

**T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**KOMPOZİT YARI İLETKEN FOTOANOTLARIN BOYA
DUYARLI HİBRİT GÜNEŞ PİLİ PERFORMANSINA ETKİSİ**

Abdullah DEMİR

Yüksek Lisans Tezi

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Yenilenebilir Enerji Sistemleri Bilim Dalı

HAZİRAN, 2022

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

**KOMPOZİT YARI İLETKEN FOTOANOTLARIN BOYA DUYARLI
HİBRİT GÜNEŞ PİLİ PERFORMANSINA ETKİSİ**

Tez Yazarı
Abdullah DEMİR

Danışman
Prof. Dr. Hikmet ESEN

İkinci Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Fehmi ASLAN

HAZİRAN, 2022
ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Başlığı:	Kompozit Yarı İletken Fotoanotların Boya Duyarlı Hibrit Güneş Pili Performansına Etkisi
Yazarı:	Abdullah DEMİR
İlk Teslim Tarihi:	23.05.2022
Savunma Tarihi:	27.06.2022

TEZ ONAYI

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

Danışman:	Prof. Dr. Hikmet ESEN Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi	<i>İmza</i> Onayladım
Başkan:	Prof. Dr. Resul ÇÖTELİ Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi	Onayladım
Üye:	Dr. Öğr. Üyesi Abdullah KAPICIOĞLU Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi	Onayladım

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun/...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

İmza

Prof. Dr. Kürşat Esat ALYAMAÇ
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “Kompozit Yarı İletken Fotoanotların Boya Duyarlı Hibrit Güneş Pili Performansına Etkisi” yüksek lisans tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

27.06.2022

Abdullah DEMİR



ÖNSÖZ

Güneşten aldığı ışığı doğrudan elektrik enerjisine dönüştürme prensibi ile çalışan güneş pilleri ülkemizde olduğu gibi dünya genelinde de önemli bir yere sahiptir. Güneş enerjisinin önemini göz önüne alarak yaptığımız çalışmada TiO_2 ve ZnO kullanılarak hibrit güneş pili üretilmiştir. Literatüre kazandırılan Saf TiO_2 , ağırlıkça 3:1 TiO_2/ZnO , 1:1 TiO_2/ZnO , 1:3 TiO_2/ZnO ve saf ZnO elektriksel karakterizasyonları detaylıca incelenmiş ve elde edilen sonuçlar grafikler ile desteklenip, yorumlanmıştır.

Bu çalışmanın seçilmesi ve yapılması konusunda fikirleriyle beni yönlendiren, bana rehberlik eden, yoğun çalışma saatleri arasında bana zaman ayıran kıymetli hocam Prof. Dr. Hikmet ESEN'e çalışmanın yürütülmesinde, laboratuvar kültürünü her anlamda öğrenmemde yardımcı olan ikinci danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Fehmi ASLAN'a teşekkürü bir borç bilirim. Bu tez çalışması, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyonu Birimi (FÜBAP) tarafından FUBAP-TEKF.20.24 protokol numaralı proje ile desteklenmiştir.

Abdullah DEMİR

ELAZIĞ, 2022

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	xi
SİMGELER	xii
KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ	1
2. GÜNEŞ ENERJİSİNİN DÜNYADAKİ VE TÜRKİYE’DEKİ YERİ	3
3. GÜNEŞ PİLLERİNİN TARİHSEL GELİŞİMİ.....	5
4. GÜNEŞ PİLİ TEKNOLOJİSİ	7
4.1. Fotovoltaik Etki	7
4.2. P-N Eklem Güneş Pili Yapısı.....	8
5. GÜNEŞ PİLLERİ VE ÇEŞİTLERİ.....	12
5.1. Birinci Nesil Güneş Pilleri	12
5.2. İkinci Nesil Güneş Pilleri	13
5.3. Üçüncü Nesil Güneş Pilleri	14
5.4. Organik Güneş Pilleri.....	14
5.5. Boya Duyarlı Güneş Pillerinin Yapısı.....	15
5.5.1. Foto Anot (Çalışma Elektrotu)	15
5.5.2. Duyarlaştırıcı (Boya)	16
5.5.3. Elektrolit	17
5.5.4. Foto Katot (Karşıt Elektrot).....	18
5.5.5. İletken Camlar	18
5.6. Boya Duyarlı Güneş Pillerinin (BDGP) Çalışma Prensibi	18
5.7. Güneş Pili Parametreleri	20
5.7.1. Güneş Pillerinde Seri Direnç (R_s).....	21
5.7.2. Güneş Pillerinde Şönt Direnci (R_{sh})	21
5.7.3. Güneş Pillerinde Kısa Devre Akımı (I_{sc})	22
5.7.4. Güneş Pillerinde Açık Devre Gerilimi (V_{oc})	22
5.7.5. Güneş Pillerinde Dolum Faktörü (FF).....	23

5.7.6. Güneş Pillerinde Verim (η)	23
6. MATERYAL VE METOT	24
6.1. TiO_2 Yarı İletken Metal Oksit Tozunun Hazırlanması.....	24
6.2. ZnO Yarı İletken Metal Oksit Tozunun Hazırlanması	27
6.3. Pastaların (Foto Anotların) Hazırlanması	28
6.3.1. Saf TiO_2 Pastanın Hazırlanması	28
6.3.2. Saf ZnO Pastanın Hazırlanması.....	29
6.3.3. TiO_2/ZnO 1:1 Oranındaki Pastanın Hazırlanması	29
6.3.4. TiO_2/ZnO 3:1 Oranındaki Pastanın Hazırlanması	29
6.3.5. TiO_2/ZnO 1:3 Oranındaki Pastanın Hazırlanması.....	30
6.4. Boya Duyarlı Hibrit Güneş Pilinin Yapımı	30
7. BULGULAR	34
7.1. Taramalı Elektron Mikroskopi (SEM) Görüntüleri	34
7.2. XRD Sonuçları	38
7.3. EDX Sonuçları	40
7.4. Elektriksel Karakterizasyon Sonuçları	44
8. SONUÇLAR	47
KAYNAKLAR	49
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

Kompozit Yarı İletken Fotoanotların Boya Duyarlı Hibrit Güneş Pili Performansına Etkisi

Abdullah DEMİR

Yüksek Lisans Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı
Haziran 2022, Sayfa xii+51

Bu tez çalışmasında, hidrotermal yöntemi ile üretilen TiO_2 ve ZnO tozlarının boya duyarlı güneş pillerinin (BDGP) performansını nasıl etkilediği araştırılmıştır. Üretilen tozlardan, saf TiO_2 , ağırlıkça 3:1 TiO_2/ZnO , 1:1 TiO_2/ZnO , 1:3 TiO_2/ZnO ve saf ZnO olmak üzere 5 farklı boya duyarlı hibrit güneş pili üretilmiştir. İletken cam olarak florin katkılı kalay oksit (FTO), karşıt elektrot olarak platin (Pt) ve boya olarak rutenyum (Ru) tercih edilmiştir. FTO üzerine farklı oranlardaki $\text{ZnO}:\text{TiO}_2$ fotoanotları serigrafi yöntemi ile kaplanmıştır. Üretilen fotoanotların morfolojik ve minerolojik analizleri SEM, XRD ve EDX ile belirlenmiştir. XRD analizleri ise hedeflenen kristal fazlarının yapıda oluştuğunu doğrulamıştır. TiO_2 ve ZnO taneciklerinin morfolojisi incelendiğinde taneciklerin sıkıca paketlenmiş ve TiO_2 miktarı arttıkça daha pürüzsüz bir yapı oluştuğu SEM görüntüleri ile gözlemlenmiştir. Üretilen boya duyarlı güneş pillerinin fotovoltaiik parametreleri solar simülatör cihazı ile analiz edilmiştir. $\text{TiO}_2:\text{ZnO}$ oranı değiştikçe pil verimlerinin (% 0,0013-2,3613 aralığında) değiştiği saptanmıştır. En yüksek verimi (η) saf TiO_2 fotoanoduna sahip boya duyarlı güneş pilinin sergilediği gözlemlenmiş ve TiO_2 oranı arttıkça pil verimlerinde bariz bir artış olduğu tespit edilmiştir. Oransal olarak TiO_2 miktarı arttıkça verimin yükselmesi TiO_2 'nin daha kararlı bir yapıya sahip olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: BDGP, Hibrit Yapı, Verimlilik, Hidrotermal

ABSTRACT

Effect of Composite Semi-Conductor Photoanodes on Dye-Sensitive Hybrid Solar Cell Performance

Abdullah DEMİR

Master's Thesis

FIRAT UNIVERSITY
Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Energy Systems Engineering
June 2022, Page xiii+51

In this thesis, it was investigated how TiO_2 and ZnO powders produced by hydrothermal method affect the performance of dye-sensitized solar cells. From the produced powders, 5 different dye-sensitive hybrid solar cells by weight were produced as Pure TiO_2 , 3:1 TiO_2/ZnO , 1:1 TiO_2/ZnO , 1:3 TiO_2/ZnO and pure ZnO . Fluorine-doped tin oxide (FTO) was preferred as the conductive glass, platinum (Pt) as the counter electrode, and ruthenium (Ru) as the dye. $\text{ZnO}:\text{TiO}_2$ photoanodes in different ratios were coated on the FTO by screen printing method. Morphological and mineralogical analyzes of the produced photoanodes were determined by SEM, XRD and EDX. XRD analyzes confirmed that the targeted crystal phases were formed in the structure. When the morphology of TiO_2 and ZnO particles was examined, it was observed with SEM images that the particles were tightly packed and a smoother structure was formed as the amount of TiO_2 increased. The photovoltaic parameters of the produced dye-sensitized solar cells were analyzed with a solar simulator device. It was determined that as the $\text{TiO}_2:\text{ZnO}$ ratio changes, the solar cell efficiencies (in the range of 0.0013-2.3613) change. It was observed that the dye-sensitized solar cell with pure TiO_2 photoanode exhibited the highest efficiency (η), and it was determined that there was a clear increase in cell efficiency as the TiO_2 ratio increased. The increase in efficiency as the amount of TiO_2 increases proportionally showed that TiO_2 has a more stable structure.

Keywords: BDGP, Hybrid Structure, Efficiency, Hydrothermal

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1.	Dünya güneş enerji haritası (W/m^2).....	3
Şekil 4.1.	Fotovoltaik etki ile çalışan hücre modeli	8
Şekil 4.2.	İletken, yarı iletken ve yalıtkan malzemelerin enerji bant diyagramı.	9
Şekil 4.3.	P-N yapılı diyotun şematik gösterimi.	9
Şekil 4.4.	Tükenim bölgesinin N tarafı şematik gösterimi.	10
Şekil 4.5.	Tükenim bölgesinin P tarafı şematik gösterimi.....	10
Şekil 4.6.	P-N tipi yarı iletken malzemenin ışık altında elektron-boşluk çifti oluşturması.....	11
Şekil 5.1.	Pozitif ve negatif polarmalı silisyum atom modeli	13
Şekil 5.2.	Amorf silisyum güneş pili.....	13
Şekil 5.3.	Organik fotovoltaik hücre.	15
Şekil 5.4.	Rutenyum temelli boyaların kimyasal yapıları	16
Şekil 5.5.	Boya duyarlı güneş pili katmanları	19
Şekil 5.6.	Boya duyarlı güneş pili çalışma prensibinin şematik görüntüsü	19
Şekil 5.7.	İdeal bir güneş piline ait eşdeğer devre.....	20
Şekil 5.8.	Güneş pilinin akım ve gerilim karakteristiği.....	21
Şekil 5.9.	Seri ve şönt dirence sahip bir güneş pilinde akım-gerilim eğrisi	22
Şekil 6.1.	Manyetik karıştırıcı.....	24
Şekil 6.2.	Ultrasonik karıştırıcı.	24
Şekil 6.3.	Hidrotermal malzeme üretim cihazı.....	25
Şekil 6.4.	Santrifüj cihazı.....	25
Şekil 6.5.	Santrifüj cihazından çıktıktan sonra çökertilmiş tozun görüntüsü.	26
Şekil 6.6.	Çöken tozların tekrar dağıtılmasında kullanılan vortex cihazı.....	26
Şekil 6.7.	TiO_2 ve ZnO tozları kurutmak için kullanılan vakumlu etüv cihazı.	27
Şekil 6.8.	PH Metre.....	27
Şekil 6.9.	Döner buharlaştırıcı.	28
Şekil 6.10.	Serigrafi baskı ile pasta çekme işlemi.	30
Şekil 6.11.	Çekilen pastanın görüntüsü.....	31
Şekil 6.12.	Kül fırını.	31
Şekil 6.13.	Rutenyum boyaya daldırılmış foto-anot katmanı.....	32
Şekil 6.14.	Fön makinası ile yapılan kurutma işlemi.	32
Şekil 6.15.	Foto-anot tabakaya elektrolit damlatılıp karşıt elektrot ile kapatılması.	33
Şekil 6.16.	FYTRONIX LSS 9000 I-V CHARACTERIZATION SYSTEM solar simülatör cihazı.....	33
Şekil 7.1.	Saf TiO_2 SEM görüntüleri.....	34
Şekil 7.2.	TiO_2/ZnO 3:1 SEM görüntüleri.	35
Şekil 7.3.	TiO_2/ZnO 1:1 SEM görüntüleri.	36

Şekil 7.4.	TiO ₂ /ZnO 1:3 SEM görüntüleri.	37
Şekil 7.5.	Saf ZnO SEM görüntüleri.	38
Şekil 7.6.	TiO ₂ için XRD grafiği.	39
Şekil 7.7.	ZnO için XRD grafiği.	39
Şekil 7.8.	Saf TiO ₂ için EDX grafiği.	40
Şekil 7.9.	TiO ₂ /ZnO 3:1 için EDX grafiği.	41
Şekil 7.10.	TiO ₂ /ZnO 1:1 için EDX grafiği.	42
Şekil 7.11.	TiO ₂ /ZnO 1:3 için EDX grafiği.	43
Şekil 7.12.	Saf ZnO için EDX grafiği.	44
Şekil 7.13.	Üretilen pillerin J _{sc} -V grafiği.	45



TABLÖLER LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Dünya'daki güneş enerji potansiyeli en yüksek bölgeler.....	4
Tablo 7.1. Saf TiO ₂ yarı iletken malzemenin ve iletken camın EDX sonuçları.	41
Tablo 7.2. TiO ₂ /ZnO 3:1 yarı iletken malzemenin ve iletken camın EDX sonuçları.	41
Tablo 7.3. TiO ₂ /ZnO 1:1 yarı iletken malzemenin ve iletken camın EDX sonuçları.	42
Tablo 7.4. TiO ₂ /ZnO 1:3 yarı iletken malzemenin ve iletken camın EDX sonuçları.	43
Tablo 7.5. Saf ZnO yarı iletken malzemenin ve iletken camın EDX sonuçları.	44
Tablo 7.6. Solar simülatör cihazı ile yapılan ölçümlerde elde edilen veriler.	45

SİMGELER

NH_3	: Amonyak
Cd	: Kadmiyum
Se	: Selenyum
ZnO	: Çinko oksit
TiO_2	: Titanyum dioksit
N	: Negatif
P	: Pozitif
As	: Arsenik
P	: Fosfor
Bi	: Bizmut
Al	: Alüminyum
B	: Bor
Ga	: Galyum
CdTe	: Kadmiyum Tellürid
CdS	: Kadmiyum Sülfid
a-Si	: Amorf Silisyum
CIGS	: Bakır İndiyum Galyum Selenür
CO_2	: Karbon Dioksit
H_2O	: Su
PSS	: Poli Sitirene Sülfanat
PEDOT	: 3,4-ethilendioksitiyofen
SnO_2	: Kalay Dioksit
Nb_2O_5	: Niobyum Pentoksit
R_s	: Seri Direnç
R_{sh}	: Şönt Direnç
I_{sc}	: Kısa Devre Akımı
V_{oc}	: Açık Devre Gerilimi
η	: Verim
I	: Akım
V	: Gerilim
FF	: Dolum Faktörü

KISALTMALAR

ITO	: Indiyum Kalay Oksit
FTO	: Flor Katkılı Kalay Oksit
TWh	: Tera watt saat
GW	: Giga watt
MW	: Mega Watt
Gr	: Gram
ml	: Mili litre
MÖ	: Milattan önce
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
XRD	: X ışını kırınımı difraksiyonu
EDX	: Enerji Dağılımı X-ışını Spektroskopi



1. GİRİŞ

Günümüzde çok hızlı bir şekilde ivme kazanan teknolojik gelişmeler ile günlük hayatımız daha da kolaylaşmaktadır. İnsanoğlunun hayatımıza kattığı yeni buluşlar yaşam kalitemizi arttırmada büyük rol oynamaktadır. Rahatlığımız açısından kolaylık sağlayan her yapı bir enerji kaynağından beslenmektedir [1]. İhtiyacımız olan bu enerjiyi karşılamak için de günümüzde tükenebilir, yenilenebilir ve nükleer enerji kaynaklarından yararlanılır. Tükenebilir enerji kaynaklarımız zamanla yok olacağı ve doğaya verdiği zararlar göz önüne alındığında, yenilenebilir enerjinin kıymeti daha da artmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarını incelediğimiz zaman çevreye verdikleri zararın en az olduğu, güneş ve rüzgâr enerjisinin günümüzde çok daha popüler olduklarını açıkça görülmektedir [2].

Önemli bir yere sahip olan güneş enerjisi ile elde ettiğimiz elektrik enerjisi yenilenebilir, doğa dostu ve dünya var olduğu sürece varlığını sürdürecektir olan bir enerji kaynağıdır olduğu için kullanım alanları çok geniştir. Bu nedenle güneş enerjisi insanlığın en büyük problemlerinden biri olan enerji sorununu çözmekte büyük rol oynayacağı düşünülmektedir. Güneş enerjisini önemli kılan diğer bir faktör ise yenilenebilir enerji kaynağı olması, herhangi bir tehlike arz etmemesi, doğa dostu olması gibi nedenlerle daha çok önem kazanmaktadır. Güneş enerjisi dünya genelinin faydalanabileceği bir enerji kaynağı olduğundan ülkelerin birbirlerine olan enerji bağımlılıklarını da azaltma potansiyeline sahiptir. Bilindiği üzere yeryüzünde varlığını sürdüren bütün enerji kaynaklarının temeli güneşten gelmektedir. Elektrik ve ısıtma için kullandığımız güneş enerjisi dünyamızın yıllık enerji gereksiniminin ortalama 15.000 katına tekabül etmektedir [3].

Güneş pilleri güneşten aldığı ışığı elektrik enerjisine dönüştürme prensibi ile çalışırlar. Hücrelerine gelen ışık elektronların tetiklenmesini sağlar ve elektronların hareketi sonucunda bir elektrik akımı oluşur. Yarıiletken malzemelerden yapılmış olan diyotların çalışma mantığına benzerlik gösteren güneş pillerinin verimi, hücre alanı, hücrenin kalitesi, hücre üzerine düşen ışığın açısı, atmosferdeki nem yüzdesi, kurulumun yapıldığı coğrafi konuma bağlı olarak değişkenlik gösterir.

Geçmişten günümüze yapılan çalışmalarda güneş pili verimlerinin arttığı görülmektedir. Yaşadığımız zaman diliminde ise bu çalışmaları organik ve inorganik olarak iki ana başlık altında toplayabiliriz. Malzeme türüne göre silisyum bazlı yapılmış olanlar inorganik, karbon bazlı polimerlerden oluşan güneş hücreleri ise organik yapıları olurlar. Üretim maliyeti açısından organik güneş pilleri inorganik güneş pillerine göre daha ekonomiktir. İnorganik esaslı güneş pillerinin toksit etkisi ve yüksek maliyetleri göz önüne alındığında, bilim insanları daha ekonomik ve çevre dostu olan organik güneş pilleri üzerine yoğunlaşmıştır. Fakat her ne kadar organik güneş pillerinin avantajları fazla dahi olsa hava ile temasında oksitlenme oranının yüksek olması ve gelen ışığın

elektrik enerjisine dönüştürülme verimi yaklaşık olarak % 10 olduğu için silikon malzemeden yapılmış olan inorganik malzemeler piyasadaki yerlerini korumaktadırlar [3].

