Nazeeruddin, M.K., 2012. Anthocyanins and betalains as light-harvesting pigments for dye-sensitized solar cells. *Sol. Energy* 86 (5), 1563–1575.
- Castillo, J., Hung, J., Rodriguez, M., Bastidas, E., Laboren, I., & Jaimes, A. (2005). LED fluorescence spectroscopy for direct determination of monoamine oxidase B inactivation. *Analytical biochemistry*, 343(2), 293-298.
- Chang, H., Wu, H.M., Chen, T.L., Huang, K.D., Jwo, C.S., Lo, Y.J., 2010. Dye-sensitized solar cell using natural dyes extracted from spinach and ipomoea. *J. Alloy. Compd.* 495 (2), 606–610.
- Chang, H., Lo, Y.J. 2010. Pomegranate Leaves and Mulberry Fruit as Natural Sensitizers for Dye-Sensitized Solar Cells. *Solar Energy*, 84, 1833-1837.
- Chapin, D. M., Fuller, C. S., & Pearson, G. L. (1954). A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power. *Journal of Applied Physics*, 25(5), 676-677.
- Deb, S.K. 2005. Dye-Sensitized TiO<sub>2</sub> Thin-Film Solar Cell Research at the National Renewable Energy Laboratory (Nrel), *Solar Energy Materials Solar Cells.* 88, 1-10.

- Drechsel, J., Männig, B., Kozłowski, F., Pfeiffer, M., Leo, K., & Hoppe, H. (2005). Efficient organic solar cells based on a double p-i-n architecture using doped wide-gap transport layers. *Applied Physics Letters*, 86(24), 244102.
- Dumbrava, A., Enache, I., Oprea, C.I., Georgescu, A., Girtu, M.A., 2012. Toward a more efficient utilisation of betalains as pigments for dye-sensitized solar cells. *Dig. J.Nanomater. Bios.* 7 (1), 339–351.
- El-Salam, M. A., Mekky, H., El-Naggar, E. M. B., Ghareeb, D., El-Demellawy, M., & El-Fiky, F. (2015). Hepatoprotective properties and biotransformation of berberine and berberrubine by cell suspension cultures of *Dodonaea viscosa* and *Ocimum basilicum*. *South African Journal of Botany*, 97, 191-195
- El-Sayed, M.M., Ghareeb, D.A., Talat, H.A., Sarhan, E.M., 2013. High fat diet induced insulin resistance and elevated retinol binding protein 4 in female rats; treatment and protection with *Berberis vulgaris* extract and vitamin A. *Pak. J. Pharm. Sci.* 26 (6), 1189–1195.
- Fernando, J.M.R.C., Senadeera, G.K.R., 2008. Natural anthocyanins as photosensitizers for dye-sensitized solar devices. *Curr. Sci.* 95 (5), 663–666.
- Furukawa, S., Iino, H., Iwamoto, T., Kukita, K., Yamauchi, S., 2009. Characteristics of dye-sensitized solar cells using natural dye. *Thin Solid Films* 518 (2), 526–529.
- Günsel, A., Güzel, E., Bilgiçli, A. T., Şişman, İ., & Yarasir, M. N. (2017). Synthesis of non-peripheral thioanisole-substituted phthalocyanines: Photophysical, electrochemical, photovoltaic, and sensing properties. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 348, 57-67.
- Güzel, E., Arslan, B.S., Durmaz, V., Cesur, M., Tutar, Ö.F., Sarı, T., İşleyen, M., Nebioğlu, M., Şişman, İ. 2018. Photovoltaic performance and photostability of anthocyanins, isoquinoline alkaloids and betalains as natural sensitizers for DSSCs. *Solar Energy* 173, 34-41.
- Grätzel M. 2000. Perspectives For Dye-Sensitized Nano crystalline Solar Cells. *Prog. Photovoltaic Res. Applic.* 8: 171–185.
- Grätzel, M. 2001. Photo electro chemical Cells. *Nature.* 414(15), 338-344.
- Green, M. A. (2000). Photovoltaics: technology overview. *Energy policy*, 28(14), 989-998.
- Hagfeldt A. Ve Grätzel M. 1995. Light-Induced Redox Reactions in Nano crystalline Systems. *Chem. Rev.* 95: 49–68.
- Hagfeldt, A., Boschloo, G., Sun, L., Kloo, L., Pettersson, H. 2010. Dye-Sensitized Solar Cells. *Chem. Rev.* 110, 6595–6663.
