

T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ALÜMİNYUM KATKILI TiO_2/ZnO NANOKOMPOZİT
YAPILARIN KARAKTERİZASYONU VE BOYA DUYARLI
GÜNEŞ PİLİ PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

Yaşar ERDOĞAN

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Tuba SOLAKYILDIRIM

FİZİK
ANABİLİM DALI

ERZİNCAN
2019

Her Hakkı Saklıdır.

Kabul ve Onay Sayfası

Dr. Öğr. Üyesi Tuba SOLAKYILDIRIM danışmanlığında, Yaşar ERDOĞAN tarafından hazırlanan bu çalışma 08/08/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliği ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Şakir AYDOĞAN

İmza:



Üye : Dr. Öğr. Üyesi Tuba SOLAKYILDIRIM

İmza:



Üye : Dr. Öğr. Üyesi Burcu BOZKURT ÇIRAK

İmza:



Yukarıdaki sonuç Enstitü Yönetim Kurulunun 11/09/2019 tarih ve 37/11..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.



Prof. Dr. Mustafa Fatih ERTUGAY
Enstitü Müdürü

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

Bilimsel Etięe Uygunluk Sayfası

“Alüminyum Katkılı TiO₂/ZnO Nanokompozit Yapıların Karakterizasyonu ve Boya Duyarlı Güneş Pili Performanslarının İncelenmesi” isimli “Yüksek Lisans” tezim tarafımda intihal tespit programı ile incelenmiştir. Buna göre tezimde bilimsel etik ihlali ve intihal olarak nitelendirilebilecek herhangi bir durum olmadığını taahhüt ederim.

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir biçimde elde edildiğini; aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi beyan ederim. 08/08/2019

Yaşar ERDOĞAN



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ALÜMİNYUM KATKILI TiO₂/ZnO NANOKOMPOZİT YAPILARIN KARAKTERİZASYONU VE BOYA DUYARLI GÜNEŞ PİLİ PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

Yaşar ERDOĞAN

Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Tuba SOLAKYILDIRIM

Bu tez çalışmasında, %0,5, %1, %2, %4 Alüminyum (Al) katkıli TiO₂/ZnO nanokompozit (TZA) fotoanotları sentezlendi ve karakterize edilerek fotovoltaiik verimi artırmak için optimum şartlarda boya duyarlı güneş pilleri (BDGP) kombine edildi. Anodik oksidasyon yöntemi kullanılarak titanyum plakalar üzerine sentezlenen TiO₂ nanotüp dizileri sentezlendi. Sentezlenen nanotüp diziler, hidrotermal yöntem kullanılarak Al katkıli ZnO nanoçubukların dekore edilmesinde alt yüzey olarak kullanıldı. Daha yüksek foto dönüşüm etkinliği için optimum Al katkıli ZnO dekorasyon yoğunluklarını belirlemek için optimum hidrotermal koşullarında Al katkılama oranları değiştirilmiştir. XRD, SEM, AFM ve XPS karakterizasyon sonuçları, TiO₂ nanotüp dizilerinin yüzey morfolojisinin, kristal yapısının, elemental bileşiminin ve yüzeyine dekore edilmiş Al katkıli ZnO nanoçubukların optimum koşullarda katkı oranlarına duyarlı olduğunu göstermektedir. TZA fotoanotlarına dayanan BDGP'lerinin verimi katkısiz TiO₂/ZnO BDGP'ye kıyasla daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. BDGP'lerde, TiO₂ nanotüp dizileri ile Al katkıli ZnO nanoçubukları arasındaki sinerjik etkileşme, yasak enerji bant aralığının azaltılması ve rekombinasyon oranlarının baskılanması sonucunda yük transfer direncinin azaltılmasıyla verimliliğın artması sağlanmıştır.

2019, 46 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Anodik oksidasyon, boya duyarlı güneş pilleri, hidrotermal, katkılama, nanokompozit, TiO₂ nanotüp, Al katkıli ZnO nanoçubuk.

ABSTRACT

Master Thesis

SYNTHESIS, CHARACTERIZATION AND DYE SENSITIZED SOLAR CELL PERFORMANCE OF ALUMINIUM DOPED TiO₂/ZnO NANOCOMPOSITE STRUCTURES

Yaşar ERDOĞAN

Erzincan Binali Yıldırım University
Institute of Natural and Applied Sciences
Department of Physics

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Tuba SOLAKYILDIRIM

In this study, 0.5%, 1%, 2%, 4% aluminum-doped TiO₂ / ZnO nanocomposite (TZA) photoanodes were synthesized and characterized and combined with dye sensitive solar cells (DSSC) under optimum conditions to increase photovoltaic efficiency. TiO₂ nanotube sequences were synthesized on titanium plates using anodic oxidation method. The synthesized nanotube arrays were used as the substrate for decorating Al-doped ZnO nano-rods using the hydrothermal method. Al doping ratios were changed at optimum hydrothermal conditions to determine optimal Al-doped ZnO decoration densities for higher photoconversion efficiency. The XRD, SEM, AFM and XPS characterization results show that the surface morphology, crystal structure, elemental composition and surface-decorated Al-doped ZnO nanorods of TiO₂ nanotube arrays are susceptible to contribution rates under optimum conditions. DSSCs based on TZA photoanodes yielded higher yields than pure TiO₂ / ZnO DSSC. In DSSCs, synergistic interaction between TiO₂ nanotube arrays and Al-doped ZnO nano-rods, reduction of forbidden energy bandgap and reduction of recombination rates result in increased efficiency.

2019, 46 Pages

Keywords: Anodic oxidation, dye sensitized solar cell, hydrothermal, doped, nanocomposites TiO₂ nanotubes, Al doped ZnO nanorods.

TEŞEKKÜR

Hazırlamış olduğum tez çalışmam süresince yardım ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, tecrübelerini ve fikirlerini benimle paylaşan danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Tuba SOLAKYILDIRIMA 'a teşekkür ederim.

Fizik Anabilim Dalı başkanı Prof. Dr. Ali Ercan EKİNCİ 'ye katkı ve desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Yüksek Lisans Tez ve laboratuvar çalışmalarında yardım ve desteklerini esirgemeyen, tecrübeleriyle ilham kaynağı olan başta Doç. Dr. Çağrı ÇIRAK, Dr. Öğr. Üyesi Burcu BOZKURT ÇIRAK, Dr. Öğr. Üyesi Sibel MORKOÇ KARADENİZ, Prof. Dr. Bülent ÇAĞLAR, Dr. Öğr. Üyesi Kemal Volkan ÖZDOKUR'a teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar çalışmalarımızı birlikte yaptığımız, desteğini üzerimden hiç çekmeyen takım arkadaşım Çiğdem EDEN'e teşekkürlerimi sunarım.

BU yüksek lisans çalışması 117F175 numaralı TÜBİTAK projesi ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Desteklerini bu yaşıma kadar hiçbir zaman esirgemeyen, her koşulda canı gönülden yanımda hissettiğim aileme sonsuz minnettarlarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Yaşar ERDOĞAN

Ağustos, 2019

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER	5
2.1. Güneş Enerjisi ve Fotovoltaik Etki.....	5
2.2. Güneş Pilleri.....	5
2.2.1. Güneş pillerinin çalışma ilkesi.....	6
2.3. Boya Duyarlı Güneş Pilleri (BDGP).....	7
2.3.1. Boya duyarlı güneş pillerinin bileşenleri ve temel işleyişi.....	7
2.3.1.1. İletken camlar.....	8
2.3.1.2. Yarı iletken elektrot.....	9
2.3.1.3. BDGP’de kullanılan boyar madde.....	9
2.3.1.4. Elektrolit.....	9
2.3.1.5. Karşıt elektrot.....	10
2.3.2. BDGP’nin çalışma prensibi.....	10
2.3.3. BDGP karakterizasyon teknikleri.....	10
2.3.3.1. Akım-gerilim (I-V) ölçümü.....	10
2.3.3.2. Mevcut dönüşüm verimliliği (IPCE).....	12
2.3.3.3. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS).....	12
2.4. Yarı İletken Malzemeler.....	13
2.4.1. Katkılı yarı iletkenlerde band teorisi ve fermi enerji seviyesi.....	14
2.4.1.1. N tipi yarı iletken malzemeler.....	15
2.4.1.2. P tipi yarı iletken malzemeler.....	15
2.5. Metal Katkılı ZnO ve TiO ₂ /ZnO Nanokompozit Yapılar.....	16
2.5.1. Çinko oksit (ZnO) ve ZnO nanoçubuk.....	16
2.5.2. Katkılı çinko oksit (ZnO) nanoçubuk.....	17

2.5.3. Titanyum dioksit (TiO ₂) ve TiO ₂ nanotüp	18
2.6. Metal Katkılı TiO ₂ /ZnO Nanokompozit Yapıların Sentezleme Yöntemleri	19
2.6.1. Hidrotermal yöntem	19
2.6.2. Anodik oksidasyon yöntemi.....	20
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	22
3.1. Numune Hazırlama ve TiO ₂ Nanotüplerin (TND) Sentezlenmesi	22
3.2. Al katkılı Nanoçubuklar ile Oluşturulmuş TiO ₂ /ZnO Nanokompozit Yapıların Sentezlenmesi	25
3.3. Boya Duyarlı Güneş Pillerinin Montaj ve Performans Ölçümleri.....	26
3.4. Karakterizasyon	28
3.4.1. X-ışını kırınım analizi	28
3.4.2. Taramalı elektron mikroskopu (SEM) analizi.....	28
3.4.3. Atomik kuvvet mikroskopu (AFM) analizi	29
3.4.4. X ışını fotoelektron spektrometresi (XPS) analizi	30
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	31
4.1. Al Katkılı ZnO Nanoçubuklar ile Oluşturulmuş TiO ₂ /ZnO Nanokompozit Yapıların Karakterizasyonu	31
4.2. BDGP'lerin Güneş Pili Performansı.....	38
5. SONUÇLAR.....	42
KAYNAKLAR	43
EKLER.....	46
Ek-1. Tez Çalışması Süresince Yapılan Akademik Çalışmalar	46
ÖZGEÇMİŞ	47

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Fotovoltaik modüllerin yıllık pazar payı	2
Şekil 1.2. PV hücre modellemeleri (Eden, 2019).....	3
Şekil 2.1. Boya duyarlı güneş pili şematik yapısı	8
Şekil 2.2. Boya duyarlaştırılmış güneş pilinin tipik I-V eğrisi	11
Şekil 2.3. (a) iletken, (b) yarı iletken, (c) yalıtkan	13
Şekil 2.4. (a) Yarı iletkenlerin ısı ile uyarılması, (b) ısı uyarıcının ortadan kaldırılması.....	14
Şekil 2.5. N tipi yarı iletken malzemenin yapısı	15
Şekil 2.6. P tipi yarı iletken malzemenin yapısı.....	16
Şekil 2.7. TiO ₂ rutil ve anataz kristal yapıların birim hücreleri	19
Şekil 3.1. TZA fotoanotların üretim ve yöntem süreci	22
Şekil 3.2. Ultrasonik Banyo	23
Şekil 3.3. TND oluşumunda kullanılan anodizasyon düzeneği	24
Şekil 3.4. TND'lerin oluşum mekanizmaları (Çırak vd., 2017)	24
Şekil 3.5. Kül fırını	25
Şekil 3.6. Hidrotermal sistemi.....	26
Şekil 3.7. BDGP'nin şematik gösterimi	27
Şekil 3.8. XRD cihazı.....	28
Şekil 3.9. SEM cihazı.....	29
Şekil 3.10. AFM cihazı	30
Şekil 4.1. TiO ₂ nanotüplerin üstten SEM görüntüsü.....	31
Şekil 4.2. TiO ₂ nanotüp dizilerinin XRD spektrumu	32
Şekil 4.3. Katkısız sentezlenmiş TiO ₂ /ZnO nanokompozit yapıların SEM görüntüleri .	33

Şekil 4.4. %0,5 Al katkıları ile sentezlenmiş TiO ₂ /ZnO nanokompozit yapıların SEM görüntüleri	33
Şekil 4.5. %1 Al katkıları ile sentezlenmiş TiO ₂ /ZnO nanokompozit yapıların SEM görüntüleri	34
Şekil 4.6. %2 Al katkıları ile sentezlenmiş TiO ₂ /ZnO nanokompozit yapıların SEM görüntüleri	34
Şekil 4.7. %4 Al katkıları ile sentezlenmiş TiO ₂ /ZnO nanokompozit yapıların SEM görüntüleri	35
Şekil 4.8. Farklı oranlarda Al katkıları ile sentezlenmiş TiO ₂ /ZnO nanokompozit yapıların XRD spektrumları	36
Şekil 4.9. %2 Al katkılı TiO ₂ /ZnO nanokompozit yapının EDX spektrumu.....	36
Şekil 4.10. %2 Al katkılı TiO ₂ /ZnO nanokompozit yapının XPS survey spektrumları.....	37
Şekil 4.11.%2 Al katkılı TiO ₂ /ZnO nanokompozit yapının AFM görüntüsü.....	38
Şekil 4.12. TZ ve farklı yüzdelerle katkılanan TZA fotoanotların J-V eğrisi.....	39
Şekil 4.13.BDGP devresinin yapısı (Çırak vd., 2019)	40
Şekil 4.14. BDGP'lerin Nyquist grafikleri.....	41

TABLolar LİSTESİ

Sayfa

Tablo 4.1. TZ ve TZA0,5, TZA1, TZA2, TZA4 fotoanotlardan oluşturulmuş boya duyarlı güneş pillerinin performans parametreleri	39
--	----



SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler

Å	Angstrom
$C (^\circ\text{C})$	Santigrat Derece
cm	Santimetre
eV	Elektron Volt
g/cm^3	Gram / Santimetreküp
g/mol	Gram / Mol
$J/mol.K$	Joule / Mol.Kelvin
mM	Mili Molar
nm	Nanometre
V	Volt
W	Watt
μ	Mikro

Kısaltmalar

<i>AFM</i>	Atomik kuvvet mikroskobu
<i>BDGP</i>	Boya duyarlı güneş pili
<i>C₆H₁₂N₄</i>	Hegzametilenetetramin
<i>CdTe</i>	Kadmiyum tellür
<i>CH₄O</i>	Metanol
<i>CuInSe₂</i>	Bakır indiyum diselenür
<i>EDS</i>	X ışını spektrometrisi
<i>E_g</i>	Yasak enerji aralığı
<i>FTO</i>	Flor katkılı kalay oksit
<i>FF</i>	Dolum faktörü
<i>GaAs</i>	Galyum Arsenür
<i>Ge</i>	Germanyum
<i>HMT</i>	Hegzametilenetetramin
<i>I_{sc}</i>	Kısa devre akımı
<i>I_L</i>	Fotojenere akım
<i>I_m</i>	Maksimum akım
<i>ITO</i>	İndiyum katkılı kalay oksit
<i>J_{sc}</i>	Kısa devre akım yoğunluğu
<i>NH₄F</i>	Amonyum florür
<i>Pt</i>	Platin
<i>P_{max}</i>	Maksimum güç çıkışı
<i>Ru</i>	Rutenyum
<i>R_{CT}</i>	Yük transfer direnci
<i>R_S</i>	Seri direnç
<i>R_{SH}</i>	Şant direnci
<i>SEM</i>	Taramalı elektron mikroskobu
<i>Si</i>	Silisyum
<i>TCO</i>	Şeffaf iletken oksit
<i>TiO₂</i>	Titanyum dioksit
<i>TND</i>	Titanyum dioksit nanotüp dizileri

<i>TZ</i>	TiO ₂ nanotüp / ZnO nanoçubuk nanokompozitler
<i>TZA</i>	Al katkılı TiO ₂ nanotüp / ZnO nanoçubuk nanokompozitler
<i>V_{oc}</i>	Açık devre potansiyeli
<i>V_m</i>	Maksimum potansiyel
<i>ZnO</i>	Çinko oksit
<i>Zn(NO₃)₂</i>	Çinko nitrat
<i>XRD</i>	X ışını kırınımı
<i>XPS</i>	X ışını fotoelektron spektrometresi
<i>η</i>	Verim



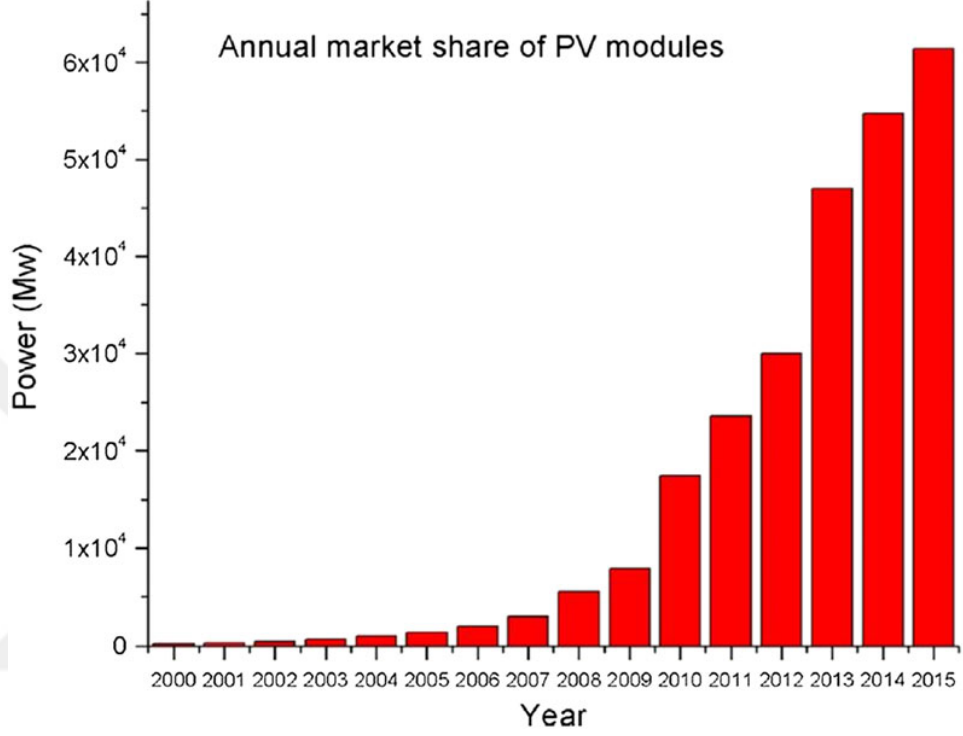
1. GİRİŞ

1947 yılında Bell Laboratuvarlarında bilim adamları tarafından icat edilen yarı iletken transistörlerin üretiminden itibaren yarı iletken endüstrisi, küçük elektronik aletleri büyük ölçekte daha az maliyetle üretebilmek için hızlı bir büyüme gösterdi. Yarı iletken teknolojisi günümüz teknolojisinin ayrılmaz bir parçası olmuştur. İlk üretilen yarı iletken malzemelerde Silisyum (Si) ve Germanyum (Ge) elementleri kullanıldı. Ge'un doğal germanyum okside dönüşmemesi ve erime noktasının çok düşük olması Ge yarı iletkenin kullanım alanını çok fazla daraltmaktadır. Galyum arsenür (GaAs) yüksek hızlı, yüksek taşıyıcı yoğunluğu, yüksek efektif taşıyıcı hızına sahip olduğunda optoelektronik cihaz uygulamalarında kullanılmaktadır ve geniş bant aralığına sahip olması GaAs'yi uygun bir yarı iletken yapmaktadır. Fakat bu özelliklerine rağmen UV led ve yüksek güç, yüksek hız uygulamalarında GaAs ve Si yetersiz kalmaktadır. Bu nedenlerden dolayı günümüzde, üçüncü nesil yarı iletken malzemeler olan SiC, GaN ve ZnO yarı iletkenleri büyük önem taşımaktadırlar. Yarı iletkenler, metal iletkenlerle yalıtkan arasında elektriksel iletkenliği kontrol edilebilen grup materyalleridir. Fakat sıcaklık, optik uyarılma, katkılama, kompozit oluşturma ile bu materyallerin iletkenlik özelliklerinin değiştirilebilmesi, gelişen yarı iletken ve güneş pili teknolojisinde büyük önem taşır (Sedefoğlu, 2016).

