

**T.C.
ISPARTA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**METAL KATKILI TiO₂ ÖNCÜLLERİ KULLANILARAK BOYA
DUYARLAŞTIRILMIŞ GÜNEŞ HÜCRESİ ÜRETİMİ ve ANALİZİ**

Meryem Serfiraz BİLİCİ

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Melik Ziya YAKUT**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISPARTA - 2019**



© 2019 [Meryem Serfiraz BİLİCİ]

TEZ ONAYI

Meryem Serfiraz BİLİCİ tarafından hazırlanan " Metal Katkılı TiO₂ Öncülleri Kullanılarak Boya Duyarlaştırılmış Güneş Hücresi Üretimi ve Analizi " adlı tez çalışması aşağıdaki jüri üyeleri önünde Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü **Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

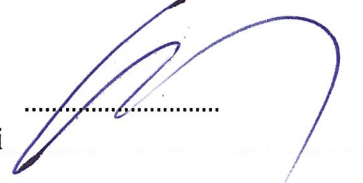
Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Melik Ziya YAKUT
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi



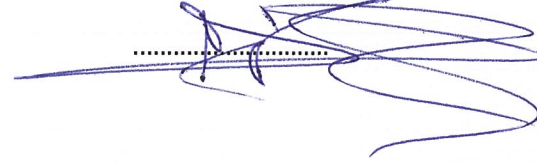
Jüri Üyesi

Prof. Dr. Arzu ŞENCAN ŞAHİN
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi



Jüri Üyesi

Prof. Dr. İbrahim ÜÇGÜL
Süleyman Demirel Üniversitesi



Enstitü Müdürü

Prof. Dr. Yusuf UÇAR

.....

TAAHHÜTNAME

Bu tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Meryem Serfiraz BİLİCİ



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER.....	i
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Güneş Enerjisi	4
1.1.1. Güneşin elektromanyetik spektrumu	5
1.1.2. Dünyanın enerji dengesi.....	8
1.2. Fotoelektrik Olay ve Koparma Enerjisi	9
1.3. Fotovoltaik Sistemler	10
1.3.1. Fotovoltaik hücrelerin çalışma ilkesi	12
1.3.2. Fotovoltaik güneş pillerinin elektriksel parametreleri.....	12
1.3.2.1. Açık devre voltajı (Voc).....	13
1.3.2.2. Kısa devre akımı (Isc)	13
1.3.2.3. Doldurma faktörü (FF)	13
1.3.2.4. Maksimum güç noktası (MPP).....	14
1.3.2.5. Güç dönüşüm verimliliği (PCE)	14
1.4. Fotovoltaik Hücrelerin Sınıflandırılması.....	14
1.4.1. Birinci nesil fotovoltaik hücreler	15
1.4.2. İkinci nesil hücreler.....	15
1.4.3. Üçüncü nesil hücreler.....	16
1.5. Boya Duyarlaştırılmış Güneş Hücreleri (DSSCs)	16
1.5.1. Çalışma prensibi	17
1.5.2. Hücre yapısı.....	18
1.5.2.1. Çalışma elektrodu	19
1.5.2.2. Yarıiletken malzeme.....	19
1.5.2.3. Duyarlaştırıcı boya	23
1.5.2.4. Redoks çifti.....	24
1.5.2.5. Karşıt elektrot	25
1.5.3. Metal Katkılama	25
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	26
3. MATERYAL VE YÖNTEM	37
3.1. Kullanılan Cihazlar	37
3.1.1. Glove box	37
3.1.2. Kül fırını	38
3.1.3. Ultrasonik sprey piroliz.....	39
3.1.4. Taramalı elektron mikroskopu (SEM)	40
3.1.5. X-ışını kırım cihazı (XRD).....	41
3.1.6. Elektro-Optik Karakterizasyon cihazı.....	42
3.2. Kullanılan Malzemeler.....	42
3.3. Altaşların Hazırlanması.....	43
3.4. Katkısız ve Nb Katkılı Öncül Çözeltilerinin Hazırlanması.....	44
3.5. Altaşlar Üzerine Katkısız ve Nb katkı TiO ₂ Kaplanması	46
3.6. Duyarlaştırıcı Boyanın Hazırlanması.....	48
3.7. DSSC'lerin Üretimi.....	49
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	51

4.1. XRD Analizi.....	51
4.2. SEM Sonuçları	54
4.4. Elektriksel lm	58
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	62
KAYNAKLAR	64
ÖZGEÇMİŞ	68



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

METAL KATKILI TiO₂ ÖNCÜLLERİ KULLANILARAK BOYA DUYARLAŞTIRILMIŞ GÜNEŞ HÜCRESİ ÜRETİMİ ve ANALİZİ

Meryem Serfiraz BİLİCİ

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Melik Ziya YAKUT

Bu tez çalışmasında, boyaya duyarlaştırılmış güneş hücrelerinin (DSSC) verimini artırmaya yönelik, DSSC ana bileşenlerinden yarıiletken malzeme ele alınmıştır. Yarıiletken malzeme olarak titanyum dioksit (TiO₂) seçilmiştir. Alttaş olarak flor katkılı kalay oksit (FTO) camlar üzerine Niyobyum (Nb) katkı ve katkısız TiO₂ kaplanmış ve elde edilen camlar DSSC'nin çalışma elektrodu olarak kullanılmıştır. FTO camlara kaplama yapmak için ultrasonik sprey piroliz (USP) ince film kaplama tekniğinden yararlanılmıştır. Öncül solüsyon titanyum (IV) izopropoksit öncül malzemenin 1-propanol (%99.9) içerisinde 0.5 M konsantrasyonda çözündürülmesi ile hazırlandı. Reaksiyonun tamamlanmasını sağlamak ve boya adsorpsiyonunu artırmak için az miktarda glacial asetik asit eklendi. Hazırlanan başlangıç çözeltisi 275 °C' deki FTO camlar üzerine ince film formunda biriktirildi. Nozül frekansı 120 kHz, basınç 2.5 psi ve akış oranı 0.2 ml/dk olarak ayarlandı. Üretilen Nb katkı ve katkısız TiO₂ kaplı FTO camlar 500 °C' de 40 dakika boyunca tavlansmıştır. Elde edilen ince filmlerin kristal yapıların değişimi, yüzey morfolojileri ve elementer özellikleri X-ışını difraksiyonu (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve EDS analizi ile incelendi. XRD sonuçlarından, tavlamanın pik şiddetini artırdığı ve kristal yapıyı geliştirdiği sonucuna varılmaktadır. Buna ek olarak katkılanan Nb'nin de olumsuz bir etki oluşturmadığı sonucuna varılmıştır. EDS analizi ile kaplamanın başarılı bir şekilde gerçekleştiği desteklenmiştir. Nb katkılanarak üretilen hücrenin verimliliği katkısız TiO₂ ile karşılaştırıldığında Nb katkısının bulunduğu hücrelerde daha yüksek verimlilik sergilendiğini göstermiştir. Katkısız TiO₂ kaplı çalışma elektroduna sahip DSSC'nin verimi %0,03 ve FF ise %10,22 elde edilmiştir. Nb katkı TiO₂ çalışma elektroduna sahip DSSC'nin verimi ise %0.13, FF ise %10.89 elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Boya duyarlaştırılmış güneş hücresi, Titanyum dioksit, Metal katkılama, Nanopartiküler, Ultrasonik sprey piroliz.

2019, 68 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

DYE-SENSITIZED SOLAR CELL PRODUCTION AND ANALYSIS USING METAL-DOPED TiO₂ PRECURSORS

Meryem Serfiraz BİLİCİ

Isparta University of Applied Sciences
The Institute of Graduate Education
Department of Energy Systems Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Melik Ziya YAKUT

In this thesis, semiconductor materials from dye-sensitized solar cells (DSSC) main components are studied to increase the efficiency of dye-sensitized solar cells. Titanium dioxide (TiO₂) was chosen as a semiconductor material. Niobium doped and undoped TiO₂ coated on the fluorine-doped tin oxide (FTO) glass substrates and the obtained glasses were used as the working electrode of the DSSC. Ultrasonic spray pyrolysis (USP) thin film coating technique was used for coating FTO glass substrates. Titanium (IV) isopropoxide at a concentration of 0.5 M and 1-propanol (%99.99) was used for the precursor solution. A small amount of glacial acetic acid was added to complete the reaction and increase dye adsorption. The prepared starting solution was deposited in thin film form on FTO glass substrates at 275 ° C. The nozzle frequency was set at 120 kHz, the pressure was set at 2.5 psi and the flow rate was set at 0.2 ml/min. Produced Nb-doped and undoped TiO₂ coated FTO glasses were annealed at 500 ° C for 40 minutes. The change of crystal structures, surface morphologies and elementary properties of the thin films were investigated by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM) and EDS analysis. From the XRD results, it is concluded that the annealing increases the peak intensity and improves the crystal structure. In addition, it was concluded that Nb added didn't have a negative effect. The success of the coating was supported by EDS analysis. The efficiency of the cell produced by the Nb doping showed that the Nb-additive cells exhibited greater efficiency compared to the pure TiO₂. The yield of DSSC with undoped TiO₂ coated working electrode was 0.03% and FF was 10.22%. The efficiency of DSSC with Nb-doped TiO₂ working electrode was 0.13% and FF was 10.89%.

Keywords: Dye-sensitized solar cell, Titanium dioxide, Metal doping, Ultrasonic spray pyrolysis.

2019, 68 pages

TEŐEKKÜR

Bu araştırma için beni yönlendiren, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesi ile aşmamda yardımcı olan değerli Danışman Hocam Dr. Öğr. Üyesi Melik Ziya YAKUT'a teőekkürlerimi sunarım.

Tezimin retim aşamasında deneysel ve teorik bilgisinden yararlandığım değerli Dr. Öğr. Üyesi Murat KALELİ hocama, kimyasal prosesleri hazırlama sürecinde yardımcı olan Uzm. Dr. Esin EREN hocama, üretim sürecindeki her türlü yardımlarından dolayı Doktora ğrencisi Ahmet Buğrahan BAYRAM'a ve Süleyman demirel niversitesi YETEM-Yenilikçi Teknolojiler Araştırma ve Uygulama Merkezi Enerji Teknolojisi Birimi'ne teőekkür ederim.

Bilgi birikiminden yararlandığım Esra KUZDERE ZMUTAF'a ve araştırma sürecinde maddi ve manevi yardımlarını gördüğüm Muhammet Raşit SANCAR'a teőekkürü borç bilirim.

Tezimin her aşamasında beni yalnız bırakmayan aileme ve arkadaşlarıma sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Meryem Serfiraz BİLİCİ
ISPARTA, 2019

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. 1976'dan itibaren günümüze kadar geçen sürede geliştirilen fotovoltaiik hücrelerin verimlerindeki değişim.....	3
Şekil 1.2. Güneş ışınlarının elektromanyetik spektrumu ve görünür ışık spektrumu	6
Şekil 1.3. Güneşten gelen enerjinin dağılımı (W/m^2)	8
Şekil 1.4. DSSC'nin çalışma prensibi.....	18
Şekil 1.5. DSSC bileşenleri ve yapısının şematik gösterimi	19
Şekil 1.6. (a) İletken, (b) yalıtkan ve (c) yarıiletken malzemelerin enerji band yapıları	21
Şekil 3.1. MBRAUN LABstar Glove Box cihazı.....	38
Şekil 3.2. Protherm kül fırını	39
Şekil 3.3. SONO-TEK Flexi Coat USP cihazı	40
Şekil 3.4. FEI Quanta FEG 250 SEM cihazı.....	41
Şekil 3.5. Bruker D8 Advance Twin-Twin XRD cihazı	42
Şekil 3.6. Alttaş temizleme işleminde kullanılan malzemeler	44
Şekil 3.7. Hazırlanan çözeltiler	45
Şekil 3.8. Referans alınan çözelti (Deneme-6).....	46
Şekil 3.9. Filmlerin USP cihazında kaplanması	47
Şekil 3.10. FTO camların kaplama yapılmadan önceki(soldaki) ve sonraki (sağdaki) görüntüleri	47
Şekil 3.11. Tavlama yapmak için kül fırınına yerleştirilen kaplama yapılan FTO camlar.....	48
Şekil 3.12. Boya çözeltilisine konan katkısız ve Nb katkılı FTO cam alttaşlar	49
Şekil 3.13. Arasına parafilm konulan FTO camların ısıtılarak birleştirilmesi	49
Şekil 3.14. Üretilen katkısız ve Nb katkılı DSSC'ler	50
Şekil 4.1. Tavlama yapılmamış katkısız TiO_2 ile kaplı FTO camın XRD grafiği	51
Şekil 4.2. 500°C'de tavllanmış katkısız TiO_2 ile kaplı FTO camın XRD grafiği	52
Şekil 4.3. Tavlama yapılmamış Nb katkılı TiO_2 ile kaplı FTO cam alttaşın XRD grafiği	53
Şekil 4.4. 500°C'de tavllanmış Nb katkılı TiO_2 ile kaplı FTO cam alttaşın XRD grafiği	53
Şekil 4.5. Tavlama yapılmamış katkısız TiO_2 ince filmin (a) 100 μm skalalı, (b) numunelerin SEM görüntüleri.....	54
Şekil 4.6. 500°C 'de tavllanmış katkısız TiO_2 ince filmin (a) 100 μm skalalı ve (b) 20 μm skalalı numunelerin SEM görüntüleri	55
Şekil 4.7. Tavlama yapılmamış Nb katkılı TiO_2 ince filmin (a) 100 μm skalalı ve (b) 20 μm skalalı numunelerin SEM görüntüleri	55
Şekil 4.8. 500°C 'de tavllanmış Nb katkılı TiO_2 ince filmin (a) 100 μm skalalı ve (b) 20 μm skalalı numunelerin SEM görüntüleri	56
Şekil 4.9. (a) Katkısız tavlammamış, (b)Nb katkılı tavlammamış ve (c) Nb katkılı tavlammamış TiO_2 ince filminin EDS analizi	57
Şekil 4. 10. Katkısız TiO_2 kaplı FTO ile üretilen DSSC'nin Işık altındaki I-V grafiği	58

Şekil 4.11.Katkısız TiO ₂ kaplı FTO ile üretilen DSSC'nin V-P grafiği.....	59
Şekil 4.12.Nb katkılı TiO ₂ kaplı FTO ile üretilen DSSC'nin I-V grafiği.....	60
Şekil 4.13.Nb katkılı TiO ₂ kaplı FTO ile üretilen DSSC'nin V-P grafiği	60
Şekil 4.14. Katkısız ve Nb katkılı TiO ₂ kaplı FTO ile üretilen DSSC'lerin I-V karakteristiklerinin karşılaştırılması	61



ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 1.1. Fotovoltaik hücrelerin sınıflandırılması.....	15
Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan malzemeler, özellikleri ve kullanım amaçları.....	42



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	Amper
Au	Altın
Al	Alüminyum
AM	Hava kütlesi
BET	Yüzey alanı ölçüm cihazı
Ca	Kalsiyum
CdTe	Kadmiyum tellür
Ce	Seryum
CH ₄	Metan
Co	Kobalt
CO ₂	Karbondiokist
CuInSe ₂	Bakır indiyum diselenid
DC	Doğru akım
DSSC	Boya duyarlaştırılmış güneş hücresi
E _g	Enerji aralığı
EPD	Elektroforetik biriktirme tekniği
eV	Elektron volt
Fe	Demir
FF	Doldurma faktörü
FESEM	Alan emisyon taramalı elektron mikroskobu
FTO	Flor katkı kalay oksit
GaAs	Galyum arsenit
HRTEM	Yüksek çözünürlüklü transmisyon elektron mikroskobu
IEC	Uluslararası Elektronik komisyonu
In	İndiyum
ITO	İndiyum katkı kalay oksit
I _{sc}	Kısa devre akımı
MPP	Maksimum güç noktası
Nb	Niyobyum
Ni	Nikel
Na	Sodyum
nm	Nanometre
N719	Rutenyum boya
O	Oksijen
PCE	Güç dönüşüm verimliliği
PLD	Darbeli lazer biriktirme
psi	Basınç ölçü birimi
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
Ru	Rutenyum
TEM	Geçirimli elektron mikroskobu
Ti	Titanyum
TiO ₂	Titanyum dioksit
TiCl ₄	Titanyum tetraklorür
USP	Ultrasonik sprey piroliz
UV	Ultraviyole
V	Volt
VIS	Görünür

Voc
W

Açık devre voltajı
Tungsten



1. GİRİŞ

İnsanoğlu yaşantısını idame ettirebilmek için duyduğu enerji gereksinimini yenilebilir enerji kaynakları ve yenilenemeyen (geleneksel) enerji kaynaklarından temin etmektedir. Son zamanlarda artan nüfus ve bunun sonucu olarak sanayileşme, kentleşme, bilim ve teknolojideki gelişmeler sebebiyle enerji gereksinimindeki talep her geçen yıl artış göstermektedir. Elektrik üretimi için kullanılan fosil yakıtlar enerji talebindeki bu artışı karşılayamamaktadır. Bununla birlikte birçok olumsuz çevresel etkilere neden olma, tükenebilir olma ve artış gösteren maliyet gibi sınırlılıklara sahiptirler. Geleneksel enerji kaynaklarının sahip olduğu sınırlılıklar, enerji arayışını dünyanın doğal döngüsü içerisinde meydana gelen enerji akışından elde edilen, temiz, tükenmez, daha uygun maliyete sahip yenilenebilir enerji kaynaklarına yönlendirmektedir. Son birkaç yılda yapılan araştırmalar, dünyadaki fosil yakıtlara olan bağımlılığa çözüm olarak alternatifler geliştirmek üzerine yapılmaktadır.

Dünyanın doğal döngüsünden faydalanarak çeşitli yenilenebilir enerji kaynağı elde etmek mümkün olabilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının çeşitleri sayılacak olursa bunlardan bazıları, jeotermal, dalga, okyanus, hidrojen ve güneştir. Yaşam döngüsünün göz bebeği güneş, yenilenebilir enerjileri ve aynı zamanda fosil yakıtları doğrudan veya dolaylı bir şekilde beslemektedir. Güneş enerjisi sahip olduğu birçok üstün özelliklerinden dolayı en önemli alternatif kaynak olarak görülmektedir. Üstün özellikleri arasında; sürekli, çevre dostu, içerdiği enerji kaynağının bol olması, yenilenebilir bir enerji kaynağı olması ve düşük maliyete sahip olması sayılabilir. Bu özelliklerinden dolayı güneşin önemi dünyada ve ülkemizde her geçen gün artmaktadır.

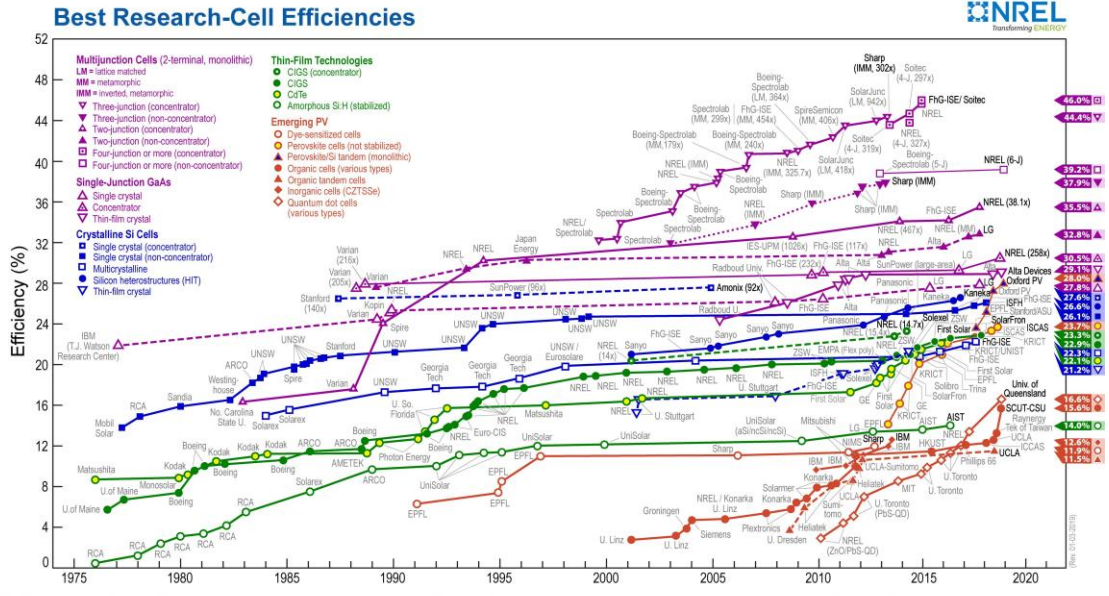
Güneşin merkezindeki tepkimeler sonucu yaymış olduğu ışınım enerjisi farklı dalga boylarında yayılarak diğer yenilenebilir enerjilere kaynak sağlamaktadır. Bunun dışında yapılan araştırmalar esnasında güneşin fotovoltatik etkisi keşfedilmiştir. Fotovoltatik etkinin özelliği, güneşten yayılan ışınımdan farklı dalga boyları ile orantılı olarak güç üretmektir. Güneşin bu fotovoltatik

etkisinden yararlanılarak elektrik üretimi yapabilen sistemler geliştirilmiştir. Bu sistemlere fotovoltaik sistemler denilmektedir. Fotovoltaik sistemlerin sağladığı önemli avantajlar vardır. Bunlar;

- Güneşten beslendikleri için dünyanın her yerinde yayılan güneş enerjisini kullanabilir,
- Yapısı gereği hemen hemen her yerde kullanılabilir,
- Elektrik üretiminde kömür, nükleer, petrol ve gaz kullanan santrallere nazaran daha az maliyetlidir,
- Güneş ışınım enerjisini yaydığı sürece bu sistemler ile üretim yapmaya devam edilebilir,
- Sürdürülebilir ve çevre dostu sistemlerdir (Ranabhat, 2016).

Fotovoltaik sistemlerin birçok çeşidi bulunmaktadır. Günümüzde fotovoltaik sistemlerden yaygın olarak kullanılanı silikon tabanlı güneş pilleridir. Günümüz piyasasında güneş enerjisinden elektrik üretimi amacıyla kullanılan pillerin büyük bir bölümünü silikon tabanlı güneş pilleri oluşturmaktadır. Ancak silikon tabanlı güneş pillerinin maliyetlerinin yüksek oluşu ve sınırlılıklarının olması sebebiyle güneşten elektrik üretiminde yeni sistemlerin geliştirilmesi kaçınılmaz olmaktadır. Geliştirilen yeni nesil güneş hücreleri, yapılarında kullanılan malzemelerin farklılıklarına ve üretilme tekniklerine göre çeşitlilik göstermekte olup üç başlık altında toplanmaktadır. Bunlar; birinci nesil hücreler, ikinci nesil hücreler ve üçüncü nesil hücrelerdir. Yeni nesil hücrelerden bazıları; amorf silisyum, kadmiyum tellür, organik güneş hücreleri, perovskit güneş hücreleridir.

Şekil 1.1. 'de 1976'dan itibaren günümüze kadar geçen sürede laboratuvar koşullarında geliştirilen fotovoltaik hücrelerin verimlerindeki değişim görülmektedir. Şekil 1.1.'de de görüldüğü üzere yeni nesil fotovoltaik hücreler oldukça ilerleme kaydetmiştir ve geleneksel silisyum bazlı hücrelerle karşılaştırıldığında oldukça umut vericidirler.



Şekil 1.1. 1976'dan itibaren günümüze kadar geçen sürede geliştirilen fotovoltaik hücrelerin verimlerdeki değişim (NREL, 2019)

Üçüncü nesil hücreler arasında yer alan ve önemli gelişme kaydeden güneş hücresi çeşidi ise boya duyarlaştırılmış güneş hücresidir (DSSC). Bu hücrelerin en önemli özelliği çalışma prensibinin geleneksel güneş pillerinden farklı olması ve fotosentez olayına benzemesidir. Geleneksel tasarımdaki silikon tabanlı güneş hücrelerinde silikon, yükleri ayırmak için elektrik alanı sağlar ve hem fotoelektron kaynağı olma görevini üstlenir hem de akım oluşturur. DSSC'lerde ise yük taşıma görevini yarıiletken malzeme üstlenirken, fotoelektron kaynağı olma görevini klorofili taklit eden boyalara veya doğal pigmentler üstlenir (Öztürk, 2013). DSSC düşük ışık koşullarında ve yüksek sıcaklıklarda çalışabilir, çevre dostudur, daha az toksik madde içerir, üretim koşulları rahatlıkla değiştirilebilir ve düşük enerji ihtiyacıyla yüksek verimde çalışır. Sayılan bu üstünlüklerinden dolayı geleneksel güneş hücrelerine alternatif olarak görülmektedir. Üstün özelliklerinin yanında güneşten gelen ışınımın sadece UV radyasyonunu emmesi gibi bir dezavantajı vardır. Bununla birlikte ticarileşme açısından düşük verimlilik ve istikrar göstermektedir.