Organik güneş pillerinde meydana gelen sorunlar ve silikon esaslı güneş pillerinin yüksek maliyetlerinden dolayı boya duyarlı güneş pilleri için yapılan çalışmalarda artış gözlemlenmiştir. Boya duyarlı güneş pilleri (BDGP), diğer güneş pillerinde olduğu gibi ışığın elektrik enerjisine dönüştürülme prensibi ile çalışırlar. İletken bir cam yüzeyine çekilen yarı iletken oksit malzemenin boyaya daldırılması ve akabinde elektrolit döküldükten sonra karşıt elektrot ile kapatılarak oluşturulurlar. BDGP'lerinin ticari anlamda kullanımını arttırmak ve bu teknolojiyi dünya pazarında daha rekabetçi bir ürüne dönüştürmek için yapılan araştırmaların artması gerekmektedir. Ticari üretimin artması için, BDGP'lerden % 15'in üzerinde verim elde edilmesi gerekmektedir [4].

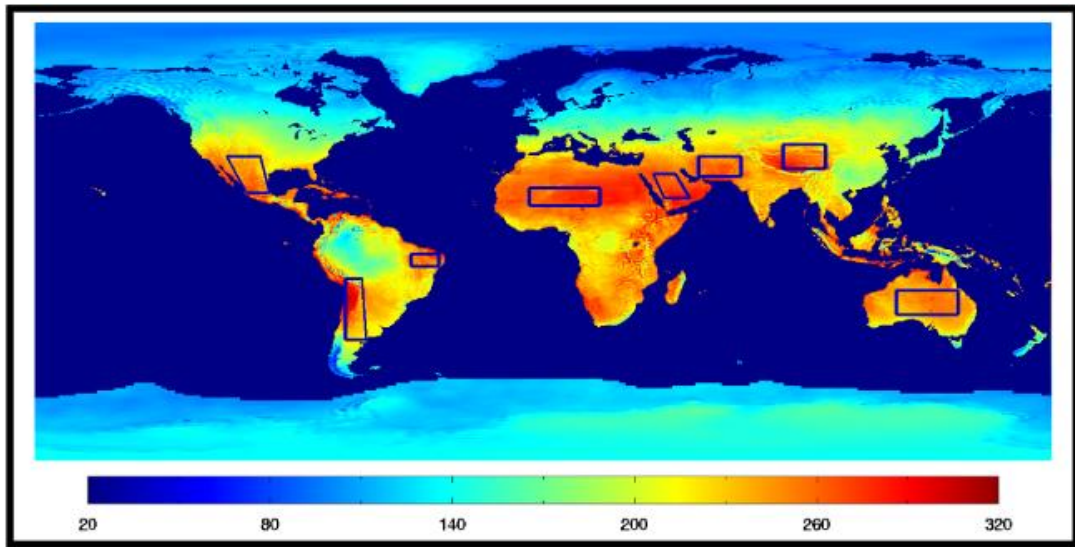
Bu tez çalışmasının amacı, BDGP'lerde kullanılan TiO_2 ve ZnO yarı iletken metal oksitleri ile hibrit yapıda piller üreterek, 3. nesil piller olarak adlandırılan BDGP'lerin yapısal ve elektriksel karakterizasyon sonuçlarını yorumlamaktır. Bu tez çalışması 8 bölümden oluşmaktadır. İlk üç bölümde BDGP'lerin önemi kısa bir literatür bilgisiyle sunularak tezin amacı anlatılmaktadır. Dördüncü bölümde güneş pili teknolojilerinden bahsedilmiş olup, özellikle yarıiletken teknolojisine vurgu yapılmıştır. Beşinci bölümde güneş pili çeşitleri, BDGP'lerin yapıları, BDGP'lerin çalışma prensibi ve güneş pili parametreleri anlatılmıştır. Tezin altıncı bölümünde çalışmada kullanılan malzemeler, araç-gereç ve BDGP'lerin üretim prosesleri sunulmaktadır. Yedinci bölümde üretilen BDGP'lerin ölçümleri, karakterizasyonu ve elde edilen bulgular yer almaktadır. Tezin sekizinci ve son bölümünde ise üretilen pillerin analizlerine dayanarak sonuçlar yer almaktadır.

2. GÜNEŞ ENERJİSİNİN DÜNYADAKİ VE TÜRKİYE’DEKİ YERİ

En önemli enerji kaynaklarımızdan biri olan güneş enerjisinin oluşumu güneşin içerisinde bulunan hidrojenin, helyum gazına dönüşümü ile gerçekleşmektedir. Güneş enerjisinin çok küçük bir kısmı dünyamıza ulaşmaktadır fakat dünyamıza ulaşan bu küçük enerji dahi dünyadaki enerji kullanımından çok daha fazladır. Gelişen teknolojiye güneş enerjisine önemli bir yer ayrılmaktadır. Gün geçtikçe geliştirilen güneş enerjisi sistemlerinin hayatımızdaki birçok alana yayıldığı gözlemlenmektedir [5].

Dünyamızda elektrik üretimi 2004 yılı itibariyle 17,450 TWh iken, bu üretimin 2030 yılında 31,657 TWh olması bekleniyor. İnsanlık olarak bu üretim ihtiyacını karşılamak için yeni elektrik enerjisi santrallerine gereksinim duyulmaktadır [6].

Dünya genelini incelediğimizde yer kabuğunun 45° Güney-Kuzey enlemlerinde bulunan arazilerde güneş enerjisinden faydalanma oranı daha yüksektir. Dünya genelindeki güneş ışınım haritası Şekil 2.1’de görülmektedir. Güneş enerjisindeki yatırımların genel olarak Avrupa ve Amerika’da olmasına rağmen şekli incelediğimizde Afrika, Avustralya ve Güney Amerika’nın güneş ışınım değerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Türkiye’yi incelediğimiz zaman ise ülkemizin güney kısmının da yüksek değerlerde güneş ışınımı aldığı görülmektedir. Dünya güneş enerjisi potansiyeli haritası Şekil 2.1’de ve dünyadaki güneş enerji potansiyeli en yüksek bölgeler Tablo 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Dünya güneş enerji haritası (W/m²) [5].

Tablo 2.1. Dünya'daki güneş enerji potansiyeli en yüksek bölgeler [5].

Bölge	Önerilen alan (km ²)	Yıllık enerji (J)
Sahra	2.000.000	1.71x10 ²²
Arabistan Çölü	500.000	4.19x10 ²²
Qingai	1.400.000	1.17x10 ²²
Avustralya	2.400.000	1.87 x10 ²²
Güney Amerika	1.800.000	1.40 x10 ²²
Brezilya	600.000	4.77 x10 ²¹
USA ve Meksika	1.600.000	1.25 x10 ²²
Güneybatı Asya	1.200.000	1.00 x10 ²²

Güneş enerjisinin küresel anlamda en hızlı büyüyen ve gelişen kaynak olduğunu söyleyebiliriz. 2021'de 302 GW'lık yenilenebilir enerji kapasitesi kurulumu gerçekleştirmiştir. Bunun 168 GW'nı güneş enerjisi sistemleri oluşturmuştur. Tüm dünya güneş enerjisinin iklim değişikliği ile mücadelede başarılı olduğunu ve ülkelerin enerjide bağımsız olmasını sağlaması açısından önemli olduğunu görmektedir. Güneş enerjisi, sıra dışı enerji fiyatlarının yaşandığı günümüzde bize biraz rahatlama sağlayacaktır [7].

Ülkemizin toplam elektrik enerjisi kurulu güç kapasitesi 2021 Aralık ayına göre 85,4 MW artarak 99.734 MW seviyesine geldi. Toplam santral sayısı da 10.549 oldu. Yenilenebilir enerji kurulu gücü de 10.119 santralle bir önceki aya göre 160,3 MW artarak 53787 MW'a yükselirken yenilenebilir santraller toplam kurulu gücün % 53,93'nü oluşturdu. Güneş enerji santrallerinin kurulu gücü de 65,5 MW'lık bir artış ile 7881,1 MW seviyesine yükseldi. Toplam güneş enerjisi santral sayısı da 217 artarak 8482 MW oldu. Güneş enerjisi kurulu gücü toplam kurulu gücün % 7,9'u olurken, rüzgar enerjisi kurulu gücünün toplam kurulu güçteki oranı da % 10,71 oldu [7].

3. GÜNEŞ PİLLERİNİN TARİHSEL GELİŞİMİ

Tarihsel olarak güneş enerjisi ilk olarak MÖ 215 yılında Arşimet tarafından güneş ışığını odaklayarak Syracusa'yi kuşatmaya gelen gemileri yakmak için kullanılmıştır [5].

1839 yıllarında Alecandre Edmond Becquerel olarak adlandırılan Fransız Fizikçi iki metal plaka kullanarak aralarındaki elektrik akım şiddetini inceleyerek ışığın şiddetini ölçen bir alet tasarlayarak fotovoltaiik etkiyi bulmuştur [8].

Katı cisimlerde de fotovoltaiik etkinin görülebileceği, 1876 yıllarında G. W. Adams ve R. E. Day tarafından 'Se' kristallerinde fotovoltaiik tepkilerin belirlenmesiyle kanıtlanmıştır [3].

Yapılan ilk güneş kollektörü, Horace de Saussure (İsviçre) tarafından 1767'de yapılmıştır. Aynı kollektörü Sir John Herschel 1830 yıllarında Güney Afrika seferinde iken yemek pişirmek için kullanmıştır. Bu süreç içerisinde Robert Stirling 1886 yılının Eylül ayında patent başvurusunda bulunmuştur. Daha sonra bu icadı Çanak sistemi ismi ile anılan, güneş ışığını yoğunlaştırılarak elde edilen ısıdan elektrik enerjisi üretmiştir [5,9].

Güneş ışığından elektrik enerjisi üretimi ile ilgili yapılan en geniş çaplı çalışma Albert Einstein tarafından 1904 yılında yapılmış olup, yapılan bu çalışma sayesinde 1921'de Nobel ödülünü almıştır. Albert Einstein tarafından yapılmış olan bu teorik çalışma 1916'da Robert Millikan aracılığı ile pratiğe dökülmüştür. Bu bağlamda 1932'de Cd-Se yapısında fotovoltaiik etki gözlemlenmiştir [9].

1954'te Fuller, Pearson ve Chapin'in ortak çalışmasında silikon ile ilk fotovoltaiik hücre yapılmıştır. Yapılan bu hücrelerde daha önce denenilen fotovoltaiik hücrelere göre 6 kat daha fazla verim elde edilmiş olup dönüm noktası kabul edilen % 6'lık verim elde edilmiştir [3].

1700'lü yıllarda güneş ışığı odaklanarak kimyevi reaksiyonlarda ve güneş fırınlarında kullanılmış, 1800'lü yıllarda ise güneş enerjisi ile çalışan baskı ve buhar makineleri kullanılmıştır. Ayrıca bu dönemde su taşıma işlemlerinde güneş enerjisinden yararlanılmıştır. Fransız mucit olan Charles Tellier güneş enerjisi ile gerçekleştirmiş olduğu deneyleriyle ilk defa odaklanmamış ve aksettirmeyen güneş cihazını tasarlamıştır. Charles Tellier'in hemen ardından güneş enerjisiyle alakalı çalışmalar Avrupa kıtasından Amerika kıtasına doğru geçiş yapmıştır. Güneş enerjisi ticaret anlamında öncelikle Amerika Birleşik Devletleri'nde hayata geçmiştir. Amerika Birleşik Devletleri'nin Massachusetts Eyaletinin başkenti olan Boston'da Dünya'ya gelen Aubrey Eneas güneş enerjisi çalışmalarına 1892 yılında başlayıp, 1900'de ise dünyadaki ilk güneş enerji ortaklığını (The Solar Motor Corporation) gerçekleştirerek deneylerine 1905 yılına kadar devam etmiştir. Güneş hücreleri hususundaki deneyleri de eş zamanlı olarak sürdürülmüştür. Bilhassa Albert Einstein'ın 1905'te yazmış olduğu makaleye 1921 yılında Nobel Fizik Ödülü bahşedilmesinin en büyük sebebi 'Fotoelektrik Etki' üzerine yazdığı makalesidir. Fotovoltaiik hücreler hususundaki deneyler ve patent işlemleri sürerken 1946 yılında Russell Ohl tarafından

yapılan deneylerin hemen akabinde bilim adamları Greal Pearson, Clavin Fuller ve Daryl Chapin 1954 yılında silikon malzemeden yapılmış ilk fotovoltaiik hücreyi icat etmişlerdir. Sahip olunan hücrelerin üretim masrafları 286 \$/W fiyatlarındaydı. Elde ettikleri verim ise % 4,5-6 sularındaydı [5,10].

1985 yılında silikon malzemeden yapılmış fotovoltaiik hücrelerde % 20'nin üzerinde verimler elde edilmeye başlandı. 1980 yıllarından sonraki süreçlerde yapılan çalışmalarda ortaya çıkan çift eklemli GaAs katkılı güneş pilleri, hücre verimliliklerini % 22'ye çıkarırken, 3 eklemli tandem hücrelerin verimlilikleri % 24'lere kadar çıkarılmıştır [3].

1991'de % 10'luk bir verim değerine sahip olan BDGP, İsviçreli bilim insanı Micheal Gratzel ve ekip arkadaşları öncülüğünde yapılmıştır [11].

1999 yılında BDGP için oksit yarı iletkenler arasında TiO_2 diğer yarı iletken malzemelere göre daha yüksek verim verdiği gözlemlenmiştir [12]. Ayrıca TiO_2 tüpler diğer TiO_2 yapılarına kıyasla daha yüksek verim göstermiştir. TiO_2 nano tüpler genel olarak hidrotermal yöntem, sol-jel tekniği ve titanyumun elektrokimyasal anotlanmasından faydalanılarak elde edilmiştir [4].

BDGP'ler için 2003 yılında organik boya kullanımında kumarin veya polen tipi duyarlaştırıcılar kullanılarak % 7,7'ye ulaşan verim gözlemlenmiştir [13].

2007 yılında V_{oc} 'yi ve güneş pillerinin verimliliğini arttırmak adına TiO_2 nano tüpleri ZnO nano parçacıkları ile kaplanmıştır. Kaplanan bu katman bir rekombinasyon bariyeri meydana getirdiğinden güneş pili veriminin artışı gözlemlenmiştir [14].

2012 yılında titanyum folyolara anodizasyon tekniği ile TiO_2 nano partiküllerin boyutları arttırılıp elektrodpozisyon tekniğiyle de ZnO nano partiküller biriktirilmiştir. Oluşturulan ZnO/ TiO_2 kompozit yapıların BDGP'lerdeki foto anot performansı incelenmiştir. Kompozit yapılarda elde edilen BDGP'lerin verim değerleri daha yüksek olmuştur [15].

Marezga ve ekibinin 2016 yılında yaptığı, Serigrafi yöntemiyle üretilen TiO_2 yarı iletken metal oksit üzerine, döndürerek kaplama yöntemiyle MgO nano parçacıkları kaplanmıştır. N3 duyarlaştırıcısı kullanılarak üretilen BDGP'lerin verimlerinde % 50 oranında artış gözlemlenmiştir [14].

2019 yılında serenyum oksit\titanyum dioksit (CeO_2/TiO_2) nano kompozit yapısı sulu bir ortamda kimyasal çökertme tekniği ile sentezlenmiştir ve % 10'nun üzerinde verim elde edilmiştir [16].

4. GÜNEŞ PİLİ TEKNOLOJİSİ

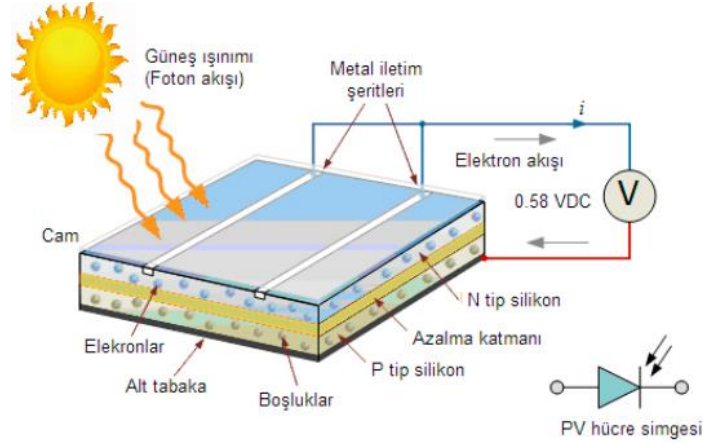
Yüzeyine gelen güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren sistemlere güneş pilleri denir. Güneşten dünyamıza gelen enerji, güneşin çekirdeğinde meydana gelen füzyon ile ortaya çıkan ışıınım enerjisidir [17]. Güneş ışığından elektrik enerjisi üreten sistemler 19. Yüzyılın sonlarına doğru Charles Fritts'in yaptığı çalışmalarda anlatılmıştır. Yapılan her çalışmanın ardından kaydedilen gelişim sayesinde güneş pillerinde önemli ölçüde ilerleme olmuştur [18].

4.1. Fotovoltaik Etki

Photo (foto) Yunanca'da ışık anlamını taşımaktadır. Voltaic (voltaik) kelimesi ise Alessandro Volt'un soyadından gelmiştir ve bu kelimelerin birleşimi ile Fotovoltaik kavramı ortaya çıkmıştır. Güneş pilleri diğer bir deyişle fotovoltaik piller, Güneş'ten gelen ışığı direkt olarak elektriğe çeviren sistemlerdir [17].

1800'lü yılların ortalarında yaşamış olan Edmund Becquerel, elektrolitin içerisinde bulunan platinin elektrotun yüzeyine gümüş kaplanmasıyla bir akım meydana geldiğini belirlemiştir [19]. Edmund Becquerel tarafından bulunmuş bu olaydan sonra güneş pili teknolojisi yoğun ilgi görmüştür. 19. yüzyılın sonlarına doğru yapılan çalışmalarda selenyum tabakalardan faydalanılarak yapılan güneş hücreleri ilk olarak Amerika'lı bir bilim insanı aracılığıyla denenmiştir [20]. Selenyum maddesinden yararlanılarak oluşturulan güneş pilleri, ışığa maruz kaldığında hızlı bir şekilde yapısı bozulduğundan verimleri genellikle % 1 civarlarında kalmıştır. O yıllarda gerçekleştirilen bu çalışmalar günümüzdeki güneş pili çalışmalarına öncü olmuşlardır [19].

20. yüzyılın başlarında ise Albert Einstein ışığın sadece dalga formlarında olmadığı tanecik veya parçacık şeklinde de hareket ettiğinden bahsetmiş ve fotovoltaik etkinin nasıl meydana geldiğini anlatan bir makale yayınlamıştır. Işığın karakteristiğini oluşturan foton adı verdiğimiz parçacıklar enerji yaymaktadır. Fotovoltaik hücreye gönderilen fotonların bir bölümü hücre içerisine girerken diğer bir bölümü ise geri yansıtılır. Hücre içerisine giren ışık huzmeleri, yarı iletken malzemede bulunan elektronları harekete geçirerek elektrik üretimini gerçekleştirir. Bahsi geçen çalışma prensibi Şekil 4.1'deki görsel ile desteklenmektedir [21].

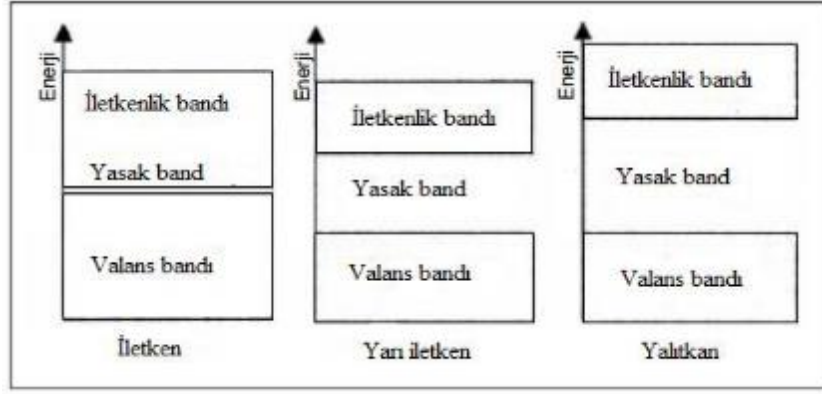


Şekil 4.1. Fotovoltaik etki ile çalışan hücre modeli [21].

Güneş pillerinin yapıları basitçe bir P-N ekleminden oluşan diyotlara benzer. Fotoelektrik ilkeye dayanarak hücreden fotonlar aracılığıyla koparılan elektronlar P-N eklemde harekete geçerek bir elektrik akımı üretir [21].