Bu tez çalışmasında Al metal katkılı ZnO öncüleri kullanılarak $TiO_2/ZnO:Al$ nanakompozit yapılar oluşturularak boya duyarlı güneş pili performansları incelenecektir.

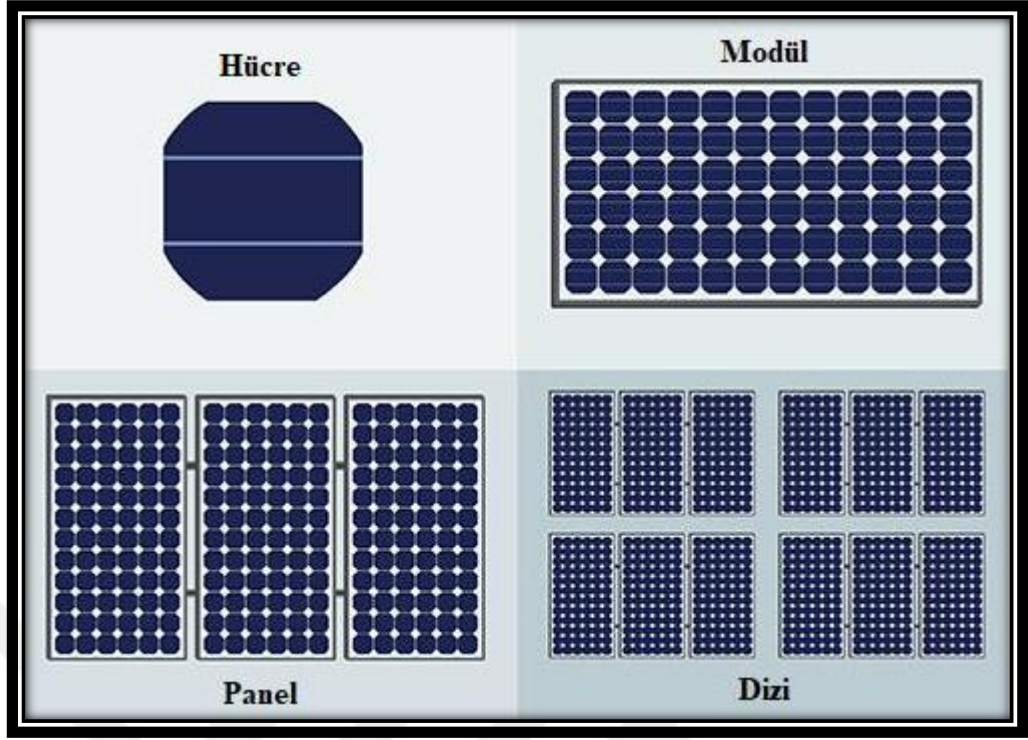
Nobel ödüllü Richard Smalley, 2003 yılında Rice Üniversitesi'nde yaptığı konuşmada önümüzdeki 50 yıl boyunca insanlığın en büyük 10 sorunu arasında enerji ve çevre olduğunu söyledi. Aslında küresel enerjinin tüketiminin artması, fosil yakıtların tükenmesinin hızlandırdı. Aynı zamanda fosil yakıtların yanması, sera etkisi, asit yağmuru ve kirlilik gibi istenmeyen çevresel etkilere yol açmaktadır. Hem enerji hem de çevre sorunları alternatif yenilenebilir ve yeşil enerji bulma ihtiyacı konusunda endişelere yol açmaktadır. Bugüne kadar hidroelektrik, güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, biyoyakıt, biyokütle ve jeotermal gibi çeşitli yenilenebilir enerji kaynakları insanlar tarafından kullanıldı. Bu yenilenebilir enerji kaynakları arasında güneş enerjisinin bolluğu ve temizliği nedeniyle dikkat çekmektedir. İstatistiklere göre, küresel enerji

talebi %0,1'ini, yeryüzünü %10'luk verime sahip güneş pili ile kaplayarak karşılanabilir (Lewis ve Crabtree, 2005). Şekil 1.1' de fotovoltaik (PV) modüller için yıllık pazar payının 2000 yılından 2015 yılına kadar hızlı bir şekilde arttığı görülmektedir ve önümüzdeki yıllarda artma eğiliminin artması beklenmektedir (Yeoh ve Chan, 2017).



Şekil 1.1. Fotovoltaik modüllerin yıllık pazar payı

PV etkisi ile güneş ışınını yani güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmek için güneş hücresi veya PV hücresi icat edildi. PV hücreleri ile üretilen güç miktarını arttırmak amacıyla seri ya da paralel bağlanarak şekil 1.2'de görüldüğü gibi hücre, modül, panel ve dizi modelleri yapılmıştır.



Şekil 1.2. PV hücre modelleri (Eden, 2019)

Bununla birlikte silikon tabanlı güneş pilinin karmaşık üretim süreci ve yüksek maliyetli oluşu ticarileşmesini sınırlamaktadır. Verimliliği koruyarak güneş hücrelerinin maliyetini düşürme düşüncesi, üçüncü nesil güneş hücreleri olan boya duyarlı güneş pillerinin (BDGP) gelişmesine yol açmıştır. BDGP'lerde, 1972 yılına kadar klorofil ile duyarlı hale getirilmiş çinko oksit foto-anot kullanılmıştır. Bununla birlikte yetersiz yüzey alanı hücre hasadını düşürmektedir. BDGP'nin ilk atılımını 1991 yılında Michael Gratzel ve Brian O'Regan'ın foto-anot olarak tek katlı bir rutenyum (Ruthenium) (Ru) boya tabakası ile kaplanmış nanoyapılı titanyum dioksit (TiO_2) filminin %7,1-%7,9 hücre verimliliği sağladığını gösterdi (Tributsh, 1972). Nanoyapılı TiO_2 filmi, yüzey alanını etkin boya yüklenmesi ile önemli ölçüde arttırdı. Bu yaklaşım, BDGP'nin ışık absorpsiyonunu ve verimliliğini önemli ölçüde geliştirdi ve bu gelişme mevcut diğer güneş pili teknolojilerine güçlü bir rakip olarak görülmesine olanak tanıdı (Yeoh ve Chan, 2017).

O zamanlardan beri, BDGP etkinliği ve kararlılığı deneysel araştırmalardaki yoğun çabalar nedeniyle sürekli iyileşmektedir. Nazeeruddin vd. (2001), duyarlaştırıcı olarak pankromatik siyah boya kullanarak BDGP'lerde %10,4 oranında verim sağladığını bildirmiştir. Chiba vd. (2006), yüksek puslu TiO_2 filminin foto-anot olarak kullanılmasını araştırdı ve bu da %11,1'lik BDGP verimliliğine yol açtı. Yella vd.

(2011), çinko porfirin boyası ve kobalt bazlı redoks elektrolitli BDGP'nin %12,3'lük dönüşüm verimliliği sağlayabildiğini göstermiştir. Mathew vd. (2014), moleküler olarak tasarlanmış porfirin boyası ile duyarlılaştırılmış TiO₂ tabanlı BDGP için %13'e varan verim elde etmişlerdir.

Günümüz yüksek teknolojisinde artan rekabetle birlikte yaşantımızın birçok alanında daha çok teknolojiye bağımlı hale gelmesi, enerjinin insan yaşamında yer almasını gerektirmektedir. Sanayileşmedeki gelişmelerle birlikte enerjimizin bir kısmı yenilenemeyen enerji kaynakları olan petrol ve kömürden gelmektedir. Enerji talepleri arttıkça bu kaynaklar tükenmekte olduğu için bilim adamları yenilenebilir enerji kaynaklarının potansiyellerini araştırarak keşfetmektedirler. Yenilenemeyen enerji kaynakları yandığında ortama zararlı gazlar yayarlar. Dolayısıyla fosil yakıtların elbet bir gün tükeneceği kaçınılmaz olduğu bilindiğinden, insanlar çevreyi kirletmeyen daha temiz ve sürdürülebilir enerji kaynakları aramaktadır (Yıldız, 2018).

Bu nedenle, potansiyel yenilenebilir enerji kaynaklarından daha bol ve kolaylıkla erişilebilir olan güneş enerjisi 1970'li yıllarda dünyada ilgi görmeye başlamıştır. Günümüzde ilk nesil güneş pili, silikon temelli güneş pilleri olmakla birlikte güneş enerjisi üretiminin temelini oluşturmaktadır. Birinci nesil silikon temelli güneş pillerinin üretim maliyetlerinin yüksek olmasına rağmen %25'lik yüksek verimlere sahiptir. Üretim maliyetlerini düşürmek için ikinci nesil güneş pilleri üretilmiş ve ince film güneş hücrelerini de kapsadığı ikinci nesil güneş pilleri düşük malzeme yoğunluğu, maliyetli olduğu kanıtlanmasına rağmen yüksek verimler elde edilememiştir. Yüksek maliyet ve düşük verim oranlarını engelleyen unsurları ortadan kaldırabilmek için yapılan diğerlerinden farklı güneş pili çalışmalarında üçüncü nesil güneş pili olan boya duyarlı duyarlı güneş pilleri (BDGP) O'Regan ve Gratzel tarafından sunuldu. BDGP, ışık enerjisini soğurarak elektrik enerjisine dönüştürebilen fotonik malzemelerdir. BDGP, her iki ışık demetlerinin bulunduğu dağınık ışık koşullarında hem iç hem de dış mekanlarda diğer güneş pili modellerine göre daha fazla enerji üretirler ve ince, esnek ve hafif modüllerin oluşturulmasına olanak sağlamakla birlikte güneş ışığının açılabilir bağımlılığını ortadan kaldırmaktadır (Gratzel, 2005; Yıldız, 2018).

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Güneş Enerjisi ve Fotovoltaik Etki

Güneş sisteminde canlı hayatının temellerinin oluşturan en büyük yıldızı, temiz ve tükenmez enerji kaynağı güneştir. Güneş çapı $1,39 \times 10^6$ km ve dünyaya uzaklığı $1,5 \times 10^9$ km olan, yüzey sıcaklığı 5800 K ve yoğun gazlardan oluşmaktadır. Güneş, bünyesinde %92,8 hidrojen ve %7,1 helyum atomu barındırmaktadır. Hidrojen atomunun helyum atomuna dönüşmesiyle oluşan bu reaksiyonda 4 hidrojen atomunun birleşmesiyle 1 helyum atomunu oluşturur. Reaksiyon sonrası açığa çıkan enerji farkı güneş enerjisini oluşturmaktadır ve açığa çıkan enerjinin küçük bir kısmı atmosferi aştıktan sonra yeryüzüne ulaşmaktadır. Yeryüzüne gelen ortalama güneş ışınımı 1000 W/m^2 'dir (Öztürk, 2012; Nelson ve Starcher, 2016; Bilici, 2019).

Güneş çekirdeğinde kütle farkından dolayı oluşan reaksiyonlar sonucu açığa çıkan enerji elektromanyetik ışınım olarak güneş yüzeyine ulaşır. Güneş yüzeyine aktarılan elektromanyetik ışınım dalgalar ve parçacıklar halinde uzay boşluğuna yayılır ve yayılan elektromanyetik dalgalar, fotonların bir araya gelerek oluşturdukları elektrik ve manyetik enerjiye sahip ışık dizileridir. Yaşam döngüsünün gözdesi olarak bilinen güneş, fosil yakıtları ve yenilenebilir enerjilerin birçoğunu doğrudan ya da dolaylı bir biçimde beslemektedir. Bu özelliklerinden dolayı dünyada ve ülkemizde yenilenebilir enerjinin gözdesi olan güneşin önemi her geçen gün kat ve kat artmaktadır. Güneş merkezinde meydana gelen tepkiler sonucunda etrafa yaymış olduğu ışınım enerjileri farklı dalga boylarında yayılarak yenilenebilir enerjilerin kaynağını oluşturmaktadır. Yapılan araştırma neticesinde güneşin fotovoltaik etkisini ve güneşten yayılan fotonların farklı dalga boyları ile orantılı bir biçimde güç ürettiği keşfedilmiştir (Ranabhat, 2016; Bilici, 2019).

2.2. Güneş Pilleri

Fotovoltaik yani güneş pilleri, güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir ve yarı iletken maddelerden tasarlanırlar. Fotovoltaik sistemler ile güneş enerjisinden elektrik enerji elde etmek mümkündür. Fotovoltaik hücreler, yüzeylerine gelen güneş enerjisini yapısında bulunan yarı iletken malzemelerle soğurarak yapısında bulunan elektronların serbest hale geçmesini sağlar ve bunun sonucunda elektriksel

enerji üretir. Bu sistemlerin çalışma prensibi fotovoltaik olaya dayanmaktadır. Fransız bilim adamı Alexandre Edmond Becquerel tarafından 1839 yılında platin yapılar üzerinde yapmış olduğu çalışmalar esnasında platin yapılar yüzeyine düşen ışığın etkisiyle oluşan gerilimi gözlemlemesiyle fotovoltaik olayı keşfetmiştir. Yapılan farklı bir çalışmada ise Adams ve Day 1877 yılında selenyum elektrotunun yüzeyi ışığa maruz bırakıldığında selenyum elektrotunun akım ürettiğini gözlediler. Bu çalışmalarını izleyen yıllarda Russel S. Ohl 1946 yılında yüksek saflıkta silikon içeren güneş pillerinin verimliliklerini geliştirdi ve güneş pili hücrelerinin patentini almıştır. Günümüzde kullanılmakta olan silikon tabanlı güneş pillerinin temelini Chapin ve arkadaşları atmıştır ve ürettikleri silikonlu güneş pili hücreleri sayesinde yaklaşık %6 verim elde etmişlerdir. Telkes ise 1947 yılında termoelektrik kavşaklar kullanarak güneş ışınlarının doğrudan elektrik enerjisine dönüştürmüş ve %1 verim elde etmiştir (Zafer, 2006; Bilici, 2019).

Fotovoltaik olayın keşfedilmesinden sonra yapılan araştırmaların artmasıyla birlikte fotovoltaik piller yani güneş pilleri popülerliği artırmıştır. 1985 yılında üretilen güneş panelleri ilk olarak Explorer adlı uzay aracında kullanılmıştır. Bu çalışmalarını izleyen yıllarda güneş pillerinin verimliliği %15'leri bulurken, 2000'li yıllarda %28'lere ulaşırken günümüzde laboratuvar koşullarında %46'lara ulaşmıştır (Tekkale, 2018; Bilici, 2019).

2.2.1. Güneş pillerinin çalışma ilkesi

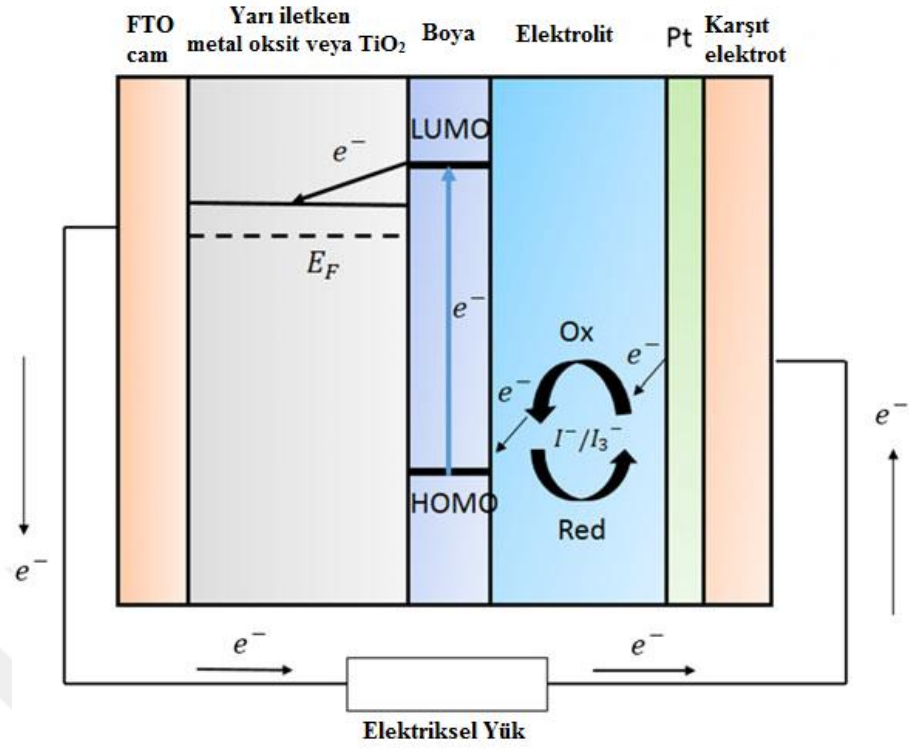
Güneş pili hücreleri genellikle p tipi ve n tipi yarı iletken katmanlarının üst üste yerleştirilmesiyle oluşur. Güneş pilleri yüzeyine gelen ışınımın bir kısmını güneş pili hücreleri içerisinden geçerken bir kısmı ise güneş pilleri yapısında bulunan yarı iletken malzemeler tarafından soğurulur. Soğurulan ışınım enerjileri ile elektronların serbest kalarak hareket etme özelliği kazanır. Serbest haldeki elektronlar boşluklar tarafından çekilir ve geride elektron boşlukları oluşur. Elektronlar pozitif yük kısmına, boşluklar ise negatif yük kısmına doğru hareket ederek elektron-boşluk çiftlerini oluştururlar. Böylelikle elektron boşluk çiftleri birbirinden ayrılır ve elektrik akımı üretilmiş olur. Yüksek enerjiye sahip bu elektronlar enerjilerini dış yüklere aktararak güneş pili hücrelerine geri dönerler (Yıldız, 2018).

2.3. Boya Duyarlı Güneş Pilleri (BDGP)

Güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmek için verimlilik, maliyet ve kararlılık gibi fotovoltaiik parametrelerinin geliştirilmesi gerekir. Günümüzde kristal silikon tabanlı güneş pilleri piyasada yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak silikon güneş enerjisinin verimliliğini engellemektedir. Mono kristalli silikon tabanlı güneş pilleri diğer güneş pillerine göre daha verimli olmasına rağmen, içerdiği toksik kimyasalların maliyetinin yüksek oluşu yüksek verimin avantajlarını engellemektedir. Bu nedenle araştırmacılar güneş enerjisinin yüksek gerilim verimliliklerini artırmaya ve güneş pilleri üzerinde daha fazla ışık enerjisi toplamak için nanoteknoloji kullanmaya odaklandı. Graetzel ve arkadaşları, nano yapılı elektrotları etkili enjekte edilebilir boyaların kombinasyonlarını gerçekleştirerek 1991 yılında enerji dönüşüm verimliliğini %7'i aşan boya duyarlı güneş pillerini geliştirdiler. Bu tip güneş pillerinin üretimi, katı hal hücre tasarımlarına göre daha uygun maliyetli olabilir ve esnek plakalar olarak tasarlanabilir. Boya hücrelerinin, çoğu fotovoltaiik teknolojisinde uygulanamayan çalışma sıcaklığına yakın sıcaklıklarda daha iyi performans gösterdiği belirtilmektedir. Boya duyarlı güneş pilleri herhangi bir ışık kaynağı altında Si tabanlı güneş pillerinden daha yüksek ya da karşılaştırılabilir verimlere sahiptir (Yıldız, 2018).

2.3.1. Boya duyarlı güneş pillerinin bileşenleri ve temel işleyişi

BGDP'nin şematik bant diyagramı Şekil 2.1'de gösterilmektedir. Şekil 2.1'de gösterildiği gibi BDGP'ler iletken camlar, yarı iletken elektrot, boyar madde, elektrolit ve karşıt elektrottan oluşmaktadır.