Bu tez çalışmasında DSSC'lerin verimini artırma amacıyla hücrenin ana bileşenlerinden biri olan yarıiletken malzeme ele alınmıştır. Yarıiletken olarak seçilen titanyum dioksit (TiO_2) malzemesine niyobyum (Nb) katkısı yapılarak

ultrasonik sprey piroliz kaplama tekniği ile cam alttaşlar üzerine kaplanmış kaplanan camlar hücrede çalışma elektrodu olarak kullanılmıştır. Nb katkılı TiO₂ kaplı ve katkısız TiO₂ kaplı çalışma elektrotlarının yapısal, morfolojik ve optiksel özellikleri analiz edilmiş ve bunlardan elde edilen hücreler incelenerek Nb katkısının verime olan etkisi gözlemlenmiştir.

1.1. Güneş Enerjisi

Güneş sisteminin en büyük yıldızı olan güneş, 1.392×10^6 km çapı ile dünyanın çapının (12.74×10^6 km) yaklaşık 109 katı çapa sahiptir. Güneşin dünya ile arasındaki uzaklık 149.6×10^6 km'dir ve güneşin yüzey sıcaklığı 5800 K ve dünyanın yüzey sıcaklığı ise 300 K'dir. (Nelson ve Starcher, 2016) Güneş, yapısında %92.8 oranında hidrojen ve %7.1 oranında helyum atomu bulundurduğu için doğal ve sürekli bir füzyon reaktanı olarak kabul edilir (Öztürk, 2012). Füzyon reaksiyonları temel olarak 4 hidrojen atomunun 1 helyum atomuna dönüşümü sonucunda ısı, ışık ve enerji oluşması sürecini kapsamaktadır. Bu süreçte üretilen helyumun kütlesi tüketilen hidrojenin kütlesinden az olduğu için kütle farkı oluşur. Güneş enerjisi, güneşin çekirdeğinde meydana gelen reaksiyonlar sonucunda kütle farkının enerjiye dönüştürülmesi ile açığa çıkan enerjidir. Dönüştürülen enerji elektromanyetik ışınım olarak güneşin yüzeyine aktarılır. Elektromanyetik ışınım dalgalar ve parçacıklar şeklinde uzay boşluğuna yayılır. Yayılan bu elektromanyetik dalgalar elektrik ve manyetik enerjiye sahip olan ışık dızeleridir ve ışığın temel parçacığı olan fotonların biraraya gelmesi sonucu oluşurlar.

Güneşin saniyede yaymış olduğu enerji 3.8×10^{23} kW'dır (Nelson ve Starcher, 2016). Kütlenin korunumu ilkesinden dolayı güneş, ürettiği enerjiye karşılık olarak saniyede yaklaşık 5 milyon ton kütle kaybeder. Böylece kütle-enerji eşitliği sağlanır. Güneşin uzaya yaymış olduğu büyük miktardaki enerjinin yalnızca iki milyarda biri yeryüzüne ulaşır. Bununla birlikte yeryüzüne ulaşan toplam güneş enerjisi azımsanmayacak miktarda olup dünya üzerinde tüketilen mevcut enerjiden oldukça fazladır. Atmosfer dışına ulaşan ışınımın ortalama değeri yaklaşık 1367 W/m^2 değerindedir ve bu değer güneş sabiti olarak kabul

edilmektedir. Ancak bu değer farklı dalga boylarında ışınlar olarak yeryüzüne ulaştığı için 0-1100 W/m² değerleri arasında farklılık gösterir.

Bu bağlamda Türkiye, yer aldığı konum itibariyle aldığı güneş enerjisi açısından oldukça verimli bir bölgededir. 36°-42° kuzey paralelleri ve 26°-45° doğu meridyenleri arasında yer alması ülkenin kutuptan çok Ekvator'a yakın olmasına ve ılıman kuşakta bulunmasına neden olmuştur. Bulunduğu konumun özelliği ile aldığı güneş enerjisinden faydalanma çalışmalarına verilen önem artmaktadır. Ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi Türkiye'de 2640 saat (günde 7.2 saat) olarak, ortalama toplam ışınım şiddeti ise 1311 KWh/m²-yıl (günlük toplam 3.6 KWh/m²-gün) olarak saptanmıştır (Batur, 2011)

1.1.1. Güneşin elektromanyetik spektrumu

Güneşten gelen elektromanyetik dalgalar farklı dalga boylarında yayılır ve yeryüzüne ulaşır. Yayılmak için herhangi bir ortama gereksinim duymayan elektromanyetik dalgalar ışık hızında (c) hareket eder. Elektromanyetik dalgalar karakterize edilirken frekans (ν) ve dalgaboyu (λ) kullanılır. Işık hızı, frekans ve dalgaboyu arasındaki bağıntı;

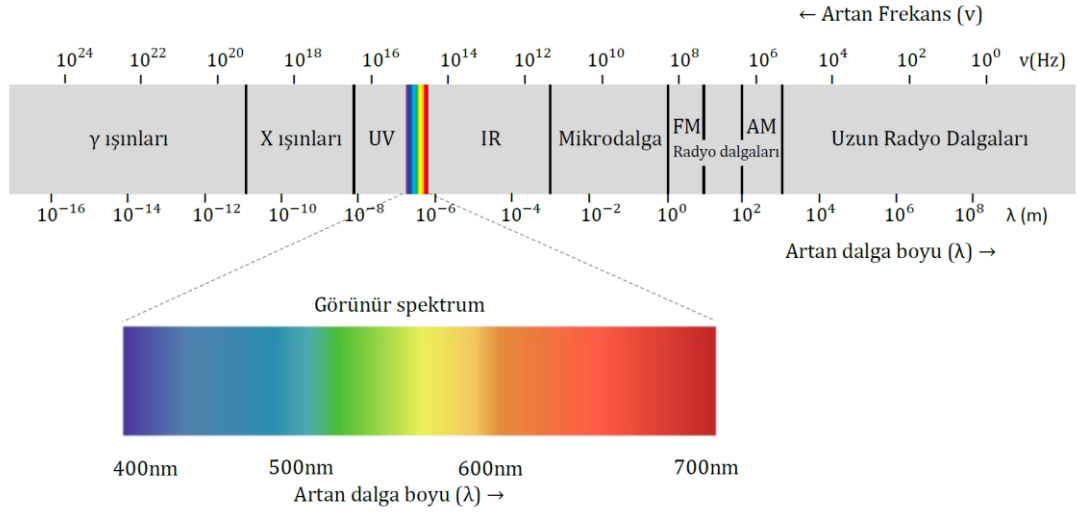
$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (1.1)$$

şeklindedir. Elektromanyetik dalgaları oluşturan fotonların enerjileri hesaplanırken aşağıdaki eşitlikten yararlanır;

$$E = h \times \frac{c}{\lambda} \quad (1.2)$$

Burada h Plank sabiti, c ışık hızı ($\sim 3.00 \times 10^8$ m/s) ve λ dalgaboyunu ifade eder. Dalga boyunun artması ile düşük enerjili ışınlar oluşurken azalması ile de yüksek enerjili ışınlar oluşur. Işınların herbiri kendine has dalga boyuna sahiptir. Yayılan ışınların dalgaboyları ve frekansları kaynağına bağlı olarak değişir. Farklı dalga boylarındaki güneş ışınları dalga boylarına ve frekanslarına göre sıralanır. Bu sıralamanın yapıldığı aralığa güneşin elektromanyetik

spektrumu denir (Şekil 1.2). Güneş spektrumu 10^{-16} ile 10^8 m arasındadır. Bunun 400-700 nm arasındaki bölge görünür spektrum olarak tanımlanır.



Şekil 1.2. Güneş ışınlarının elektromanyetik spektrumu ve görünür ışık spektrumu

Şekil 1.2'de de görüldüğü üzere elektromanyetik spektrumdaki dalgalar ışınım frekansına ve moleküllerin değişen enerjisine göre şu şekilde gruplandırılır;

1. Gama ışınları
2. X-ışınları
3. Ultraviyole (UV) ışınım
4. Görünür spektrum
5. Kızılötesi (Infrared) ışınım
6. Mikrodalgalar
7. Radyo Dalgaları

Bu gruplandırma temel gruplandırma olup bazıları kendi içinde de gruplara ayrılmaktadır.

Gama ışınları en kısa dalga boyuna ve en yüksek foton enerjisine sahip ışınlardır. Dünya atmosferi tarafından soğurulurlar fakat atmosferin farklı derinliklerine geçebilirler. Sahip oldukları yüksek enerjiye rağmen pencere canımı geçemezler. X-ışınları gama ışınlarından daha uzun dalgaboyuna sahip

ışınlarıdır. Bu ışınlar dünya atmosferini geçemez. X-ışınları düşük yoğunluklu cisimlerden kolaylıkla geçebilirken yüksek yoğunluğa sahip cisimlerden geçemezler. Morötesi ışık olarak da bilinen UV ışınları X-ışınlarından daha uzun dalgaboyuna sahiptir ve çıplak gözle görülmezler. UV ışınları kendi içinde üç gruba ayrılır. Bunlardan UV-B ve UV-C ozon tabakası tarafından engellenir ve atmosferi geçemez. UV-A ışınları ise atmosferden geçerek yeryüzüne ulaşır. UV-A ışınlarına uzun süre maruz kalınması canlıların üzerinde zararlı etkilere neden olmaktadır. UV ışınlarından daha uzun dalgaboyuna sahip olan dalgaboyu aralığı görünür spektrum olarak adlandırılmaktadır. Elektromanyetik spektrumun en dar bölgesini oluşturan görünür ışık 400 ile 700 nm dalgaboyu aralığındadır. Bu aralıktaki ışınlar çıplak gözle görülebilir ve görünürlüğün algılanmasından sorumludurlar. Bu bölgedeki en uzun dalgaboyuna kırmızı renk sahipken en kısa dalga boyuna ise mor renk sahiptir. Kızılötesi (Infrared) ışınım ise belli bir sıcaklığa sahip tüm maddelerin yaymış olduğu ışınımlardır. Moleküllerin titreşimleri tarafından absorplanmasıyla oluşurlar. Sahip oldukları düşük enerji moleküldeki elektronik geçişlerini sağlamaya yeterli değildir. Kızılötesi ışınım bölgesi uzak, orta ve yakın olmak üzere üç alt başlığa ayrılır. Bunun dışında gruplandırmanın en sonunda yer alan radyo dalgaları ise en uzun dalgaboyuna ve en düşük foton enerjisine sahip ışınımlar olup elektromanyetik spektrumun geniş bir bölümünü kapsar. Radyo dalgaları elektrik titreşimleri ile üretilebilirler.

Güneş hücrelerinin verimliliği güneş spektrumuna bağlı olarak değişir. Güneş spektrumuna etki eden faktör ise hava kütlesi (AM)'dir. Hava kütlesi, gelen ışınımın bir kısmının atmosferde karşılaştığı hava ve toz partikülleri tarafından emilmesinin ardından gerçekleşen değişiklik ile ışınımın akışı üzerine etkisini ölçmek için kullanılır. Konum, tarih ve saate göre değişiklik gösteren hava kütlesinin artması ile hücredeki kısa devre akımı ve açık devre voltaj değerleri artar. Buna bağlı olarak da açığa çıkan enerji artar (Rida vd., 2016). Hava kütlesi, gelen güneş ışınımının yüzeyin normali ile yaptığı açıya bağlı olarak değişir ve denklemi aşağıdaki gibi gösterilir;

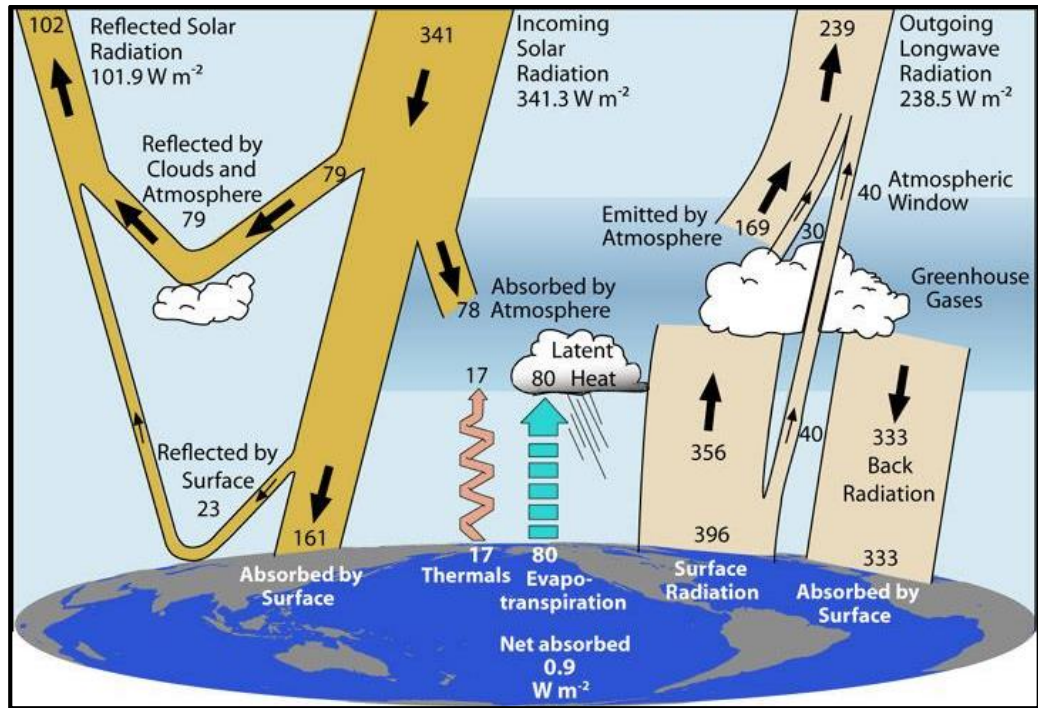
$$AM = \frac{1}{\cos \theta} \quad (1.3)$$

burada θ zenit açısıdır. Işınımların değeri AM 0 koşulunda maksimumdur. Güneş ışınlarının dik geldiği konumda AM 1'e eşittir. Geliş açısı 48° olduğunda ise AM 1.5'e eşit olur. Güneş ışınımının geldiği açıya bağlı olarak aldığı yol uzunluğunun artması ile AM değeri de artar.

Güneş hücrelerinin verimlilikleri bir standarta göre belirlenir. Bu standart Uluslararası Elektronik Komisyonu (IEC 60904-3) tarafından belirlenen; güneş ışınımı 1000 W/m^2 , hücre sıcaklığı 25°C , hava kütlesi 1.5 değerleridir (Chaichan vd., 2016).

1.1.2. Dünyanın enerji dengesi

Işınım enerjisi olarak da adlandırılan güneş enerjisi dünyanın atmosferine girdiğinde yeryüzüne doğru yol alırken yayılır, yansır ya da emilir. Ayrıca bu durumlardan herhangi birine maruz kalmadan direkt olarak yeryüzüne ulaşan bir kısım ışınım enerjisi de vardır ve yeryüzünde bulunan nesnelere tarafından emilir veya yansıtılır (Şekil 1.3).



Şekil 1.3. Güneşten gelen enerjinin dağılımı (W/m^2) (Trenberth vd., 2009)

Dünya atmosferine ulaşan toplam enerji ortalama 342 W/m^2 olup Şekil 'de dağılımı gösterilmiştir. Gelen toplam güneş ışınımının yaklaşık 79 W/m^2 'si bulutlar ve atmosfer tarafından, yaklaşık 23 W/m^2 'si yüzey tarafından geri yansıtılmaktadır (toplam 102 W/m^2 değerinde). Gelen ışınımın geri kalan 161 W/m^2 'lik kısmı yeryüzü tarafından, 78 W/m^2 'lik kısmı ise atmosfer tarafından emilmektedir. Dünya yüzeyinden yayılan yaklaşık 396 W/m^2 'lik değere sahip ışınımın 169 W/m^2 'lik kısmı atmosfer tarafından, 30 W/m^2 'lik kısmı bulutlar tarafından ve 40 W/m^2 'lik kısmı da direkt olarak uzaya yansıtılır. Yani dünya, toplamda güneşten emilen kadar elektromanyetik ışınım enerjisini aynı miktarda uzaya yayar. Eğer gelen ve giden enerji dengesi sağlanmazsa dünyanın sıcaklığı artar ve dengenin sağlanması için bu sefer daha fazla enerji uzaya yayılır. Ancak sera gazlarının (atmosferde bulunan karbondioksit (CO_2), metan (CH_4) vb. gibi ısı tutma özelliği bulunan gazlar) etkisiyle, enerji dengesinin oluşturduğu sıcaklık değişir. Şekil 1.2'de de görüldüğü üzere sera gazlarının etkisiyle 333 W/m^2 değerindeki ışınım geri yayılarak yüzey tarafından emilir. (Trenberth vd., 2009)

Dünya atmosferinde gerçekleşen bu enerji akışında gözlenen ışık dağılımındaki süreksizlikler güneş spektrumunun UV ve kızılötesi bölgelerindeki ışık yoğunluğunda önemli ölçüde azalmaya neden olur. Günümüzde üretilen fotovoltaikler, görünür spektrum ve yakın kızıl ötesi bölgesindeki ışınımın emilimi ile çalışacak şekilde tasarlanmıştır (Kocaoğlu, 2014).

1.2. Fotoelektrik Olay ve Koparma Enerjisi

Dünya yüzeyine ulaşan ışınım üzerine çalışmalar yapan Hertz yaptığı deneylerden birinde, ışığa duyarlı bir metalin, üzerine düşen ışığın etkisiyle birlikte elektronlarının serbest hale geçtiğini gözlemlemiştir. Tanımlaması, güneş ışınımının yüzeydeki elektronları uyararak koparması olan bu olay fotoelektrik olay olarak adlandırılır. Serbest hale geçen elektronlara da fotoelektron denmektedir.

Elektronlar normal şartlarda maddeye bağılı durumdadır ve dış bir etki olmadan madde yüzeyinden ayrılamazlar. Elektronların yüzeyden tümüyle ayrılabilmeleri için gelen ışınımın enerjisinin elektronların enerjisinden büyük olması gerekir. Elektronun maddenin yüzeyinden ayrılabilmesi (ya da koparılması) için gereken maksimum enerjiye koparma enerjisi denir. Diğer bir ifade ile koparma enerjisi, elektronların yüzeye bağılı kalmasını sağlayan minimum enerjidir. Bu enerji birçok kaynakta iş fonksiyonu (work function) olarak tanımlanmaktadır.

$$K_{max} = hv - \Phi \quad (1.4)$$

burada K_{max} elektronların maksimum kinetik enerjisi, hv gelen ışığın enerjisi ve Φ iş fonksiyonunu ifade etmektedir.

Hücre yüzeyine düşen her bir foton yüzeydeki elektronlar ile etkileşime geçerek sahip olduğu enerjiyi elektronlara verir. Yeterli miktarda enerji alan elektronlar bu enerjinin bir kısmını (kopma enerjisi) harcayarak yüzeyden ayrılırlar. Yüzeyden ayrıldıktan sonra geriye kalan enerji de fotoelektronun kinetik enerjisini verir. Yani fotoelektronların sayısının artması etkileşime geçen foton sayısına bağılıdır ki bu da ışığın şiddetinin artırılması ile mümkündür. Işığın şiddetinin artırılması fotoelektronun kinetik enerjisini etkilemez, yalnızca fotoelektron sayısını artırır.

Güneşin yaymış olduğu ışınların, yani fotonların enerjisinden faydalanabilmek için farklı sistemler geliştirilmektedir. Yeryüzüne gelen ışınım enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren sistemler fotovoltaik sistemlerdir.

1.3. Fotovoltaik Sistemler

Fotovoltaik hücreler (güneş hücreleri) yapısında bulunan yarıiletken malzemeler ile yüzeylerine gelen güneş enerjisini soğurarak yapılarındaki elektronların serbest hale geçmesini sağlayan ve bunun sonucunda da

elektriksel gerilim üreten sistemlerdir. Bu sistemlerin çalışma ilkesi fotovoltaik olaya dayanır.

Fotovoltaik olayı ilk olarak Fransız bilim adamı Edmond Becquerel (1839) platin tabakalar üzerine yapmış olduğu bir çalışma esnasında oluşan gerilimi gözlemlemesi sonucunda keşfetmiştir. Diğer bir çalışmada ise Adams ve Day (1877) selenyum elektrodunu ışığa maruz bıraktıklarında elektrodun akım ürettiğini gözlemlemiştir (Zafer, 2006). Bunu izleyen yıllarda birçok çalışma yapılmış ve 1946 yılında Russell S. Ohl yüksek saflıkta silikon içeren güneş hücrelerinin verimliliklerini rapor ederek geliştirdiği hücrelerin patentini almıştır (Ohl, 1946). Günümüzde kullanılan silisyum güneş pillerinin temelini ilk olarak Chapin ve arkadaşları oluşturmuştur ve ürettikleri hücrelerden elde ettikleri verim %6 dolaylarında olmuştur. 1947'de güneş ışınımının elektrik enerjisine doğrudan dönüştürülmesi için termoelektrik kavşaklar kullanan Telkes ise %1 verim elde ettiğini bildirmiştir (Chapin, 1954; Telkes, 1947).

Fotovoltaik olayın keşfedilmesinden uzun bir süre sonra uzay araştırmalarının da artmasıyla fotovoltaik piller popülerlik kazanmıştır. Yapılan çalışmalar ışığında 1 Ocak 1958'de güneş panelleri, Explorer adlı ilk uzay aracında kullanılmıştır. İzleyen yıllarda ise güneş pillerinin verimliliği %15'i bulmuş ve 2000'li yıllara gelindiğinde %28'e ulaşan fotovoltaik pil verimi günümüz laboratuvar şartlarında %46'ya kadar ulaşmıştır (Kudret, 2011).

Fotovoltaik hücreden çıkan elektrik doğru akım (DC) formundadır. Bir fotovoltaik enerji santralinde gereken DC enerjiyi üretmek için birçok fotovoltaik hücrenin biraraya getirilmesiyle oluşturulan modüllere ve bununla birlikte birçok modülün biraraya getirilmesiyle oluşturulan dizilere ihtiyaç vardır. Modül dizisinin oluşturulması için modüller birbirleriyle seri veya paralel şekilde bağlanarak elde edilen güç artırılabilir. Modüller seri bağlanarak modül dizisi oluşturulduğunda gerilimde artma meydana gelecektir. Paralel bağlandığında ise akımda artma meydana gelecektir (Tekkale, 2018).

1.3.1. Fotovoltaik hücrelerin çalışma ilkesi

Bir fotovoltaik hücre genel olarak, p ve n katmanların birbirlerinin üstüne yerleştirilmesiyle oluşur. Fotovoltaik hücrelerin yüzeyine gelen güneş ışınımının bir kısmı yansır, bir kısmı hücre içerisinden geçer ve bir kısmı ise hücre yapısında bulunan yarıiletken malzeme sayesinde soğurulur. Soğurulan ışınım enerjisi ile elektronlar serbest kalır ve özgürce hareket etme özelliğine kavuşur. Elektronlar boşluklar tarafından çekilir ve elektronların ayrılması ile geride boşluklar oluşur. Yani elektronlar pozitif tarafa, boşluklar ise negatif tarafa doğru hareket eder ve elektron-boşluk çiftlerini oluştururlar. Oluşan bu elektron-boşluk çiftleri birbirinden ayrılır ve bunun sonucunda elektrik akımı üretilir. Daha sonra yüksek enerjiye sahip elektronlar enerjilerini dış yüke aktararak tekrar fotovoltaik hücreye dönerler.

1.3.2. Fotovoltaik güneş pillerinin elektriksel parametreleri

Güneş hücrelerinin kendi aralarında kıyaslamasını yapabilmek için kullanılan altı adet parametre vardır ve bu parametreler hücre verimliliğini hesaplamak için önem teşkil eder. Bu parametreler; açık devre voltajı (V_{oc}), kısa devre akımı (I_{sc}), doldurma faktörü (FF), maksimum güç noktası (MPP) ve güç dönüşüm verimliliği (PCE)'dir.

