



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

**FOTOANOT TAVLAMA SICAKLIĞI VE ELEKTROLİT
TÜRÜNÜN BOYA DUYARLI GÜNEŞ PİLİ PERFORMANSINA
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

TUĞÇE ÖZKACAR

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. MUHARREM GÖKÇEN**

DÜZCE, 2021

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FOTOANOT TAVLAMA SICAKLIĞI VE ELEKTROLİT
TÜRÜNÜN BOYA DUYARLI GÜNEŞ PİLİ PERFORMANSINA
ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Tuğçe ÖZKACAR tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Muharrem GÖKÇEN

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Muharrem GÖKÇEN

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Abdullah Yıldız
Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

Doç. Dr. Ersin ORHAN
Düzce Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 05/07/2021

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

5 Temmuz 2021

Tuğçe ÖZKACAR



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Prof. Dr. Muharrem GÖKÇEN'e en içten dileklerle teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili eşime ve aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

5 Temmuz 2021

Tuğçe ÖZKACAR

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	viii
KISALTMALAR.....	ix
SİMGELER	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ	1
2. TEORİK BİLGİLER	4
2.1. GÜNEŞ PİLLERİ	4
2.1.1. Güneş Pillerinin Tarihçesi.....	4
2.1.2. Güneş Pillerinin Yapısı ve Özellikleri	5
2.1.2.1. Fotovoltaik Olay	6
2.1.2.2. Temel bir P-N Eklem Güneş Pili'nin Yapısı.....	6
2.1.2.3. Fotovoltaik Sistemlerde Kullanılan Temel Ekipmanlar	10
2.1.3. Güneş Pili Türleri.....	11
2.1.3.1. Birinci Nesil Güneş Hücreleri.....	11
2.1.3.2. İkinci Nesil Güneş Hücreleri.....	12
2.1.3.3. Üçüncü Nesil Güneş Pilleri.....	14
2.1.4. Güneş Pili Verimlilikleri.....	14
2.2. BOYA DUYARLI GÜNEŞ HÜCRELERİ.....	15
2.2.1. Boya Duyarlı Güneş Hücrelerinin Yapısı ve Bileşenleri	16
2.2.1.1. Foto Anot (Çalışma Elektrodu).....	16
2.2.1.2. Duyarlaştırıcı (Boyar Madde).....	16
2.2.1.3. Elektrolit	17
2.2.1.4. Foto Katot (Karşı Elektrot).....	18
2.2.2. Boya Duyarlı Güneş Pillerinin Çalışma Prensibi.....	18
2.2.3. Boya Duyarlı Güneş Pillerinde Verimi Etkileyen Faktörler	19
2.2.4. Pil Parametrelerinin Hesaplanması.....	20
3. MATERYAL VE YÖNTEM	22
3.1.FOTO-ANOTLARIN HAZIRLANMASI.....	22
3.2. BOYA DUYARLILAŞTIRILMASI	24
3.3. KARŞIT ELEKTROTLARIN HAZIRLANMASI	25
3.4. BDGP HAZIRLANMASI.....	25
3.5. ÖLÇÜM DÜZENEKLERİ	26
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	27
4.1. FOTOANOTLARIN MORFOLOJİK ÖZELLİKLERİ.....	27
4.2. E1 VE E2 ELEKTROLİTİ İÇİN FOTOVOLTAİK PARAMETRELER	32
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	39
6. KAYNAKLAR.....	41

ÖZGEÇMİŞ	44
-----------------------	-----------

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Dünya Birincil Enerji Tüketim Oranlarının Kaynak Bazlı Dağılımı 2019	1
Şekil 1.2 Türkiye’de Temmuz 2020 kurulu güç oranları.....	2
Şekil 1.3. Kaynak Bazında Türkiye Kurulu Güç Gelişimi ve Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Payı	3
Şekil 2.1. FV hücrelerinin çalışma prensibi.....	6
Şekil 2.2. P-N birleşimli diyot.	7
Şekil 2.3. P-N eklemine enerji bantlarının bükülmesi.	8
Şekil 2.4. Elektron ve hollerin difüzyonu ile deplasyon bölgesinin oluşması.	9
Şekil 2.5. Işık altındaki PN eklemine elektron-deşik çifti oluşması.	10
Şekil 2.6. FV Sistem ekipman şeması.....	10
Şekil 2.7. Silisyum tabanlı güneş hücresi.	11
Şekil 2.8. Amerika Birleşik Devletleri (ABD) Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı’nın (NREL) verilerine göre, silisyum tabanlı hücrelerin verimleri	12
Şekil 2.9. a) Amorf silisyum güneş pili b) Tek Kristal silisyum güneş pili c) Polikristal Silisyum güneş pili.....	12
Şekil 2.10. Amerika Birleşik Devletleri (ABD) Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı’nın (NREL) verilerine göre, Bakır İndiyum Galyum diselenit (CIGS) tabanlı hücrelerin verimleri	13
Şekil 2.11. Amerika Birleşik Devletleri (ABD) Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) tarafından en iyi araştırma-hücre verimlilikleri	13
Şekil 2.12. 2020 yılında PSE Project Ltd. şirketi tarafından yapılan çalışmada fotovoltaiik pillerin cinsine göre verimlilikleri	15
Şekil 2.13. BDGP bileşenlerinin şematik görüntüsü.	16
Şekil 2.14. BDGP çalışma prensibi şematik gösterimi.	19
Şekil 2.15. FV pil akım-gerilim (I-V) karakteristiği.....	20
Şekil 2.16. İdeal güneş pili için eşdeğer devre.	21
Şekil 3.1. FTO kaplı camlar.	22
Şekil 3.2. Kül Fırın.	23
Şekil 3.3. Kurutma işleminden sonra bekletilen foto anotlar.	23
Şekil 3.4. Boya çözeltisinde bekletilen fotoanotlar.	24
Şekil 3.5. 300, 400, 500 ve 600 °C gibi dört farklı sıcaklıkta tavlanan fotoanotlar.	24
Şekil 3.6. 450°C’de tavlanan karşıt elektrotlar.....	25
Şekil 3.7. Fotoanot ve karşıt elektrotların sabitlenmesiyle oluşturulmuş BDGP.	26
Şekil 3.8. Ölçüm düzenekleri.....	26
Şekil 4.1. a) 300 °C , b) 400 °C c) 500 °C , d) 600 °C ‘de tavlanan BDGP’lerin SEM görüntüleri.....	28
Şekil 4.2 a) 300 °C b) 400 °C c) 500 °C d) 600 °C de tavlanan DSSC’lerin AFM görüntüler	30
Şekil 4.3. a) 300 °C b) 400 °C c) 500 °C d) 600 °C de tavllanmış fotonaotlu BDGP için elektrolit türüne bağlı olarak karanlık ve ışık altındaki J-V eğrileri.	33
Şekil 4.4. a) E1 b) E2 elektrolitli BDGP için Sıcaklığa bağlı J-V eğrileri.	35
Şekil 4.5. a) E1 elektrolitli BDGP için Nyquist eğrileri b) E2 elektrolitli BDGP için Nyquist eğrileri	37

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 1.1. Türkiye brüt elektrik üretimin birincil kaynaklara göre üretimi.....	3
Çizelge 4.1. Hazırlanan BDGP'lerin fotovoltaik performans parametreleri.	38
Çizelge 4.2. Hazırlanan BDGP'lerin elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) parametreleri.....	38



KISALTMALAR

AFM	Atomik Kuvvet Mikroskobu
BDGP	Boya Duyarlı Güneş Pili
GEPA	Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası
IPCE	Gelen Işığın Akıma Dönüşme Verimi
NREL	ABD Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu



SİMGELER

AM	Hava kütlesi
Au	Altın
CdTe	Kadmiyum Tellürid
FF	Dolum Faktörü
FTO	Florin katkılı Kalay Oksit
Ga	Galyum
GaAs	Galyum Arsenik
In	İndiyum
I	İyot
IR	Kızılötesi
I ⁻	İyodür
ITO	İndiyum Katkılanmış Kalay Oksit
LED	Işık yayan diyot
SnO ₂	Kalay Oksit
TiO ₂	Titanyum dioksit
ZnO	Çinko Oksit
η	Verim

ÖZET

FOTOANOT TAVLAMA SICAKLIĞI VE ELEKTROLİT TÜRÜNÜN BOYA DUYARLI GÜNEŞ PİLİ PERFORMANSINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Tuğçe ÖZKACAR

Düzce Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Muharrem GÖKÇEN

Temmuz 2021, 43 sayfa

Boya duyarlı güneş pillerinde (BDGP), fotoanot tavlama sıcaklığı ve elektrolit türünün pilin fotovoltaik parametreleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. BDGP'lerin fotovoltaik ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) özellikleri, dört farklı fotoanot tavlama sıcaklığı ve iki farklı elektrolit çözeltisi için incelenmiştir. Fotoanotların tavlama sıcaklığı için dört farklı sıcaklık (300, 400, 500 ve 600 °C) kullanılmış ve bu fotoanotların morfolojik özellikleri, alan emisyonu taramalı elektron mikroskobu (FESEM) ve atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ile incelenmiştir. Bu DSSC'lerin fotovoltaik ölçümleri, farklı redoks konsantrasyonuna ve katkı maddesine sahip iki farklı tip elektrolit için bir AM 1.5 simüle edilmiş güneş simülatörü kullanılarak 50 mW/cm² (0,5 Sun) ışık altında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca DSSC'lerin rekombinasyon özellikleri ile seri ve yük transfer direncini elde etmek için elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) ölçümlerinden her bir BDGP için Nyquist grafikleri elde edilmiştir. Yüksek pürüzlülük ve düşük seri direnç sayesinde 600 °C'de tavlanan fotoanota sahip BDGP'nin her iki elektrolit türü için de en yüksek verime sahip olduğu bulunmuştur.

Anahtar sözcükler: Boya duyarlı güneş pili (BDGP, DSSC), Elektrolit, Fotoanot, Tavlama Sıcaklığı, Verim, Z907.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF PHOTOANODE ANNEALING TEMPERATURE AND ELECTROLYTE TYPE ON DYE-SENSITIZED SOLAR CELL PERFORMANCE

Tuğçe ÖZKACAR

Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Physics

Master's Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Muharrem GÖKÇEN

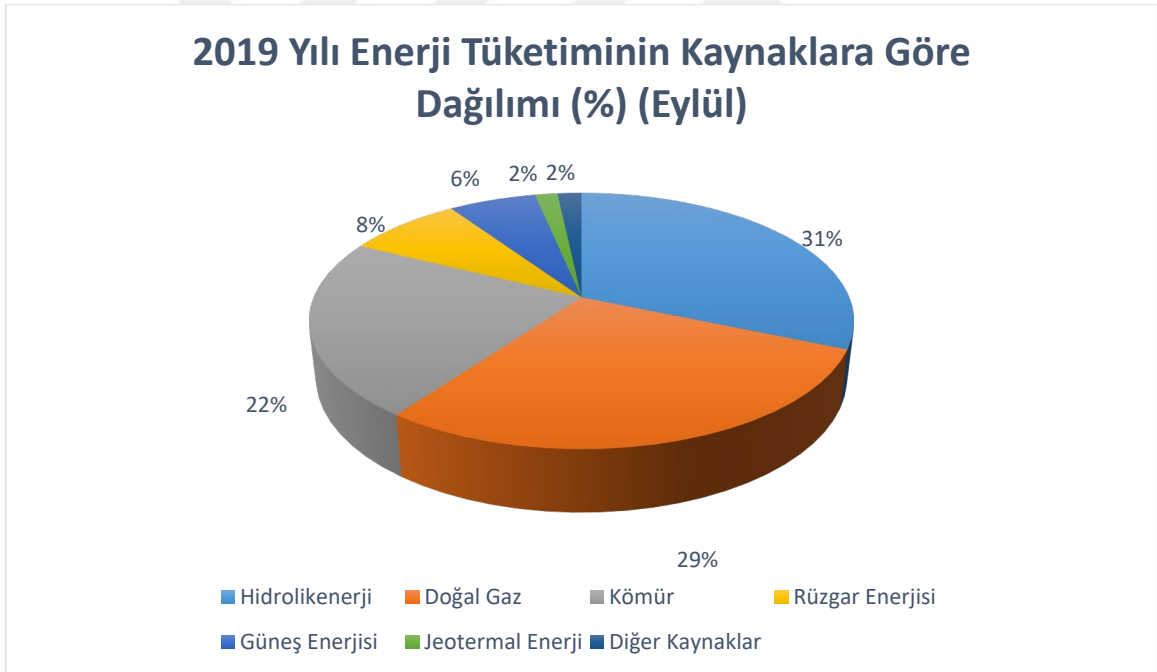
July 2021, 43 pages

In dye-sensitized solar cells (BDGP), the effects of photoanode annealing temperature and electrolyte type on the photovoltaic parameters of the cell were investigated. Photovoltaic and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) properties of BDGPs were investigated for four different photoanode annealing temperatures and two different electrolyte solutions. Different temperature (300, 400, 500 and 600 °C) are used for photoanode annealing and the properties of these photoanodes are great with field scanning electron microscope (FESEM) and atomic force microscope (AFM). Photovoltaic measurements of these DSSCs were performed under 50 mW/cm² (0.5 Sun) light modeled in an AM 1.5 simulated model for two different samples with different redox elements and content content. Also, to obtain the series and charge transfer resistance with recombination properties of the DSSCs electrochemical impedance spectroscopy (EIS) measurements were conducted the Nyquist plots of the cells were obtained. Because of the high roughness and small series, DSSC with photoanode annealed at 600 °C has the highest efficiency for both types.

Keywords: Annealing, dye sensitized solar cell (DSSC), Efficiency, Electrolyte, Photoanode, Z907.

1. GİRİŞ

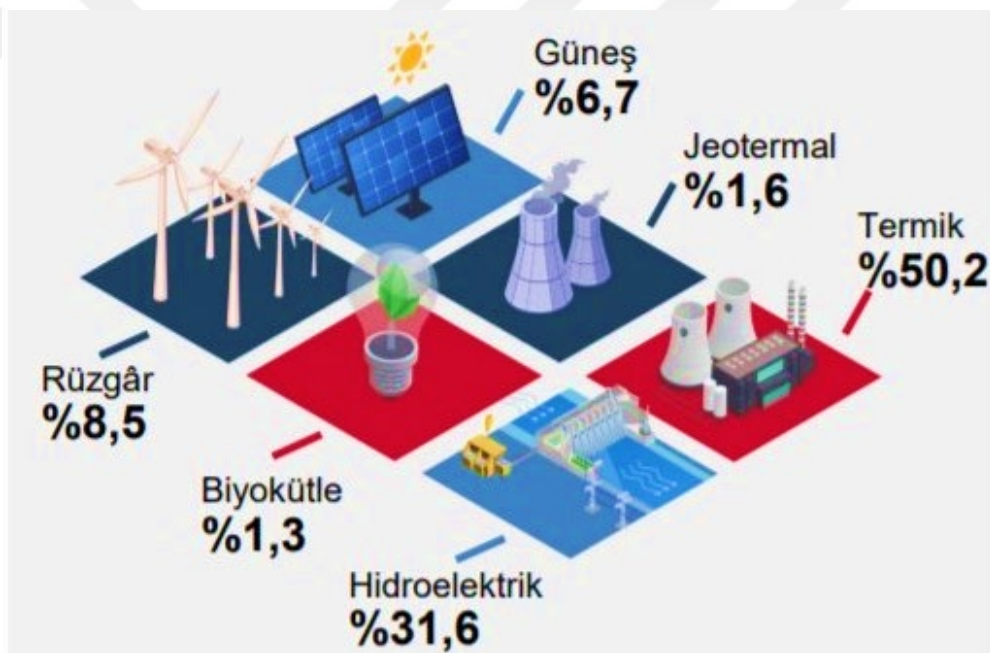
Enerji, insan hayatının sürdürülebilmesi için temel ihtiyaçlardan biridir. Artan dünya nüfusu ile birlikte, gelişmekte olan ülkelerin sanayileşmesi de artarken dünyadaki enerji tüketimi de artmaktadır ve bu daha çok enerji ihtiyacı anlamına gelmektedir. Bu sebeple enerji sistemlerinde verimliliğin artırılması için tüm dünyada çalışmalar yapılmaktadır. Sanayileşmeden önce enerji ihtiyaçları doğadaki temel kaynaklardan karşılanırken (su odun, rüzgar vs.), kömürle çalışan buhar makinelerinin keşfinden sonra kullanılan enerji kaynakları tamamen değişmiştir. Günümüzde kullanılan başlıca birincil enerji kaynakları; fosil yakıt olarak adlandırılan petrol, kömür, doğalgaz ve yenilenebilir enerji olan hidroelektrik santrallerdir.



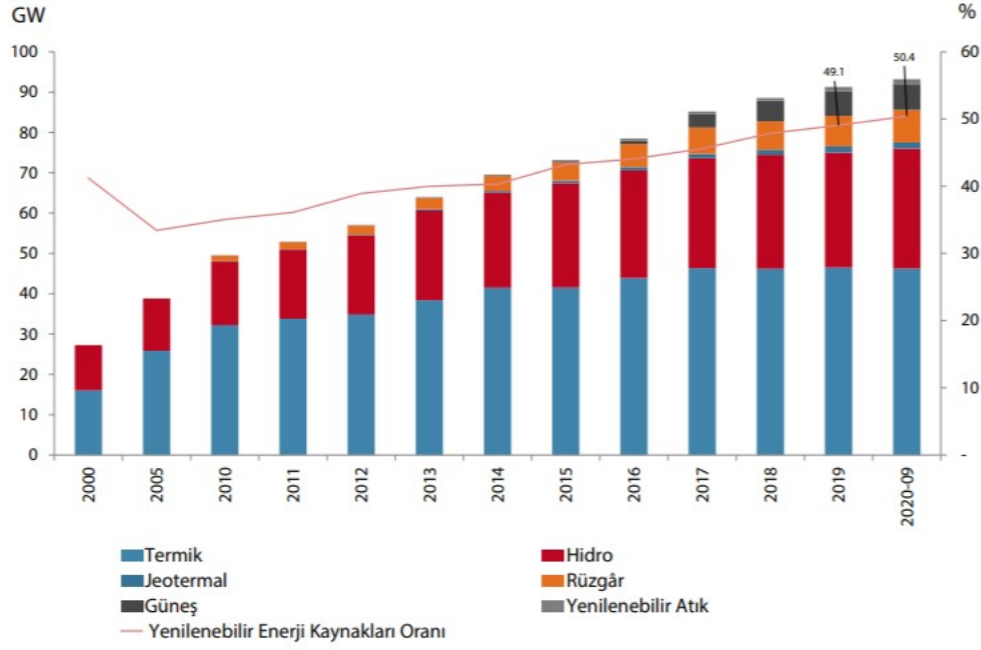
Şekil 1.1. Dünya Birincil Enerji Tüketim Oranlarının Kaynak Bazlı Dağılımı 2019 [1].