Şekil 2.1. Boya duyarlı güneş pili şematik yapısı

2.3.1.1. İletken camlar

Şeffaf iletken camlar, düşük maliyetli, bol ve yüksek optik özelliklerinden dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır. En yaygın olarak kullanılan Flor katkılı Kalay Oksittir (FTO). FTO bileşenleri, güneş spektrumunun aktif bölgelerinde maksimum soğurma seviyesini arttırmak için oldukça şeffaf olmalıdır. FTO, nitelikler arasında dikkatli bir denge, elektriksel iletkenlik ve optik şeffaflık arasında uyumluluk sağlamalıdır. Şeffaf iletken oksit fotonların solar hücreye girmesini ve foto elektronların cihaz verilerine aktarmasına izin veren şeffaf bir elektrot olarak çalışır. Bu nedenle, yüksek iletkenlik ve düşük UV ışını absorpsiyonu herhangi bir güneş pili cihazı için ön şeffaf iletken oksitler hayati önem taşırlar. FTO camı, mükemmel elektriksel iletkenlik ve optik şeffaflığı nedeniyle DSSC uygulamasında en yaygın kullanılan oksittir. Birçok çalışmada FTO'nun yüksek sıcaklıklarda kararlı direncinden dolayı indiyum kalay oksit (ITO)'dan daha üstün olduğu bildirilmiştir. Bu nedenle, FTO BDGP uygulamalarında ITO yerine kullanılmaktadır. Yüksek iletkenlik ve düşük UV ışını absorpsiyonu herhangi bir güneş pili cihazı için ön şeffaf iletken oksitler hayati önem taşırlar (Yeoh ve Chan, 2017; Yıldız, 2018; Eden, 2019).

2.3.1.2. Yarı iletken elektrot

BDGP’de, yarı iletken elektrot şeffaf iletken altlık yüzüne tutturulmuş nanoyapılı yarı iletken malzemelerden yapılır. Yarı iletken elektrotlarda yaygın olarak kullanılan malzeme TiO_2 ’dir. TiO_2 , bol miktarda malzeme sağlayan ucuz, çevre dostu olmakla beraber geniş bant aralığına, yüksek iletken bant aralığına, önemli taşıma elektronlarına ve yüksek elektron hareketliliğe sahiptir. Uygun yarı iletken filmin temel eşitlikleri hem yüksek yüzey alanına hem de yüksek şeffaflığa sahiptir. Bu yüzden TiO_2 BDGP’de fotoelektrot olarak kullanılır (Yıldız, 2018; Eden, 2019).

2.3.1.3. BDGP’de kullanılan boyar madde

Boyar madde genellikle fotoelektrot olarak kullanılan metal oksit ya da TiO_2 fotoelektrotlar yüzeyine tutturulur. Boyar madde üzerine düşen ışınlar sayesinde elektronların uyarılmasını sağladığı ve ışın adsorpsiyon yüzey alanı genişlettiği için BDGP’deki ana bileşenlerden biridir. İdeal bir boya kızıl ötesi bölgede yüksek molar sönme katsayısına, boya rejenerasyonu ve buna bağlı olarak iyi çözünürlüğe sahip olmalıdır. Rutenyum (Ru) esaslı boyalar halihazırda üstün ışık adsorbe etme, dayanıklılık ve en önemlisi fotojenlenmiş şarjların TiO_2 nanotülerin içine enjekte edilmesini sağlayan metal ligand yük transfer geçişi nedeniyle en verimli boyadır. Ru boyaların hafif hasat özelliğini arttırmaya yönelik kapsamlı araştırmalar devam etmektedir (Yeoh ve Chan, 2017).

2.3.1.4. Elektrolit

BDGP’de elektrolit, çalışan elektrot ve karşıt elektrot arasında yük taşıyan ve oksitlenmiş boyanın yenilenmesine izin veren elektriksel olarak iletken bir ortam görevi görür. BDGP’lerde en yaygın olarak kullanılan elektrolit, I/I_3 redoks çifti kullanılır. Bu redoks çifti sıvı elektrolitin mükemmel performansı, düşük rekombinasyon kaybına, aşırı hızlı boya rejenerasyonuna ve yarı iletken malzeme filmine yavaş penetrasyona bağlıdır. Bununla birlikte BDGP’nin uzun vadeli kararlılıklarını etkileyen sıvı elektrolitte mevcuttur. Asıl endişe ise yük taşıyıcı konsantrasyonunu azaltacak ve hücre bozunmasına neden olarak iyodür iyonunun buharlaşması sonucu toksik organik çözücünün sızması da çevre kirliliğine yol açacaktır (Yeoh ve Chan, 2017).

2.3.1.5. Karşıt elektrot

Karşıt elektrotunun elektrokatalitik özelliği BDGP'nin PV performansını yönetmede önemli bir bileşendir. Katalitik katman olmadan, TCO katmanı iyodür/triyodür elektrolitte çok yüksek bir yük transferine sahip olduğundan zayıf bir karşıt elektron yapar. Platin (Pt), yüksek katalitik aktivitesi, redoks reaksiyonu için aşırı potansiyeli azaltma kabiliyeti ve elektrolite karşı korozyona yüksek direnç nedeniyle karşıt elektrot olarak standart katalizördür. Pt, BDGP'de elektrot üzerindeki gerçekleşen reaksiyonu katalize eden önemli bileşenlerden biridir (Yeoh ve Chan, 2017).

2.3.2. BDGP'nin çalışma prensibi

Işık ile uyarılmış boya molekülleri, elektronları yarı iletken metal oksidin ya da yarı iletken TiO_2 'nin iletim bandına geçirir. Genel olarak yarı iletken elektrot TiO_2 tabakası, boya yüzeyini ve geniş yüzey alanını sağlayarak ışığın adsorbe edilmesini kolaylaştırmak için doğada bulunan maddedir. Elektronlar, yarı iletken metal, şeffaf iletken oksit oksitlenirken akar. Oksitlenmiş boya, iyodür/triyodür redoks çifti içeren elektrolitten elektron transferi yoluyla zemin durumuna geri getirilir. Boyanın iyodür ile hızlı bir şekilde yenilenmesi, elektronların oksitlenmiş boya ile rekombinasyonunu engellemek için esastır. Oksitlenmiş redoks arabulucuları, elektrotlar dış devreden geçtikten sonra karşıt elektrotta yeniden üretilir ve tüm çevrimi tamamlar (Yeoh ve Chan, 2017).

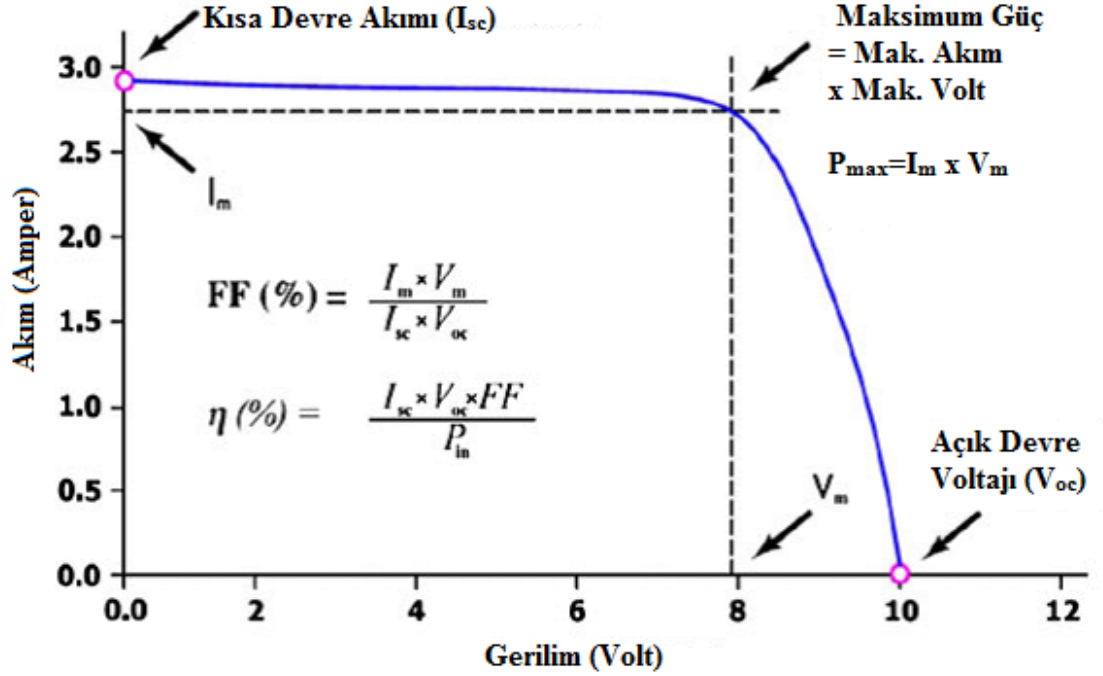
2.3.3. BDGP karakterizasyon teknikleri

BDGP'nin çalışma fonksiyonlarını ve bileşenlerinin karmaşık etkilerini tam olarak anlamak için, bireysel bileşenlerinin araştırılmasına ek olarak BDGP'nin karakterizasyonlarını bütün olarak anlamak gerekir. Akım-voltaj (I-V) ölçümü, akım dönüşüm verimi (IPCE) spektroskopisi ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS), bu karakterizasyon teknikleri bize BDGP verimliliği hesaplanırken yardımcı olacak parametrelerdir (Yeoh ve Chan, 2017).

2.3.3.1. Akım-gerilim (I-V) ölçümü

I-V ölçümünün ana işlevi, standart aydınlatma koşullarında BDGP'nin elektrik çıkış gücünü belirlemektir. BDGP ölçümü için kullanılan standart ışınlama spektrumu, 25 C

hücre sıcaklığını ve güneş ışınlanmasının toplam güç yoğunluğu 1000 W/m^2 olacak şekilde belirtilen hava kütlesi 1,5 olarak bilinir. BDGP'nin dört önemli parametresi, Şekil 2.2'de gösterildiği gibi I-V eğrisinden, yani açık devre voltajı (V_{oc}), kısa devre akımı (I_{sc}), dolun faktörü (FF) ve güç dönüşüm verimliliği (PCE, η) kolayca elde edilebilir. Açık devre voltajı (V_{oc}), bir güneş pili hücrelerinin harici devreye beslediği maksimum voltaj olarak tanımlanır. V_{oc} , fermi düzeyindeki fotoanot seviyesi ve redoks çiftinin elektrokimyasal potansiyeli arasındaki farkla orantılıdır. Şekil 2.2'de gösterildiği gibi V_{oc} , $I=0 \text{ A}$ noktasından kesilmesiyle oluşur ve hücre alanından bağımsız olup aynı aydınlatma koşulunda daima sabittir (Yeoh ve Chan, 2017).



Şekil 2.2. Boya duyarlı güneş pilinin tipik I-V eğrisi

Kısa devre akımı (I_{sc}), bir güneş pilinin maksimum çıkış akımıdır. I_{sc} , güneş pili boyunca uygulanan potansiyelin sıfır olduğu kısa devre koşullarında ölçülür. I-V eğrisinde gösterildiği gibi I_{sc} , $V=0 \text{ V}$ kesişmesinden ölçülmektedir. Standart koşullar altında I_{sc} , fotoanotta boya adsorpsiyon miktarı, fotoanodun elektrokimyasal özellikleri ve elektrolit varlığında boyanın moleküler yapısı dahil olmak üzere çeşitli faktörlere bağlıdır. I_{sc} denklem 3.1'de gösterildiği gibi difüzyon uzunluğu ile orantılıdır.

$$I_{sc} = qG (L_n + L_p) \quad (2.1)$$

G üretim hızı, L_n ve L_p sırasıyla elektron ve boşluğun difüzyon uzunluklarıdır (Al-Alwani, 2016; Yeoh ve Chan, 2017).

Doldurma faktörü (FF), güneş pilinin ideallliğini ölçer ve maksimum güç çıktısının (P_{max} , V_{oc} , V_{oc} ve I_{sc} oranı) olarak hesaplanır. FF değeri 0 ile 1 arasında değişirken, yüksek bir değer daha çok tercih edilen dikdörtgen şeklini belirler. İdeal olarak, bir güneş pili içerisinde üretilen güç, harici devrede kayıp olmadan dağılır. Bununla birlikte, pratik uygulamalarda, bir güneş pili hücreindeki güç, temas direnci, yük taşıma, kaçak akım vb yoluyla tüketilir (Hagfelt vd., 2010). Bu bileşik etkiler, FF'yi azaltan seri ve paralel dirençlere elektriksel olarak eşdeğerdedir ve FF tarafından hesaplanabilir (Yeoh ve Chan, 2017).

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{sc} \times V_{oc}} = \frac{I_{max} V_{max}}{I_{sc} \times V_{oc}} \quad (2.2)$$

Bir güneş pilinin güç dönüşüm verimliliği (η) maksimum üretilen gücün (P_{max}) olay gücüne (P_{in}) oranıdır. Daha spesifik olmak gerekirse, güneş hücresi tarafından üretilen güç, standart hava kütlesi 1,5 aydınlatma koşulu altında temsili hücre alanı üzerindeki olay gücüne bölünür. Fotoanodun gözenekli ağı dönüşüm verimliliğine kadar olan parametreleri doğrudan etkiler ve bu yüzden gözenekli ağıdaki kaybı azaltmak için BDGP'yi daha yüksek η ile üretmek gerekir (Yeoh ve Chan, 2017).

$$FF = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{I_{sc} V_{oc} FF}{P_{in}} \quad (2.2)$$

2.3.3.2. Mevcut dönüşüm verimliliği (IPCE)

IPCE, dış devreden akan fotoanotlanmış elektron ($N_{elektron}$) sayısının, belirli bir dalga boyunda meydana gelen foton sayısına (N_{photon}) oranı olarak tanımlanır. IPCE ayrıca dış kuantum verimi olarak da bilinir (Yeoh ve Chan, 2017).

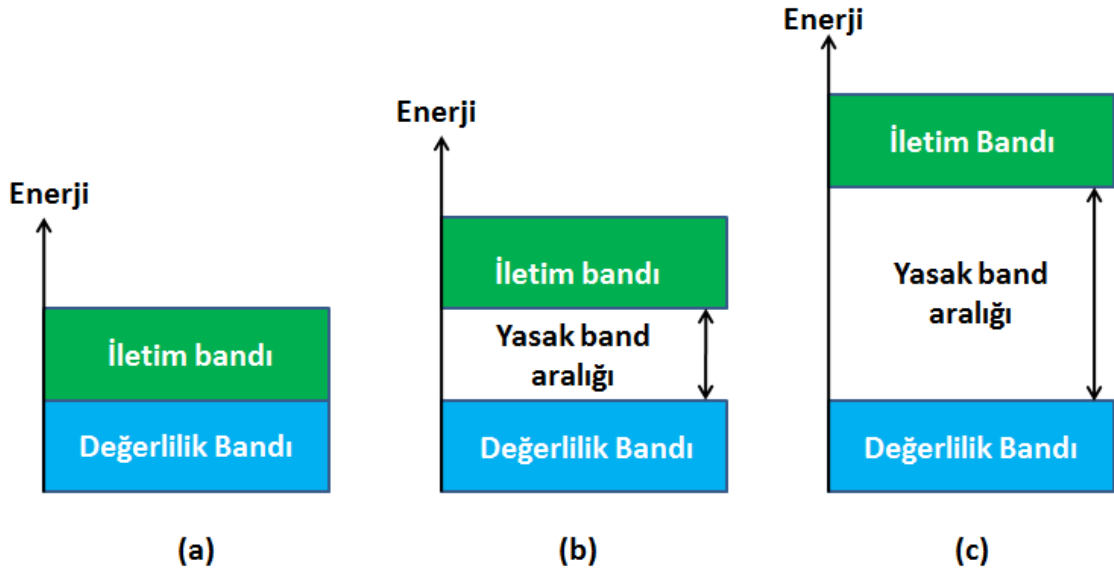
2.3.3.3. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS)

Kararlı I-V ölçümü, yalnızca BDGP'de elektron taşınımı ve rekombinasyon oranları hakkında sınırlı bilgi sağlar. BDGP'de yük transfer kinetiğini anlamak için dinamik bir teknik olan EIS'e ihtiyaç vardır. EIS'de, sisteme uygulanan potansiyel, sinüzoidal alternatif potansiyel alternatif oluşturmak için küçük sinüs dalgası tarafından rahatsız

edilir ve sinüzoidal akım çıkışı modülasyon frekansındaki değişime karşı ölçülür. Empedans akımı, voltajın akıma oranı olarak tanımlanır. Frekans alanı ve hem gerçek hem de hayali parçalardan oluşur. Bir rezistansın empedansı gerçek değere sahiptir ve frekanstan bağımsızdır (Jose vd., 2009; Yeoh ve Chan, 2017).

2.4. Yarı İletken Malzemeler

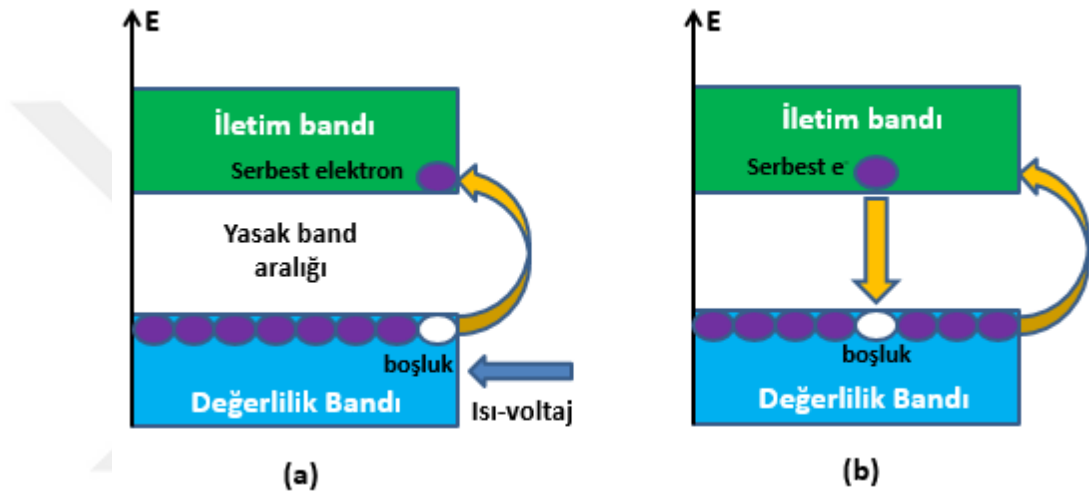
Katı malzemeler iletkenlik özelliklerine göre iletken, yarı iletken, yalıtkan olmak üzere üç gruba ayrılır. Bir katı malzemenin iletken olabilmesi için, elektronun değerlik bandından iletkenlik bandına geçebilmesi gerekmektedir. Dolayısıyla elektronlar, bant boşluğundan geçebilmesi için yeterli ya da daha fazla enerjiye sahip olmak zorundadır. Elektronlar bant boşluğundan geçebilmesi için gereken bu enerjiyi ısı, foton, voltaj gibi uyarıcılarla elde ederek iletkenlik bandına geçerler. Böylece enerji bant aralığı bir maddenin iletkenlik özelliği taşımasında önemli rol oynamaktadır.



Şekil 2.3. (a) iletken, (b) yarı iletken, (c) yalıtkan

İletken malzemeler Şekil 2.3(a)'da görüldüğü gibi iletkenlik bandı ile değerlik elektron bandı bitişik ya da iç içe geçmiş durumlarda kontrolsüz ve devamlı elektron alışverişine olur. Bu durum malzemenin elektronikte kullanımını olumsuz ya da elverişsiz hale getirmektedir. Yalıtkan malzemelerde yasak band aralığı Şekil 2.3(c)'de görüldüğü gibi oldukça geniş olması elektronların iletkenlik bandına geçişini engellemektedir. Elektronların yüksek enerjilerle uyarılmalarına rağmen bir elektronu iletkenlik bandına

geçiş için yeterli olmamaktadır. Yarı iletken malzemelerde yasak enerji bant aralığı Şekil 2.3(b)'de görüldüğü gibi yalıtkan malzemelere kıyasla daha düşüktür. Dolayısıyla Şekil 2.4(a) ve Şekil 2.4(b)'de görüldüğü gibi elektronlar ısı, ışık, voltaj gibi uyarıcılarla uyarıldığında gerekli enerjiyi elde ederler ve yasak enerji bant aralığından iletkenlik bandına geçiş yaparlar. Yarı iletkenler üzerine uygulanan bu enerji ortadan kaldırıldığında serbest halde uyarılan elektronlar değerlik bandına geri dönerler. Bu özellikleri sayesinde yarı iletkenler elektronik teknolojinin vazgeçilmez yapı taşlarını oluşturmaktadır (Özünel E., 2016).