4.2. P-N Eklem Güneş Pilinin Yapısı

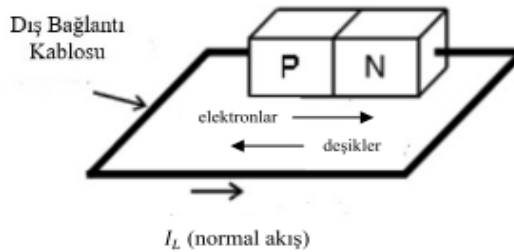
Son yörüngelerinde diğer bir deyişle valans bandında 4 elektron bulunan elementlere yarı iletken denir. Bu yarı iletken malzemelerin dirençleri yalıtkanların dirençlerine oranla daha düşük, iletken malzemelerin dirençlerine oranla daha yüksektir. Normal şartlar altında yalıtkan özellik gösteren yarı iletken malzemeler manyetik alan, ışık, ısı veya gerilime maruz kaldıklarında son yörüngelerindeki elektronlar serbest kalarak malzemenin iletken olmasına neden olurlar. Yarı iletkenleri, bileşik yapıda görebileceğimiz gibi element olarak da görebiliriz. ZnO ve TiO₂ gibi yarı iletken malzemeler bileşiklere örnek gösterilirken, silisyum ve germanyum gibi yarı iletken malzemeler ise elementlere örnek gösterilebilirler. Yarı iletkenlerin atomik yapılarını incelediğimizde kristal yapıda olduklarını görürüz. Yarı iletken bir malzemeye dışardan enerji vererek iletken hale getirebiliriz. Bu sistem ise üç değişik enerji bandından oluşur. Sırasıyla iletkenlik, yasak ve valans bantlarıdır. İletken, yarı iletken ve yalıtkan malzemelerin enerji bant diyagramı Şekil 4.2’de gösterilmiştir [4].



Şekil 4.2. İletken, yarı iletken ve yalıtkan malzemelerin enerji bant diyagramı.

Yarı iletkenler yapıları gereği boşluklar ve bu boşlukların yerini doldurabileceği elektronlara sahiptirler. Valans bandında bulunan bir elektronun iletkenlik bandına geçebilmesi için öncelikle yasak bant aralığı ile denk veya daha yüksek bir enerjiye sahip bir foton yarı iletken malzemeye absorbe edilir. Sonrasında ise elektron iletkenlik bandına geçer. İletkenlik bandı içerisinde bulunan boşluklar gelen elektronlar ile doldurulur ve bu bağlamda elektron-boşluk çifti meydana gelir. Oluşan bu elektron-boşluk çifti serbest taşıyıcı görevi görerek elektriksel iletkenliğe neden olur [22].

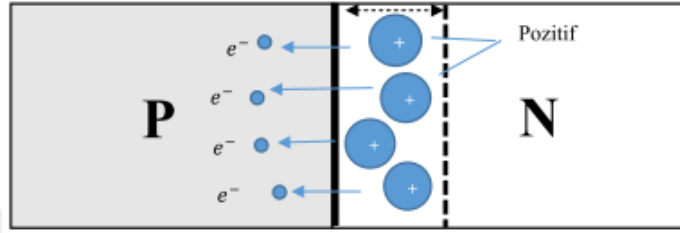
Fotovoltaik etki ile çalışan güneş pillerinin çalışma prensibini inceleyecek olursak P-N yapısına sahip bir diyot ile benzerlik gösterdiğini görebiliriz. Elektronlar ışık ile tetiklenerek harekete geçerler ve negatif iyonlar ile zenginleştirilmiş N-tipi yarı iletken katmandan ayrılarak, pozitif iyonlar ile zenginleştirilmiş P-tipi yarı iletken katmana doğru hareket ederler ve P-tipi katmanda bulunan boşlukları doldururlar. P-N yapıli diyota ait şematik gösterim Şekil 4.3’de gösterilmiştir [23].



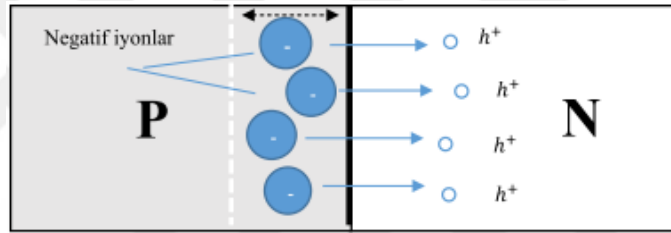
Şekil 4.3. P-N yapıli diyotun şematik gösterimi [21].

P-tipi ve N-tipi yarı iletken malzemelerin ikisinde de kullanılan yarı iletken malzeme aynı ise ‘aynı eklem’ olarak isimlendirilir. Kullanılan yarı iletken malzemeler farklı ise ‘farklı eklem’

olarak isimlendirilir. Bir P-N birleşiminde, N-tipi katmandaki elektronlar P-tipi katmandaki boşlukları doldururlar. Bu nedenle P ve N tipi katmanın birleşim yerinde bulunan elektronlarda azalma meydana gelir. Bu olay sadece birleşim yerinde meydana gelir. Pozitif iyonların bulunduğu, elektronlardan temizlenen bu bölgeye deplasyon bölgesi diğer bir deyişle tüketim bölgesi denir. Tüketim bölgesinin N tarafı şematik gösterimi Şekil 4.4'te, tüketim bölgesinin P tarafı şematik gösterimi ise Şekil 4.5'de verilmiştir [24].

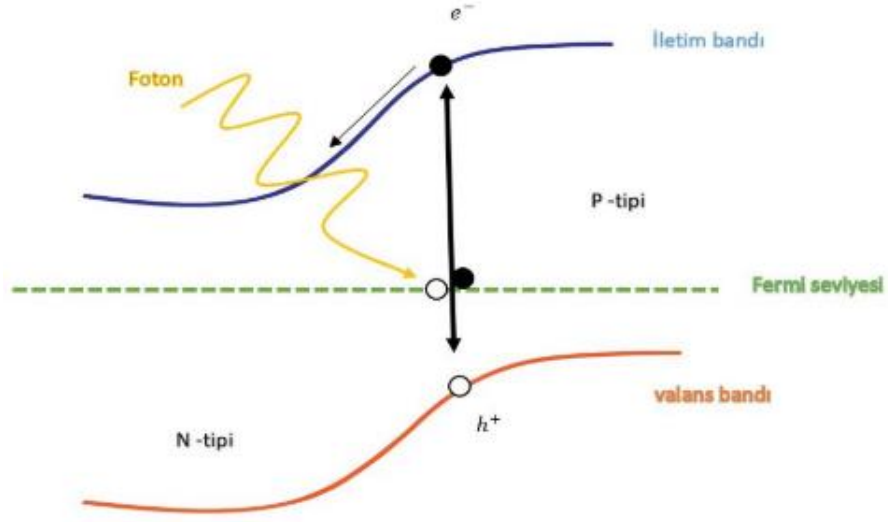


Şekil 4.4. Tüketim bölgesinin N tarafı şematik gösterimi.



Şekil 4.5. Tüketim bölgesinin P tarafı şematik gösterimi.

Güneş pili yüzeyine gelen ışık, yarı iletken malzeme tarafından emilir ve elektronların tetiklenmesine neden olur. Harekete geçen elektronlar boşlukları doldurması ile elektron-boşluk çifti meydana gelir. Deplasyon aralığında meydana gelen bu etkide, oluşmuş olan elektron-boşluk çiftlerin elektrik alanına zıt yönde bir hareket sağlayarak fotoakımlar oluşturur ve devreden elektrik akımı akmaya başlar. P-N tipi yarı iletken malzemenin ışık altında elektron-boşluk çifti oluşturması Şekil 4.6'da görsel olarak desteklenmiştir [21].



Şekil 4.6. P-N tipi yarı iletken malzemenin ışık altında elektron-boşluk çifti oluşturması [21].

5. GÜNEŞ PİLLERİ VE ÇEŞİTLERİ

Güneş pillerini teknolojik olarak incelediğimiz zaman birinci nesil güneş pilleri genel olarak silisyum tabanlı, tek ve çok kristalli silisyum yapısından oluşan pillerdir. İkinci nesil güneş pilleri ise ince film teknolojisini anlatmaktadır. Üçüncü nesil güneş pilleri maliyeti önemli ölçüde düşürerek aynı oranda verimi arttırmayı hedeflemektedir [25].

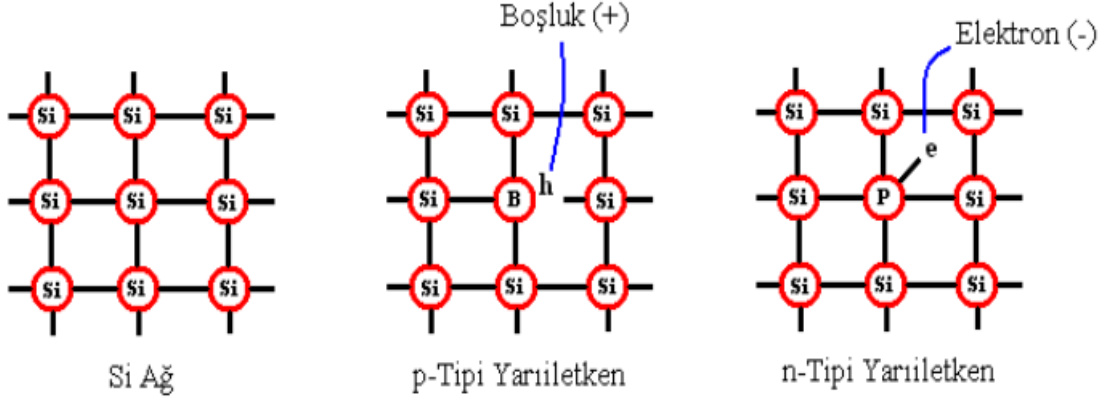
5.1. Birinci Nesil Güneş Pilleri

Bu tip güneş pilleri geliştirilen ilk pillerdir. Temel olarak Silisyum, Germanyum ve Kadmiyum tellürden meydana gelen inorganik bileşenlerden oluşturulmuştur. Fakat bu malzemelerin maliyetleri yüksek olduğu için yeni araştırmalara ihtiyaç duyulmuştur. Birinci nesil güneş pilleri içerisinde mono ve polikristal yapıları barındırmaktadır [4].

Silikon yapılu güneş pilleri P-tipi silisyum tabakalar ile N-tipi silisyum tabakaların bir araya gelmesi ile oluşurlar. Temel katman metalden oluşur ve üst katman ise gelen ışığı geri göndermeyecek yapıya sahip olan metal grid elektrotlardan oluşur. N-tipi katmanda saf silisyumun iletkenlik bandındaki deliklerinin artırılması atomlara katkı maddesi ekleyerek yapılır. Bu atomlar, 5-değerli valans elektronları olan arsenik (As), fosfor (P) veya bizmut (B)'dur. Silisyum kristaline katkı maddesi olarak 5 valans elektronuna sahip fosfor belli bir oranda eklendiğinde, fosfor atomunun 4 valans elektronu, silisyumun 4 valans elektronu ile kovalent bağ oluşturur. Fosfor'un 1 valans elektronu açıkta kalır ve ayrılır. Bu açıkta kalan elektron kristal yapı içerisinde serbest şekilde hareket ederek iletme katkı sağlar. Çünkü herhangi bir atoma bağlı değildir. İletkenlik, iletme katkı sağlayan elektron sayıları ile kontrol edilebilir. Bu ise silisyuma eklenen atomların sayısı ile olur. Katkı sonucu oluşturulan bu iletkenlik elektronu, valans bandında bir boşluk oluşturmaz. Akım taşıyıcılarının çoğunluğu elektron olan, silisyum veya germanyum esaslı malzemelere N-tipi yarıiletken malzeme denir [26].

Saf silisyum atomu içerisine, 3 valans elektrona sahip (3-değerli) atomların belli bir oranda eklenmesi ile yeni bir kristal yapı oluşur. Bu yeni kristal yapıda delik (boşluk) sayısı artırılmış olur. 3 valans elektrona sahip atomlara örnek olarak; alüminyum (Al), Bor (B) ve Galyum (Ga) elementlerini verebiliriz. Örneğin; saf silisyum içerisine belli bir oranda bor katılırsa; bor elementinin 3 valans elektronu, silisyumun 4 valans elektronu ile ortak kovalent bağ oluşturur. Fakat silisyumun 1 valans elektronu ortak valans bağı oluşturamaz. Bu durumda 1 elektron noksanlığı meydana gelir. Buna “boşluk” veya “delik” denir. Silisyuma eklenen katkı miktarı ile boşlukların sayısı kontrol edilebilir. Bu yöntemle elde edilen yeni malzemeye P-tipi yarıiletken malzeme denir. Çünkü boşluklar pozitif yüklüdür. Dolayısı ile P-tipi malzemede çoğunluk akım taşıyıcıları boşluklardır. Elektronlar ise P-tipi malzemede azınlık taşıyıcılar olarak adlandırılır. P-

tipi malzemede birkaç adet serbest elektronda oluşmuştur. Bunlar ısı ile oluşan boşluk çiftlerinden meydana gelmiştir. Pozitif ve negatif polarmalı silisyum atom modeli şekil 5.1’de verilmiştir [26].



Şekil 5.1. Pozitif ve negatif polarmalı silisyum atom modeli [27].

5.2. İkinci Nesil Güneş Pilleri

İkinci nesil güneş pilleri diğer bir deyişle ince film güneş pilleri maliyet açısından daha uygundur. Fakat verimlilik bakımından monokristal ve polikristal yapı silisyum pillere göre daha düşük potansiyele sahiptir [25].



Şekil 5.2. Amorf silisyum güneş pili [21].

İnce film güneş hücrelerine örnek olarak, Kadmiyum Tellürid / Kadmiyum Sülfid (CdTe / CdS), Amorf Silisyum (a-Si) ve Bakır İndiyum Galyum Selenür (CIGS) verilebilir. Amorf silisyum güneş pili Şekil 5.2’de gösterilmiştir [14].

5.3. Üçüncü Nesil Güneş Pilleri

Bütün güneş pillerinde olduğu gibi üçüncü nesil güneş pillerinde de asıl hedef verimliliği arttırmaktır. Bunun yanı sıra farklı etkenleri de hesaba katarak maddi değerini birinci nesil güneş pillerinin altında tutmaktır [28].

Üçüncü nesil güneş pillerinin başında BDGP gelmektedir. BDGP'yi bir bitkinin fotosentez olayı ilişkilendirebiliriz. Yaprak içerisine emilimi gerçekleşen güneş ışığı CO_2 ve H_2O kullanarak oksijen elde eder. Bu olaya benzer olarak BDGP geliştirilmiştir. Boya sayesinde emilimi gerçekleşen güneş ışığından enerji açığa çıkar [29]. Bu tip güneş pillerinde kullandığımız boya çeşitleri organik ve anorganik boya olmak üzere iki çeşittir. BDGP'de elde edilen en yüksek verim Rutenyum esaslı boyalar ile gerçekleştirilmiştir. Bu da Rutenyumun en çok tercih edilen boya maddesi olmasına neden olmuştur [30].

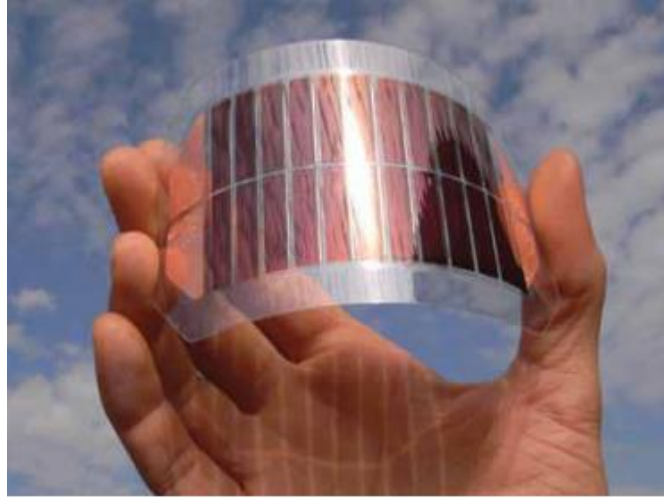
BDGP'lerde en iyi verim yaklaşık olarak % 11 ile Gratzel pilidir [25]. 1991 yılında Gratzel ve arkadaşları aracılığıyla gerçekleştirilen çalışmalar neticesinde ürettikleri BDGP'lerin sonraki yıllarda çok büyük ilgi gördüğü gözlemlenmiştir. BDGP'lerin silisyum yapıli güneş pillerine nazaran maliyet ve üretim kolaylığındaki avantajları artan ilginin temel nedenleri arasındadır [31].

BDGP'ler yarı iletken malzeme, boyar madde, elektrolit, katalizör ve iletken cam olmak üzere beş ana kısımdan meydana gelir. Bu ana kısımlar üzerinde yapılan farklı uygulamalar, pilin verimini belirleyen en önemli faktörlerdendir [31].

5.4. Organik Güneş Pilleri

Güneş pili gelişiminde üçüncü nesil diye tanımlanan organik güneş pilleri, iki iletken şerit ortasına organik katkıli maddelerin konulmasıyla oluşur. Organik tabanlı hücrelerde kullanılan yarıiletken polimerler, hücre gelişiminde çok etkili olmuşlardır. Organik hücrelerin moleküler yapısını incelediğimiz zaman yapılarında kolaylıkla değişimler gerçekleştirebilmemiz bizlere önemli avantajlar sağlamaktadır. Bunların yanı sıra maliyetlerinin düşük olması, doğada kolay bulunabiliyor olmaları ve ağır olmamaları da bizlere ekstra avantajlar sağlamakla birlikte organik hücreler sonraki çalışmalar için de ümit vadetmektedir [3].

Organik güneş pillerinde hücrenin ön katmanını hareketli polimerle doldurarak hücre yüzeyine vuran ışık hapsedilmektedir. Birden fazla tabakadan oluşan bu güneş pillerinde ışık geçirgenliği ile verimin en üst düzeyde olması için her tabakanın moleküler yapısı diğer tabakalar ile uyumluluk göstermelidir. Organik fotovoltaiik hücre modeli Şekil 5.3'de gösterilmiştir [32].



Şekil 5.3. Organik fotovoltaiik hücre [3].

Organik güneş pilleri, bir donör ve bir akseptöre sahiptirler. Organik güneş pillerinin genel hatlarını incelediğimiz zaman ışık saçan LED'leri andırmaktadırlar. Bu devre elemanları, arka yüzeylerinde saydam indiyum kalay oksit (ITO) malzemeden oluşmuş cam elektrot ile donatılmışlardır. Şeffaf iletken arka yüzeyi polistren sulfonik asit (PSS) katkılanmış polietilen-dioksitiyofen sulu çözeltisinden oluşmaktadır. Bu (3,4-ethilendioksitiyofen):poli(sitirene sülfanat) PEDOT:PSS tabakası, indiyum kalay oksit elektrotunun kalitesini artırır vedeşik enjeksiyon/ekstraksiyonuna destek sağlar. Bu elektrotun başka bir artısı da PEDOT katmanının kimyasal redoks tepkimeleriyle değiştirilebilir olmasıdır [3].

5.5. Boya Duyarlı Güneş Pillerinin Yapısı

BDGP, yapısal olarak geleneksel güneş pillerine göre farklılık göstermektedirler. Bu farklılığın nedeni ise sıvı elektrolit kullanılması ve yük ayrımı yapılmasından kaynaklanmaktadır. BDGP'lerde yük ayrımı, elektronlar ve boşlukların difüzyonu ile gerçekleşir. Geleneksel güneş pillerinde, yarı iletkenlerin fotovoltaiik etki ile güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürürler. BDGP'lerde ise bu olayın temelini ışığa duyarlı boya ve yarı iletkenler oluşturmaktadır [4].

5.5.1. Foto Anot (Çalışma Elektrotu)

Çalışma elektrotu boya duyarlı güneş pilleri için önemli bir katmandır. Boya duyarlı güneş pillerinde 1991 yılında TiO_2 yarı iletken malzemesi ile önemli çalışmalar yapılmıştır. [19].