Fosil kaynaklar enerji ihtiyacımızın %80'ini karşılamaktadır [2]. Yapılan araştırmalarda temiz bir enerji kaynağı olmayan fosil yakıtlarının kullanımı çevre kirliliği ve küresel ısınmaya sebebiyet vereceği öngörülmektedir. Fosil yakıtların ileride yetersizleşeceği bilindiğinden, insanlar çevreyi kirletmeyen, daha temiz ve daha sürdürülebilir enerji kaynakları arayışı içine girmişlerdir.

Dünyadaki enerji tüketiminin 2005 ten 2030 a kadar %50 oranında artması beklenmektedir [3]. Türkiye toplam elektrik kurulu gücünün %31,6'sını hidroelektrik santraller oluştururken, rüzgâr ve güneş enerjisi santrallerinin toplam oranları %15,2 seviyesinde gerçekleşmiştir [4]. Türkiye'deki ve dünyadaki durum karşılaştırıldığında, Türkiye'de enerji kaynaklarına bağlı dağılım dünya ortalamaları civarındadır. Şekil 1.3'ten görüleceği üzere, 1990'lı yıllarda petrole bağımlılık oransal olarak yüksek iken 2000'li yıllarda petrolden elde edilen enerji oransal olarak azalmış buna karşın doğalgazdan elde edilen enerji artmıştır. Grafikten de görüleceği üzere son yıllarda kullanılan enerjiler arasında katı yakıtlar, petrol ve doğalgazdan üretilen enerjiler yaklaşık benzer oransal ağırlığa sahiptir. Buna karşın son yıllardaki yatırımlarla yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilecek enerjinin artması beklenmektedir.



Şekil 1.2 Türkiye'de Temmuz 2020 kurulu güç oranları.



Şekil 1.3. Kaynak Bazında Türkiye Kurulu Güç Gelişimi ve Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Payı [4].

Yenilenebilir enerji kaynakları düzenli ve sürekli bir şekilde temin edilen kaynaklar olduğundan gelecekte enerji ihtiyacının büyük bir kısmını karşılayacağı öngörülmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları: güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, jeotermal enerji, biyokütle enerjisi, okyanus enerjisi, hidroelektrik enerjidir. Türkiye Brüt elektrik üretimin birincil kaynaklara göre üretimi tabloda verilmiştir [5].

Çizelge 1.1. Türkiye brüt elektrik üretimin birincil kaynaklara göre üretimi.

Türkiye Brüt Elektrik Üretiminin Birincil Enerji Kaynaklarına Göre Aylık Dağılımı													
2020													
Birim GWh													
	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Toplam
Taş Kömürü+it hal kömür+Asfaltit	6.653,4	5.817,1	5.229,4	2.916,6	3.556,7	5.922,2	6.641,2	6.683,9	6.398,3	5.785,6			55.604,5
Linyit	3.174,1	3.006,1	2.976,8	2.429,6	2.600,2	3.666,6	3.408,4	3.176,0	3.075,3	3.516,6			31.029,6
Sıvı Yakıtlar	27,7	25,5	25,3	23,1	25,2	24,3	28,1	28,4	26,9	26,9			261,6
Doğalgaz+Lng	7.474,4	4.859,2	2.494,9	1.536,9	1.718,4	3.632,5	6.628,5	7.398,7	8.142,4	8.245,9			52.131,7
Yenilenebilir+Atık	425,5	405,3	445,3	436,6	453,227	426,376	466,283	463,3	470,1	493,1			4.483,0
Termik	17.755,1	14.113,3	11.171,8	7.340,8	8.353,7	13.671,9	17.172,4	17.750,3	18.113	18.068,1			143.510,5
Hidrolik	5.487,8	7.168,8	9.633,6	9.137,1	9.019,2	6.723,1	6.919,5	6.709,4	5.578,9	4.476,9			70.854,2
Jeotermal+	3.834,2	3.646,9	3.898,0	3.863,5	3.519,5	3.229,8	4.684,9	4.472,5	3.951,2	2.923,5			38.024,2
Güneş +													

2. TEORİK BİLGİLER

Yenilenebilir enerji kaynakları içinde güneş enerjisi yüksek avantajlarından dolayı bir adım öne çıkmaktadır. Yaklaşık çapı 1.392.000 kilometre ve Dünya'ya uzaklığı yaklaşık 150 milyon kilometre olan güneş, en büyük enerji kaynağıdır. Güneşte saniyede 564 milyon ton hidrojen, 560 milyon ton helyuma dönüşürken 4 milyon ton kütle kaybolur ve açığa çıkan $3,86 \times 10^{26}$ J enerji ışınım şeklinde uzaya yayılmaktadır [6].

Yıllık toplam güneşlenme süresi Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlasına (GEPA) göre 2.741 saat (günlük ortalama 7,5 saat), yıllık toplam gelen güneş enerjisi miktarı $1.527 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{yıl}$ (günlük ortalama $4,18 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{gün}$) olduğu tespit edilmiştir [6]. Güneşin toplam enerji rezervi $1,785 \times 10^{47}$ J gibi büyük bir değer olduğundan milyonlarca yıl ışınmasını sürdürebilir ve bu nedenle Dünya için sonsuz bir enerji kaynağıdır denilebilir [6].

2.1. GÜNEŞ PİLLERİ

2.1.1. Güneş Pillerinin Tarihçesi

Fotovoltaik Hücrelerin tarihsel gelişimi 1800'lü yıllara dayanmaktadır. Fotovoltaik etki, 1839'da Alexandre Edmond Becquerel'in elektrolit içerisine batırılmış elektrotlar arasındaki gerilimin, elektrolit üzerine düşen ışığa bağımlı olduğunu gözlemlemesiyle keşfedilmiştir [7]. 1876 yılında William Grylls Adams, öğrencisi Richard Evans Day ile birlikte, fotovoltaik etkiyi bir platin ve yarı iletken selenyuma bağlı olarak göstermişler, ancak çok düşük bir verime ulaşmışlardı [7].

Fotovoltaik etki ile ilgili en kapsamlı çalışma 1905'de Albert Einstein tarafından yapılmıştır. Işık enerjisinin enerji paketleri halinde taşınacağını varsayarak fotoelektrik etkiyi açıkladığı bir makale yayınladı. Günümüzde bunlar foton olarak adlandırılmaktadır [8].

1921 yılında, Einstein bu teorik çalışma ile Nobel ödülü almıştır. 1946 yılında modern güneş hücrelerinin patentini Russell Ohl almıştır. 1953'te farklı bant aralıklarına sahip malzemelerin güneş pili performansı üzerine teorik hesaplamalar yapan ilk kişi Amerikalı Kimyager Dan Trivich oldu. 1954 yılında Chapin, Fuller ve Pearson tarafından ilk silikon

tabanlı fotovoltaik hücre yapılarak bu hücrelerden %6 verim elde edilmiştir [9].1958 de güneş panelleri ilk uzay aracı olan Explorer'da kullanılmıştır [10]. 1960'lı yıllarda silikon fotovoltaik hücreler uzay teknolojilerinde kullanılmaya başlanmıştır. Fotovoltaik hücre teknolojisinin uzay çalışmalarında kullanımı çok hızlı gelişmesini sağlamış ve 1960'ların başında verimleri %15'lere ulaşmıştır [11].

1977 yılına gelindiğinde ise Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD) ulusal yenilenebilir enerji laboratuvarı açılmıştır [12].

1985 yılında üretilen silikon güneş pillerinin verimleri %20'yi aşmıştır. 1980'lerden sonra yeni bir yöntem olan çift eklemli GaAs katkılı güneş hücrelerinin verimi %22'ye, üç eklemli tandem güneş pillerinin verimleri ise %24'lere ulaşmıştır [11].

1991 yılında ilk yüksek verimli Boya Duyarlı Güneş Hücresi, Michael Grätzel ve arkadaşları tarafından bulundu. 2000 yılından itibaren fotovoltaik pil piyasası genişlemiş ve bölgesel bir pazardan küresel bir pazara dönüşmüştür. Çin hükümeti 2008 yılından itibaren Fotovoltaik pil endüstrisine ciddi şekilde yatırım yapmaktadır. 2012 yılında Amerika'lı yarıiletken malzeme üretim şirketi laboratuvar ortamında verimi %9,1 olan organik tabanlı güneş pilinde polimer malzeme (PEDOT-PSS) bulduklarını duyurmuştur. Ve yine aynı yıl Alman güneş enerjisi teknoloji şirketi olan Heliatek, iki katmanlı soğurucu tabaka kullanarak, organik güneş pili üretiminde %12 gibi yüksek bir verim elde ettiklerini duyurmuşlardır [11].

Son 13 yıl içinde, kurulu olan Fotovoltaik kapasitesinin yıllık ortalama büyüme oranı yaklaşık %40 olmuştur [11]. Anorganik malzemelerle yapılan piller bugün fotovoltaik piyasasının büyük bir yüzdesini oluşturmaktadır. Organik tabanlı güneş pilleri ise ticari pazarda istenilen yerde değildir.

2.1.2. Güneş Pillerinin Yapısı ve Özellikleri

Güneş enerjisinin yarı iletken malzemelerle elektrik enerjisine dönüştürülmesi olayına Fotovoltaik (FV) etki denmektedir. Fotovoltaik cihazlar, ışık enerjisini direkt olarak elektrik enerjisine çeviren cihazlardır. Güneş Hücreleri olarak da adlandırılan Fotovoltaik cihazlar ışık altında çalışırlar [13]. FV sistemlerinin diğer elektrik üretme sistemlerine karşı en büyük avantajı gerekli olan enerjinin her yerde bulunabilir olmasıdır.

2.1.2.1. Fotovoltaik Olay

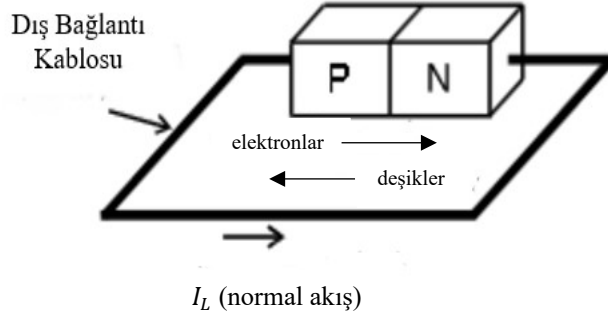
1905 yılında Albert Einstein ışığın yalnızca dalga yapısının olmadığını tanecik ya da parçacık olarak da davranabildiğini açıklamış ve fotoelektrik olayının nasıl oluştuğunu gösteren bir makale yazmıştır. Işığın bu karakteristik yapısı, içindeki foton adı verilen enerji paketçiklerinden gelmektedir. Fotonlar, elektromanyetik radyasyonun parçacık halini temsil eder. Fotonlar, güneş ışınım spektrumundaki farklı dalga boylarına bağlı olarak, farklı enerjilere sahiptirler. Fotovoltaik bir hücre üzerine iletilen fotonlar, bir kısmı hücre tarafından yansıtılır, bir kısmı soğurular, kalan kısmı da hücre içerisinden geçer. Soğurulan fotonlar, yarı iletken bir malzemenin atomundaki elektrona aktarılır ve böylece Fotovoltaik hücre tarafından elektrik üretilir [13].



Şekil 2.1. FV hücrelerinin çalışma prensibi [13].

2.1.2.2. Temel bir P-N Eklem Güneş Pili'nin Yapısı

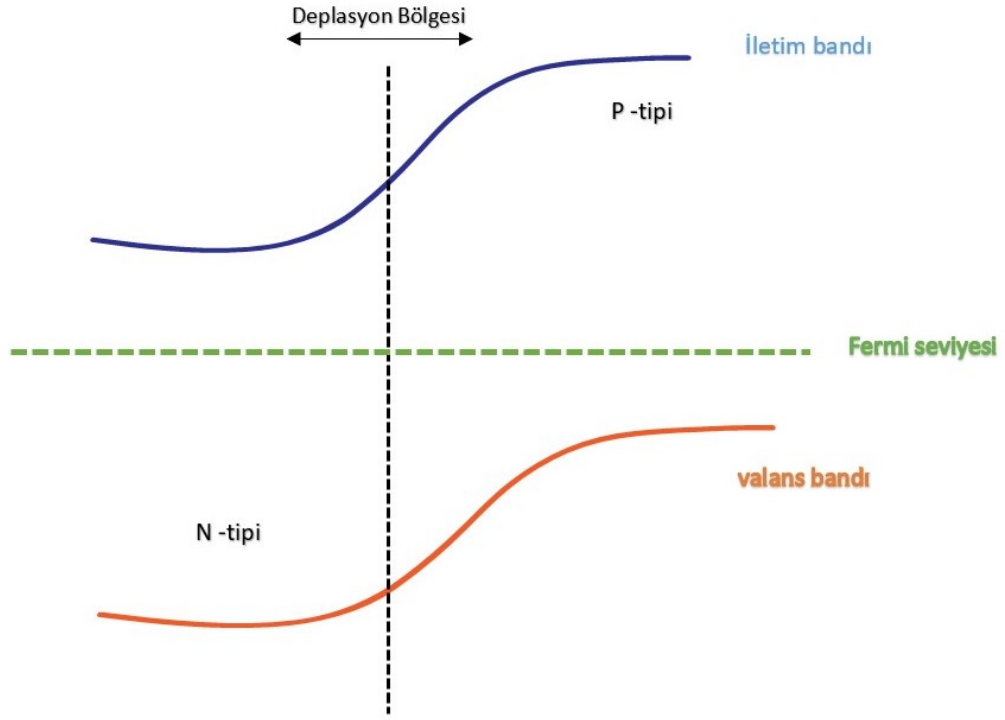
FV güneş pillerinin çalışma prensibi P-N birleşimli bir diyot gibi davranır. Elektronlar N tipi bölgeden çıkarak bir dış devre üzerinden P tipi bölgeye geri dönerler ve deşiklerle (hollerle) yeniden birleşirler. Şekil 2.2'de bu P-N birleşimi gösterilmiştir [14].



Şekil 2.2. P-N birleşimli diyot.

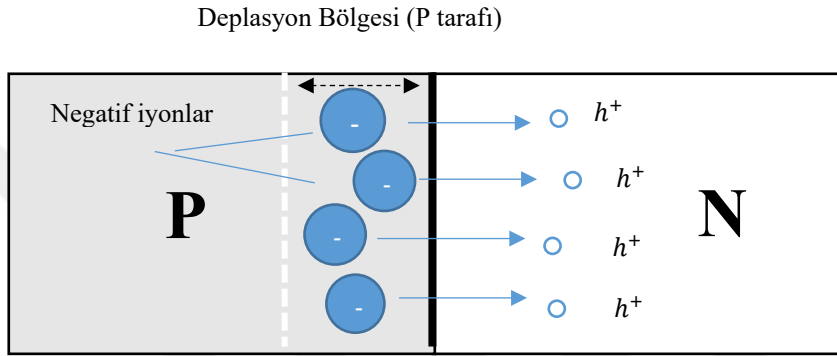
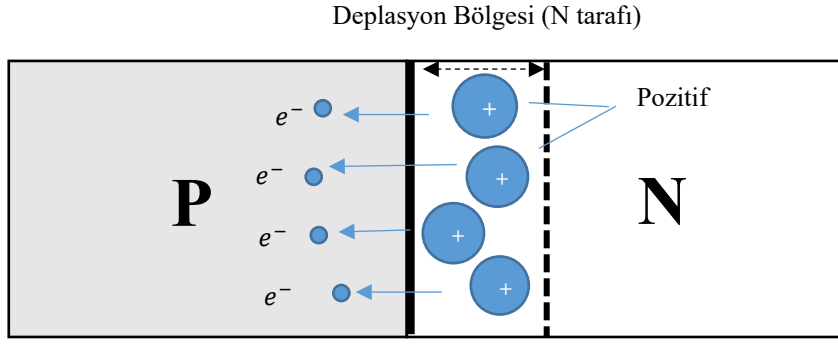
Bir P-N eklemi p-tipi ve n-tipi yarı-iletkenlerinin kontak haline getirilmesiyle oluşturulur. P-tipi ve N-tipi bölgelerin her ikisi de aynı malzemeden (Si yarı yarıiletken) oluşuyorsa bu eklem “aynı eklem” (homojunction) olarak adlandırılır veya her ikisi de farklı malzemelerden (CdTe ince film, BDGP) oluşuyor ise “farklı eklem” (heterojunction) olarak adlandırılır.

Şekil 2.4 'de gösterildiği gibi p-tipi ve n-tipi malzemelerin bir araya getirilerek oluşturulan P-N bağlantısında, N tipi bölgedeki çoğunluk taşıyıcıları P tipi bölgeye geçerek burada çoğunluk taşıyıcısı olan deşikleri doldururlar. Bundan dolayı birleşim yüzeyine yakın yerlerde çoğunluk taşıyıcılarında eksilme olur. Bu durum yalnızca birleşime yakın bölgelerde geçerlidir. Bu atomlar kristal örgüde asıl kristal atomlarının yerlerine yerleşmiş olup kristalde hareket edemezler. Bu pozitif iyonların yerleştiği bölge, elektronlardan arındığı için “**deplasyon bölgesi**” (**tüketim bölgesi**) olarak adlandırılır [15]. Bu bükülmüş bantlar boşaltılmış bölgede bir elektrik alan oluşmasına sebep olur. Güneş hücrelerindeki foton soğurumu, yarı iletken bant aralığına bağlıdır [3].