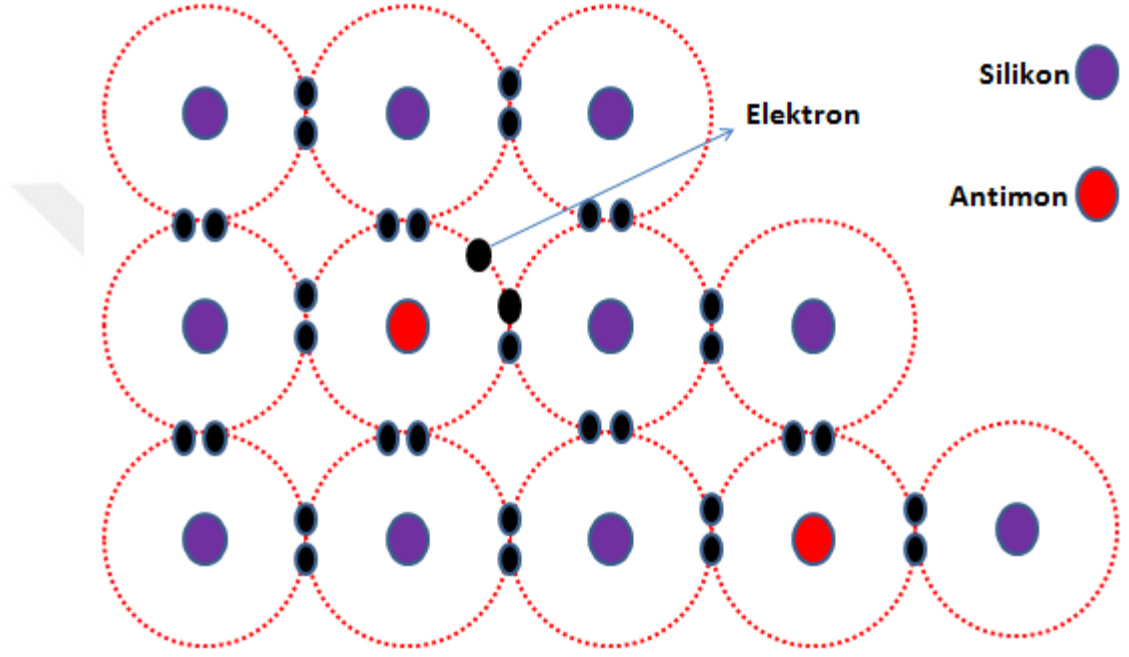
Şekil 2.4. (a) Yarı iletkenlerin ısı ile uyarılması, (b) ısı uyarıcısının ortadan kaldırılması

2.4.1. Katkılı yarı iletkenlerde band teorisi ve fermi enerji seviyesi

Yarı iletkenlerde katkılanma cinsinin ve katkılanma oranının, elektron ve boşluk yoğunluklarını ve Fermi enerji seviyelerini nasıl değiştirdiğini inceleyelim. Safsızlıkların eklenmesi yarı iletken içindeki elektron ve boşlukların dağılımlarını değiştirmektedir. Yük taşıyıcıların yoğunluklarının değişmesi yarı iletkenlerin Fermi enerji seviyesini değiştirmesine sebep olacaktır. Saf yarı iletkenlerde yasak bant aralığının orta seviyesine denk gelen Fermi düzeyi, katkılı yarı iletkenlerde katkılanma cinsine göre iletim bandına ya da değerlik bandına doğru kayacaktır. Ayrıca saf yarı iletkenlerin katkılanması sonucunda serbest elektron ve boşluk konsantrasyonunun artması nedeniyle iletkenlikleri de istenilen düzeyde artırılabilir. Bu nedenle katkılı yarı iletkenler elektronik devre elemanlarında, optik ve fotonik cihazlarda ve güneş hücrelerinde çokça tercih edilmektedir. N-tipi ve p-tipi olmak üzere iki farklı tip katkılı yarı iletken vardır.

2.4.1.1. N tipi yarı iletken malzemeler

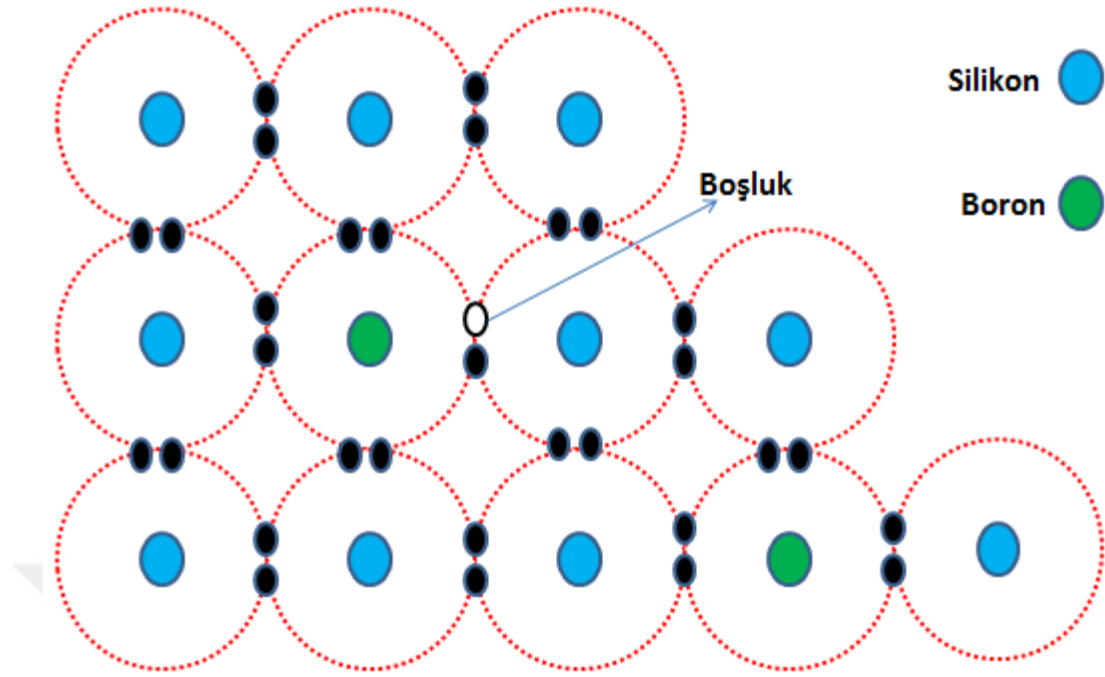
N-tipi yarı iletkenlerde, Şekil 2.5’de görüldüğü gibi, saf yarı iletken (silisyum veya germanyum) atomları içerisine 5 değerlilik elektronuna sahip antimon, arsenik, bizmut ve fosfor gibi atomların belli bir oranda eklenmesi ile yeni bir kristal yapı oluşturulur. N tipi yarı iletkenlerde serbest elektron sayısı ya da yoğunluğu boşluk yoğunluğundan daha fazladır.



Şekil 2.5. N tipi yarı iletken malzemenin yapısı

2.4.1.2. P tipi yarı iletken malzemeler

P-tipi yarı iletkenlerde ise boşluk (hole(hol)) yoğunluğu elektron yoğunluğundan çok daha fazladır. Saf silisyum veya germanyum atomu içerisine, 3 değerlilik elektronuna sahip indiyum, boron, alüminyum ve galyum gibi atomların belli bir oranda eklenmesi sonucunda p tipi yarı iletken meydana gelir. Bu yapıda iletkenlik Şekil 2.6.’ da görüldüğü gibi boşluklar tarafından sağlanır. Toplamda yedi elektron olacağından bir boşluk (hole) diye tabir edilen yapı boşta kalır. Bu sayede iletkenlik artırılmış olur. (Özünel E., 2016)



Şekil 2.6. P tipi yarı iletken malzemenin yapısı

2.5. Metal Katkılı ZnO ve TiO₂/ZnO Nanokompozit Yapılar

2.5.1. Çinko oksit (ZnO) ve ZnO nanoçubuk

Çinko oksit (ZnO), enerji bandı yapısı ve fiziksel özellikleri bakımından neredeyse TiO₂ ile aynı olan geniş bant aralıklı bir yarı iletkenidir. ZnO'nun en belirgin avantajı, ZnO'nun, anataz fazı TiO₂'den 1 kat daha fazla büyüklükte olan çok yüksek bir elektron hareketliliğine sahip olmasıdır. Yüksek elektron hareketliliği, rekombinasyon kaybını azaltarak elektron taşınımını kolaylaştırmak için gereklidir. Bununla birlikte, ZnO bazlı DSSC'nin etkinliği genellikle, asidik boyadaki daha yavaş elektron enjeksiyon kinetiğine ve ZnO'nun kararsızlığına atfedilebilecek olan TiO₂'den daha düşüktür. Bununla birlikte, ZnO, anizotropik büyümesi ve kristalleşme kolaylığından dolayı TiO₂ için seçkin bir alternatif olarak kabul edilmektedir. Bu özellikler, ZnO'nun nanoçubuk için benzersiz özellikler sağlayabilen çok çeşitli nanoyapılarda sentezlenmesine izin verir (Raj ve Prasanth, 2016; Yeoh ve Chan, 2017).

Ara yüzey modifikasyonunun etkisi TiO₂ bazlı DSSC ile benzer şekilde, ZnO nano yapılarına dayanan DSSC'lerin etkinliği, foto-anot / elektrolit arayüzünde şarj rekombinasyonu ile sınırlıdır. Ayrıca, ZnO asidik çözelti içerisinde kimyasal olarak kararsızdır ve çözünmeye eğilimlidir, bu da Zn²⁺ / boya komplekslerinin oluşumuyla

sonuçlanır. Zn^{2+} / boya komplekslerinin topaklaşması, ZnO yüzeyi üzerinde elektron enjeksiyonunun boyadan ZnO CB'ye kadar önlenmesini önleyen bir bariyer tabakası oluşturacaktır (Yeh vd., 2013; Goh vd., 2014; Yeoh ve Chan, 2017).

2.5.2. Katkılı çinko oksit (ZnO) nanoçubuk

Literatürlerde farklı katyonlarla katlanmış ZnO bildirilmiştir.

Raj vd., (2013), tek aşamalı döküm yöntemini kullanarak magnezyum (Mg) katkı ZnO nanoçubuk yarı iletken fotoanot yapısında kullandı. ZnO nanoçubuk verimliliğini %5 mol Mg katkı ZnO nanoçubuk ile verimliliği %1,97 den %4,11 seviyelerine çıkardığını gösterdi. Mg katkı ZnO'daki sürekli ve gözenekli kök benzeri yapı, çok sayıda elektron taşıdığını destekledi ve optik yol uzunluğu ve yüksek elektrolit difüzyonunu arttırdı.

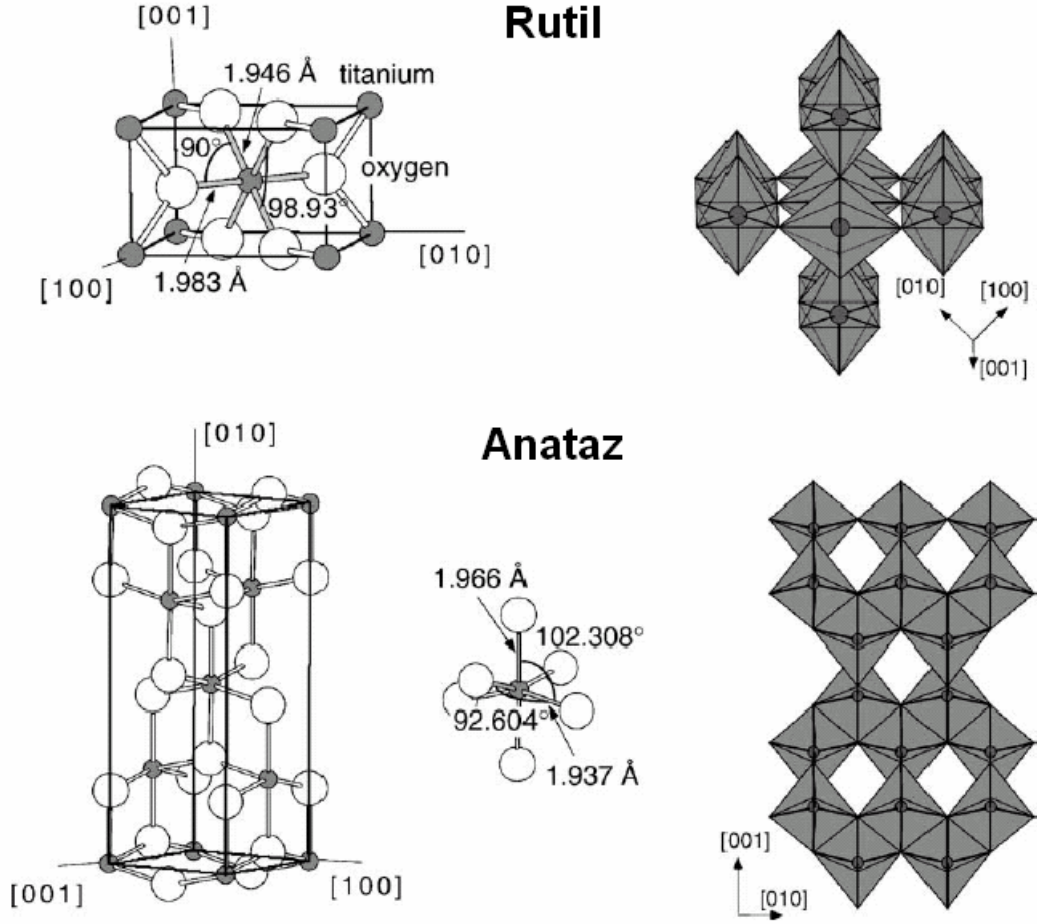
Guo vd. (2014), doğrudan çökeltme tekniği kullanılarak nanotabaka bazlı küresel yapı ZnO fotoanodundaki Mg katkısını araştırdı. Mg katkı sonrası bant aralığının artışına bağlı olarak fotovoltaj artışına bağlı olarak %1,72'den %4,19'a yükselen performans gözlemlendi.

Tao vd., (2012), Al katkı ZnO nanoçubuk dizilerine dayanan BDGP'nin performansını artırdığını bildirmiştir. Geliştirilmiş performans, fotoelektrot / elektrolit ara yüzündeki elektron rekombinasyon direncindeki artışa bağlandı ve bu da karanlık akımın azalmasına neden oldu. Al katkısı ile ZnO nanoçubuk dizilerinin çapının artmasıyla elektron taşınım direncinde azalma gözlemlendi. Zhu vd., (2013), hemen hemen aynı benzer verimliliğe sahip ZnO nanoçubukları Al ile katkılayarak verimliliğini %0,3 olarak bildirdi.

Azalan elektron rekombinasyonu ve arttırılmış elektron ömrü, açık devre voltaj azalması ve EIS karakterizasyonları ile doğrulanan DSSC performansının artmasına neden olan iki ana faktördür. Wang vd., (2013), ZnO küresel partikül fotoanotundaki kalay (Sn) katkısı, alan emisyon-SEM karakteristiklerini gözlemlendiği üzere Sn-ZnO partikül boyutundaki düşüşe bağlı olarak boya adsorpsiyonunu arttırdığını ifade etmiştir.

2.5.3. Titanyum dioksit (TiO₂) ve TiO₂ nanotüp

Titanyum dioksit (TiO₂), BDGP için yüksek kimyasal stabilite, göz alıcı yapı ve düşük toksik etkisi gibi sayısız üstün özelliği nedeniyle en popüler fotoanot malzemesidir. Zhang ve arkadaşları tarafından bildirildiği gibi, anataz dolaylı bant aralığı yarı iletken kategorisine girerken, rutil ve brookite doğrudan patlama aralığı yarı iletkenleridir. Anatazın dolaylı bant boşluğu nedeniyle, uyarılmış elektronların iletim bandından anataz değer bandına valans bandına doğrudan geçiş yapması imkansızdır. Sonuç olarak, uyarılmış elektronların ömrü rutil ve brookite kıyasla anatazda daha uzundur. Bunun yanı sıra, anatazın foto-çekim elektronlarının ortalama etkili kütlesi üç polimorf arasında en hafif olanıdır. Bu, fotoanot elektronların daha hızlı göç etmesine ve dolayısıyla rutil ve brookite kıyasla anatazda daha düşük rekombinasyon oranına izin verir. Park ve arkadaşları, anataz bazlı hücrenin rutil bazlı hücreye göre daha kısa devre fotok akımı (J_{sc}) olduğunu bildirmiş, açık devre gerilimi ise (V_{oc}) her iki durumda da aynıdır. Rutil filmdeki daha düşük foto-akımı, daha az miktarda adsorbe edilmiş boya ile sonuçlanan anataz filmine kıyasla daha küçük yüzey alanına bağlanır. Son yıllarda, çok çeşitli TiO₂ nanoyapıları, nanopartiküller, nanoroitler, nanoteller, nanotüpler ve nano tabakalar gibi BDGP uygulaması için fotoanot olarak sentezlenmiştir. Çeşitli TiO₂ yapılarının sentezi için sol jel, hidrotermal, püskürtme pirolizi, elektrokimyasal biriktirme, spin kaplama ve kimyasal buhar biriktirme gibi çeşitli üretim yöntemleri bildirilmiştir (Yeoh ve Chan, 2017).



Şekil 2.7. TiO₂ rutil ve anataz kristal yapıların birim hücreleri

2.6. Metal Katkılı TiO₂/ZnO Nanokompozit Yapıların Sentezleme Yöntemleri

2.6.1. Hidrotermal yöntem

Hidrotermal sentezleme, yüksek basınç altında ve su içerisinde kaynama noktalarının belirli seviye üstündeki sıcaklıklarda katot reaktanlarını tepkimeye sokarak nanaçubuk sentezleme yöntemlerinden biridir. Bu şartlar doğada mevcut durumda olan, yapay olarak kristallenen ilk yöntemdir. Solvotermal ve hidrotermal birbirine benzeyen iki deneysel süreçtir. Hidrotermal yöntem, maddenin sulu çözeltisi kullanılarak yüksek sıcaklıkta ve yüksek basınçta bir maddenin kristalleştirilmesi işlemidir. Genel olarak (100 °C) ve basınçta (<1 atm) çözünmeyen maddelerden kristal sentezi veya kristal büyütme işlemi olarak tasvir edilir. İşlem, kontrollü sıcaklık ve basınç altında otoklavlarda gerçekleştirilir. Su/organik çözelti kaynama noktasının üzerindeki

sıcaklıkların kullanılmasına izin verir. Hidrotermal sentez, çözünebilir kırılma noktasının üzerindeki sıcaklıklarda ve basınçlarda çözünebilir bir maddede meydana gelen bir karışım tepkisi olarak karakterize edilir.

Bu metotta giriş ürünleri ve çözücü özelliği olan maddeler kapalı bir kap içerisine yerleştirilerek hedeflenen sıcaklık değerine kadar ısıtılır ve belirlenen sürede bekletilerek kristal kaplama gerçekleştirilir. Çözücü özelliği olan madde su olursa hidrotermal metot, bir organik çözücü olursa solvotermal metot olarak adlandırılır. Bu yöntemde maddelerin çözücü madde içerisinde tamamıyla çözünmesi istenir eğer çözünmezse sıcaklık, pH gibi değerlerin kontrolü ile çözünmesi sağlanabilir.

Hidrotermal metodun artıları aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

- a) Kimyasal yönü kontrol altına alınabilmektedir,
- b) Homojenlik sağlanır,
- c) Düşük sıcaklıklarda ve düşük maliyette gerçekleştirilebilir,
- d) Farklı ve yeni özellikli maddeler elde edilebilir.

Mekanik işlemlere gerek duyulmadığı için son zamanlarda bilim çalışması yapanların dikkatini çekmiştir. Hidrotermal metodu sol-jel yöntemi ile kıyaslırsak, sol-jel yöntemi hidrotermal yöntemle göre daha pahalı bir sistemdir. Ayrıca sol-jel yöntemi daha karışık bir sistem ve büyük basınçlı sistemlere gereksinim duyulmaktadır. Sol-jel yönteminin ayrı bir dezavantajı ise çözücülerin tekrar kullanılamamasıdır. Bu yöntemde nano boyuttaki parçacıkların tamamen kapalı ortamda üretilmektedir (Özbey F., 2018).