IEC tarafından belirlenen standart şartlar altında ($AM=1.5$, 1000 W/m^2 , 25°C), bu parametrelerden üçünün (V_{oc} , I_{sc} ve FF) her birinin optimize edilmesi ile verimliliğin en üst düzeye çıkarılması mümkün olabilmektedir. Daha yüksek açık devre voltajı için daha iyi redoks potansiyeline sahip olan redoks çifti kullanılabilir. Benzer şekilde, kısa devre akımı, güneş ışığını emmeye yardımcı olan boya duyarlaştırıcılar ile güneş ışığı emilimi artırılarak geliştirilebilir. Paralel devre direncinin arttırılması ve seri direncin azaltılması, difüzyon ve elektron transferi için aşırı voltajın azaltılması, daha yüksek bir FF değerine yol açar, böylece daha yüksek verimlilik ve teorik güce daha yakın çıkış gücü değeri sağlanır. Malzeme özellikleri ve hücre içindeki fiziksel işlemler bu parametrelerin değişimi üzerinde etkilidir. Bu nedenle, fiziksel işlemin

özelliklerini ve malzeme özelliklerini yakalayabilen teorik modeller, çeşitli çalışma parametrelerini ve hücre yapılandırmalarını optimize etmek için kritik öneme sahiptir (Gong vd., 2017).

1.3.2.1. Açık devre voltajı (V_{oc})

Açık devre voltajı, bir güneş hücresinden elde edilen maksimum voltajdır. Cihazdaki net akımın sıfır ($I=0$) olduğu anda oluşur. Bu elektriksel potansiyel fark, yarı iletkenin Fermi seviyesi ile elektrolit redoks potansiyeli arasındaki enerji farkını temsil eder. Yüksek voltaj, cihazın açık devre voltajı tarafından üretilir.

1.3.2.2. Kısa devre akımı (I_{sc})

Fotovoltaik pilde voltajın sıfır olduğu anda gözlenen akımdır. Kullanılan malzeme, ışık miktarı ve uç kısımların tasarımına bağlı olarak değişmektedir. Kısa devre akımı parlaklığa bağlı olan fotovoltaik akıma eşittir. Fotovoltaik hücre kısa devre akımına yakın bir akımda çalıştırarak, pilin üzerine düşen güneş ışınımı ile doğru orantılı olan akım ölçülebilir. Kısa devre akımı yoğunluğu ise (I_{sc}), kısa devre akımının, fotoaktif yüzey alanına bölümüdür (Kabadayı, 2011).

1.3.2.3. Doldurma faktörü (FF)

Bir güneş hücresinde, maksimum gücün I_{sc} ve V_{oc} ürünlerine oranıdır. Zayıf ışın koşullarında güneş hücrelerindeki maksimum gücü belirleyen önemli bir parametredir.

$$FF = \frac{I_{max} V_{max}}{I_{sc} V_{oc}} = \frac{P_{max}}{I_{sc} V_{oc}} \quad (1.5)$$

Burada; I_{max} , maksimum akım, V_{max} , maksimum voltaj, P_{max} , maksimum güç noktası, I_{sc} , kısa devre akımı, V_{oc} , açık devre voltajıdır.

Doldurma faktörünün aldığı değerler güneş hücresinin kalitesini belirler. Bir güneş hücresini iyi olarak nitelendirebilmek için hücrenin doldurma faktörünün 0.75-0.8 değerler arasında olması gerekir (Zafer, 2006).

1.3.2.4. Maksimum güç noktası (MPP)

Hücreye gelen ışık miktarına bağlı olarak maksimum akım ve voltajın olduğu noktadır.

$$P_{max} = V_{max} \times I_{max} \quad (1.6)$$

1.3.2.5. Güç dönüşüm verimliliği (PCE)

Hücre performansını karşılaştırma yapmada kullanılan bir parametredir. Elde edilen maksimum gücün yüzeye gelen ışık enerjisinin gücüne ($P_{ışık}$) oranıdır.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{ışık}} = \frac{I_{SC} \times V_{OC} \times FF}{P_{ışık}} \quad (1.7)$$

Güç dönüşüm verimliliği güneş spektrumuna, aldığı ışık enerjisinin yoğunluğuna ve hücre sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir. Bu yüzden daha önce bahsedilen standart şartlar ($AM=1.5$, 1000 W/m^2 , 25°C) uygulanır.

1.4. Fotovoltaik Hücrelerin Sınıflandırılması

Fotovoltaik hücrelerin sınıflandırılması Çizelge 1.1'de görülmektedir. Üç ayrı kategori olarak değerlendirilmesi yapılan hücreler; birinci nesil, ikinci nesil ve üçüncü nesil hücreler olmak üzere sınıflandırılmıştır.

Çizelge1.1. Fotovoltaik hücrelerin sınıflandırılması (Ranabhat, 2016)

Birinci Nesil Hücreler <ul style="list-style-type: none">• Monokristal Silisyum Hücreler (Mono c-Si)• Polikristal (Poly c-Si) Silisyum Hücreler• Amorf Silisyum Hücreler
İkinci Nesil Hücreler <ul style="list-style-type: none">• Amorf Silisyum (a-Si ve a-Si/μc-Si)• CuInSe₂ (CIS), CIGS (CuInGaSe₂)• Kadmium Tellür (CdTe)
Üçüncü Nesil Hücreler <ul style="list-style-type: none">• Boya Duyarlı Güneş Hücreleri (DSSC)• Perovskit (cell)• Organik Güneş Hücreleri (OPV)

1.4.1. Birinci nesil fotovoltaik hücreler

Birinci nesil fotovoltaik hücreler geleneksel güneş hücreleridir. En çok çalışılan malzeme olarak silikon kullanılmaktadır. Geleneksel hücreler monokristal yapılı veya polikristal yapılı silikondan elde edilmektedir. Silikonun ince dilimler halinde kesilmesi ve katkılandırılmasıyla yapılırlar. Şu anda konutlarda kullanılan en verimli fotovoltaik hücrelerdir. Fotovoltaik hücre pazarının yaklaşık olarak %90'lık bölümünde bu hücreler yer almaktadır (Kabadayı, 2011).

1.4.2. İkinci nesil hücreler

İkinci nesil güneş pilleri genellikle ince film güneş hücreleri olarak adlandırılır, bunun nedeni silikon bazlı hücreler ile karşılaştırıldıklarında kalınlıkları oldukça azdır ve sadece birkaç mikrometre kalınlığında üretilirler. Maliyeti az olan cam, plastik ve metal gibi malzemeler üzerine yapılandırılmaları, bu teknoloji ile üretilen hücrelerin daha uygun maliyet ile üretilip satılmasına olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte verimleri düşüktür.

1.4.3. Üçüncü nesil hücreler

Üçüncü nesil fotovoltaik hücreler nanotüpler, silikon teller, konvansiyonel matbaa teknolojileri, organik boyalar ve iletken plastikler kullanan solar mürekkepler de dahil olmak üzere, silikon dışındaki birçok farklı malzemeden üretilmektedirler. Amaç, güneş enerjisini daha geniş bir güneş spektrumu üzerinde (örneğin kızılötesi dahil) üzerinde daha verimli hale getirmek, daha az pahalı olması ve böylece daha fazla insan tarafından kullanılabilmesi ve daha fazla ve farklı kullanımlar geliştirmektir. Üçüncü nesil güneş pilleri üzerindeki çalışmaların çoğu laboratuvarda yapılmaktadır. Birçok şirket tarafından araştırma ve geliştirme çalışmaları sürdürülmektedir. Ancak çoğunlukla ticari olarak temin edilememektedir. Ticarileştirme için çalışmalar halen devam etmekte olup geliştirilmeleri üzerine birçok çalışma yapılmaktadır.

1.5. Boya Duyarlaştırılmış Güneş Hücreleri (DSSCs)

Boya duyarlaştırılmış güneş hücreleri (DSSCs) geleneksel fotovoltaik hücrelerden oldukça farklı çalışma prensibine sahip, üçüncü nesil güneş hücreleri grubuna ait hücrelerden biridir. Fotovoltaik hücrelerin verimliliğini artırma amaçlı geliştirilmişlerdir. Çalışma prensibi, ışınım enerjisinin bitki yaprakları tarafından emilimi sürecine benzemesi nedeniyle yapay fotosenteze benzetilmektedir. Sahip olduğu bileşenlerden boyaya duyarlaştırılmış yarıiletken malzeme, bir tür klorofil olarak davranması nedeniyle DSSC'ler aynı zamanda yapay kloroplast olarak da adlandırılabilirler. Bu yeni nesil hücrelerin çalışma prensibini anlamak bileşenlerini tanımaktan geçmektedir ve bileşenlerinin herbiri kendi içerisinde ayrı bir öneme sahiptir. Bu bileşenler; çalışma elektrodu, yarıiletken malzeme, duyarlaştırıcı boya, elektrolit ve karşıt elektrottur. İlk olarak 1991 yılında O'Regan ve Grätzel tarafından tasarlanmıştır. Boya ile duyarlaştırılmış gözenekli TiO_2 yarıiletkenine sahip hücrelerin simüle güneş ışığında % 7.1-7.9 ve dağınık gün ışığında % 12 verim sergilediği rapor edilmiştir (O'Regan ve Grätzel, 1991). Grätzel hücreleri olarak da anılan DSSC'ler adını tasarımcısı olan Michael Grätzel'den almaktadır.

DSSC'lerin üstün özellikleri sıralanacak olursa bunlar;

- Kararlı yapıda olma,
- Sağlam ve hafif bir yapıya sahip olma,
- Daha az toksik madde içermeye,
- Yüksek sıcaklıkta ve düşük ışımaya koşullarında çalışabilme,
- Kompleks üretim süreçlerine sahip olmama,
- Düşük enerji ile yüksek verim elde etme,
- Üretim koşullarında kolay değişiklik yapabilmeye.

Sayılan bu üstün özellikleri DSSC'leri geleneksel fotovoltaik hücrelerin alternatifi konumuna getirmektedir. Ancak bunların yanında güneşten gelen ışımının sadece UV radyasyonunu emmesi gibi bir dezavantajı vardır. Bununla birlikte ticarileşme açısından düşük verimlilik ve istikrar göstermektedir.

1.5.1. Çalışma prensibi

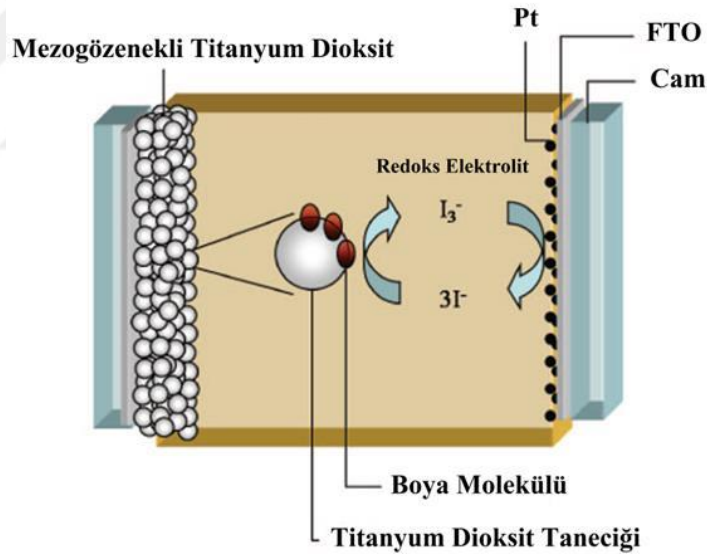
DSSC'lerin çalışma prensibi belirtildiği üzere geleneksel fotovoltaik hücrelerin çalışma yapısından oldukça farklıdır. Geleneksel fotovoltaik hücrelerde yük ayrımı için elektrik alan sağlayan silikon hem fotoelektron kaynağı görevi görmekte hem de akım oluşturmaktadır. DSSC'lerde ise yük taşıma görevini yarıiletken malzemeler, boşluk taşıma görevini ise redoks çifti sağlamaktadır. Fotoelektronların kaynağı ise duyarlaştırıcı boyadır. Yük ayrışması boyaya duyarlaştırılmış yarıiletken ile redoks aracı olarak kullanılan elektrolit arasında gerçekleşmektedir. Işık emilimi görevi gören boyanın daha fazla ışık emilimi yapabilmesi için yarıiletken malzemenin daha fazla boya adsorbe etmesi gerekmektedir. Bu durumu geliştirmek için yarıiletken malzemelere metal katkısı yapılmaktadır.

DSSC'lerin çalışma aşamaları aşağıdaki gibidir (Şekil 1.4);

1. Güneşten gelen ışımın, yarıiletken malzemeye adsorblanmış olan boya molekülleri tarafından soğurulur.

2. Güneş ışınımını soğuran boya uyarılmış hale geçer.
3. Uyarılan boya molekülündeki bir elektron ışınımın enerjisi ile yarıiletken malzemenin iletkenlik bandına doğru hareket eder.
4. İletkenlik bandına ulaşan elektronlar ilerleyerek çalışma elektroduna ulaşır ve buradan dış devreye geçer.
5. Boya molekülünün bir elektronunun TiO_2 'nin iletkenlik bandına geçmesiyle oluşan boşluk elektrolitin bir elektronunu vermesi ile indirgenir.
6. Bir elektronunu boya molekülüne vererek yükseltgenen elektrolit karşıt elektroda gelen düşük enerjili elektron tarafından indirgenir. Böylece devre tamamlanır ve bu sürecin sonucunda akım oluşur.

DSSC'lerin elektron aktarım süreci esnasında net yük her zaman sıfırdır ve kimyasal olarak bir değişme meydana gelmez (Zafer, 2006).

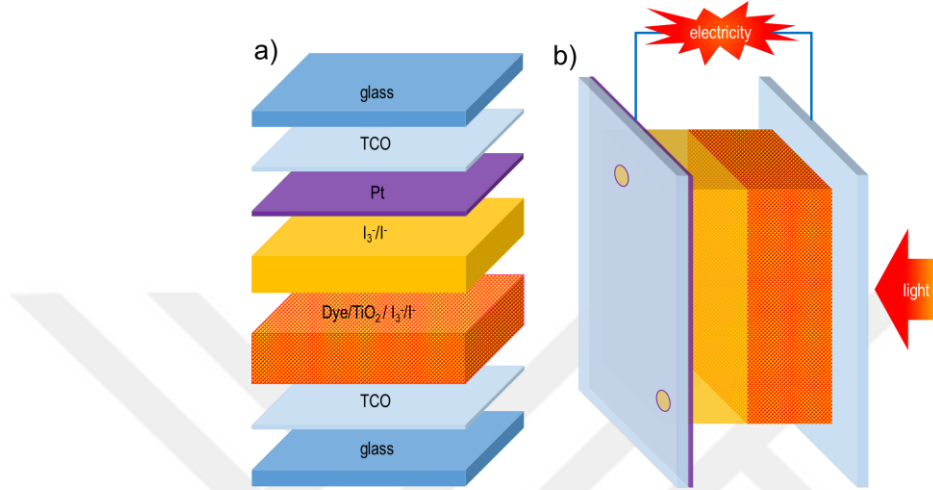


Şekil 1.4. DSSC'nin çalışma prensibi (Hagfeldt vd., 2010)

1.5.2. Hücre yapısı

DSSC, çalışma elektrodu olarak boya adsorbe edilmiş yarıiletken ile kaplı iletken cam, karşıt elektrot ve aralarında redoks çiftinin (I^-/I_3^-) yer aldığı sıvı ara katmandan meydana gelmektedir. Yarıiletken olarak en yaygın kullanılan malzeme TiO_2 'dir. Redoks çifti olarak ise iyodür triiyodür (I^-/I_3^-) ve boya için de

rutheniyum kompleksi boyalar kullanılmaktadır. Flor katkılı kalay oksit (FTO) ile kaplanmış iletken ve geçirgen cam çalışma elektrodu için kullanılmaktadır. Karşıt elektrot için de platinyum kaplı FTO camlar kullanılmaktadır. Şekil 1.5'de DSSC'nin bileşenleri ve yapısı gösterilmiştir.



Şekil 1.5. DSSC bileşenleri ve yapısının şematik gösterimi (Sarker, 2017)

1.5.2.1. Çalışma elektrodu

DSSC'lerde güneşten gelen ışının emilip iletilmesi için çalışma elektrodu olarak şeffaf iletken oksit (TCO) materyaller kullanılmaktadır. DSSC uygulamalarında flor katkılı kalay oksit (FTO) ve indiyum kalay oksit (ITO) oldukça yaygın olarak kullanılan TCO materyalleridir. ITO saydamlık ve tabaka direncine göre kıyaslama yapıldığında daha iyi performansa sahip olsa da yüksek sıcaklıklarda direnci artmaktadır. Bu nedenle yüksek sıcaklık gerektiren DSSC uygulamalarında FTO tercih edilmektedir.

1.5.2.2. Yarıiletken malzeme

Malzemelerin sınıflandırılması değişik özelliklere göre yapılabilmektedir. Elektrik iletme yeteneklerine göre sınıflandırılması ele alındığında malzemeler iletken, yalıtkan ve yarıiletken olarak sınıflandırılmaktadır. İletkenler en iyi elektrik iletme yeteneğine sahip malzemelerdir. Yalıtkanlar ise elektrik iletme

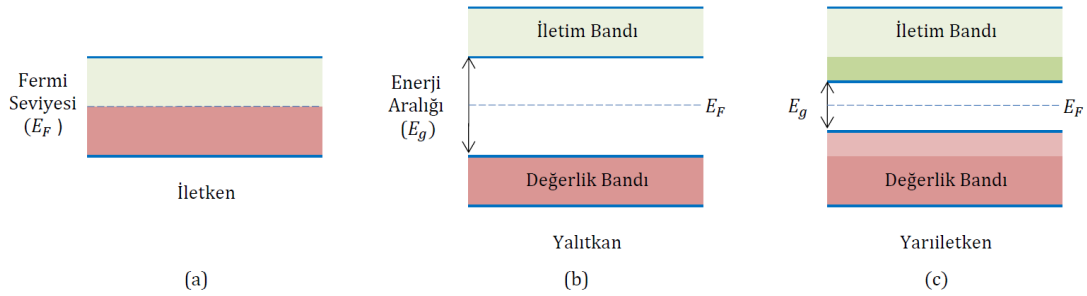
yeteneği olmayan veya bu özelliği çok zayıf olan ve elektriğe karđı direnç gösteren malzemelerdir. Yarıiletken malzemeler ise mutlak sıfır sıcaklığında ($T=0$ K) yalıtkan malzemelerin özelliklerini sergileyen ve sıcaklıkları arttıkça elektriği iletme yetenekleri artan malzemelerdir. Sıcaklığa karđı bu davranışları fotovoltaiik pil üretimindeki kullanımı iletken malzemelere karđı avantaj sağlamaktadır. Yarıiletken malzemelere dışarıdan ısı, ışık veya elektriksel gerilim gibi etkiler uygulanması sonucunda iletken malzeme özelliği gösterirler ve bu etkiler ortadan kaldırıldığında ise tekrar yalıtkan özellikleri gösterirler.

Malzemelerin sergilediği elektrik iletme yetenekleri sahip oldukları enerji bant yapılarına göre değişmektedir. Malzemenin elektrik, manyetik ve optik özellikleri hakkında bilgi veren enerji bant yapısını, malzeme yapısındaki en dış yörüngede bulunan serbest elektronların davranışları oluşturmaktadır. Bu elektronlar değerlik elektron olarak adlandırılırlar ve belirli seviyede enerjiye sahiptirler. Değerlik elektronların işgal ettiği bant değerlik bandı ve buradaki elektronların sahip olduğu enerji, değerlik bandı enerjisi olarak ifade edilir. Elektronlar tarafından işgal edilmemiş enerji bandı ise iletim bandıdır ve değerlik elektronların atomdan ayrılabilmesi için ihtiyaç duyduğu enerji, iletim bandı enerjisi olarak ifade edilir. Yalıtkan ve yarıiletken malzemelerin enerji bant yapılarında elektronların işgal edemeyecekleri enerji aralıkları (E_g) vardır ve bunlar yasak bant aralığı (boşluğu) olarak adlandırılmaktadır. Enerji aralığında elektronla dolu olma olasılığının %50'ye denk geldiği noktayı nitelendiren seviye fermi enerji seviyesi olarak adlandırılır.

Yasak enerji aralığının fazla olması elektron geçişini zorlaştırır. Malzemelerdeki bant yapısına bakılacak olursa, iletken malzemelerde değerlik bandı ile iletim bandı bitişiktir (Şekil 1.4.(a)). Bu nedenle elektronun iletim bandına geçmesi için düşük seviyeli bir enerji yeterli olmaktadır. En iyi elektrik iletme yeteneğine sahip olan iletken malzemelerin yapısındaki elektronlar serbest bir şekilde hareket edebilmekte ve iletim bandına direkt olarak geçebilmektedir. Bu durumun tam tersini sergileyen, yani oldukça geniş bir yasak bant boşluğuna sahip olan ve elektrik iletme yeteneği olmayan veya oldukça zayıf elektrik iletme yeteneğine sahip olan malzemeler ise yalıtkan malzemelerdir (Şekil

1.4.(b)). Yalıtkan malzemelerde elektronların serbest hale geçebilmesi için oldukça yüksek seviyeli enerji verilmelidir.

Yarıiletkenlerin enerji band yapıları yalıtkanların band yapısı ile benzerlik göstermektedir. Ancak sahip oldukları enerji bant aralığı yalıtkan malzemelere göre daha dardır (Şekil 1.4.(c)). Mutlak sıfır sıcaklığında yarıiletkenlerin değerlik bandları elektron ile doludur ve iletim bandında hiçbir elektron bulunmaz. Bu nedenle yarıiletkenler düşük sıcaklıklarda zayıf iletken özellikleri sergilerler. Yüksek sıcaklıklarda ise bant aralığının dar olmasından dolayı yarıiletkenlerin iletkenliği sıcaklığa bağlı olarak artar. Sıcaklığın etkisiyle yarıiletkenlerin değerlik bandında bulunan elektronlar ayrılarak iletim bandına geçer ve geride boşluk bırakırlar. Değerlik bandında oluşan bu boşluklar pozitif yük olarak görülür. Bu durum yarıiletkenlerin yapısında hem pozitif yükler hem de negatif yükler bulundurduğunu gösterir. Değerlik bandındaki bir elektronun bu şekilde geride boşluk bırakarak yakınında bulunan boşluğu doldurması ve boşluğun başka bir elektron ile tekrar dolması davranışında boşluk bir yük taşıyıcı olarak davranır (Serway ve Beichner, 2005).



Şekil 1.6. (a) İletken, (b) yalıtkan ve (c) yarıiletken malzemelerin enerji band yapıları

Sıcaklığın artmasıyla yarıiletkenlerin dirençleri azalır ve iletkenlikleri artar. İletken malzemelerde ise tam tersi bir durum söz konusudur. Bu nedenle fotovoltajik hücre yapımında iletken malzemelerinin kullanımından ziyade yarıiletken malzemelerin kullanılması daha fazla avantaj sağlar.

Bir yarıiletkende iletkenlik bandında bulunan elektronların sayısı ile bunların değerlik bandında bıraktıkları boşlukların sayısına eşit ise bu yarı iletkenlere saf (asal) yarıiletken denir. Bu tanımdaki bir malzemede, mutlak sıfırda ($T=0$ K) bütün elektronlar değerlik bandında olup iletim bandında hiçbir serbest elektron bulunmaz (Tatar, 2015).

Yarıiletken malzemeler güneş hücresi üretiminde saf olarak kullanılmadıkları için bu malzemelere katkılama yapılması gerekir. Katkılama ile n-tipi veya p-tipi yarıiletken elde edilir. Yapılan katkıya göre yarıiletkenin yapısı değişir. Katkılama ile değerlik bandı enerji seviyesinin yukarıya çekildiği yarıiletkenlere p-tipi yarıiletken, iletim bandı enerji seviyesinin aşağıya çekildiği yarıiletkenlere ise n-tipi yarıiletkenler denir. Güneş hücrelerinde en yaygın kullanılan yarıiletken olan silisyumdan n-tipi silisyum elde etmek için periyodik cetvelin 5. grubundan bir element katkılanır. Örnek olarak 5. grup elementlerden fosfor dış yörüngesinde 5 elektron bulundurur. Silisyum ise dış yörüngesinde 4 elektron bulundurur. Fosfor elementinin silisyuma katkılanması ile fosforda bir elektron dışta kalır ve bu serbest elektron olarak adlandırılır. Dışta kalan serbest elektronlar diğer atomlara doğru hareket edebilir. Bu tür katkılama ile oluşan yarıiletken n-tipi yarıiletken denir. P-tipi silisyum elde etmek için de periyodik cetvelin 3. grubundan bir element katkılanır. Örneğin indiyum atomu dış yörüngesinde 3 elektron bulundurur ve silisyuma katkılandığında 1 elektron eksik çalışır. Bu durumda indiyumun oluşturduğu eksiklik boşluk olarak adlandırılır. Elektronlar, oluşan bu boşluklarda hareket edebilir. Boşluklar pozitif yük olarak tanımlanır ve bu tür katkılama ile oluşan yarıiletkenlere de p-tipi yarıiletken denir (Öztürk ve Kaya, 2013)

DSSC ana bileşenlerinden biri olan yarıiletken malzemeler için birçok madde vardır. Bunlar; TiO_2 , SnO_2 , ZnO , Nb_2O_5 , ZrO_2 gibi yarıiletkenlerdir. Bunlar arasında görünür ışıktaki saydam olan, geniş bant aralığına sahip, kararlı yapıda ve toksik olmayan TiO_2 DSSC uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. TiO_2 pigment işlevinden dolayı oldukça geniş bir kullanım sahasına sahiptir. TiO_2 , boya ve kaplama sektöründe, gıda sektöründe, kağıt, plastik ve ilaç gibi ürünlerde ve ayrıca kendi yüzeyini temizleyen sistemlerde kullanılmaktadır.