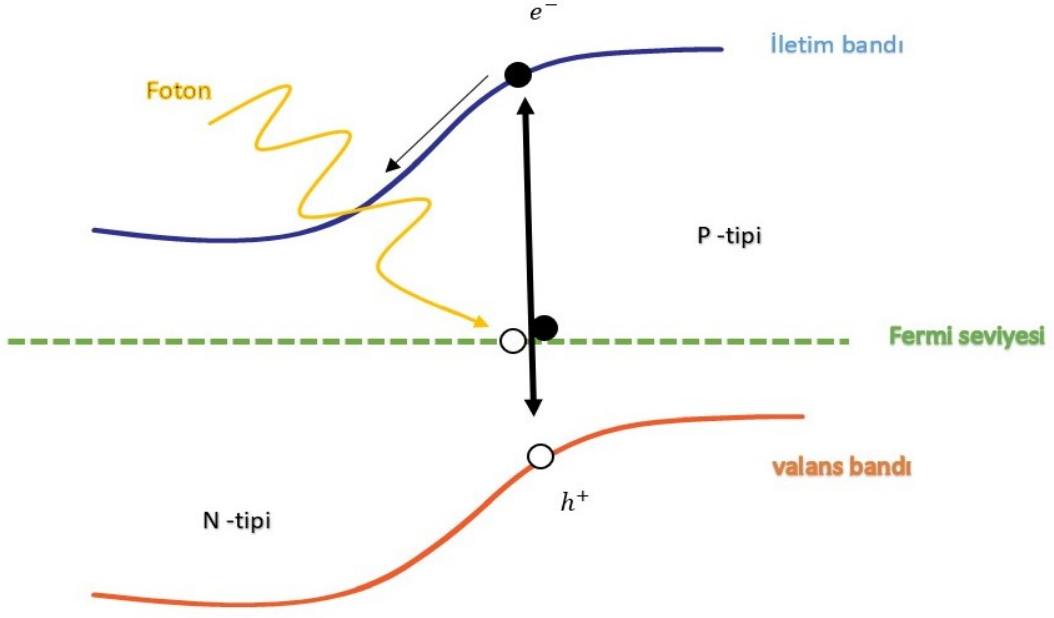
Şekil 2.3. P-N eklemde enerji bantlarının bükülmesi.

Deplasyon bölgesindeki pozitif yük dengede elektronları çeker, elektronları p bölgesine iten difüzyon kuvveti, elektronları n-tipi bölgeye geri çağıran yerleşik (built-in) elektrik alan kuvveti tarafından tamamen dengelenir. Benzer şekilde p-tipi bölgeden n-tipi bölgeye doğru hollerin difüzyonu, p-tipi malzemedeki deplasyon bölgesinin artmasına neden olur. Bu bölge hollerden temizlenmiştir ve iyonize olmuş negatif yüklü akseptör varlığından dolayı negatif bir yük taşır.



Şekil 2.4. Elektron ve hollerin difüzyonu ile deplasyon bölgesinin oluşması.

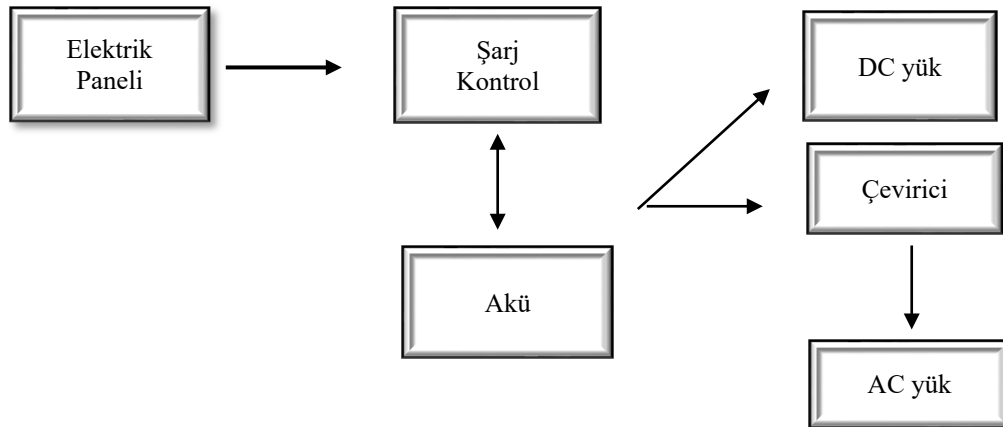
Şekil 2.5’de gösterildiği gibi güneş pili üzerine düşürülen ışık fotonunun enerjisi yarı-iletken malzemenin bant aralığından daha büyük olduğunda, fotovoltaiik hücre tarafından soğrulma olayı gerçekleşir. Soğrululan bu foton elektron/deşik çifti oluşturur. Tüketim bölgesinde gerçekleşen bu olayda, oluşan elektron-deşik çiftleri yerleşik elektrik alan tarafından zıt yönlerde sürüklenerek fotoakıma katkıda bulunur. Böylece dış devrede net bir elektrik akımı oluşmuş olur.



Şekil 2.5. Işık altındaki PN eklemine elektron-deşik çifti oluşması.

2.1.2.3. Fotovoltaik Sistemlerde Kullanılan Temel Ekipmanlar

Güneş pilleri, güneş ışığından 12-15 Voltluk bir elektrik üretirler. Evimizde kullandığımız cihazlar ise 220 Voltla çalışırlar. Alternatif bir üretim aracı olarak FV güneş pilleri oldukça önemli bir yere sahiptir. FV sistemleri gün ışığı olmadan da çalışabilir olması için bazı ekipmanlardan oluşurlar. En temel FV sistem elemanları güneş paneli, akü grubu, şarj kontrol cihazları ve çeviricilerden oluşur. Bunların haricinde sistemin güvenli çalışabilmesi için solar kablolar , sigortalar, diyotlar, akü dolabı, panel montaj malzemeleri, güç izleyicileri ve çeşitli sayaçlar gibi yardımcı ekipmanlarda kullanılmaktadır [16].



Şekil 2.6.FV Sistem ekipman şeması.

2.1.3. Güneş Pili Türleri

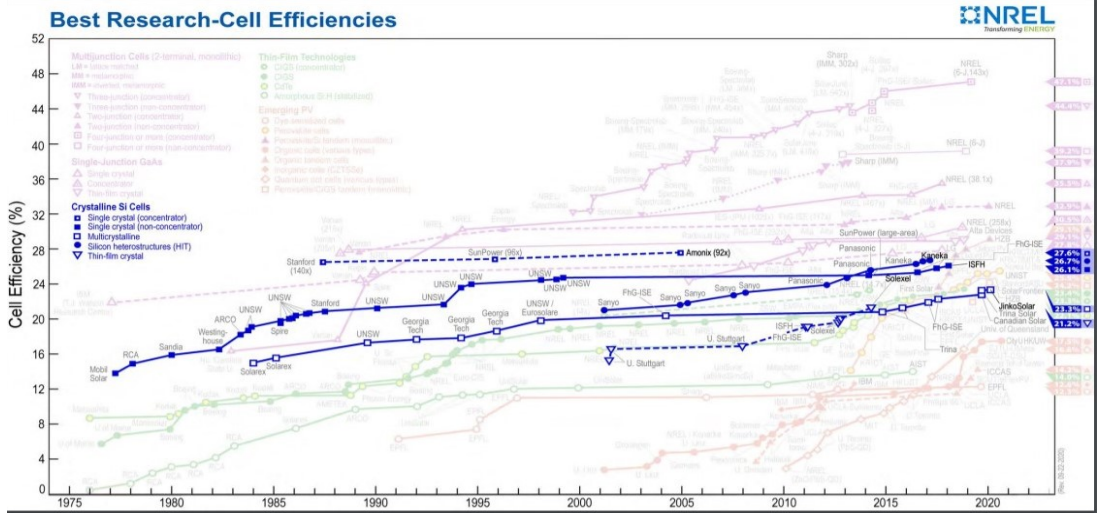
2.1.3.1. Birinci Nesil Güneş Hücreleri

Birinci Nesil Güneş Hücrelerinin yapımında Silisyum (Si) ve Galyum Arsenik (GaAs) en yaygın kullanılan malzemelerdir. Doğada bol bulunurluğu, zehirli olmaması elektriksel ve optiksel özelliklerinin uzun süre kalıcı olması ve veriminin yıllar içinde artış göstermesi sebebiyle güneş pilleri yapımında kullanılan en popüler malzeme silisyumdur. Silisyum tabanlı güneş hücreleri tek (mono) ve çok(poli) kristal yapılarına göre ayrılırlar.

Tek kristal yapıya sahip olan hücreler, çok kristal yapıya sahip olan hücrelere göre daha verimlidir. Tek kristal silisyum güneş pillerinin verimi %15-20 civarında ve üretim maliyetinin karşılanma süresi 4-6 yıl arasındadır. Çoklu kristal silisyum güneş pillerinin verimi ise yaklaşık %12-16 dır ve üretim maliyetinin karşılanma süresi 2-4 yıl arasındadır [17]. Verimliliğin yanı sıra, sanayinin başlıca gereksinimi düşük maliyettir [18].



Şekil 2.7. Silisyum tabanlı güneş hücresi.

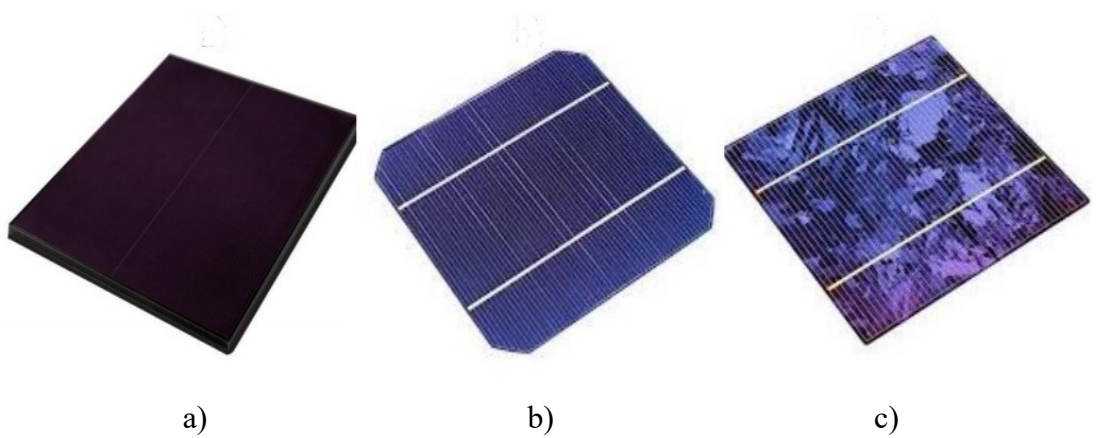


Şekil 2.8. Amerika Birleşik Devletleri (ABD) Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı'nın (NREL) verilerine göre, silisyum tabanlı hücrelerin verimleri [19].

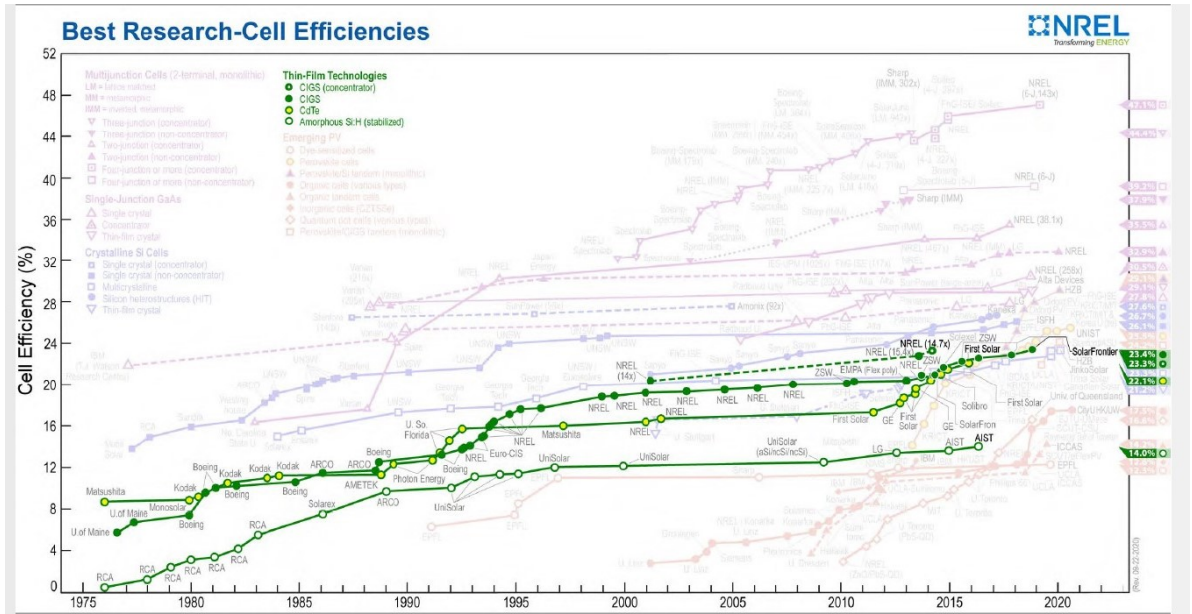
2.1.3.2. İkinci Nesil Güneş Hücreleri

İkinci nesil güneş hücreleri ince film güneş pilleri olarak da adlandırılırlar. Bu hücreler azaltılmış materyaller sebebiyle daha düşük maliyetlere sahiptir. İnce film yapısında olmalarından dolayı kolay bükülebilmeleri bu hücrelerin estetik açıdan daha kullanışlı olmalarını sağlayarak daha avantajlı hale getirmektedir [20].

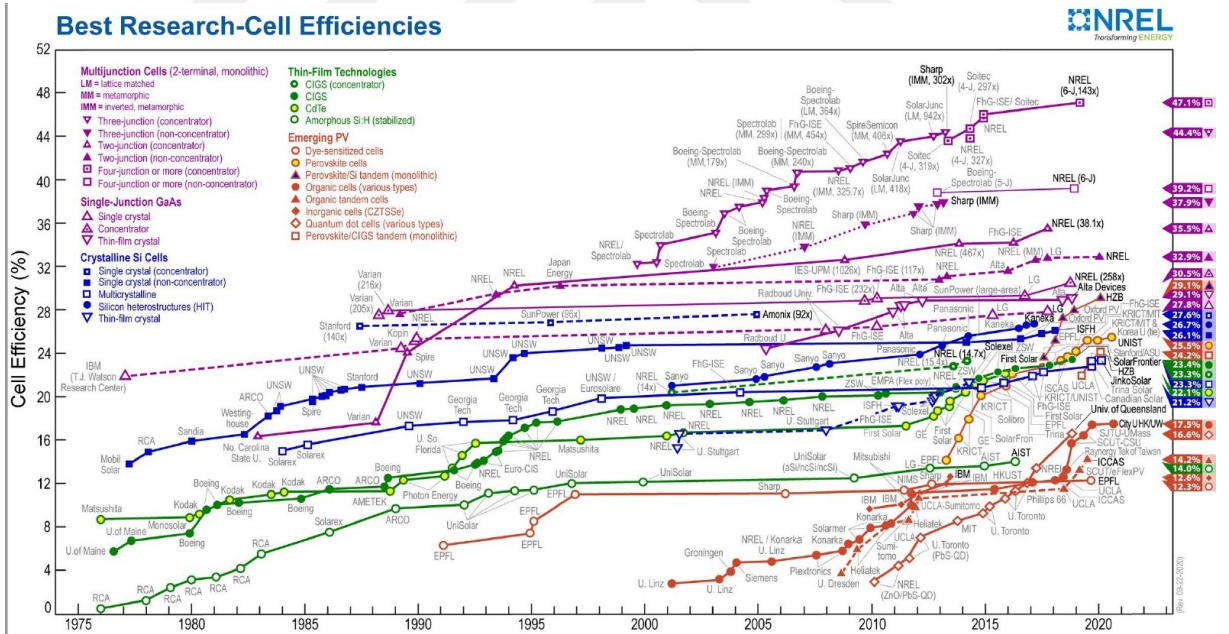
İkinci nesil güneş pilleri, Kadmiyum Tellürid / Kadmiyum Sülfid (CdTe/CdS), Bakır İndiyum Galyum diselenit (CIGS), Amorf Silisyum (a-Si) ve ince film kristal silisyum gibi çeşitlere sahiptir.



Şekil 2.9. a) Amorf silisyum güneş pili b) Tek Kristal silisyum güneş pili c) Polikristal Silisyum güneş pili.



Şekil 2.10. Amerika Birleşik Devletleri (ABD) Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı'nın (NREL) verilerine göre, Bakır İndiyum Galyum diselenit (CIGS) tabanlı hücrelerin verimleri [19].



Şekil 2.11. Amerika Birleşik Devletleri (ABD) Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) tarafından en iyi araştırma-hücre verimlilikleri [21].

2.1.3.3. Üçüncü Nesil Güneş Pilleri

1990 'lı yıllarda üçüncü nesil güneş pilleri üzerinde çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Üçüncü nesil güneş hücreleri diğer güneş pillerine göre daha düşük verimli ancak maliyetinin de diğerlerine göre çok daha az olması sebebiyle daha çok tercih edilir olmuştur.

Üçüncü nesil güneş pilleri arasında; boya ile duyarlılaştırılmış fotovoltaik hücreler, polimer tabanlı güneş hücreleri, nanokristal tabanlı güneş hücreleri bulunmaktadır. Graetzel ve O'Regan tarafından geliştirilen BDGP'ler diğer güneş pili türlerine göre çevre dostu malzemelerden oluşması daha ekonomik , bol bulunur ve maliyetinin düşük olması vb. gibi avantajlara sahiptir [7]. BDGP'ler, geniş bant aralıklı yarı-iletkenin organik boyalarla veya doğal pigmentlerle hassaslaştırılmasıyla güneş enerjisinden elektrik üretir [7]. Üçüncü nesil güneş pillerinin amacı, verimliliği arttırarak, maliyeti birinci nesil güneş pillerinin seviyesinden daha düşük bir seviyeye getirmektir [7].