2.6.2. Anodik oksidasyon yöntemi

Elektrokimyasal anodik oksidasyon yöntemi, nanoyapıların, özellikle TiO₂ nanotüp/nanoçubukların sentezi için kullanılan bir diğer iyi bilinen yoldur. Tipik olarak, TiO₂ nanotüplerin, titanyum folyonun NaX inorganik tuzları ile doğrudan oksidasyonu ile elde edildi (X, florür iyonu, klorür iyonu ve sülfat iyonu olabilir). Anodik voltaj çözeltide uygulandığında, titanyum folyo X içeren çözeltide çözülür. Ardından kristalimsi TiO₂ çökeltme ile oluşur. TiO₂ nanoyapılarının morfolojik yapısı, anodizasyon süresi, uygulanan voltaj, sıcaklık, uygulama parametreleri, su içeriği, pH

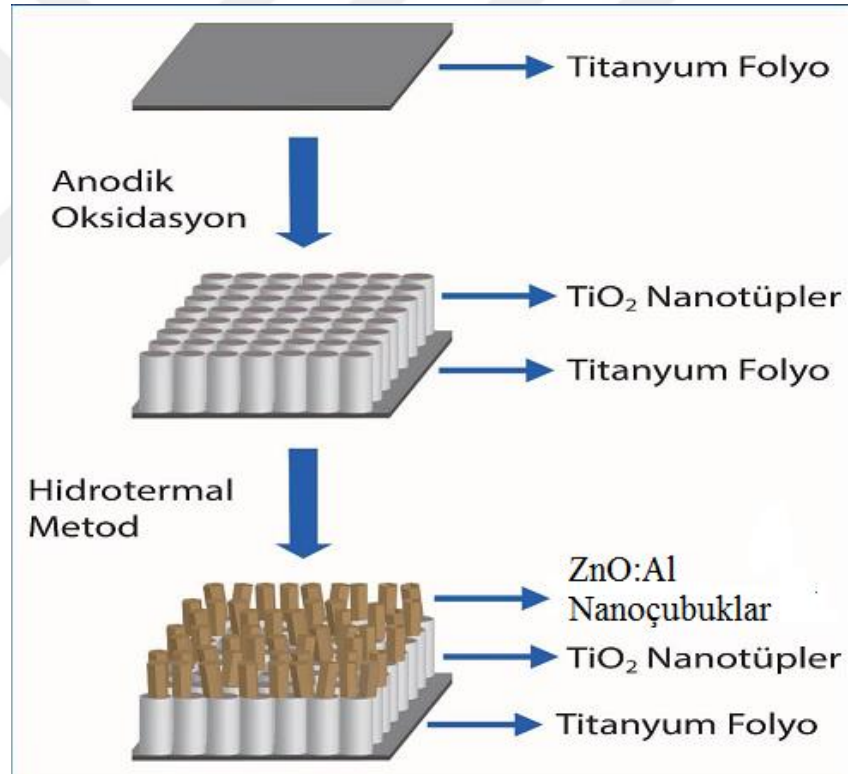
ve organik katkı maddeleri gibi sentezleme koşullarını değiştirerek ayarlanabilir. Bununla birlikte, TiO₂ nanoyapılarının imalatı için bu yöntemle ilişkin birçok sorunun çözümlenmesi gerekmektedir. Örneęin, kararlı, verimli ve düşük maliyetli anodik oksidasyon teknolojisi için günümüzde çok daha fazla zorluklar var.

,



3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu tez çalışmasında Al katkılı ZnO nanoçubuklar ile TiO_2/ZnO nanokompozit (TZ) yapılar, nanotüp/nanoçubuk formunda sentezlenmiştir. Sentezlenen TiO_2 nanotüp dizilerinin (TND) elektrokimyasal yöntem ile büyütülmesi ve üzerine Al katkılı ZnO nanoçubukların hidrotermal yöntem ile büyütülerek nanotüp dizileri üzerine dekore edilmesiyle sentezlenen Al katkılı TiO_2/ZnO ($\text{TiO}_2/\text{ZnO}:\text{Al}$) nanokompozit yapılar (TZA) oluşturulmuştur. Çalışmanın tüm adımlarında Al katkılı TiO_2/ZnO nanokompozit yapılar, karakterizasyon doğruluğunu ve güvenilirliğini arttırabilmek için birden fazla sayıda sentezlenmiştir. Sentezlenen Al katkılı TiO_2/ZnO nanokompozit yapıların oluşum aşamaları Şekil 3.1’de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. TZA fotoanotların üretim ve yöntem süreci

3.1. Numune Hazırlama ve TiO_2 Nanotüplerin (TND) Sentezlenmesi

Öncelikli olarak Metal katkılı BDGP’lerde altlık olarak kullanılan titanyum plakalar (%99,7 saflık, 0,25mm kalınlık, Sigma Aldrich) 1,3x2,5 cm boyutlarında kesilerek, plakaların yüzeyindeki kirliliklerin ve toz partiküllerini yüzeyden koparmak için ultrasonik banyo cihazında sırasıyla otuzar dakika aseton, 2-propanol, deiyonize su ile

temizleme prosedürleri uygulanmıştır. Temizleme prosedürleri uygulanırken Merck markasına ait olan Aseton (CH_3COCH_3), 2-propanol ($\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_3$) kullanılmıştır. Temizleme prosedürlerinin uygulandığı ultrasonik banyo cihazı Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Ultrasonik Banyo

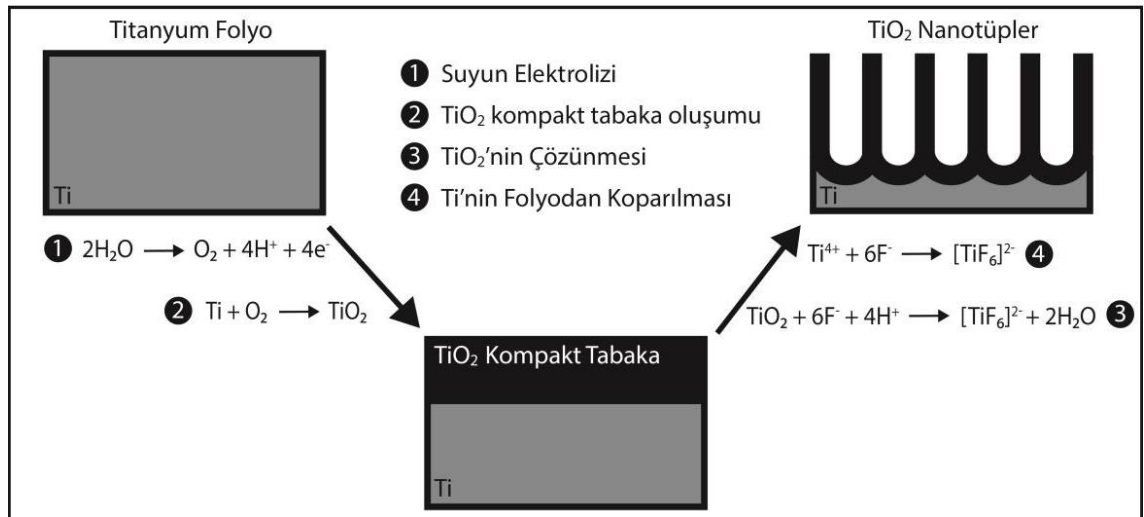
Temizleme prosedürlerinden sonra titanyum plakalar üzerine anodik oksidasyon yöntemi kullanılarak TiO_2 nanotüp dizileri (TND) oluşturulmuştur. Anodik oksidasyon işlemi için 0,4gr (%0,4 wt) Amonyum Floride (NH_4F) (%99,8 saflık, Sigma Aldrich) 5ml (%5wt) deiyonize su ve 85 ml (%94,6 wt) Etilen Glikol (%99,8 saflık, Sigma Aldrich) çözeltileri ile anodik oksidasyon işlemi için gerekli olan elektrolit çözeltisi hazırlandı. Hazırlanan çözelti teflon kap içerisine doldurulup manyetik karıştırıcıda 500 rpm (revolutions per minute) karıştırma hızında 20 dakika boyunca karıştırılmıştır. Çalışma elektrotu titanyum plaka ve karşıt elektrot Pt (%99,9 saflık, Sigma Aldrich) elektrolit çözeltisi içerisine daldırıldı ve Oda koşullarında 3 saat boyunca gerilim 2şer V arttırılarak 30V’a kadar çıkarılıp sabit tutulup 30V gerilim uygulanarak anodik oksidasyon işlemi ile TND’ler sentezlenmiştir. Anodizasyon işlemi sonrası sentezlenen

TiO₂ nanotüp dizileri yüzeyinde oluşan kalıntıları ortadan kaldırmak için ultrasonik banyoda 2 dk. Metanol (CH₄O) (%99,8 saflık, Sigma Aldrich) ile temizlenmiş ve azot gazı ile kurutma işlemi kurutulmuştur. Anodik oksidasyon yönteminde kullanılan anodizasyon düzeneği Şekil 3.4’de gösterilmektedir.



Şekil 3.3. TND oluşumunda kullanılan anodizasyon düzeneği

Anodik oksidasyon yöntemi süresince oluşum evresi basamaklar halinde Şekil 3.4’te gösterilmektedir.



Şekil 3.4. TND'lerin oluşum mekanizmaları (Çırak vd., 2017)

Sentezlenen TND'lerin amorf yapıdan anataz fazına geçmesi için 450 C’de 1 saat boyunca Şekil 3.5’te gösterilen kül fırınında tavlama işlemi uygulanmıştır.



Şekil 3.5. Kül fırını

3.2. AL katkıli Nanoçubuklar ile Oluşturulmuş TiO_2/ZnO Nanokompozit Yapıların Sentezlenmesi

Al Katkılı TiO_2/ZnO nanokompozit yapıları elde etmek için hidrotermal yöntem kullanılmıştır. Bu aşamada altlık yüzey TiO_2 nanotüp dizilerinin yüzeyine %0,5, %1, %2, %4 Al katkıli ZnO Hidrotermal yöntem ile sentezlenerek, Al metal katkıli ZnO nanoçubuklar TiO_2 nanotüp yüzeyine dekore edilmiştir. Böylelikle Al katkıli TiO_2/ZnO nanokompozit (TZA) yapılar sentezlenmiştir.

Öncelikle ZnO nanoçubukların oluşumu için Çinko nitrat ($Zn(NO_3)_2$) ve hidroksil (OH) kaynağı heksametiltetramin ($C_6H_{12}N_4$, HMT) çözeltileri hazırlanmıştır. Hazırlanan çinko oksit çözeltilisine, kütlece %0,5, %1, %2, %4 Al metali eklenmiştir. 50mM çinko nitrat içerisine farklı oranlarda Alüminyum nitrat ($Al(NO_3)_3$, %99,99 saflık, Sigma Aldirch) metali ve HMT 20'şer ml'lik farklı kaplarda manyetik karıştırıcıda 1000rpm karıştırma hızında 10dk karıştırılmıştır. 50ml'lik reaktör teflon kap içerisine titanyum plakalar yerleştirildikten sonra hazırlanan çözeltiler teflon kap içerisine dökülmüştür. Teflon kap çelik otoklav içerisine yerleştirip hidrotermal reaktöre (DAB-2, Berghof GmbH) yerleştirilmiştir. Hidrotermal uygulamalar 4 saat 90 C'de gerçekleşmiştir.

Katkılama yapılan TZ fotoanotlar sırasıyla TZA0,5, TZA1, TZA2, TZA4 olarak isimlendirilmiştir. Şekil 3.6’da hidrotermal reaktör ve düzeneği gösterilmektedir.



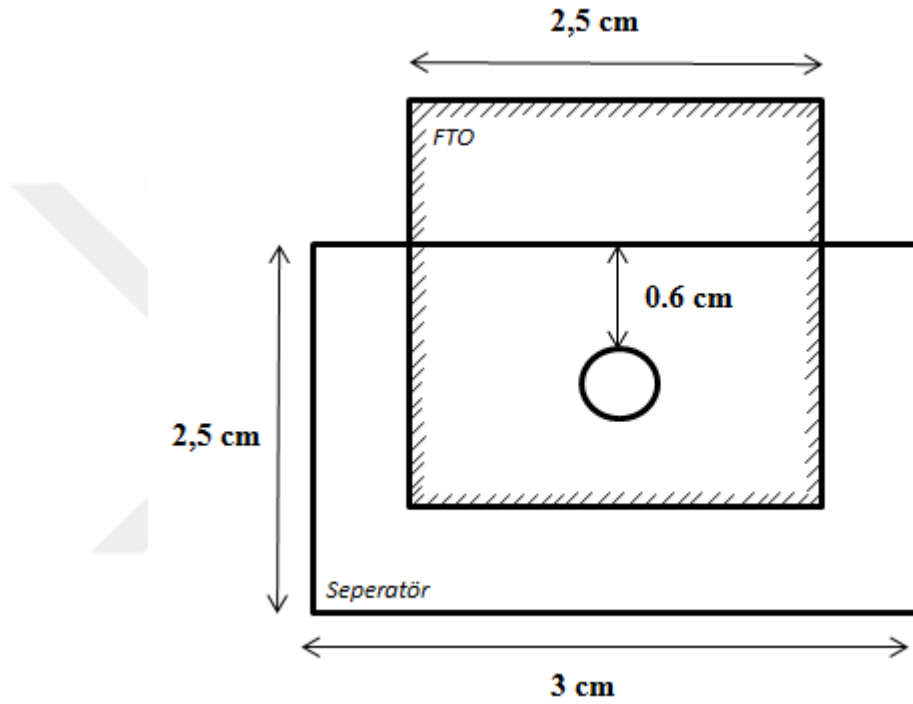
Şekil 3.6. Hidrotermal sistemi

3.3. Boya Duyarlı Güneş Pillerinin Montaj ve Performans Ölçümleri

Farklı oranlarda sentezlenerek oluşturulan Al katkılı TiO_2/ZnO nanokompozit yapılar, boya duyarlı güneş pillerinde fotoanot olarak kullanılmıştır. Sentezlenen TZA fotoanotlar, ticari N719 (Sigma Aldrich) Ru esaslı boyası ile 0,05 mM etanol çözeltisi hazırlanarak 12 saat boyunca bu çözeltiliye daldırılarak karanlıkta bekletilmiştir. Daha sonra fotoanotlar yüzeydeki serbest boya moleküllerini ortadan kaldırmak için etanolle durulanmıştır. Böylelikle boyaya duyarlı TZA fotoanotlar elde edilmiştir.

Karşıt elektrotun hazırlanması için öncelikli olarak 2,5x2,5 cm boyutlarında FTO cam (Sigma Aldrich, 13 Ω/sq) kesilerek Bölüm 3.1’de anlatılan temizleme prosedürleri uygulanmıştır. Daha sonra FTO camlar üzerine Platisol T (Solaronix) damlatılmış ve fırça yardımı ile yüzeyine sürülmüştür. Bu FTO’lar kül fırınında 450 C’de 10 dk. bekletilerek Platisol T’nin Pt dönüşümü sağlanmıştır. TZA fotoanotlar ile Pt/FTO karşıt elektrotlar arasında yalıtkan madde olarak 60 μm kalınlığındaki separatör (Solaronix), redoks tepkimelerinin gerçekleşemese bilmesi için I^-/I_3^- elektrolit (Hi-30, Solaronix) kullanılmıştır.

Boya Duyarlı Güneş Pilleri, TZA çalışma elektrotu Pt/ZnO karşıt elektrot arasına birbirlerine olan temasını engellemek amacıyla yalıtkan madde olan 60 μ m kalınlığındaki Surlyn film Şekil 3.7’de gösterildiği gibi 2,5x3cm boyutlarında kesilerek bir noktadan delik açılarak çalışma elektrodu ile karşıt elektrot arasına yerleştirilmiştir. Son olarak çalışma elektrotu ile karşıt elektrot arasına I/I₃ enjektör yardımı ile enjekte edilmiştir.



Şekil 3.7. BDGP'nin şematik gösterimi

BDGP'nin performans ölçümlerinde ışık kaynağı olarak solar simülatör (ABET 10500), akım-gerilim (I/V) ölçüm cihazı (Keithley 2400), EIS ölçümü potansiyostat/galvonostat (Gamry-Interface 1000) cihazları kullanılmıştır.

Akım gerilim (I/V) eğrileri, üretilen TZA fotoanotların ışık kaynağı altında fotoanot performansları hakkında bilgi vermektedir. Akım gerilim eğrileri AM 1,5G standardında filtre, solar simülatör yardımıyla 100 mW/cm² aydınlatma şartlarında oluşturuldu ve güneş piline gerilim uygulanarak akım değerleri not edilmiştir. I/V eğrileri ile elde edilen akım değerleri ile P_{max}, V_{oc}, I_{sc}, FF ve η değerleri hesaplanmıştır.

3.4. Karakterizasyon

3.4.1. X-ışını kırınım analizi

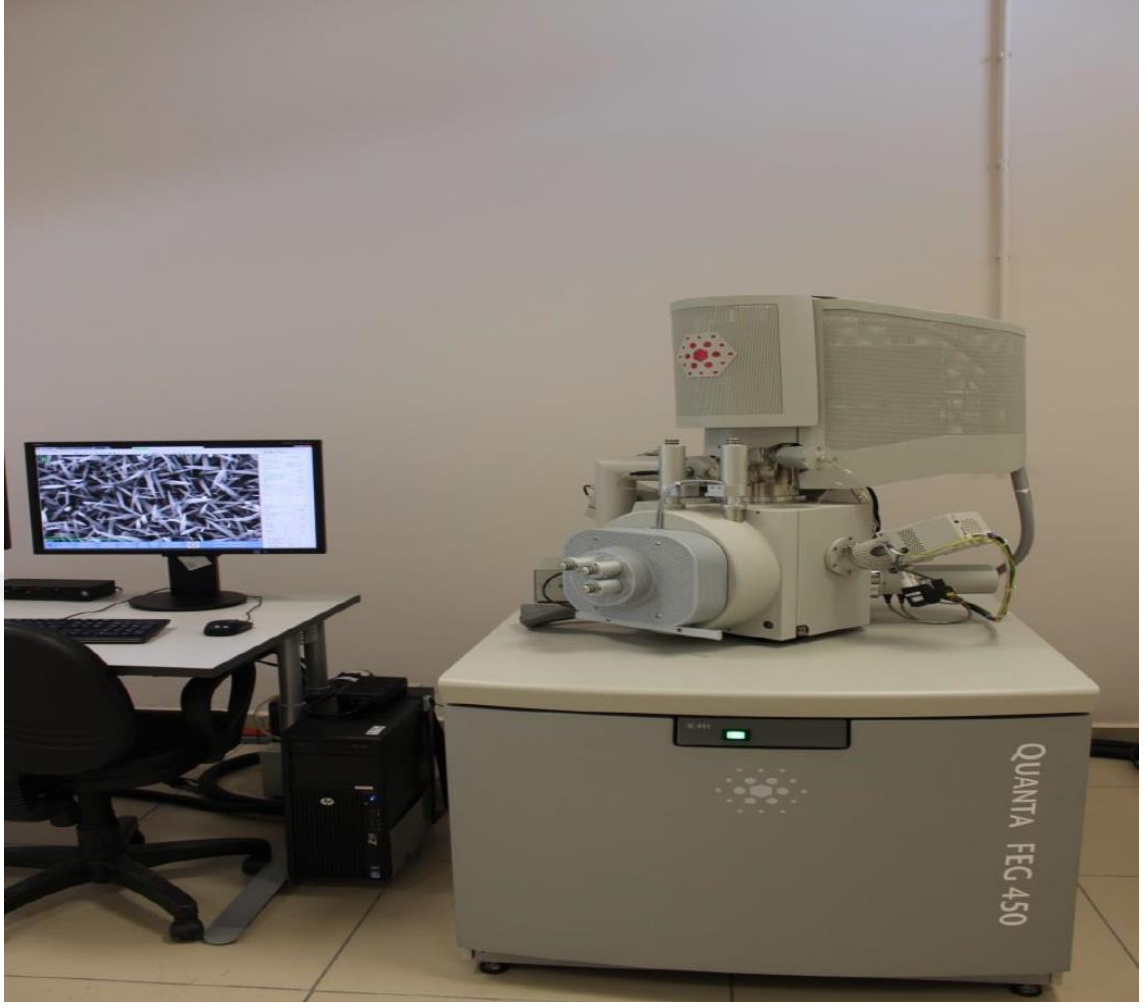
Sentezlenen TND, TZ ve Farklı oranlarla Al katkılanarak TZA'ların kristal yapıları ve faz analizleri X-Ray difraktometresiyle (PANanalytical, Empyrean) ile yapılmıştır. Yapılan analizler 2° döndürme hızıyla 10° - 90° açıları arasında Cu-K α radyasyonu ($\lambda=1,5406 \text{ \AA}$, 45mV, 40mA) uygulanarak yapılmıştır.