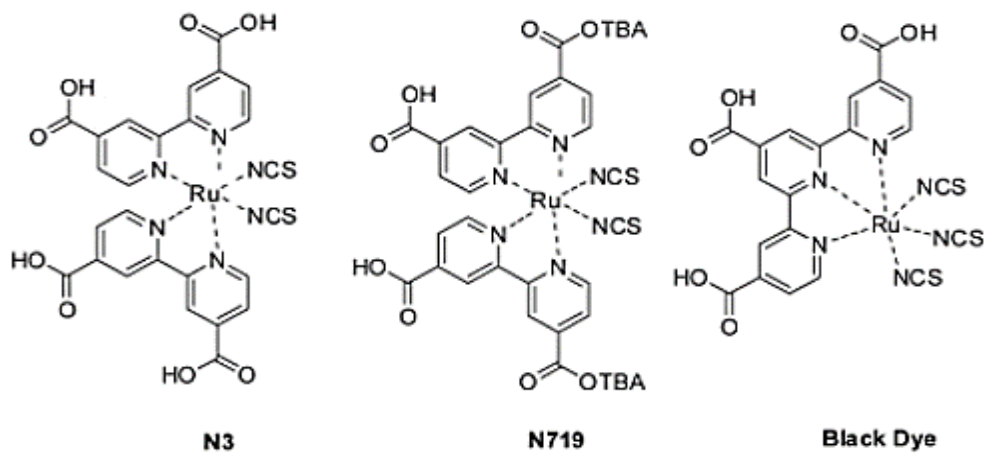
Çalışma elektrotu olan TiO_2 üzerinde çalışmalar yaparken farklı metal oksit yarı iletkenler ve elementler denenmektedir. Metal oksitlerin çeşidine dayanarak TiO_2 çalışma elektrotunun bazı parametreleri geliştirilmiş veya ışık soğurma potansiyeli artırılmıştır [33,34]. Her ne kadar en

yüksek verim TiO_2 yarı iletken malzemesi ile sağlansa da bunun yanı sıra ZnO , SnO_2 ve Nb_2O_5 gibi farklı yarı iletken malzemelerle de çalışmalar yapılmıştır. TiO_2 yarıiletken malzemesinin yüksek verim elde edilmesi dışında, pazar payının yüksek olması ve kimyasal yapısının kararlı olması önemli bir etken oluşturmaktadır [31]. Boya duyarlı güneş pillerinin amacı boyanın emilimi için bir yüzey alanı oluşturmak, uyarılmış boyada elektron alıcısı görevi üstlenmek ve elektrotun iletken cam ile temasını sağlayıp akım akışı sağlamaktır [21].

5.5.2. Duyarlastırıcı (Boya)

Boya duyarlı güneş pillerinde kullanılacak olan boya çeşitlerinin temel amacı içine işlediği yarıiletken tabakaya elektron akışı sağlamaktır. İçerisinde elektron barındıran boyaya ışığın temas etmesi halinde elektronlar uyarılıp harekete geçer. Yarıiletken katmana doğru hareket eden bu elektronlar yüzeye ulaştıktan sonra yarıiletken malzemenin iletim bandına doğru hareket ederler. Boya yüzeyine gelen ışık kesilmediği müddetçe elektrolit içindeki redoks tepkimeleri yenilenir yani bir döngü halinde boya yüzeyi ve elektrolit arasında bir elektron akışı olur. BDGP'lerde en yüksek verim değerlerine Rutenyum esaslı boyalar ile ulaşılmıştır. Fakat Rutenyum boyaların yüksek maliyetleri, araştırmacıları alternatif boyalar arama yoluna sürüklemiştir. Rutenyum temelli boyaların kimyasal yapıları Şekil 5.4'de gösterilmiştir [14].

Yapılan çalışmalar neticesinde muadillerine nazaran en iyi verim Rutenyum boya ile sağlanmıştır [31]. Dünyamıza gelen güneş ışığı % 45 oranla görünür, % 47 oranla kızıl ötesi ve % 8 oranla mor ötesi ışığı oluşturmaktadır [14]. Rutenyum boyalar ışığın görünür ve kızıl ötesi boyutu ile tetiklendiği için genellikle tercih sebebi olmuştur [31].



Şekil 5.4. Rutenyum temelli boyaların kimyasal yapıları [19].

Boyar malzemenin veriminin yüksek olması için ihtiyaç duyulan özellikler şu şekilde sıralanabilir;

- Kullanılacak olan boya malzemesi, 920 nm dalga boyuna kadar olan ışığın emilimini gerçekleştirebilmeli
- Kullanılacak olan boya malzemesi, yarıiletken içerisine iyice nüfuz etmeli
- Kullanılacak olan boya malzemesi, yarıiletken malzemenin iletkenlik bandını aşmalı ve bunun yanı sıra meydana gelen potansiyel fark elektron alışverişinde sorun yaratmamalı
- Kullanılacak olan boya malzemesi üzerine elektrolit damlatıldığında yarı iletken malzeme üzerindeki kararlılığını koruyabilmeli
- Kullanılacak olan boya malzemesi iyi bir çözünürlüğe sahip olmalıdır [17].

5.5.3. Elektrolit

Elektrolit, içinde bulundurduğu iyonlar ile iletkenlik sağlayan bir çözeltilerdir. Yapılmış olan deneylerde sıklıkla iyodür (I^-) / triiyodür (I_3^-) redoks çifti barındıran elektrolitler kullanılır. Çözelti içerisinde meydana gelen redoks reaksiyonu ile duyarlaştırıcıdan gelen elektronları geri göndererek döngüyü tamamlamış olur. Bu işlem ışık kesilmediği sürece devam eder. Elektron akışında bir aksilik olması boya duyarlı güneş pillerinin verimini önemli ölçüde düşürür. Bu nedenle üretilecek olan elektrolitin uygun değerlere sahip olması gerekir [32,35].

Boya duyarlı güneş pillerinde kullanılacak elektrolit çözeltisinde olması gereken temel özellikler şöyle sıralanabilir;

- Kullanılan elektrolitin yükseltgenme ve indirgenme potansiyelinin, termodinamik açıdan boya malzemesinin yükseltgenme ve indirgenme potansiyeliyle entegre olmalıdır.
- Kullanılan elektrolitin taşıyıcılık görevini en iyi düzeyde yerine getirebilmesi için elektroliti meydana getirecek olan bileşenlerin birbirleri ile homojen olarak karışması gerekir.
- Kullanılan elektrolit içerisindeki çözücünün iyi bir yayılma değerine sahip olması gerekir.
- Kullanılan elektrolitte redoks tepkimesi meydana gelirken oluşacak yapının kararlı olması gerekir.
- Kullanılan elektrolitte elektron akışının seri olması için redoks çiftindeki indirgenme ve yükseltgenme olayının seri olarak meydana gelmesi gerekir.
- Kullanılan elektrolitin boya dışındaki malzemeler ile tepkimeye girmemesi gerekiyor.

Boya duyarlı güneş pillerinde kullanılan elektrolitin sıvı fazında olmasından kaynaklı sorunlar yaşanmaktadır. Bazı deneylerde katı fazındaki elektrolitler denenmiş olup akışkanlığı ve uçuculuğu önemli ölçüde azaltılmıştır. Fakat her ne kadar katı fazdaki elektrolit bazı sorunlara çözüm olsa da pilin verimini düşürdüğü için tercih edilmemektedir [25,36].

5.5.4. Foto Katot (Karşıt Elektrot)

Foto katot yani pozitif (+) uç olan karşıt elektrotu en basit şekilde tanımlayacak olursak, dış devre üzerinden gerçekleşen elektron akışını kendi yüzeyine alır akabinde bu elektronları elektrolite aktararak yenilenmesini sağlar. Katalizör olarak en yüksek verimi platinden aldığımız için çok tercih edilir [36,37]. Platinin asıl görevi, elektrotun içerisinde meydana gelen indirgenme ve yükseltgenme işleminin katalizini sağlamaktır [4,38].

Platinin, üst düzey katalitik canlılığı, iyi bir iletkenliğe sahip olması ve kararlı yapısı sayesinde iyi bir karşıt elektrot görevi görse de boya duyarlı güneş pillerindeki en yüksek maliyetli parçalardandır. Bu yüzden, boya duyarlı güneş pillerindeki maliyeti azaltmak amacıyla daha ucuz karşıt elektrot parçaları geliştirmek gerekiyor. Karbon nano tüpler, canlandırılmış karbon, karataş, karbon siyahı ve birtakım metaller karşıt elektrotlarda denenerek katalizör görevini başarıyla yerine getirmiştir [38].

5.5.5. İletken Camlar

Cam yüzeyi, genel olarak PVD (fiziksel buhar biriktirme) tekniği ile kaplanır. Bu teknik aracılığı ile cam yüzeyinde saydam iletken bir katman oluşturulur ve katkılanan malzemeye göre adlandırılır. Örneğin; ITO (İndiyum katkılı kalay oksit) veya FTO (Flor katkılı kalay oksit) olarak adlandırılır [39].

BDGP'lerde genellikle FTO ve ITO camlar kullanır. Kullanılan iletken camların BDGP'lerdeki temel görevi, optik olarak saydamlık, elektriksel olarak iletkenlik sağlamasıdır. FTO ve ITO cam yüzeyine kaplanırken yoğunluk arttıkça iletkenlikte artar fakat doğru orantılı olarak saydamlık azalacağı için kalınlık uygun değerde tutulmalıdır [17].

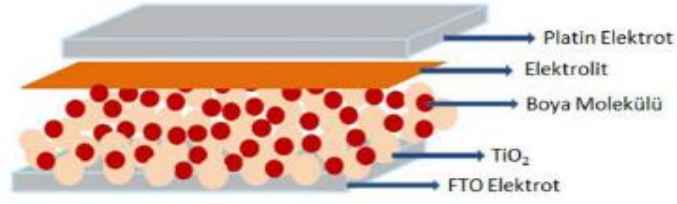
5.6. Boya Duyarlı Güneş Pillerinin (BDGP) Çalışma Prensibi

BDGP'nin temel çalışma mantığı, güneşten gelen ışığın, görünür ışınlarından yararlanarak elektrik enerjisi üretebilmektir [40].

BDGP'leri oluşturan parçaları aşağıdaki gibi sıralayabiliriz;

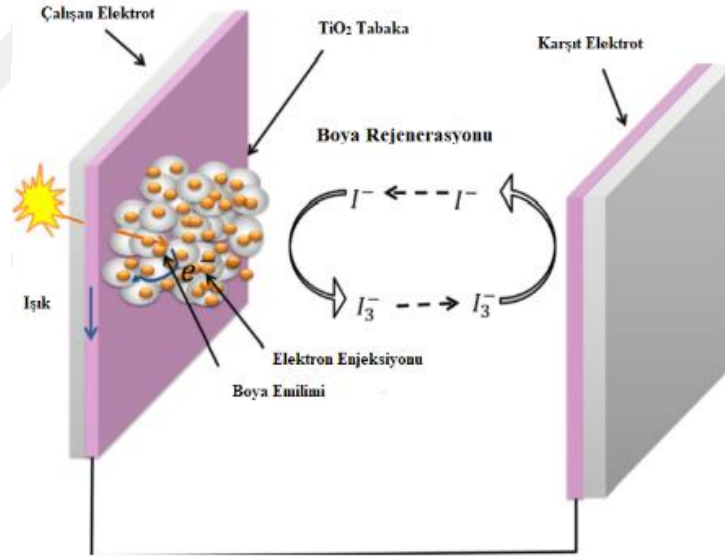
- Saydam iletken oksit ile kaplanan cam
- TiO_2 veya türevi yarı iletken metal oksit malzeme
- Kullanılan yarı iletken içerisine nüfuz edecek boya malzemesi
- Redoks reaksiyonunu gerçekleştirecek olan elektrolit
- Redoks çiftindeki elektronları yenileyecek olan karşıt elektrot

boya duyarlı güneş pili katmanları görsel olarak Şekil 5.5'de gösterilmiştir [41,42].



Şekil 5.5. Boya duyarlı güneş pili katmanları [25].

Boya duyarlı güneş pillerinde içerisine boya emdirilmiş yarı iletken metal oksit malzemenin yüzeyine gelen güneş ışığı, boya içerisindeki elektronları uyarak harekete geçirir. Harekete geçen elektronlar çalışan elektrotta doğru ilerler. Daha sonra çalışan elektrot içerisindeki elektronlar karşıt elektrot tabaka sayesinde yenilenerek dış devre üzerinden boyaya gönderilir. Bu döngü sürekli kendini tekrarlayarak devam eder. Boya duyarlı güneş pillerinin çalışma prensibinin şematik görüntüsü şekil 5.6’de gösterilmiştir [4,43].



Şekil 5.6. Boya duyarlı güneş pili çalışma prensibinin şematik görüntüsü [4].

Denklem 5.1’de S boyayı $h\nu$ ise yüzeye gelen ışık miktarını temsil etmektedir,



Rutenyum temelli boyalar, takribi olarak 720 nm dalga boyu seviyelerinde tetiklenirler. Ortalama olarak bu dalga boyu ise 1,72 eV değerinde enerji üretir. Tetiklenen boya (S^*)

yükseltgenir hemen sonrasında yarı iletken malzemeye elektron geçişi olur. Denklem 5.2 ile bu durumu açıklayabiliriz.



Elektron alışverişinin verimli olabilmesi amacıyla, elektron potansiyeli ve iletim bandındaki yarı iletkenin enerji düzeyi arasındaki fark 0.2-0.3 V'dan daha yüksek olmalıdır. Boya içerisinden koparılan elektron, yenilenebilmek için karşıt elektroda gönderilir. Boya duyarlı güneş pillerinin verimi direkt olarak çalışma elektrotu ve karşıt elektrotta bulunan iyot seviyesinin düşmesine bağlıdır. Karşıt elektrotta meydana gelen reaksiyon işlemi, çalışma elektrotu içerisinde gerçekleşen reaksiyondan daha hızlı olmalıdır.

Tetiklenen boya indirgenir ve aşağıdaki Denklem 5.3'deki gibi gösterilir.



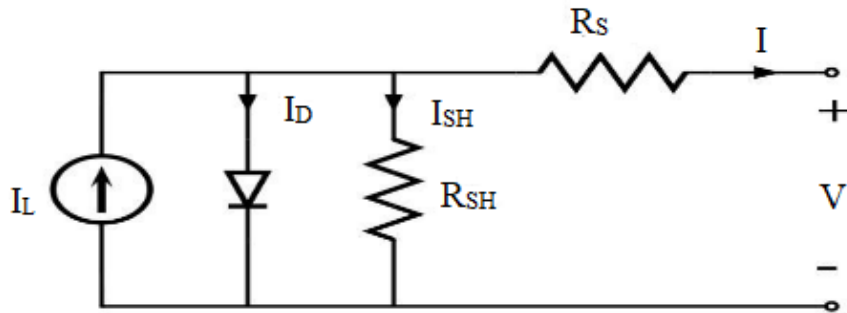
Burada I^- iyodür ve I_3^- ise triiyodürü temsil etmektedir. Oluşan bu indirgenme ve yükseltgenme reaksiyonu bittikten sonra döngü tamamlanmış olur. Boya duyarlı güneş pillerinde daima enerji üretimi gerçekleşebilmesi için bu döngünün kesilmeden devam etmesi gerekmektedir [31].

5.7. Güneş Pili Parametreleri

Optimum değerlere sahip bir güneş pili eşdeğer devresinde, ileri yönlü diyota paralel bağlı akım kaynağı bulunur. Kayıpları engellemek adına bunlara paralel ve seri dirençler bağlanır.

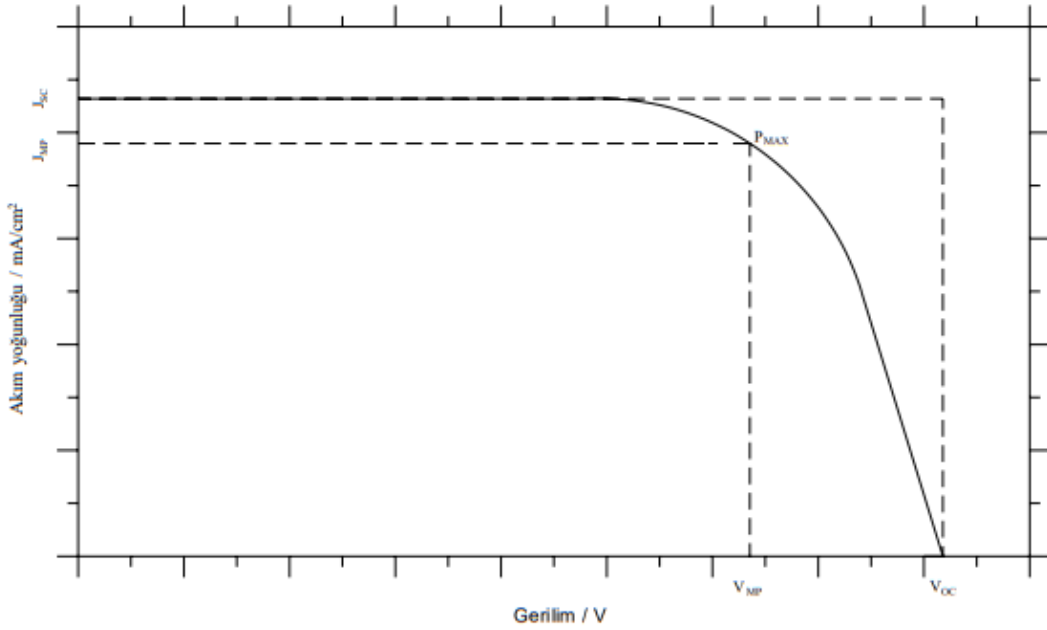
Şekil 5.7' de görmüş olduğumuz I (Çıkış akımı), I_L (Fotojenere akım), I_D (Diyot akımı), I_{SH} (Şönt akımı) ve bu değerlere bağlı olarak çıkış akımını Denklem 5.4'deki gibi hesaplayabiliriz.

$$I = I_L - I_D - I_{SH} \quad (5.4)$$



Şekil 5.7. İdeal bir güneş piline ait eşdeğer devre.

Sistemdeki kaynağımız, ışığın tetiklemesi ile hareket eden elektronların ürettiği enerjiden oluşur. R_s , pil içerisinde yararlandığımız tüm sistemin elektriksel dirençleri (yarı iletkenin direnci, elektrotun direnci, yarı iletken katman ile elektrot arasındaki bağlantı) ve bu yapıların arasında meydana gelen tüm omik dirençleri göstermektedir. R_{sh} ise sızıntı akımlara karşı koyan şönt direncidir. R_{sh} 'ın direnç değeri düştükçe I_L akımı bölüneceği için güç kaybı yaşanacaktır. R_s 'nin sıfır, R_{sh} 'ın sonsuza gittiği devreler bizim için ideal kabul edilmektedir. Güneş pillerindeki akım ve gerilim karakteristiği Şekil 5.8'de gösterilmiştir [36].



Şekil 5.8. Güneş pilinin akım ve gerilim karakteristiği [4].

5.7.1. Güneş Pillerinde Seri Direnç (R_s)

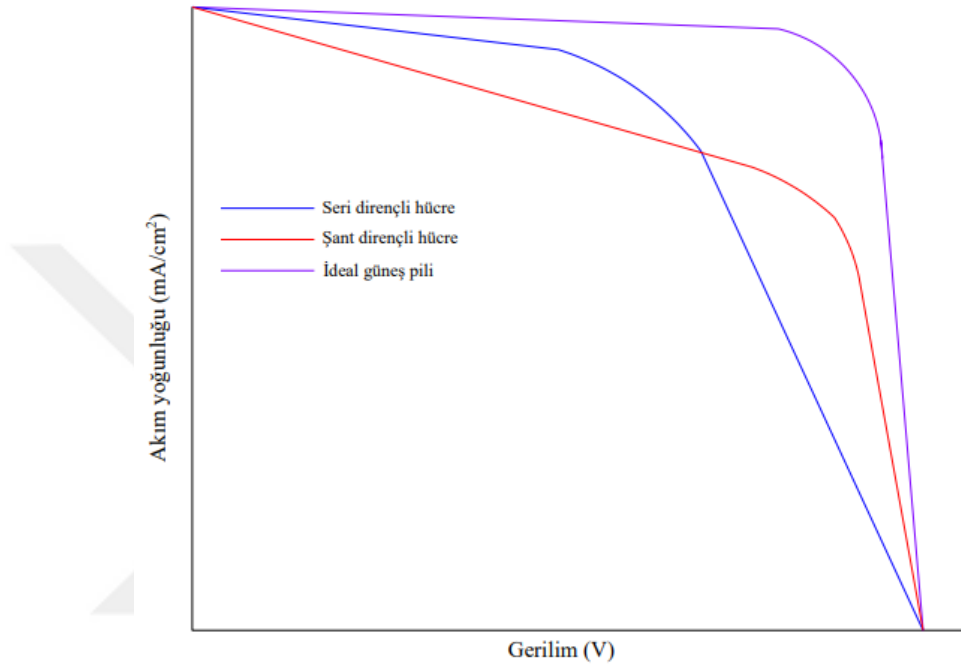
Güneş pillerinde bulunan seri direnç (R_s), elektron alışverişinin olduğu yarı iletken katman ve temas ettiği noktada oluşturduğu dirençtir. R_s , maksimum gücü etkilerken dolum faktörünü düşürür, R_s değerinin yüksek olması ise I_{sc} 'yi düşürebilir. İdeal bir güneş pilinde R_s değeri sıfır olacağı için V_{oc} bu durumdan etkilenmez [43].