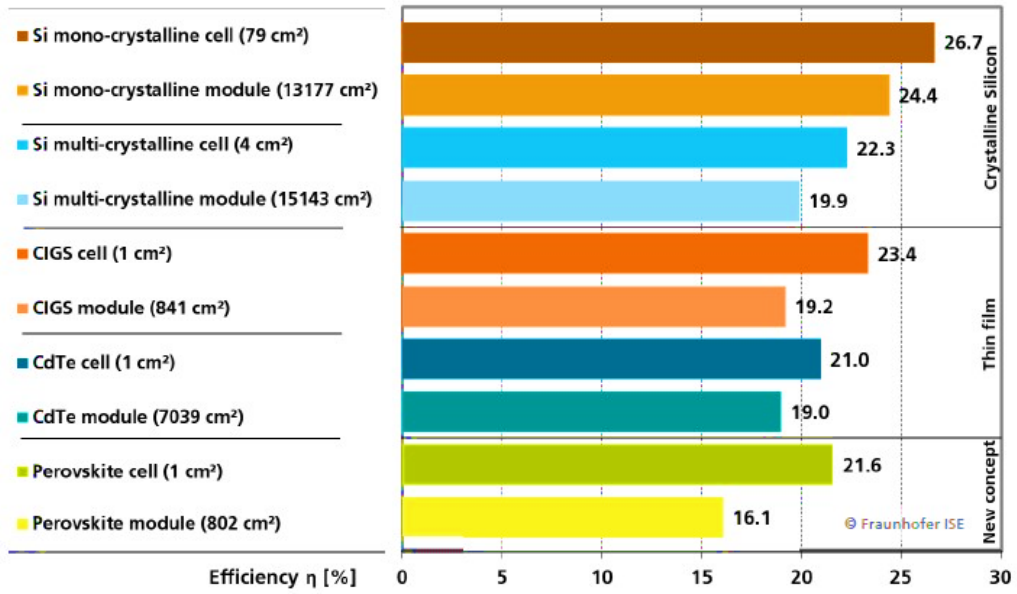
2.1.4. Güneş Pili Verimlilikleri

Bir güneş pilinin verimliliği (η), giriş gücü (P_{in}) ve etkin alan (A) olmak üzere pilden alınan maksimum gücün (P_{max}) fotovoltaik hücrenin üzerine düşen güneş ışınım gücüne oranı olarak tanımlanır. Dünya atmosferine düşen ışık yoğunluğu, Dünya ile Güneş arasındaki uzaklığa bağlı olarak 1325 W/ m^2 ve 1412 W/ m^2 arasında değişmektedir [20].

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in} \times A} = \frac{I_m \times V_m}{P_{in} \times A} = \frac{J_m \times V_m}{P_{in}} = \frac{I_{sc} \times V_{oc} \times FF}{P_{in} \times A} \quad (2.1)$$

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

Fraunhofer Enstitüsü tarafından internette ISE PV Charts'den yapılan en yüksek verimlilikleri gösteren çizelge aşağıda verilmiştir.



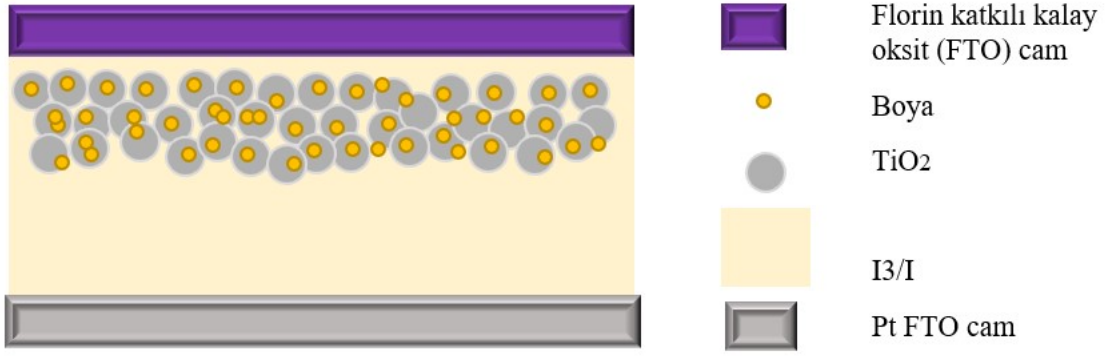
Şekil 2.12. 2020 yılında PSE Project Ltd. şirketi tarafından yapılan çalışmada fotovoltaik pillerin cinsine göre verimlilikleri [22].

2.2. BOYA DUYARLI GÜNEŞ HÜCRELERİ

1991’de O’Regan ve Michael Grätzel tarafından, nanokristalin TiO₂ kullanılarak % 7,1 verimle boya duyarlı güneş pilleri elde edildi [23]. Günümüzde bu verimlilik %14’lerin üzerindedir [24].

BDGP, saydam iletken oksit cam (FTO, ITO gibi), ışığa duyarlı boya, yarı-iletken oksit tabaka (TiO₂, ZnO gibi), (fotoanot), elektrolit ve foto-katottan (karşı elektrot) oluşur. Verimin en iyi olabilmesi için bu temel kısımların en iyi duruma getirilmesi oldukça önemlidir [24].

Boya katkılı Güneş hücrelerindeki en önemli özellik oldukça büyük yüzey alanına sahip mezoporoz yarıiletken (TiO₂) tabakanın kullanılıyor olmasıdır. Yüzey artışı güneş hücresinin verimini önemli oranda arttırmaktadır. Çok fazla absorpsiyon yapan herhangi bir molekül mono tabaka şeklinde TiO₂ yüzeyine bağlandığında üzerine düşen ışığı yaklaşık %1 oranında absorplayabilir. Devam eden çalışmalar boyunca, yeni boyalar geliştirilmiştir. Bu çalışmaların önemli bir kısmı rutenyum boyaları üzerinde olmuştur. N3, N719 ve “Black Dyes” gibi çok farklı sayılarda rutenyum boyaları sentezlenilmiştir. BDGP bileşenlerinin şematik görüntüsü şekildeki gibidir.



Şekil 2.13. BDGP bileşenlerinin şematik görüntüsü.

2.2.1. Boya Duyarlı Güneş Hücrelerinin Yapısı ve Bileşenleri

2.2.1.1. Foto Anot (Çalışma Elektrodu)

Çalışan elektrot, elektrik devresinin negatif (-) ucunu oluşturur. BDGP, TiO_2 katmanına elektriksel temas sağlayan aynı zamanda ışığın hücrenin içerisine girmesine izin veren şeffaf iletken oksit (TCO) kaplı cam altlık üzerine sinterlenmiş, nanokristalin TiO_2 , ZnO , SnO_2 tabakasından oluşur [7]. BDGP'lerde yaygın olarak kullanılan yarı iletken malzeme, kristallliği, geniş bant aralığı ve son derece önemli taşıma elektronuna sahip yüksek elektron hareketliliği, ucuz, çevre dostu ve bol bulunurluğu nedeniyle TiO_2 'dir[25].

Nano kristal yarı iletkenin boya duyarlı güneş hücrelerinde temel görevi, boya emilimi için yüzey temin etmesi, uyarılmış boya için bir elektron alıcısı olarak işlev görmesi ve gelen elektronun iletken cam yüzeye iletilmesini sağlamaktır [7].

2.2.1.2. Duyarlaştırıcı (Boyar Madde)

Gelen ışığı foto akıma dönüştüren BDGP'ler tarafından ışığı absorbe edip elektrik akımına dönüştürmek için önemli bir bileşendir. Güneşten gelen ışıklardan daha geniş dalga boyu aralığında soğurum yapabilmek için $\sim 3,2$ eV bant aralığına sahip olan TiO_2 yüzeyine kimyasal olarak boya molekülleri bağlanır. TiO_2 , dalga boyu 380 nm' ye kadar olan fotonları soğurabilir [3]. Duyarlaştırıcı boya olarak kullanılacak bir malzeme bazı fotofiziksel ve elektrokimyasal özelliklere sahip olmalıdır. Boyar madde öncelikle mümkün olduğunca lüminesans olmalıdır. İkinci olarak, boyar maddenin absorpsiyon spektrumu, ultraviyole-görünür (UV-VIS) ve yakın kızılötesi bölge (NIR) bölgelerini kapsamalıdır. En yüksek dolu moleküler orbital (HOMO) donör grup etrafında lokalize olurken, en düşük boş moleküler orbital (LUMO) sabitleyici/alıcı grup etrafında lokalize olmalıdır. HOMO, redoks elektrolitlerinden daha düşük olmalıdır. Elektron transfer

reaksiyonu sırasında enerji kayıplarını en aza indirmek için uyarılmış durumun enerji seviyesi, TiO₂'nin iletim bandına uygun olmalıdır.

Duyarlaştırıcı boyalar BDGP'lerde anahtar rol oynadığından, N3, N719, N749 (siyah boya), K19, CYC-B11, C101, K8, D102, SQ, Y123, Z907 gibi çok sayıda organometalik, inorganik ve organik/metal içermeyen boyalar/doğal boyalar, Mangosteen ve daha pek çoğu, BDGP'lerde duyarlaştırıcı olarak kullanılmıştır [26]. Rutenyum (Ru), Osmiyum (Os) ve İridyum (Ir) kompleksleri gibi ağır geçiş metallerinden üretilen metal kompleks boyalar, uzun uyarılmış ömürleri, yüksek verimli metalden liganda yük transfer spektrumları ve yüksek redoks özellikleri nedeniyle BDGP'lerde yaygın olarak organometalik ve inorganik boyalar olarak kullanılmıştır.

$ML_2(X)_2$ yapısında, **M** bir metali, **L**, 2,2'-bipiridil-4,4'-dikarboksilik asit gibi bir ligandı ve **X**'in halojenür, siyanür, tiyosiyanat, asetilasetonat ve tiyokarbamat gibi bir sübstitüentü temsil eden boya genel olarak tercih edilen bir duyarlaştırıcının genel yapısıdır. Termal ve kimyasal stabilite (kararlılık) ve görünür bölgeden (VIS) NIR'ye kadar geniş absorpsiyon aralığı nedeniyle, rutenyum polipiridil kompleksleri en iyi verimleri verdiği gözlenmiş ve bu nedenle şimdiye kadar yaygın olarak kullanılmıştır. Ru Kompleksleri 1991'de O'Regan ve Grätzel, rutenyum boyasına (siyah boya) dayalı ilk DSSC için %7,12 verimlilikte gerçekleştirdiler [27]. Daha sonra, bu konuya yeni bir bakış açısı kazandıran Ru bazlı boya (N749) kullanılarak yaklaşık %10'luk bir verim yapılan çalışmalarda bildirildi. Ru komplekslerinin çoğu, bir oktahedral geometride polipiridil ligandları ve tiyosiyanat birimleri ile koordine edilen Ru(II) atomlarından oluşur ve metalden ligand yük transferi (MLCT) geçişleri nedeniyle, orta düzeyde absorpsiyon katsayısı sergilerler. Ayrıca, Ru komplekslerinin elektrokimyasal özelliklerinin yanı sıra absorpsiyon ve emisyonunu iyileştirmek için bipiridil kısımları, karboksilat polipiridin Ru boyları, fosfat Ru boyları ve polinükleer bipiridil Ru boyları ile sübstitüe edilebilmektedir.

2.2.1.3. Elektrolit

Boya duyarlı güneş pillerinin (BDGP) performansı elektrolite büyük ölçüde bağlıdır. Elektrolitler, BDGP'lerdeki en önemli bileşenlerden biridir; elektrotlar arasındaki iç yük taşıyıcıların taşınmasından sorumludur ve BDGP işlemi sırasında boyayı ve kendisini sürekli olarak yeniler.

Elektrolitler temel olarak organik bir matriste bir redoks aracı içerir. Elektrolitlerin

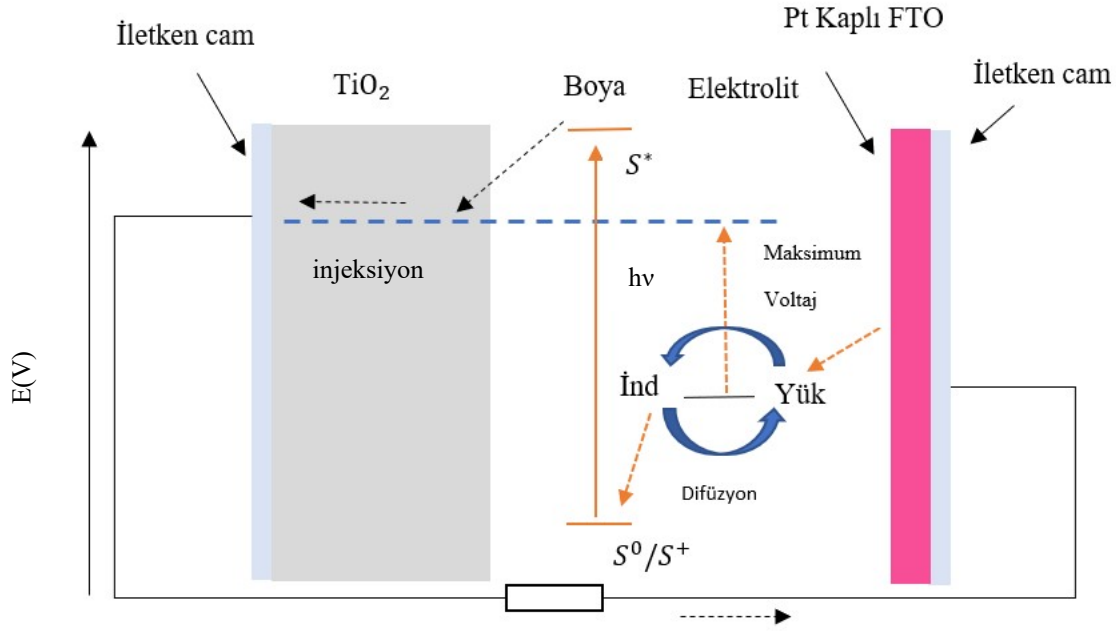
işlevi bir yük transfer taşıyıcısıdır ve performansı, yük transferinin hızı ve iletkenliği ile yakından ilgilidir. Redoks çifti, oksitlenmiş boyayı verimli bir şekilde yenileyebilmelidir. Uzun süreli kimyasal, termal ve elektrokimyasal kararlılığa sahip olmalıdır. BDGP bileşenleri ile aşındırıcı olmamalıdır. Bir elektrolitin absorpsiyon spektrumu, bir boyanın absorpsiyon spektrumu ile örtüşmemelidir.

2.2.1.4. Foto Katot (Karşıt Elektrot)

Karşıt elektrot elektrik devresinin pozitif (+) ucunu oluşturur. Karşıt elektrot cam ya da plastik bir yüzey üzerine kaplanan iletken bir tabakadan oluşur. Dış devreden üzerine gelen elektronları alır ve bunları elektrolite geri transfer ederek yenilenmesini sağlar [3]. Karşıt elektrotun ana işlevi, triiyodidi hem FTO kaplı hem de elektrolit içeren yüzeyde iyodüre indirgemek ve devreyi tamamlamaktır. Yük transferi gerçekleşirken kayıpların daha az olması için karşıt elektrodun yüksek katalitik ve yüksek elektriksel iletkenliğe sahip olması gerekmektedir. Böylece indirgenme reaksiyonu hızlanmış olur [3]. Bununla birlikte, karşıt elektrotun yüzeyi platin (Pt) grafen, aktif karbon, iletken polimerler gibi uygun bir katalizörle etkinleştirilmelidir. Ancak bu katalizörler arasında Platinin tercih edilme nedeni, redoks reaksiyonları sırasında elektrolitin hızlı bir şekilde yenilenebilen yüksek bir elektron hareketliliğine ve yüksek elektrik iletkenliğine sahip olmasıdır [23].

2.2.2. Boya Duyarlı Güneş Pillerinin Çalışma Prensibi

Güneşten gelen ışık boya molekülleri tarafından soğurulur, ışığı soğuran boya molekülleri uyarılır ve bir elektronunu TiO_2 ' in iletkenlik bandına aktarır. Boya molekülü yükseltgenerek kararsız hale geçer. TiO_2 ' ye ulaşan elektron bir bağlantı yardımıyla dış devreye aktarılır ve elektrik enerjisine dönüşüm gerçekleşmiş olur. Yükseltgenmiş boya molekülü elektrolit içerisindeki I^- iyonundan elektron alarak kendisi indirgenerek kararlı duruma geçmiş olur ancak iyodür I^- ise tri-iyodüre (I_3^-) yükseltgenir. I_3^- ise dış devreden karşıt elektrot üzerine gelen elektronu alarak I^- iyonuna dönüşür [3].

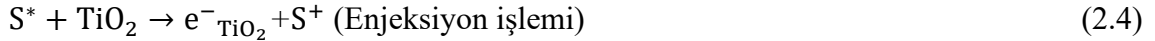


Şekil 2.14. BDGP çalışma prensibi şematik gösterimi.

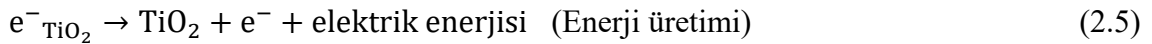
Boya duyarlı güneş hücrelerinin çalışma prensibini aşağıdaki denklemlerle ifade edecek olursak;



Boyanın uyarılmış halde kalma süresi nano-saniye kadardır.[20]



Uyarılmış boya yükseltgenerek elektronunu yarıiletken katmana TiO_2 iletir.



I^- iyon redoks mediatöründen elektron alıp I^-_3 haline getirilerek yenilenir.



Böylece, BDGP' de kalıcı bir kimyasal değişim olmadan elektrik enerjisi üretilmiş olur [28].

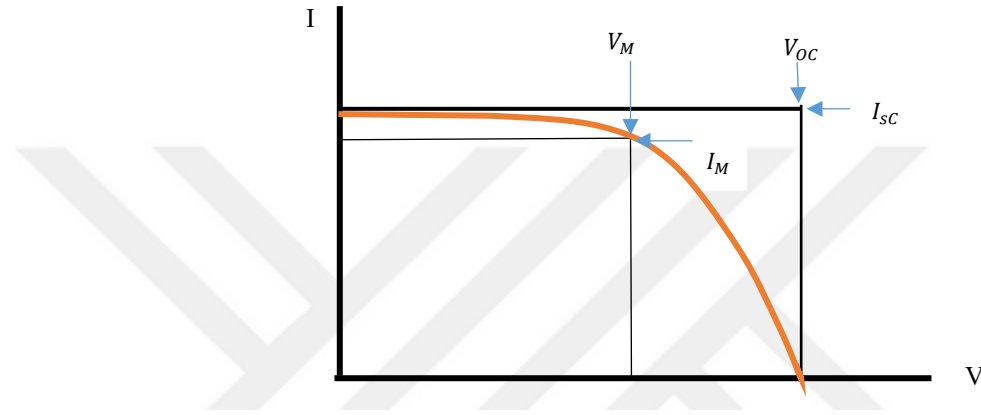
2.2.3. Boya Duyarlı Güneş Pillerinde Verimi Etkileyen Faktörler

Güneş pillerinin verimi, akım (I) voltaj (V) eğrisi parametreleri kullanılarak belirlenir. Bu grafik, hücrenin karakteristik özelliklerini belirtir. Bu grafiğe bağlı parametreler, I-V

eğrisi, V_{oc} , I_{sc} , FF, η , IPCE şeklinde sıralanabilir. Güneş pillerinde verimin yüksek olabilmesi için yüksek bir kısa devre akımı (I_{sc}) ve açık devre gerilimi (V_{oc}) yanında yüksek bir dolun faktörü gereklidir.