Şekil 3.8. XRD cihazı

3.4.2. Taramalı elektron mikroskopu (SEM) analizi

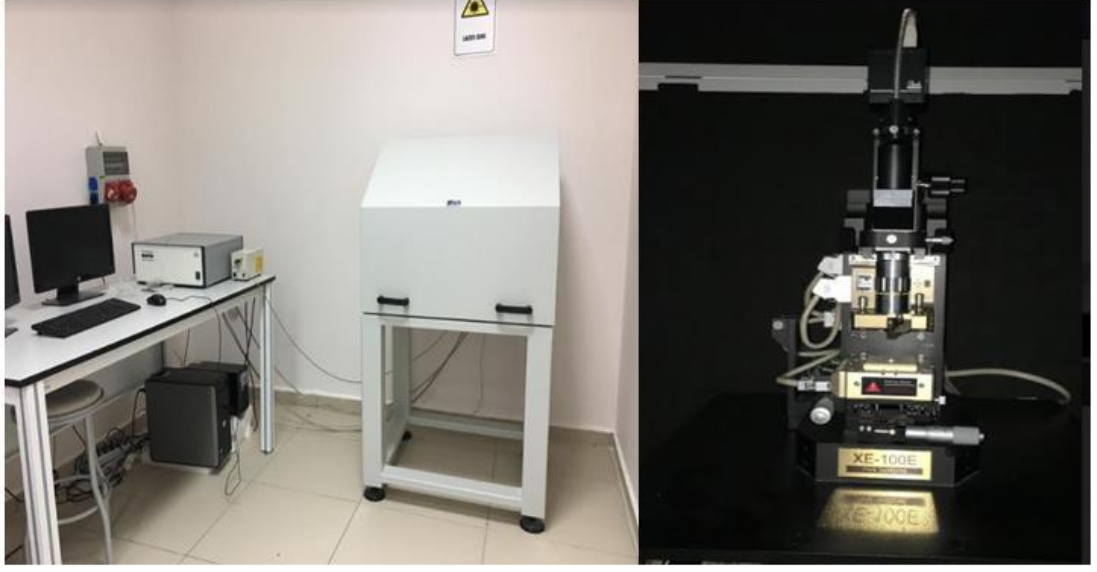
Sentezlenen TND, TZ, TZA fotoanotların, nanotüp ve katkılı nanoçubukların yüzey morfolojisi SEM (FESEM, FEI, Quanta 450) ve enerji dağılım grafikleri X-ışını spektrometresi (EDS) cihazı kullanılarak incelenmiştir.



Şekil 3.9. SEM cihazı

3.4.3. Atomik kuvvet mikroskobu (AFM) analizi

Farklı oranlarda Al katkılanarak sentezlenen TZA fotoanotların yüzey pürüzlülüğünün araştırılmasında atomik kuvvet mikroskobu kullanılmıştır. Analizler $5 \times 5 \mu\text{m}$ 'lik yüzey alanında temassız mod kullanılarak alınmış ve yüzey topografya analiz sonuçları elde edilmiştir.



Şekil 3.10. AFM cihazı

3.4.4. X ışını fotoelektron spektrometresi (XPS) analizi

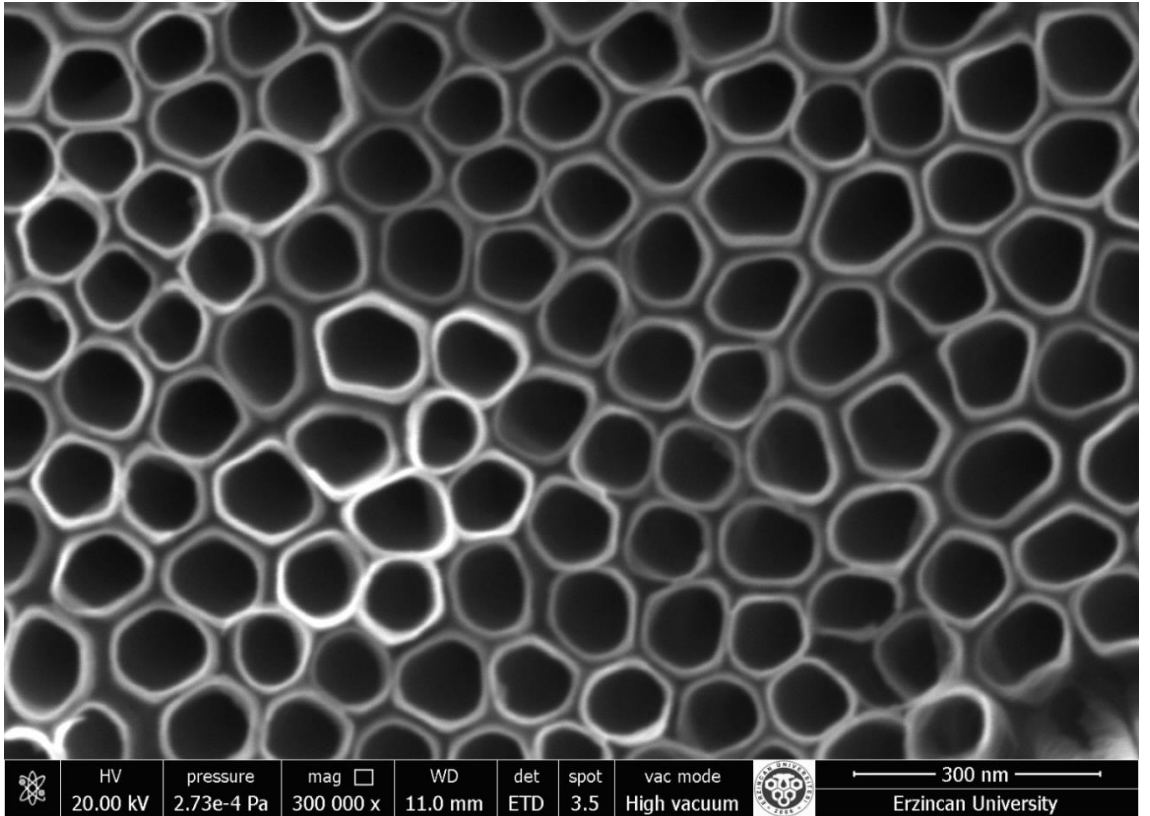
Sentezlenen TZA fotoanotların elemental analizleri X ışını fotoelektron spektrometresi ile yapılmıştır ve TZA fotoanotların elemental yapıları incelenmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Al Katkılı ZnO Nanoçubuklar ile Oluşturulmuş TiO₂/ZnO Nanokompozit Yapıların Karakterizasyonu

Bu çalışmada, farklı oranlarda Al katkılı TiO₂/ZnO (TZA) nanokompozit yapılar sentezlenmiştir. Al elementi için katkı oranları, literatürdeki katkılama oranları ve ZnO nanoçubukların morfolojisini bozmayacak şekilde %0,5 ile %4 arasında belirlenmiştir.

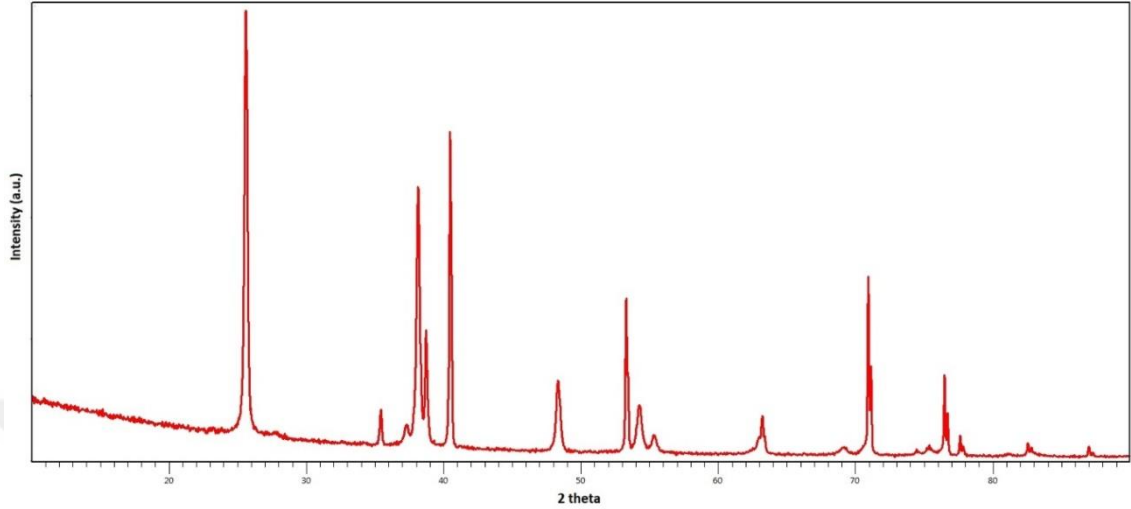
Öncelikle, katkılı ZnO nanoçubukların üzerine sentezleneceği anodik oksidasyon sonucunda büyütülmüş TiO₂ nanotüplerin üstten SEM görüntüleri Şekil 4.1’de verilmiştir. 30 V gerilim altında, 3 saat boyunca büyüyen nanotüpler 80-90 nm çapında ve yaklaşık 3-4 µm boyları arasında bir dağılıma sahiptir.



Şekil 4.1. TiO₂ nanotüplerin üstten SEM görüntüsü

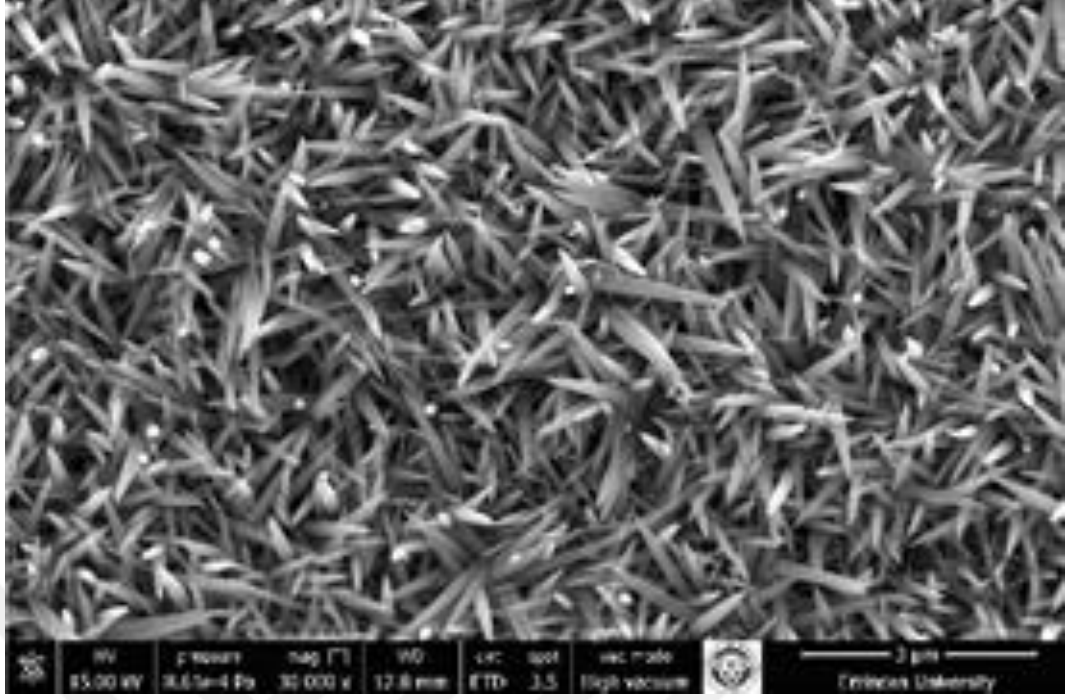
Şekil 4.2’de nanotüp formundaki TiO₂’nin XRD spektrumu verilmiştir. Spektrumda görüldüğü gibi 20(θ) 25,3° de karakteristik anataz (101) piki, tavlama işlemi sonrasında nanotüplerin kristal yapısının anataz fazda olduğunu göstermektedir. Anodizasyon şartları

değişmediği için tüm TiO₂ nanotüpler aynı nanotüp morfolojisine ve kristal yapısına sahiptir.

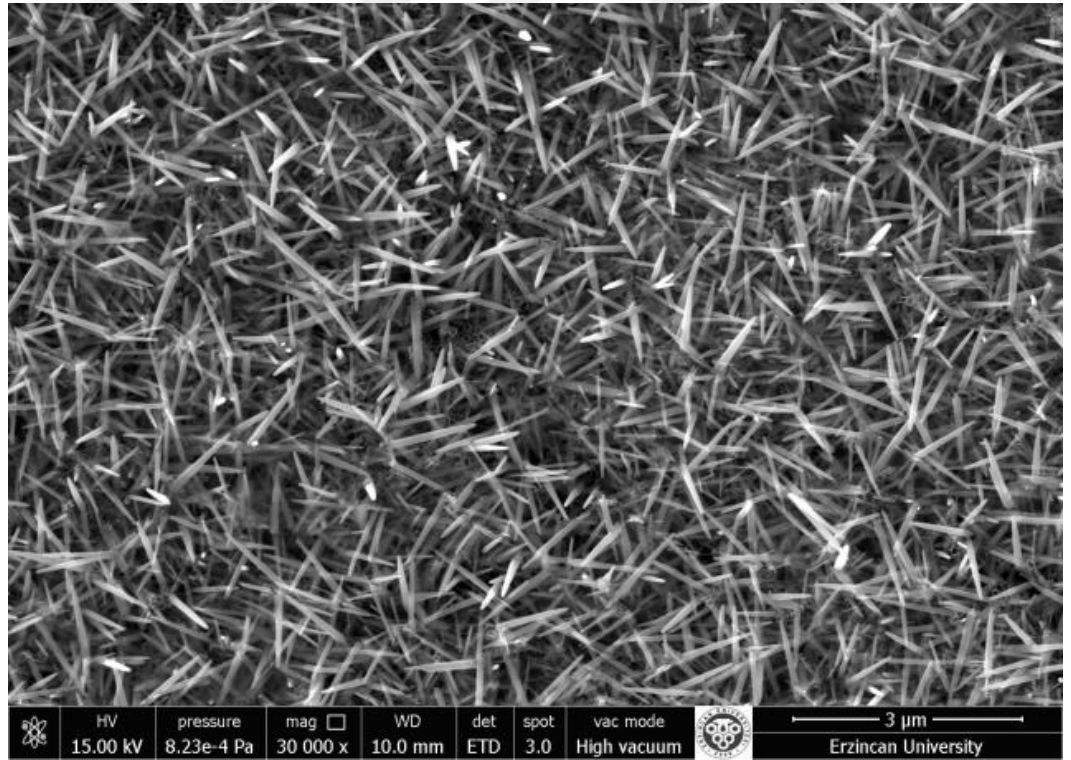


Şekil 4.2. TiO₂ nanotüp dizilerinin XRD spektrumu

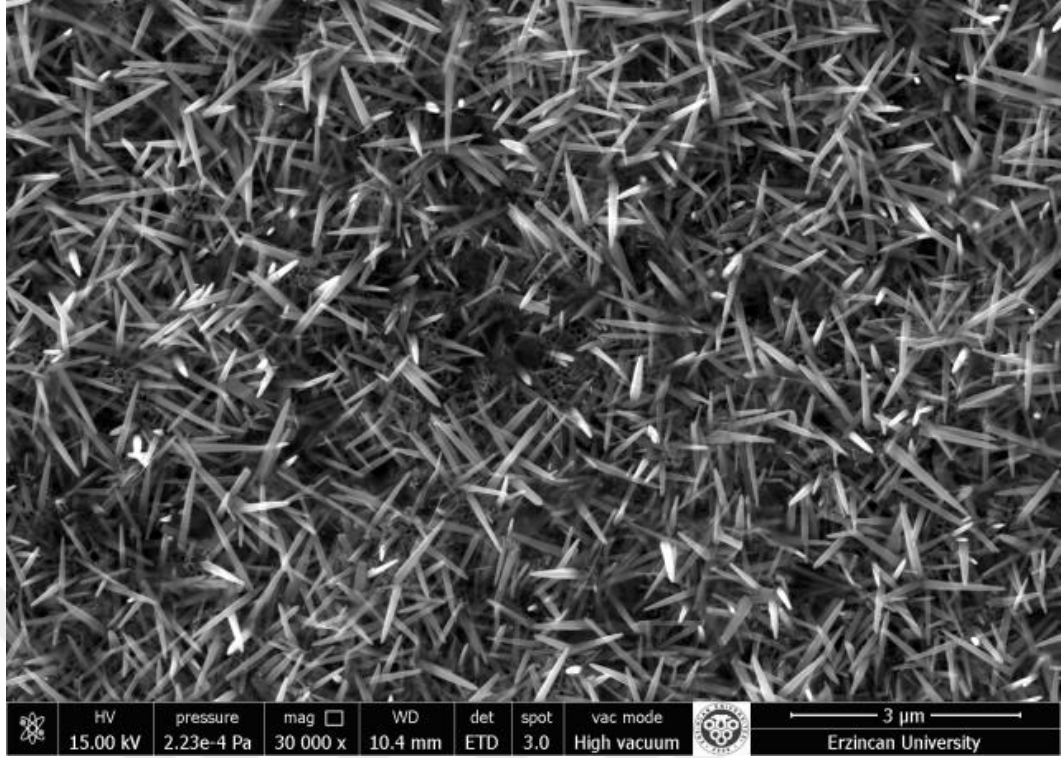
%0,5, %1, %2, %4 Al katkılı ZnO nanoçubuklar ile oluşturulmuş TiO₂/ZnO nanokompozit yapılar sırasıyla TZA0,5, TZA1, TZA2, TZA4 olarak isimlendirilmiş. Sırasıyla Şekil 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7’de Al katkılama oranları ile sentezlenen TiO₂/ZnO nanokompozit yapıların SEM görüntüleri verilmiştir. Şekillerde de görüldüğü gibi, Al katkılama oranı arttıkça ZnO nanoçubukların TiO₂ nanotüpleri üzerinde bir miktar seyrekleştiği görülmektedir. Ayrıca, ortamdaki OH derişiminin yüksek olmasından dolayı, çok bazik bir çözeltide Al(OH)₃ (Alüminyum hidroksit) Al(OH)₄⁻ dönüştüğünden yüzeyde Al₂O₃ büyümemiştir. Böylece ZnO nanoçubuk yapısındaki çinko ile yer değiştirdiği sonucuna varılmıştır.