5.7.2. Güneş Pillerinde Şönt Direnci (R_{sh})

R_{sh} 'ın düşük olması akan akım için ikinci bir yol oluşturacağından büyük ölçüde güç kaybına neden olur. R_{sh} 'ın düşük olması; doldurma faktörü, maksimum güç çıkışı ve açık devre gerilimini doğrudan etkilemektedir. Kısa devre gerilimi, çok düşük bir değer olmadıkça etkilenmez,

çünkü J_{SC} 'de toplam akım dış kanallardan akar ve bu nedenle R_{SH} küçüktür. Kısa devre akım noktasında I-V eğrisinin eğiminden R_{SH} tahmini hesaplanabilir [4].

Güneş ışığı ile elektrik enerjisi üreten güneş pillerinde çoğunlukla J-V grafiğinin değerlerine bakılarak yorum yapılır. Belirli bir R_S ve R_{SH} değerine sahip bir güneş pilinde akım ve gerilim eğrisi Şekil 5.9'da gösterilmiştir [36].



Şekil 5.9. Seri ve şönt dirence sahip bir güneş pilinde akım-gerilim eğrisi [4].

5.7.3. Güneş Pillerinde Kısa Devre Akımı (I_{sc})

Devreden akan akımın kısa yolu tercih etmesi veya yük üzerindeki direncin sıfıra eşit olması durumunda, güneş pilinden elde edilen akıma I_{sc} denir. I_{sc} , güneş pili yüksüz iken üretebileceği maksimum akım olarak da adlandırılabilir. Kısa devre akımını etkileyen faktörler; elektrolit, sıcaklık ve kullanılan boya türü ile ilişkilidir [43].

5.7.4. Güneş Pillerinde Açık Devre Gerilimi (V_{oc})

V_{oc} güneş pilinden elde edebileceğimiz en yüksek gerilim seviyesidir. Bir başka ifadeyle V_{oc} yüksüz bir ortamda yüzeyine güneş ışığı düşen pilin üretebileceği maksimum gerilim seviyesidir. V_{oc} 'yi etkileyen faktörler ise elektrolit, yarı iletken malzeme ve kullanılan boyadır [4].

5.7.5. Güneş Pillerinde Dolum Faktörü (FF)

FF, güneş pillerinde maksimum gücün bir ölçüsü olarak adlandırılır. I-V grafik eğrisinin karesi olarak da ifade edilebilir. FF aşağıdaki Denklem 5.6 ile elde edilir.

$$FF = \frac{V_m.I_m}{V_{oc}.I_{sc}} \quad (5.6)$$

FF güneş pillerinin çalışması süresince meydana gelen elektriksel kayıpları yansıtır [43].

5.7.6. Güneş Pillerinde Verim (η)

BDGP'lerin verimlerini I-V değerlerine göre belirlenir. I-V değerlerinden oluşturmuş olduğumuz grafik ile pilin karakteristik olarak yorumlayabiliriz. Güneş pillerinin verimini arttırmak için I_{sc} ve V_{oc} değerlerinin yanı sıra FF değerinin de yüksek olması gerekir [21].

Güneş pillerinde η , maksimum güç ile yüzeye düşen ışığın güç girdisine bölümüdür. η çoğunlukla yüzdesel olarak değerlendirilir.

Güneş pilinin verimini Denklem (5.7) ile açıklayabiliriz.

$$\eta = \frac{I_{sc}.V_{oc}.FF}{P_{in}} \quad (5.7)$$

η parametresi, V_{oc} , I_{sc} , ve FF'ye bağımlı bir değişken olduğu için verimi etkilemektedir. Bunun yanı sıra yüzeye düşen ışığın dalga boyu, yayılımı ve sıcaklık değeri de verimi etkileyen diğer parametrelerdir [4].

6. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, boya duyarlı kompozit yarı iletken elektron alıcıların hibrit güneş pillerine etkileri incelenmiştir. TiO_2 ve ZnO nano tozlarının hazırlanması, yarı iletken malzemenin yapımı, pilin hazırlanması ve ölçümlerin alınması bu başlık altında anlatılmıştır.

6.1. TiO_2 Yarı İletken Metal Oksit Tozunun Hazırlanması

20 ml saf su içerisine 2,28 gr üre eklendikten sonra Şekil 6.1’de gösterilen manyetik karıştırıcı üzerinde 15 dakika karıştırılmıştır.



Şekil 6.1. Manyetik karıştırıcı.

Hemen akabinde çözelti içerisine 2 ml TTIP (Titanium (IV) isopropoxide) damla damla eklenmiştir. 45 dk daha manyetik karıştırıcıda karıştırıldıktan sonra Şekil 6.2’de gösterilen ultrasonik karıştırıcıda 20 dk çözeltinin dağıtılması sağlanmıştır.



Şekil 6.2. Ultrasonik karıştırıcı.

10 dk daha manyetik karıştırıcıda karıştırıldıktan sonra hidrotermal malzeme üretim cihazına alınmış ve cihaz 180 °C de 4 saat işlem görmüştür. Hidrotermal cihazı Şekil 6.3’de gösterilmiştir.



Şekil 6.3. Hidrotermal malzeme üretim cihazı.

4 saatin sonunda hidrotermal’den çıkarılan çözelti çöktürme ve temizleme işlemi yapmak için santrifüj cihazında 5000 rpm’de 10 dk döndürülmüştür. Santrifüj cihazı Şekil 6.4’de gösterilmiştir.



Şekil 6.4. Santrifüj cihazı.

Santrifüj cihazından çıkarılan tozlar sırasıyla saf su, alkol ve saf su ile karıştırıcı cihazında temizlenerek her işlemten sonra tekrardan santrifüj edilmiştir. Santrifüj cihazından çıktıktan sonra çöktürülmüş tozun görüntüsü Şekil 6.5’de gösterilmiştir.



Şekil 6.5. Santrifüj cihazından çıktıktan sonra çöktürülmüş tozun görüntüsü.

Her santrifüj işleminden sonra Şekil 6.6’da görülen bir Vortex (karıştırıcı) yardımı ile çöken tozlar tekrar dağıtılmıştır.



Şekil 6.6. Çöken tozların tekrar dağıtılmasında kullanılan vortex cihazı.

Son olarak temizlenen TiO_2 tozu Şekil 6.7’de gösterilen Vakumlu Etüv’de $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’de kurumaya bırakılmıştır.



Şekil 6.7. TiO_2 ve ZnO tozları kurutmak için kullanılan vakumlu etüv cihazı.

Etüv'den çıkarılan TiO_2 ve ZnO toz haline getirilmek için baget çubuk ile ezilmiştir.

6.2. ZnO Yarı İletken Metal Oksit Tozunun Hazırlanması

ZnO yarı iletken tozu aşağıdaki adımlar izlenerek hazırlanmıştır;

- 2,1949 gr Çinko Asetat hassas terazi ile tartılmıştır.
- 1,4019 gr Hekzametilen Tetramin hassas terazi ile tartılmıştır.
- Tartılan tozlar bir beherin içerisine konuldu ve hemen akabinde 100 ml saf su ilave edilerek 30 dakika boyunca manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır.
- Üretilen parçacık boyutlarını daha küçük hale getirmek amacıyla çözelti PH değeri 10 olana kadar Amonyum çözeltisi ($\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$) damlatılmıştır. Kullanılan PH metre Şekil 6.8'de gösterilmiştir.



Şekil 6.8. PH Metre.

- PH değeri 10 olan çözelti hidrotermalde 200 °C’de 3 saat bekletilerek ZnO tozları üretilmiştir.
- Üretilen ZnO tozlarına çökertme ve temizleme işlemi yapmak için santrifüj cihazında 5000 rpm’de 10 dk döndürülmüştür.
- Santrifüj cihazından çıkarılan tozlar Şekil 6.2’de gösterildiği gibi sırasıyla saf su, alkol ve saf su ile temizlenerek her işlemten sonra tekrardan santrifüj edilmiştir.
- Son olarak temizlenen ZnO tozu etüv’de 60 °C’de kurumaya bırakılmıştır.

6.3. Pastaların (Foto Anotların) Hazırlanması

Saf TiO₂, saf ZnO, 1:3 oranında TiO₂/ZnO, 3:1 oranında TiO₂/ZnO ve son olarak 1:1 oranında TiO₂/ZnO pastalarının hazırlanması sırasında kullanılan ekipmanlar ve kullanılan malzeme miktarları aşma aşama bu başlık altında belirtilmiştir.

6.3.1. Saf TiO₂ Pastanın Hazırlanması

Saf TiO₂ pastanın yapımında kullanılan malzemeler ve pastanın hazırlanışı aşağıda maddeler halinde anlatılmıştır;

- 0,25 gr TiO₂ toz
- 0,125 gr Etil Selüloz
- 2,5 ml Alpha Terpeneol
- 10 ml Absolute Ethanol

Verilen miktardaki malzemeler balon joje içerisine konulup içerisindeki alkol uçmasını diye ağzı kapatılmıştır. Daha sonra ultrasonik karıştırıcıda 1 saat çözeltinin dağılması sağlanmıştır. Şekil 6.2’de gösterilen ultrasonik karıştırıcıda homojen hale gelen çözelti, Şekil 6.1’de gösterilen manyetik karıştırıcıda 700 rpm’lik bir hız ile 24 saat karıştırılmıştır. Hemen akabinde Şekil 6.9’da gösterilen döner buharlaştırıcı cihazı ile uygun jel kıvamını alana kadar buharlaştırılmıştır.



Şekil 6.9. Döner buharlaştırıcı.

Jel kıvamında bulunan saf TiO_2 kurumaması adına ağzı kapatılarak diğer numuneler hazırlanana kadar desikatörde muhafaza edilmiştir.

6.3.2. Saf ZnO Pastanın Hazırlanması

Saf ZnO pastanın yapımında kullanılan malzemeler aşağıda verilen miktarlarda kullanılmıştır;

- 0,25 gr ZnO toz
- 0,125 gr Etil Selüloz
- 2,5 ml Alpha Terpeneol
- 10 ml Absolute Ethanol

Verilen miktarlardaki malzemeler balon joje içerisine konulduktan sonra pastanın hazırlanışı saf TiO_2 pastasının hazırlanmasında izlenen adımlar ile tekrarlanmıştır.

6.3.3. TiO_2/ZnO 1:1 Oranındaki Pastanın Hazırlanması

TiO_2/ZnO 1:1 oranındaki pastanın yapımında kullanılan malzemeler aşağıda verilen miktarlarda kullanılmıştır;

- 0,125 gr TiO_2 toz
- 0,125 gr ZnO toz
- 0,125 gr Etil Selüloz
- 2,5 ml Alpha Terpeneol
- 10 ml Absolute Ethanol

Verilen miktarlardaki malzemeler balon joje içerisine konulduktan sonra pastanın hazırlanışı saf TiO_2 pastasının hazırlanmasında izlenen adımlar ile yapılmıştır.

6.3.4. TiO_2/ZnO 3:1 Oranındaki Pastanın Hazırlanması

TiO_2/ZnO 3:1 oranındaki pastanın yapımında kullanılan malzemeler aşağıda verilen miktarlarda kullanılmıştır;

- 0,1875 gr TiO_2 toz
- 0,0625 gr ZnO toz
- 0,125 gr Etil Selüloz
- 2,5 ml Alpha Terpeneol
- 10 ml Absolute Ethanol

Verilen miktarlardaki malzemeler balon joje içerisine konulduktan sonra pastanın hazırlanışı saf TiO_2 pastasının hazırlanmasında izlenen adımlar ile yapılmıştır.

6.3.5. TiO₂/ZnO 1:3 Oranındaki Pastanın Hazırlanması

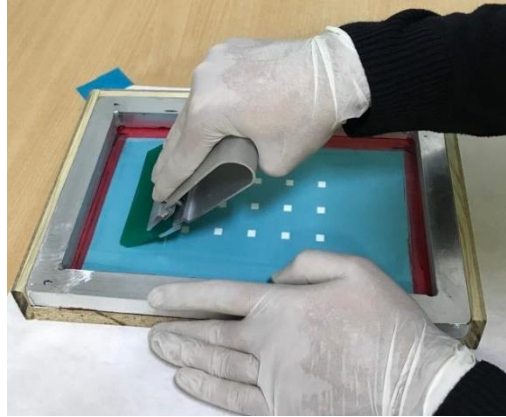
TiO₂/ZnO 1:3 oranındaki pastanın yapımında kullanılan malzemeler aşağıda verilen miktarlarda kullanılmıştır;

- 0,0625 gr TiO₂ toz
- 0,1875 gr ZnO toz
- 0,125 gr Etil Selüloz
- 2,5 ml Alpha Terpeneol
- 10 ml Absolute Ethanol

Verilen miktarlardaki malzemeler balon joje içerisine konulduktan sonra pastanın hazırlanışı saf TiO₂ pastasının hazırlanmasında izlenen adımlar ile yapılmıştır.

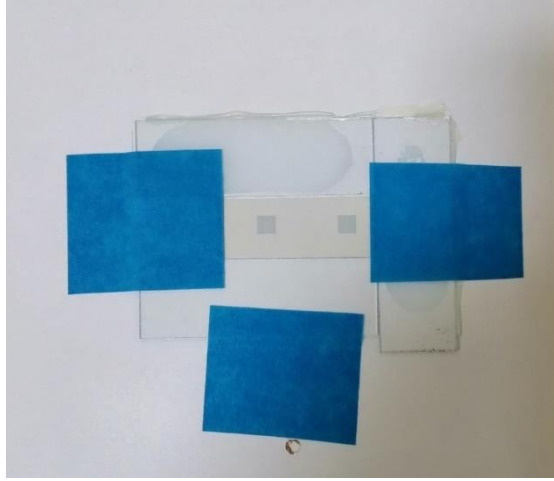
6.4. Boya Duyarlı Hibrit Güneş Pili'nin Yapımı

2x5 cm boyutlarında kesmiş olduğumuz FTO camları ultrasonik karıştırıcıda her biri 10 dk olmak koşuluyla aseton, saf su, alkol ve son olarak tekrar saf su ile temizlenmiştir. Temizlenen FTO camlar azot gazı ile kurutulmuş ve temiz bir hazne içerisinde muhafaza edilmiştir. Şekil 6.10'da gösterilen özel olarak yaptırmış olduğumuz 165 mesh 0,36 cm² alana sahip kare şeklindeki serigrafi baskı ile bu baskının içerisine tam oturacağı ahşap bir haznemiz aracılığıyla pasta çekme işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.10. Serigrafi baskı ile pasta çekme işlemi.

Şekil 6.11'de gösterilen pasta, çekilen her katının ardından 80 °C'ye ayarlanmış olan etüv içerisinde 20 dk kurumaya bırakılmıştır. Bu pastaya soğuma işleminin ardından diğer katlar çekilmiştir.



Şekil 6.11. Çekilen pastanın görüntüsü.

Pastaya 4 katı çekilip etüvde kuruttuktan sonra 450 °C'ye ayarlanmış Şekil 6.12'de gösterilen kül fırını içerisinde 45 dk boyunca tavlanmıştır. Sonrasında soğumaya bırakılmış ve soğuyan FTO camları elmas cam kesici ile ortadan ikiye ayrılarak 2x2.5 cm² iki adet pil için fotoanot katmanları oluşturulmuştur. Üretilen fotoanotlardan biri ile güneş pili yapımında diğeri ise yapısal ve morfolojik analizler için kullanıldı.



Şekil 6.12. Kül fırını.

8 mg rutenyum boya 10 ml metil alkolde çözüldü. Sonrasında elde ettiğimiz FTO üzerine kaplanmış fotoanot tabakalı yapı üst tarafa gelecek şekilde, Şekil 6.13'de gösterildiği gibi boyaya daldırıldı. Emilimin daha iyi gerçekleşmesi adına 24 saat boya içerisinde bekletildi. Boyanın ışığa maruz kalıp bozulmaması için boyanın bulunduğu cam hazne alüminyum folyo ile sarılarak karanlık bir ortama bırakıldı.



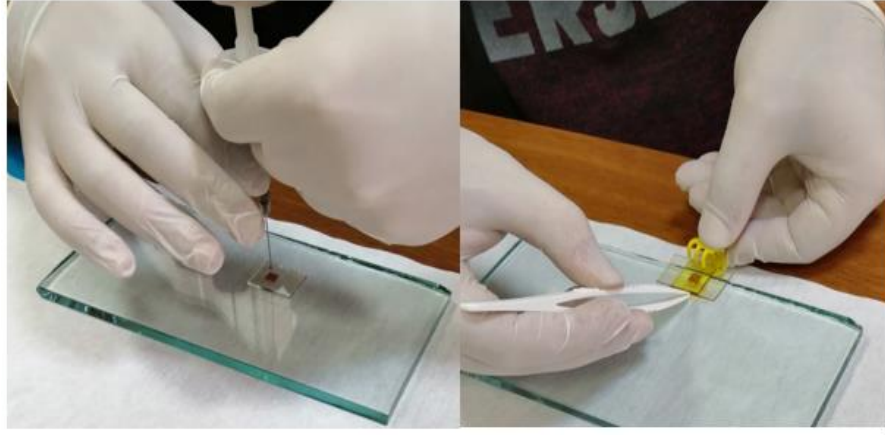
Şekil 6.13. Rutenyum boyaya daldırılmış foto-anot katmanı.

24 saatin ardından boya içerisinde çıkarılan foto-anot katmanlar öncelikle metil alkole daldırılıp temizlendi. Sonrasında temiz bir kap içerisine alınarak, Şekil 6.14’te gösterildiği gibi 15 dk boyunca belirli bir mesafeden fön makinasının düşük sıcaklık ayarı ile kurutuldu.



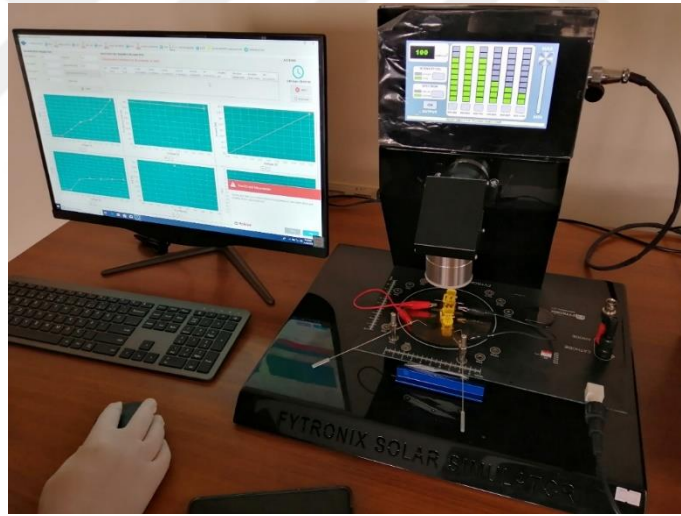
Şekil 6.14. Fön makinası ile yapılan kurutma işlemi.

Kurutma işlemi gerçekleştirildikten sonra Şekil 6.15’te gösterildiği gibi foto-anot katman üzerine şırınga ile 2 damla elektrolit damlatıldı. Hemen akabinde elektrolit kurumadan hızlı bir şekilde platin kaplı camın iletken yüzeyi foto-anot tabakaya bakacak şekilde üzerine kapatıldı ve kısıkaç yardımıyla birbirlerine tutturuldu.



Şekil 6.15. Foto-anot tabakaya elektrolit damlatılıp karşıt elektrot ile kapatılması.

Kıskaç ile tutturduğumuz güneş pilimiz FTO üste gelecek şekilde yani ışık ilk olarak FTO tabaka ile buluşacak şekilde konumlandırılıp Şekil 6.16’da gösterilen FYTRONİX LSS 9000 I-V CHARACTERIZATION SYSTEM marka solar simülatör ile I-V ölçümler alınmıştır.



Şekil 6.16. FYTRONİX LSS 9000 I-V CHARACTERIZATION SYSTEM solar simülatör cihazı.