2.2.4. Pil Parametrelerinin Hesaplanması

Boya duyarlı güneş pillerinin verimlilik performansı I-V eğrisi parametreleri kullanılarak karakterize edilir.



Şekil 2.15. FV pil akım-gerilim (I-V) karakteristiği

I-V eğrisi üzerinde maksimum güç (P_m) maksimum verimin olduğu noktanın belirlenmesi ile bulunur. Bu noktanın tespit edilmesinden sonra akım-gerilim eksenleri üzerindeki izdüşüm değerleri pilin maksimum gücüne karşılık gelen akım (I_m) ve gerilim (V_m) değerlerini gösterir. Bu durumda pilden elde edilecek maksimum güç bağıntısı aşağıdaki gibidir [29].

$$P_m = I_m \times V_m \quad (2.8)$$

Işınım altındaki akım-gerilim eğrisinde, hesaplanan en büyük maksimum güç değerinin $V_{oc} \times I_{sc}$ ye oranı dolun fakörü (filling factor- FF) denir. Artan seri direnç (R_s) ile veya azalan şönt direncine (R_{sh}) bağlı olarak FF değeri azalır [29].

$$FF = \frac{I_m \times V_m}{I_{sc} \times V_{oc}} = \frac{P_m}{I_{sc} \times V_{oc}} \quad (2.9)$$

Kısa devre akımı (I_{sc}), hücrenin uçları arasındaki potansiyel farkı sıfır (0) iken akımın alabileceği maksimum değeri ifade eder. Kısa devre akımı, hücrenin elektriksel ve optiksel özelliklerine, foton yakalayabilme kapasitesine ve düşen ışığın spektrumuna bağlıdır. Açık devre voltajı (V_{oc}) ise pilden geçen toplam akımın sıfır olduğu anda ölçülen voltajdır. Açık devre voltajı fotovoltaik elektromotor kuvvetine (e.m.k.) eşittir.

Literatürde güneş pillerinin akım-voltaj özelliklerini temsil eden, basit varsayımlardan birçok fiziksel değişkeni içeren gelişmiş modellere kadar çeşitlilik içeren birçok model vardır. Şekil 2.15, iyi bilinen tek eklemli bir güneş pilinin basit bir devre modelini göstermektedir. Bu temel devre, ışık tarafından üretilen akıma karşılık gelen bir akım kaynağına paralel bir diyot ve şönt direnç ile bunlara seri bağlı bir dirençten oluşur. Bu tek diyotlu modelde, terminaldeki akım (I) ile voltaj (V) arasındaki ilişki şu şekilde verilir[30],[31].

$$I = I_L - I_D - I_{SH} \quad (2.10)$$

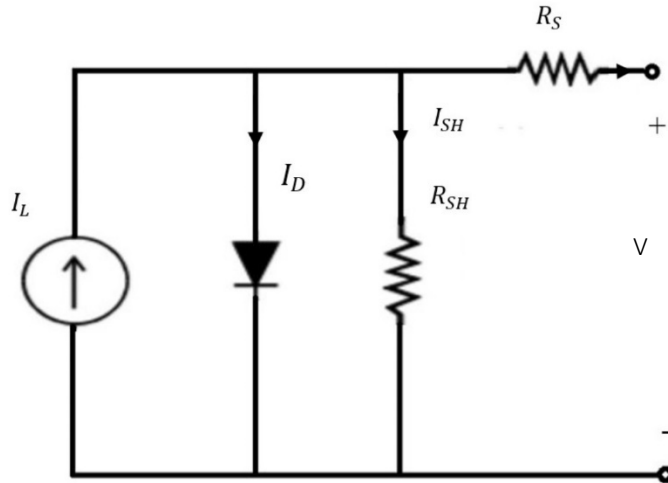
Burada, I_L , I_D ve I_{SH} sırasıyla, ışık tarafından üretilen akım, diyot akımı ve şönt direnç akımıdır. I_D ve I_{SH} akımları şu şekilde verilir.

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{q(V+IR_S)}{nkT}} - 1 \right) \quad (2.11)$$

$$I_{SH} = \frac{V+IR_S}{R_{SH}} \quad (2.12)$$

Böylece terminal akımı ve voltajı arasındaki ilişki şu şekilde verilebilir:

$$I = I_L - I_D - I_{SH} = I = I_L - I_0 \left(e^{\frac{q(V+IR_S)}{nkT}} - 1 \right) - \frac{V+IR_S}{R_{SH}} \quad (2.13)$$

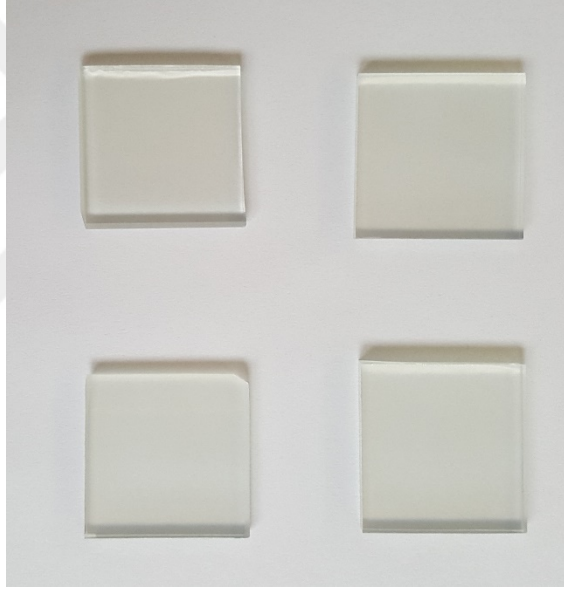


Şekil 2.16. İdeal güneş pili için eşdeğer devre.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1.FOTO-ANOTLARIN HAZIRLANMASI

Çalışmalarımızda alt tabaka malzemesi olarak 2,5 x 2,5 cm boyutlarında FTO kaplı camlar kullanıldı. FTO kaplı cam malzeme ultrasonik temizleyicide sırayla aseton, etanol ve deiyonize su içinde 10 dakika temizlendi. Temizleme işlemlerinden sonra FTO kaplı camlar kuru nitrojen gazı ile kurutuldu.

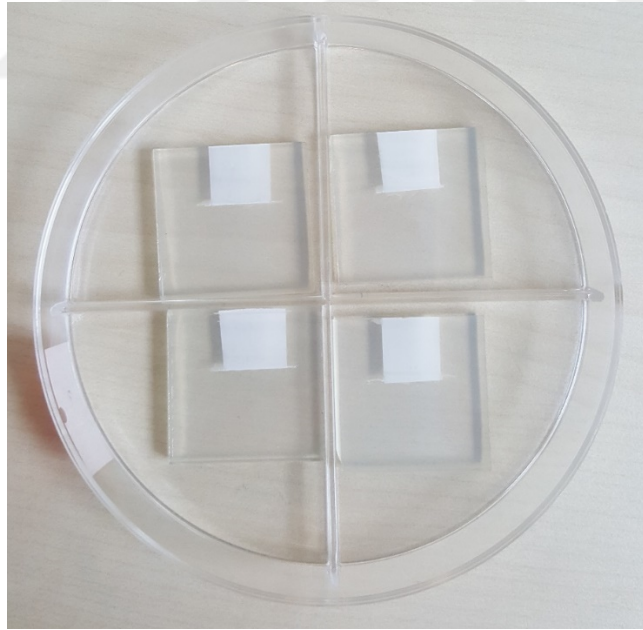


Şekil 3.1. FTO kaplı camlar.

Temizlenmiş ve kurutulmuş FTO kaplı camlar, scotch 3M polimer bant ile açıkta kalan alan 1 cm^2 olacak şekilde maskelendi. Maskelediğimiz FTO kaplı cam yüzeyinde ki bu $1 \times 1 \text{ cm}$ lik alana Sigma Aldrich ten satın alınan titanium dioxide (TiO_2) (>95 % anatase) kolloidal pasta bir cam çubuk yardımıyla düzgünce sürülmüştür. Oda sıcaklığında bir süre kuruduktan sonra bu maske bantlar sökülerek bir sıcak tabla (hot plate) üzerinde $80 \text{ }^\circ\text{C}$ de yaklaşık 5 dakika kurutulmuştur. Bu kurutma işleminden sonra foto anotlar 300, 400, 500 ve 600 gibi dört farklı sıcaklıkta tavlantılmıştır. Tavlama işlemi programlı bir kül fırında istenilen sıcaklığa doğal olarak geldikten sonra bu sıcaklıkta 30 dakika tutularak, tekrar oda sıcaklığına yine fırın içinde doğal olarak düşmesi sağlanmıştır [32].



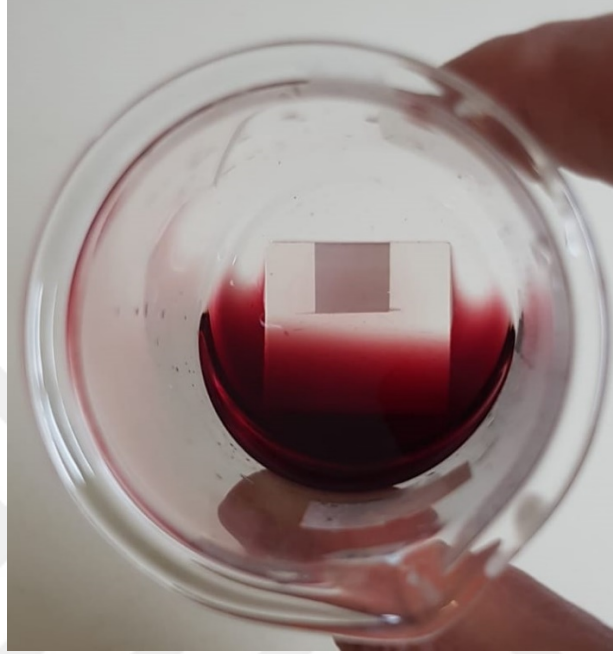
Şekil 3.2. Kül Fırın.



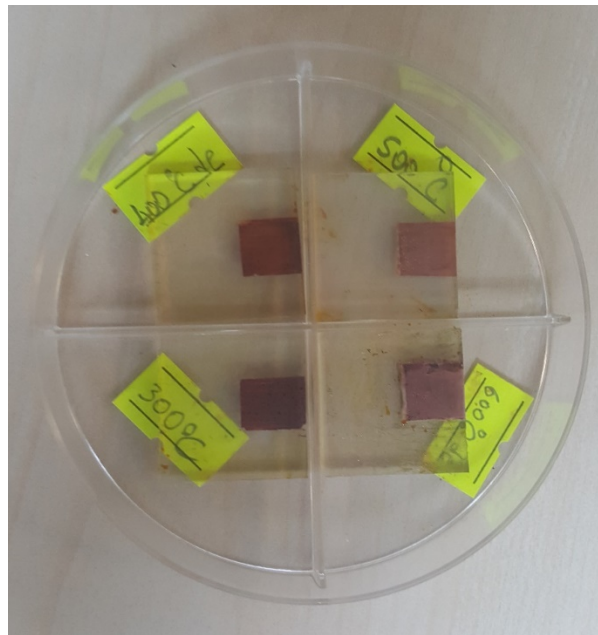
Şekil 3.3. Kurutma işleminden sonra bekletilen foto anotlar.

3.2. BOYA DUYARLILAŞTIRILMASI

Hazırlanan fotoanotlar, 12 saat boyunca Solaronix-İsviçre firmasından satın alınan Ruthenizer 520-DN (Z907) boya maddesinden hazırlanan 0,15 mM Z907 boya/N, N-Dimetilformamid (DMF) boya çözeltisinde bekletildi [32].



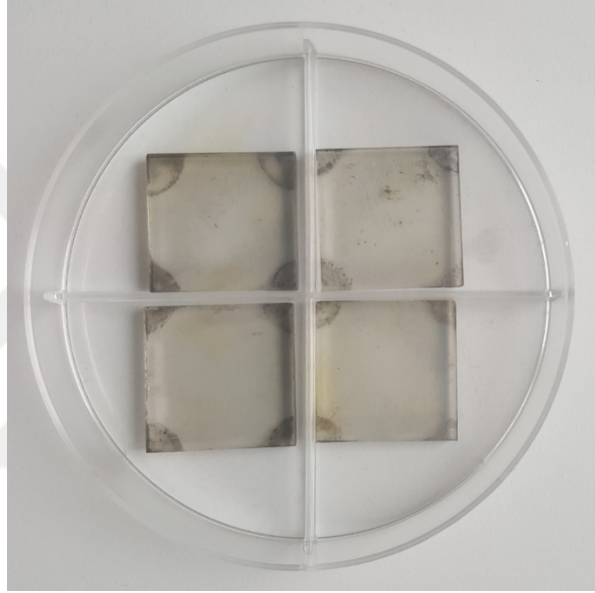
Şekil 3.4. Boya çözeltisinde bekletilen fotoanotlar.



Şekil 3.5. 300, 400, 500 ve 600 °C gibi dört farklı sıcaklıkta tavlanan fotoanotlar.

3.3. KARŞIT ELEKTROTLARIN HAZIRLANMASI

Karşit elektrodu oluşturmak için, spin kaplama yöntemiyle FTO kaplı cam üzerine Platin (Pt) kaplanması sağlandı. Spin kaplama yöntemi kullanılarak, FTO kaplı camlar üzerine 100 µl Platisol T/SP (Solaronix, İsviçre) çözeltisi damlatıldı ve 30 saniye boyunca 2000 rpm hızla döndürüldü. Bu işlem 3 kez tekrarlandı. Kaplama işleminden sonra, karşit elektrot bir sıcak plaka üzerinde 80 °C'de ısıtıldı ve daha sonra 450 °C'de 30 dakika tavlandı [26], [32], [33] .

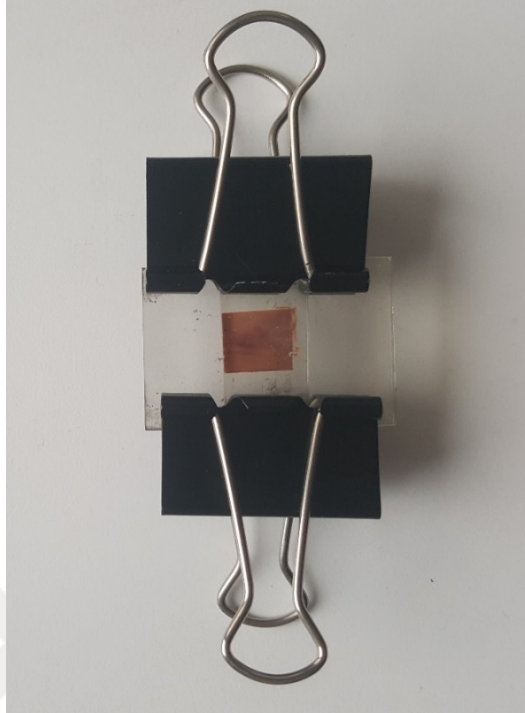


Şekil 3.6. 450°C'de tavlanan karşit elektrotlar.

3.4. BDGP HAZIRLANMASI

Dört farklı sıcaklıkta tavllanmış fotoanotların boya ile duyarlılaştırılmasından ve karşit elektrotların oluşturulmasından sonra, her bir tavlama sıcaklığı için iki farklı elektrolit kullanıldı. Elektrolit olarak E1 (50 mM redox yoğunluklu - AN50 (Solaronix, İsviçre)) ve E2 (30 mM redox yoğunluklu ve ilave thiocyanate içeren - HI30 (Solaronix, İsviçre)) olmak üzere iki farklı tip elektrolit kullanıldı. Boya duyarlılaştırılmış fotoanotlar üzerine birkaç damla elektrolit damlatıldıktan sonra karşit elektrot üzerine kapatılarak karşılıklı iki kısıkaç ile hücre sabitlenmiştir. Böylece dört farklı sıcaklıkta tavllanmış foto elektrota

ve her bir sıcaklık için de 2 farklı elektrolite sahip olmak üzere toplam 8 adet BDGP elde edilmiştir [32].



Şekil 3.7. Fotoanot ve karşıt elektrotların sabitlenmesiyle oluşturulmuş BDGP.

3.5. ÖLÇÜM DÜZENEKLERİ

Elde edilen BDGP numunelerinin fotovoltmik ölçümleri bir Keithley 2400 kaynak-ölçer (source-meter) ile bir solar simülatör kullanılarak 50 mW/cm^2 (0.5 Sun) ışık şiddeti altında ölçülmüştür. Kaynak-ölçerin voltaj tarama hassasiyeti 0,01 V olarak ayarlanmıştır.

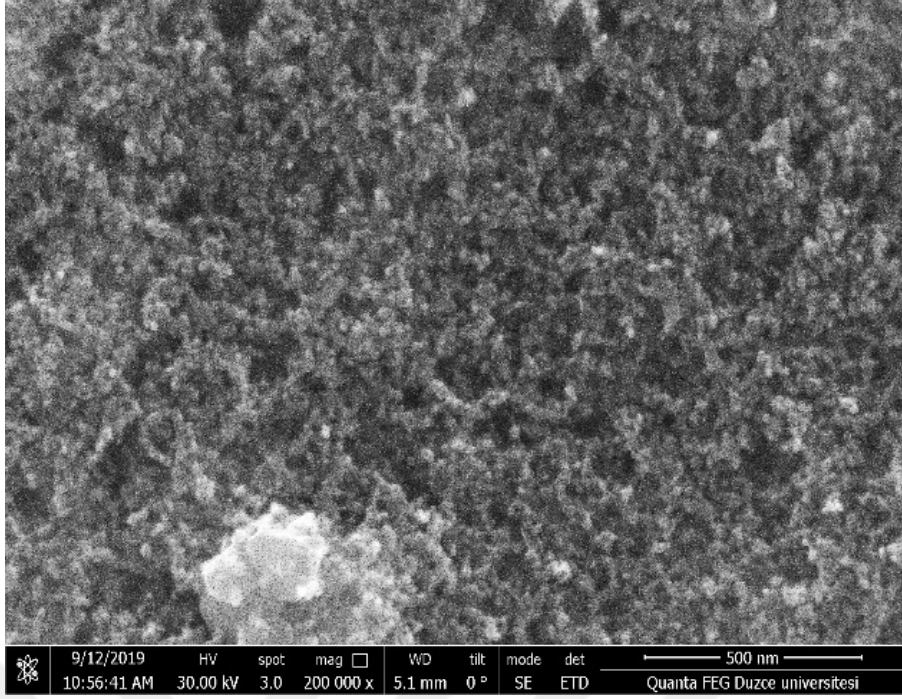


Şekil 3.8. Ölçüm düzenekleri.