TiO₂'in rutil, anataz ve brokit olmak üzere üç farklı kristal yapısı vardır. Rutil, termodinamik açıdan en kararlı olan yapıdır. Bunun yanısıra hem geniş bant aralığına hem de yüksek iletkenlik bant enerjisine sahip olan anataz yapı DSSC'lerde en çok tercih edilen kristal yapıdır (Boz, 2015).

Periyodik cetvelin 4A grubunda yer alan titanyum ve 6B grubunda yer alan oksijen (O) atomlarının birleşmesiyle oluşur. Ergime sıcaklığı 1858 °C'dir ve yüksek sıcaklıklarda kararlı bir fazdır. Anataz da tetragonal sistemde kristallenir. Sertlik 5-6, özgül ağırlık 4-4.5'tir. Yarı metalik ve metalik cilalıdır. Daha düşük sıcaklıklarda kararlı bir faz yapısı olan anataz, yüksek sıcaklıklarda rutil fazına dönüşür (Akar, 2016).

1.5.2.3. Duyarlaştırıcı boya

DSSC uygulamalarında yarıiletken malzemenin yüzeyine adsorplanarak gelen ışınımı emme görevi üstlenen bileşendir. Gelen ışınımı emerek uyarılan boya molekülleri fotoelektron kaynağıdır. Uyarıldıktan sonra emilen ışınımın etkisiyle elektronlarını yarıiletken malzemeye vererek yükseltgenir. Diğer taraftan ise elektrolit içindeki redoks çiftinden elektron alarak indirgenir.

DSSC üretimlerinde birçok rutenyum (Ru) kompleksi, porfirin, ftalosiyenin ve organik boyalar kullanılmıştır. Bunların arasında Ru kompleksi boyalar içerdiği özelliklerinden dolayı en iyi fotovoltaiik özellik sergilemektedirler. Ancak buna rağmen ideal boyalar değildir ve ideali yakalamak için birçok çalışma yapılmaktadır. Rutenyum boyalarının sentezleri kolay değildir ve sentez sırasında kullanılan malzemeler oldukça pahalıdır. Ayrıca güneş spektrumunun sınırlı kısmında emilim sağlamaları bu boyaları ideallikten uzaklaştırmaktadır.

Yarıiletken malzemeyi duyarlaştırmada boya seçimi kullanılan yarıiletkenin türüne göre değişmektedir. TiO₂ yarıiletkeni için en yüksek verim N3 (%10) ve Z907 (%11) boyalarından, ZnO yarıiletkeni için ise N719 (%5) rutenyum kompleksi boyadan elde edilmiştir (Mori ve Yanagida, 2006).

DSSC hücrelerinde kullanılacak boyaların özellikleri aşağıda sıralanmıştır;

- Geniş bir absorpsiyon spektrumu içermeli ve mümkünse IR bölgesinde absorpsiyon yapmalı
- Yarıiletken tabakanın yüzeyine kuvvetlice tutunabilmeli
- Enerji seviyelerinin hem yarıiletkenin iletkenlik bandı ile hem de redoks çifti ile uyumlu olmalı
- Geniş ölçekli üretim için kolay sentezlenebilir ve anlaşılabilir senteze sahip olmalı
- Geri dönüşüm olasılığına sahip olmalı ve düşük toksik özelliğe sahip olmalı
- Işık altında yüksek kararlılığa sahip olmalı
- Yarıiletken yüzeyinde topaklanmamalı
- Elektrokimyasal olarak kararlı olmalı
- Işığa ve ısıya karşı dayanıklı yapıda olmalı (Boz, 2015).

Bu tezde Rutenyum türevi olan TiO_2 yarıiletkeni için uygun olan Z907 boyası kullanılmıştır, Ru boyalarının en iyi fotovoltaiik sonuçları gösterdiği bilinmektedir. Uygun enerji seviyelerinde kararlı elektrokimyasal davranışa, geniş bir absorpsiyona ve uygun kimyasal özelliklere sahip olmaları nedeniyle rutenyum kompleksi boyalar DSSC hücrelerinde öncü boya olarak kullanımda önemli bir değere sahiptir. DSSC hücrelerinde kullanılan birçok rutenyum boyalarının verimleri %10 düzeyini aşmaktadır (Boz, 2015).

1.5.2.4. Redoks çifti

DSSC'de akım üretme sürecinde boşluk taşıma görevini üstlenen bileşen redoks çiftidir. Uyarılan boyadan ayrılan elektronların oluşturduğu boşluklar, redoks çiftinin yükseltgenmesi ile doldurularak elektron sirkülasyonu sağlanır. Elektrolit için birçok elektrolit çeşidi geliştirilmiştir. DSSC'lerde genellikle iyodür/triiyodür (I^-/I_3^-) sıvı redoks çifti kullanılmaktadır. Sıvı elektrolitlerin sızdırmazlık problemi vardır. Bu probleme çözüm olarak katı elektrolitler

geliştirilmiştir. Ancak katı elektrolitin düşük elektron hareketliliği nedeniyle uygun olmadığı vurgulanmıştır (Giray, 2010).

1.5.2.5. Karşıt elektrot

Karşıt elektrot cam ya da plastik yüzey üzerine kaplanan iletken bir tabakadan oluşur. Karşıt elektrotların görevi hücredeki akım sürecinde fotoelektronların devre döngüsünü tamamlamasını sağlamak ve düşük seviyeli elektronları yeniden sisteme dahil etmektir. Bir elektronunu vererek yükseltgenen boya molekülü triiyodürün elektron alarak indirgenmesini sağlar. Triiyodürün indirgenmesinden sonra boya molekülünün yeniden elektron alabilmesi için kullanılan iyodür oluşur. İdeal bir hücre için çalışma elektrodunda (anot) gerçekleşen reaksiyon yavaş gerçekleşmeli, karşıt elektrodaki (katot) reaksiyon hızlı gerçekleşmelidir (Giray,2010). DSSC'lerde karşıt elektrot olarak genellikle Pt, Au veya karbon gibi kararlı ve asil iletkenler kullanılmaktadır. Işığı yansıtma özelliğinin yüksek oluşu nedeniyle platin DSSC'lerde karşıt olarak sık kullanılmaktadır.

1.5.3. Metal Katkılama

DSSC'lerde çeşitli yöntemler ile üretilen çalışma elektrodu hücre verimliliğini geliştirmek için önemli bir etkidir. Çalışma elektrodunu oluşturmada kullanılan yarıiletkenlerin elektriği iyi iletme yeteneklerinin çok iyi olması gerekmektedir. Yarı iletkenlerin elektriği iletme yeteneklerini geliştirmek için en yaygın kullanılan yöntemlerden biri yarıiletkene metal katkısı yapmaktır. Bölüm 1.5.2.2'de de bahsedildiği üzere geniş band aralığına sahip TiO₂ DSSC'lerde en çok tercih edilen yarıiletkendir. TiO₂'nin iletkenlik yeteneğini geliştirmek için toprak alkali metalleri (Li, Ca ve Ba), geçiş metalleri (Co, Cr, Fe, Cu, Nb ve Ru), lantanit ve nadir toprak metalleri (Eu, La, Nd ve Pr) katkılama yapılabilmektedir (Iwasaki vd., 2000; Rodrriguez vd., 1997). Geçiş metalleri katkılamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında TiO₂'ye metal katkısı için geçiş metalleri arasında yer alan Nb elementi seçilmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Güneş enerjisini direkt olarak elektrik enerjisine dönüştürme özelliğine sahip DSSC'lerin güç dönüşüm verimliliğini geliştirmeye yönelik çalışmalar son zamanlarda gitgide artmaktadır. Yapılan literatür taramasında farklı üretim teknikleri, farklı parametreler ve farklı katkılama malzemeleri kullanılarak üretilen DSSC'ler ile ilgili çalışmalar incelenmiş ve üretilen DSSC'lerin yapısal, optik ve elektriksel özellikleri üzerine çalışıldığı görülmüştür.

Lee vd. (2009) yaptıkları bu çalışmada Nb katkılı ve katkısız TiO₂ tozlarını geleneksel yöntemle üreterek bu tozları darbeli lazer biriktirme tekniği (PLD) ile FTO camlar üzerine biriktirmişlerdir. Ürettikleri Nb katkılı TiO₂ FTO, katkısız TiO₂ FTO ve sade FTO camları DSSC'lerde çalışma elektrodu olarak kullanarak karşılaştırmalarını yapmışlardır. Bu üç cam ile üretilen hücrelerden Nb katkılı TiO₂ içeriğine sahip olan hücrelerin verimliliği sade FTO içeren hücreler ile karşılaştırıldığında %21.2, katkısız TiO₂ ile karşılaştırıldığında ise verimlilik % 4.1 artış olduğu rapor etmişlerdir.

Lü vd. (2010) bu çalışmada DSSC'lerde çalışma elektrodu olarak kullanılmak üzere Nb katkılı TiO₂ nanopartiküllerini yeni bir sentetik yolla sentezlemişler ve enerji dönüşüm verimliliğine olan etkisini incelemişlerdir. Nb katkısının üretilen DSSC'lerin fotoakımına olumlu etki ettiğini bununla birlikte artan katkı ile Voc değerini azalttığını bildirmişlerdir. Yaptıkları analiz sonuçlarına göre %5.0 mol Nb katkısına sahip hücrenin güç dönüşüm verimliliği (PCE) (%7.8) katkısız TiO₂ ile üretilen hücrenin güç dönüşüm verimliliğine kıyasla yaklaşık %20'lik bir gelişme olduğu sonucuna varmışlardır.

Tsvetkov vd. (2011) DSSC'lerin verimini geliştirmeye yönelik olarak hücre bileşenlerinden biri olan çalışma elektrodunu ele almışlardır. Çalışma elektrodunu üretirken öncül olarak kullandıkları TiO₂ yarıiletkenine Nb katkısı eklemiş ve bu işlemi sol jel yöntemini kullanarak yapmışlardır. Farklı oranlarda gerçekleştirdikleri işlemler sonucunda %1.7 mol'den daha düşük Nb konsantrasyonuna sahip hücrelerde rekombinasyonun önlendiğini

bildirmişlerdir. I_{SC} ve V_{OC} değerlerinin geliştirilmesine etki eden %1.7 mol Nb katkısının cihaz verimliliğini %11 oranında artırdığını rapor etmişlerdir.

Yang vd. (2011) DSSC' lerde kullanmak üzere elektrokimyasal anotlama yöntemi ile farklı Nb/Ti oranlarına sahip Nb katkılı TiO_2 nanotüpler üretmişlerdir. Katkılı ve katkısız TiO_2 kullandıkları DSSC' ler ile karşılaştırdıklarında %30' luk bir verim artışı olduğunu bildirmişlerdir. Bununla birlikte ölçümler sonucunda yapılan Nb katkısının hücrede meydana gelen rekombinasyon kayıplarını engellediği kaydedilmiştir.

Nikolay vd. (2011) yaptıkları çalışmada TiO_2 yarıiletkenine soljel yöntemi ve hidrotermal yöntemle farklı oranlarda Nb katkılayarak DSSC' lerin güç dönüşüm verimliliğini geliştirmeyi amaçlamışlardır. Üretilen Nb katkılı TiO_2 macunları Doktor-Blade yöntemi ile FTO camlar üzerine biriktirilmiştir ve DSSC'lerde çalışma elektrodu olarak kullanıldığında elektron taşınmasında yararlı olduğunu bildirmişlerdir. Farklı oranlarda Nb katkısı sağlayarak en iyi güç dönüşüm verimliliği için gerekli olan katkı miktarını tespit etmişlerdir. İncelemeler sonucunda % 8.0'lik en iyi güç dönüşüm verimliliğini % 2.5 mol Nb katkılı TiO_2 ile hazırlanan DSSC'ler vermiştir.

Yang vd. (2012) yaptıkları çalışmada USP yöntemi ile Nb katkılı TiO_2 üretmiş ve fotokatalitik aktivitelerini incelemiştir. Çalışmada TiO_2 öncülü olarak $TiCl_4$ kullanılmıştır. Nb katkısının morfolojisini, yapısını, yüzey alanını ve TiO_2 mikrokürelerin spektral absorpsiyon özellikleri üzerindeki etkisini SEM, TEM, XRD, Raman spektrumları, BET ve UV-Vis cihazları ile araştırmışlardır. Nb katkısının TiO_2 'nin spektral absorpsiyonunu görünür spektruma uzattığı gözlemlenmişler ve absorpsiyon başlangıcı saf TiO_2 mikrokürelere kıyasla % 5'lik katkı ile yaklaşık 88 nm için kırmızıya kaydığını rapor etmişlerdir. Nb katkılı TiO_2 mikrokürelere, güneş ışığında ya da görünür ışık altında metilen mavisi yıkımı için TiO_2 mikrokürelere kıyasla daha yüksek fotokatalitik aktivite gösterdiler; bu durumu, genişletilmiş ışık emme aralığına ve elektron deliği çift rekombinasyonunun bastırılmasına dayandığını bildirmişlerdir.

Park vd. (2012) 20 nm boyutunda anataz nanokristallerden oluşan TiO_2 nanoyapılarını Nb katkısı ekleyerek PLD yöntemi ile sentezlemişlerdir. Sentezledikleri bu yapıları DSSC' lerde kullanarak hücre performansı ve morfolojiye olan etkilerini araştırmışlardır. Yapılan katkılama ile I_{sc} değerlerinde kayda değer bir değişim olmadığı, bununla birlikte V_{oc} ve doldurma faktörü (FF) değerlerinin artan Nb katkısı ile stabil olarak azaldığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca Nb katkısı ile ayayüzdeki yük rekombinasyonunun baskılandığını bildirmişlerdir.

Duan vd. (2012) farklı kalay (Sn) içeriğine sahip Sn katkılı TiO_2 sentezlemek için hidrotermal yöntem kullanmıştır. Sn katkılı ve katkısız TiO_2 filmleri FTO camlar üzerine doktor-blade yöntemi ile üretmişlerdir. Üretilen filmler DSSC' lerde çalışma elektrodu olarak kullanılarak hücre performansı araştırılmıştır. Katkılı ve katkısız filmler karşılaştırıldığında Sn katkısına sahip filmlerin elektron transfer hızlarının katkısız filmlere göre daha yüksek çıktığını ve V_{oc} ile I_{sc} değerlerini geliştirdiğini bulunmuşlardır. %0.5 mol Sn içeriğine sahip DSSC' ler % 8.31' lik en iyi verimi sergilemiş ve katkısız TiO_2 içeren DSSC' lere kıyasla %12.1 oranında gelişme göstermiştir.

Zhang vd. (2012) DSSC' ler için çalışma elektrodu olarak TiO_2 ' e seryum (Ce) katkısının etkisini incelemişler ve DSSC' lerin performansına önemli ölçüde etki ettiğini bildirmişlerdir. %0.05 ve %0.1 Ce katkılı TiO_2 içeren DSSC' lerin performansı saf TiO_2 içeren hücrelere kıyasla % 7.65'e kadar bir artış sağlamıştır. Bununla birlikte artan Ce katkısı ile I_{sc} ve hücre performansının düştüğünü fakat FF değerini artırdığını gözlemlemişlerdir.

Horie vd. (2013) çalışma elektrodu olarak ürettikleri Nb katkılı TiO_2 filmleri DSSC' lerde kullanmışlar ve fotovoltaik özelliklerini incelemişlerdir. Elektrospinning yöntemi ile hazırlanan nanoyapılar spin kaplama yöntemi ile FTO camlar üzerine biriktirilmiştir. TiO_2 ve Nb katkılı TiO_2 nanofiberlerini karıştırarak I_{sc} değerini artırmışlardır. Nb katkısının elektron taşıma için uygun bir katkılamam maddesi olduğunu bildirmişlerdir.

Kim vd. (2013) Nb katkılı ve katkısız TiO₂ nanopartikülleri sentezlemiş ve elektron enjeksiyonunu ve transferini kolaylaştırma amaçlı delik iletkeni co-adsorban eklemişlerdir. TiO₂ nanopartiküllerine Nb katkısı yapmak için sol jel ve hidrotermal yöntemden yararlanılmış ve DSSC' lerde sorunsuz bir şekilde kullanmışlardır. Yapılan Nb katkısı elektron enjeksiyonuna olumlu etki sağlarken Voc değeri için ters etki göstermiştir. Bu duruma çözüm olarak da Nb katkısı ile birlikte delik iletkeni co-adsorban eklemişler ve karşılaştırma yapmışlardır. Yapılan incelemeler sonucunda delik iletkeni co-adsorban kullanarak oluşturdukları Nb katkılı DSSC' lerin %7.41' lik PCE gösterdiği ve katkısız TiO₂ içeren DSSC' ye göre %11 gelişme gösterdiğini rapor etmişlerdir.

Murali (2014) yaptığı bu çalışmada spreylendirme yöntemi ile ITO camlar üzerine TiO₂ biriktirmiş ve sıcaklığın hücreler üzerindeki etkisini araştırmıştır. İncelemeleri sonucunda filmlerin band aralıklarının sıcaklığın artmasıyla daraldığını gözlemlemiştir. Üç farklı boya ve bunların kombinasyonunu kullanarak TiO₂ biriktirilen filmlerden DSSC üretim hücre verimliliğindeki değişikliği incelemiştir.

Lee vd. (2014) farklı oranlarda Nb katkısını TiO₂ ' ye sol jel türevli elektrospinning ile katkılayarak FTO camlar üzerine spin kaplama yöntemi ile biriktirmiştir. XRD sonuçlarına göre değişen Nb/Ti mol oranının bir sonucu olarak anataz ve rutil fazlar oluştuğunu ve bu oran yükseldikçe anataz fazının rutil faza dönüştüğünü gözlemlemiştir. Nb katkılı TiO₂' nin bant boşluk enerjisi katkının artırılması ile anataz fazdan rutil faza dönüştüğünde 3.25 eV ile 2.87 eV arasında değişen değerler göstermiştir. Yaptıkları çalışmanın sonucunda Nb katkısının morfolojiyi, kristal yapıyı ve bant boşluk enerjine etki ettiği yargısına varmışlardır.

Long vd. (2014) hidrotermal yöntemle Nb katkılı TiO₂ nanopartiküllerini hazırlamış ve fotoelektrokimyasal özelliklerini incelemiştir. Hazırlanan partiküller daldırarak kaplama yöntemi ile FTO camlar üzerine kaplanmıştır. Az miktardaki rutil Nb katkılı TiO₂'nin gelişmiş performans sergilediği sonucuna varmışlar ve kullandıkları %1 oranındaki Nb katkısı için % 8.53'lük güç

dönüşüm verimliliği elde ederken %2 Nb oranında ise bu değeri %8.77 olarak elde etmişlerdir.

Archana vd. (2014) bu çalışmada elektrosponnig tekniğini kullanarak yaklaşık 50nm çapındaki tungsten (W) katkılı TiO₂ nanoyapılarını sentezlemiş ve DSSC'lerde kullanıldığında performansa olan etkisini incelemişlerdir. %2 oranında W:TiO₂ içeren DSSC'lerin katkısız TiO₂ içeren DSSC'ler ile karşılaştırılmasıyla yüksek I_{sc} ve düşük V_{oc} artışı sergilediği sonucuna varmışlardır. W katkısı içeren hücrelerdeki bu değişimlerin katkının etkisiyle geniş yüzey alanı sonucu artan boya emilimi ve artan elektron yoğunluğu sonucu uzayan elektron ömründen kaynaklandığı çıkarımına varmışlardır.

Yang vd. (2014) Nb katkısının DSSC'lerdeki etkisini incelemek üzere çalışma elektrodu olarak kullandıkları TiO₂'ye katkılayarak FTO cam üzerine biriktirmişlerdir. Yaptıkları araştırmalar sonucunda farklı Nb oranlarına sahip nanoyapıların güç dönüşüm verimliliğini önemli ölçüde geliştirdiğini bulmuşlardır.

Shakir vd. (2015) DSSC'lerin çalışma elektrodu için FTO cam üzerine Doktor Blade tekniğini kullanarak Cu katkılı TiO₂ nanoparçacıkları biriktirmişleridir. Hazırlanan elektrotların DSSC'lerin performansına olan etkisini incelemek için katkılı ve katkısız numuneler hazırlayarak karşılaştırma yapmışlardır. Gözenekliliği artırma amaçlı birçok yol izlemişlerdir. Karbon mikrokürelerini dahil ettiklerinde gözenekliliğin ve yüzey alanının arttığını gözlemlemişlerdir. %3 oranındaki Cu katkılı ince filmlere %2.5 oranında karbon mikroküreler eklediklerinde gözenekliliğin %11 oranında arttığını bulmuşlardır. DSSC üretimi için çalışma elektrodu olarak Cu katkılı TiO₂, N₃ boya, iyodür/triiyodür (I⁻/I₃⁻) elektrolit ve karşıt elektrot olarak Au kaplı FTO cam kullanmışlar ve yaptıkları analizler sonucunda katkısız TiO₂ ile hazırlanan hücrelere kıyasla V_{oc} değerinde %11 artış gözlemlemişlerdir.

Su vd. (2015) yaptıkları çalışmada hidrotermal sentez yöntemi ile TiO₂ nanapartiküllerine Nb metal katkısı yapmıştır. Katkılanan Nb metali ile iletim

bandındaki pozitif değişimin elektron aktarımını artırdığını ve geliştirilmiş elektron iletkenliğinin elektron taşınımını kolaylaştırdığını gözlemlemiştir. Bunlara ek olarak Nb katkısının TiO₂-elektrolit arayüzünde yüzey rekombinasyonunu önlediğini ve bununda açık devre voltaj (V_{oc}) değerinde artışa sebep olduğu sonucunu elde etmişlerdir. Ayrıca Nb-katkılı TiO₂ içeren DSSC'lerin ayrıca uzun vadeli bir stabilite özelliği gösterdiği görülmüştür.

Arunachalam vd. (2015) bu çalışmada spreylendirme yöntemi kullanarak hazırladıkları filmlerin alttaş sıcaklığının ve öncül olarak kullanılan titanyumun molar konsantrasyonunun fiziksel özellikler üzerine etkisini araştırmıştır. İncelemeler sonucunda 450 ° C ve 0.1 M alttaş sıcaklığının ve öncül konsantrasyonunun optimum değerler olduğu bulunmuştur. Ürettikleri filmler ile DSSC'leri oluşturmuşlar ve güç dönüşüm verimliliği en yüksek 450 ° C alttaş sıcaklığında biriktirilmiş anataz fazındaki TiO₂ içeren hücrelerden elde etmişlerdir.

Arunachalam vd. (2016) başka bir çalışmalarında Zn katkılı TiO₂ ince filmler kullanarak DSSC' verimine etkisini incelemişlerdir. Zn katkısını spreylendirme tekniği ile ITO camlar üzerine biriktirmişler ve yapılan analizler ile artırılan katkı ile birlikte pürüzlülüğü olan nanoyapılı filmler elde etmişlerdir. Bununla birlikte katkı maddesinin artması enerji bandı boşluğunda azalma meydana getirmiştir. Ürettikleri bu filmleri ve boya olarak organik bir boyayı DSSC üretiminde kullanarak hücre verimini yaklaşık %1.22 elde etmişlerdir.

Akar (2016) yaptığı tez çalışmasında DSSC' lerde çalışma elektrodu olarak TiO₂ kaplı FTO camlarını elektrokimyasal depolama yöntemi ile çalışma şartlarını değiştirerek ve farklı yüzey artırıcı maddeler kullanarak farklı kalınlıklarda ince filmler elde etmiştir. Karşıt elektrot için platin kaplanarak oluşturulan filmleri kullanmış, diğer bir bileşen olan boya için ise azo boya seçimini yaparak güneş hücresi üretmiştir. Son olarak ürettiği güneş hücresinin verim analizi yapmıştır.