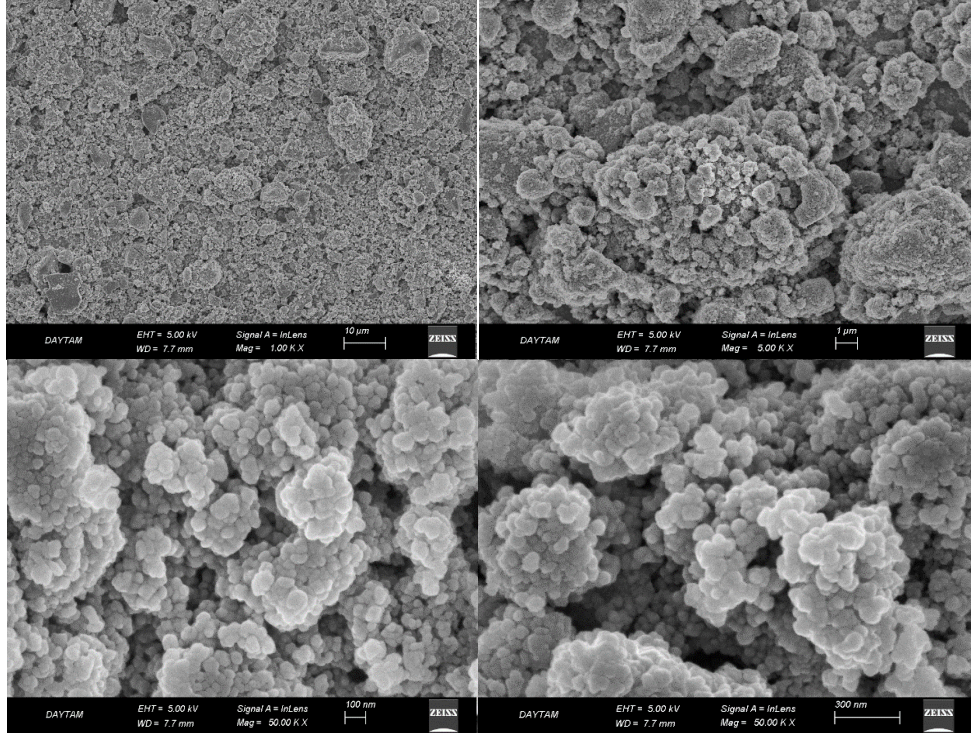
7. BULGULAR

Bu bölümde üretilen saf TiO_2 , saf ZnO , 1:3 oranında TiO_2/ZnO , 3:1 oranında TiO_2/ZnO ve son olarak 1:1 oranında TiO_2/ZnO pillerinin; SEM, XRD, EDX ve Elektriksel karakterizasyon sonuçları ve bu sonuçlara dayalı yorumlar yapılmıştır.

7.1. Taramalı Elektron Mikroskopi (SEM) Görüntüleri

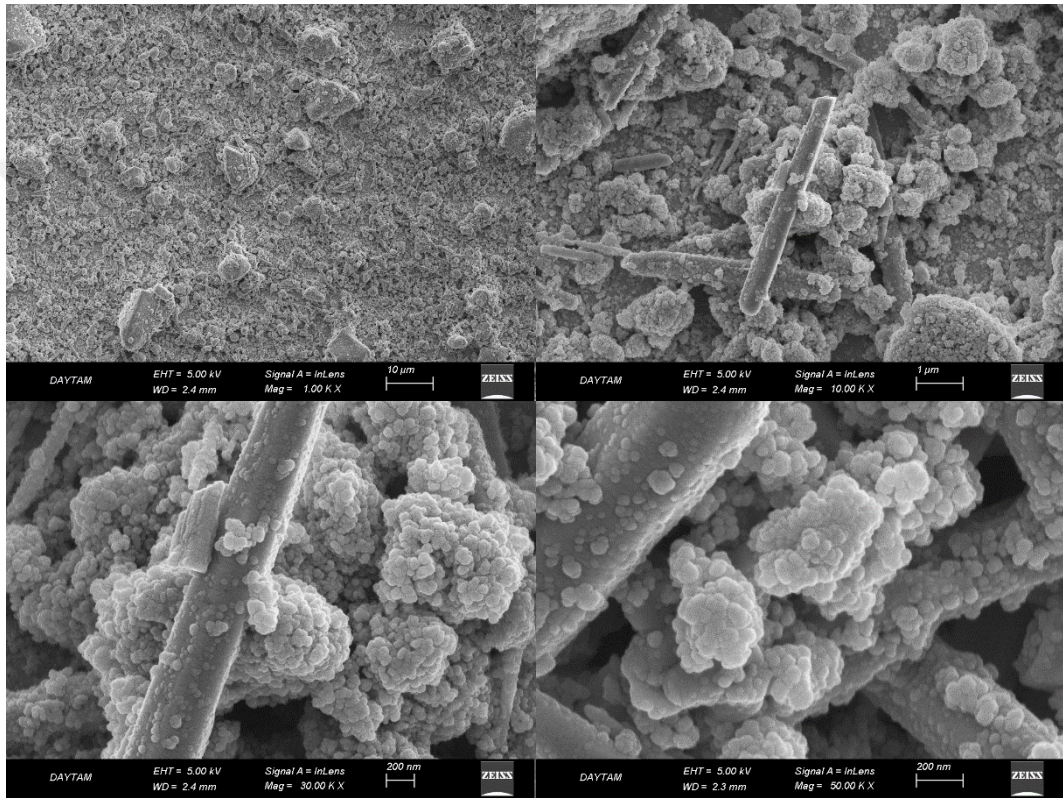
Beş farklı numune için yapılan SEM analizleri (Saf TiO_2 , saf ZnO , 1:3 oranında TiO_2/ZnO , 3:1 oranında TiO_2/ZnO ve son olarak 1:1 oranında TiO_2/ZnO) incelendiğinde oluşan yapının homojen olarak dağıldığı görülmüştür. Nano boyutlu taneciklerinin oluştuğu da 200 nm ölçekli çekimlerde net bir şekilde ortaya çıkmaktadır. ZnO parçacıkları çubuksu bir yapıya sahipken TiO_2 parçacıkları kabartmalı bir yapıya sahiptir. Aşağıdaki verilen Şekil (7.1) –(7.5)’de beş numunenin ayrı ayrı SEM görüntüleri mevcuttur.

Farklı ölçeklerde görüntülenmiş saf TiO_2 ince filmlerin SEM görüntüleri Şekil 7.1’de gösterilmiştir. SEM görüntülerini incelediğimiz zaman sıkıca paketlenmiş nano yapıda partiküllerden oluştuğu görülmektedir. Elde edilen SEM görüntülerinde kaplama yoğunluğu ve yüzey morfolojisinin partiküllerdeki düzgünlüğü değiştirdiğini görmekteyiz. Fakat nano taneciklerin boyutlarını göz önüne aldığımızda önemli bir değişiklik olmamıştır.



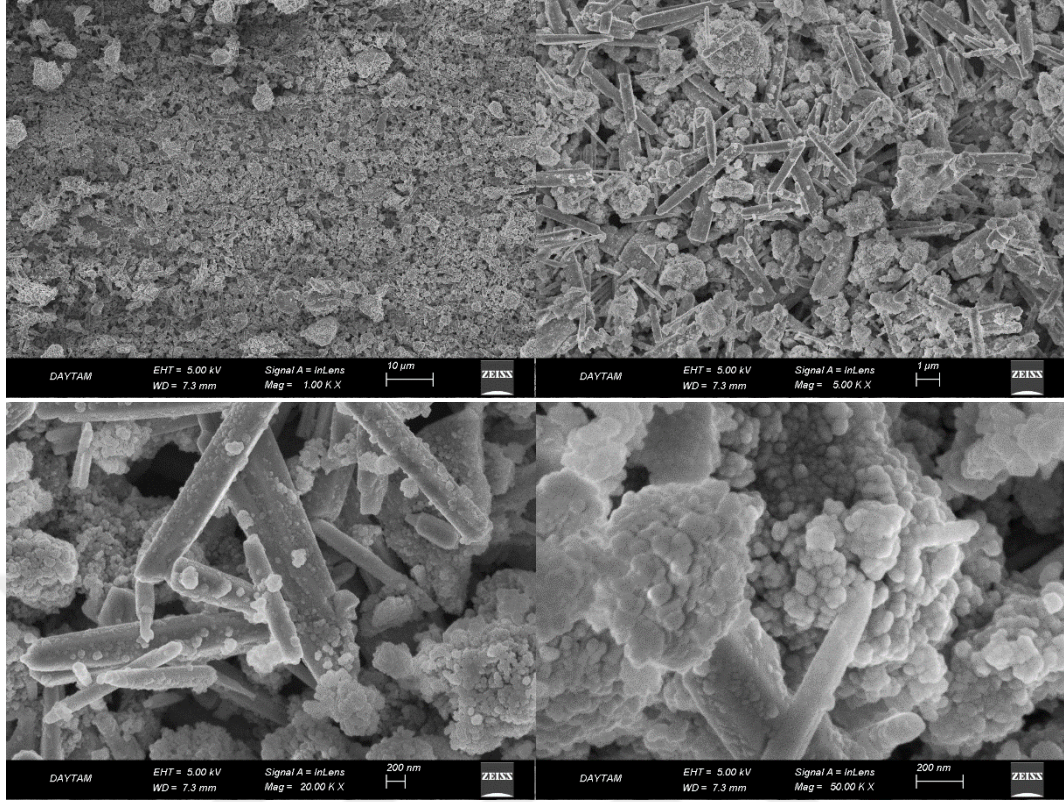
Şekil 7.1. Saf TiO_2 SEM görüntüleri.

Farklı ölçeklerde görüntülenmiş TiO_2/ZnO 3:1 ince filmlerin SEM görüntüleri Şekil 7.2’de gösterilmiştir. SEM görüntülerini incelediğimiz zaman TiO_2 ’nin kabartmalı bir yapıyı, ZnO ’nun ise çubuğu andırdığı ve bu iki yarı iletken metal oksit malzemenin sıkıca paketlenmiş nano yapıda partiküllerden oluştuğu görülmektedir. Elde edilen SEM görüntülerinde kaplama yoğunluğu ve yüzey morfolojisini incelediğimizde saf TiO_2 kaplamasına nazaran kompozit bileşimin daha pürüzlü bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Fakat nano taneciklerin boyutlarını göz önüne aldığımızda önemli bir değişiklik olmamıştır.



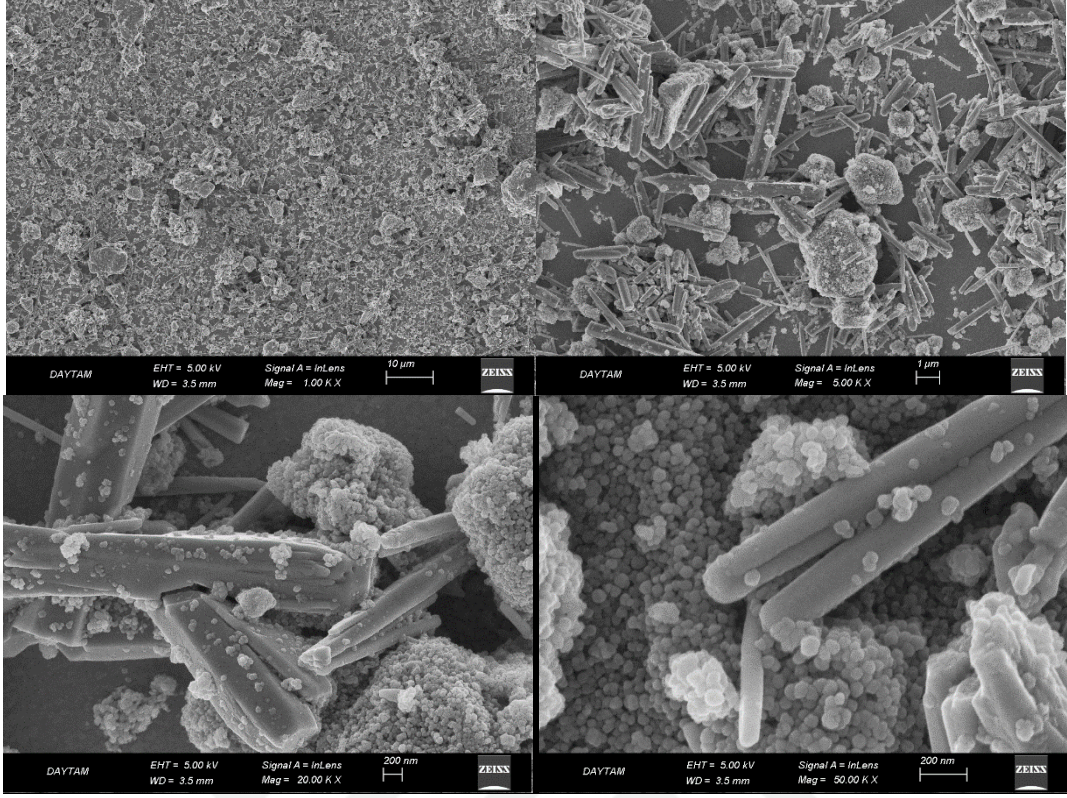
Şekil 7.2. TiO_2/ZnO 3:1 SEM görüntüleri.

Farklı ölçeklerde görüntülenmiş TiO_2/ZnO 1:1 ince filmlerin SEM görüntüleri Şekil 7.3’de gösterilmiştir. SEM görüntülerini incelediğimiz zaman TiO_2 ’nin kabartmalı bir yapıyı, ZnO ’nun ise çubuğu andırdığı ve bu iki yarı iletken malzemenin sıkıca paketlenmiş nano yapıda partiküllerden oluştuğu görülmektedir. Elde edilen SEM görüntülerinde kaplama yoğunluğu ve yüzey morfolojisini incelediğimizde ZnO miktarı arttıkça kaplamanın daha pürüzlü bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Fakat nano taneciklerin boyutlarını göz önüne aldığımızda önemli bir değişiklik olmamıştır.



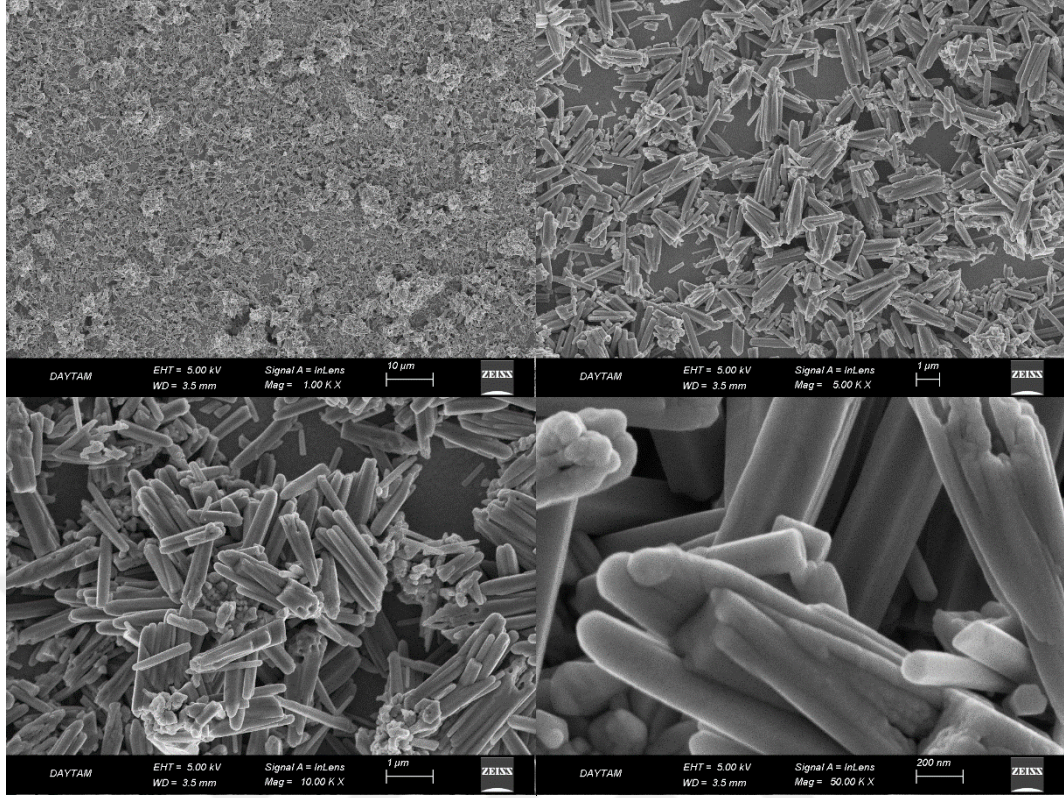
Şekil 7.3. TiO₂/ZnO 1:1 SEM görüntüleri.

Farklı ölçeklerde görüntülenmiş TiO₂/ZnO 1:3 ince filmlerin SEM görüntüleri Şekil 7.4’de gösterilmiştir. SEM görüntülerini incelediğimiz zaman TiO₂’nin kabartmalı bir yapıyı, ZnO’nun ise çubuğu andırdığı ve bu iki yarı iletken metal oksit malzemenin sıkıca paketlenmiş nano yapıda partiküllerden oluştuğu görülmektedir. Elde edilen SEM görüntülerinde kaplama yoğunluğu ve yüzey morfolojisini incelediğimizde ZnO miktarı arttıkça kaplamanın daha pürüzlü bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Fakat nano taneciklerin boyutlarını göz önüne aldığımızda önemli bir değişiklik olmamıştır.



Şekil 7.4. TiO_2/ZnO 1:3 SEM görüntüleri.

Farklı ölçeklerde görüntülenmiş saf ZnO ince filmlerin SEM görüntüleri Şekil 7.5’de verilmiştir. SEM görüntülerini incelediğimiz zaman, ZnO’nun çubuğu andırdığı ve bu çubuksu yapıların sıkıca paketlenmiş nano yapıda partiküllerden oluştuğu görülmektedir. Elde edilen SEM görüntülerinde kaplama yoğunluğu ve yüzey morfolojisini incelediğimizde saf ZnO’daki çubuksu yapıdan kaynaklı olarak kaplamanın pürüzlü bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Fakat nano taneciklerin boyutlarını göz önüne aldığımızda önemli bir değişiklik olmamıştır.



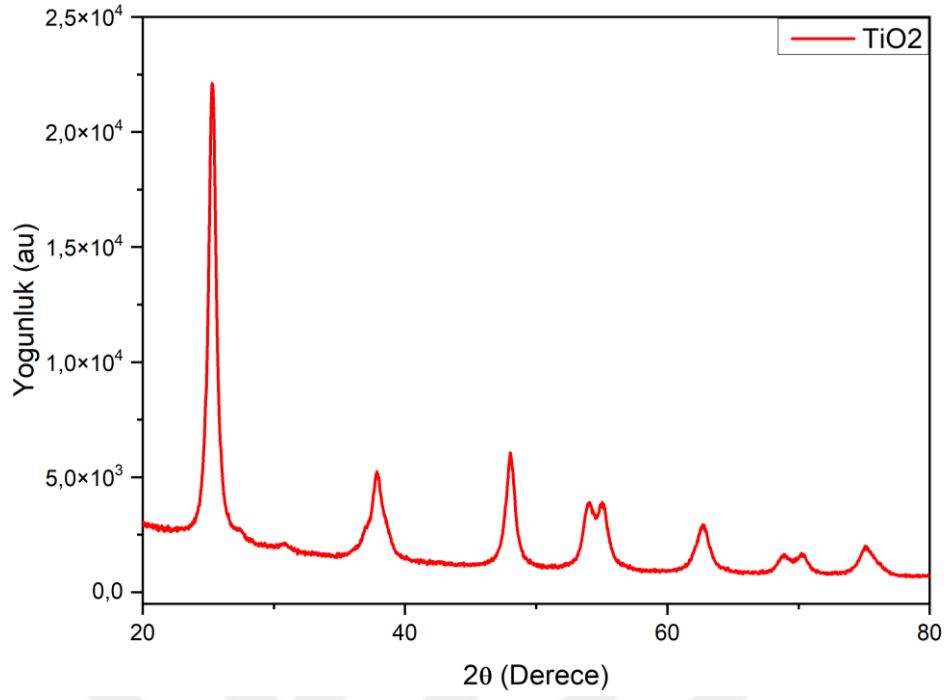
Şekil 7.5. Saf ZnO SEM görüntüleri.

İncelemeler neticesinde beş farklı numune için yapılan SEM analizinin (Saf TiO_2 , saf ZnO, 1:3 oranında TiO_2/ZnO , 3:1 oranında TiO_2/ZnO ve son olarak 1:1 oranında TiO_2/ZnO) yapılan literatür çalışmalarını desteklediği görülmüştür.