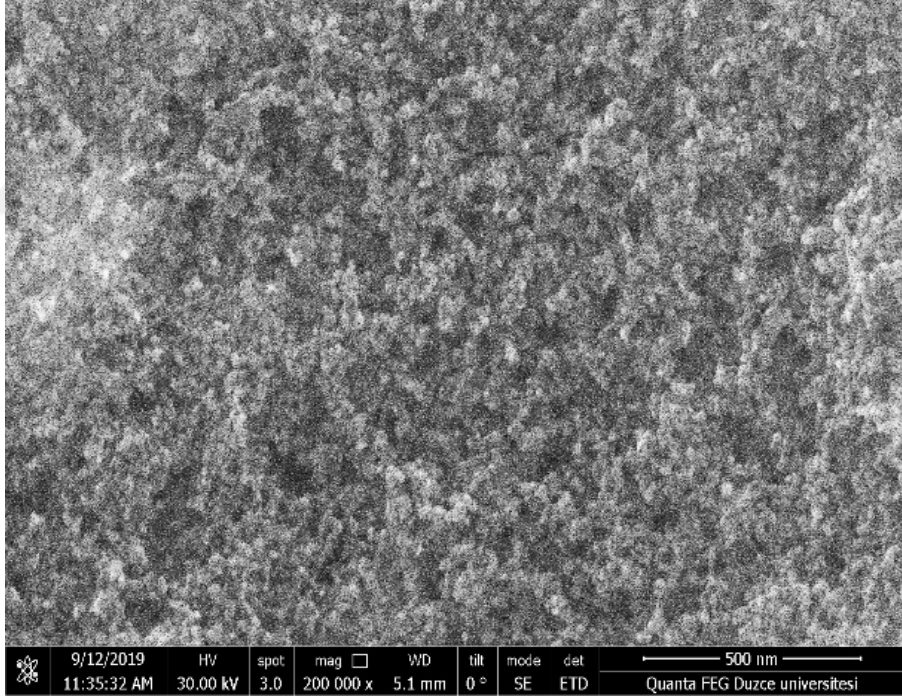
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. FOTOANOTLARIN MORFOLOJİK ÖZELLİKLERİ

Şekil 4.1 ve 4.2 sırasıyla foto anotların alan emisyon tabancalı taramalı elektron mikroskopu (field emission gun scanning electron microscope FEG-SEM) ve (atomic force microscope-AFM) resimlerini göstermektedir. Şekil 4.1'den görüleceği gibi TiO₂ nano parçacıkları yaklaşık 20 nm boyuta sahiptir ve her bir tavlama sıcaklığı için benzer dağılıma sahiptirler. Yüzey morfolojisi ve pürüzlülüğü, hem boya tutunumu (adsorpsiyonu) hem de güneş ışığı soğurulması (absorpsiyonu) nedeniyle BDGP'lerin oldukça önemli özelliklerindedir. AFM analizinden elde edilen pürüzlülük değerleri 300, 400, 500 ve 600 °C tavllanmış fotoanot numuneleri için sırasıyla 77,78,81 ve 109 nm olarak elde edilmiştir. TiO₂ fotoanot tabakalarının yüzey pürüzlülüğü, 300 °C'den 600 °C'ye artan tavlama sıcaklığı ile literatüre uygun olarak artmıştır[34]. İlk üç sıcaklık için elde edilen pürüzlülük değerleri birbirine çok yakın iken 600 °C'de tavlanan numune için elde edilen pürüzlülük değeri diğerlerine göre oldukça yüksektir. Bu nedenle, 600 °C'de tavlanan numunenin, daha yüksek adsorpsiyon ve absorpsiyon nedeniyle daha yüksek verime sahip olması beklenebilir [32].

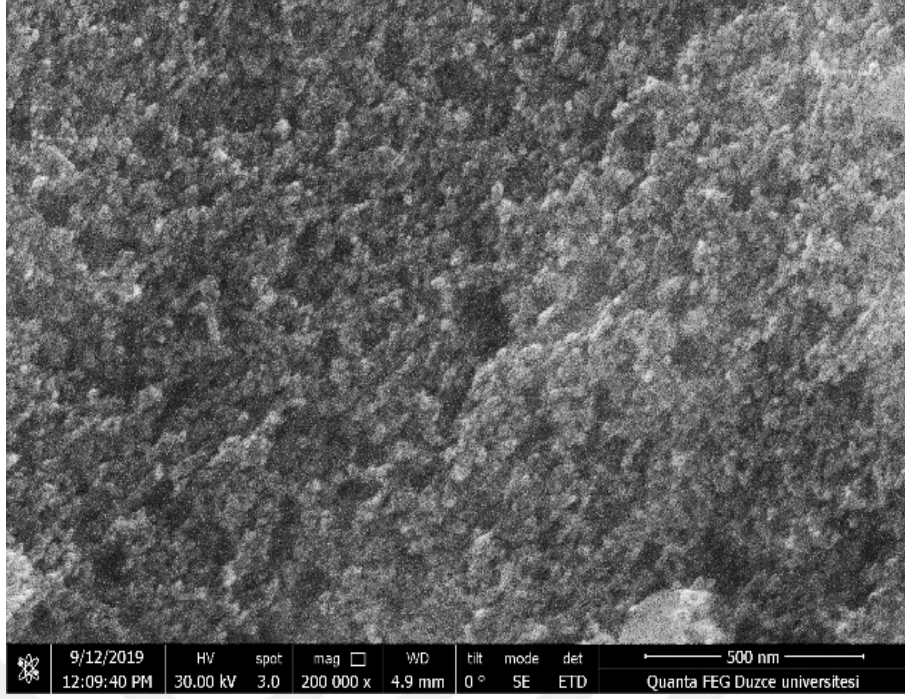


a)

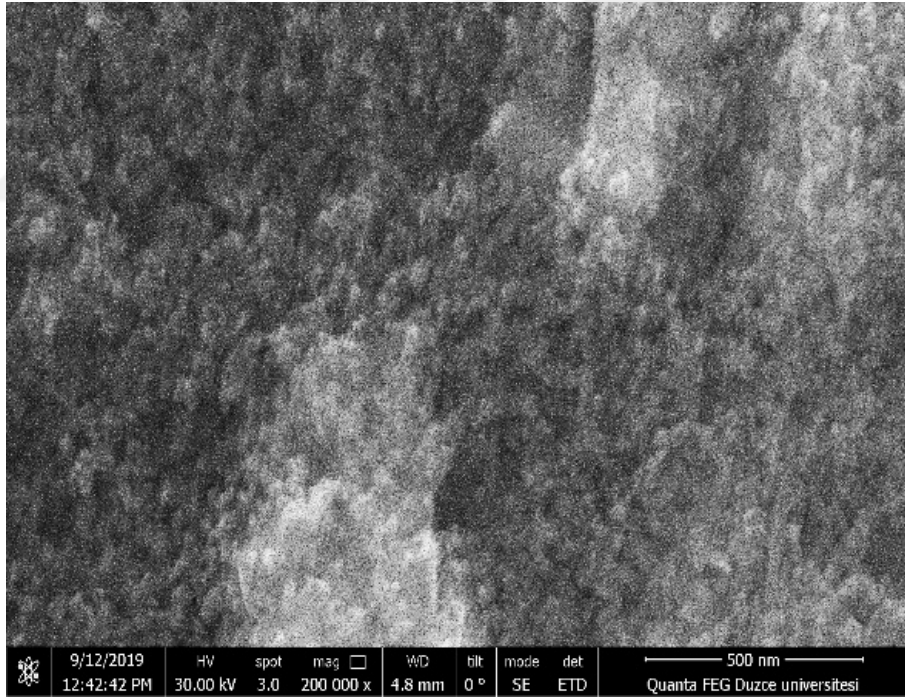


b)

Şekil 4.1. a) 300 °C , b) 400 °C c) 500 °C , d) 600 °C 'de tavlanan BDGP'lerin SEM görüntüleri.

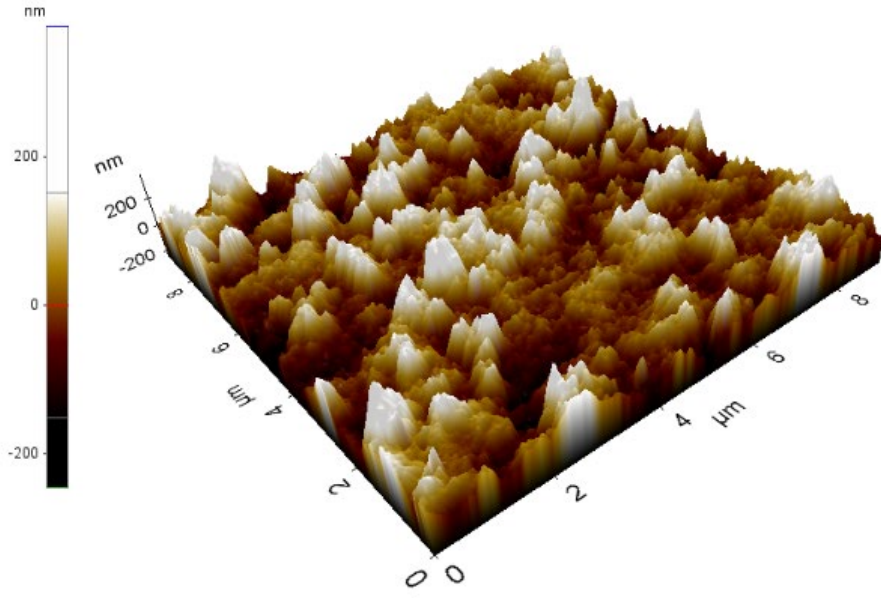


c)

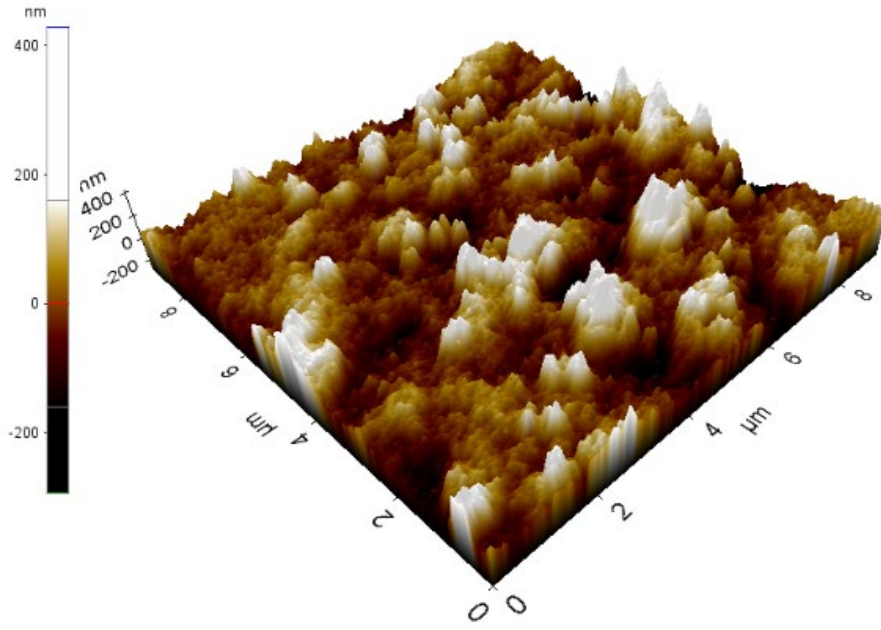


d)

Şekil 4.1. (devam) a) 300 °C , b) 400 °C c) 500 °C , d) 600 °C 'de tavlanan BDGP'lerin SEM görüntüleri.

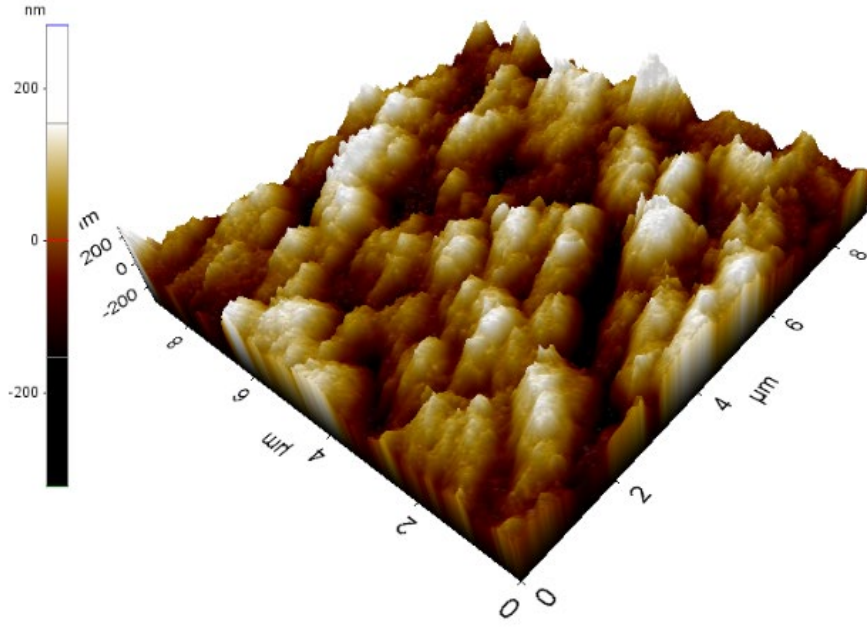


a)

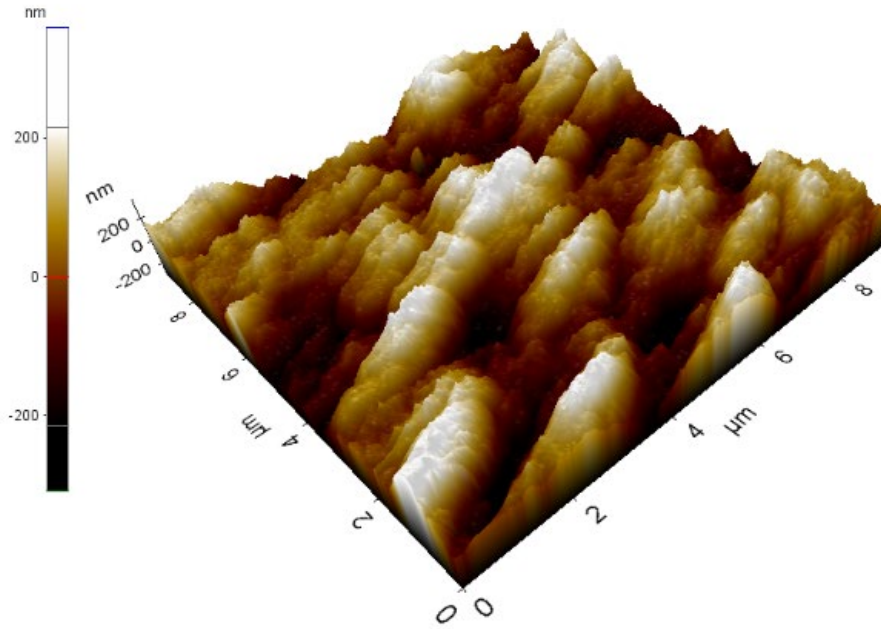


b)

Şekil 4.2 a) 300 °C b) 400 °C c) 500 °C d) 600 °C de tavlanan DSSC'lerin AFM görüntüleri.



c)



d)

Şekil 4.2. (devam) a) 300 °C b) 400 °C c) 500 °C d) 600 °C de tavlanan DSSC'lerin AFM görüntüleri.

4.2. E1 VE E2 ELEKTROLİTİ İÇİN FOTOVOLTAİK PARAMETRELER

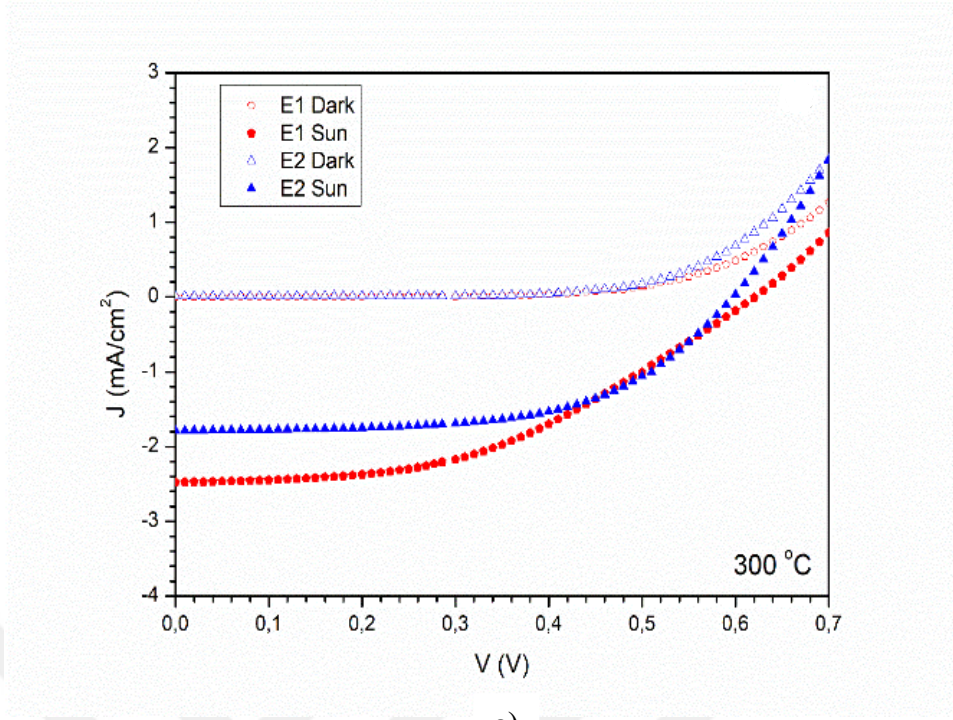
Fotovoltaik performansın hem tavlama sıcaklığına hem de elektrolit türüne bağlılığını elde etmek için dört farklı sıcaklık (300, 400, 500 ve 600 C) ve iki farklı elektrolit (E1 ve E2) ile toplam 8 adet BDGP oluşturulmuştur. Bu hücrelerin fotovoltaik parametreleri hesaplamak için ölçülen akım yoğunluğu-voltaj (J-V) Şekil 4.3 ve 4.4'te verilmiştir. Şekil 4.3 her bir sıcaklık için elektrolit türüne bağlı olarak karanlık ve ışık altındaki J-V eğrilerini göstermektedir. Şekil 4.4. ise her bir elektrolit için sıcaklığa bağlı J-V eğrilerini göstermektedir.