Liu vd. (2016) hidrotermal ve spin kaplama yöntemlerini kullanarak DSSC' nin bileşenlerinden çalışma elektrodu için Nb katkılı TiO₂ filmler üretmiştir. TiO₂' ye

uygun miktarda Nb katkısı yapılmasının, esnek DSSC'lerin fotovoltaiik özelliklerini etkin bir şekilde geliştirdiğini bulmuşlardır. Aydınlatma altında yaptıkları elektromanyetik spektrum ölçümleri sonucunda güneş ışınlarının Nb katkılı TiO₂ bileşiğinde daha hızlı transfer olabildiğini gözlemlemişlerdir. Karanlıktaki ölçümlerde az miktardaki Nb katkısının, elektron rekombinasyon kayıplarını azaltmak için yüzeysel enerji seviyesi tuzaklarını azalttığını göstermiştir. Çalışma elektrodu olarak % 2.4 mol Nb katkılı TiO₂ ve karşıt elektrot olarak Pt kaplı ITO-PEN ile oluşturdukları tamamen esnek DSSC'lerin I_{sc} değerinde 9.98 ila 13.60 mAcm⁻² arasında ve V_{oc} değerlerinde 0,74 ila 0.78 V arasında artış kaydemişler. Bunların sonucu olarak da katkısız TiO₂ içeren hücrelerin güç dönüşüm veriminden (4.96%) daha iyi olan % 7.20 güç dönüşüm verimliliği sergilediğini rapor etmişlerdir.

Shaban vd. (2016) bu çalışmada USP, spin kaplama ve daldırma ile kaplama yöntemlerinden yararlanarak ZnO ince filmler biriktirmişlerdir. İncelemeler sonucunda USP yöntemi en iyi sonuçları vermiştir. USP yönteminde farklı sıcaklıklar ve farklı nozzle-alttaş arası mesafeleri denemişler ve sıcaklık için 350 °C ve mesafe için de 20 cm ile en iyi sonuçları elde etmişlerdir. Ürettikleri filmleri FTO/TiO₂ arasında engelleyici tabaka olarak kullanımışlardır.

Fugare vd. (2017) bu çalışmada USP yöntemini kullanarak TiO₂ ince filmleri çelik, bakır ve FTO gibi farklı yarıiletken alttaşlar üzerinde hazırlamış ve filmlerin yapısal, morfolojik ve elektrokimyasal özelliklerini incelemiştir. Çalışma sonucu olarak paslanmaz çelik ile hazırlanan TiO₂ ince filmlerin mükemmel elektrokimyasal performans sergilediğini rapor etmişlerdir.

Dhamodharan vd. (2017) indiyum katkılı kalay oksit (ITO) substratlar üzerine spreylendirme yöntemiyle Alüminyum (Al) katkılı çinko oksit (ZnO) ince filmler biriktirmiş ve üretilen substratları DSSC'lerin üretiminde kullanımışlardır. Elde edilen filmler Al/Zn oranlarına göre yapısal, mikrokimyasal, optik ve elektriksel özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Aldıkları sonuçlara göre düşük Al içeriği için granüler ve nanoyapıda bir morfoloji, daha yüksek Al içeriği için de nanosheet morfoloji gözlemlemişlerdir. % 1.5 Al/Zn oranına sahip filmlerde

bant boşluğu enerjisi 3,26–3,42 eV aralığında değişmiştir. Maksimum güç dönüşümü verimliliğinin % 1.02 olduğunu ve % 4.52'lik güneşten elektrik dönüşüm verimini kullandıkları nar boyası ile duyarlı hale getirilmiş Al katkılı ZnO filmler ile üretilen DSSC ile elde etmişler ve böylelikle fotonların elektrona dönüştürülmesinde daha verimli olduğu sonucuna varmışlardır.

Liu vd. (2017) hidrotermal yöntem kullanılarak ve ardından ısı ile işleme sentezlenen Nb katkılı DSSC'lerin mikroyapıları ve fotovoltaiik performansları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Nb katkısının hücrelerin fotovoltaiik performansı üzerinde önemli bir etkisi olduğunu rapor etmişlerdir. %5 mol ve daha az miktardaki Nb katkısı olan TiO₂ filmler ile içerisinde saf TiO₂ bulunan ince filmleri karşılaştırdıklarında Nb katkısının bulunduğu filmlerin daha yüksek fotovoltaiik verimlilik sergilediğini bulmuşlardır. %3.5 mol oranında Nb katkısı içeren TiO₂ filmler % 4,99 verimle saf TiO₂ filmlere sahip hücrelere göre % 13.7'lik bir iyileştirme sağlamıştır. Bununla birlikte yapılan katkı elektron transferinde gelişim sağlamış ve ara yüzey direncini azaltmıştır. Daha yüksek katkı oranlarında ise kusurların oluşumu sonucu yük rekombinasyonunda artış gözlenmiştir.

Jaafar vd. (2017) yapmış oldukları bu çalışma ile katı-hal tekniği ile sentezlenen Nb katkılı TiO₂ filmlerinin DSSC'lerde kullanılmak üzere geliştirilmesini amaçlamışlardır. Nb katkılı TiO₂ filmlerin elektron rekombinasyonunu bastırdığını ve hazırlanan filmlerin doğal boya ile duyarlaştırılmış güneş hücrelerinde kullanılması sonucu yüksek enerji dönüşüm verimliliği gösterdiklerini gözlemlemişlerdir. Enerji dönüşüm verimliliğindeki artış, elektron transferinin geliştirilmesi ve elektron iletkenliğinin iyileştirilmesi ile ilişkili olarak fotoakım ve açık gerilimdeki artıştan kaynaklanmıştır. Sonuçlara göre ağırlıkça % 1.0 Nb katkılı TiO₂ yaklaşık olarak %1.4'lük verim ile saf TiO₂ ye göre %75 daha yüksek güç dönüşüm verimliliği sergilemiştir.

Endo vd. (2018) DSSC'lerde kullanılmak üzere sıvı faz biriktirme yöntemini kullanarak Zn kalıntılarını flor katkılı kalay oksit cam substratlar üzerine kalıntılamışlardır. Üretilen camların yüzey yapılarını ve kimyasal özelliklerini

FESEM, XRD, TEM ve XPS cihazlarını kullanarak incelemişlerdir. Zn katkılanmış örneklerin V_{oc} değerini iyileştirdiğini ve gerilimin 0.876 V'a ulaştığını raporlamışlardır. Yapılan bu çalışmada katkılanan Zn örneklerinin hücrelerin fotokatalitik özelliklerini önemli ölçüde etkilediği ve yüksek Zn miktarının fotoakım yoğunluğunu azalttığı gözlemlenmiştir. Bunun yanında yüksek miktardaki Zn için boya miktarında artış sağlanmıştır. Uyarılan foto elektronların TiO_2 nanotüplerine tutunma olasılığındaki azalmanın baskın nedeni olarak fotoakımdaki azalmadan kaynaklandığı tahmin edilmektedir.

Ünlü vd. (2018) yaptıkları çalışmada demir, nikel, kobalt, çinko (Fe, Ni, Co, Zn) katkılı ve katkısız TiO_2 nanopartiküllerini mikrodalga destekli hidrotermal yöntemle sentezleyerek farklı boya ile kullandıklarında hücredeki performansa etkilerini incelemişlerdir. Çalışma elektrodu için gereken malzemeyi hazırlarken florin katkılı kalay oksit (FTO) cam üzerine spin kaplama yöntemini kullanmışlardır. Boya olarak N719 ve dithizone kullanılmıştır. Yaptıkları direnç karşılaştırmasında N719 ile üretilen hücreler arasında en yüksek FTO ve karşı elektrot-elektrolit arasındaki arabirim direncini Co katkılı TiO_2 ile hazırlanan hücre göstermiştir. Ayrıca en yüksek elektrolit, boya ve çalışma elektrodu arasındaki arabirim direncini de Fe katkılı TiO_2 ile hazırlanan hücreler göstermiştir. Katkısız TiO_2 ile hazırlanan hücrelerde ise genel olarak gözlenen değerler diğer hücrelere göre düşüktür. Hem akım hem gerilim değerlerinde kayıplar gözlemlenmiş ve kısa devre akımındaki (I_{sc}) kayıpların V_{oc} değerlerinden daha fazla olduğu sonucuna varılmış. N719 boyası kullanılan hücrelerdeki kayıplar diğerlerine kıyasla daha düşük olduğu rapor edilmiştir. Verimdeki en çok azalmaya Fe katkılı hücrelerde gözlenmiştir. N719 ile hazırlanan Co ve Zn katkılı fotoanotları katkısız, Fe ve Ni katkılı fotoanotlarına göre daha geniş dalga boyu aralığı göstermişlerdir. Bu durum Co ve Zn katkısının yüzey alanını artırdığı anlamına gelmektedir.

Bhardwaj vd. (2018) TiO_2 yarıiletkenine farklı konsantrasyonlarda Au katkılanması yaparak DSSC'lerin güç dönüşüm verimliliğini önemli ölçüde artırmayı amaçlamışlardır. Elektroforetik biriktirme tekniğinden (EPD) yararlanarak katkıladıkları TiO_2 -Au nanokompozitlerinin oluşumunu XRD,

HRTEM, UV-Vis cihazları ile doğrulamışlardır. Solar simülatör aydınlatma altında ($100\text{mW}/\text{cm}^2$, AM 1.5) DSSC'lerin akım-voltaj özelliklerini ölçtüklerinde güç dönüşüm verimliliğinde önemli ölçüde artış gözlemlenmiştir. Ağırılıkça %25 olan konsantrasyonda I_{sc} değerinin önemli ölçüde arttığını göstermektedir.

Manju ve Jawhar (2018) magnezyum katkılı TiO_2 nanopartiküller üretmek için farklı konsantrasyonlardaki magnezyumu solvotermal mikrodalga ışınlama yöntemini kullanarak üretilen fotoelektrotların fotoelektrik özelliklerini incelemiştir. Üretilen fotoelektrotları XRD, TEM ve UV-Vis cihazları ile karakterize etmişlerdir. $100\text{ mW}/\text{cm}^2$ yapay güneş ışığına maruz bıraktıkları numunelerden en iyi performansı %3.0 mol Mg içeren fotoelektrota sahip DSSC'lerin gösterdiğini rapor etmişlerdir. Bu hücreler %7.36 lık güç dönüşüm verimliliğine ulaşmış ki bu durum saf TiO_2 içeren hücrelerin verimliliğine (%6.26) göre gözle görülür ölçüde artmıştır.

Shalini vd. (2018) alkali metal grubunda yer alan Na metalini farklı oranlarda TiO_2 yarıiletkenine hidrotermal yöntemle sentezleyerek Na katkılı ve katkısız TiO_2 ile elde edilen filmleri DSSC üretiminde kullanmışlar ve metal katkısının hücrelerin performansına olan etkisini araştırmışlardır. Bunun yanında üretilen hücrelerin yapısını ve morfolojisini de incelemiştir. Yaptıkları çalışma sonucunda %6 Na katkılı TiO_2 esaslı filmler ile üretilen DSSC'nin fotoelektrik dönüşüm verimliliği katkısız TiO_2 esaslı filmler ile üretilen DSSC'den %79 daha yüksek verim gösterdiğini rapor etmişlerdir.

Beula vd. (2018) farklı doping konsantrasyonlarına sahip zayıf metal sınıfına ait olan indiyumu (In) metal katkısı için kullanarak In katkılı TiO_2 fotoelektrotlarını sol-jel destekli spin-kaplama yöntemi ile hazırlamışlardır. TiO_2 'de indiyum katkısının etkisini çeşitli cihazlarla incelenmişler ve özelliklerinin DSSC'ler için uygun olduğunu rapor etmişlerdir. Saf TiO_2 elektrodu kullanılan DSSC'ye kıyasla 0.025M In-katkılı TiO_2 elektrodu kullanılan DSSC'lerde % 45 daha fazla (% 2.71) geliştirilmiş verimlilik elde edilmiştir. Uyarılan In-katkılı TiO_2 daha yüksek elektron hareketliliği ve enjeksiyon oranı sağlamış ve bu da daha iyi I_{sc} 'ye yol açarak daha iyi bir verim elde edilmesini sağlamıştır.

Wang vd. (2018) DSSC' ler için hidrotermal yöntemini kullanarak Nb ve Fe katkılı titanyum dioksit nanoyapıları hazırlamış ve çalışma elektrodu olarak değerlendirmesini yapmıştır. Nb ve Fe katkısının eklenmesi verici (donör) yoğunluğunda tuzak aracılı yük geçişinde bir artışa neden olmuştur. Yapay güneş ışınımı altında foto-akım verimini, açık-devre voltajını ve güç dönüşüm verimliliğini etkilediği gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada sahip olduğu üstün özelliklerinin yanında düşük güç dönüşüm verimliliğine sahip olan DSSC'lerin, güç dönüşüm verimliliğini artırmak ve karmaşık yöntemlere nazaran daha basit bir yöntem olan USP yöntemi kullanılarak basit bir hücre üretimi gerçekleştirilmek amaçlanmıştır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

DSSC'lerin verimlerindeki artışı sağlayabilmek için hücre bileşenlerinin her biri önem arz etmektedir. Yapılan çalışmalarda sayısız kimyasal ve malzeme denenmiştir. Bununla birlikte üretim ve karakterizasyon teknikleri geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Bu tez çalışmasında DSSC'lerde yarıiletken olarak kullanılan TiO₂'ye Nb metal katkısı yapılmasının üretilen hücre performansına olan etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. FTO camlar üzerine katkısız ve Nb katkılı TiO₂ kaplanarak 2 farklı numune elde edilmiştir. Kaplama işlemi için USP kaplama tekniğinden yararlanılmıştır. Elde edilen numuneler ile birlikte, önceden tedarik edilmiş olan DSSC'nin ana bileşenleri standart yöntemler ve iyi bilinen malzemeler seçilerek biraraya getirilmiş ve hücre üretimi yapılmıştır. Üretilen TiO₂ filmlerin yapısal, morfolojik ve elektriksel özellikleri incelenmiş ve oluşturulan hücrelerin performansları karşılaştırılmıştır.

3.1. Kullanılan Cihazlar

3.1.1. Glove box

Argon veya azot gibi çok yüksek saflıkta etkisiz atmosferler içinde bulunması gereken maddelerin muhafaza edilmesi ve işlem yapılması için tasarlanmış kapalı bir kutudur (Şekil 3.1). Tedarik edilen kimyasallardan bazıları inert gaz ortamında saklanması gerektiğinden glove box içerisinde tutulmuştur. Solüsyon hazırlanırken atmosferden etkilenmemesi için hazırlama işleminin bir kısmı glove box içerisinde yapılmıştır. Bu aşamada Süleyman Demirel Üniversitesi, YETEM-Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi Enerji Teknolojisi Birimi'nde bulunan Glove box cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3.1. MBRAUN LABstar Glove Box cihazı

3.1.2. Kül fırını

Üretilen filmlerin tavalama işlemi için, Süleyman Demirel Üniversitesi, YETEM-Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi Enerji Teknolojisi Birimi'nde bulunan ve Şekil 3.2'de gösterilen Protherm marka kül fırını kullanılmıştır. Ani sıcaklık değişimlerinin yapısal bozukluklara neden olmaması için sıcaklık kontrolü aşama aşama ve süre tutularak gerçekleştirilmiştir. Her bir sıcaklık artırma adımında 1'er dakika bekleme yapılarak numunelerin sıcaklık değişimine adapte olması beklenmiştir.



Şekil 3.2. Protherm kül fırını

3.1.3. Ultrasonik sprey piroliz

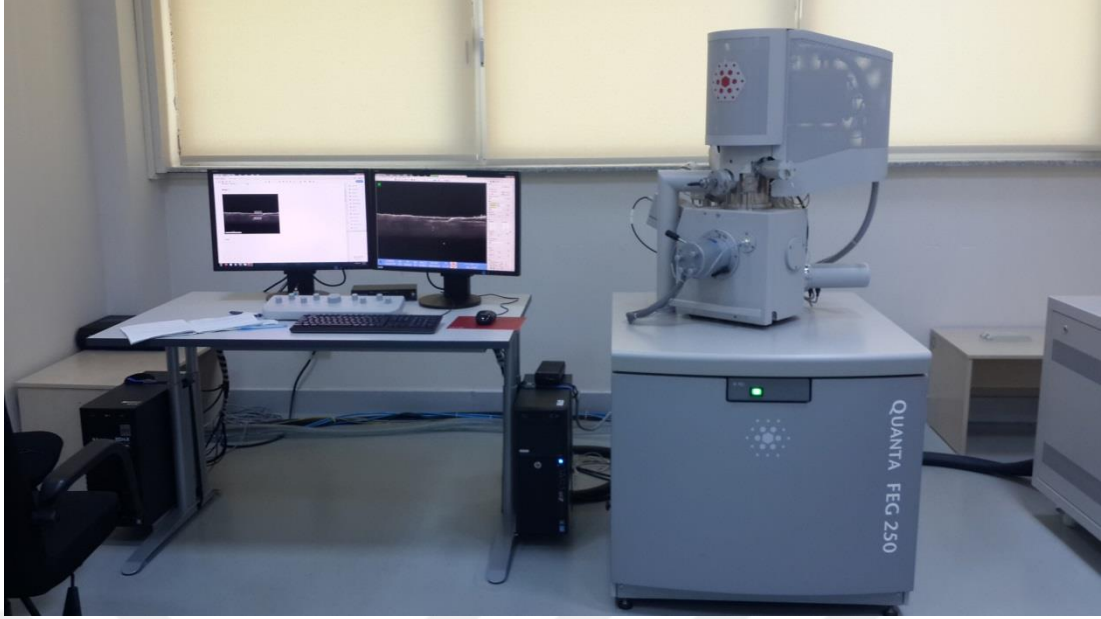
USP, hazırlanan öncül çözeltinin, önceden belirlenen ve değiştirilmesi mümkün olan parametrelerin set edilerek, önceden ısıtılmış bir alttaş yüzeyine nozül tarafından atomize edilip gönderilmesiyle gerçekleştirilen basit ve kolay bir kaplama yöntemidir. Değiştirilebilen işlem parametreleri sayesinde üretilen filmler veya nanopartiküller üzerinde değişiklikler yapılabilmektedir. Bu işlem parametreleri; çözelti konsantrasyonu, yüzey sıcaklığı, biriktirme sıcaklığı, ultrasonik frekans, nozül mesafesi, hava basıncı, püskürtme süresi ve akış hızıdır. USP, kolay ölçeklendirme, doğru katman oluşum kontrolü, yüksek üretim verimi ve katılanan elemanların kolay tanıtılması gibi birçok avantaj sunar (Edinger vd., 2015). Bu çalışmada USP için belirlenen parametre değerleri literatürdeki yapılan çalışmalar dikkate alınmıştır. Seçilen cam alttaşlara kaplama işleminde Süleyman Demirel Üniversitesi, YETEM-Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi Enerji Teknolojisi Birimi'nde bulunan SONO-TEK Flexi Coat marka USP cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. SONO-TEK Flexi Coat USP cihazı

3.1.4. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

Taramalı elektron mikroskobu (SEM), incelenecek olan malzeme yüzeyini tarayarak yüzeyin yapısal özellikleri hakkında bilgi veren, yüksek çözünürlükte yüksek büyütme ile görüntü sağlayan cihazdır. Görüntülerin sağlanması için yüksek enerjili elektron demetlerinden yararlanır. Yüzeğe gönderilen elektron demetleri yüzeyi tarayarak görüntü elde eder. Özellikle katı malzemelerin karakterizasyonunda kullanılan SEM cihazı birçok farklı alanda kullanılabilir. Bu çalışmada elde edilen TiO_2 filmlerin yapısal özelliklerinin analizi için Süleyman Demirel Üniversitesi YETEM-Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi Enerji Teknolojisi Birimi'nde bulunan FEI Quanta FEG 250 SEM cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. FEI Quanta FEG 250 SEM cihazı

3.1.5. X-ışını kırım cihazı (XRD)

Kristallerin her biri tıpkı insanların parmak izinde olduğu gibi kendine özgü atomik dizilimlere sahiptir. X-ışını kırınım yöntemi, kristallerin yüzeyine gönderilen eşit veya daha yüksek dalga boylu ışınlar verdiği yanıtı göre bir profil oluşturarak numuneyi tanımlar. Bu cihaz ile birçok malzemenin (sıvı, toz, kristal ve ince film halindeki) kristal yapısı incelenebilir.

Kristal katıların yapısıyla ilgili bilgiler incelenirken görünür ışıktan yararlanılamaz. Bunun nedeni görünür ışığın dalga boyunun incelenen kristalin atom ve molekülleri arasındaki boşlukların dalgaboyundan büyük olmasıdır. Bu nedenle kristalin içindeki boşlukların dalgaboyuna eşit veya daha büyük dalgaboyuna sahip olan X-ışınları kullanılarak malzemenin atomik ve moleküler yapısı incelenebilir (Sönmezoğlu, 2010). Bu çalışmada üretilen numunelerin kristal yapısını incelemek için Süleyman Demirel Üniversitesi, YETEM-Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi Enerji Teknolojisi Birimi'nde bulunan Bruker D8 Advance Twin XRD cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Bruker D8 Advance Twin-Twin XRD cihazı

3.1.6. Elektro-Optik Karakterizasyon cihazı

DC direnç ölçümleri için Süleyman Demirel Üniversitesi, YETEM-Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi Enerji Teknolojisi Birimi Elektro-Optik Karakterizasyon Laboratuvarında bulunan Keithley cihazı kullanılmıştır.

3.2. Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada kullanılan kimyasallar ve diğer malzemeler özellikleri ile birlikte aşağıdaki çizelgede verilmiştir (Çizelge 3.1).

Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan malzemeler, özellikleri ve kullanım amaçları

Malzeme	Özellikler	Kullanım Amacı
Titanium (IV) isopropoxide (Titanyum tetra izopropoksit) $Ti[OCH(CH_3)_2]_4$ Sigma Aldrich	%97 Ma= 284.22 g/mol d=0.96 g/mL Sıvı	Öncül malzeme

Niobium (V) ethoxide (Niobyum penta etoksit) $Nb(OCH_2CH_3)_5$ Sigma Aldrich	%99.95 Ma=318.21 g/mol d=1.268 g/mL Sıvı	Metal katkısı
Z907 cis-Bis(isothiocyanato)(2,2'- bipyridyl-4,4'- dicarboxylato)(4,4'-di- nonyl-2'- bipyridyl)ruthenium(II) Sigma Aldrich	%95 Ma= 870.10 g/mol Toz	Duyarlaştırıcı boya malzemesi
Acetonitrile (Asetonitril) Merck	Ma= 41.05 g/mol	Boya çözeltisi için çözgen
Iodine/triiodide (iyodür/triiyodür) Solaronix	50 mM	Redoks çifti
1-propanol (Propanol) C_3H_8O Tekkim	%99.9 Ma=60.10 g/mol d=0.804 g/mol (25°C'de)	Öncül solüsyon için çözücü
Glacial Acetic Acid (Glasial asetik asit) CH_3COOH Merck	%100 Ma=60.05 g/mol	Reaksiyonun tamamlanması için
Destile (saf) su H_2O Tekkim	Ma= 18.02 g/mol	Temizleme işlemi için
FTO cam (Florin katkılı kalay oksit, $SnO_2:F$) Solaronix	15 ohm/sq 2.2mm	Çalışma elektrodu hazırlamak için
Platinum kaplı cam Fytronix	15 ohm/sq 2.2mm	Karşıit elektrot olarak

3.3. Altaşların Hazırlanması

Kaplama işleminde kullanılacak iletken camların temiz ve homojen olması üretilen filmlerin özelliklerine ve kaplama kalitesine önemli derecede etki etmektedir. Bu nedenle kaliteli bir üretim gerçekleştirebilmek adına altaş temizliğinin son derece dikkatli ve büyük titizlikle yapılması gerekir. Bunun dışında seçilen altaş malzeme belirlenen sıcaklığa dayanıklı olmalıdır. Bu çalışmada, Solaronix'ten 10 cm x 10 cm x 0.22 cm ebatlarında temin edilen FTO

kaplı camlar kullanıldı. Temizleme işleminden önce camlar, iletken kısmına zarar gelmeyecek şekilde, elmas uçlu cam kesme aleti ile kesildi ve 2 cm x 2 cm x 0.22 cm ebatlarında alttaş numuneler elde edildi. Elde edilen alttaşların her iki yüzeyi de, sırasıyla deterjanlı su, toluen, izopropanol, etanol ve aseton ile yıkandı ve her bir yıkama işleminden sonra camlar saf su ile durularak azot gazı ile kurutuldu (Şekil 3.6). Son işlem olarak etanol içine bırakıldı ve USP cihazı hazır hale gelene kadar bekletildi. Kaplama işlemine başlanacağı zaman azot gazı ile kurutularak hazır hale getirildi.