- Hao, S.C., Wu, J.H., Huang, Y.F., Lin, J.M., 2006. Natural dyes as photosensitizers for dyesensitized solar cell. *Sol. Energy* 80 (2), 209–214.
- Hong, W., Xu, Y., Lu, G., Li, C., & Shi, G. (2008). Transparent graphene/PEDOT–PSS composite films as counter electrodes of dye-sensitized solar cells. *Electrochemistry Communications*, 10(10), 1555-1558.
- Hu, Y., Yellappa, S., Thomas, M.B., Jinadasa, R.G.W., Matus, A., Shulman, M., D'Souza, F., Wang, H., 2017. beta-functionalized push-pull opp-dibenzoporphyrins as sensitizers for dye-sensitized solar cells. *Chem-Asian J.* 12 (20), 2749–2762.
- Huang, H., Chen, H., Long, J., Wang, G., & Tan, S. (2016). Novel D–A– $\pi$ –A organic dyes based on 3-dimensional triarylamine and benzothiadiazole derivatives for high-performance dye-sensitized solar cells. *Journal of Power Sources*, 326, 438-446.



- Karaca, H., Şişman, İ., Güzel, E., Sezer, S., Selimoğlu, F., Ergezen, B., ... & Eyüpoğlu, V. (2018). Thiochalcone substituted phthalocyanines for dye-sensitized solar cells: Relation of optical and electrochemical properties for cell performance. *Journal of Coordination Chemistry*, 71(10), 1606-1622.
- Koç, E., & Şenel, M. C. (2013). Dünyada ve Türkiye’de enerji durumu-genel değerlendirme. *Mühendis ve Makina*, 54(639), 32-44.
- Kisserwan, H., Kamar, A., Shoker, T., & Ghaddar, T. H. (2012). Photophysical properties of new cyclometalated ruthenium complexes and their use in dye sensitized solar cells. *Dalton Transactions*, 41(35), 10643-10651.
- Kumar, S.N.A., Ritesh, S.K., Sharmila, G., Muthukumaran, C. 2017. Extraction Optimization and Characterization of Water Soluble Red Purple Pigment from Floral Bracts of *Bougainvillea Glabra*. *Arab. J. Chem.* 10, S2145–S2150.
- Kuwabara, T., Nakayama, T., Uozumi, K., Yamaguchi, T., & Takahashi, K. (2008). Highly durable inverted-type organic solar cell using amorphous titanium oxide as electron collection electrode inserted between ITO and organic layer. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92(11), 1476-1482.
- Lai, W.H., Su, Y.H., Teoh, L.G., Hon, M.H., 2008. Commercial and natural dyes as photosensitizers for a water-based dye-sensitized solar cell loaded with gold nanoparticles. *J. Photoch. Photobio. A* 195 (2–3), 307–313.
- Law M., Greene Le., Johnson Jr., Saykally R., Yang P. 2005. Nanowire Dyesensitized Solar Cells. *Nat. Mat.*, 4: 455-459.
- Lee, K. M., Hu, C. W., Chen, H. W., & Ho, K. C. (2008). Incorporating carbon nanotube in a low-temperature fabrication process for dye-sensitized TiO<sub>2</sub> solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92(12), 1628-1633.
- Li, B., Wang, L., Kang, B., Wang, P., Qiu, Y. 2006. Review of Recent Progress in Solid-State Dye-Sensitized Solar Cells. *Sol. Energ. Mat. Sol. C.*, 90, 549–573.
- Liang, Y., Feng, D., Wu, Y., Tsai, S. T., Li, G., Ray, C., & Yu, L. (2009). Highly efficient solar cell polymers developed via fine-tuning of structural and electronic properties. *Journal of the American Chemical Society*, 131(22), 7792-7799.
- Longo, L., Vasapollo, G., 2006. Extraction and identification of anthocyanins from *Smilaxaspera L.* berries. *Food Chem.* 94 (2), 226–231.
- Lungenschmied, C., Dennler, G., Neugebauer, H., Sariciftci, S. N., Glatthaar, M., Meyer, T., & Meyer, A. (2007). Flexible, long-lived, large-area, organic solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 91(5), 379-384
- Maurya, I.C., Srivastava, P., Bahadur, L., 2016. Dye-sensitized solar cell using extract from petals of male flowers *Luffa cylindrica L.* as a natural sensitizer. *Opt. Mater.* 52, 150–156.