Böyle bir BDGP için enerji dönüşüm verimi şu şekilde tanımlanır:

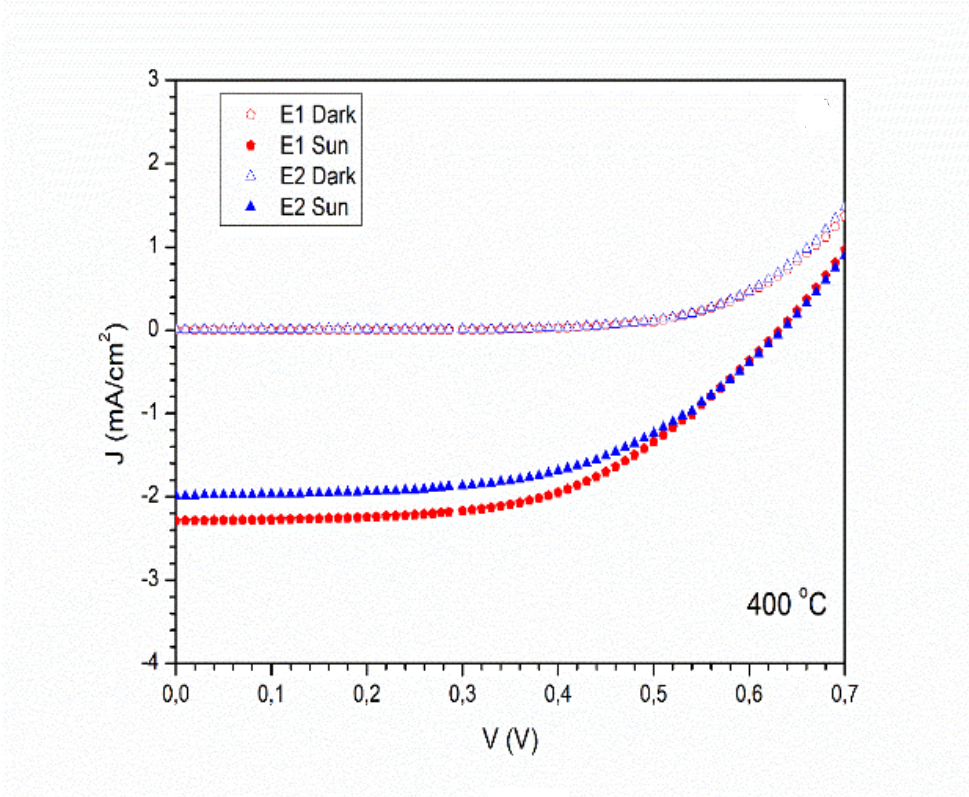
$$\eta = \frac{P_m}{P_{light}} = \frac{V_m J_m}{P_{light}} = \frac{V_{oc} J_{sc} FF}{P_{light}} \quad (4.1)$$

Burada; P_m alan başına maksimum güç noktası ($=V_m J_m$), P_{light} alan başına ışık gücü, V_{oc} açık devre voltajı, J_{sc} kısa devre akımı ve FF ise dolun faktörüdür.

Çizelge 4.1'de, DSSC'lerin V_{oc} , J_{sc} , FF ve η değerlerini göstermektedir. Şekil 4.3, 4.4 ve Çizelge 4.1'de görüldüğü gibi, her iki elektrolit için tavlama sıcaklığının artmasıyla verim artmaktadır ve en yüksek verim 600 °C'de tavllanmış fotoanotlu numune için elde edilmiştir. Tablodan açıkça anlaşılmaktadır ki, daha yüksek verimliliğin ana nedeni, yüksek sıcaklıklardaki daha yüksek akım yoğunluğudur. AFM analizinden elde edilen, artan sıcaklıkla artan pürüzlülüğe bağlı olarak adsorbe edilen boya moleküllerinin miktarının arttığı söylenebilir. Bu nedenle, boya moleküllerinden gelen foto elektron miktarı ile belirlenen fotoakımın artması verimi artırdığından, yüksek tavlama sıcaklıklarında elde edilen verim fotoanodun artan pürüzlülük değerlerine bağlanabilir. Ayrıca, E1 elektrolitinin, daha yüksek redoks yoğunluğundan dolayı her bir hücre için daha yüksek J_{sc} sağladığı ve bu durumda daha yüksek verimlilikle sonuçlandığı söylenebilir. Öte yandan, E2 elektroliti tüm hücreler için daha yüksek FF değerleri ile 500 ve 600 °C gibi yüksek sıcaklıkta tavllanmış hücreler için daha yüksek V_{oc} değerleri sağlamıştır. Çözücü, redoks çifti ve ilave katkılardan oluşan elektrolit bileşimi hem elektrolitin aktivitesini hem de elektrokimyasal potansiyeli etkiler. E2 elektroliti ayrıca tiyosiyanat içerdiğinden, hücrelerin yüksek FF ve V_{oc} değerleri elektrolitin değişen kimyasal potansiyeline atfedilebilir. BDGP'lerin yük yeniden birleşme (rekombinasyon) özellikleriyle, seri ve yük transfer direncini araştırmak için, elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) ölçümleri karanlıkta ve V_{oc} yakınında 0,7 V voltaj altında yapıldı.

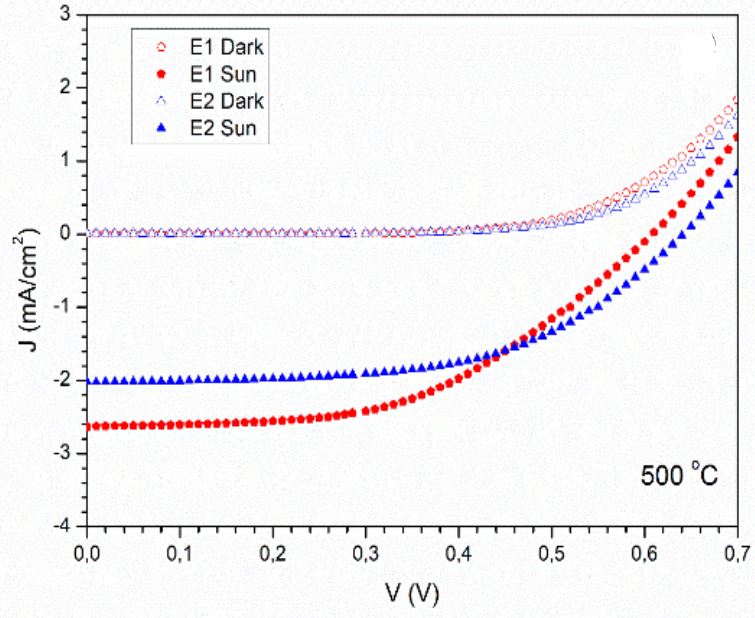


a)

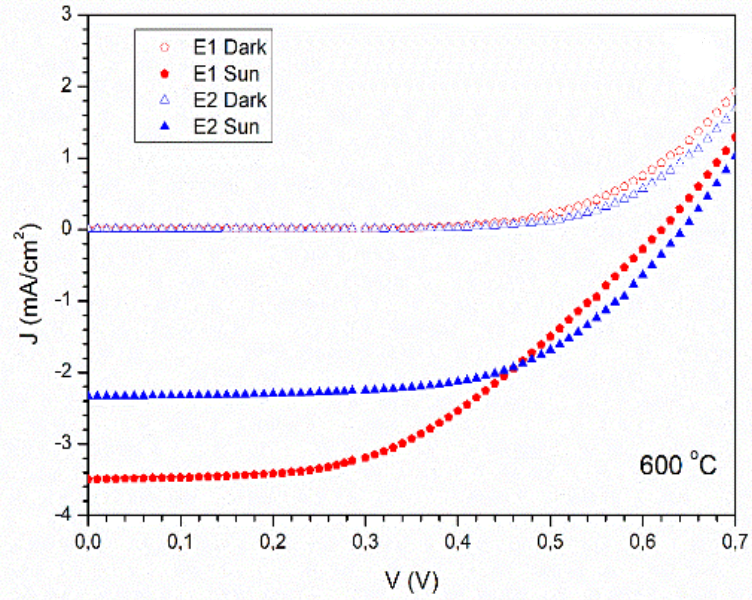


b)

Şekil 4.3. a) 300 °C b) 400 °C c) 500 °C d) 600 °C de tavlanmış fotonaotlu BDGP için elektrolit türüne bağlı olarak karanlık ve ışık altındaki J-V eğrileri.

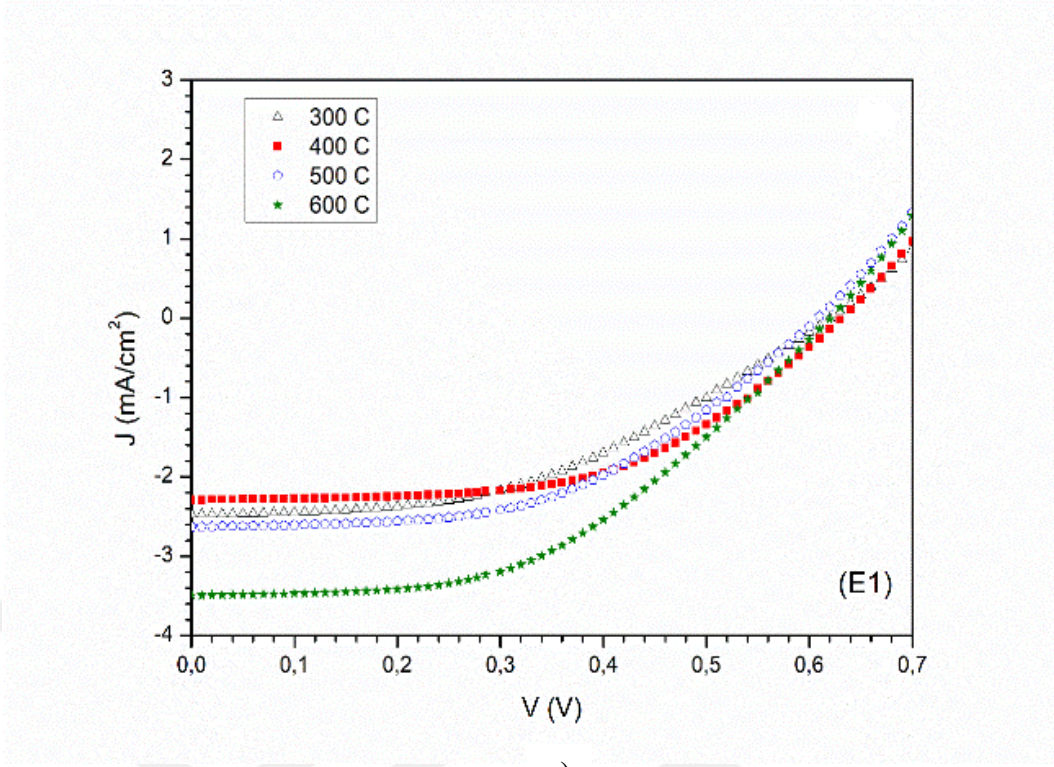


c)

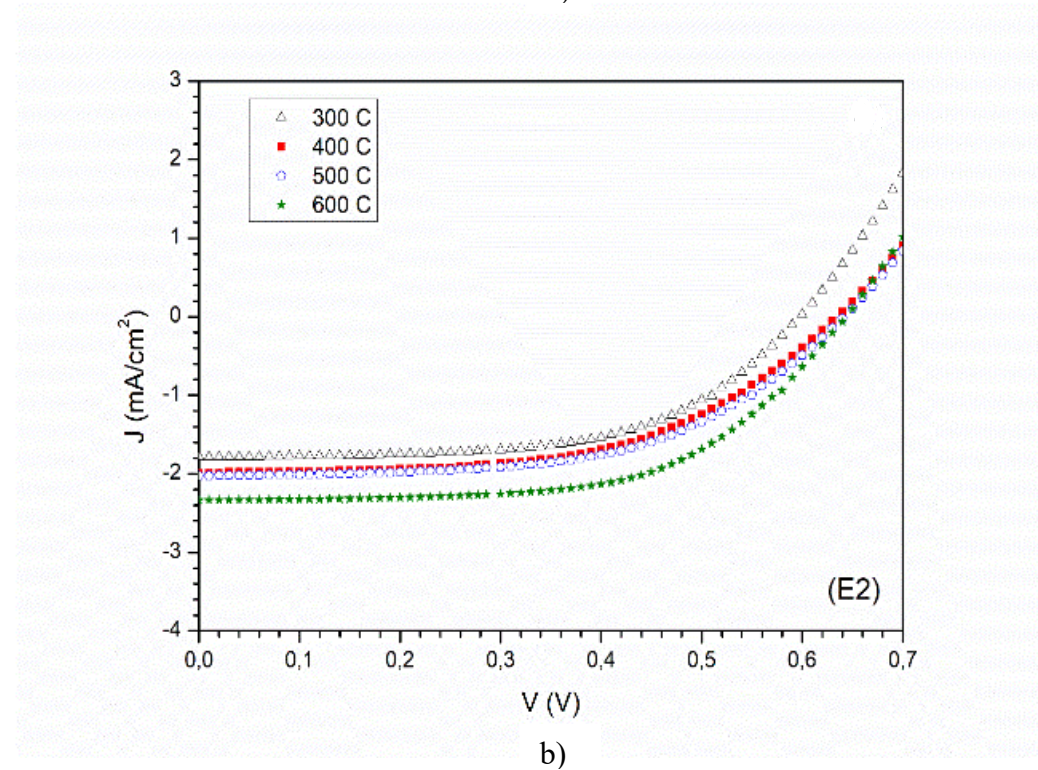


d)

Şekil 4.3. (devam) a) 300 °C b) 400 °C c) 500 °C d) 600 °C de tavlanmış fotonaotlu BDGP için elektrolit türüne bağlı olarak karanlık ve ışık altındaki J-V eğrileri.



a)

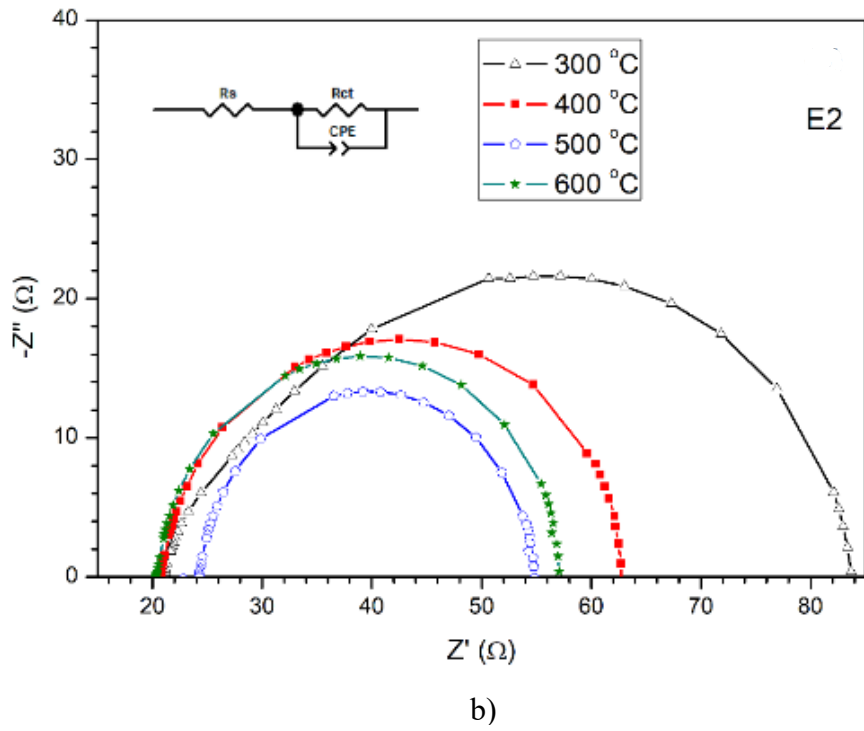
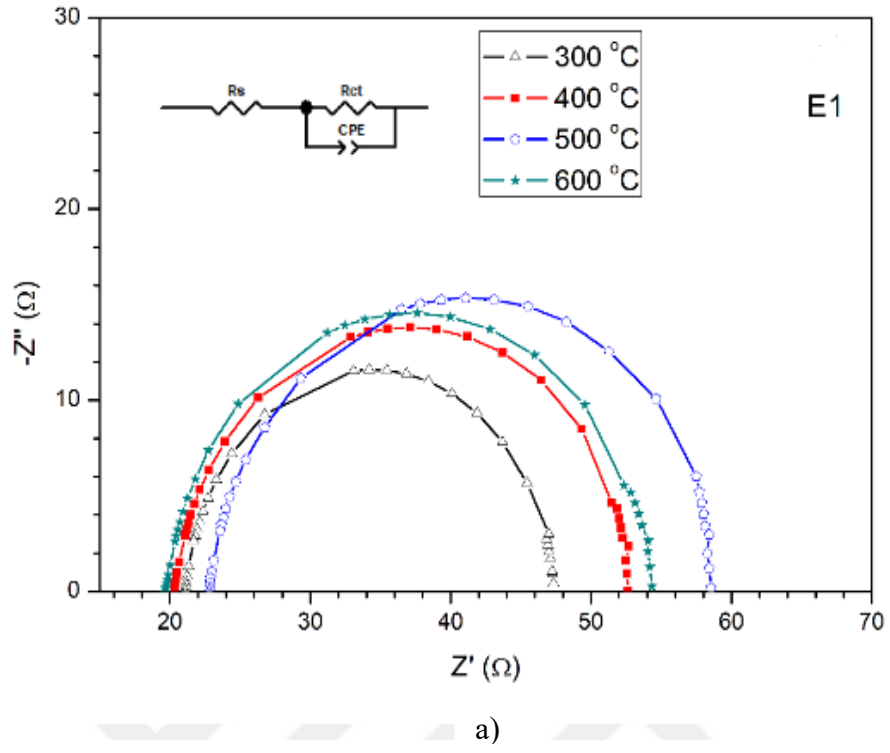


b)

Şekil 4.4. a) E1 b) E2 elektrolitli BDGP için Sıcaklığa bağlı J-V eğrileri.