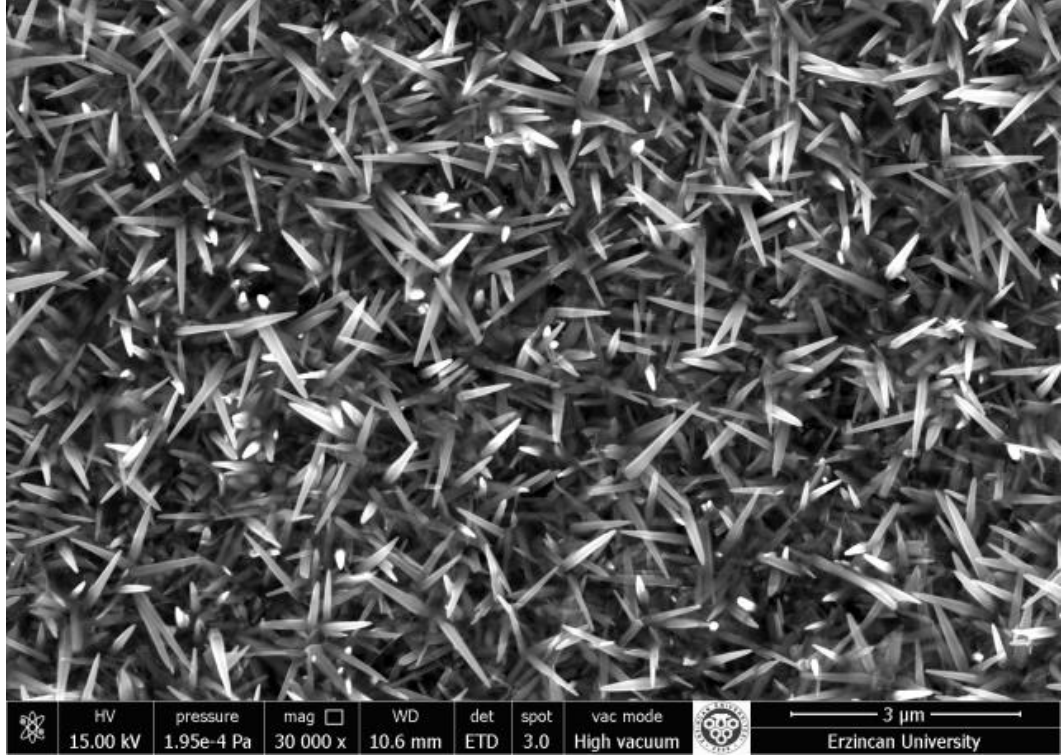
Şekil 4.3. Katkısız sentezlenmiş TiO₂/ZnO nanokompozit yapıların SEM görüntüleri



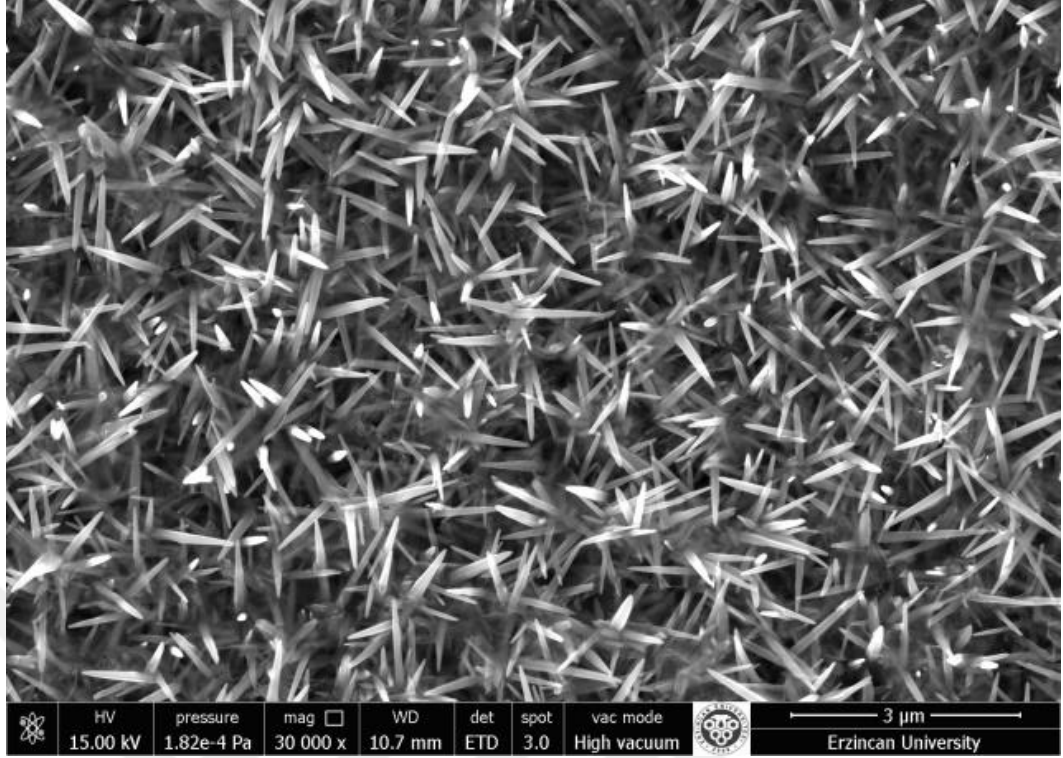
Şekil 4.4. %0,5 Al katkıları ile sentezlenmiş TiO₂/ZnO nanokompozit yapıların SEM görüntüleri



Şekil 4.5. %1 Al katkıları ile sentezlenmiş TiO₂/ZnO nanokompozit yapıların SEM görüntüleri

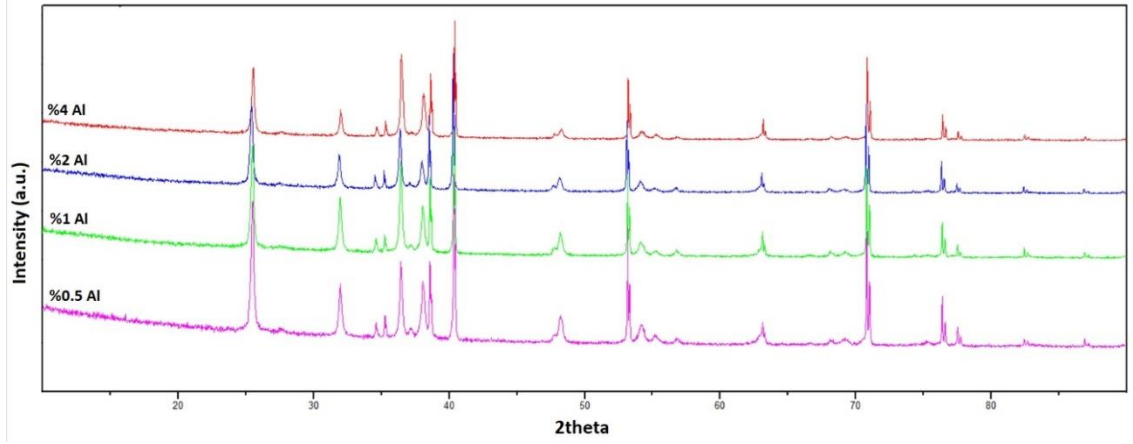


Şekil 4.6. %2 Al katkıları ile sentezlenmiş TiO₂/ZnO nanokompozit yapıların SEM görüntüleri



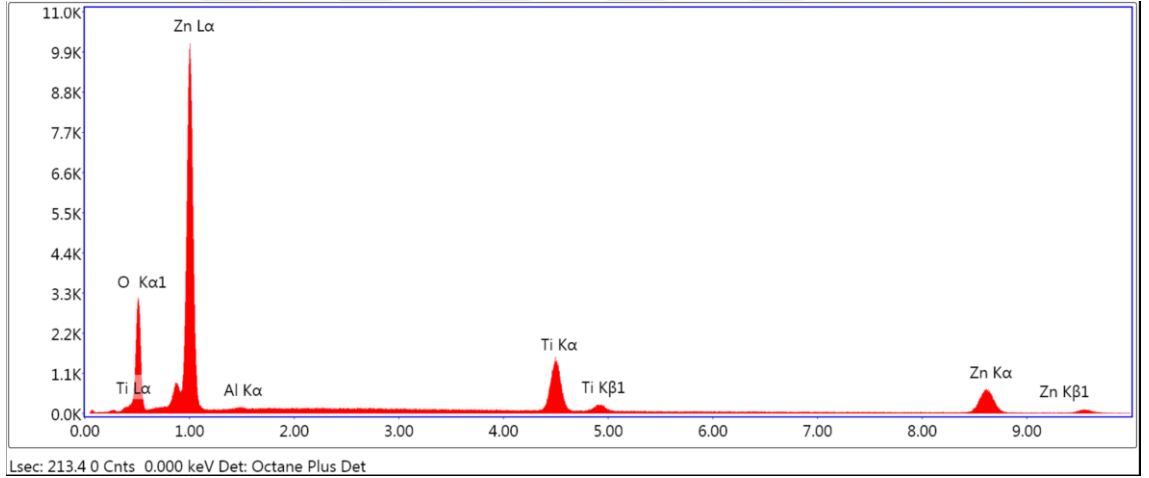
Şekil 4.7. %4 Al katkıları ile sentezlenmiş TiO_2/ZnO nanokompozit yapıların SEM görüntüleri

Şekil 4.8’de farklı oranlarda Al katkılanmış TiO_2/ZnO nanokompozit yapıların XRD spektrumları verilmiştir. Nanokompozit yapı hem Anataz TiO_2 ve Wurtzite ZnO difraksiyonlarını içermektedir. TiO_2 nanotüplerin, $25,3^\circ$, $37,9^\circ$, $48,1^\circ$, $54,1^\circ$, $55,2^\circ$ ve $63,5^\circ$ (2θ) deki difraksiyonlar anataza TiO_2 ’nin (JCPDS No. 21-1272) sırasıyla (101), (004), (200), (105), (211) ve (204) düzlemlerine karşılık gelmektedir. Şekil 4.4’deki pikler dışında $2\theta=30-40^\circ$ wurtzite formundaki ZnO (JCPDS No. 36-1451) nanoçubukların (010), (002), ve (011) pikleri sırası ile $31,8^\circ$, $34,6^\circ$, $36,4^\circ$ 2θ açılarında gözlenmiştir. Şekil 4.4’te görüldüğü gibi, Al katkılanması sonucu yeni bir pik oluşumu gözlenmiştir. Ayrıca, wurtzite ZnO piklerinin, katkılama arttıkça az miktarda sağa kaydığı tespit edilmiştir.

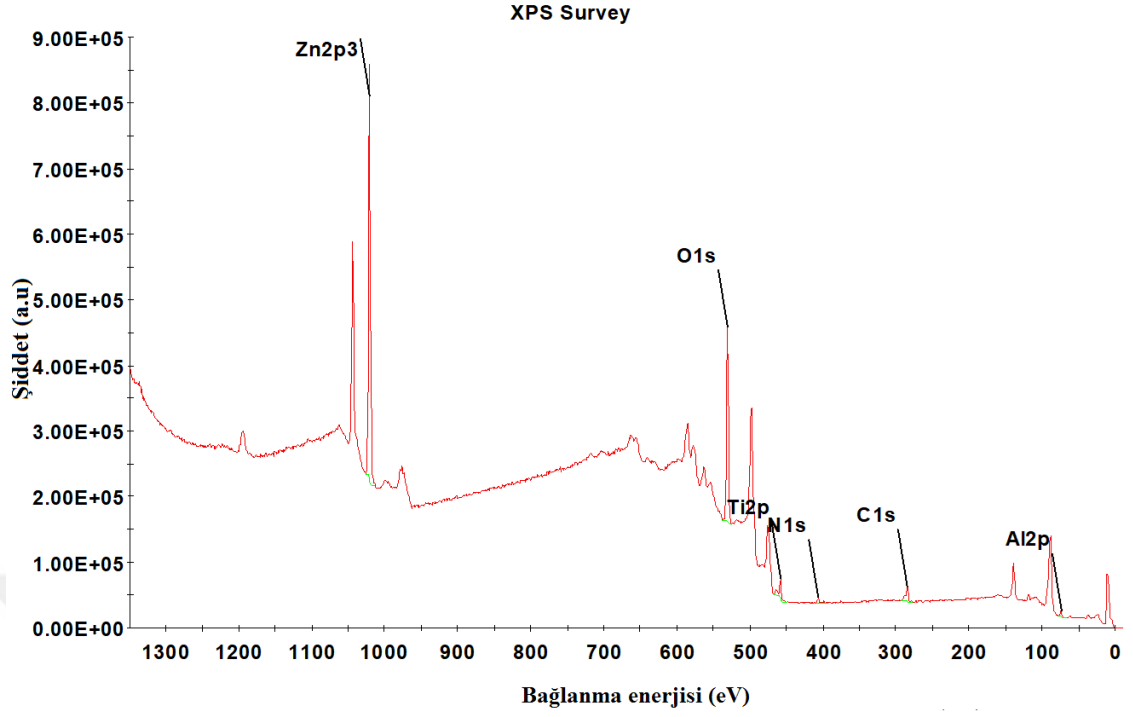


Şekil 4.8. Farklı oranlarda Al katkıları ile sentezlenmiş TiO_2/ZnO nanokompozit yapılarının XRD spektrumları

Elde edilen Al katkıli TiO_2/ZnO nanokompozit yapıların EDX ve XPS spektrumları sırasıyla Şekil 4.9 ve 4.10'da verilmiştir. Yapılan elementel analiz sonucunda numune yüzeylerinde Ti, Zn, Al ve O elementlerinin varlığı tayin edilmiştir.

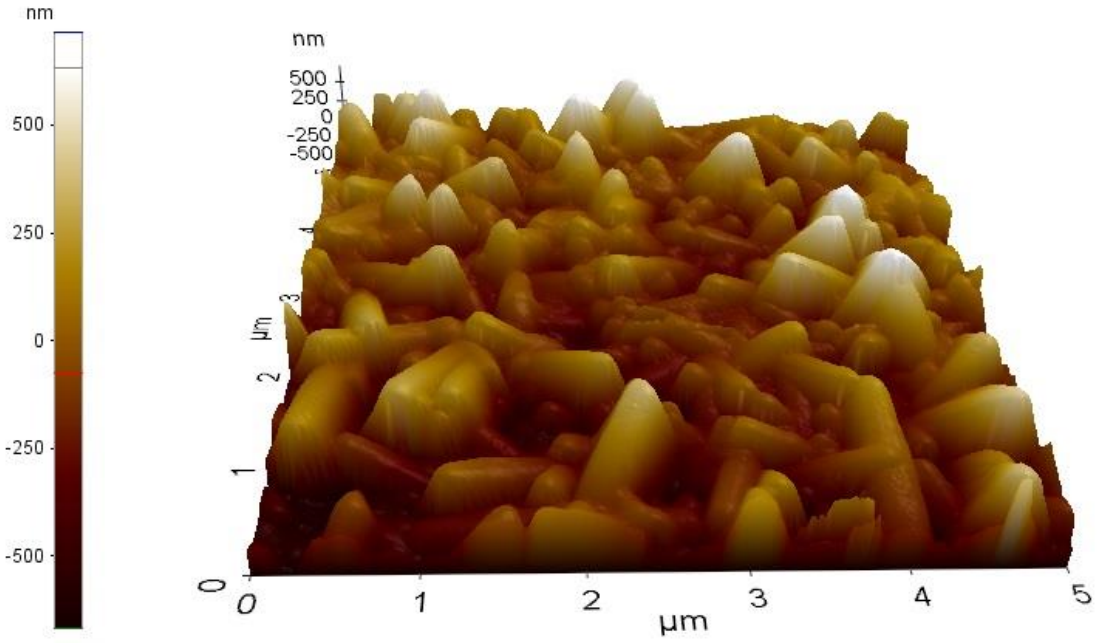


Şekil 4.9. %2 Al katkıli TiO_2/ZnO nanokompozit yapının EDX spektrumu



Şekil 4.10. %2 Al katkıli TiO_2/ZnO nanokompozit yapının XPS survey spektrumları

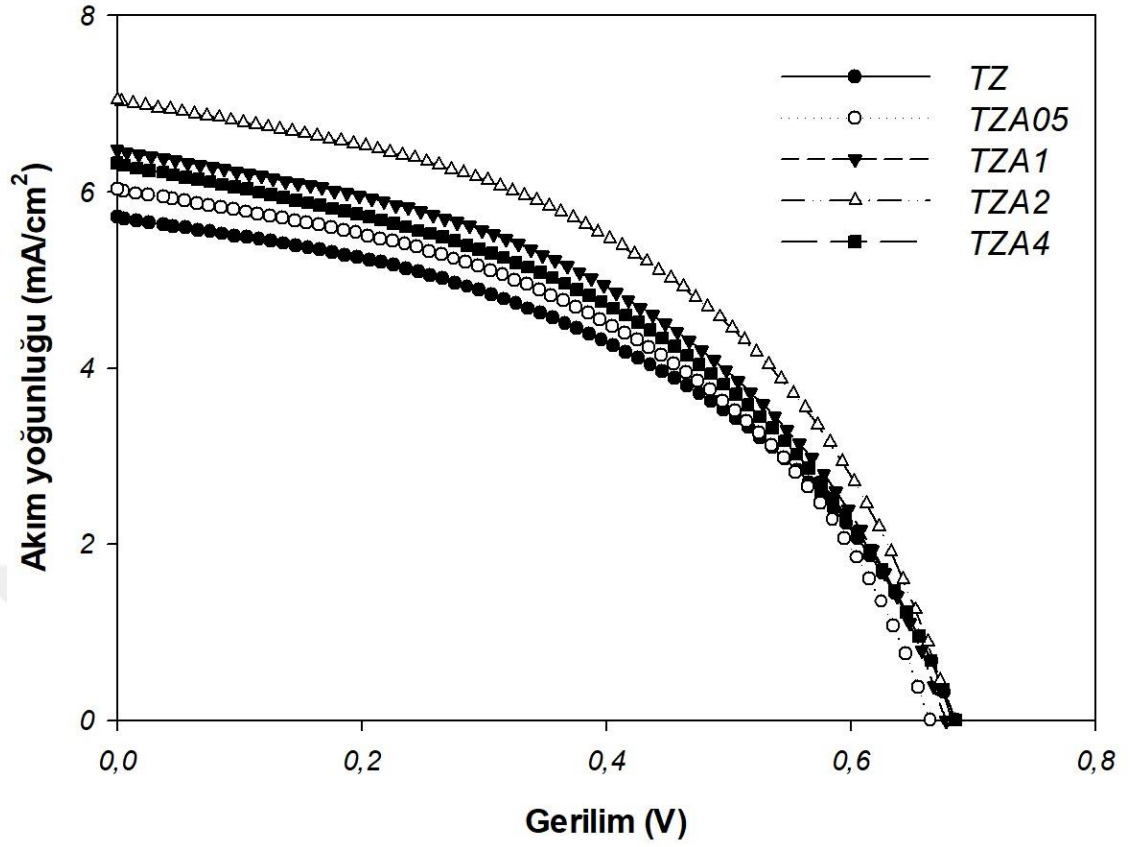
Şekil 4.11’de %2 Al katkıli TiO_2/ZnO nanokompozit yapıların AFM ile elde edilmiş yüzey morfolojisi verilmiştir. SEM, bu tip nanokompozit yapının yüzey morfolojisinin tayininde AFM’ye göre çok etkili tekniktir. Fakat araştırma laboratuvarımızda bulunan AFM cihazı ile de yüzey üzerindeki nanoçubukların morfolojisi belirgin bir şekilde görülmektedir.



Şekil 4.11.%2 Al katkıli TiO₂/ZnO nanokompozit yapının AFM görüntüsü

4.2. BDGP'lerin Güneş Pili Performansı

Hazırlanan TiO₂ nanotüpleri, kütlece %0,5, %1, %2 ve %4 Al katkıli 50mM ZnO çözeltileri kullanılarak hidrotermal yöntem TZA0,5, TZA1, TZA2 ve TZA4 isimlendirilerek nanoçubuklar üretilerek BDGP'lerin montajında kullanılmıştır. Şekil 4.12'de, üretilen TZA fotoanotların uygulanan akım yoğunluğuna karşı voltaj (J-V) eğrisini göstermektedir. TZ ve TZA0,5, TZA1, TZA2, TZA4 fotoanotlardan oluşturulmuş boya duyarlı güneş pillerinin performans parametreleri Tablo 4.1'de gösterilmiştir.