- Mishra, A., Fischer, M. K., & Bäuerle, P. (2009). Metal-free organic dyes for dye-sensitized solar cells: From structure: Property relationships to design rules. *Angewandte Chemie International Edition*, 48(14), 2474-2499.
- Nasrollahzadeh, M., Sajadi, S.M., Rostami-Vartooni, A., Alizadeh, M., Bagherzadeh, M., 2016. Green synthesis of the Pd nanoparticles supported on reduced graphene oxide using barberry fruit extract and its application as a recyclable and heterogeneous catalyst for the reduction of nitroarenes. *J. Colloid Interf. Sci.* 466, 360–368.

- Ni, J.S., Yen, Y.C., Lin, J.T., 2016. Organic sensitizers with a rigid dithienobenzotriazolebased spacer for high-performance dye-sensitized solar cells. *J. Mater. Chem. A* 4(17), 6553–6560.
- Nwanya Ac., Ezema F1., Ejikeme Pm. 2011. Dyed Sensitized Solar Cells: A Technically and Economically Alternative Concept to P-N Junction Photovoltaic Devices. *International Journal Of The Physical Sciences*, 6.
- O'Regan, B., Gratzel, M., 1991. A low-cost, high-efficiency solar-cell based on dye-sensitized colloidal TiO<sub>2</sub> films. *Nature* 353 (6346), 737–740.
- Ooyama, Y., Harima, Y., 2012. Photophysical and electrochemical properties, and molecular structures of organic dyes for dye-sensitized solar cells. *ChemPhysChem* 13(18), 4032–4080.
- Öztürel, N., Zilan, R., & Ecevit, A. (2001). Türkiye 'de Yenilenebilir Enerji Kaynakları İçin İzlenmesi Gereken Strateji, Planlama Politikaları ve Bunların Sosyal ve Siyasi Etkileri. *Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*, 28-32.
- Park, K.H., Kim, T.Y., Park, J.Y., Jind, E.M., Yıme, S.H., Choif, D.Y., Lee, J.W. 2013. Adsorption Characteristics of Gardenia Yellow as Natural Photosensitizer for Dyesensitized Solar Cells. *Dyes and Pigments*, 96, 595-601.
- Pelet, S., Moser, J.E., Gratzel, M. 2000. Cooperative Effect of Adsorbed Cations and Iodide on the Interception of Back Electron Transfer in the Dye Sensitization of Nano crystalline TiO<sub>2</sub>. *J. Phys. Chem. B*, 104, 1791–1795.
- Phinjaturus, K., Maiaugree, W., Suriharn, B., Pimanpaeng, S., Amornkitbamrung, V., Swatsitang, E., 2016. Dye-sensitized solar cells based on purple corn sensitizers. *Appl. Surf. Sci.* 380, 101–107.
- Polo, A.S., Iha, N.Y.M. 2006. Blue Sensitizers for Solar Cells: Natural Dyes from Calafate and Jaboticaba. *Solar Energy Materials Solar Cells*, 90, 1936-1944.
- Polo, A.S., Itokazu, M.K., Iha, N.Y.M. 2004. Metal Complex Sensitizers in Dyes ensitized Solar Cells. *Coordination Chemistry Reviews*, 248, 1343-1361.
- Prabavathy, N., Shalini, S., Balasundaraprabhu, R., Velauthapillai, D., Prasanna, S., Muthukumarasamy, N., 2017. Enhancement in the photostability of natural dyes for dye-sensitized solar cell (DSSC) applications: a review. *Int. J. Energy Res.* 41 (10), 1372–1396.
- Prevenslik, T. V. (2003). Cavitation induced Becquerel effect. *Ultrasonics*, 41(4), 323-327.
- Rahimi-Madiseh, M., Lorigoini, Z., Zamani-Gharaghoshi, H., Rafieian-kopaei, M., 2017. *Berberis vulgaris*: specifications and traditional uses. *Iran. J. Basic. Med. Sci.* 20 (5), 569–587.
- Ramamoorthy, R., Radha, N., Maheswari, G., Anandan, S., Manoharan, S., Williams, R.V., 2016. Betalain and anthocyanin dye-sensitized solar cells. *J. Appl. Electrochem.* 46 (9), 929–941.
- Ravikumar, K., Kim, S.H., Son, Y.A., 2007. Design of experiments for the optimization and statistical analysis of Berberine finishing of polyamide substrates. *Dyes Pigm.* 75 (2), 401–407.