Hücrelerin Nyquist grafikleri Şekil 4.5'de verilmiştir. Hücrelerin empedans değerleri ZView yazılımıyla eşdeğer devre kullanılarak fit edilmiş ve elde edilen değerler Çizelge 4.2'de verilmiştir. EIS verilerine uygun olarak, bir seri direnç (R_s) ile yük aktarım direnci (R_{ct}) ve sabit faz elemanından (CPE) oluşan bir eşdeğer devre en olası uyumu (fit) vermiştir. FTO direnci, R_s üzerindeki ana etkidir ve bu değer tüm hücreler için hemen hemen aynıdır. TiO_2 tabakasının şekli ve kalınlığı, tavlama sıcaklığı ve elektrolit tipi gibi diğer etkiler de hücrelerin seri direncini etkileyebilir. Bir BDGP ışığa maruz kaldığında, aktif bölgede elektron-deşik (veya iyon) çiftleri oluşur. Yeni üretilen bu yük taşıyıcılarından bazıları yeniden birleşebilirken bazıları zıt yönlerde sürüklenebilir ve böylece fotoakıma katkıda bulunabilirler. Daha küçük R_s ve R_{ct} , bu yüklü çiftlerin akıma yüksek katkısının ve düşük rekombinasyon oranının göstergesidir [32], [35].

Nyquist grafiklerinde bir yarım daire, TiO_2 tabakası içindeki elektron taşınmasına olduğu kadar TiO_2 /boya/elektrolit arayüzü boyunca elektron taşınması olgusuna da atıfta bulunur. Şekil 4.5 (a) 'dan görüldüğü gibi, 300 °C tavllanmış hücrenin Nyquist grafiği en küçük çapa sahipken, 500 °C tavllanmış hücre en büyük çapa sahiptir. Ayrıca, diğer hücrelere kıyasla en düşük R_{ct} değeri, 300 °C tavllanmış hücre tarafından E1 tipi elektrolit için elde edilmiştir. Böylece en düşük R_{ct} değerinin en küçük çapla ilişkili olduğu söylenebilir. 300 °C'de tavlanan fotoanodun bu düşük yük aktarım direnci, verimli yük aktarım sürecine ve daha düşük elektron-deşik rekombinasyon oranına bağlanabilir. Ancak bu durum 300 °C'de tavlanan hücre için en iyi fotovoltaj dönüşüm verimliliğini sağlamadı. 600 °C tavllanmış hücrenin en iyi fotovoltaj dönüşüm verimliliğine sahip olduğu bulundu ve bu durum daha yüksek pürüzlülükten dolayı hücrenin daha yüksek adsorpsiyon ve absorpsiyon oranına sahip olmasına atfedildi. E2 elektroliti için verilen Şekil 4.5 (b)'den, en küçük çap 500 °C'de tavllanmış hücre için elde edilmiştir. Bununla birlikte, her iki elektrolit tipi için 600 °C tavllanmış hücre, en düşük R_s ve belirgin daha yüksek pürüzlülük nedeniyle en iyi fotovoltaj dönüşüm verimliliğine sahiptir. Tek başına EIS ve morfolojik inceleme PV sonuçları hakkında net bir bilgi vermez iken, EIS ve pürüzlülük verileri birlikte değerlendirildiğinde PV sonuçlarını desteklediği söylenebilir [32].



Şekil 4.5. a) E1 elektrolitli BDGP için Nyquist eğrileri b) E2 elektrolitli BDGP için Nyquist eğrileri.

Çizelge 4.1. Hazırlanan BDGP'lerin fotovoltaik performans parametreleri.

Tavlama Sıcaklığı (°C)	E ₁				E ₂			
	V _{oc}	J _{sc}	FF	η	V _{oc}	J _{sc}	FF	η
	(V)	(mA/cm ²)	(%)	(%)	(V)	(mA/cm ²)	(%)	(%)
300	0,62	2,48	45,10	1,39	0,60	1,79	57,78	1,24
400	0,62	2,29	55,17	1,57	0,62	1,99	55,76	1,38
500	0,61	2,63	49,64	1,59	0,64	2,02	55,49	1,44
600	0,62	3,49	47,60	2,06	0,64	2,34	59,46	1,78

Çizelge 4.2. Hazırlanan BDGP'lerin elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) parametreleri.

Tavlama Sıcaklığı (°C)	E ₁		E ₂	
	R _s (Ω)	R _{ct} (Ω)	R _s (Ω)	R _{ct} (Ω)
300	21,13	26,28	20,98	66,31
400	20,33	32,58	20,71	42,74
500	22,76	36,35	24,30	30,65
600	19,72	34,57	20,36	37,17

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada boya duyarlı güneş pillerinde (BDGP), fotoanot tavlama sıcaklığı ile elektrolit içeriğinin pilin fotovoltaik performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. BDGP'lerin fotovoltaik ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) özellikleri, dört farklı fotoanot tavlama sıcaklığı ve iki farklı elektrolit çözeltisi için incelenmiştir. BDGP'lerinde duyarlaştırıcı boya olarak Ruthenizer 520-DN (Z907) kullanılmış ve fotovoltaik ölçümler bir solar simülatör altında 50 mW/cm² (0,5 Sun) aydınlatma şartlarında gerçekleştirilmiştir.

Bu amaçla, flor katkı kalay oksit (FTO) camlar üzerine doktor blade yöntemiyle TiO₂ nanokristal kaplanarak oluşturulan fotoanotlar dört farklı sıcaklıkta (300, 400, 500 ve 600 °C) tavlansmıştır. Bu fotoanotların morfolojik özellikleri, alan emisyonu taramalı elektron mikroskobu (FESEM) ve atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ile incelenmiştir. FESEM resimlerinden TiO₂ nano parçacıkların yaklaşık 20 nm boyuta sahip olduğu ve her bir tavlama sıcaklığı için benzer dağılıma sahip olduğu görülmüştür. AFM analizinden elde edilen pürüzlülük değerleri 300, 400, 500 ve 600 °C tavlansmış fotoanot numuneleri için sırasıyla 77, 78,81 ve 109 nm olarak elde edilmiştir. TiO₂ fotoanot tabakalarının yüzey pürüzlülüğü, 300 °C'den 600 °C'ye artan tavlama sıcaklığı ile literatüre uygun olarak artmakta olup özellikle 600 °C'de tavlansan numune için elde edilen pürüzlülük değeri diğerlerine göre oldukça yüksek olduğu görülmüştür.

Dört farklı sıcaklıkta tavlansan fotoanotlar ile oluşturulan boya duyarlı güneş pillerinde E₁ (50 mM redox yoğunluklu - AN50) ve E₂ (30 mM redox yoğunluklu ve ilave thiocyanate içeren - HI30) olmak üzere iki farklı tip elektrolit kullanıldı. Böylece imal edilen 8 farklı BDGP numunesinin fotovoltaik özellikleri bir güneş simülatörü altında 50 mW/cm² (0,5 Sun) aydınlatma şartlarında incelenmiştir. Her iki elektrolit türü için fotoanot tavlama sıcaklığının artmasıyla verim arttığı gözlenmiş ve en yüksek verimin 600 °C'de tavlansmış fotoanota sahip numune için elde edilmiştir. Yüksek sıcaklıklardaki büyük akım yoğunluğunun yüksek verimliliğin temel nedeni olduğu görülmüştür. Bu durum artan sıcaklıkla artan pürüzlülüğe bağlı olarak adsorbe edilen boya molekülleri miktarındaki artışa atfedilmiştir. Ayrıca, E₁ elektrolitinin daha yüksek redoks yoğunluğundan dolayı her bir hücre için daha yüksek J_{sc} sağladığı ve bu durumun da daha yüksek verimlilikle

sonuçlandığı bulunmuştur. Öte yandan, E2 elektroliti tüm hücrelerin daha yüksek dolum faktörüne (FF) sahip olduğu bulunmuştur.

BDGP'lerin rekombinasyon özellikleri ile seri ve yük transfer direncini elde etmek için elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) ölçümleri yapılarak hücrelerin Nyquist grafikleri elde edilmiştir. Nyquist eğrileri için, bir seri direnç (R_s) ile yük aktarım direnci (R_{ct}) ve sabit faz elemanından (CPE) oluşan bir eşdeğer devre en olası uyumu (fit) vermiştir. Seri direnç (R_s) üzerindeki ana etkinin FTO direnci olması sebebiyle tüm hücreler için birbirine yakın değerde iken, her iki elektrolit türü için de 600 °C de tavlanan fotoanotlu numune için en küçük seri direnç değerleri elde edilmiştir. Her iki elektrolit tipi için 600 °C tavllanmış hücre, en düşük R_s ve belirgin olarak daha yüksek pürüzlülük değeri nedeniyle en iyi fotovoltaiik dönüşüm verimliliğine sahip olduğu bulunmuştur. Böylece, tek başına EIS veya morfolojik incelemenin PV sonuçları hakkında net bir bilgi vermeyeceği, bu verilerin birlikte değerlendirildiğinde PV sonuçlarını desteklediği söylenebilir. Sonuç olarak; EIS ve morfolojik inceleme sonuçları birlikte değerlendirildiğinde birbirini desteklediği, yüksek pürüzlülük ve düşük seri direnç sayesinde 600 °C'de tavlanan fotoanota sahip BDGP'nin her iki elektrolit türü için de en iyi fotovoltaiik performansı sergilediği gözlemlenmiştir.

6. KAYNAKLAR

- [1] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2020, 18 Ağustos). *Dünya Birincil Enerji Tüketim Oranlarının Kaynak Bazlı Dağılımı* [Online]. Erişim: <https://www.enerji.gov.tr>.
- [2] Y. Mutlu, “Türkiye’nin enerji potansiyeli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimi açısından önemi,” *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, c. 4, sayı 2, ss. 35, 2012.
- [3] H. Arslan, “Evropiyum (Eu +3) Katkılı Tio₂ İnce Filmlerin Sentezi Karakterizasyonu Ve Boya Duyarlı Güneş Pili Foto-Anot Olarak Kullanımı,” Yüksek lisans tezi, Fizik, Fen Bilimleri Enstitüsü, Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye, 2018.
- [4] C. Hakyemez. (2021, 15 Ocak). *Kaynak Bazlı Üretim* [Online]. Erişim: <http://www.tskb.com.tr/i/assets/document/pdf/enerji-bulteni-temmuz-2020.pdf>.
- [5] Teiaş. (2020,4 Mayıs). *Türkiye brüt elektrik üretiminin birincil kaynaklara göre üretimi* [Online]. Erişim :<https://www.teias.gov.tr/tr-TR/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri>.
- [6] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2020, 18 Ağustos) *Dünya Birincil Enerji Tüketim Oranlarının Kaynak Bazlı Dağılımı* [Online]. Erişim: <https://www.enerji.gov.tr>.
- [7] D. Ereker, “Vanadyum Pentaoksit Fotoanot Malzemesinin Nanokristal TiO₂ Tabanlı Güneş Pillerinin Fotovoltaik Özelliklerine Etkisi,” Yüksek lisans tezi, Nanoteknoloji, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, Türkiye, 2019.
- [8] A. Einstein. “Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt,” *Annalen der physik*, sayı 17, ss.132-148, 1905.
- [9] G. L. Chapin, D. M., Fuller, C.S., Pearson. “A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power,” *Journal of Applied Physics*, ss. 676-677, 1954.
- [10] G. Atmaca. (2021, Mart 3). *Güneş Pillerinin Tarihi* [Online]. Erişim: <https://www.kuark.org/2012/04/gunes-pili-ve-kisa-tarihi/>.
- [11] E. Akman, S. Akin, G. Karanfil ve S. Sonmezoglu, “Organik Güneş Pilleri,” *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 14, sayı 1, ss. 1-30. 2013.
- [12] M. Acar, “Güneş pillerinin dünü, bugünü ve geleceğe bakış,” *Mühendis ve Makina*, c. 47, sayı. 560, ss. 42-51, 2006.
- [13] H. H. Öztürk . (2021, 3 Mart). *Güneş Enerjisinden Fotovoltaik Yöntemle Elektrik Üretiminde Güç Dönüşü Verimi Ve Etkili Etmenler* [Online]. Erişim: https://www.emo.org.tr/ekler/3a921ffad054cb0_ek.pdf 2004.
- [14] İ. H. Altaş, “Fotovoltaik Güneş Pilleri: Yapısal Özellikleri ve Karakteristikleri,” *Enerji, Elektrik, Elektromekanik-3e*, c. 47, ss. 66-71, 1998.

- [15] Ş. Aydoğan, “PN Eklem Diyodu,” *Katıhal Fiziği*, 1. baskı, Ankara, Türkiye: Nobel Yayın Dağıtım, 2011, böl.13, ss. 308-309.
- [16] F. Kantaroğlu, “Fotovoltaik Sistemler,” *Journal of Chemical Information and Modeling*, ss. 2, 2010.
- [17] N. G. Kelzenberg, M. D., Daniel, B., Turner, E., Breandan, M., Micheal ve L. Morgan, C. “Photovoltaic measurements in single-nanowire silicon solar cells,” *Nano Letters*, c. 8, ss. 710-714, 2008.
- [18] S. Kalogirou, “McEvoy’s Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications (1),” *United Kingdom Academic Press*, ss. 75-560, 2017.
- [19] Nrel Transformin Energy. (2020, Haziran 10). *Best Research Cell Efficiencies* [Online]. Erişim: <https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/cell-pv-eff-crysi.20200922.pdf>.
- [20] B. Kocaman ve S. A. Tuncel, “Boya Duyarlı Güneş Hücreleri İçin Yeni Sistemlerin Geliştirilmesi Ve Karakterizasyonu”, Yüksek lisans tezi, Nanoteknoloji ve Nanotıp, Fen Bilimleri Enstitüsü, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 2014.
- [21] Nrel Transformin Energy. (2020, Haziran 10). *Best Research-Cell Efficiency Chart* [Online]. Erişim: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>.
- [22] Photovoltaics Report. (2021, 10 Ocak). *Photovoltaics Report* [Online]. Erişim: www.ise.fraunhofer.de.
- [23] Z. K. Yıldız, “TiO₂ Based Dye Sensitized Solar Cells Obtained By Sol-Gel Method,” Yüksek lisans tezi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2018.
- [24] Ö. Mermer ve M. Boz, “Katkılandırılmış TiO₂ İnce Filmlerin Üretilmesi, Karakterizasyonu Ve Boya Katkılı Güneş Pili Aygıtlarının Geliştirilmesi,” Yüksek lisans tezi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye, 2015.
- [25] E. P. Nwanya, F. I. Ezema “Annealing effects of photoanode on dye sensitized solar cell performance.” *Journal of the Physical Sciences*, s. 6, 2011.
- [26] Z. K. Yıldız, A. Atılğan, A. Atli, K. Özel, C. Altinkaya, ve A. Yıldız, “Enhancement of efficiency of natural and organic dye sensitized solar cells using thin film TiO₂ photoanodes fabricated by spin-coating,” *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, c. 368, ss. 23-29, 2019.
- [27] M. O’regan ve B. Grätzel. “A low-cost, high-efficiency solar cell based on dyesensitized colloidal TiO₂ films, ” *Nature*, c. 353, sayı 6346, ss. 737-740, 1991.
- [28] M. Grätzel, “Dye-sensitized solar cells,” *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, c. 4, sayı 2, ss.145-153, 2003.
- [29] B. Demirci. (2021, 1 Mart). *Güneş Pili Çalışma Prensipleri ve Verim Hesabı* [Online]. Erişim: <https://muyendis.com/gunes-pili-calisma-prensipleri-ve-verim-hesabi/>.
- [30] K. J. Lee, J. H. Kim, H. S. Kim, D. Shin, D. W. Yoo ve H. J. Kim, “A study on a solar simulator for dye sensitized solar cells,” *International Journal of Photoenergy*, c. 2012, sayı 11, 2012.
- [31] T. O. Saetre, O. M. Midtgård ve G. H. Yordanov, “A new analytical solar cell I-V

- curve model,” *Renewable Energy*, c. 36, sayı 8, ss. 2171-2176.
- [32] T. Çiftci, M. Gökçen ve E. Orhan, “Annealing effects of photoanode on dye sensitized solar cell performance,” *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, Basımda.
- [33] E. Orhan, M. Gökçen ve S. Taran, “Effect of the photoanode fabrication condition, electrolyte type and illumination type on dye-sensitized solar cells performance,” *Bulletin of Materials Science*, c. 44, sayı 1, 2021.
- [34] S. Mahalingam, H. Abdullah, A. M. I. Ashaari ve S. Shaari, “Influence of heat treatment process in In₂O₃-MWCNTs as photoanode in DSSCs,” *Ionics (Kiel)*, c. 22, sayı 5, ss.711, 2016.
- [35] R. Selvapriya, J. Mayandi, V. Ragavendran, V. Sasirekha, V. J. Vinodhini, ve J. M. Pearce, “Dual Morphology Titanium Dioxide for Dye Sensitized Solar Cells,” *Ceram*, c. 45, sayı 6, ss. 7268-7277, 2019.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Tuğçe ÖZKACAR

Yabancı Dili : İngilizce

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Fizik	Düzce Üniversitesi	2021
Lisans	Fizik	Düzce Üniversitesi	2014
Lise		Sabit Büyük Bayrak Lisesi	2010

YAYINLAR

T. Çiftci, M. Gökçen ve E. Orhan, "Annealing effects of photoanode on dye sensitized solar cell performance," *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, Basımda.