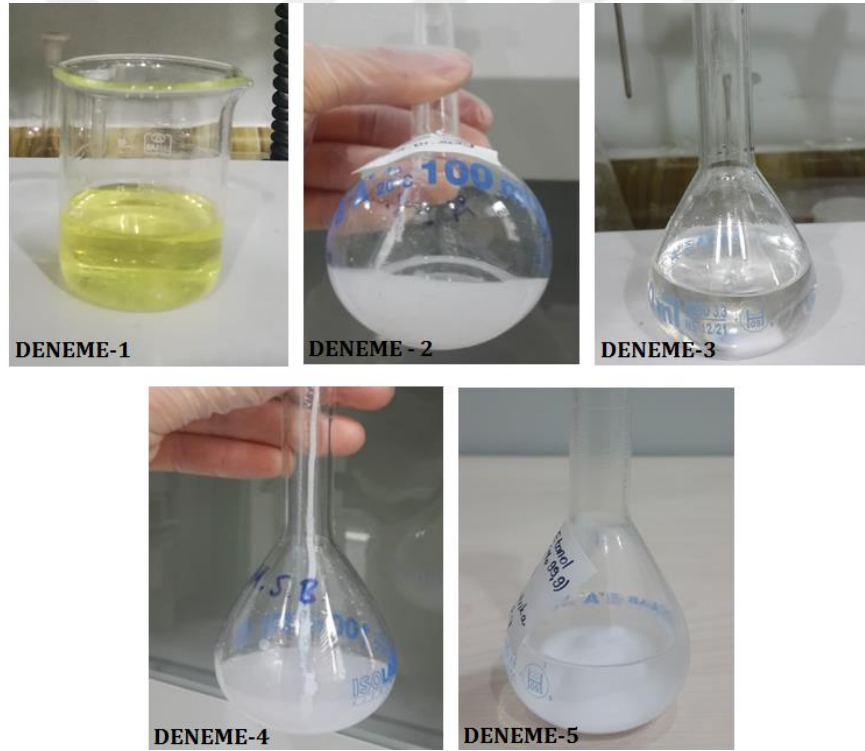
Şekil 3.6. Alttaş temizleme işleminde kullanılan malzemeler

3.4. Katkısız ve Nb Katkılı Öncül Çözeltilerinin Hazırlanması

Öncül solüston için öncül malzeme seçimi solüsyon bazlı üretim tekniklerinde büyük önem arz etmektedir. Öncül çözelti, elde edilen filmin yapısal ve optik özelliklerini direkt olarak etkilemektedir. (Bayram, 2018). Bu çalışmada öncül olarak titanyum (IV) izopropoksit kullanılmıştır. TiO_2 öncül çözeltisinin eldesi için öncül malzeme olarak birçok çalışmada farklı kimyasallar kullanılmıştır. Kullanılan öncül malzemelerinden bazıları; titanyum (IV) butoksit (Khan, 2017), titanyum tetra klorür (Taziwa, 2017), titanyum asetil asetonat (Arunachalam, 2016) ve titanyum izopropoksit (Shalini vd., 2018)'tir.

Öncül çözeltinin hazırlanması sürecinde farklı çözelti ve asitler ile denemeler yapılarak istenilen özellikte solüsyon eldesi yapıldı. Deneme-1'de öncül malzeme 1-propanol ve bir miktar asetik asit (%80) ile yapıldı. Oluşan çözelti

şeffaf ve sarı renteydi. Elde edilen ilk çözeltide çökelti meydana geldi. Bunun sebebi olarak titanyum (IV) izopropoksit malzemesinin su ile reaksiyona girmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Deneme-2’de asit miktarı azaltılarak yapıldı ancak çözeltide çökelek meydana geldi. Deneme-3’de etanole (%99.9) az miktarda asit eklenerek öncül malzeme ile karıştırıldı. Oluşan çözelti renksiz ve şeffaftı ancak istenen özellikte film oluşturmadı. Deneme-4’de etanol (% 99.9) içerisine öncül malzeme eklenerek asitsiz bir çözelti hazırlandı ve çözelti bir süre sonra bulanıklaştı. Deneme-5’de deneme-4’ten farklı olarak asit eklenerek hazırlandı ve yarım saat sonra çökelti oluştu. Yapılan farklı özellikteki çözeltilerin görseli Şekil 3.7.’de görülmektedir. Çözeltilerin her biri 0.5 M konsantrasyonda hazırlandı.



Öncül malzemenin suya olan hassasiyetinden dolayı kullanılan malzemelerin ve eklenecek olan kimyasalların susuz olmasına özen gösterildi ve ortamın nem seviyesi de dikkate alındı. Deneme-6’da öncül çözelti konsantrasyonu 0.5 M olarak alındı. İlk olarak 1-propanol (%99.5) içerisine çok az miktarda glasiyal asetik asit (%100) eklendi. Karışıma asit eklemedeki amaç tutuculuğu artırmak ve tepkimenin tamamlanmasını sağlamaktır. Daha sonra titanyum (IV)

izopropoksit, glasiyal asetik asit (%100) eklenmiş olan 1-propanol (%99.5) içerisinde yavaşça ve dikkatli bir şekilde katılarak çözdürüldü. Hava ile temasını önlemek için içerisinde azot gazı basılarak ağzı parafilm ile iyice kapatıldı ve manyetik karıştırıcıda yaklaşık 1 saat karıştırıldı (Şekil 3.8). Karışma esnasında herhangi bir çökelti oluşmadığı için referans çözelti olarak kullanıldı.



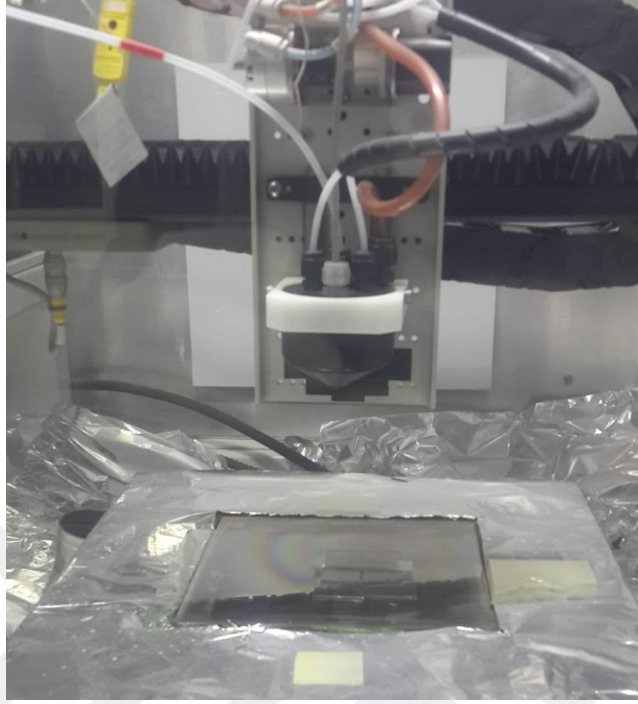
Şekil 3.8. Referans alınan çözelti (Deneme-6)

Nb katkısı için Nb/Ti molar oranı 0.03 alındı. Nb kaynağı olarak niobyum (V) etoksit kullanıldı. Referans olarak alınan çözelti prosedürüne uygun bir çözelti hazırlandı. Hazırlanan çözelti ve Nb öncülü glove box içerisinde alındı. Nb öncülü hazır haldeki Ti çözeltisine yavaşça ve dikkatli bir şekilde ilave edildi ve ağzı iyice kapatıldı. Nb katkısı yapıldıktan sonra glove box'tan çıkarılarak manyetik karıştırıcıda yaklaşık 1 saat karıştırıldı ve hazır hale getirildi.

3.5. Alttaşlar Üzerine Katkısız ve Nb katkılı TiO₂ Kaplanması

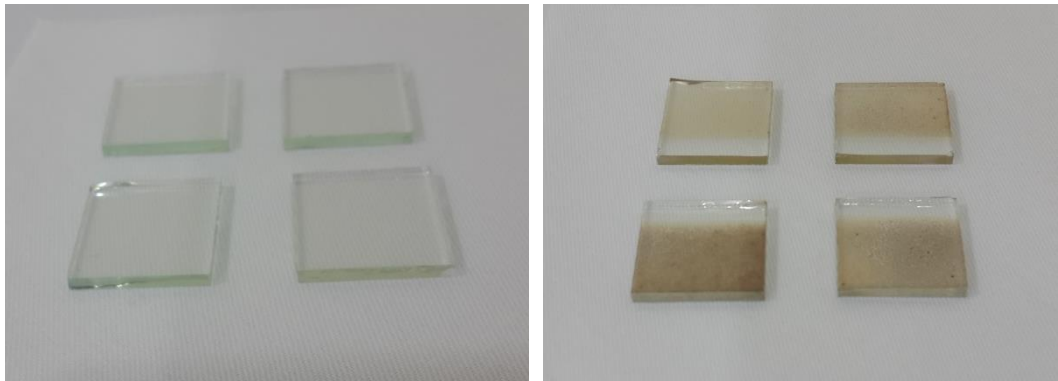
Filmlerin USP cihazında kaplanabilmesi ve cihaza zarar vermemesi için öncül çözeltinin homojen bir yapıda olması gerekir. Elde edilen homojen çözeltiler ve önceden kesilip temizlenen 2x2 cm² alana sahip FTO camlar USP cihazı içerisinde yerleştirildi (Şekil 3.9). USP için gerekli parametreler literatür incelenerek belirlendi ve optimize edildi. Cihazın nozül frekansı 120 kHz, nozül masafesi 10 cm, hava basıncı 2.5 psi ve akış hızı 0.2 ml/dk olarak ayarlandı. Öncül çözelti sisteme konulmadan önce sistemdeki kirliliği almak için 1-propanolden geçirildi. Hazırlanan öncül çözelti sisteme eklenerek, sıcaklığı 275 °C'ye getirilen

camlar üzerine 11 pas geçiş ile biriktirildi. FTO camlar üzerine, USP yöntemi ile başarılı bir şekilde biriktirildi.



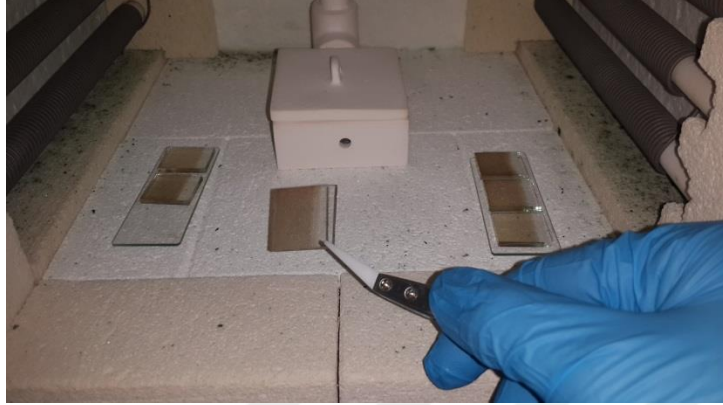
şekil 3.9. Filmlerin USP cihazında kaplanması

şekil 3.10.'da FTO camların kaplamadan önceki ve kaplamadan sonraki durumları görülmektedir. Kaplama yapılan filmler kahverengimsi bir renkte oluşmuştur.



şekil 3.10. FTO camların kaplama yapılmadan önceki (soldaki) ve sonraki (sağdaki) görüntüleri

Filmlerin tavlama için kül fırını kullanılmıştır (Şekil 3.11). Tavlama kademe kademe 50 °C aralıklarla artırılarak yapıldı. Sıcaklık 500 °C'ye çıkarıldı ve filmler 40 dk tavlandı. Tavlama işleminden sonra filmler soğumaya bırakıldı.

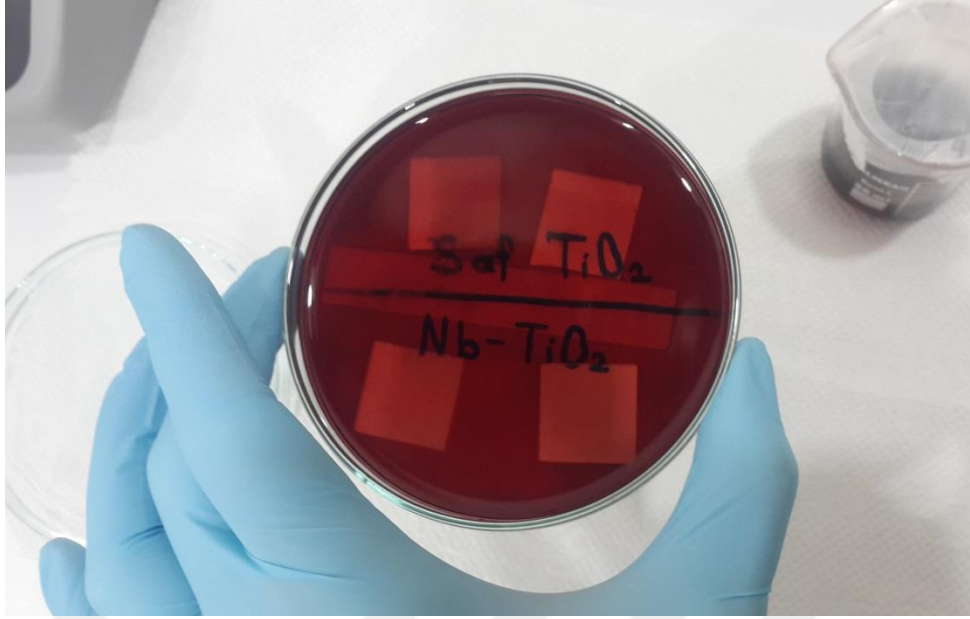


Şekil 3.11. Tavlama yapmak için kül fırınına yerleştirilen kaplama yapılan FTO camlar

3.6. Duyarlaştırıcı Boyanın Hazırlanması

Bir TiO_2 yüzeyi üzerinde oluşan boya molekülü, boyaya duyarlaştırılmış güneş pillerinde önemli bileşenlerden biridir. Genellikle bir çözücüden boya molekülleri adsorbe edilerek oluşturulur. Boya tabakası mümkün olduğu kadar güneş ışığını emmeli ve ışığı TiO_2 iletim bandına enjekte edilen fotoelektronlara dönüştürmelidir (Gusak vd., 2014).

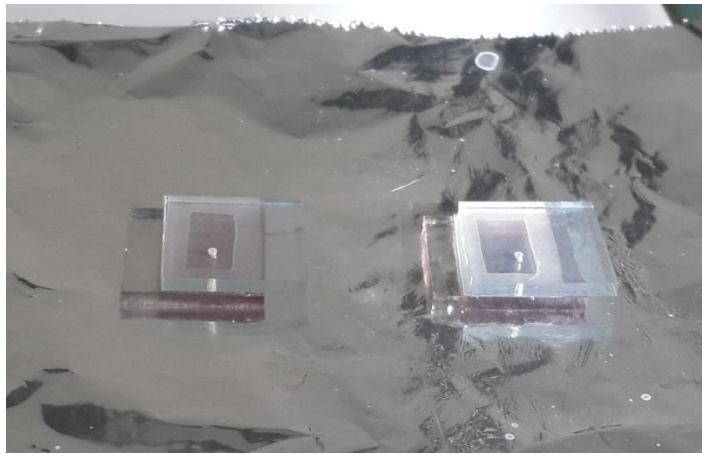
Bu çalışmada ticari olarak Sigma Aldrich'ten tedarik edilen Z907 rutenyum boya 0.6 mM konsantrasyonunda 50ml'lik asetonytril çözücü içerisinde çözündürülerek hazırlandı. TiO_2 kaplı FTO camlar hazırlanan boya çözeltisine konarak boyanın adsorblanması için 66 saat boyunca boya çözeltisi içerisinde bekletildi. Şekil 3.12.'de boya çözeltisinde bekletilen katkısız ve Nb katkılı FTO cam alttaşlar görülmektedir. Daha sonra cam alttaşların yüzeyi üzerinde fiziksel olarak adsorbe edilmeyen boyayı çıkarmak amacıyla camlar asetonytril ile durulandı ve kurumaya bırakıldı.



Şekil 3.12. Boya çözeltisine konan katkısız ve Nb katkılı FTO cam altaşlar

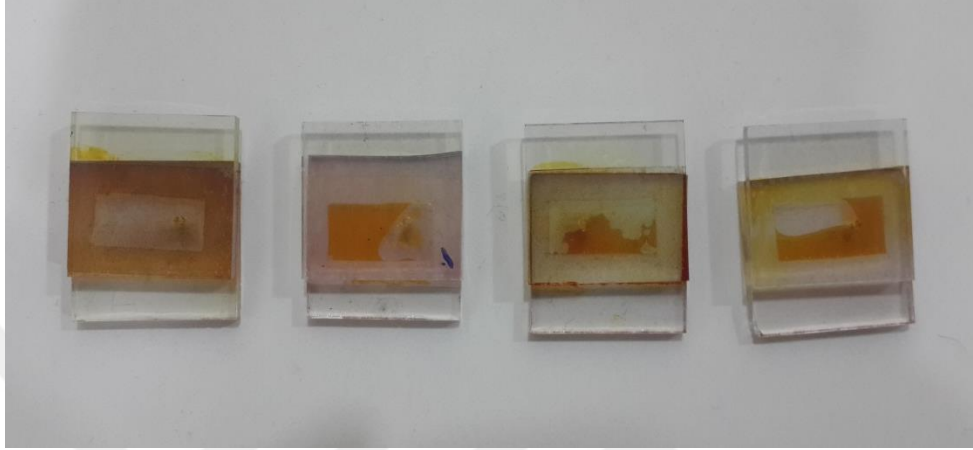
3.7. DSSC'lerin Üretimi

USP yöntemi ile kaplanan saf ve Nb katkılı TiO_2 FTO cam elektrotlar çalışma elektrodu olarak kullanıldı. Fytronix şirketinden ticari olarak satın alınan 2 cm x 2 cm x 0.22 cm ebatlarında ve elektrot eklemesi yapılması için delinmiş olan Pt kaplı FTO camlar karşıt elektrot olarak kullanıldı. Tavlama yapılmamış olan Pt kaplı FTO camlar temizlenerek 450°C'de 30 dakika tavlama yapıldı ve sonra soğumaya bırakıldı. Çalışma elektrodu ile karşıt elektrodu birleştirmek için iki cam arasına parafilm konularak ısıtıldı ve birleştirildi (Şekil 3.13).



Şekil 3.13. Arasına parafilm konulan FTO camların ısıtılarak birleştirilmesi

Hücreyi birarada tutmayı sağlayan parafilm aynı zamanda elektrolit enjekte edebilmek için boşluk oluşturmaktadır. Birleştirilen camlar arasına önceden delinen delikten Solaronix şirketinden hazır alınan sıvı elektrolit (I^-/I_3^-) enjekte edildi ve delik uygun bir şekilde kapatılarak DSSC oluşturuldu. Farklı Nb oranları ile hazırlanan 3 ayrı numuneden ayrı ayrı DSSC elde edildi (Şekil 3.14).



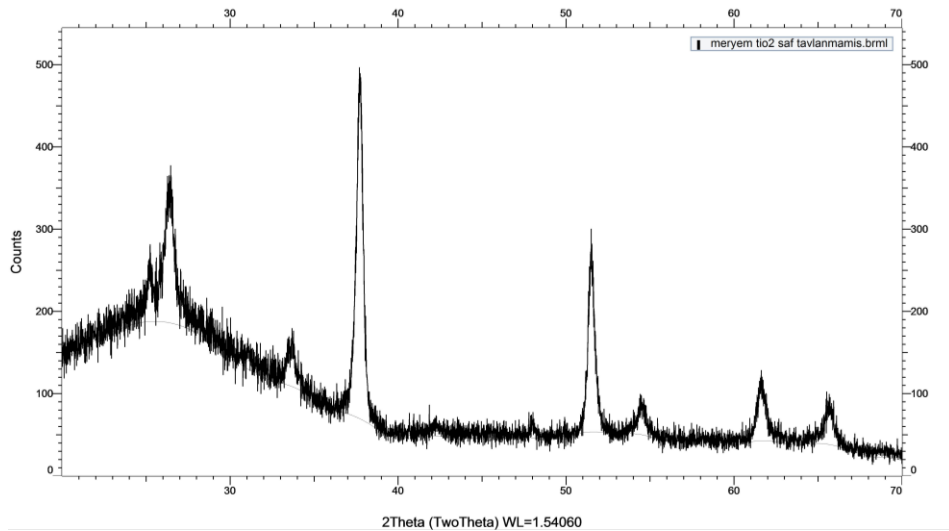
Şekil 3.14. Üretilen katkısız ve Nb katkılı DSSC'ler

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. XRD Analizi

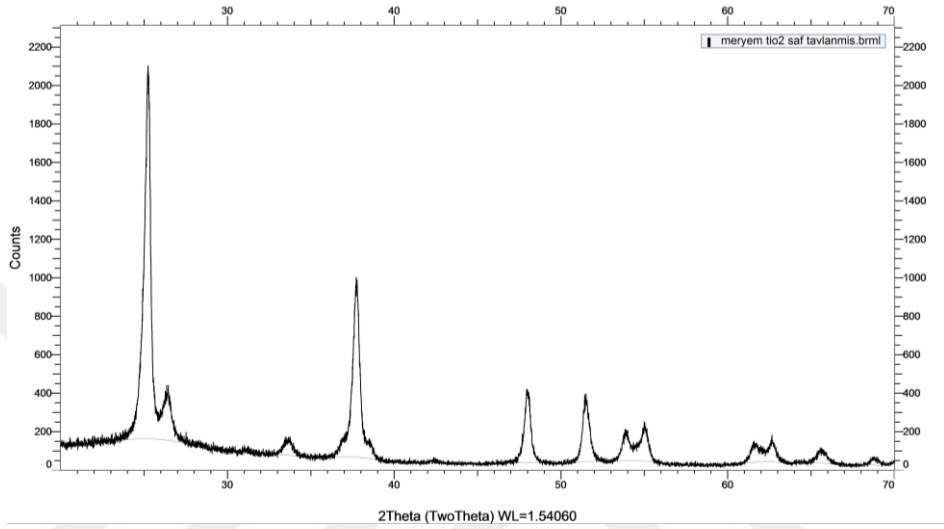
USP yöntemi ile üretilen güneş hücresi yapımında çalışma elektrodu olarak kullanılan cam alttaşların kristal yapıda olup olmadıkları XRD cihazı ile kontrol edilmiştir. Tavlama işleminin kontrolü ile farklı şiddet ve genişliklere sahip pikler elde edilebilmektedir. Tavlama sıcaklığının artırılmasıyla kristal yapıda iyileşme sağlanabilmektedir. Bununla birlikte TiO₂ ince filmlere eklenen asit ile yapıdaki kristallenme artırılabilir (Bayram, 2018).

Tavlama işlemi yapılmayan numunelerin XRD grafiklerinde (Şekil 4.1) FTO malzemesine ait piklerin yanında TiO₂ ile ilgili pikler gözükse de, kristal yapının tam oluşmadığı (amorf yapıda olduğu) gözlemlenmiştir. JCPDS veritabanındaki TiO₂ anataz yapıya ait XRD pikleri; 24.8°, 37.3°, 47.6°, 53.5°, 55.1°, ve 62.2'dir. Bunlar XRD grafiğinde (101), (004), (200), (105), (211) ve (204) kristal düzlemlerine karşılık gelir. Şekil 4.1.'de de görüldüğü üzere tavlansız filmlerin XRD analizinde görülen pikler standart anataz pikleri ile örtüşse de kristallenme tam olmadığı için yoğun bir kristal sinyali oluşturamamışlardır.