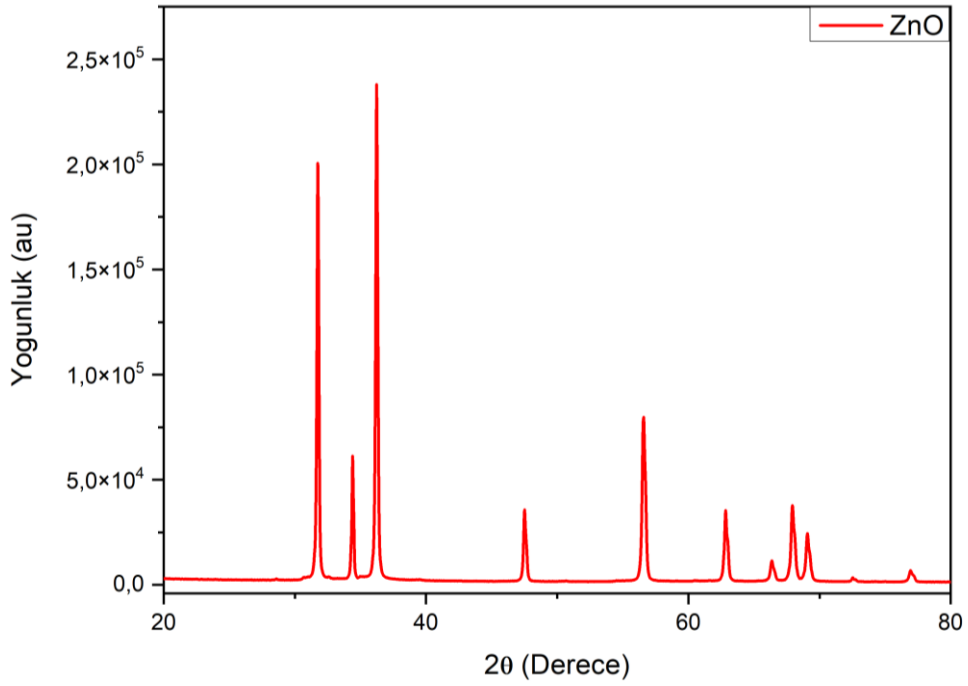
7.2. XRD Sonuçları

XRD (X ışını kırınımı difraksiyonu) ölçümlerimiz 20-90 derece arasında alınmıştır. XRD analizleri, TiO_2 ve ZnO tozların kristal yapısını ve faz analizlerini incelemek adına yapılmıştır. XRD sonuçlarına göre hidrotermal yöntemi ile hazırlanan $\text{TiO}_2\text{-ZnO}$ 'da anataz ve kristalize yapının olduğu görülmektedir.

TiO_2 için Şekil 7.6'de verilen grafiğe göre maksimum pik değeri 25.30° açısında oluşurken, ZnO için Şekil 7.7'de verilen grafiğe göre maksimum pik değer 36.23° açısında oluşmuştur. Ölçüm açısı arttırıldıkça anataz ve kristalize yapı devam etmiştir fakat pik şiddetlerinin düştüğü görülmektedir. TiO_2 ve ZnO için elde edilen XRD grafik sonuçları aşağıda verilmiştir.



Şekil 7.6. TiO₂ için XRD grafiği.



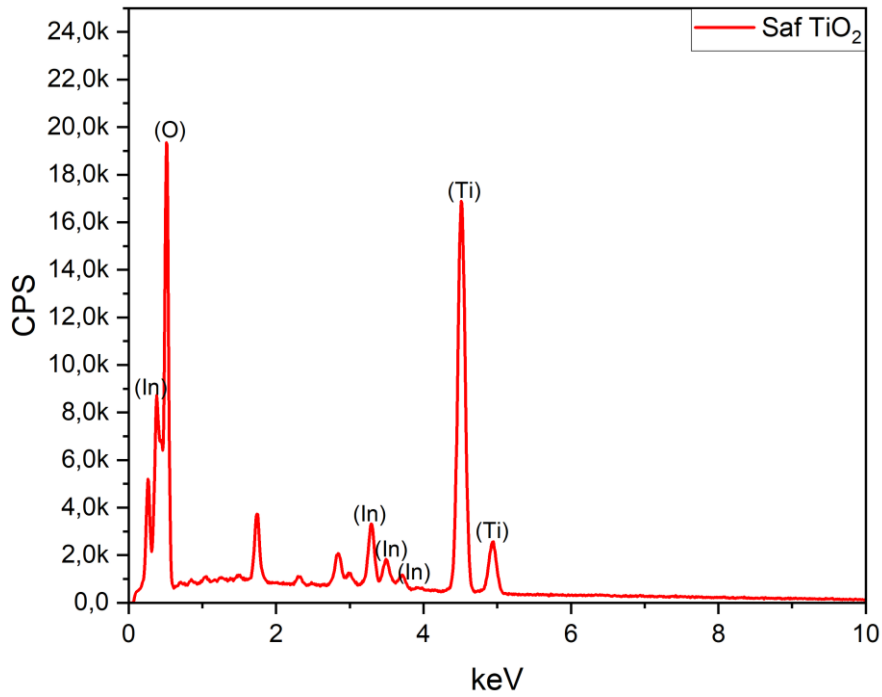
Şekil 7.7. ZnO için XRD grafiği.

TiO₂ ve ZnO için yapılan XRD analizlerinin çalışma sonuçlarını desteklediği sonucuna varılmıştır.

7.3. EDX Sonuçları

Üretilen yarı iletken katmanın nano partikül yapılarındaki kompozisyonu incelemek adına Enerji Dağılımı X-ışını Spektroskopi (EDX) analizleri yapıldı. Analiz sonuçları kullandığımız malzemeleri ve oranlarını destekler niteliktedir. EDX grafiklerinde görülen ‘In’ pikleri indiyum katkılı FTO camları temsil etmektedir. Elde edilen 5 farklı yarı iletken malzemenin (Saf TiO_2 , saf ZnO , 1:3 oranında TiO_2/ZnO , 3:1 oranında TiO_2/ZnO ve son olarak 1:1 oranında TiO_2/ZnO) oranları ve grafik sonuçları aşağıda verilmiştir.

Şekil 7.8’i incelediğimizde saf TiO_2 nano taneciklerinin kimyasal kompozisyonu ve pik değerleri net bir şekilde görülmektedir. Analiz edilen numuneler FTO cam üzerinde bulunduğundan EDX sonuçlarında görmüş olduğumuz ‘In’ pikleri indiyum katkılı FTO camlarını temsil etmektedir. Saf TiO_2 yarı iletken malzemesinin konsantrasyonuna bağlı olarak Tablo 7.1’de de görüldüğü üzere % 45,64 Ti ve % 43,80 O belirlenmiştir.

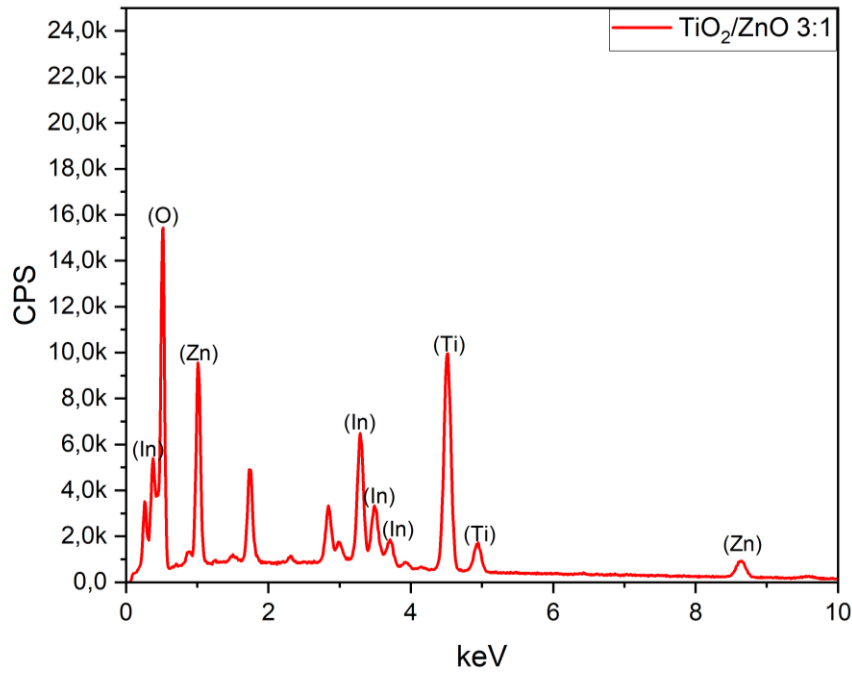


Şekil 7.8. Saf TiO_2 için EDX grafiği.

Tablo 7.1. Saf TiO₂ yarı iletken malzemenin ve iletken camın EDX sonuçları.

Element	Ağırlık %	Atomik %	Hata %	Net Int.
O K	43,80	71,47	10,04	3944,88
Si K	1,80	1,67	5,46	696,50
In L	8,76	1,99	3,92	1007,16
Ti K	45,64	24,87	2,24	7011,68

Şekil 7.9'yi incelediğimizde TiO₂/ZnO 3:1 nano taneciklerinin kimyasal kompozisyonu ve pik değerleri net bir şekilde görülmektedir. Analiz için gönderilen numuneler FTO cam üzerinde bulunduğundan EDX sonuçlarında görmüş olduğumuz 'In' pikleri indiyum katkılı FTO camlarını temsil etmektedir. TiO₂/ZnO 3:1 yarı iletken malzemesinin konsantrasyonuna bağlı olarak Tablo 7.2'de de görüldüğü üzere % 28,13 Ti , % 33,54 O ve % 14,37 Zn belirlenmiştir.

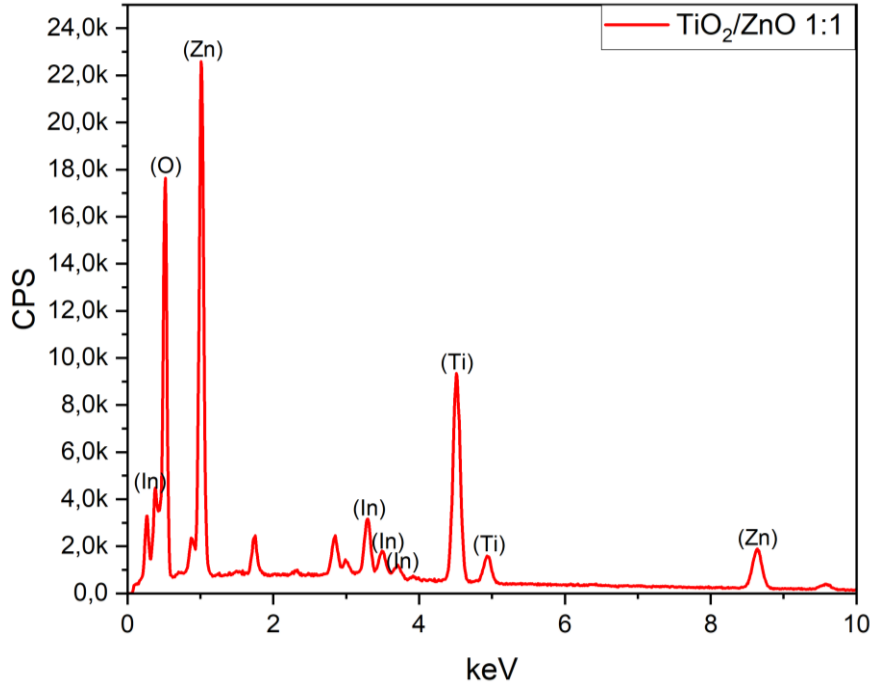


Şekil 7.9. TiO₂/ZnO 3:1 için EDX grafiği.

Tablo 7.2. TiO₂/ZnO 3:1 yarı iletken malzemenin ve iletken camın EDX sonuçları.

Element	Ağırlık %	Atomik %	Hata %	Net Int.
O K	33,54	65,56	9,94	3191,22
Si K	3,17	3,53	5,84	1064,45
In L	20,79	5,66	2,79	2207,00
Ti K	28,13	18,37	2,90	4039,78
Zn K	14,37	6,87	6,77	421,76

Şekil 7.10'yi incelediğimizde TiO_2/ZnO 1:1 nano taneciklerinin kimyasal kompozisyonu ve pik değerleri net bir şekilde görülmektedir. Analiz için gönderilen numuneler FTO cam üzerinde bulunduğundan EDX sonuçlarında görmüş olduğumuz 'In' pikleri indiyum katkılı FTO camlarını temsil etmektedir. TiO_2/ZnO 1:1 yarı iletken malzemesinin konsantrasyonuna bağlı olarak Tablo 7.3'de de görüldüğü üzere % 25,40 Ti , % 31,47 O ve % 32,88 Zn belirlenmiştir.

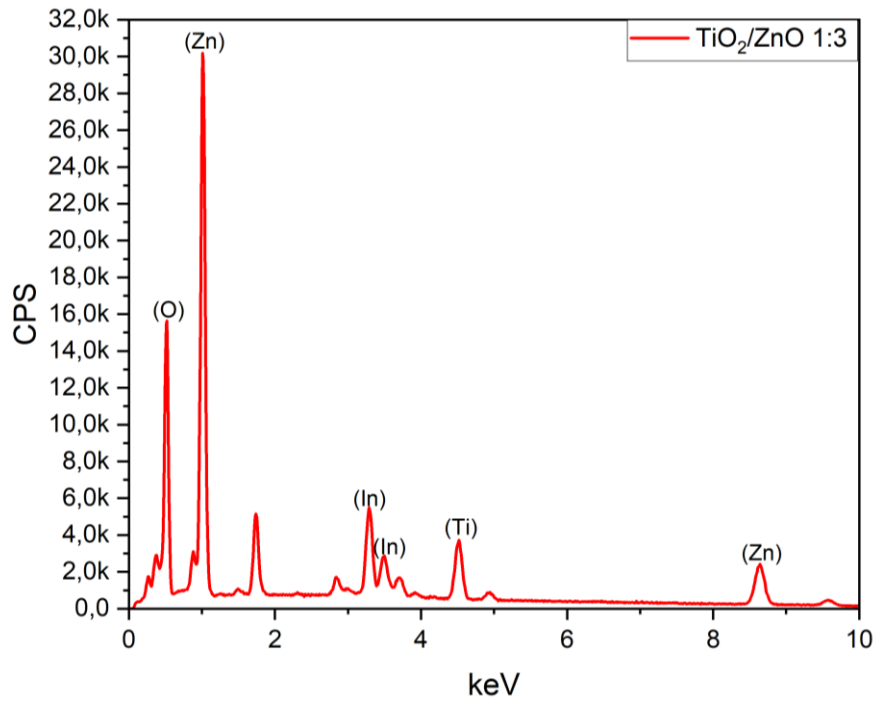


Şekil 7.10. TiO_2/ZnO 1:1 için EDX grafiği.

Tablo 7.3. TiO_2/ZnO 1:1 yarı iletken malzemenin ve iletken camın EDX sonuçları.

Element	Ağırlık %	Atomik %	Hata %	Net Int.
O K	31,47	63,07	9,51	3553,32
Si K	1,09	1,24	7,58	329,8
In L	9,16	2,56	3,63	946,61
Ti K	25,40	17,00	2,72	3693,12
Zn K	32,88	16,13	4,88	930,65

Şekil 7.11'yi incelediğimizde TiO_2/ZnO 1:3 nano taneciklerinin kimyasal kompozisyonu ve pik değerleri net bir şekilde görülmektedir. Analiz için gönderilen numuneler FTO cam üzerinde bulunduğundan EDX sonuçlarında görmüş olduğumuz 'In' pikleri indiyum katkılı FTO camlarını temsil etmektedir. TiO_2/ZnO 1:3 yarı iletken malzemesinin konsantrasyonuna bağlı olarak Tablo 7.4'de de görüldüğü üzere % 9,44 Ti, % 24,93 O ve % 43,57 Zn belirlenmiştir.

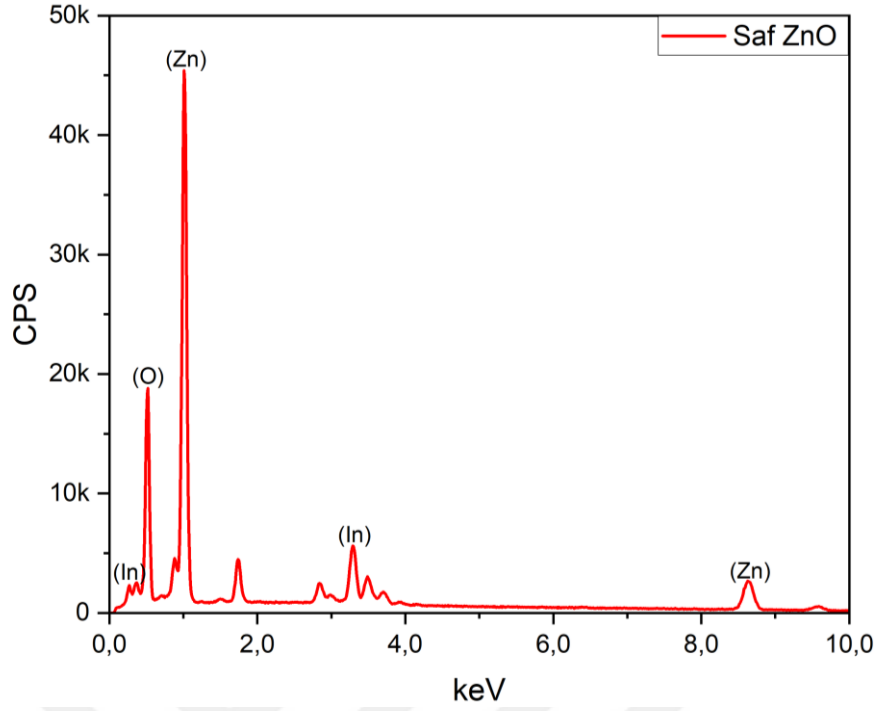


Şekil 7.11. TiO₂/ZnO 1:3 için EDX grafiği.

Tablo 7.4. TiO₂/ZnO 1:3 yarı iletken malzemenin ve iletken camın EDX sonuçları.

Element	Ağırlık %	Atomik %	Hata %	Net Int.
O K	24,93	57,35	9,21	3035,83
Si K	3,84	5,03	6,65	1036,15
In L	18,22	5,84	2,66	1734,70
Ti K	9,44	7,25	3,72	1271,38
Zn K	43,57	24,53	4,49	1179,60

Şekil 7.12'yi incelediğimizde saf ZnO nano taneciklerinin kimyasal kompozisyonu ve pik değerleri net bir şekilde görülmektedir. Analiz için gönderilen numuneler FTO cam üzerinde bulunduğundan EDX sonuçlarında görmüş olduğumuz 'In' pikleri indiyum katkılı FTO camlarını temsil etmektedir. Saf ZnO yarı iletken malzemesinin konsantrasyonuna bağlı olarak Tablo 7.5'de de görüldüğü üzere % 26,13 O ve % 51,19 Zn belirlenmiştir.



Şekil 7.12. Saf ZnO için EDX grafiği.

Tablo 7.5. Saf ZnO yarı iletken malzemenin ve iletken camın EDX sonuçları.

Element	Ağırlık %	Atomik %	Hata %	Net Int.
O K	26,13	60,43	8,66	3746,44
Si K	3,31	4,35	7,15	840,73
In L	19,38	6,25	2,51	1788,94
Zn K	51,19	28,97	4,35	1358,41

İncelemeler neticesinde beş farklı numune için yapılan EDX analizinin (Saf TiO_2 , saf ZnO, 1:3 oranında TiO_2/ZnO , 3:1 oranında TiO_2/ZnO ve son olarak 1:1 oranında TiO_2/ZnO) çalışma sonuçlarını desteklediği görülmüştür.