- Sahin, K., Orhan, C., Tuzcu, M., Borawska, M.H., Jablonski, J., Guler, O., Sahin, N., Hayirli, A., 2013. *Berberis vulgaris* root extract alleviates the adverse effects of heat stress via modulating hepatic nuclear transcription factors in quails. *Brit. J. Nutr.* 110 (4), 609–616.

- Sauvage, F., DiFonzo, F., Bassi, A.L., Casari, C.S., Russo, V., Divitini, G., Ducati, C., Bottani, C.E., Comte, P., Graetzel, M. 2010. Hierarchical TiO<sub>2</sub> Photoanode for Dyesensitized Solar Cells. *Nano Lett.* 10 (7), 2562–2567.
- Sayama, K., Sugihara, H., & Arakawa, H. (1998). Photoelectrochemical properties of a porous Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> electrode sensitized by a ruthenium dye. *Chemistry of Materials*, 10(12), 3825-3832.
- Schliemann, W., Joy, R.W., Komamine, A., Metzger, J.W., Nimtz, M., Wray, V., Strack, D., 1996. Betacyanins from plants and cell cultures of *Phytolacca americana*. *Phytochemistry* 42 (4), 1039–1046.
- Smestad, G. P., & Gratzel, M. (1998). Demonstrating electron transfer and nanotechnology: a natural dye-sensitized nanocrystalline energy converter. *Journal of chemical education*, 75(6), 752.
- Smith, W. (1873). Effect of Light on Selenium. *Nature*, 7, 303.
- Şişman, İ., Tekir, O., & Karaca, H. (2017). Role of ZnO photoanode nanostructures and sensitizer deposition approaches on the photovoltaic properties of CdS/CdSe and CdS<sub>1-x</sub>Se<sub>x</sub> quantum dot-sensitized solar cells. *Journal of Power Sources*, 340, 192-200.
- Tang, C. W. (1986). Two-layer organic photovoltaic cell. *Applied physics letters*, 48(2), 183-185.
- Tennakone, K., Kumara, G.R.R., Kottegoda, I.R.M., Perera, V.S.P. 1999. *Chemical Communications*, 35, 15-16.
- Thomas, S., Deepak, T.G., Anjusree, G.S., Arun, T.A., Nair, S.V., Nair, A.S. 2014. A Review on Counter Electrode Materials in Dye-Sensitized Solar Cells. *J. Mater. Chem. A*, 2, 4474-4490.
- Tsoutsos, T., Frantzeskaki, N., & Gekas, V. (2005). Environmental impacts from the solar energy technologies. *Energy Policy*, 33(3), 289-296.
- Velusamy, M., Thomas, K.R.J., Lin, J.T., Hsu, Y.C., Ho, K.C. 2005. Organic Dyes Incorporating Low-Band-Gap Chromophores for Dye-Sensitized Solar Cells. *Org. Lett.* 7 (10), 1899–1902.
- Yakimov, A., & Forrest, S. R. (2002). High photovoltage multiple-heterojunction organic solar cells incorporating interfacial metallic nanoclusters. *Applied Physics Letters*, 80(9), 1667-1669.
- Wu, Y.Z., Zhu, W.H., 2013. Organic sensitizers from D-pi-A to D-A-pi-A: effect of the internal electron-withdrawing units on molecular absorption, energy levels and photovoltaic performances. *Chem. Soc. Rev.* 42 (5), 2039–2058.
- Würfel, P. (2005). *Physics of solar cells: From principles to new concepts*. Verlag GmbH & Co KGaA.
- Zhang, D., Lanier, S.M., Downing, J.A., Avent, J.L., Lumc, J., Mchalea, J.L. 2008. Betalain Pigments for Dye-Sensitized Solar Cells. *Journal of Photochemistry and Photobiology A : Chemistry*, 195, 72-80.
- Zhou, Z., Wu, L., Gao, Y., Ma, T. 2011. Dye-Sensitized Solar Cells Using 20 Natural Dyes as Sensitizers. *Journal of Photochemistry and Photobiology a : Chemistry*, 219, 188-194.

## ÖZGEÇMİŞ

Mert CESUR, 22 Ekim 1992 tarihinde İstanbul'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini İstanbul'da tamamladı. 2010 yılında Mehmet Tekinalp Lisesi'nden mezun oldu. Aynı yıl başladığı Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümünü 2015 yılında birincilikle bitirdi. Aynı yıl Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Analitik Kimya Anabilim dalında yüksek lisans eğitimine başladı. Bir adet uluslararası bilimsel yayını bulunmaktadır. Şu anda özel bir şirkette çalışmaktadır.