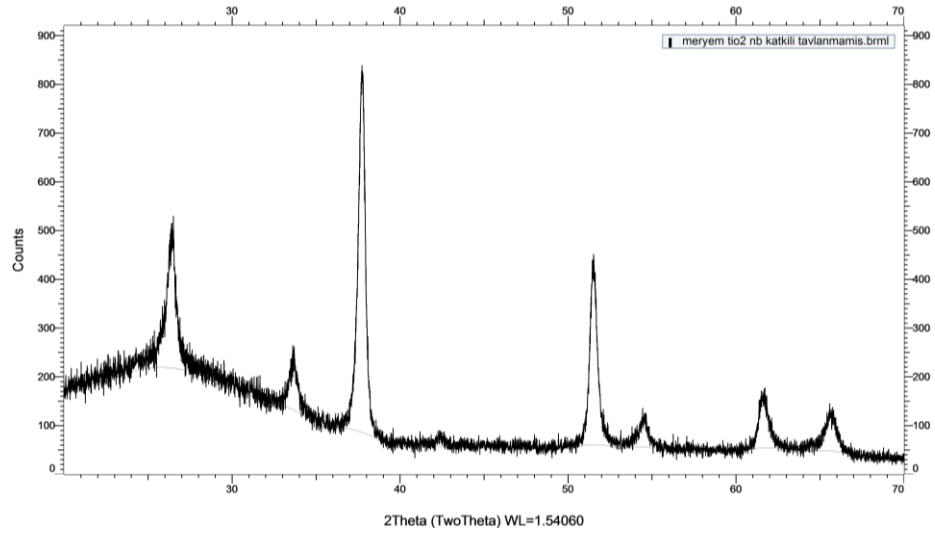
Şekil 4.1. Tavlama yapılmamış katkısız TiO₂ ile kaplı FTO camın XRD grafiği

Şekil 4.2.'de 500°C'de 40 dakika boyunca tavllanmış olan katkısız TiO₂ ile kaplanmış FTO camın XRD grafiği görülmektedir. Tavlama ile TiO₂'ye ait pik şiddetlerinin arttığı ve kristallenmenin belirginleşmesi ile daha düzenli bir kristal yapı oluştuğu görülmüştür. Oluşan pikler, JCPDS veritabanındaki 21-1272 kart numaralı TiO₂'in anataz fazına ait standart pikler ile birebir uyumludur.



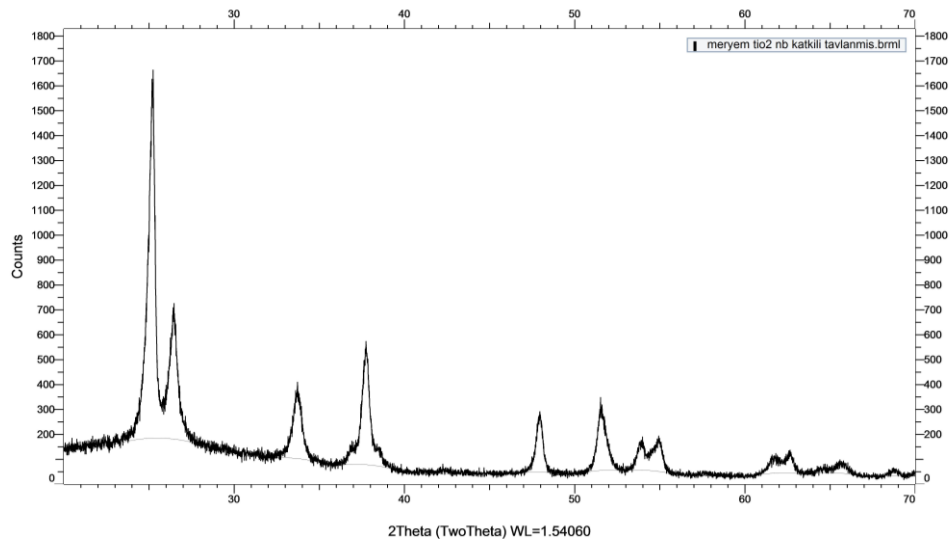
Şekil 4.2. 500°C'de tavllanmış katkısız TiO₂ ile kaplı FTO camın XRD grafiği

Şekil 4.3.'de tavlama yapılmamış Nb katkılı TiO₂ ile kaplanmış FTO cam altaşın XRD grafiği gösterilmektedir. Grafikten de görüldüğü üzere kristal yapı tam olarak oluşmamıştır. Oluşan pikler standart piklerle tam anlamıyla uyuşmamaktadır. Ancak tavlama yapılmamış katkısız TiO₂ ile kaplı FTO cam altaşın XRD sonucuna kıyasla pik şiddetleri artmış ve oluşan pikler belirginleşmiştir.



Şekil 4.3. Tavlama yapılmamış Nb katkılı TiO₂ ile kaplı FTO cam alttaşın XRD grafiği

Şekil 4.4.'de Nb katkısının etkisiyle 500°C'de 40 dakika boyunca tavllanmış Nb katkılı TiO₂ filmlerin XRD grafiğindeki pik şiddetleri artmış ve piklerin 500°C'de tavllanmış katkısız TiO₂ filmlere ait XRD pikleri ile kıyaslanabilir mertebede olduğu görülmüştür. XRD sonuçları, USP film kaplama yöntemi kullanılarak FTO cam alttaş üzerine Nb katkılı TiO₂'nin başarılı bir şekilde kaplandığını göstermektedir.

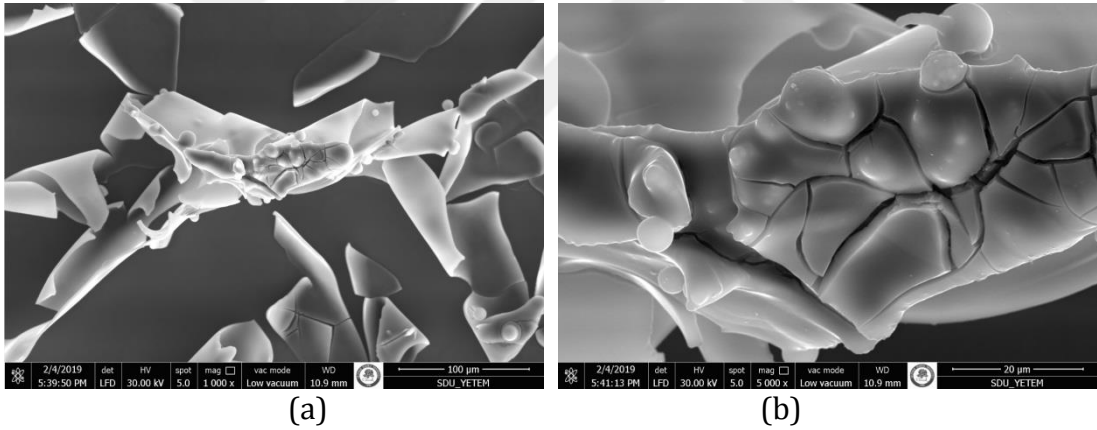


Şekil 4.4. 500°C'de tavllanmış Nb katkılı TiO₂ ile kaplı FTO cam alttaşın XRD grafiği

XRD sonuçlarından yola çıkarak tavlamanın pik şiddetini artırdığı ve kristal yapıyı geliştirdiği sonucuna varılmaktadır. Buna ek olarak katkılanan Nb'nin de olumsuz bir etki oluşturmadığı sonucuna varılmıştır.

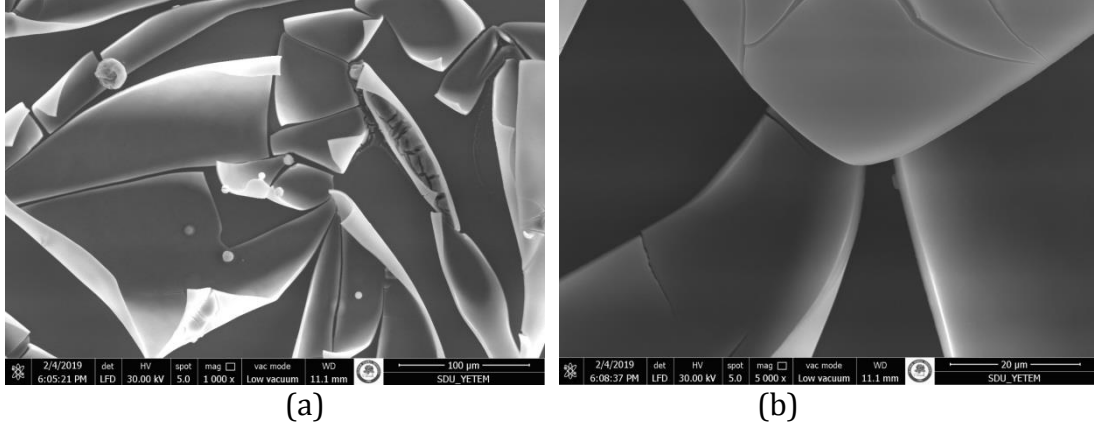
4.2. SEM Sonuçları

USP yöntemi ile üretilen katkısız ve Nb katkılı TiO₂ ince filmlerin yüzey morfolojileri taramalı elektron mikroskobu kullanılarak incelenmiştir. Farklı büyütme oranlarında incelenen tavlama yapılmamış katkısız TiO₂ ince filmin görüntüleri Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da görülmektedir. Şekil 4.5'de yer alan 500°C 'de tavllanmış katkısız TiO₂ ince filmin yüzey görüntüsünün çatlaklardan meydana geldiği, pürüzlü bir yapıda olduğu, yüzeye tutunduğu ve film yüzeyinde aglomerleşmelerin olduğu görülmektedir. EDS elementel analizi ile kaplamanın başarılı bir şekilde gerçekleştiği desteklenmiştir.



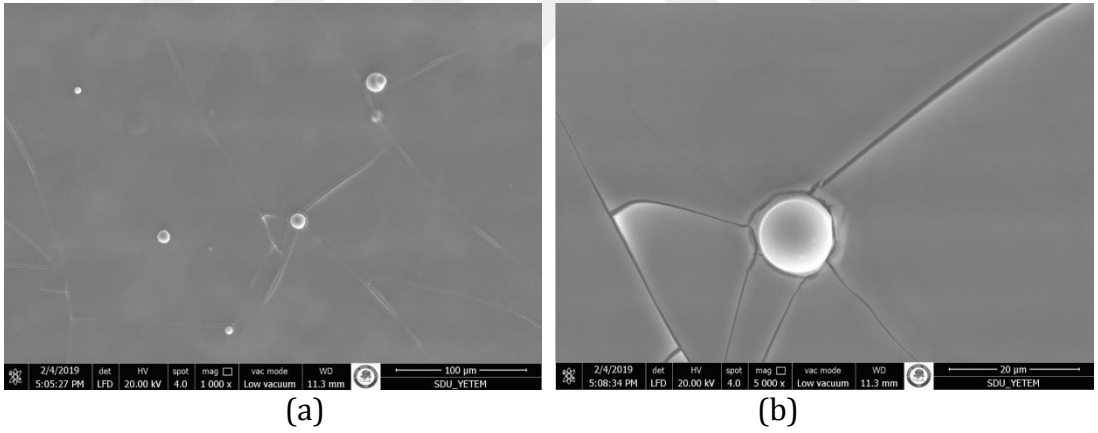
Şekil 4.5. Tavlama yapılmamış katkısız TiO₂ ince filmin (a) 100 µm skalalı, (b) numunelerin SEM görüntüleri

500°C'de tavlanan katkısız TiO₂ ince filminin SEM görüntüsü Şekil 4.6'da görülmektedir. Tavlama yapılmaya katkısız TiO₂ ince filmlere kıyasla yüzeydeki çatlaklarda ve aglomerleşmede azalma görülmüştür.



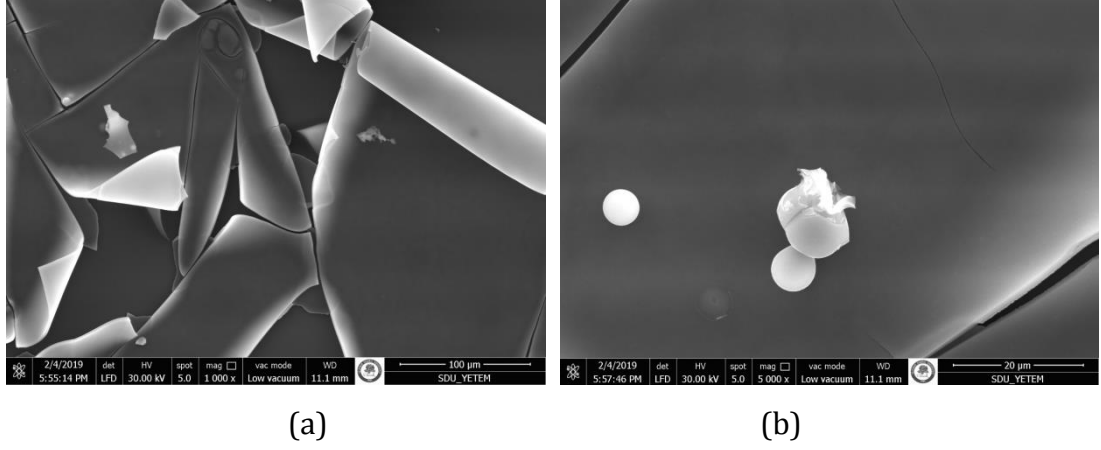
Şekil 4.6. 500°C 'de tavllanmış katkısız TiO₂ ince filmin (a) 100 µm skalalı ve (b) 20 µm skalalı numunelerin SEM görüntüleri

Şekil 4.7'da 500°C 'de tavllanmış Nb katkılı TiO₂ ince filmin (a) 200 µm skalalı, (b) 100 µm skalalı (c) 50 µm skalalı ve (d) 20 µm skalalı numunelerin SEM görüntüleri verilmiştir. Elde edilen filmlerin yüzeyinde katkısız numunelere göre daha homojen bir yapı görülmektedir. Bununla birlikte yüzeyde aglomerleşmeler olduğu görülmektedir.



Şekil 4.7. Tavlama yapılmamış Nb katkılı TiO₂ ince filmin (a) 100 µm skalalı ve (b) 20 µm skalalı numunelerin SEM görüntüleri

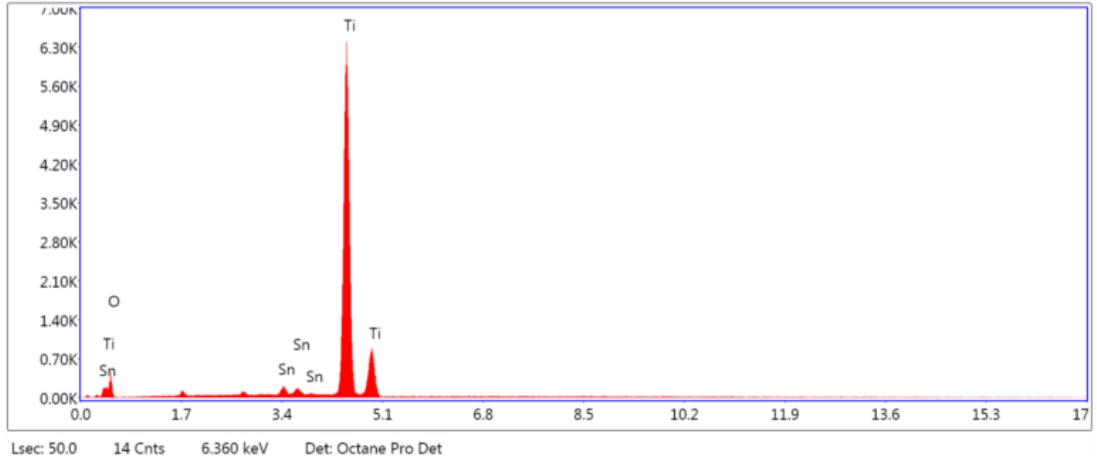
Şekil 4.8.'de ise tavllanmış Nb Katkılı TiO₂ ince filmin tavlamanın etkisiyle yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmektedir. Tavllanmış katkısız TiO₂ ince filmine kıyasla yüzeydeki pürüzlülük biraz daha azdır. Bununla birlikte yüzeydeki pürüzlülük boya emilimi açısından önemlidir. Ancak optimum düzeyde olması gerekir.



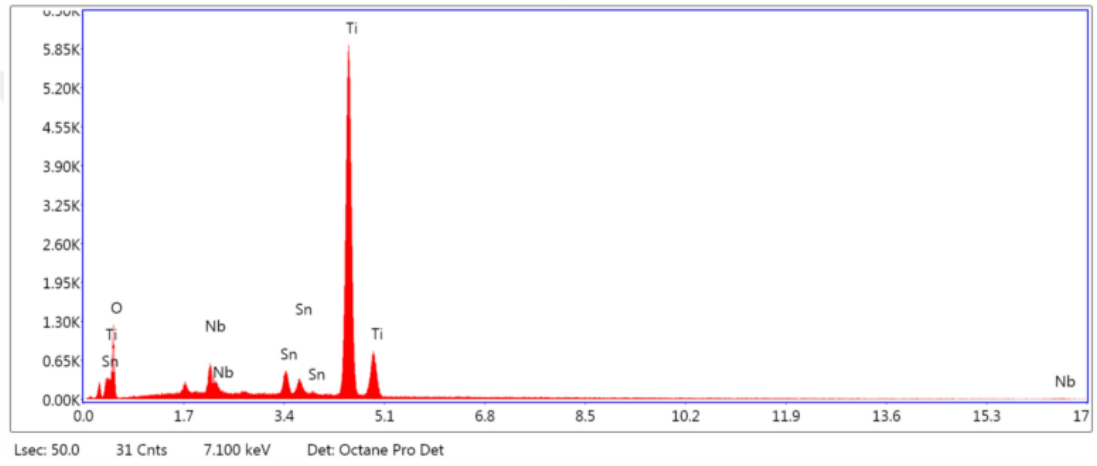
Şekil 4.8. 500°C 'de tavllanmış Nb katkılı TiO₂ ince filmin (a) 100 µm skalalı ve (b) 20 µm skalalı numunelerin SEM görüntüleri

SEM analizinin sonucunda tavlama işleminin yapıdaki çatlak ve aglomerasyona iyi geldiği görülmüştür. Nb katkılı filmlerde daha homojen bir yapı oluştuğu ve 500°C tavlama ile birlikte pürüzlülüğün arttığı gözlemlenmiştir.

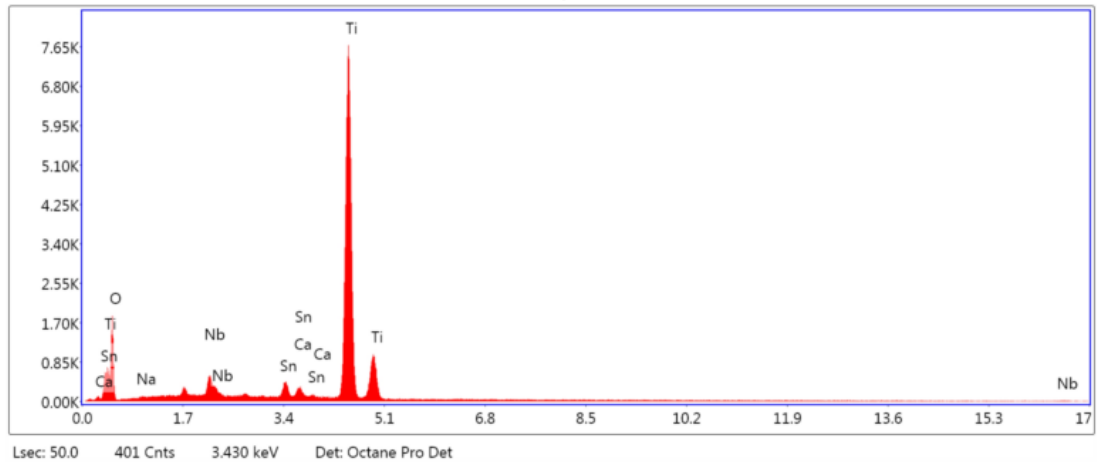
Şekil 4.9'da katkısız tavlınmamış, Nb katkılı tavlınmamış ve Nb katkılı tavlınmış TiO₂ ince filmlerin elementel analiz sonuçlarının görselleri bulunmaktadır. Şekil 4.9.(a)'da katkısız tavlınmamış TiO₂ 'nin içeriğinde O,Sn ve Ti pikleri görülmüştür. Sn ve O pikleri kullanılan alttaş malzemeden kaynaklanmaktadır. Ti'nin atomik oranının %34.31 olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.9. (b)'de Nb katkılı tavlınmamış TiO₂ ince filminin içeriğindeki Nb piklerinin oranı %1.07 olarak tespit edilmiştir. Ti piki ise %20.40 oranındadır ve diğer element pikleri alttaş malzemenin yapısından gelmektedir. Şekil 4.9 (c)'de tavlınmış Nb katkılı filmlerin EDS analiz sonucunda %0.74 oranında Nb elementi, %18.58 oranında da Ti elementinin olduğu görülmektedir. Analiz sonucunda çıkan diğer elementler kullanılan alttaş malzemenin yapısından gelmektedir.



(a)



(b)

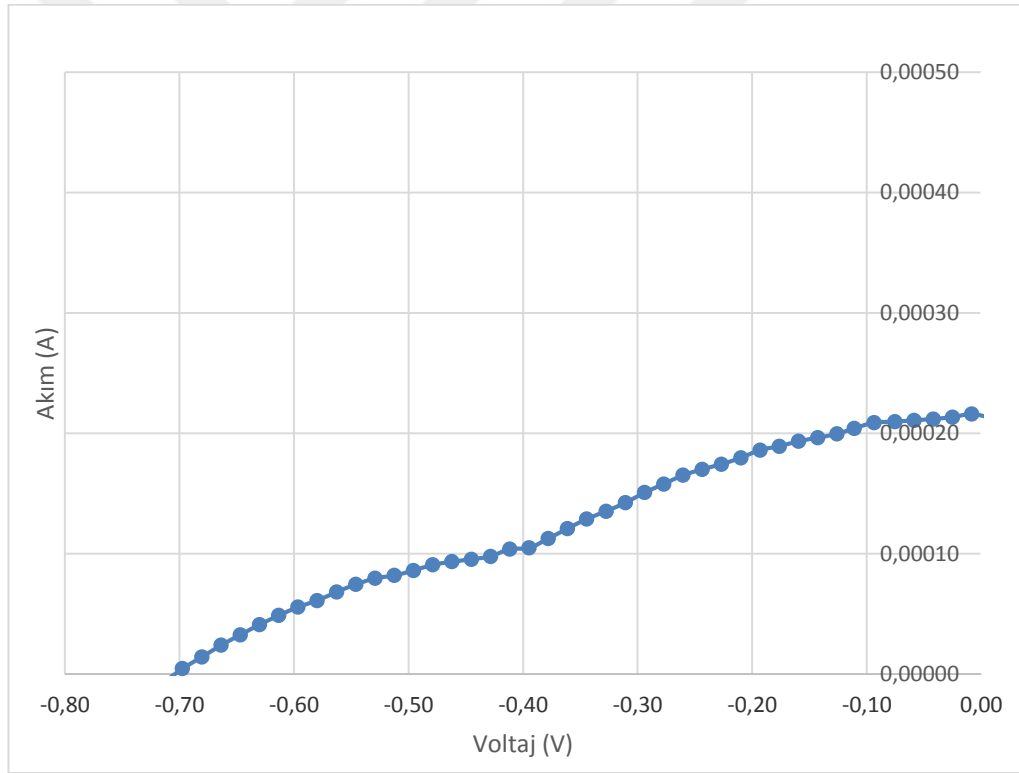


(c)

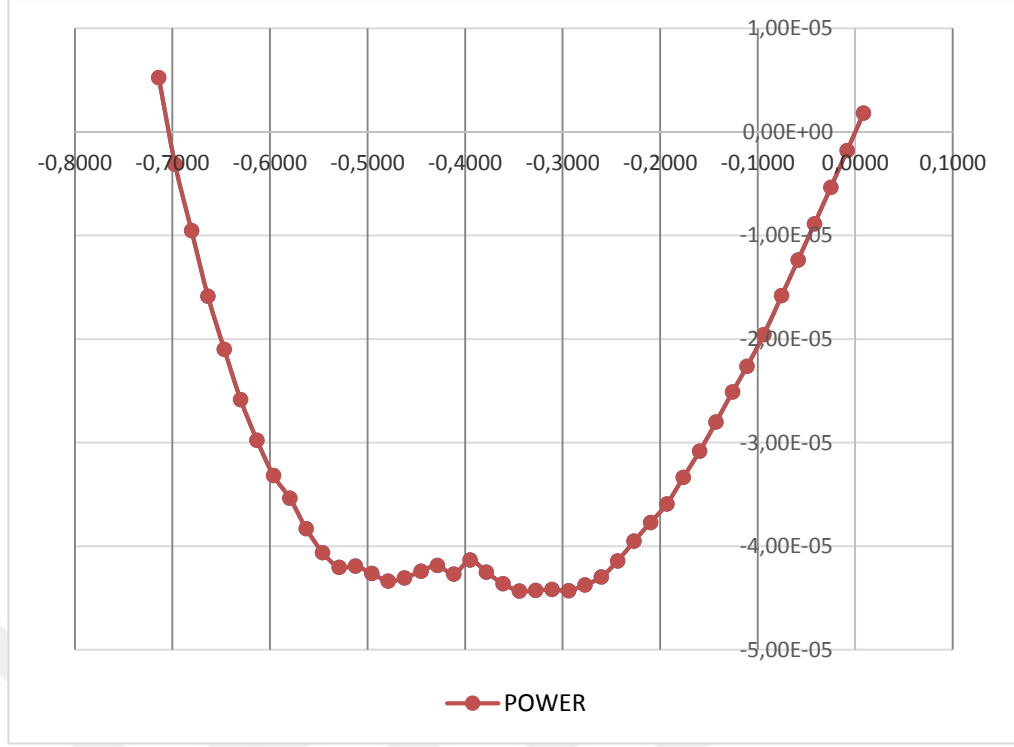
Şekil 4.9. (a) Katkısız tavlınmamış, (b) Nb katkılı tavlınmamış ve (c) Nb katkılı tavlınmış TiO_2 ince filminin EDS analizi

4.4. Elektriksel Ölçüm

Elde edilen katkısız ve Nb katkılı DSSC'lerin, Süleyman Demirel Üniversitesi, YETEM-Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi Enerji Teknolojisi Birimi Elektro-Optik Karakterizasyon Laboratuvarında bulunan Keithley cihazı ile DC direnç ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen veriler ile akım-voltaj (I-V) ve voltaj-güç (V-P) grafikleri oluşturulabilir. Ölçümler 0.1 W/cm^2 , AM1.5 ve 25°C koşullarında yapıldı. Katkısız TiO_2 ile hazırlanan DSSC'nin akım voltaj verilerinin okunmasıyla hesaplanan güç değerleri V-P grafiği oluşturmak için kullanılmıştır. Oluşturulan grafikten yola çıkarak hesaplanan verim %0,03 ve FF ise %10,22 bulunmuştur. Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de sırasıyla katkısız TiO_2 ile hazırlanan DSSC'nin ışık altındaki I-V ve V-P grafiği gösterilmektedir.