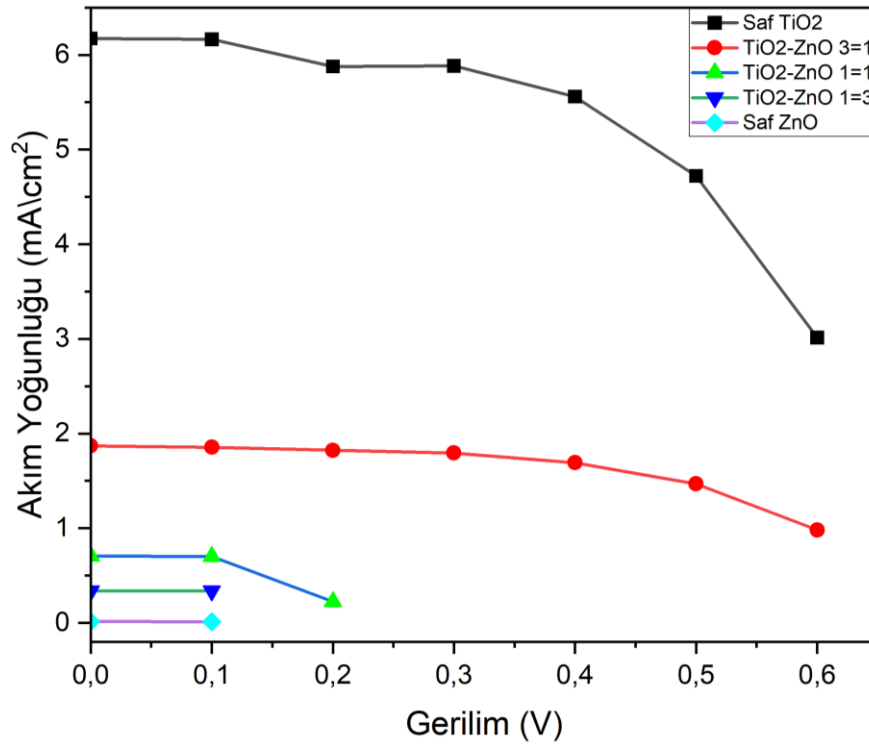
7.4. Elektriksel Karakterizasyon Sonuçları

Solar simülatör cihazı ile ölçümünü aldığımız pillerin verimlerini yüksek değerden düşük değere doğru sıralayacak olursak saf TiO_2 , 3:1 oranında TiO_2/ZnO , 1:1 oranında TiO_2/ZnO , 1:3 oranında TiO_2/ZnO ve saf ZnO şeklindedir. En yüksek verimi % 2,3613 ile saf TiO_2 içeren BDGP'nin, en düşük verimin ise % 0,0013 ile saf ZnO içeren BDGP'nin sergilediği görülmüştür. Elde edilen bu verilere dayanarak ZnO oranı arttıkça verimin düştüğü tespit edilmiştir. Ayrıca BDGP'lerin η , V_{OC} , J_{SC} , FF, R_s ve R_{SH} değerleri Tablo 7.6'da verilmiştir. Saf TiO_2 miktarı arttıkça V_{OC} ve I_{SC} değerlerinin yükseldiği görülmüştür.

Tablo 7.6. Solar simülatör cihazı ile yapılan ölçümlerde elde edilen veriler.

	η (%)	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF	R_s (ohm)	R_{sh} (ohm)
Saf TiO ₂	2,3613	0,6	6,1730	0,6375	70,5816	1149,1610
TiO ₂ /ZnO 3:1	0,7346	0,6	1,8696	0,6548	226,8603	4163,1972
TiO ₂ /ZnO 1:1	0,0701	0,2	0,7053	0,4969	475,5111	76923,0769
TiO ₂ /ZnO 1:3	0,0337	0,1	0,3390	0,9950	0	199999,999
Saf ZnO	0,0013	0,1	0,0136	0,9512	0	499999,999

BDGP'lerde en iyi yarı iletken metal oksit malzemelerden biri TiO₂'dir. TiO₂'nin yüksek verime sahip olmasının nedeni kimyasal olarak kararlı bir yapıya sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Anataz yapıdaki TiO₂, yüzey alanı, gözenekli yapısı, gözeneklerin çapı, şeffaflığı ve film kalınlığı bakımından yüksek verim sergilemektedir [4]. Şekil 7.13'de elde edilen fotovoltaiik parametreler karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 7.13. Üretilen pillerin J_{sc} -V grafiği.

Hidrotermal yöntemi ile sentezlenen TiO_2 nanopartikülleri ve ZnO nano çubuklarının 100 nm boyutlarında olduğu görülmüştür. Üretilen BDGP'lerde en yüksek η , V_{OC} ve J_{SC} saf TiO_2 'de %2,3613, 0,6 V ve 6,1730 mA/cm² olarak elde edilmiştir. Açıkça görülmektedir ki, η , V_{OC} ve J_{SC} değerleri, TiO_2 nano partikülerin ZnO nano çubuklarıyla hibritleşmesi sonucunda ciddi bir şekilde düşmüştür. Bu durum, hibritleşme sonrasında elektron taşınımının düşmesi ve fotoanottan elektrolite aktarılan elektronların rekombinasyon oranının artmasından kaynaklanmaktadır. Böylece ZnO nanoçubuklar, TiO_2 nanopartiküler arasında sinerjik olarak bir azalmaya neden olmuştur.



8. SONUÇLAR

Yapılan bu tez çalışmasında boya duyarlı kompozit yarı iletken elektron alıcıların hibrit güneş pillerine etkileri incelenmiştir. Kompozit malzeme olarak TiO_2 ve ZnO yarı iletkenleri kullanılmış olup toplamda beş adet pil üretilmiştir. TiO_2 ve ZnO metal oksit tozlarının tanecik boyutlarının daha küçük olması adına hidrotermal yöntem ile üretim yapılmıştır. İlaveten ZnO nano çubukların tanecik boyutunu daha da küçültmek adına üretim esnasında pH değeri 10 seviyesinde tutulmuştur. Çalışmada nano tanecikler kullanıldığı için temizliğe ekstra özen gösterilmiştir. Üretilen BDGP'ler için kullanılan FTO camlar basit RCA yönetimiyle temizlenmiş, toz kapmaması adına vakumlu desikatör içerisinde muhafaza edilmiştir.

Üretilen piller saf TiO_2 , saf ZnO , 1:3 oranında TiO_2/ZnO , 3:1 oranında TiO_2/ZnO ve son olarak 1:1 oranında TiO_2/ZnO dan oluşmaktadır. Üretilen bu pillerde FTO cam üzerine $0,36 \text{ cm}^2$ alanına sahip yarı iletken kompozit malzemeler ile kaplanmış, boya maddesi olarak Rutenyum kullanılmış, elektron akışı elektrolit ile sağlanmış ve karşıt elektrot olarak platinyum kullanılmıştır.

Elde edilen fotoanotların yapısal ve morfolojik karakterizasyonu XRD, SEM ve EDX ile analiz edilmiştir.

SEM analizleri incelendiğinde saf TiO_2 ince filmlerin sıkıca paketlenmiş nano yapıda partiküllerden oluştuğu görülmüştür. Ayrıca kaplama yoğunluğu ve yüzey morfolojisinin partiküllerdeki düzgünlüğü değiştirdiği sonucuna varılmıştır. TiO_2/ZnO 3:1 ince filmlerin SEM görüntülerini incelediğimiz zaman TiO_2 'nin kabartmalı bir yapıyı, ZnO 'nun ise çubuğu andırdığı ve bu iki yarı iletken metal oksit malzemenin sıkıca paketlenmiş nano yapıda partiküllerden oluştuğu görülmüştür. İlaveten kaplama yoğunluğu ve yüzey morfolojisini incelediğimizde saf TiO_2 kaplamasına nazaran kompozit bileşimin daha pürüzlü bir yapıya sahip olduğu sonucuna varılmıştır. TiO_2/ZnO 1:1 ince filmlerin SEM görüntülerini incelediğimiz zaman TiO_2 'nin kabartmalı bir yapıyı, ZnO 'nun ise çubuğu andırdığı ve bu iki yarı iletken malzemenin sıkıca paketlenmiş nano yapıda partiküllerden oluştuğu görülmüştür. Ayrıca kaplama yoğunluğu ve yüzey morfolojisini incelediğimizde ZnO miktarı arttıkça kaplamanın daha pürüzlü bir yapıya sahip olduğu sonucuna varılmıştır. TiO_2/ZnO 1:3 ince filmlerin SEM görüntülerini incelediğimiz zaman TiO_2 'nin kabartmalı bir yapıyı, ZnO 'nun ise çubuğu andırdığı ve bu iki yarı iletken metal oksit malzemenin sıkıca paketlenmiş nano yapıda partiküllerden oluştuğu görülmüştür. Elde edilen SEM görüntülerinde kaplama yoğunluğu ve yüzey morfolojisini incelediğimizde ZnO miktarı arttıkça kaplamanın daha pürüzlü bir yapıya sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Saf ZnO ince filmlerin SEM görüntülerini incelediğimiz zaman, ZnO 'nun çubuğu andırdığı ve bu çubuksu yapıların sıkıca paketlenmiş nano yapıda partiküllerden oluştuğu görülmüştür. Kplama yoğunluğu ve yüzey morfolojisini incelediğimizde saf ZnO 'daki çubuksu yapıdan kaynaklı olarak kaplamanın pürüzlü

bir yapıya sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Tüm numuneler için nano taneciklerin boyutları göz önüne alındığında önemli bir değişiklik olmadığı saptanmıştır.

XRD sonuçlarına göre $\text{TiO}_2\text{-ZnO}$ 'da anataz ve kristalize yapının olduğu görülmüştür. TiO_2 için maksimum pik değeri 25.30° açısında ZnO için 36.23° açısında olduğu gözlenmiştir. Ölçüm açısı arttırıldıkça anataz ve kristalize yapının devam ettiği fakat pik şiddetlerinin düştüğü tespit edilmiştir. Minerolojik karakterizasyon sonuçlarının yapılan çalışmayı doğruladığı sonucuna varılmıştır.

EDX analizlerinin kullandığımız malzemeleri ve oranlarını destekler nitelikte olduğu görülmüştür. Ayrıca EDX sonuçlarında görülen 'In' piklerinin, fotoanot cam altlık olarak kullanılan indiyum katkılı FTO camların yapısından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır.

Üretilen pillerin elektriksel karakterizasyon ölçümleri solar simülatör cihazı ile 100 mW/cm^2 (1 sun) aydınlatma şartları altında gerçekleştirilmiştir. Beş farklı şekilde üretilen pillerin sonuçları incelendiği zaman en yüksek verimi % 2,36 ile saf TiO_2 pastasına sahip pilin sergilediği en düşük verimi ise % 0,0013 ile saf ZnO pastasına sahip pilin sergilediği görülmüştür. Numunelerdeki ZnO miktarı arttıkça verimin düştüğü anlaşılmıştır. Bu durum TiO_2 'nin kimyasal olarak daha kararlı bir yapıya sahip olmasıyla bağdaştırılmıştır.

Nano çalışılan ortamlarda verimi etkileyen en önemli faktörlerden birisi çalışılan ortamın ve malzemelerin temizliğidir. Nano boyuttaki çalışmaların temiz oda (clean room) şartlarında yapılması istenilen hedeflere ulaşma noktasında çok önemlidir. Bu nedenle daha karlı ve yüksek verimlere sahip pillerin üretilmesi adına deneylerin temiz oda şartlarında yapılmasının pil performanslarını daha iyi bir seviyeye taşıyacağı öngörülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] Bıkçe M., Çelik A. R., ve Çakır M. (2016). “Eğitim Laboratuvarlarında Güneş Enerji Verimliliğinin Araştırılması: İskenderun Örneği”, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Derg.*, c. 31, sayı 1, ss. 395–404, doi: 10.21605/cukurovaummfd.317888.
- [2] Özgöçmen A., (2007). “Güneş Pillerini Kullanarak Elektrik Üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [3] Akman E., Akin S., Karanfil K., ve Sonmezoglu S., (2013). “*Organik Güneş Pilleri*”, Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, c. 14, ss. 1-30.
- [4] 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.
- [5] Kapluhan E., (2014). “Enerji coğrafyası açısından bir inceleme: Güneş enerjisinin Dünya’daki ve Türkiye’deki kullanım durumu”, *Coğrafya Derg.*, sayı 29, ss. 70–98.
- [6] Güler Ö., (2009). “Wind energy status in electrical energy production of Turkey”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, c. 13, sayı 2, ss. 473–478, doi: 10.1016/j.rser.2007.03.015.
- [7] Aal S. A. ve Awadh D., (2022) “The effect of anchoring group on the performances of metal-free phtalocyanine and metallophthalocyanine dye/titanium dioxide interface for dy-sensitized solar cells”, *Surfaces and Interfaces*, s. 102089, doi: 10.1016/j.surfin.2022.102089.
- [8] Prevenslik T. V., (2003). “The Cavity QED Induced Thermophotovoltaic Effect”, *by Jt. Grad. Sch. Energy Environ*, c. 4, ss. 163–183.
- [9] Yakimov A., Forrest S., (2002). “Arayüzey metalik nanokümleri içeren yüksek foto voltajlı çoklu heterojonksiyonlu organik güneş pilleri”, *Appl. Phys. Lett.*, c. 80, sayı 9, ss. 1667–1670.
- [10] Liang L., Y., Xu, Z., Xia, J., Tsai, S., Wu, Y., Li, G., Ray, C., Yu, (2010). “Parlak Gelecek İçin —% 7,4’lük Güç Dönüştürme Verimliliği ile Toplu Heterojonksiyonlu Polimer Güneş Pilleri”, *Adv. Mater.*, c. 22, sayı 20, ss. 135–138.
- [11] Justin Raj C. vd., (2012). “Electrochemical properties of TiO₂ encapsulated ZnO nanorod aggregates dye sensitized solar cells”, *J. Alloys Compd.*, c. 537, ss. 159–164, doi: 10.1016/j.jallcom.2012.05.012.
- [12] Kumara G. R. A., Okuya M., Murakami K., Kaneko S., Jayaweera V. V., ve Tennakone K., (2004). “Dye-sensitized solid-state solar cells made from magnesiumoxide-coated nanocrystalline titanium dioxide films: Enhancement of the efficiency”, *J. Photochem. Photobiol. A Chem.*, c. 164, sayı 1–3, ss. 183–185, doi: 10.1016/j.jphotochem.2003.11.020.
- [13] Grätzel M., (2003) “Dye-sensitized solar cells”, *J. Photochem. Photobiol. C Photochem. Rev.*, c. 4, ss. 145–153, doi: 10.1016/S1389-5567(03)00026-1.
- [14] Gözel M., (2021). “Quercetin Cu(II) Kompleksi İle Duyarlaştırılmış TiO₂ Tabanlı Boya Duyarlı Güneş Pili Fabrikasyonu ve Karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, Batman Üniversitesi, Fizik Anabilim Dalı.
- [15] Liu R., Yang W. D., Qiang L. S., ve Liu H. Y., (2012) “Conveniently fabricated heterojunction ZnO/TiO₂ electrodes using TiO₂ nanotube arrays for dye-sensitized solar cells”, *J. Power Sources*, c. 220, ss. 153–159, doi: 10.1016/j.jpowsour.2012.07.097.

- [16] Manibalan G., Murugadoss G, Thangamuthu R., Mohan Kumar R., ve Jayavel R., (2019) “Facile synthesis of heterostructure CeO₂-TiO₂ nanocomposites for enhanced electrochemical sensor and solar cell applications”, *J. Alloys Compd.*, c. 773, ss. 449–461, doi: 10.1016/j.jallcom.2018.09.210.
- [17] Seçkin E., (2010). “Titanyum anodizasyonu yöntemi ile boyar maddeli güneş pili hücresi üretilmesi ve verim karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [18] Fritts C. E., (1883). “On a new form of selenium cell, and some electrical discoveries made by its use”, *Am. J. Sci.*, sayı 156, ss. 465–472, doi: 10.2475/AJS.S3-26.156.465.
- [19] Boz M., (2015). “Katkılandırılmış TiO₂ İnce Filmlerin Üretilmesi, Karakterizasyonu ve Boya Katkılı Güneş Pili Aygıtlarının Geliştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [20] Siemens W., (1885). “On the electromotive action of illuminated selenium, discovered by Mr. Fritts, of New York”, *Van Nostrand's Engineering Magazine*, s. 514.
- [21] Özkacar T., (2021). “Fotoanot Tavlama Sıcaklığı Ve Elektrolit Türünün Boya Duyarlı Güneş Pili Performansına Etkisinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [22] Çelik V., (2017). “TiO₂ mesoporous/ZnO nanotel tabanlı tandem (katmanlı) nano yarıiletkenlerin üretilerek optoelektronik özelliklerinin incelenmesi ve boya ile duyarlı fotovoltaj hücrelerin üretilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Yalova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [23] Altaş İ. H., (1998). “Fotovoltaj Güneş Pilleri : Yapısal Özellikleri ve Karakteristikleri”, *Enerji. Elektr. Elektromekanik-3e*, c. 47, ss. 66–71.
- [24] Aydoğan Ş., (2011). *PN Eklem Diyodu*, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara.
- [25] Ereker D., (2019). “Vanadyum Pentaoksit Fotoanot Malzemesinin Nanokristal TiO₂ Tabanlı Güneş Pillerinin Fotovoltaj Özelliklerine Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Nanoteknoloji Anabilim Dalı.
- [26] Örnek O., (2012). “İletken Polimer Tabanlı Hibrit Güneş Pili Üretimi ve Karakterizasyonu”, Doktora Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı.
- [27] A. Kösemen, “Yarı İletken Metal Oksit Nanoyapıların Üretimi, Karakterizasyonu ve Ters Hibrit Güneş Piline Uygulamaları”, Gebze Teknik Üniversitesi, 2016.
- [28] İnci H., (2010). “Hibrit kaplama yöntemi ile ZnO/Cu₂O güneş pili yapımı”, Yüksek Lisans Tezi, Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [29] Cho E. C. vd., (2007). “Silicon quantum dots in a dielectric matrix for all-silicon tandem solar cells”, *Adv. Optoelectron.*, c. 2007, s. 11, doi: 10.1155/2007/69578.
- [30] Demir Z., (2018). “Farklı Konsantrasyonlarda Sentezlenen TiO₂ / ZnO Nanokompozit Yapıların Karakterizasyonu ve Boya Duyarlı Güneş Pili Performanslarının İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [31] Polo A. S., Itokazu M. K., Murakami Iha N. Y., (2004). “Metal complex sensitizers in dye-sensitized solar cells”, *Coord. Chem. Rev.*, c. 248, ss. 1343–1361, doi: 10.1016/j.ccr.2004.04.013.
- [32] Kocaman B., Tuncel S. A., (2014). “Boya Duyarlı Güneş Hücreleri İçin Yeni Sistemlerin Geliştirilmesi Ve Karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Nanoteknoloji ve Nanotıp Anabilim Dalı.
- [33] Çelik A. N., Koç F., (2020). “Polikristal Tür bir Fotovoltaj Panelin I-V Karakteristiğinin Analitik Modellenmesi ve Deneysel Validasyonu”, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknol.*

Derg., c. 8, sayı 4, ss. 2491–2515, doi: 10.29130/dubited.789691.

- [34] Akman E., (2020). “Bakır Katkılı TiO₂ Fotoanotlarının Boya Duyarlı Güneş Pilleri Performansı Üzerindeki Etkisi”, *Eur. J. Sci. Technol.*, sayı 18, ss. 129–135, doi: 10.31590/ejosat.672079.
- [35] Wolfbauer G., Bond A. M., Eklund J. C., Macfarlane D. R., (2021). “A channel flow cell system specifically designed to test the efficiency of redox shuttles in dye sensitized solar cells”, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, c. 70, ss. 80–101.
- [36] Chung I., Lee B., He J., Chang R. P. H., Kanatzidis M. G., (2012). “All-solid-state dye-sensitized solar cells with high efficiency”, *Nature*, c. 485, sayı 7399, ss. 486–489, doi: 10.1038/nature11067.
- [37] Yıldız Z. K., (2018). “TiO₂ based dye sensitized solar cells obtained by sol-gel method”, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği.
- [38] Dai S. vd., (2004). “Dye-sensitized solar cells , from cell to module”, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, c. 84, ss. 125–133, doi: 10.1016/j.solmat.2004.03.002.
- [39] Kosyachenko L. A., (2011). *Solar Cells: Dye-sensitized Devices*, Ukraine.
- [40] Granqvist C. G., (2007). “Transparent conductors as solar energy materials: A panoramic review”, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, c. 91, sayı 17, ss. 1529–1598, doi: 10.1016/j.solmat.2007.04.031.
- [41] Zulkifili A. N. B., Kento T., Daiki M., Fujiki A., (2015). “The Basic Research on the Dye-Sensitized Solar Cells (DSSC)”, *J. Clean Energy Technol.*, c. 3, sayı 5, ss. 382–387, doi: 10.7763/jocet.2015.v3.228.
- [42] Nazeeruddin K., Baranoff E., Gra M., (2011). “Dye-sensitized solar cells : A brief overview”, *Sol. Energy*, c. 85, ss. 1172–1178, doi: 10.1016/j.solener.2011.01.018.
- [43] Kim S., Yum J., Sung Y., (2005). “Flexible dye-sensitized solar cells using ZnO coated TiO₂ nanoparticles”, *J. Photochem. Photobiol. A Chemistry*, c. 171, ss. 269–273, doi: 10.1016/j.jphotochem.2004.10.019.

ÖZGEÇMİŞ

Abdullah DEMİR

[REDACTED]	
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]