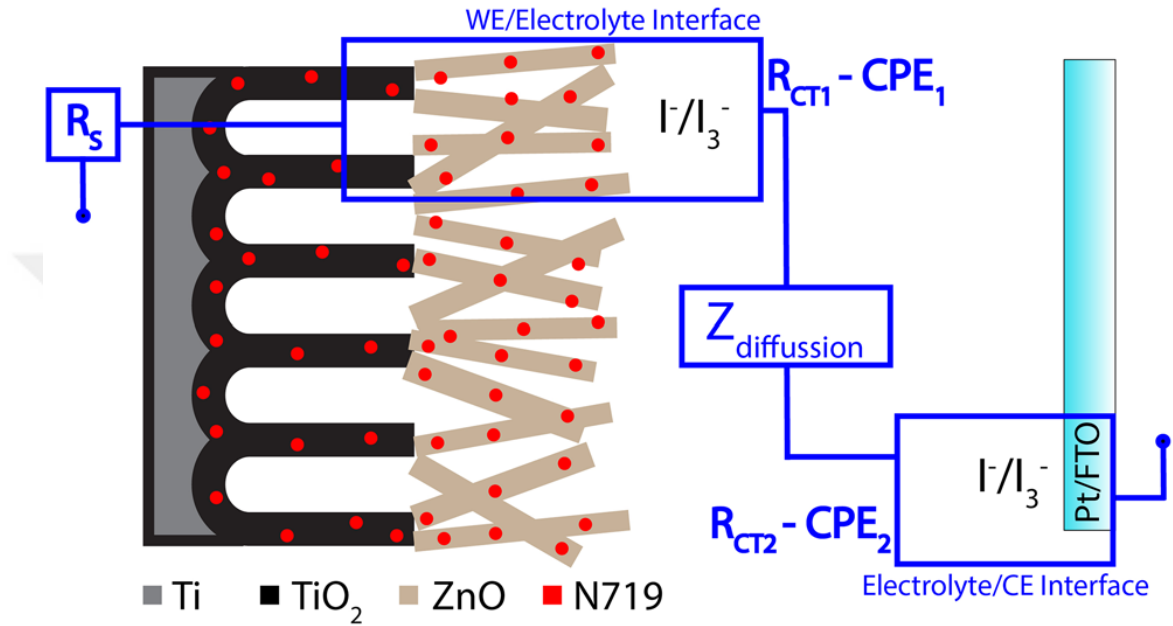
Şekil 4.12. TZ ve farklı yüzdelerle katkılanan TZA fotoanotların J-V eğrisi

Tablo 4.1. TZ ve TZA0,5, TZA1, TZA2, TZA4 fotoanotlardan oluşturulmuş boya duyarlı güneş pillerinin performans parametreleri

	J_{SC} (mA/cm ²)	V_{OC} (V)	FF (%)	η (%)
TZ	5,72	0,69	56	1,77
TZA05	6,03	0,66	55	1,84
TZA1	6,48	0,68	55	2,02
TZA2	7,04	0,68	57	2,27
TZA4	6,33	0,69	54	1,91

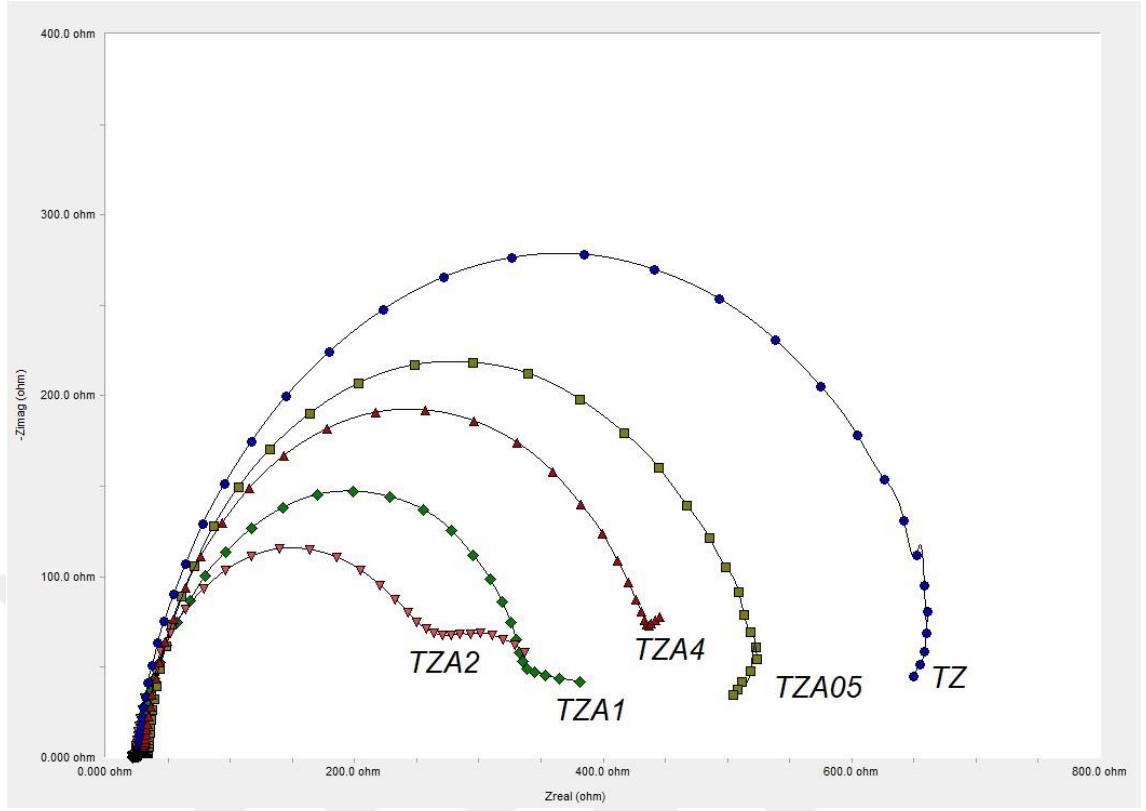
BDGP'nin elektronik yapısı EIS ölçüm tekniği kullanılarak incelenmektedir. Şekil 4.13'de oluşturulmuş olan BDGP'nin eşdeğer devresinin şematik yapısını ve temel

yorumu gösterilmektedir. R_s seri direnci, WE çalışma elektrotunu, CE karşıt elektrotu, R_{CT1} fotoanot ile elektrolit ara yüzelerindeki yük transfer direncini ve R_{CT2} elektrolit ile platin (Pt) ara yüzelerindeki yük transfer direncini ifade etmektedir. CPE elemanları ise ara yüzelerdeki kapasitif sabit faz elemanıdır. $Z_{diffüzyon}$ redoks çift elektrolitinde Warburg empedansıdır (Çırak vd., 2019).



Şekil 4.13.BDGP devresinin yapısı (Çırak vd., 2019)

TND ve TZA fotoanotlarıyla yapılan BDGP'lerinin Şekil 4.13'de gösterilmiştir. R_{CT} direnci hızlı elektron transferi anlamına geldiği gibi elektron transferleri ile rekombinasyon arasındaki etkileşme fotoanotların güneş pili performanslarında etkileyiciliği belirleyen önemli bir faktördür (Çırak vd., 2019). Şekil 4.14'deki Nyquist grafikleri incelendiğinde daire yarı çaplarının arttığı görülmektedir ve bunu sebebi ise R_{CT} direncinin artmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.14. BDGP'lerin Nyquist garfikleri

5. SONUÇLAR

Özetle, %0,5, %1, %2, %4 Al katkıli TiO₂/ZnO nanokompozit yapılar başarıyla sentezlenerek boya duyarlı güneş pillerinde fotoanot olarak kullanılmıştır. TND'lar, anodik oksidasyon yöntemiyle 30 V 3 saat şartlar altında sentezlendi ve TND yüzeyine hidrotermal yöntem kullanılarak, Al katkıli ZnO nanoçubuklar altlık olarak kullanılan TiO₂ nanotüpler üzerine dekore edilerek farklı oranlarda Al katkıli TiO₂/ZnO nanokompozit yapılar sentezlendi. Anataz TiO₂ substratları, oluşan altıgen wurtzite Al katkıli ZnO ve Al katkıli ZnO prekürsör konsantrasyonlarının etkisi AFM, XRD, SEM ve XPS teknikleri kullanılarak doğrulanmıştır. TZA fotoanotlarının BDGP performans etkileri J-V ve EIS ölçüm teknikleri kullanılarak incelenmiştir. TZA2 için yüksek akım yoğunluğu 7,04 mA/cm², açık devre gerilimi 0,68 V ve %2,27 verim değerleri elde edilmiştir. Sonuçlar, farklı oranlarda Al katkıli TZA fotoanot yapıların sinerjik etkileşimleri, yasak enerji bant aralığının azaltılması ve rekombinasyon oranlarının baskılanması sayesinde, Al katkıli TiO₂/ZnO fotoanotların BDGP'lerinin fotovoltaj performanslarının katkısız TiO₂/ZnO fotoanotların performanslarına kıyasla yaklaşık 1,5 katı daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

Al-Alwani, M.A., Mohamad, A.B., Ludin, N.A., Kadhum, A.A.H. and Sopian, K. (2016) “Dye-sensitized solar cells: development, structure, operation principles, electron kinetics, characterisation, synthesis materials and natural photosensitisers”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 183–213.

Bilici, M.S. (2019) “Metal katkıli TiO₂ öncülleri kullanılarak boya duyarlaştırılmış güneş hücresi üretimi ve analizi”, Yüksek Lisans Tezi, *Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Isparta, 1-63.

Burschka, J., Pellet, N., Moon, S.J., Humphry-Baker, R., Gao, P., Nazeeruddin, M.K. and Grätzel, M. (2013) “Sequential deposition as a route to high-performance perovskite-sensitized solar cells”, *Nature*, 499(7458), 316–319.

Chiba, Y., Islam, A., Watanabe, Y., Komiya, R., Koide, N. and Han, L. (2006) “Dye-sensitized solar cells with conversion efficiency of 11.1%”, *Japanese Journal of Applied Physics*, 45(7),638.

Çırak, B.B., Demir, Z., Eden, Ç., Erdoğan, Y., Çağlar, B., Morkoç Karadeniz, S., Kılınç, T., Ekinci, A.E. and Çırak, Ç. (2019) “Synthesis of TiO₂ Nanotube /ZnO Nanorod Hybrid Nanocomposite Photoanodes For Dye- Sensitized Solar Cells”, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, DOI: 10.1007/s/0854-019-00935-8.

Eden, Ç. (2019) “Farklı Sıcaklıklarda Sentezlenen TiO₂/ZnO Nanokompozit Yapıların Karakterizasyonu ve Boya Duyarlı Güneş Pili Performanslarının İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzincan, 1-67.

Gratzel, M. (2005) “Solar Energy Conversion by Dye-Sensitized Photovoltaic Cells”, *Inorganic Chemistry*, 44(20), 6841–6851

Guo, X., Don, H., Niu, G., Qiu, Y. and Wang, L. (2014) “Mg doping in nanosheet-based spherical structured ZnO photoanode for quasi-solid dye-sensitized solar cells”, *RSC Advances*, 4(41), 21294–21300.

Guillén, E., Azaceta, E., Peter, L.M., Zukal, A., Tena-Zaera, R. and Anta, J.A. (2011) “ZnO solar cells with an indoline sensitizer: a comparison between nanoparticulate films and electrodeposited nanowire arrays”, *Energy & Environmental Science*, 4(9), 3400–3407.

Guo, X., Don, H., Niu, G., Qiu, Y. and Wang, L. (2014) “Mg doping in nanosheet-based spherical structured ZnO photoanode for quasi-solid dye-sensitized solar cells”, *RSC Advances*, 4(41), 21294–21300.

Güller, Ö. (2018) “TiO₂ Nanoçubukların Hidrotermal Yöntemiyle Sentezi ve Opto-Elektronik Aygıt Uygulamaları”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 4-6.

Hagfeldt, A., Boschloo, G., Sun, L., Kloo, L. and Pettersson, H. (2010) “Dye-sensitized solar cells”, *Chemical Reviews*, 110(10), 6595–6663.

Hagfeldt, A., Boschloo, G., Sun, L., Kloo, L. and Pettersson, H. (2010) “Dye-sensitized Solar Cells”, *Chemical reviews*, 110(11), 6595-6663.

Jose, R., Thavasi, V. and Ramakrishna, S. (2009), “Metal oxides for dye-sensitized solar cells”, *Journal of the American Ceramic Society*, 92(2), 289–301.

Lewis, N.S. and Crabtree, G. (2005) “Basic research needs for solar energy utilization: report of the basic energy sciences workshop on solar energy utilization”, *US Department of Energy*, Washington DC,

Mathew, S, Yella, A., Gao, P., Humphry-Baker, R., Curchod, B.F.E., Ashari-Astani, N., Tavernelli, I., Rothlisberger, U., Nazeeruddin, M.K. and Gratzel, M. (2014) “Dyesensitized solar cells with 13% efficiency achieved through the molecular engineering of porphyrin sensitizers”, *Nature Chemistry*, 6, 242–247.

Nazeeruddin, M.K., Kay, A., Rodicio, I., Humphry-Baker, R., Müller, E., Liska, P., Vlachopoulos, N. and Gratzel, M. (1993) “Conversion of Light to Electricity by Cis-X₂Bis(2,2'-bipyridyl-4,4'-dicarboxylate) Ruthenium (II) Charge-Transfer Sensitizers (X = Cl⁻, Br⁻, I⁻, CN⁻ and SCN⁻) on Nanocrystalline TiO₂ Electrodes”, *American Chemical Society*, 115, 6382-6390.

Nazeeruddin, M.K., Pe'chy, P., Renouard, T., Zakeeruddin, S.M., Baker, R.H., Comte, P., Liska, P., Cevey, L. and Costa, E. (2001) “Engineering of efficient panchromatic sensitizers for nanocrystalline TiO₂-based solar cells”, *Journal of the American Chemical Society*, 123(8),1613–1624.

Nelson, V. and Starcher, K. (2016) “Introduction to Renewable Energy”, *CRC Press*, Florida, 423.

Özbey, F. (2018) “Hidrotermal Metot ile TiO₂ Esaslı Kompozit Malzemelerin Üretilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Firat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 8-9.

Öztürk, H.H. (2012) “Güneş Enerjisi ve Uygulamaları”, *Birsen Yayınevi*, İstanbul, 354.

Özünel, E. (2016) “Germanyum Micro ve Nano Yapıların Darbeli Lazer İçeren Elektrokimyasal Anodizasyon Yöntemi İle Üretilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karaman, 4-27.

Raj, C.J., Prabakar, K., Karthick, S.N., Hemalatha, K.V., Son, M.K. and Kim, H.J. (2013) “Banyan root structured Mg doped ZnO photoanode dye-sensitized solar cells”, *The Journal of Physical Chemistry*, 117(6), 2600–2607.

Raj, C.C. and Prasanth, R. A. (2016) “Critical review of recent developments in nanomaterials for photoelectrodes in dye sensitized solar cells”, *Journal of Power Sources*, 317,120–132.

Ranabhat, K., Patrikeev, L., Antal'evna-Revina, A., Andrianov, K., Lapshinsky, V. and Sofronova, E. (2016) “An Introduction to Solar Cell Technology”, *Journal of Applied Engineering Science*, 14(4), 481-491.

Sedefoğlu, N. (2016) “Metal katkılı yarı iletken çinko oksit (ZnO) malzemelerinin üretimi ve karakterizasyonu”, Doktora Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana, 1-2.

Tekkale, G. (2018) “Türkiyenin Çeşitli İllerinde Yapılacak Arazi Tipi Lisanssız Güneş Enerji Santrali Yatırımlarının Teknik ve Finansal Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü*, İstanbul, 1-5.

Tributsch, H. (1972) “Reaction of excited chlorophyll molecules at electrodes and in photosynthesis”, *Photochemistry and Photobiology*, 16(4), 261-269.

Wang, H., Bhattacharjee, R., Hung, I.M., Li, L.,and Zeng, R. (2013) “Material characteristics and electrochemical performance of Sn-doped ZnO spherical-particle photoanode for dye-sensitized solar cells”, *Electrochimica Acta*, 111, 797–801.

Yeh, M.H., Lin, L.Y., Chou, C.Y., Lee, C.P., Chuang, H.M., Vittal, R. and Ho, K.C.(2013) “Preparing core–shell structure of ZnO@TiO₂ nanowires through a simple dipping–rinse–hydrolyzation process as the photoanode for dye-sensitized solar cells” *Nano Energy*, 2(5), 609–621.

Yella, A., Lee, H.W., Tsao, H.N., Yi, C., Chandiran, A.K., Nazeeruddin M.K., Diau, E.W.G., Yeh, C.Y., Zakeeruddin, S.M. and Gratzel M. (2011) “Porphyrin-Sensitized Solar Cells With Cobalt (II/III)-Based Redox Electrolyte Exceed 12 Percent Efficiency”, *Science*, 334, 629-634.

Yeoh, M. and Chan, K. (2017) “Recent advances in photo-anode for dye-sensitized solar cells: a review”, *International Journal of Energy Research*, 41, 2446-2467.

Yıldız, Z.K. (2018) “TiO₂ Based Dye Sensitized Solar Cells Obtained by Sol-gel Method”, Yüksek Lisans Tezi, *Ankara Yıldırım Beyazıt University Department of Energy Systems Engineering*, Ankara, 1-3.

Zafer, C. (2006) “Organik Boya Esaslı Nanokristal Yapılı İnce Film Güneş Pili Üretimi”, Doktora Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir,132.

Zhu. S., Tian, X., Shan, L., Ding, Z., Kan, Z., Xu, X., Zhou, Z. and Wang, L. (2013) “Effect of Al³⁺ on the growth of ZnO nanograss film and its application in dye-sensitized solar cells”, *Ceramics International*, 39(8), 9637–9644.

EKLER

Ek-1. Tez Çalışması Süresince Yapılan Akademik Çalışmalar

Bozkurt Çırak, B., Demir, Z., Eden, Ç., **Erdoğan, Y.**, Çağlar, B., Karadeniz Morkoç, S., Kılınç, T., Ekinci, A.E. and Çırak, Ç. (2019) “Synthesis of TiO₂ Nanotube/ZnO Nanorod Hybrid Nanocomposite Photoanodes For Dye-Sensitized Solar Cells”, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, DOI: 10.1007/s10854-019-00935-8.

Bozkurt Çırak, B., Çağlar, B., Kılınç, T., Karadeniz Morkoç, S., **Erdoğan, Y.**, Kılıç, T., Kahveci, E., Ekinci, A.E. and Çırak, Ç. (2019) “Synthesis and characterization of ZnO nanorice decorated TiO₂ Nanotubes for enhanced photocatalytic activity”, *Material Research Bulletin*, 109, 160-167.

Özdokur, K.V., Bozkurt Çırak, B., Çağlar, B., Çırak, Ç., Karadeniz Morkoç, S., Kılınç, T., **Erdoğan, Y.**, Ekinci, A.E. (2018) “Fabrication of TiO₂ decorated TiO₂/ZnO/Pt nanocomposite electrode with enhanced electrocatalytic activity for methanol oxidation”, *Vacuum*, 155, 242-248.

Eden, Ç., Demir, Z., Bozkurt Çırak B., Morkoç Karadeniz S., Kılınç, T., **Erdoğan, Y.**, Gökçe, C., Özdokur, V.K., Ekinci, A.E. and Çırak, Ç. (2018) “Effect of Anodization Time on Electrophotocatalytic Performance of TiO₂ Nanotubes”, *International Conference on Innovative Engineering Applications*, 18.

Demir, Z., Eden, Ç., Bozkurt Çırak B., Morkoç Karadeniz S., Kılınç, T., **Erdoğan, Y.**, Gökçe, C., Özdokur, V.K., Ekinci, A.E. and Çırak, Ç. (2018) “Effect of Anodization Voltage on Electrophotocatalytic Performance of TiO₂ Nanotubes”, *International Conference on Innovative Engineering Applications*, 19.

Bozkurt Çırak, B., Demir, Z., Eden, Ç., **Erdoğan, Y.**, Çağlar, B., Karadeniz Morkoç, S., Kılınç, T., Ekinci, A.E. and Çırak, Ç. (2019) “Synthesis of TiO₂ Nanotube/ZnO Nanorod Hybrid Nanocomposite Photoanodes For Dye-Sensitized Solar Cells”, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, DOI: 10.1007/s10854-019-00935-8.

ÖZGEÇMİŞ

Yaşar ERDOĞAN 06 Mart 1986 yılında Gaziantep’te doğdu. İlk ve orta öğrenimini Kırıkkale’de, lise öğrenimini Denizli Sarayköy ilçesinde tamamladı. 2007 yılında Akdeniz Üniversitesi Otomotiv Bölümünden, 2014 yılında ise Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Fizik Bölümünden mezun oldu. 2014 yılında Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi’nde tezli yüksek lisans eğitimine başladı.