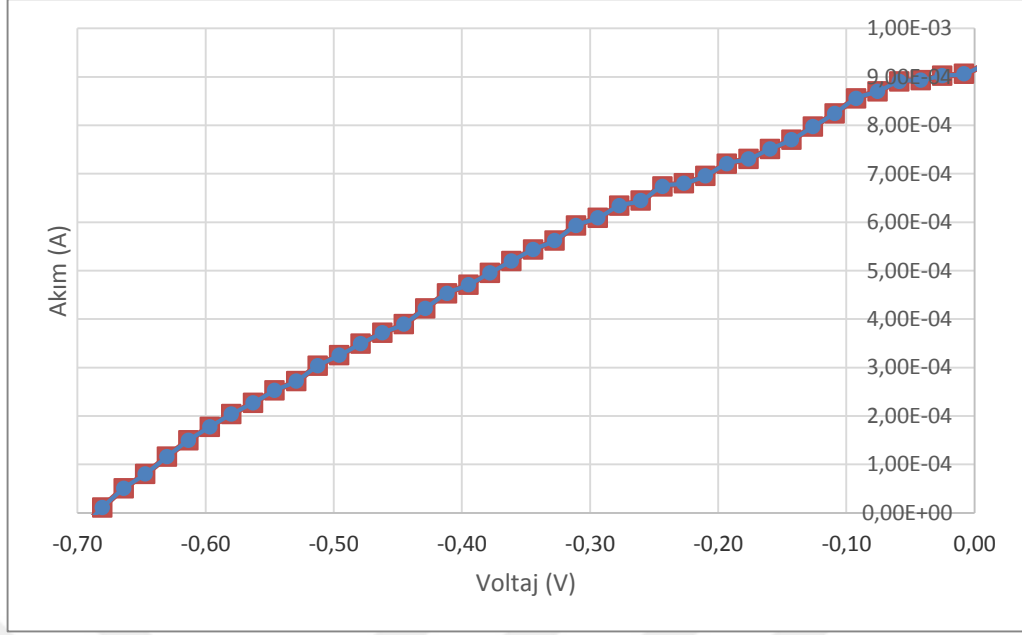


Şekil 4.10. Katkısız TiO_2 kaplı FTO ile üretilen DSSC'nin Işık altındaki I-V grafiği

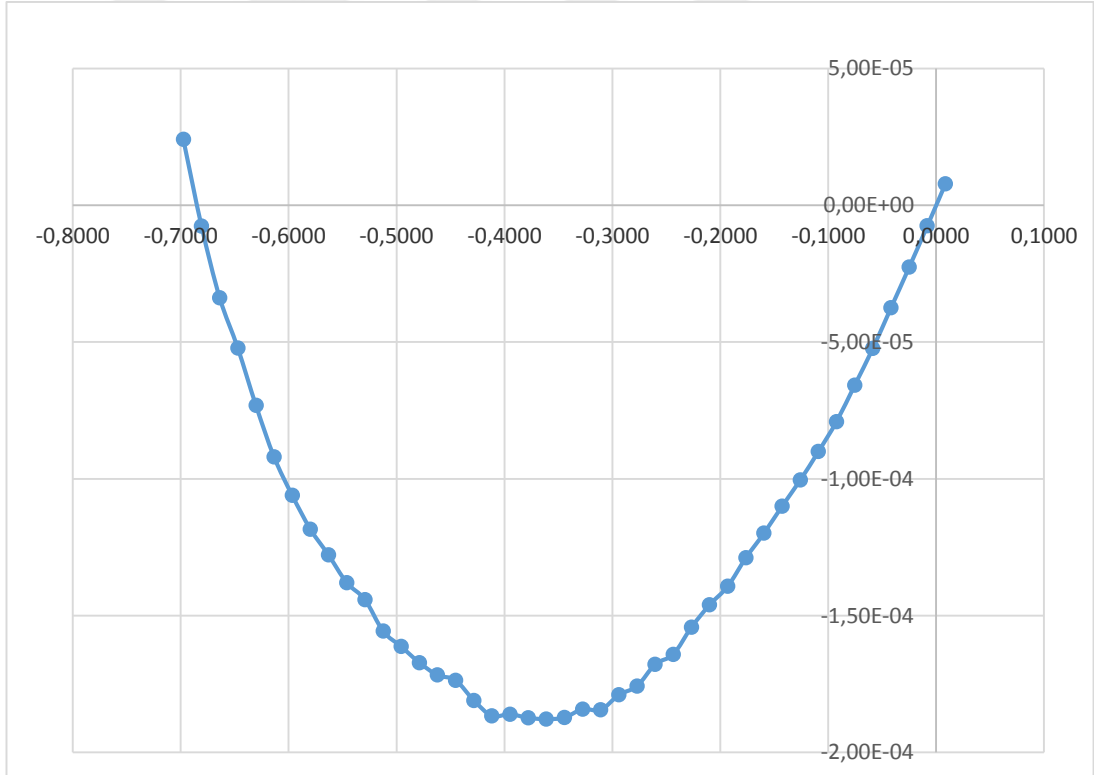


Şekil 4.11. Katkısız TiO₂ kaplı FTO ile üretilen DSSC'nin V-P grafiği

Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'da bulunan Nb katkılı TiO₂ kullanılarak hazırlanmış olan DSSC ye ait I-V ve V-P grafiklerinden I_{sc} ve V_{sc} , I_{max} ve V_{max} değerleri okunmuştur. Okunan değerler ile P_{max} ve $P_{ışık}$ değerleri hesaplanmış ve hesaplanan bu veriler ile verim ve FF değerleri elde edilmiştir. Nb katkılı TiO₂ kullanılarak hazırlanmış olan DSSC'nin verimi %0.13, FF ise %10.89 olarak hesaplanmıştır. Hücreden elde edilen akım ve voltaj değerleri yüksek olduğu için hücre kapasitesi yüksektir fakat verim düşük çıkmıştır. Bu durum diğer parametrelerin hücrede akım kaybına neden olması ile açıklanabilir. Kontak problemleri, direnç problemleri, seri direnç gibi nedenler verimde düşüslere sebep olmaktadır. Bu parametrelerdeki iyileştirmelerle verimli bir hücre elde edilebilir. Karşıt elektrot olarak temin ettiğimiz Pt kaplı FTO camın transparan özellikte olması ve iletkenlik direncinin yaklaşık 13.5 ohm mertebelerinde çıkması hücre verimi olumsuz yönde etkilemiştir.



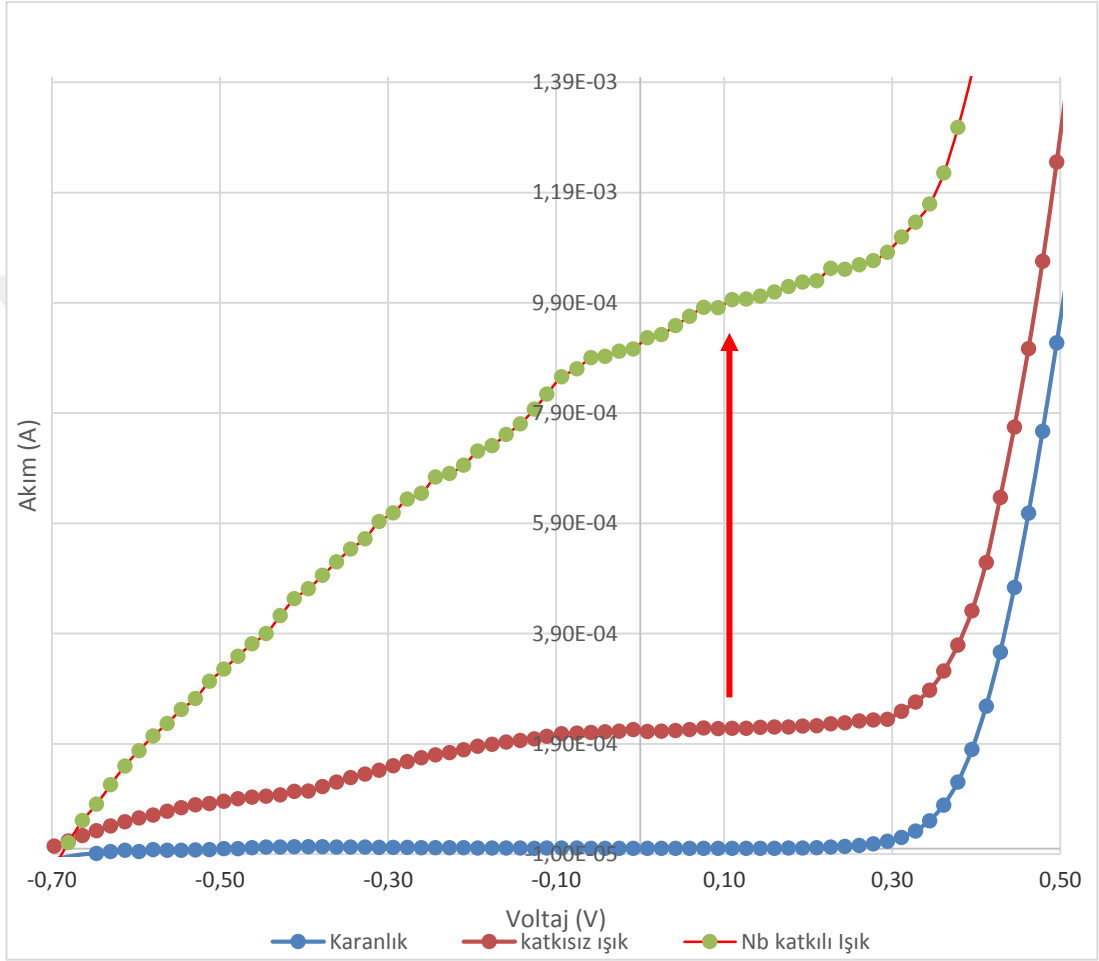
Şekil 4.12. Nb katkılı TiO₂ kaplı FTO ile üretilen DSSC'nin I-V grafiği



Şekil 4.13. Nb katkılı TiO₂ kaplı FTO ile üretilen DSSC'nin V-P grafiği

Şekil 4.14'de karanlıkta ve ışık altında katkısız ve Nb katkılı DSSC'lerin I-V karakteristiklerinin karşılaştırılması verilmiştir. Grafikte de görüldüğü üzere Nb katkılı ya da katkısız TiO₂'ye sahip hücreye ışık verildiğinde elektron oluşumu

sağlanabilmektedir. Her iki hücrede de karanlıkta elektron sağlanması bir DSSC elde edildiğini gösterir. Bunun dışında katkısız TiO_2 'ye sahip hücrede ışık altında akım yaklaşık 2.01×10^{-4} A mertebesindeyken Nb katkısının etkisiyle 9×10^{-4} A mertebelerine ulaşmıştır. Bu sonuçlar açık bir şekilde güç üretiminde iyileşme olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.14. Katkısız ve Nb katkılı TiO_2 kaplı FTO ile üretilen DSSC'lerin I-V karakteristiklerinin karşılaştırılması

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

DSSC ana bileşenlerinden yarıiletken malzemelerin elektriği iletme yetenekleri geliştirilebilir. Yarıiletkenler için önemli olan öncül malzeme seçimidir ve solüsyon bazlı üretim tekniklerinde bu seçim büyük önem arz etmektedir. Öncül malzeme seçimi elde edilen filmlerin yapısal ve optiksel özelliklerini doğrudan etkilemektedir (Bayram, 2018). DSSC'lerin verimi için önemli parametrelerden biri de ışınım emilimini gerçekleştiren boya moleküllerinin kullanılan yarıiletken malzemeye iyi bir şekilde adsorbe olarak ışınım emiliminin artırılmasıdır. Yarıiletkenler içerisinde en yüksek verime sahip olan ve en sık kullanılan malzeme TiO_2 'dir. Bunun için de en önemli nokta TiO_2 yarıiletkeninin elektriği iletme yeteneğini geliştirmek için yarı iletkene katkılama yapmaktır.

Bu çalışmada TiO_2 öncül malzemesi olarak titanyum (IV) izopropoksit kullanılmıştır. Metal katkısı için de Nb (V) etoksit seçilmiştir. Öncül solüsyon, katkısız ve Nb katkılı TiO_2 olarak iki farklı şekilde hazırlanmıştır. Seçilen öncül maddeler ile öncül çözelti hazırlanmış ve ilk 5 deneme de istenilen özellikte çözelti elde edilememiştir. Deneme-6'da oluşturulan çözelti istenilen özelliklerde oluşmuştur. Üretim için baz alınan Deneme-6'nın hazırlanma prosesine uygun olarak elde edilen solüsyonlar, USP kaplama tekniği ile FTO cam alttaşlar üzerine başarılı bir şekilde kaplanmıştır. FTO cam alttaşlar üzerine kaplanan katkısız ve Nb katkılı TiO_2 ince filmlerin kristal yapısının değişimi XRD cihazı, yüzey morfolojisi ise SEM cihazı ile yapılmış ve üretilen hücrelerin elektriksel özellikleri incelenmiştir.

XRD analiz sonuçlarından elde edilen veriler Nb katkılı TiO_2 'nin, USP kaplama yöntemi ile FTO cam alttaşlar üzerine başarılı bir şekilde kaplandığını ve Nb katkısının olumsuz bir etki oluşturmadığını göstermiştir. Ayrıca XRD sonuçlarından tavlama yapmanın pik şiddetini artırdığı ve kristal yapıyı geliştirdiği sonucuna da varılmaktadır.

Elektriksel ölçümlerden elde edilen verilerden üretilen hücrenin akım ve voltaj değerlerinin yüksek olduğu görülmüştür. Bu veriler hücrenin elektrik üretim

kapasitesinin yüksek olduğunu göstermektedir. Ancak hücredeki diğer parametrelerin oluşturduğu elektron kaybı nedeniyle hücre verimi düşük çıkmıştır. Nb katkıları ile üretilen hücrenin verimliliği katkısız TiO₂ ile karşılaştırıldığında Nb katkısının bulunduğu hücrelerde daha yüksek verimlilik sergilendiğini göstermiştir. Katkısız TiO₂ kaplı çalışma elektroduna sahip DSSC'nin verimi %0,03 ve FF ise %10,22 elde edilmiştir. Nb katkılı TiO₂ çalışma elektroduna sahip DSSC'nin verimi ise %0.13, FF ise %10.89 elde edilmiştir. Sonuç olarak Nb katkısı güç dönüşüm verimliliğini geliştirmiştir. Alınan sonuçların literatürle karşılaştırılması sonucunda makalelerle uyumlu sonuçların çıktığı görülmüştür.



KAYNAKLAR

- Akar, V., 2016. Elektrokimyasal Depolama Yöntemi İle Boyar Maddeli Güneş Pili Üretimi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 85s, Isparta.
- Arunachalam, A., Dhanapandian, S., Manoharan, C., Bououdina, M., Ramalingam, G., Rajasekaran, M., ... & Ibraheem, A. M., 2016. Influence of Sprayed Nanocrystalline Zn-doped TiO₂ Photoelectrode with the Dye Extracted from Hibiscus Surattensis as Sensitizer in Dye-sensitized Solar Cell. *Ceramics International*, 42(9), 11136-11149.
- Barbe, C. J., Arendse, F., Comte, P., Jirousek, M., Lenzenmann, F., Shklover, V., & Grätzel, M., 1997. Nanocrystalline Titanium Oxide Electrodes for Photovoltaic Applications. *Journal of the American Ceramic Society*, 80(12), 3157-3171.
- Batur, H., 2013. Güneş Gözelerinin Modellenmesi ve Verimlilik Analizleri. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 60s, Isparta.
- Bayram, A. B., 2018. Ultrasonik Sprey Piroliz Yöntemi ile Biriktirilmiş Titanyum Dioksit (TiO₂) İnce Filmlerin Üretimi ve Karakterizasyonu. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 66s, Isparta.
- Boz, M., 2015. Katkılandırılmış TiO₂ İnce Filmlerin Üretilmesi, Karakterizasyonu ve Boya Katkılı Güneş Pili Aygıtlarının Geliştirilmesi. Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 56s, İzmir.
- Chaichan, M. T., Kazem, H. A., Mahdy, A. M., & Al-Waeely, A. A., 2016. Optimal Sizing of a Hybrid System of Renewable Energy for Lighting Street in Salalah-Oman Using Homer Software. *International Journal of Scientific Engineering and Applied Science (IJSEAS)*, 2(5), 157-164.
- Chapin, D. M., Fuller, C. S., & Pearson, G. L., 1954. A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power. *Journal of Applied Physics*, 25(5), 676-677.
- Edinger, S., Bekacz, J., Richter, M., Hamid, R., Wibowo, R. A., Peić, A., Dimopoulos, T., 2015. Influence of the Acetic Acid Concentration on the Growth of Zinc Oxide Thin Films Prepared by Spray Pyrolysis of Aqueous Solutions. *Thin Solid Films*, 594, 238-244.
- Giray, H. B., 2010. The Effects of Platinum Particle Size to the Efficiency of a Dye Sensitized Solar Cell (DSSC). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 85s, Ankara.

- Gong, J., Sumathy, K., Qiao, Q., & Zhou, Z., 2017. Review on Dye-sensitized Solar Cells (DSSCs): Advanced Techniques and Research Trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 234-246.
- Gusak, V., Nkurunziza, E., Langhammer, C., & Kasemo, B., 2014. Real-Time Adsorption and Desorption Kinetics of Dye Z907 on a Flat Mimic of Dye-Sensitized Solar Cell TiO₂ Photoelectrodes. *The Journal of Physical Chemistry C*, 118(30), 17116–17122.
- Güler, T., 2015. Fabrication and Electrical Characterization of Sonochemically Grown Nanostructured ZnO Dye Sensitized Solar Cells. *Gediz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 110s, İzmir.
- Hagfeldt, A., Boschloo, G., Sun, L., Kloo, L., & Pettersson, H., 2010. Dye-sensitized Solar Cells. *Chemical reviews*, 110(11), 6595-6663.
- Iwasaki, M., Hara, M., Kawada, H., Tada, H., & Ito, S., 2000. Cobalt ion-doped TiO₂ photocatalyst response to visible light. *Journal of Colloid and Interface Science*, 224(1), 202-204.
- Kabadayı, K., 2011. Esnek Yüzeyde Boya İle Duyarlaştırılmış Fotovoltaik Hücre Üretimi Ve Performans İncelenmesi. *Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 96s, İzmir.
- Khan, S., Cho, H., Kim, D., Han, S. S., Lee, K. H., Cho, S. H., Choi, H., 2017. Defect Engineering Toward Strong Photocatalysis of Nb-doped Anatase TiO₂: Computational Predictions and Experimental Verifications. *Applied Catalysis B: Environmental*, 206, 520-530.
- Kocaoğlu, B. C., 2014. Production and Development of Flexible Dye Sensitized Solar Cells. *Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Science, Master Degree*, 129s, Ankara.
- Kudret, A., 2011. ZnO Tabanlı Doğal Boyar Maddeli Güneş Pili Yapımı. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 68s, Kahramanmaraş.
- Mori, S., Yanagida, S., 2006. TiO₂-Based Dye-Sensitized Solar Cell. In: Soga T (Ed) *Nanostructured Materials For Solar Energy Conversion*. Elsevier, Amsterdam.
- Nelson, V., Stacher, K., 2016. *Introduction to Renewable Energy*. CRC Press, 423s, Florida.
- Ohl, R. S., 1946. U.S. Patent No. 2,402,662. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- O'Regan, B., & Grätzel, M., 1991. A Low-cost, High-efficiency Solar Cell Based on Dye-sensitized Colloidal TiO₂ Films. *Nature*, 353(6346), 737-740.

- Öztürk, H.H., 2012. Güneş Enerjisi ve Uygulamaları. Birsen Yayınevi, 354s, İstanbul.
- Öztürk, H.H., Kaya, D., 2013. Güneş Enerjisinden Elektrik Üretimi: Fotovoltaik Teknoloji. Umuttepe Yayınları, 417s, Kocaeli.
- Ranabhat, K., Patrikeev, L., Antal'evna-Revina, A., Andrianov, K., Lapshinsky, V., & Sofronova, E., 2016. An Introduction to Solar Cell Technology. Journal of Applied Engineering Science, 14(4), 481-491.
- Rida, K. S., Al-Waeli, A. A., & Al-Asadi, K. A., 2016. The Impact of Air Mass on Photovoltaic Panel Performance. Eng. Sci. Rep, 1(1), 1-9.
- Rodriguez-Talavera, R., Vargas, S., Arroyo-Murillo, R., Montiel-Campos, R., & Haro-Poniatowski, E., 1997. Modification of the phase transition temperatures in titania doped with various cations. Journal of materials research, 12(2), 439-443.
- Sarker, S., 2017. Dye-sensitized solar cells (DSSCs). Erişim Tarihi: 22.11.2018. <https://www.jvanalysis.com/about>
- Shalini, S., Balasundaraprabhu, R., Kumar, T. S., Muthukumarasamy, N., Prasanna, S., Sivakumaran, K., & Kannan, M. D., 2018. Enhanced Performance of Sodium Doped TiO₂ Nanorods Based Dye Sensitized Solar Cells Sensitized with Extract From Petals of Hibiscus Sabdariffa (Roselle). Materials Letters, 221, 192-195.
- Serway, R. A., Beichner R. J., 2005. Çev. Ed. Çolakoğlu, K., Palme Yayıncılık, 392s, Ankara
- Sönmezoğlu, S., 2010. Nano Tanecikli TiO₂ İnce Filmlerin Yapısal, Morfolojik Ve Optiksel Özelliklerinin İncelenmesi. Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 113s, Tokat.
- Tatar, D., 2015. Spray Pyrolysis Yöntemi ile Farklı Altlık Sıcaklığında Elde Edilen SnO₂ ve SnO₂:F İnce Filmlerin Bazı Fiziksel Özelliklerine, Altlık Sıcaklığının Etkisinin Araştırılması. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 154s, Erzurum.
- Taziwa, R., & Meyer, E., 2017. Fabrication of TiO₂ Nanoparticles and Thin Films by Ultrasonic Spray Pyrolysis: Design and Optimization. In Pyrolysis. InTech.
- Telkes, M., 1947. The Efficiency of Thermoelectric Generators. I. Journal of Applied Physics, 18(12), 1116-1127.

The National Renewable Energy Laboratory, 2019. Best Research-Cell Efficiency Chart. Erişim Tarihi: 20.01.2019.
<https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/pv-efficiency-chart.20190103.pdf>

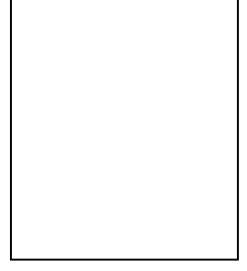
Trenberth K.E., Fasullo J.T., Kiehl J., 2009. Earth's Global Energy Budget. Bulletin of the American Meteorological Society, 90(3), 311-324.

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



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Meryem Serfiraz BİLİCİ
Doğum Yeri ve Yılı : ANKARA, 1993
Medeni Hali : Bekar
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : meryemserfiraz@gmail.com



Eğitim Durumu

Lise : Özel Nenehatun Anadolu Lisesi, 2011
Lisans : SDÜ, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği