

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**FOTOVOLTAİK HÜCRELERDE KULLANILMAK ÜZERE YARI İLETKEN İNCE
FİLMLEİN BİRİKTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ALİ BİRELLİ

TEZ DANIŞMANI
DR.ÖĞR. ÜYESİ M. FATİH GÖZÜKIZIL

BİLECİK, 2022

10490252

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**FOTOVOLTAİK HÜCRELERDE KULLANILMAK ÜZERE YARI İLETKEN İNCE
FİLMLEİN BİRİKTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ALİ BİRELLİ

TEZ DANIŞMANI
DR. ÖĞR. ÜYESİ M. FATİH GÖZÜKIZIL

BİLECİK, 2022

10490252

BEYAN

"Fotovoltaik Hücrelerde Kullanılmak Üzere Yarı iletken İnce Filmlerin Biriktirilmesi" adlı yüksek lisans tezinin hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını, aksinin tespit edileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Bu çalışmanın, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda; projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte, ETİK KURUL onayı alınması durumunda ise ETİK KURUL tarih karar ve sayı bilgilerinin beyan edilmesi gerekmektedir.	
DESTEK ALINMIŞTIR	DESTEK ALINMAMIŞTIR
Destek alındı ise;	
Destekleyen kurum:	
Desteğin Türü	Proje Numarası
1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)	
2- TÜBİTAK	
Diğer:	
ETİK KURUL onayı var ise;	
ETİK KURUL karar tarih/sayı:/.....

Ali Birelli

Tarih

.....

İmza

.....

ÖN SÖZ

Yüksek lisans eğitim döneminde benden desteklerinin esirgemeyen, her problemimde bana yol gösteren, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım kıymetli Sayın Dr. Öğr. Üyesi M. Fatih GÖZÜKIZIL ve Öğr. Görevlisi Enes Nayman hocama, sevgisini ve desteğini esirgemeyen ve her zaman yanımda olan biricik çekirdek aileme, arkadaşlarıma ve müdürlerim Feridun ALTAN ve Ahmet ALTAŞ'a tüm içtenliğimle teşekkür ederim

Ali Birelli

2022

ÖZET

FOTOVOLTAİK HÜCRELERDE KULLANILMAK ÜZERE YARI İLETKEN İNCE FİMLERİN BİRİKTİRİLMESİ

Fosil yakıtların tükenmesi, pahalı ve çevreye olan zararlı etkileri nedeniyle alternatif temiz enerji kaynaklarına yönelimini artırmaktadır. Yarı iletken teknolojileri yaygın olarak alternatif enerji kaynaklarında, optoelektronik, filtreleme, arıtım cihazlarında ve sensör uygulamalarında kullanılmaktadır. Titanyum dioksit (TiO_2); kararlı kimyasal yapısı, zehirli olmaması, yüksek foto aktiviteye sahip olması ve maliyetinin düşük olması gibi özelliklerinden dolayı yaygın olarak tercih edilen yarı iletken bir malzemedir. Metal oksit yarı iletkenlerden olan TiO_2 , fotovoltaik hücrelerde ince film formunda aktif olarak kullanılmaktadır.

TiO_2 ; kimyasal banyolama, elektrokimyasal depolama, sol-jel daldırarak ve döndürerek kaplama gibi metal oksit ince film biriktirme yöntemleri ile çeşitli altlıklar yüzeylerine ince filmler halinde biriktirilmektedir. TiO_2 ince filmler kobalt (Co), krom (Cr), kalay (Sn), alüminyum (Al) ve bakır (Cu) gibi çok çeşitli katkı malzemeleri ile birlikte katkılanarak kristal yapı, yasak enerji aralıkları ve saydamlık gibi özellikleri değiştirilerek ince filmin yapılarının iyileştirilmesi sağlanmaktadır.

Kaplama yöntemlerinden daldırarak kaplama yöntemi; farklı boyut ve şekillerdeki altlıkların kaplanabilmesi, uygulamanın basitliği, ileri teknoloji ya da pahalı cihaz gereksiniminin olmaması, istenilen kalınlığa göre süreç tekrarının yapılabilmesi, deneysel parametrelerin istenilen kaplama özelliğine göre değiştirilebilmesi gibi avantajları ile ön plana çıkarmaktadır.

Bu çalışma kapsamında; sol-jel daldırarak kaplama yöntemi ile katkısız TiO_2 , Al ve Cu metalleri ile katkılı TiO_2 ince filmleri cam altlıklar üzerine biriktirilmiştir. %1, %3, %5 üç farklı katkılama oranlarında Al, Cu katkılı TiO_2 ince filmler üretilerek; katkılamının morfolojik, yapısal ve optik özellikler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Üretilen katkısız ve Al, Cu Katkılı TiO_2 ince filmlerin yapısal özellikleri X-Işını Kırınımı (XRD) Cihazı, morfolojik özellikleri Alan Emisyonu Taramalı Elektron Mikroskobu (FESEM) ve optik özellikleri UV-Vis. Spektrofotometresi kullanılarak karakterize edilmiştir. Karakterize edilen filmlerin fotovoltaik hücre katmanı olarak kullanımını simule edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: TiO_2 İnce Film, Daldırarak Kaplama, Fotovoltaik Hücreler, Yarı İletkenler.

ABSTRACT

DEPOSITION OF SEMICONDUCTOR THIN FILMS FOR USE IN PHOTOVOLTAIC CELLS

The depletion of fossil fuels increases the orientation to alternative clean energy sources due to their expensive and harmful effects on the environment. Semiconductor technologies are widely used in alternative energy sources, optoelectronics, filtering, purification devices and sensor applications. Titanium dioxide (TiO_2) is a widely preferred as a semiconductor material due to its features such as stable chemical structure, non-toxicity, high photoactivity and low cost. TiO_2 ; a semiconductor metal oxide is actively used in the form of thin films in photovoltaic cells.

TiO_2 ; deposited as thin films on the surfaces of various substrates by Metal oxide thin film deposition methods such as chemical bathing, electrochemical deposition, sol-gel dipping spin coating. By doping TiO_2 thin films with a wide variety of additives like cobalt (Co), chromium (Cr), tin (Sn), alumina (Al) and copper (Cu), improving the structures of the thin film by changing its properties such as crystal structure, forbidden energy gaps and transparency that is provided.

One of the coating methods, dip coating method; stands out with its advantages like being able to coat substrates of different sizes and shapes, simplicity of application, no need for advanced technology or expensive equipment, repeating the process according to the desired thickness, and changing the experimental parameters according to the desired coating feature.

In this study; pure TiO_2 , Al and Cu metals and also doped TiO_2 thin films were deposited on glass substrates by sol-gel dip coating method. By producing Al, Cu doped TiO_2 thin films with three different doping ratios of 1%, 3%, 5%; the effects of doping on morphological, structural and optical properties were investigated. Structural properties of produced pure and Al, Cu doped TiO_2 thin films were determined by X-Ray Diffraction (XRD) Device, morphological properties by Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM) and optical properties by UV-Vis. It was characterized using a spectrophotometer. The use of the characterized films as photovoltaic cell layer is simulated.

Keywords: TiO_2 Thin Film, Dip Coating, Photovoltaic Cells, Semiconductors.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖN SÖZ	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER	iv
TABLolar LİSTESİ	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ	x
1. GİRİŞ	1
2. FOTOVOLTAİK HÜCRELER	2
2.1. Fotovoltaik Etki	2
2.2. Fotovoltaik Hücrelerin Yapısı ve Çalışma İlkesi	3
2.3. Fotovoltaik Hücrelerin Çeşitleri	6
2.4. Güneş Pilleri Yapısı ve Kullanım Alanları	6
2.5. Güneş Pili Çeşitleri	8
2.5.1. p-n Homoelektronik Güneş Pilleri.....	8
2.5.2. p-n Heteroelektronik Güneş Pilleri	9
2.5.3. Schottky Eklem Güneş Pilleri	10
2.5.4. Organik İnce Film Güneş Pilleri	10
2.5.4.1. Boyar Madde Güneş Pilleri	11

2.5.4.2. Hibrit Güneş Pilleri.....	11
2.6. Güneş Pili Kullanım Alanları	12
3. İNCE FİLMLER	13
3.1. İnce Film Teknikleri	13
3.1.1. Buhar Büyüme Yöntemi	14
3.1.1.1. Fiziksel Buhar Biriktirme	14
3.1.1.1.1. Buharlaştırma	14
3.1.1.1.2. Sıçratma	16
3.1.1.2. Kimyasal Biriktirme	16
3.2.2. Sıvı Fazla Büyüme	16
3.2.2.1. Sol-Jel Yöntemi	16
3.2.2.2. Kimyasal Banyo	22
3.2.2.3. Elektrokimyasal Yöntem	23
3.2.3. Katı Fazla Büyüme	23
3.2.3.1. Mekanik Aşındırma	23
3.2.3.2. Devitrifikasyon	23
3.2. İnce Filmlerin Büyüme Morfolojisi	24
3.3. İnce Filmlerin Kullanım Alanları	24
3.4. Yarıiletkenler	24
3.4.1. n- Tipi Yarı iletkenler	25

3.4.2. p-Tipi Yarı iletkenler	26
3.5. Yarı iletken İnce Film Güneş Hücreleri	27
3.6. Yarı iletken İnce Film Güneş Hücrelerini Oluşturan Tabakalar	27
3.6.1. Alttaş	27
3.6.2. Saydam İletken Oksit (SiO)	28
3.6.3. Pencere / Tampon Katmanı	28
3.6.4. Soğurucu Katman	28
3.6.5. Arka Metal Kontak	29
3.7. Literatür Taraması.....	29
4. DENEYSEL YÖNTEM	33
4.1. Deneysel Parametrelerin Belirlenmesi	33
4.2. Üretilen İnce Filmlerin Karakterizasyonu	35
4.2.1. TiO ₂ ve TAL Serisi İnce Filmlerinin Yüzeysel Karakterizasyonu	35
4.2.2. TCU Serisi İnce Filmlerinin Yüzeysel Karakterizasyonu.....	39
4.2.3. TiO ₂ ve TAL Serisi İnce Filmlerinin Yapısal Karakterizasyonu	42
4.2.4. TCU Serisi İnce Filmlerinin Yapısal Karakterizasyonu	45
4.3. İnce Filmlerin Optik Karakterizasyonu	48
4.4. TiO ₂ Katmanlı Fotovoltaik Hücre Simülasyonu.....	50
5. SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER	53
KAYNAKÇA	54

TABLULAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 4.1. Al ve Cu Katkılı TiO ₂ Serilerin Adlandırılması.....	35
Tablo 4.2. TAL İnce Filmlere Ait EDX Sonuçları	49
Tablo 4.3. TCU İnce Filmlere Ait EDX Sonuçları.....	42
Tablo 4.4. TAL Serisi Yarı Pik Genişliği ve Tanecik Boyutu	48
Tablo 4.5. TCU Serisi Yarı Pik Genişliği ve Tanecik Boyutu	48
Tablo 4.6. Katkısız ve Cu, Al Katkılı TiO ₂ İnce Filmlerin Yasak Enerji Aralığı Değerleri	49

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Elektron-Boşluk Çifti Oluşturma.....	3
Şekil 2.2. Fotovoltaik (PV) Hücrenin Yapısı.....	4
Şekil 2.3. p ve n Tipi Yarı İletkenlerin Enerji Bant Diyagramları.....	5
Şekil 2.4. Güneş Pili Yapısı.....	7
Şekil 2.5. Schottky Eklem Güneş Pillerinin Enerji-Bant Diyagramı.....	10
Şekil 2.6. Boyaya Duyarlı Güneş Pili Cihazı Şeması	11
Şekil 3.1. İnce Film Üretim Teknikleri	14
Şekil 3.2. Döndürerek Kaplama Tekniği	18
Şekil 3.3. Daldırarak Kaplama İşlem Basamakları	19
Şekil 3.4. Daldırarak Kaplama Yöntemi İle Kaplama Sırasındaki Jelleşme Süreci	20
Şekil 3.5. Akma Yöntemiyle Kaplama Tekniği	21
Şekil 3.6. Saf Silisyum Yapısı	25
Şekil 3.7. Si Kristaline P Katkılanması.....	26
Şekil 3.8. Si Kristaline B Katkılanması	27
Şekil 3.9. Yarı İletken İnce Film Güneş Hücrelerini Oluşturan Katmanların a) Alttaban8 Dizilimi b)Üst Katman Dizilimi.....	28
Şekil 4.1. TiO ₂ İnce Film Kaplama Prosesi	34
Şekil 4.2. TiO ₂ Serisi İnce Film FESEM Görüntüleri.....	36
Şekil 4.3. TAL1 Serisi İnce Film FESEM Görüntüleri.....	37
Şekil 4.4. TAL3 Serisi İnce Film FESEM Görüntüleri.....	38
Şekil 4.5. TAL5 Serisi İnce Film FESEM Görüntüleri.....	38
Şekil 4.6. TiO ₂ ve TAL Serisi İnce Filmlerinin Karşılaştırmalı FESEM Görüntüleri	40

	Sayfa
Şekil 4.7. TCU1 Serisi İnce Film FESEM Görüntüleri	40
Şekil 4.8. TCU3 Serisi İnce Film FESEM Görüntüleri	40
Şekil 4.9. TCU5 Serisi İnce Film FESEM Görüntüleri	41
Şekil 4.10. TCU Serisi İnce Filmlerinin Karşılaştırmalı FESEM Görüntüleri	41
Şekil 4.11. TiO ₂ Serisi İnce Filmlerinin XRD Analiz Spektrumu	43
Şekil 4.12. TAL1 Serisi İnce Filmlerinin XRD Analiz Spektrumu	43
Şekil 4.13. TAL3 Serisi İnce Filmlerinin XRD Analiz Spektrumu	44
Şekil 4.14. TAL5 Serisi İnce Filmlerinin XRD Analiz Spektrumu	44
Şekil 4.15. TAL Serisi İnce Filmlerinin Karşılaştırmalı XRD Analiz Spektrumu	45
Şekil 4.16. TCU1 Serisi İnce Filmlerinin XRD Analiz Spektrumu.....	46
Şekil 4.17. TCU3 Serisi İnce Filmlerinin XRD Analiz Spektrumu.....	46
Şekil 4.18. TCU5 Serisi İnce Filmlerinin XRD Analiz Spektrumu.....	47
Şekil 4.19. TCU Serisi İnce Filmlerinin Karşılaştırmalı XRD Analiz Spektrumu	47
Şekil 4.20. TiO ₂ Katmanlı Fotovolyaik Hücre Simülasyonu.....	50
Şekil 4.21. Simülasyonu Yapılan Fotovoltaik Pilin Yansıma Spektrumu	51
Şekil 4.22. Simülasyonu Yapılan Fotovoltaik Pilin İletim Spektrumu.....	51
Şekil 4.23. Simülasyonu Yapılan Fotovoltaik Pili Boyunca Uygulanan Voltaj Şarj Yoğunluğu.....	52

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

- AC** : Alternatif Akım
- CB** : Klorobenzen
- DC** : Doğru Akım
- FBB** : Fiziksel Buhar Biriktirme
- FESEM** : Taramalı Elektron Mikroskobu
- MW** : Megawatt
- NREL** : Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı
- PV** : Fotovoltaik
- RF** : Radyo Frekansı
- SİO** : Saydam İletken Oksit
- TiO₂** : Titanyum Dioksit
- XRD** : X-Işını Kırınımı
- Å** : Angstrom
- Al** : Aliminyum
- As** : Arsenik
- CdTe** : Kadmiyum Tellür
- CO₂** : Karbondioksit
- Cu** : Bakır
- E_C** : İletim Bandının Enerjisi
- E_F** : Fermi Enerji Seviyesi
- E_g** : Yasak Bant Aralığı
- E_V** : Valans Bandının Enerjisi
- GaAs** : Galyum Arsenik
- Ge** : Germenyum
- h** : Planck Sabiti

In : İndiyum

P : Fosfor

Se : Selenyum

Si : Silisyum

v : Frekans

ϕ_B : Bariyer Yüksekliği

q : Temel Yük

Ω_{cm} : Ohm Santimetre

$\alpha\text{-Sn}$: Alfa-Kalay

μm : Mikrometre

1. GİRİŞ

TiO₂, ince film formunda fotokatalizör olarak yaygın kullanılan yarı iletken malzemelerden biridir. Titanyum dioksit (TiO₂), kimyasal kararlılık, toksit olmama, düşük maliyet, bulunabilirlik, iyi mekanik esneklik ve iletkenlik gibi n- tipi yarı iletken bir malzemedir (Bardakçı, 2007: 10). Metal oksit ince film biriktirme yöntemlerinden, sol-jel daldırarak kaplama, döndürerek kaplama magnetron püskürtme kimyasal banyo biriktirme, fiziksel buhar biriktirme çeşitli malzemeler üzerine TiO₂ ince filmler kaplanmaktadır (Sönmezoğlu v.d., 2012:395). Daldırarak kaplama da, işlemin kolay uygulanabilirliği, ileri teknoloji, maliyet gerektiren cihazlara ihtiyaç duyulmaması, sürecin tekrar edilebilirliği, çalışma parametrelerinin kontrollü ve değiştirilebildiği gibi avantajlarının olması ince film kaplama için tercih sebebi olarak düşünülmektedir. Fotovoltaik hücreler atık sulardan boyar madde gideriminde optoelektronik uygulamalarda, nem sensörlerinde, çeşitli gazların algılanmasına olanak sağlayan gaz sensörlerinde TiO₂ ince filmlerin kullanılabilirlikleri çalışılmaktadır. TiO₂ katkısız olarak kullanılabildiği ve Al, Cu Fe, Mn, Zn gibi farklı katkılamalar yapılarak kullanıldığı görülmüştür (Çalığülü v.d. 2021: 318).

Bu çalışma kapsamında sol-jel daldırarak kaplama tekniği ile farklı altlıklar üzerine katkılı ve katkısız metal oksit ince filmler biriktirilmiştir. Kaplama malzemesi olarak TiO₂ seçilmiş, mikroskop lamı kullanılmıştır. Al ve Cu katkılama malzemesi tercih edilmiştir. Katkılama işlemi her iki katkı malzemesinin %1, %3 ve %5 oranda TiO₂ çözeltisine eklenerek yapılmıştır. Katkılama ile TiO₂ ince filmlerin kristal yapısında, yüzey morfolojisinde ve yasak enerji aralığında oluşturduğu değişiklikler incelenmiştir. Daldırarak kaplama yöntemi ile cam altlıklar yüzeyinde elde edilen katkılı ve katkısız TiO₂ ince filmlerin yapısal özellikleri X-Işını Kırınımı (XRD) Cihazı, yüzey özellikleri Alan Emisyonu Taramalı Elektron Mikroskobu (FESEM) ve optik özellikleri UV-Vis. Spektrofotometresi kullanılarak karşılaştırmalı olarak gözlemlenmiştir. Üretilen TiO₂ filmlerin fotovoltaik hücrelerde katman olarak kullanımı için gpvdm (General- Purpose Photovoltaic Device Mode) yazılımı ile simülasyonu yapılmıştır.

2. FOTAVOLTAİK HÜCRELER

Fotovoltaik hücreler; farklı tiplerdeki yarı iletken yapıların bir araya gelmesiyle oluşturdukları elektriksel alanından akım elde etme esasıyla çalışır. Fotonların taşıdığı enerjinin fotovoltaik hücrelerde bulunan elektronlar tarafından yutulması ile elektrik akımı oluşturularak enerjiye dönüştürülür (Çelik ve Koç, 2020: 2493). Yani üzerlerine gelen ışık enerjisi, hücreyi oluşturan malzemelerin uçlarında elektrik gerilimi oluşmaktadır. Elde edilen elektrik, doğru akım olarak kullanılmakta ayrıca alternatif akıma da dönüştürülebilmektedir. Fotovoltaik hücreleri oluşturan katmanların hareketli olmaması, sürtünme, aşınma gibi mekanik etkilerin oluşmadığından ömürleri uzundur. Fotovoltaik hücreler birbirine seri veya paralel bağlanarak bir yüzey üzerine sabitlenip ve güç çıkışı artırılarak fotovoltaik hücre modülü oluşturulur (Günday, 2010: 5).

2.1. Fotovoltaik Etki

Güç oluşturmak için hem gerilim hem de akım oluşturulması gerekmektedir. Güneş pillerinde gerilim fotovoltaik etki ile gerçekleşmektedir. Fotovoltaik etki, fotovoltaik hücrenin güne ışığıyla voltaj ya da elektrik akımı ürettiği süreçtir. (Hanania vd., 2015: 21).

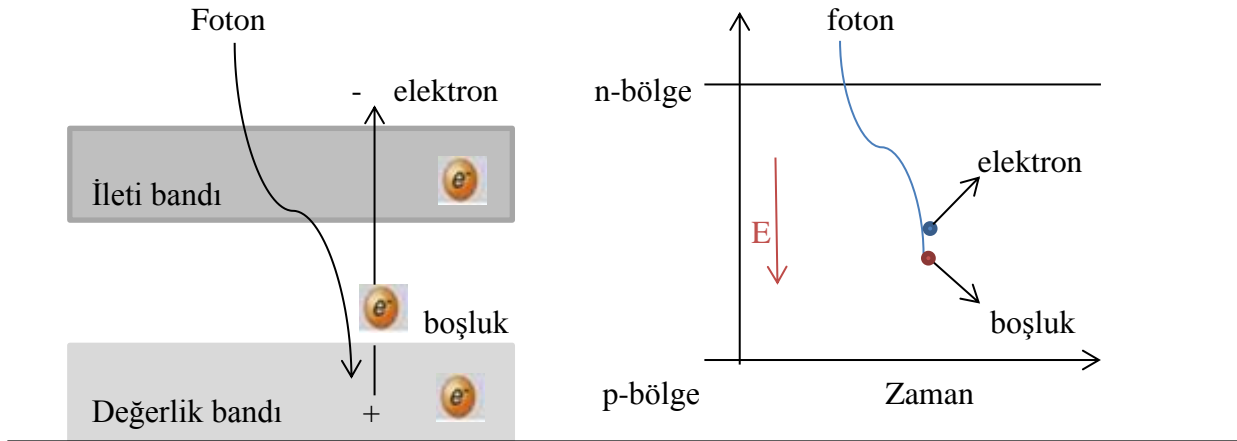
Fotovoltaik etki güneş pillerinden meydana gelmektedir. Bu güneş pilleri, p-n bağlantısı için bir araya getirilen yarı iletken (p tipi ve n tipi) oluşur. İki yarı iletkenin birleştirilmesinde elektronlar pozitif p tarafına ve delikler negatif n tarafına hareket etmesiyle bağlantı bölgelerinde elektrik alanı oluşur. Bu da, negatif yönlü parçaların bir yönde ve pozitif yönlü parçaların diğer yönde hareket etmesini sağlamaktadır (Boyle, 2004: 84).

Işık, küçük elektromanyetik ya da enerji demetleri olan fotonlardır. Fotonlar, güneş panellerini meydana getiren fotovoltaik hücreleri tarafından emilebilir. Işığın şiddeti ne kadar büyükse yüzeye düşen fotonlar da o kadar fazladır.

Belirli bir dalga boyunda ışık hücrelere geldiğinde, foton enerjisi, p-n bağlantısındaki yarı iletken malzemesindeki elektronlara aktarılır. Bu durum elektronların hareketini artırarak iletim bandına yani daha yüksek bir enerji durumuna atlamasına neden olmaktadır. Elektronun iletim bandına sıçradığında geride değerlik bandında bir delik bırakır. Bu da elektron boşluk çifti olan iki yük taşıyıcısı oluşturmaktadır (Hanania vd., 2015: 22).

Elektronlar uyarıldıklarında, çevredeki atomlarla bağ yapıları oluşturur ve yarı iletken malzemeyi bir arada tutarlar, böylece hareket etmeleri engellenir. P-n bağlantısında meydana gelen elektrik alanında, elektronlar ve delikler beklendiği gibi zıt yönde hareket eder. Serbest kalan elektron p tarafına yönelmek yerine n tarafına doğru hareket etme eğilimine sahiptir. Elektronun bu hareketi hücrede elektrik akımı oluşturur. Elektron hareket ettiğinde, geriye bir delik kalır ve bu delik p-tarafı ile ters yönde hareket etmektedir.

Fotovoltaik olayının gerçekleşmesi aşamasında, p-n eklem diyotun p ve n bölgelerine gelen fotonlar soğurulduğunda; enerji yasak bant aralığından daha yüksek olan fotonlar, değerlik bandındaki elektronları, iletkenlik bandına yükselterek elektron-boşluk çiftleri oluşturmaktadırlar. Bu çiftler birbirinden ayrıldığında fotoakım oluşur. Yüksek enerjiye sahip elektronlar, enerjisini dış yüke aktararak tekrardan fotovoltaik hücreye dönüş sağlarlar. Bu sistem Şekil 2.1’de gösterilmektedir.



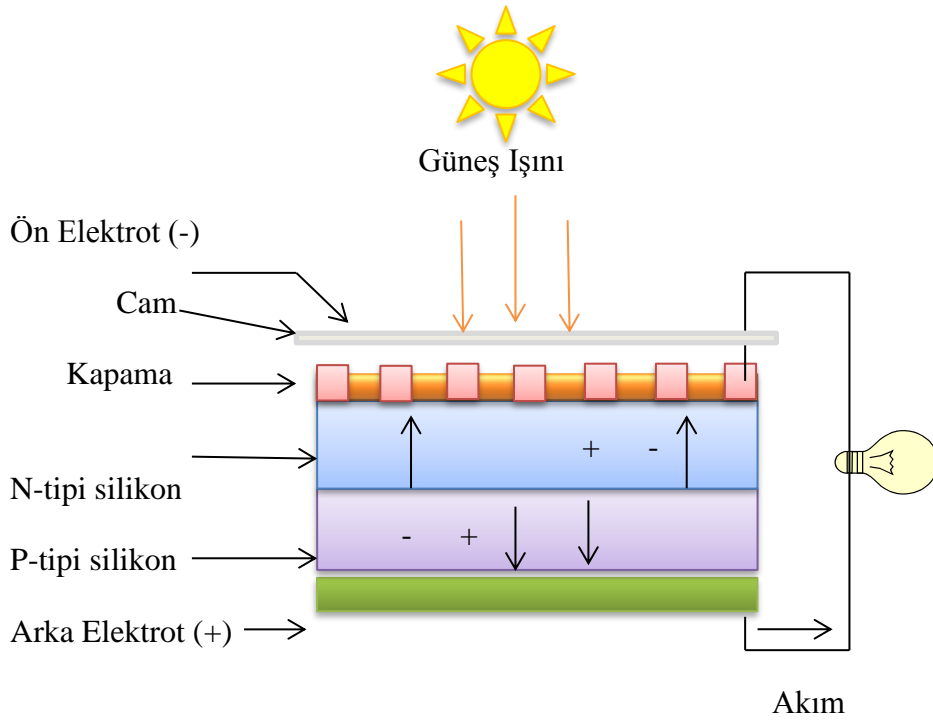
Şekil 2.1 Elektron-Boşluk Çifti Oluşturma

Kaynak: (Öztürk, 2017: 2)

2.2. Fotovoltaik Hücrelerin Yapısı ve Çalışma İlkesi

Güneşten gelen ışınım, enerji taşıyan fotonların bir araya gelmesinden oluşmaktadır. Bu fotonlar, dalga boyutlarına bağlı enerji içermektedir (Öztürk, 2017: 2).

Işık enerjisi ile fotovoltaik güneş hücrelerini doğrudan elektrik enerjisine dönüştürmek için aşağıda yer alan süreçlerin aynı zamanda gerçekleşmesi gerekmektedir (Sarıca, 2017: 6).



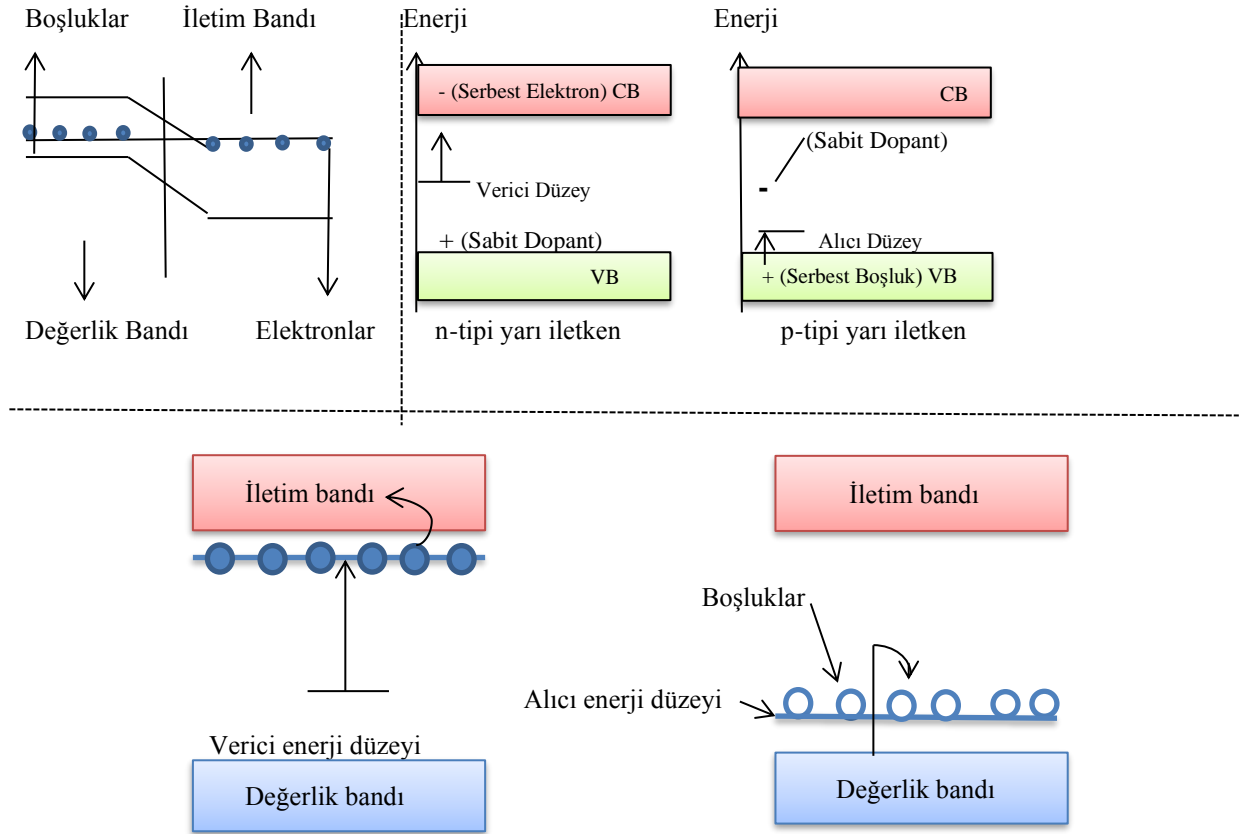
Şekil 2.2. Fotovoltaik (PV) Hücrenin Yapısı

Kaynak: (Öztürk, 2017: 2)

Fotovoltaik (PV) hücrenin çalışma ilkesine baktığımızda, PV hücrelerin üzerlerine ışık düştüğünde uçlarında elektrik gerilimi oluşmaktadır. Fotovoltaik ilkeye göre çalışmanın olması için, güneş ışığını soğuracak malzeme, yasak enerji aralığı güneş spektrumu ile uyum içerisinde bir yarı iletken (Si, GaAs, CdTe gibi) olmalıdır (Öztürk, 2017: 3).

Fotovoltaik hücrenin yapıları p-n eklemden meydana gelen diyotlara benzemektedir. Fotoelektrik ilkeye göre, hücreden fotonlar aracılığı ile koparılan elektronlar harekete geçmektedir. Bu sayede elektrik akımı meydana gelir. Bu da, birbirinden ayrılan elektron-boşluk çiftleri, PV hücrenin uçlarında yararlı bir güç çıkışı oluşturmaktadır (Navruz, 2013: 455).

Yarı iletkenler, iki tane enerji bandından meydana gelmektedir. Bu bantlar iletkenlik ve değerlilik bandı ismini almaktadır. Şekil 2.3’de yer alan p ve n eklemine, tabakaların iş fonksiyonlarının birbiri ile aynı olmaması, p ve n eklemine termal dengeyi sağlaması ile eklem ara yüzünde bant süreksizliği oluşmaktadır. Yasak enerji aralığına büyük ya da eşit enerjili bir foton, yarı iletken sayesinde soğurulduğunda, enerjisini değerlilik banttaki elektrona aktararak, elektronun iletkenlik bandına geçmesini sağlamakta ve elektron-boşluk çifti meydana gelmektedir (Navruz, 2013: 456).



a) n-tipi yarı iletkenin enerji-bant diyagramı b) p-tipi yarı iletkenin enerji-bant diyagramı

Şekil 2.3. p ve n Tipi Yarı İletkenlerin Enerji Bant Diyagramları

Kaynak: (Öztürk, 2017: 4)

Güneş pilinin ara yüzeyinde bir p-n eklem var ise elektrik alan tarafından elektron-boşluk çiftleri birbirinden uzaklaşır. Fotovoltaik hücre, elektronları n bölgesine, boşlukları ise p bölgesine taşıyan bir pompa gibi çalışmaktadır. Birbirinden kopan elektron-boşluk çiftleri, fotovoltaik hücrelerin uçlarında yararlı bir güç çıkışı meydana getirir. Bu durum yeniden bir fotonun hücre yüzeyine düşmesiyle tekrarlanmaktadır.

2.3. Fotovoltaik Hücrelerin Çeşitleri

Fotovoltaik hücrelerin çeşitlerine baktığımızda birinci nesil, ikinci nesil ve üçüncü nesil fotovoltaik hücreler olarak karşımıza çıkmaktadır. Birinci nesil fotovoltaik hücrelerde, hammadde olarak yüksek saflıkta silisyum kristalleri kullanılmaktadır. Yüksek güç verimliliği nedeniyle bu teknoloji en eski fakat en popüler teknolojidir (Sharma vd., 2015: 1147). Birinci nesil güneş pilleri iki alt gruba ayrılmaktadır. İlki monokristal, ikincisi polikristaldir. Monokristal, verimlilikleri farklı yöntemlerle üretilen hücrelere kıyasla daha uzun ömürlüdür. Polikristal fotovoltaik hücreler, kristal yapısındaki bozukluklar hücrelerin verimliliklerinin düşmesine neden olmaktadır. Ancak maliyetin düşük ve üretimin kolay olması fotovoltaik hücrelere yaklaşımın artmasına sebep olmaktadır (Çelik ve Koç, 2020: 2495).

İkinci nesil fotovoltaik hücreler CdTe (Kadmiyum Tellür), CIS (Bakır İndiyum Sülfür), CIGS (Bakır İndiyum Galyum di-Selenid) dir. Genellikle çatı uygulamaları için esnek yapıda üretilmektedir. Kolay taşınabilir ve kurulabilir olması diğer hücrelere göre avantajlı olsa da verimlilikleri düşüktür (Çelik ve Koç, 2020: 2495). İkinci nesil fotovoltaik hücreler, birinci nesil fotovoltaik hücrelere kıyasla daha ekonomiktir (Rathore vd., 2021: 1212).

Üçüncü nesil fotovoltaik hücrelere baktığımızda, organik fotovoltaik hücre olarak karşımıza çıkmaktadır (Waldauf vd., 2004: 505). Maksimum verimin ve optik geçirgenliğin sağlanabilmesi için tüm katmanların kristal yapıları birbiriyle uyum içerisinde olmalıdır.

2.4. Güneş Pili Yapısı ve Kullanım Alanları

Güneş enerjisinden, verimli olarak yararlanma yöntemi güneş pilleridir. Güneş pilleri, güneşten gelen enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren yapılar olarak kullanılmaktadır.

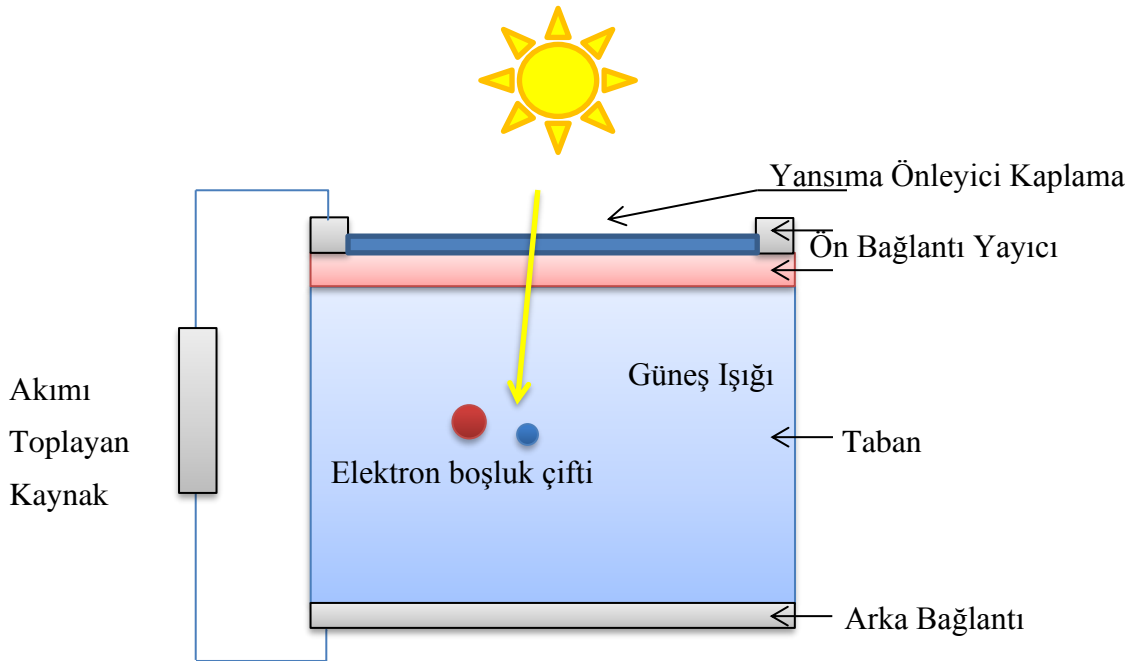
Güneş pilinin çalışma şekli, fotovoltaik olayına dayanmaktadır. 1839 yılında Becquerel, elektronların birbiri arasındaki gerilimin, elektrolit üzerine gelen ışığa bağlı olarak değiştiğini tespit etmiştir (Karamanav, 2007: 6). Smith, Selenyum'un (Se) fotoiletkenlik özelliğini gözler önüne sererek 1873 yılında ilk fotovoltaik düzenek oluşumu ile tarihte yerini almıştır. Adams ve Day ise, 1873'de katı maddelerin fotovoltaik özelliklere sahip olabileceklerini gözlemlemişlerdir (Demiroğlu, 2019: 51).

Fotonlar, güneş pili hücreleri üzerine geldiğinde, bir kısmı güneş hücrelerinin içinden geçer, bir kısmı aynen yansıtılır, geri kalan kısım da güneş hücreleri tarafından soğurulur. Güneş pilinin soğurduğu fotonlar elektrik üretmektedir.

Güneş pili modülleri akümülatör, invertörler ve çeşitli elektronik destek devreleri ile beraber kullanılarak fotovoltaik sistem meydana getirirler. Oluşturulan sistemler genellikle elektrik şebekesi bulunmayan, yerleşim yerlerine uzak bölgelerde, yakıt taşımanın maliyetli ve güç olduğu durumlarda kullanılmaktadır (Demiroğlu, 2019: 53).

Güneş pili hücrelerinin üst tabakaları kaplama ve korumalardan oluşmaktadır. Yansımayı önleyici kaplamalar çatlama, enerji kaybının ve kırılmaların önlenmesini sağlamaktadır. Bu kaplamaların alt kısımlarında n ve p tipi yarı iletken maddeler bulunmaktadır.

Güneş ışığını elektriğe dönüştüren aygıt güneş pilidir. Işık güneş piline düşmesiyle akım ve gerilim oluşturarak elektrik enerjisi elde edilmektedir (Gratzel, 2003: 146). Bu olay iki aşamadan meydana gelmektedir. İlki, tercih edilen malzemenin ışığı soğurmasıyla elektronun daha yüksek enerjiye ulaşması. İkincisi ise, yüksek seviyedeki elektronun güneş pilinden dış devreye doğru ilerlemesidir. Elektron, enerjisini ilk olarak devreye sonra güneş piline dağıtmaktadır (Ali, 2013: 9).



Şekil 2.4. Güneş Pilinin Yapısı

Kaynak: (Ertürk, 2019: 12)

Şekil 2.4. güneş pilinin yapısını göstermektedir. Güneş ışığı, yarı iletken malzemede elektron boşluk çifti oluşturmak için yeteri kadar enerjiye sahip olduğunda, geri birleşmeden önce oluşan elektron boşluk çifti dış devreyle toplanarak bir akım kaynağı oluşturmaktadır.

PV (Fotovoltaik) hücrede elektriksel güç elde edilebilmek için, fotovoltaik malzeme tarafından güneşten gelen fotonların soğurulmasıyla fotoakımın ve gerilimin üretilmesi gerekmektedir.

Güneş pilinin çalışmasındaki temel adımları; akımı meydana getirmek için ışığın kaynak taşıyıcılarıyla toplanması, güneş pilleriyle gerilim oluşturulması, güç kaynağı ve dirençteki güç kaybının oluşturulması şeklinde tanımlanabilir (Ali, 2013: 10).

2.5. Güneş Pili Çeşitleri

Güneş pili çeşitlerini 4 başlık altında inceleyebiliriz. Bunlar; p-n heteroeklem, p-n homoeklem, schottky eklem güneş pilleri ve organik ince film pilleridir.

2.5.1. p-n Homoeklem Güneş Pilleri

İki farklı tip iletkenliğe sahip olan yarıiletkenler (p-tipi ve n-tipi) arasındaki geçiş bölgesi p-n eklemi olarak tanımlanır (Öztürk, 2011: 20). P-n eklemler elektrik santrallerinin doğrusal olmayan dönüşümü (doğrultucu modülasyon, jenerasyon vb.) ışığının elektrik enerjisine dönüşümü için mikro elektronikte ve başka bir çok alanda kullanılmaktadır (Karşlı, 2011: 18).

p-n homoeklem güneş pilinde, p-n eklem her iki kısmında da aynı kristal yapılı yarı iletken kullanılmaktadır. Ancak p-n homoeklem güneş pillerinde katkılama yöntemleri farklılık göstermektedir (Gezeroğlu, 2019: 23). Katkılama yöntemlerinde, dört ayrı p-n homoeklemlili güneş pili yapısı bulunmaktadır. Bunlar sıg homoeklemlili, ön yüzey alanlı, yüksek alçak yayınlı ve düşey homoeklemlili güneş pilleri olarak sıralanmıştır (Demiroğlu, 2019: 54).

Tek kristalli ya da çok kristalli (polikristal) olarak ayrı cins yarı iletken malzeme kullanılarak üretilmektedir. Çok kristallerin elde edilmesi zor ve pahalıdır. Ancak tek kristalden meydana gelen homoeklemlili güneş pillerine göre sıcağa karşı dayanıklı, yüksek verimli ve uzun ömürlüdür (Küpeli, 2005: 72).

p-n homoeklemlı güneş pillerinin yapısında en çok tercih edilen malzemeler, Silisyum (Si) ve Galyum arseniktir (GaAs). Bu iki malzemedenden de en yaygın olarak kullanılan silisyumdur. Çünkü silisyum tarafından meydana gelen p-n eklemının açık devre gerilimi daha büyüktür. Silisyum, germanyum da olduğu gibi kızılötesi ışınlara kadar uzanamamaktadır. Işık kaynağı olarak güneş kullanıldığında önemli sorun oluşturmamaktadır. Çünkü güneş ışığında en yüksek enerji ışınım, görünür bölgede yeşil ışınımdır. Bu da her iki madde için uygunluk göstermektedir (Küpeli, 2005: 72). Akkor ışık kaynağının kullanılmasında; germanyumun uçları arasındaki gerilim küçük olsa da, çıkışından elde edilen güç silisyuma göre daha büyüktür. Bunun nedeni germanyumun yasak bant genişliği silisyumdan küçük olmasıdır. Daha küçük enerjilerde fotoakım elde edilmesini sağlamaktadır (Köse, 1986: 44).

2.5.2. p-n Heteroeklem Güneş Pilleri

p-n heteroeklem güneş pillerinin kullanılmaya başlamasının temel nedenleri, daha kolay ve daha ucuza elde edilebilmesi, sıcaklığa ve radyasyona karşı daha fazla dayanması gibi özellikler göstermesidir (Küpeli, 2005: 76). Ancak heteroeklem güneş pilleri homoeklemlı güneş pillerinden daha düşüktür (Boz, 2011: 70).

Heteroeklem güneş pilinde p-n eklemının iki yanı da farklı iki yarı iletkenlerden meydana gelmektedir. Bu yar iletkenlerin bant aralıkları, elektron ilgileri ve katkı konsantrasyonları farklıdır.

Heteroeklem güneş pillerinin p-n eklemi üretilirken eklemın iki tarafının aynı kristal yapıda olması imkânsızdır. Aynı olmamasından dolayı yasak bant aralığında izinli enerji durumları ve geçiş bölgesinde birleşme merkezleri oluşmaktadır. Bu da p-n ekleminde tünelleme meydana gelmesine neden olmaktadır (Gezeroğlu, 2019: 25).

İki yarı iletken birleştirildiğinde, Fermi düzeyleri sistemin her tarafında aynı olmaktadır. Ancak sistemde iş fonksiyonlarının farkına eşit olan bir elektrostatik potansiyel engeli ortaya çıkmaktadır. Ayrıca p-n eklemının iletim bandı kenarında, bant aralıkları farkına bağlı süreksizlikler oluşmaktadır. Meydana gelen bu süreksizlikler, fotovoltajik olay için uygun olmayan durumlardır (Küpeli, 2005: 76).

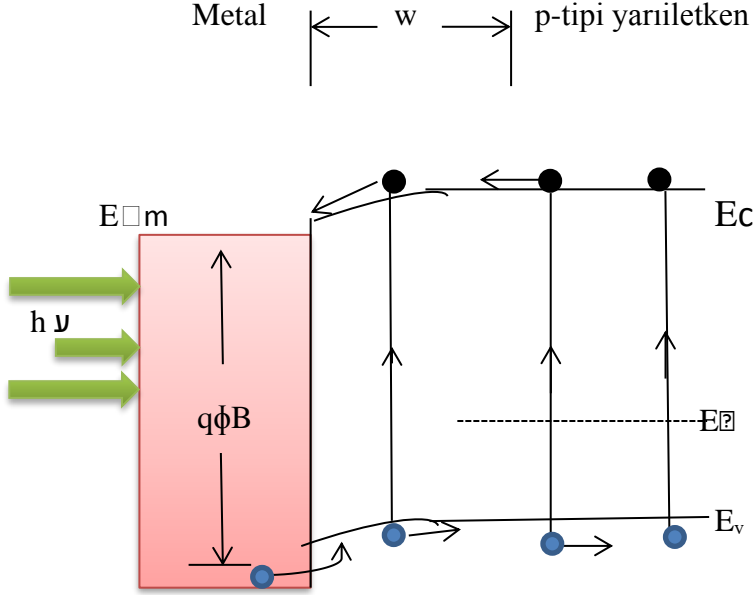
Heteroeklem ince film düzeneklerinin günümüzde yaygın olarak kullanımları şu şekildedir;

- Kadmiyum sülfür – bakır sülfür güneş pilleri (Yiğit, 2020: 5)
- Kadmiyum sülfür – bakır indium diselenit güneş pilleri (Aydın, 2016: 23)
- Bakır sülfüt – çinko kadmiyum sülfür güneş pilleri (Çıtanok, 2014: 9)
- Kadmiyum sülfür – silisyum güneş pilleri (Yiğit, 2020: 5)

- Kadmiyum sülfür – kadmiyum tellür güneş pilleri (Demiriz, 2019: 11)

2.5.3. Schottky Eklem Güneş Pilleri

Bu güneş pilleri yarıiletken üzerine 100 Å'dan daha ince metal film kaplayarak üretilmektedir.



Şekil 2.5. Schottky Eklem Güneş Pillerinin Enerji-Bant Diyagramı

Kaynak: (Demiroğlu, 2019: 56)

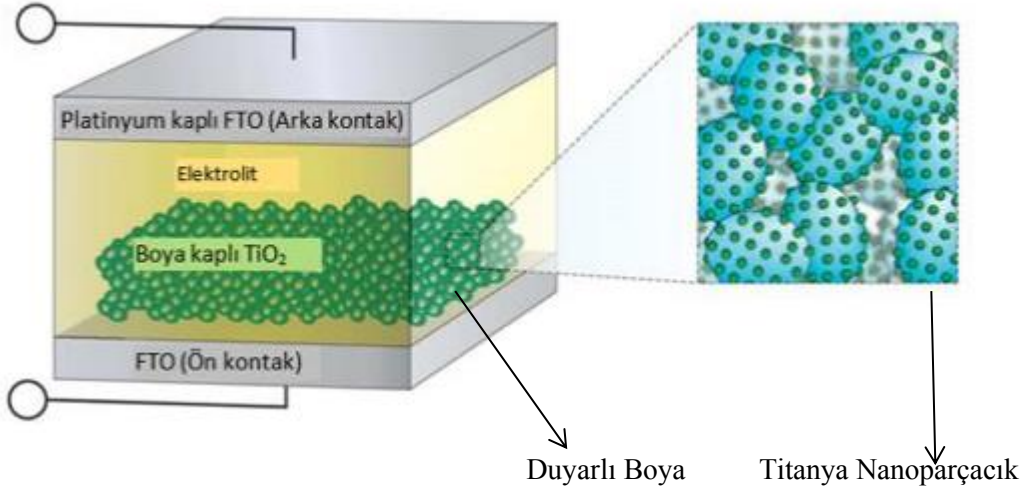
Şekil 2.5.'de p-tipi yarı iletken ile oluşturulmuş güneş pili için enerji bant diyagramı yer almaktadır. Metal yüzeyine ışık geldiğinde $h\nu > q\Phi_B$ enerjisi bulunan fotonlar metal içerisindeki boşlukları uyarmakta, yarı iletken ile metal arasındaki Schottky bariyerini geçerek yarı iletken içine geçmesini sağlamaktadır. $h\nu > E_g$ enerjisine sahip olan fotonlar yarı iletkenin içinden ve aşınma bölgesinden elektron boşluk çiftleri meydana getirir (Tatar, 2007: 11).

2.5.4. Organik İnce Film Pilleri

Yüksek verim ve düşük maliyet için yapılan çalışmalar sonucu, güneş pili endüstrisini üçüncü nesil güneş piline taşımıştır. İnorganik malzemeler yerlerini organik malzemelere bırakmıştır. Boyar maddeler ya da moleküler organik camlar gibi malzemeler tercih edilmeye başlanmıştır. Organik malzemelerin kullanımı ile büyük ölçekte ve düşük sıcaklıkta üretimler kolaylıkla yapılabilir duruma gelmiştir (Goetzberger vd., 2003: 43).

2.5.4.1. Boyar Madde Güneş Pilleri

Sistemin yapısı, absorpsiyonu sağlayan yüzeye yayılmış geniş bant aralıklı boya duyarlı yarı iletkenlere dayanmaktadır (Bagher vd., 2015: 99) Nanokristal yapıdaki oksit filmlerin, geniş absorpsiyon bandına sahip boya duyarlı madde ile kullanımı güneş ışığından geniş aralıkta yararlanılmasını sağlamaktadır (Grätzel, 2003: 148).



Şekil 2.6.. Boyaya Duyarlı Güneş Pili Cihazı Şeması

Kaynak: (Bagher vd., 2015: 99)

2.5.4.2. Hibrit Güneş Pilleri

İnorganik – organik hibrit güneş pilleri; hafif olması, esnek yapısı, sağlamlık, düşük maliyetli gibi organik ve inorganik yarı iletkenlerin avantajlarının bir arada kullanılması fikri ile meydana gelmiştir. Bu maksatla nano boyutta büyütülmüş inorganik yarı iletkenler, organik yarı iletken malzemelerle kombine edilmektedir (Demiroğlu, 2019: 59).

2.6.Güneş Pili Kullanım Alanları

Güneşin yeterli olmadığı zamanlarda veya özellikle gece boyunca kullanılacaksa mutlaka akümülatör bulundurulmaktadır. Güneş pili modülleri tüm gün elektrik enerjisi üreterek akümülatörde depolanır. Böylece enerji bu akümülatörden karşılanır. Akünün yüksek şarj ve deşarj olarak zarar görmemesi için denetim birimi akünün durumuna bağlı olarak güneş pilinden gelen akımı kesmekte veya yükün çektiği akımı durdurmaktadır.

Şebeke bağlantılı güneş pili sistemlerinde en yaygın görülen uygulama, binalarda küçük güçlü kullanım şeklindedir. Örnek vermek gerekirse, bir konutun elektrik ihtiyacı giderilirken, üretilen fazla enerji elektrik şebekesine satılır, yeterli enerjinin üretilmediği durumlarda ise şebekeden enerji alınır. Bu tür sistemde enerji depolaması yapılmasına gerek duyulmamaktadır. Sadece üretilen DC elektriğin, AC elektriğine çevrilmesi ve şebeke uyumlu olması yeterli olmaktadır.

Genel olarak güneş pilinin kullanım alanlarına baktığımızda şunları sıralayabiliriz;

- Haberleşme istasyonlarında,
- Telefon sistemlerinde,
- Su ve elektrik dağıtım sistemlerinde yapılan telemetrik ölçümlerinde,
- Bina iç-dış aydınlatmasında,
- Yerleşim yerlerinden uzak evlerde radyo, buzdolabı vb. gibi elektrikli eşyaların çalıştırılmasında,
- Tarımsal sulamada,
- Orman gözetleme kulelerinde,
- Deniz fenerlerinde,
- Deprem ve hava gözlem istasyonlarında,
- İlaç ve aşı soğutmalarında,
- Petrol boru hatlarında kullanılmaktadır.

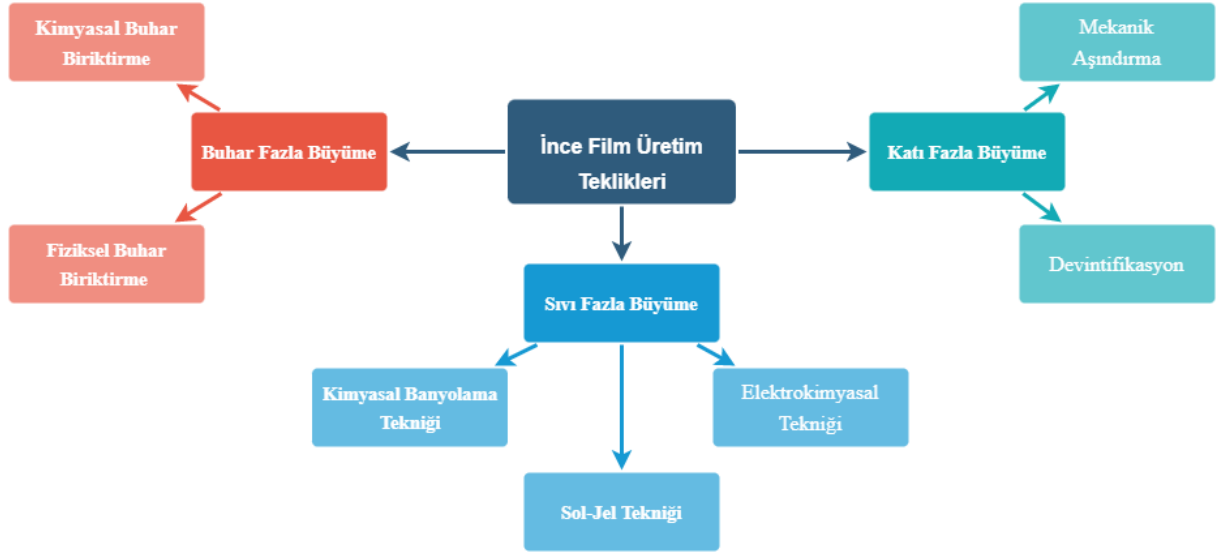
3. İNCE FİLMLER

İnce filmlerin ortaya çıkış sebebi ilk olarak seramik ve cam gibi yüzeylere motiflerin işlenerek dekoratif görüntü oluşturmak için kullanılsa da geliştirilen ince film üretme yöntemleri sayesinde günümüzde teknolojik cihazların çoğunda tercih edilmektedir. İnce film temel olarak gaz, sıvı ve katı formdaki kaplama malzemesinin, bir altlık yüzeyinde nano boyutlarda bir tabaka şeklinde biriktirilmesi işlemidir.

Transistörler, diyotlar ve sensörler gibi materyallerin yapımında kullanılan nitelikli, değerli ve az bulunan yarı iletkenleri malzemelerin tamamında kullanmak yüksek maliyetlere sebep olduğu için ince film yöntemleri alternatif yöntem olarak piyasada yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. İstenilen altlık malzemelerin üzerine farklı yöntemler yardımıyla nano boyutlarda kaplama yaparak maliyetleri büyük oranda düşüren bu yöntemler ayrıca yarı iletkenlik haricinde malzemelere görsel, fiziksel ve kimyasal özelliklerde de iyileştirmeler sağlayabilmektedir. Yarı iletken teknolojisinin küresel boyutlarda çok geniş kullanım alanları bulması ve elektronik pazarının olmazsa olmaz malzemelerinden biri olan ince filmler, hem bu özellikleri sayesinde hem yeniliğe açık olması sebepleriyle, araştırma ve geliştirme kapsamında akademik çalışmaların vazgeçilmez konularından birisi olmaktadır.

3.1. İnce Film Teknikleri

İnce filmlerin elde edilmesi ve kullanılacak altlık malzemelerinin üzerine biriktirme aşamaları çok farklı yöntemlerle uygulanabilmektedir. Kaplama metotları, buhar, katı ve sıvı fazda büyüme şeklinde yapılmaktadır. Bu metotların alt kısımlarında ise çoğunlukla fiziksel ve kimyasal yöntemler yer almaktadır. Yöntemler içerisinde kullanılan malzeme cinsi, pH, sıcaklık, konsantrasyon gibi parametreler değiştirilerek ince film yapısı, yüzeylere tutunma verimliliği, dayanıklılıkları değişkenlik gösterebilmektedir. Altlık malzemelere uygulanacak ince film yöntemlerinin doğru seçilmesi için yöntem proseslerinin ve kullanılacak malzemelerin yapısının çok iyi bilinmesi gerekmektedir. İnce film teknikleri üç gruba ayrılmaktadır. Bunlar; buhar fazla büyüme, sıvı fazla büyüme ve katı fazla büyümedir. Şekil 3.1.'de ince film üretim teknikleri diyagramı verilmiştir.



Şekil 3.1. İnce Film Üretim Teknikleri

3.1.1. Buhar Büyüme Yöntemi

3.1.1.1. Fiziksel Buhar Biriktirme

İnce filmlerin FBB yöntemleriyle biriktirilmesi birçok sanayi alanında yaygın kullanım alanı bulmuştur. Bu metotta kullanılan ekipmanlara çok bakım gerektirmemektedir. FBB ile üstün yüzeye tutunma, homojen katman oluşumu, kontrollü morfoloji, yüksek malzeme ve özellik çeşitliliğine sahip kaplamalar üretebilmektedir (Baptista v.d., 2018:22: 752).

Şekilli ince filmler; FBB ile kontrollü bir şekilde büyütülebilen, farklı morfolojilere sahip olan, nano boyutta kolonsal yapılar şeklinde tanımlanmaktadır. FBB; vakum ortamında katı olan bir malzemenin sıçratılarak ya da buharlaştırılarak atomların yüzeyinden koparılması ve malzeme yüzeyine biriktirilmesi esasına dayanır (Aytaç ve Malayoğlu, 2018: 154). FBB, buharlaşma ve sıçratma olarak iki alt başlıktan oluşmaktadır.

3.1.1.1.1. Buharlaştırma

Bütün maddeler buharlaşma, erime ve kaynama sıcaklıkları gibi birçok ayırt edici özelliklere sahiptir. İnce film olarak yüzeye biriktirilecek malzeme öncelikle buharlaşma işleminin uygulanması için ısıtılmaktadır. Buharlaştırılan malzeme sıcaklık olarak daha soğuk bölgede yer alan altlık materyalin üzerine taşınmasıyla ince film biriktirme işlemi gerçekleşmektedir. Bu yöntemde ısıtma işlemi farklı şekillerde uygulanarak buharlaştırma meydana gelmektedir (Bilgen,2015: 10).

Buharlaştırma işlemi genellikle daha düşük atom enerjisine sahip, yüksek vakum basıncına ihtiyaç duyulan, altlığa tutunmanın zayıf olduğu bir yöntemdir. Bu nedenle, buharlaştırma işlemi genellikle endüstriyel uygulamalar ve yüzey morfolojisinde kalite gereksiniminin yüksek olmadığı kalın filmler için daha uygundur (Baptista v.d., 2018: 753).

Buharlaştırma yöntemi de kendi içerisinde farklı başlıklar altında değerlendirilmektedir. Bu yöntemlerden bazıları; endüktif, lazer, rezistans ve elektron demeti buharlaştırma yöntemleridir.

Endüktif yöntemle yapılan buharlaştırma işleminde, pota çevresine sarılmış bakır tellere indüksiyon akımı uygulanmaktadır. Bu akım neticesinde ısı meydana gelmekte ve bakır teller soğuk su yardımı ile soğutulmaktadır. Erime sıcaklığı yaklaşık 2100 °C'ye kadar çıkabilen tüm materyallere uygulanabilmektedir. Bu yöntemin en büyük dezavantajlarından bir tanesi maliyetlerin yüksek olmasıdır (Sönmezoğlu v.d., 2012: 396).

Lazerle buharlaştırma yönteminde, üzerine film biriktirilecek altlık malzemeye vakum odasından lazer kaynağıyla buharlaştırma işlemi yapılır. Buharlaştırılacak filmin ışıyım soğurma özelliğini, kullanılacak lazerin dalga boyunu belirlemektedir. Bu yöntemde, erime sıcaklığı yüksek olan lazer ışınını soğurma yeteneğine sahip metaller buharlaştırılabilmektedir.

Ateşe karşı dayanıklı malzemeler olan refrakter malzemeler bu yöntemde üzerine buharlaştırılacak malzemenin yerleştirildiği pota olarak kullanılmaktadır. Rezistans telleri potanın çevresine sarılarak ısıtma sürecini başlatır. Rezistans yardımıyla yapılan buharlaştırma yönteminde düşük iyonlaşma tabakaların yüzey üzerine tutunabilmesi zayıf iken, gözenekliliği yüksektir. Bu yöntem ile biriktirilen ince filmler genellikle dekoratif amaçlı çalışmalarda kullanılmaktadır (Bilgen, 2015: 10).

Yüksek enerjiye sahip iyonların elektron kaynağı sayesinde oluşturulup altlık malzemeye yönlendirilmesiyle meydana gelen enerjinin ince film malzemesini buharlaştırma prensibidir. Elektronların yönlendirilerek malzemeleri buharlaştırmaya yarayan bu metotta buharlaşma düzenli bir şekilde yüzeylere uygulanabilmektedir (Sönmezoğlu v.d., 2012: 40).

3.1.1.1.2. Sıçratma

Sıçratma metodu, hedef malzemelerin yüzeyinin, iyon tabancası veya plazma aracılığı ile atomik boyutta ve hızlandırılmış yüksek enerjiye sahip gaz iyonları tarafından bombardımanıyla, hedef malzemenin yüzeyinden koparılan atomların, buhar haline geçerek altlık materyallerin yüzeyine biriktirilmesi şeklinde uygulanmaktadır. Sıçratma genellikle, ince film biriktirme işlemlerinde, yüzey aşındırma ve yüzey analizinde kullanılmaktadır. Sıçratma metodunda soy gazların iyonları, hedef malzemeye değerek sahip oldukları enerjiyi malzemeye aktarır. Böylelikle malzemenin yüzeyinde bulunan atomları sıçratır (Bilgen, 2015: 11).

Sıçratma yöntemi manyetik alan, triyot ve doğru akım diyot sıçratma yöntemlerinden oluşmaktadır

3.1.1.2. Kimyasal Buhar Biriktirme

Kimyasal bileşiğin bir kapalı alan içinde faz olarak katı halden gaz haline geçmesiyle taban malzemelerin üzerine taşıyıcı gaz yardımıyla taşınarak difüzyon yolu ile birikir. Bu metoda kimyasal buhar biriktirme yöntemi denir. Biriktirmenin kalınlığı 10 mikrondan daha incedir. Kullanılacak altlık malzeme ve ince film malzemelerinin dayanıklılıklarına göre uygulama sıcaklıkları 1100 °C'ye kadar çıkarılabilmektedir. Materyallerin kristal yapıları, morfolojisi ve stokiyometrisi gibi parametreleri değiştirilerek süreçler kontrol edilir (Coşğun v.d., 2021: 50).

3.1.2. Sıvı Fazla Büyüme

Sıvı faz biriktirme yöntemi, ortam koşulları altında sulu çözeltilerden ince oksit filmler oluşturmak için kullanışlı bir yöntemdir (Valiulis ve Silickas, 2007:2). Sıvı fazda biriktirme işlemleri; elektrokimyasal, kimyasal banyolama ve sol-jel metodu yöntemlerinden oluşmaktadır.

3.1.2.1. Sol-Jel Yöntemi

Sol-jel, ucuz, kolay ve mükemmel biriktirme özelliklerine sahip olması gibi avantajları sebebiyle altlık materyaller üzerine biriktirme uygulamaları günden güne hız kazanmaktadır. Püskürtme ve daldırma gibi farklı yöntemlerle yapılmaktadır.

Sol- jel işlem süreci “sol” olan sıvı halden “jel” olan katı hale sol bileşiminin geçişini içermektedir (Perednis ve Gauckler, 2005). İnorganik olan sol ve jeller, yoğunlukla bir sıvı ortamında çözülmüş haldeki kimyasal rejanlardan sentezlenerek üretilirler (Gözükızıl, 2020:8; Museum, 2019: 96). Sol veya jelde kimyasal başlatıcı olarak isimlendirilen metal katyonu bulunan rejan bulunmaktadır. Bu formun kimyasal dönüşümü bir hayli karmaşıktır. Solün jele transformasyonu da moleküler seviyede aynı şekilde karmaşıktır. Reaksiyonlarda sol içerisinde konsantre olmuş koloidal parçacıkların jel içinde birbirlerine bağlanarak büyümesini ve sistemli dağılımının kontrolünü sağlamaktadır (Gözükızıl, 2020: 9). Kimyasal yöntemler içerisinde Sol-jel metodu, öncelikle sol olan solüsyonun birtakım işlemlerden geçirilerek jel haline dönüştürülmesi esasına dayanmaktadır. Sol, hazırlanan çözelti içerisinde yer alan katı parçacıkların kararlı süspansiyonudur. Jel, yapı olarak yoğun bir katı ve sıvı karışımına sahip formdur. Her sol bir jel olmamakla birlikte, jelin elde edilmesindeki en önemli kısım, çözücü ve çözünen en küçük parçacıkların birbirleri arasında bağ kurmasıdır. Zayıf ve kuvvetli bağlarla birbirlerine bağlanan moleküller ve aralarındaki boşlukların içerisinde yer alan sıvılar, iskelet formunda dokular meydana getirmektedir. Bu sayede sıvı ortamın bağlar ile birleşmesiyle ortaya çıkan akışkan olmayan jel meydana gelir (Toygun, 2013: 461).

Konvensiyonel metotlarla, inorganik yapıya sahip seramik, cam gibi materyalleri oluşturmak için yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu proseslerde sıcaklıklar yaklaşık 1600 C°'ye kadar çıkabilmektedir. Yüksek sıcaklıklar taşıyıcılarda tahribata sebep olduğu gibi çalışma süreçlerini de zorlaştırmaktadır. Film oluşumu için daha kolay yöntem olan kimyasal yöntemler uygulamaları yoğunlukla tercih edilmektedir (Bardakçı, 2007: 40). Sol-jel metodu, biriktirme işlemlerinin çok katlı yapıldığı uygulamalarda daha kolay ve homojen bir film elde etmede yüksek avantajlar içerdiği için çok geniş bir kullanım alanına sahiptir (Gözükızıl, 2020: 10).

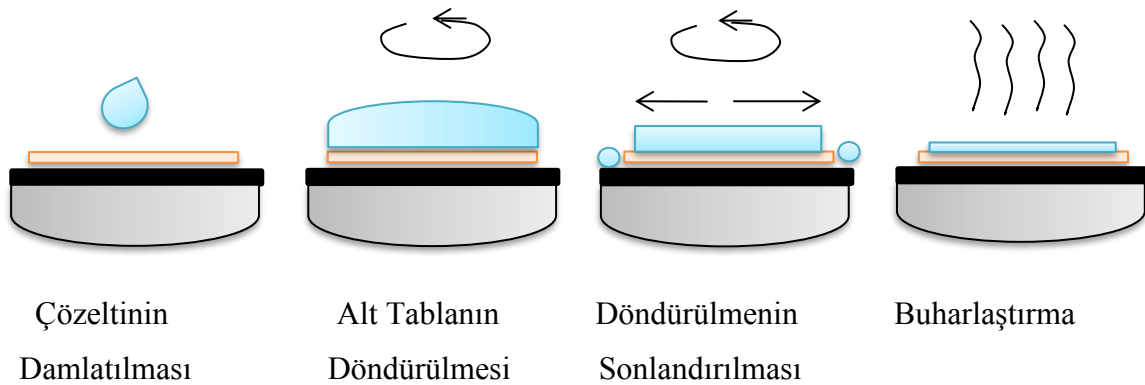
Genellikle biriktirme organik olmayan malzemelerde tercih edilmektedir. Teknolojik açıdan incelendiğinde en önemli detay, çözeltinin katı hale geçmeden önce hazırlanan çözeltinin döndürme, daldırma ve püskürtme gibi işlemlerinin ince film oluşumunda istenilen özelliklere ideal düzeyde sahip olmasıdır.

Sol-jel metodu vakum ortamına ve yüksek çalışma sıcaklığına ihtiyaç duyulmaması, süreç kontrolünün zor olmaması, sistemde gerekli olan ekipman teminlerinin kolaylığı, dış ortamla etkileşimde bulunmaması, hava kirliliği oluşturmaması, parametreleri değiştirerek yüzey geometrisi ve gözenek yapılarının değiştirilebilmesi, homojen yapı elde edilebilmesi ve enerji sarfiyatının yüksek olmaması gibi avantajlara sahiptir (Bardakçı, 2007: 42). İşlem süreçlerinde kullanılan bazı kimyasal maddelerin sağlığa zararlı olması, katmanlı film oluşturma sürelerinin uzun olması, solüsyon kaybının fazla olması, büyük çapta uygulanacak biriktirmeler için maliyetlerin yüksek olması ve çözeltilerin ömrünün uzun olmaması bu yöntemin dezavantajlarıdır.

Sol-Jel metodu daldırma, döndürme, akma ve püskürtme ile kaplama olmak üzere dörde ayrılmaktadır.

- Döndürme İle Kaplama Yöntemi (Spin Coating)

Döndürerek kaplama yöntemi; genellikle sert, eğimi az, düz altlıkların yüzeylerine ince filmler biriktirmek için yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Kaplanacak yüzey belirlenen yüksek hızlarla döndürülür. İnce filmler bir alttaş yüzeyinin, hazırlanan sol-jet çözeltisi damlaları ile kaplanmasıyla oluşturulur ve oluşturulan bu tabakanın düzenli olması amacı ile döndürülür. İnce filmlerin oluşturulması Şekil 3.2.'de gösterildiği gibi 4 safhaya ayrılabilir. Bunlar; çözeltinin damlatılması, alt tabanların döndürülmesi, döndürme işleminin sonlandırılması ve buharlaştırma.



Şekil 3.2. Döndürerek Kaplama Tekniği

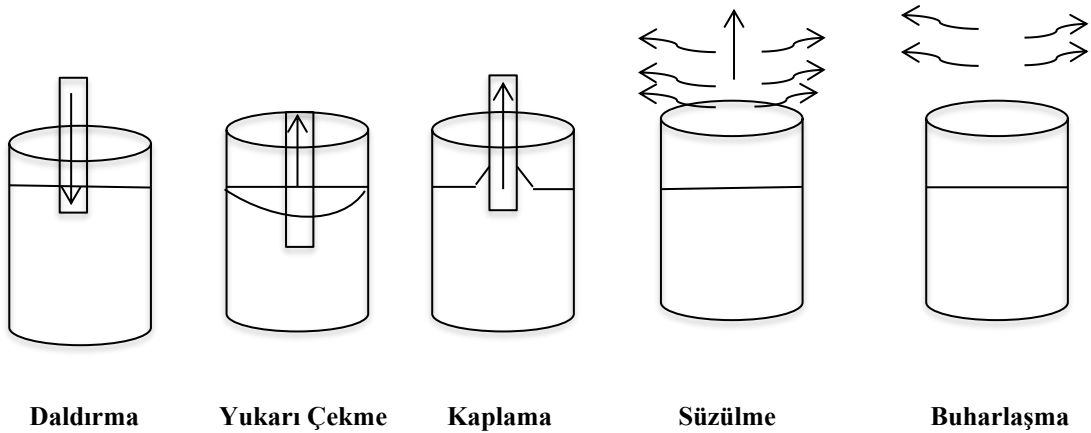
Kaynak: (Gözükızıl, 2020: 16)

İnce film oluşumunda döndürücüye yerleştirilen altlıkların yüzeyin kaplanması için ilk olarak yüzey üzerine bir miktar sıvı damlatılır. Ardından döndürme aşamasında damlatılan çözelti, dönme hızından oluşan merkezci kuvvet ile radyal hareketle kaplanacak olan yüzeyin dışına akmaktadır. Döndürme işlemi son bulduğunda, fazlalık olan sıvı kaplanacak yüzeyden taşar. Film kalınlıklarını azaltılması yüzeyde taşan sıvının miktarını da azaltır. Akışkanlığa karşı direncin artmasına uçucu olmayan madde konsantrasyonundaki artış da sebep olmaktadır. Filmlerin incelmesindeki en önemli adım buharlaşma aşamasıyla son bulur.

Döndürerek kaplama işleminin avantajı, yüzeyde oluşmaya başlayan film tabakasının düzgün olarak dağılmasıdır. Bunun sonucunda film kalınlığının kaplanacak yüzeyin tüm bölgelerinde homojen özellik göstermesidir. Film kalınlıklarının düzgün olması kaplanacak yüzeye damlatılan çözeltinin radyal olarak dışa doğru akması, merkezci kuvvet ve ters yönde gelişen sürtünme kuvveti ile sağlanmaktadır. Meydana gelen incelleme safhasında yer çekimi kuvveti ihmal edilerek merkezci kuvvetle oluşturulur (Gözükızıl, 2020: 16).

- **Daldırarak Kaplama Yöntemi (Dip Coating)**

Daldırarak kaplama yöntemi, cam, seramik, iplik, kumaş gibi altlıkların yüzeylerinin genel olarak saydam kaplamaların biriktirilmesinde kullanılmaktadır. Bu yöntem, hazırlanan başlangıç çözeltisinin içerisine seçilen altlık malzemesinin belirlenen sabit hızda daldırılması ve yine aynı hızla geri çekilmesiyle yapılmaktadır. Daldırarak kaplama yöntemi; farklı malzemeler arasından seçilen altlığın hazırlanan kaplama çözeltisine daldırılması, çözülden çıkarılması, altlıkların kaplanması, altlık yüzeyinden kaplama çözeltisi fazlasının süzülmesi ve buharlaşma aşamalarından oluşmaktadır (Sönmezoğlu vd., 2012: 399).

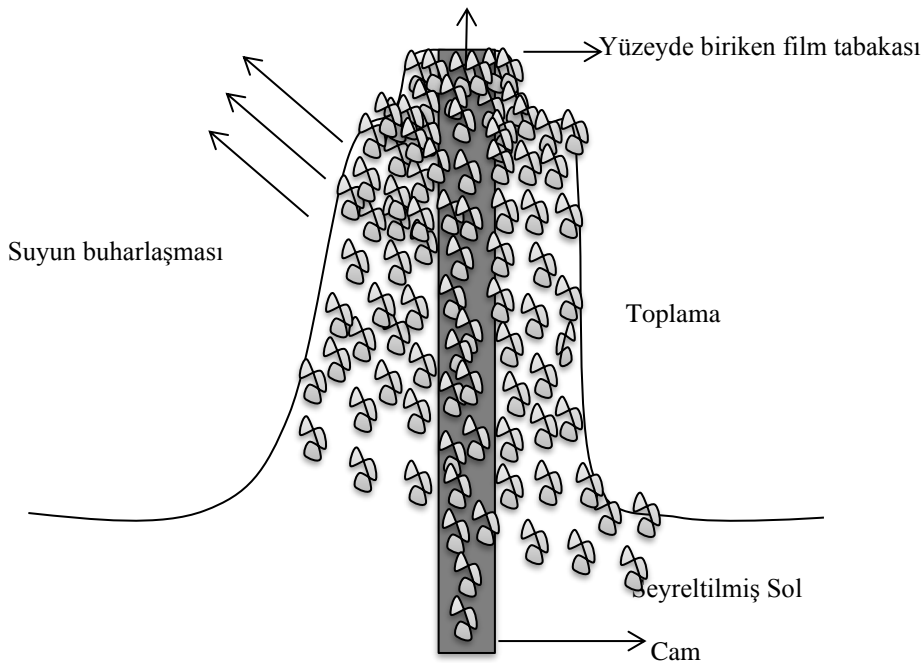


Şekil 3.3. Daldırarak Kaplama İşlem Basamakları

Kaynak: (Atar, 2013: 15)

Daldırarak kaplama süreci, altlık belirlenen sabit hızla, farklı parametrelerde hazırlanabilen, başlangıç çözeltisini içerisine daldırılmasıyla başlar. Kaplama çözeltisi içerisinde altlıklar kaplama parametrelerine göre belirlenen sürede bekletilir. Altlıklar, bekleme süresi tamamlandıktan sonra daldırma hızıyla yukarı doğru çekilerek kaplama çözeltisinden çıkartılır. Kaplama çözeltisi içerisinde bekleme sürecinde altlığın kaplama çözeltisi ile temasa giren kısımları kaplanmış olur. Şekil 3.3.'te daldırarak kaplama işlem basamakları gösterilmiştir. Çözelti içine giren alttaş ile alttaşı çevreleyen akışkan arasında mekanik sınır tabakası meydana gelir. Bu tabakada iki yönlü akış oluşumu gözlenir. Böylece alt ve dış tabaka olarak iki adet tabaka oluşur. Alttaşa yakın tabaka, alttaşa tutunarak yukarı yönlü hareket sergilerken, dış kısımda kalan tabaka çözeltide kalma ve geri dönme eğilimli hareket sergilemektedir. Sonuç olarak altlık yüzeyinde kaplama malzemesi biriktirilerek oluşan film tabakasının kalınlığı, akışkanın hareket eden tabakaların yönelimlerinin miktarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir Şekil 5.4.'te daldırarak kaplama yöntemi ile yapılan kaplama süresince çözücünün sistemden uzaklaşmasıyla meydana gelen jelleşme süreci gösterilmektedir.

Şekil 3.4.'te daldırarak kaplama yöntemi ile yapılan kaplama süresince çözücünün sistemden uzaklaşmasıyla meydana gelen jelleşme süreci gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Daldırarak Kaplama Yöntemi İle Kaplama Sırasındaki Jelleşme Süreci

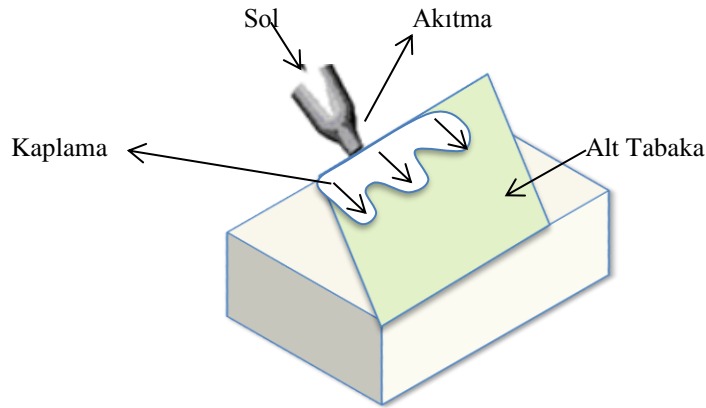
Kaynak: (Atar, 2013: 16)

Daldırarak kaplama yöntemi; farklı boyut ve şekillerdeki altlıklara göre daldırma düzeneğinin ayarlanarak kaplama yapılabilmesi, tüm sürecin kontrol edilebilir olarak ayarlanabilmesi, istenilen kalınlıkta ince filmler elde etmek için sürecin tekrar edilebilmesi, karmaşık, pahalı cihazlara ve vakuma ihtiyaç duyulmaması, yatırım ve üretim maliyetlerinin düşük olması, altlık yüzeyleri üzerinde homojen filmlerin elde edilebilmesi, atıkların tüm yüzeylerinin aynı anda kaplanabilmesi gibi avantajları ile yaygın olarak tercih edilmektedir.

- Akma İle Kaplama Tekniği

Akma ile kaplama tekniğinde kaplama kalınlığı, kaplama sıvısının viskozitesine, çözücünün buharlaşma hızına bağlı değişiklik göstermektedir. Polikarbonat yapısından oluşan sert yüzeylerin yapımında tercih edilmektedir. Avantajı, düzlemsel olmayan büyük numunelerin kolay bir şekilde kaplanmasını sağlamaktadır. Kaplama yapıldıktan sonra numunenin döndürülmesi homojen kaplama yüzeyi sağlamaktadır. Eğer döndürme işlemi yapılmaz ise kaplama kalınlığı üst yüzeyden alt yüzeye doğru kalınlaşmaktadır (Atay, 2008: 24).

Şekil 3.5.'te gösterilen akma yöntemiyle kaplama tekniğinde, kaplanacak altlık malzeme belirli bir eğimle askıda tutulur ve daha sonra kaplama çözeltisi yüzeye dökülür. Fazla olan çözelti altlığın yüzeyinden akarak bir tankta toplanır ve tekrar kullanılır.



Şekil 3.5. Akma Yöntemiyle Kaplama Tekniği

Kaynak: (Atay, 2008: 24)

- **Püskürtme İle Kaplama Yöntemi (Spray Pyrolysis)**

İnce filmlerin sulu çözeltileri hazırlanarak ısıtılan altlık üzerine basınçlı hava ve azot gazı yardımı ile mikron boyutlarında püskürtülerek biriktirme yapılmasıdır. Püskürtme yöntemi uygun maliyeti, kolay uygulanabilirliği, üretim sürecine müdahale kolaylığı, vakumlu bir düzeneğe ihtiyaç duymaması, üretim proseslerinin her basamağının adım adım kontrol edilebilmesi ve basit yapısı bakımından sıklıkla tercih edilen yöntemlerden bir tanesidir (Sönmezoğlu v.d., 2012: 397).

Püskürtme yöntemi kategori bakımından üç ana kısımdan meydana gelmektedir. İlk olarak başlangıç çözeltilerinin mikron boyutlarına indirgenmesi, damlacığın gaz ortamı içerisine transferi ve damlacık buharlaştırma, altlık üzerine yayma, kurutma ve ince film biriktirmesini sağlamaktır (Bilgen, 2015: 15). Birinci kısımda, çözeltiden damlacıklar oluşturularak hızla altlık üzerine gönderilmektedir. Damlacık içinde bulunduğu ortamdaki hareket eden termoforetik elektriksel, strokes ve gravitasyonel kuvvetlerin etkisine kalır.

İnce filmlerin biriktirme özellikleri genellikle hazırlama koşullarına bağlıdır. Altlık malzemelerin yüzey sıcaklığı, film pürüzlülüğü, çatlaması, kristallliği vb. sprey piroliz yönteminin en kritik parametrelerdendir (Perednis ve Gauckler, 2005: 50).

3.1.2.2. Kimyasal Banyo

Kimyasal banyo yöntemi, belirlenen kimyasallarla uygun stokiyometri göre hazırlanan çözeltiyle, altlıkların üzerlerine filmlerin elde edilmesidir. Farklı sıcaklıklarda hazırlanabilen banyoların içerisine çözeltilerin yerleştirilerek, kaplama çözeltileri istenilen sıcaklıkta sabit tutulmaktadır. Kimyasal banyo depolama yöntemi, uygun stokiyometriye sahip sulu çözeltileri hazırlanan kimyasal maddeleri kullanılarak uygun sıcaklıkta belirlenen altlıklar üzerinde film elde etme yöntemidir. Bu yöntemde, hazırlanan kimyasal banyo içine altlık daldırılır. Film üretmek için vakumlu ortama ihtiyaç yoktur. Bu yöntemde çözeltilerin pH'ı önemli rol oynar ve film oluşumu sırasında çözeltilerin pH'ı ve sıcaklığı aynı tutulmak zorundadır (Gözükızıl, 2020: 18).

Maliyetlerinin az ve uygulamasının basit olması, sıcaklık, başlangıç konsantrasyonu ve pH gibi deneysel parametrelerin kolaylıkla değiştirilebilmesi, hızlı olarak istenilen filmlerin üretilebilmesi, sıcaklık ayarının yapılabilir olması ile ilave bir tavlama işlemine ihtiyaç duyulmaması, farklı boyutlarda ve şekillerdeki malzemelere kaplama yapılabilmesi gibi avantajları sayesinde ince film üretim yöntemleri arasında tercih edilmektedir.

3.1.2.3. Elektrokimyasal Yöntem

Elektrokimyasal (elektroliz) biriktirme yöntemi, hazırlanan kaplama çözeltilerinin metalik veya metal olmayan altlıklar üzerine toplanmasıyla ince filmlerin kaplama işlemidir. Farklı şekillerde ve geniş alanlara sahip yüzeylerin kaplanması işleminde avantajlı bir yöntem olarak kabul edilmektedir. Yöntem ile üretilen filmlerin kalitesini, elektrolitin sıcaklığı, elektrolite ilave edilen kimyasalların türü ve miktarının yanı sıra hazırlana çözeltiyi oluşturan kimyasal ve katkı malzemeleri, çözeltinin pH değeri ve sisteme verilen akım miktarı da etkilemektedir. (Sönmezoğlu v.d., 2012: 398).

3.1.3. Katı Fazla Büyüme

Katı fazda büyütme işlemi genel olarak mekanik aşındırma ve devitrifikasyon olarak ikiye ayrılmaktadır.

3.1.3.1. Mekanik Aşındırma

Mekanik aşındırma, yüksek enerjili büyük taneli partiküllerin bozulması ile daha küçük kristali malzemelerin elde edilmesi işlemi olarak tanımlanabilir. Bu yöntem saf metaller, intermetalik ve alaşım sistemlerinde nanokristal yapıların üretilmesidir. Yüksek enerjili bilyalı değirmenlerde öğütülmüş malzemelerin tekrar birleşimi ile aşındırma cinsi miktarı ve süresi değiştirilerek tane boyutu ayarlanıp ince yapıda filmler elde etmek mümkündür (Çetinkaya, 2011: 64).

3.1.3.2. Devitrifikasyon

Devitrifikasyon, amorf yapıdaki malzemelerin belirlenen sıcaklıklarda ve sürede kontrollü kristalleştirilmesi ile elde edilen kaplamalardır. İlk olarak kristal fazın yüzeyde çekirdek oluşumu ve tanecik boyutun küçülmesi ile kristalimsi amorf yapı oluşur. Hızlıca katılaşma ve sıcaklığın düşmesi ile yapı kristalleşir. Kristalleşme parametreleri değiştirilerek kontrollü ve tane boyutu farklı filmler üretilmektedir.

3.2. İnce Filmlerin Büyüme Morfolojisi

Filmlerin yüzeyde büyüme morfolojisi üretilen ince filmlerin özelliklerini belirlemektedir. Filmlerin morfolojisi farklı parametrelerle kontrollü olarak değiştirilebilmektedir. İnce filmin büyütülmesi, çeşitli yöntemlerle kaplama malzemesinin atomlarının altlık yüzeyinde çekirdeklenerek yapıyı oluşturmaya başlar. Daha sonra atom çekirdekleri bir araya gelerek kararlı adalar oluştururlar ve adaların birleşmesi ile de film büyüme meydana gelmektedir. (Demir, 2007: 17). Yani çekirdeklenme ile başlayan büyüme süreci, büyümenin düzenli şekilde devam etmesi ile tüm yüzeyi homojen bir şekilde kaplayan ince film tabakasının oluşması ile sonuçlanmaktadır. (Sezgin, 2010: 22). Sıcaklık, altlığın yapısı, katman sayısı ve tane boyutu gibi parametreler büyüme basamaklarını değiştirmektedir.(Demiroğlu, 2019: 11).

3.3. İnce Filmlerin Kullanım Alanları

İnce filmler günümüzde elektronik cihazlarda, optik kaplamalarda, yarı iletken aletlerin bileşiminde ve bilgisayar teknolojisinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Kimyasal, biyolojik, optik ve elektronik uygulamalarda sıklıkla şekilli ince filmler kullanılmaktadır. Yüzeyle dik ve birbirlerine paralel kolonlardan meydana gelen ince filmler, kolonsal yapıdaki filmlerdir. Şekilli ince filmler ise, bükülmüş ve şekillendirilmiş kolonların bir araya gelmesiyle oluşmaktadır. Boşluklu ve gözenekli yapıya sahip şekilli ince film kolonlarının arasına, akışkanlar dağıldığında organik katılar ve sıvı kristaller gibi malzemeler girmektedir. Bu malzemeler ince filmlerin temel özelliklerini saf olmayan bir şekilde değiştirmektedir (Demiroğlu, 2019: 64).

3.4. Yarı iletkenler

Yarı iletkenlerin elektriksel özellikleri iletken ve yalıtkan malzemelerin arasında orta seviyededir. Bunun nedeni yarı iletkenlerin elektron enerjisi seviyelerinin özel bir düzende olmasıdır (Gözükızıl, 2020: 3). Orta sıcaklıkta yalıtkanlar 10^{14} ile 10^{20} Ω .cm aralığında özdirenç, iletkenlerde 10^{-6} Ω .cm'den daha küçük özdirenç sahiptir. Yarı iletkenlerin özdirençleri iletkenlerin ve yalıtkanların arasındaki bölgede 10^{-2} ile 10^9 Ω .cm aralığında değişiklik göstermektedir.

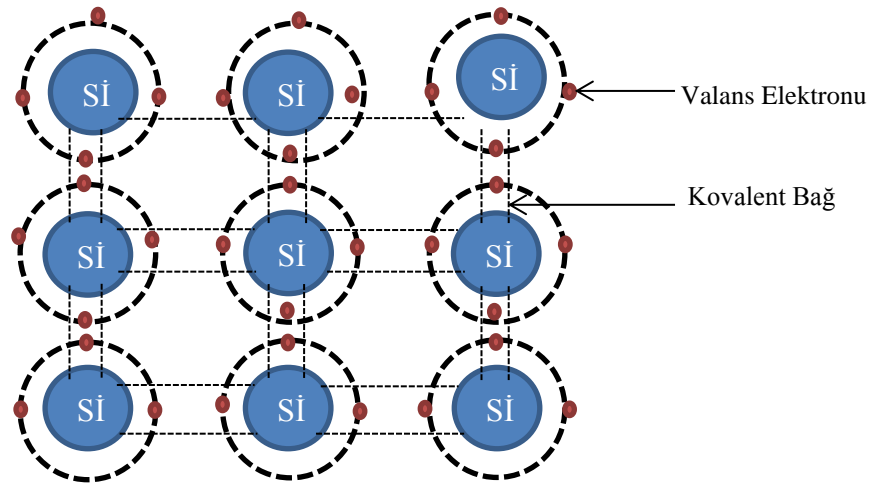
Yarı iletkenlerin özdirenç sıcaklığın artması ile küçülür, sıcaklığın azalması ile genişler. Böylece mutlak sıfır noktasına ulaştığında yalıtkanlık özelliğini göstermektedir (Dikici, 2012: 13).

Yarı iletkenler farklı kimyasal ve fiziksel özellikleri olan malzemelerdir. Bu maddeler, elementlerin periyodik cetveldeki yerine bağlı olarak, benzer davranışlı gruplara ayrılırlar. En çok bilinen yarı iletkenler periyodik cetvelde yer alan IV. sütunundaki C (karbon-elmas), Si (silisyum), Ge (germanyum) ve α -Sn (alfa-kalay) yarı iletkenlerdir. Si ve Ge elektronik teknolojisinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Dikici, 2012: 14).

Katkıyı oluşturmak üzere bir araya gelen çok sayıdaki atomların elektronları belirli enerjileri ile katıların bant yapılarını oluşturmaktadır. Elektronların uyarıldıklarında ulaşabilecekleri enerji bandına iletim bandı (E_c), kararlı durumda buldukları enerji bandına ise valans bandı (E_v) adı verilmektedir.

3.4.1. n-Tipi Yarı iletkenler

V.grup elementlerinden biri (P, As, Sb,...) IV. grup elementlerinden Silisyum (Si) kristaline katılarak n-tipi Si yarıiletkeni elde etmesi n-tipi katkılama işlemine örnek olarak verilebilir. Saf Si atomları, komşusu olan Si atomları ile kovalent bağ yapar. Şekil 4.1.'de bağlar Si atomunun valans elektronları ve ikişer elektron içeren bağ yapısı gösterilmektedir.

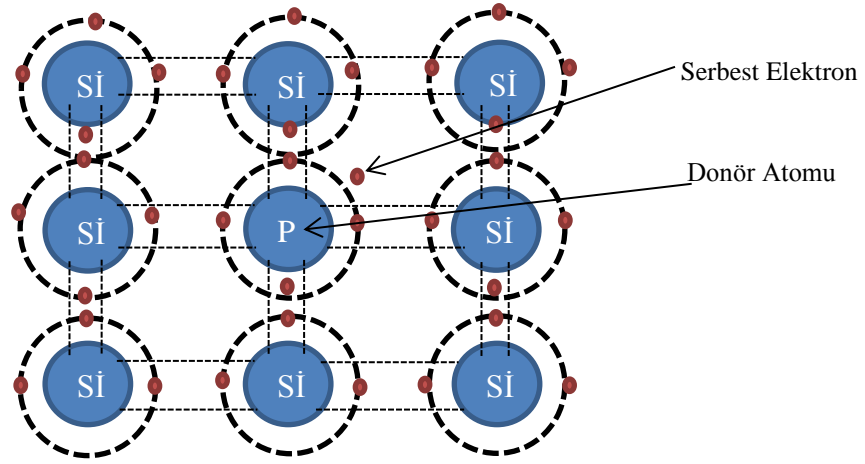


Şekil 3.6. Saf Silisyum Yapısı

Kaynak: (Gözükızı, 2020: 5)

Bütün elektronlar kovalent bağ ile bağ yapısına katıldıklarından, herhangi bir elektronun ileti bandına geçmesi için yasak enerji aralığına (E_g) eşit ya da daha büyük enerjiye ihtiyaç duymaktadır.

V.grup elementlerin yörüngelerinde beş elektronu olduğundan katkılama atomu olarak kullanılmaktadır. Şekil 3.7. deki gibi Si kristalinin Fosfor (P) ile katkılaması düşünüldüğünde fosforun valans bandında bulunan beş elektronunun dört tanesi Si atomları ile kovalent bağ oluştururken, bir elektron zayıf elektrostatik kuvvetle Si atomuna bağlanır ve az bir enerji ile buradan koparılabilir. Zayıf kuvvetle bağlı olan bu elektron Si atomu elektronlarının yasak enerji aralığı değerinden çok daha küçük bir enerji ile iletim bandına geçebilir. Valans bandından iletim bandına geçen elektrona karşılık bir boşluk oluşmamaktadır. Elektron veren P atomu donör atomu olarak adlandırılır. n-tipi yarı iletkenin azınlık taşıyıcıları boşluklar, çoğunluk taşıyıcıları da elektronlardır (Gözükızıl, 2020: 5).



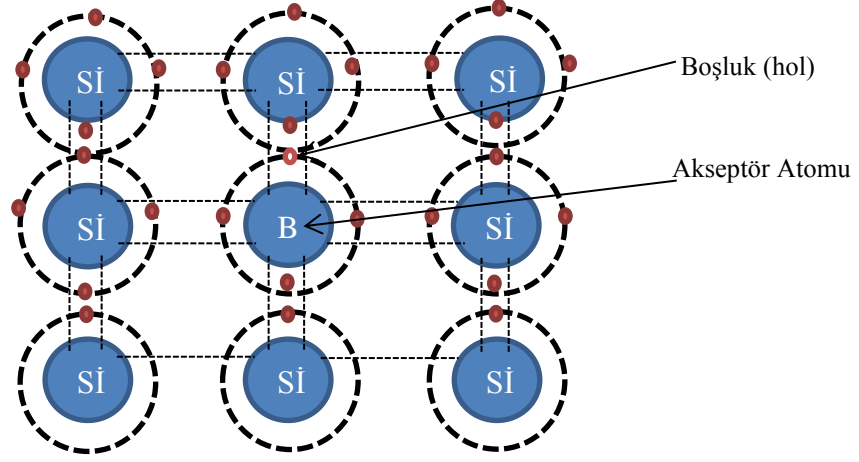
Şekil 3.7. Si Kristaline P Katkılanması

Kaynak: (Gözükızıl, 2020: 6)

3.4.2. p-Tipi Yarıiletkenler

p tipi katkılamada yarı iletken, akseptör atomları ile katkılanmıştır. Akseptör olarak periyodik tablonun III. grup elementlerinden (B, Ga, Al, In,...) biri, IV. grup elementlerinden Silisyum (Si) kristaline katkılanarak p-tipi Si yarıiletkeni elde edilmesi p-tipi katkılama işlemine örnek olarak verilebilir.

Şekil 3.8. de görüldüğü gibi, III. grup elementlerinden Bor (B), Si kristaline katkılanırsa, Si atomları ile borun üç elektronu kovalent bağ yapar ve kristalde bir boşluk oluşur. Komşu atomun elektronlarından biri çok az bir enerji ile buraya gelebilir. Böylece yasak enerji aralığından küçük bir enerji ile valans bandında boşluk meydana gelir (Gözükızıl, 2020: 6).



Şekil 3.8. Si Kristaline B Katkılanması

Kaynak: (Gözükızıl, 2020: 7)

3.5. Yarı İletken İnce Film Güneş Hücreleri

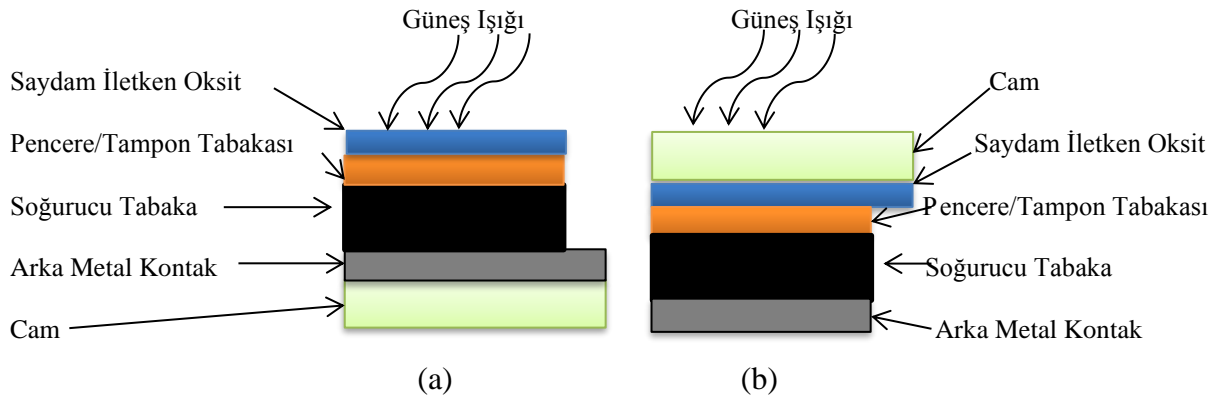
Küresel fotovoltaik güneş hücreleri pazarının önemli kesimde kristal Silisyum (c-Si) güneş hücreleri yer almaktadır. c-Si güneş hücreleri, güneş spektrumuna uyumlu olması, bol bulunması, temiz ve toksit içermemesi bakından avantajlıdır. Buna ek olarak fotovoltaik güneş hücreleri çalışma esnasında Co₂ üretmeseler bile, üretimleri esnasında önemli miktarda enerji tüketerek, Co₂'nin oluşmasına neden olmaktadır. Bu nedenle üretim maliyetlerinin geri dönüşü ve ekolojik dengenin korunması, gelecek teknolojilerinin seçilmesinde oldukça önemlidir (Luque ve Hegedus, 2011: 22).

3.6. Yarı iletken İnce Film Güneş Hücrelerini Oluşturan Tabakalar

Yarı iletken ince film güneş hücrelerini oluşturan 5 tabaka yer almaktadır. Bunlar; alttaş, saydam iletken oksit, pencere/tampon katmanı, soğurucu katman, arka metal kontaklıdır.

3.6.1. Alttaş

Alttaban diziliminde, mekanik destek için kullanılmakta olan alttaş en alt katmanda yer almaktadır. En üstte hücreye geçiş sağlar ve sırayla saydam iletken oksit ve pencere/tampon tabakasını aşarak soğurucu tabakaya gelir. Aşağıdaki Şekil 3.9.'da alttaban ve üst katman dizilimi gösterilmektedir.



Şekil 3.9. Yarı İletken İnce Film Güneş Hücrelerini Oluşturan Katmanların a) Alttaban Dizilimi b) Üst Katman Dizilimi

Kaynak: (Sarıca, 2017: 15)

Üst katman dizilimine bakıldığında, güneş ışığı mekanik destek ile kullanılan alttaştan geçerek sırasıyla saydam iletken oksit ve pencere/tampon tabakasına, oradan da soğurucu katmana ulaşmaktadır (Sarıca, 2017: 15).

3.6.2. Saydam İletken Oksit (SİO)

İnce film güneş hücrelerinde ön kontak malzemesi olarak işlevini sürdürmektedir. Burada ışığın soğurulmasından güneş hücresi içerisinde aktif bölgeye iletilebilmesi için yasak enerji aralığının genişliği ve tabakanın geçirgen olması önemlidir (Poortmans ve Arkhipov, 2006: 41).

3.6.3. Pencere/Tampon Katmanı

Yüksek sıcaklık süreçlerinde soğurucu katman ile SİO katmanı arasında kaçak akım mekanizmalarının oluşması fazla olduğundan, pencere/tampon malzemesinin çok ince üretilmesini kısıtlamaktadır (Sarıca, 2017: 17). Güneş hücresine değen ışığın pencere/tampon katmanı ile soğurularak fazla kayıplara uğramadan soğurucu katmana ulaşabilmesi için yasak enerji aralığı yeteri kadar geniş olmalıdır.

3.6.4. Soğurucu Katman

Güneş spektrumunun büyük bir kısmını soğurması ve sonucunda güneş hücrelerinden yüksek akım elde edilmesi beklenmektedir. Bundan dolayı, seçilen soğurucu katmanın yasak enerji aralığı bu durumu sağlamalıdır (Luque ve Hegedus, 2011: 631).

3.6.5. Arka Metal Kontak

Hücreyi tamamlayan arka metal kontak, herhangi bir gerilim kaybı oluşmaması için soğurucu tabaka ile omik iletim yapan ve düşük dirence sahip malzeme olmalıdır. Sahip oldukları düşük dirençleri nedeniyle, metaller arka kontak olarak tercih edilmektedir (Sarıca, 2017: 19).

3.7. Literatür Taraması

Günümüzde yarıiletkenler modern dünya ve teknolojinin vazgeçilmezi olarak düşünülmektedir. Teknolojinin gelişimine katkıda bulunan birçok cihazın yapımında kullanılan yarı iletken malzemeler günümüz elektronik sanayinin temel malzemesi haline gelmiştir. Ayrıca fosil temelli enerji kaynaklarının zamanla tükenmeye başlaması ve farklı enerji problemlerinin doğması alternatif enerji kaynakları arayışına sebep olmuştur. Alternatif enerji kaynaklarında aktif olarak kullanan yarı iletken malzeme üretim çalışmalarına da hız kazandırmıştır (Gençyılmaz, 2013). Yarı iletken malzemelerin pahalı, nadir olarak bulunması veya işlenmesindeki zorluklar sebebiyle malzemeleri bütünüyle kullanmak yerine ince film biriktirme yöntemleri ile yüzeylerde biriktirmeyi daha uygun hale getirmektedir. Kendine özgü yüzeysel özellikleri bulunan çeşitli malzemelere, AlO, CuO, FeO, ZnO, CdO ve TiO₂ gibi farklı metaller ile ince film kaplama işlemi yapılarak yarı iletken özellik kazandırılmaktadır.

TiO₂ ince filmleri, hem kimyasal hem elektrik ve hem de optik özelliklerinden ötürü değişik kullanım alanları ile önemli hale gelmiştir (Bardakçı, 2007: 45).

Öztürk (2011) tezinde farklı kalınlıklarındaki cam ve p-tipi silisyum altlıklar üzerine döndürerek kaplama yöntemiyle saf TiO₂ ince filmleri üretmiştir. Ürettikleri TiO₂ filmlerin optik, elektriksel ve fotovoltaiik özelliklerini incelemiştir. Kobalt tuzu ve farklı geçiş metalleri katkılama ile TiO₂ ince filmlerin fotovoltaiik özelliklerinin arttırdığı gözlemiştir.

Bardakçı (2007:60), titanyum n-butoksit, asetik asit ve deiyonize su, etanol başlangıç malzemeleri kullanarak TiO₂ ince filmler hazırlamıştır. Sol-jel yöntemi ile hazırladıkları film çözeltilerine daldırma yöntemi kullanarak, cam taşıyıcı yüzeyine TiO₂ ince filmler biriktirmiştir. Yapılan çalışmada kullanılan kimyasal maddelerin sağlığa zarar vermeyen ve yüksek saflıkta başlangıç malzemeler olması gerektiğini vurgulamıştır. Ayrıca sıcaklık nem gibi laboratuvar ortam özelliklerinin çözeltinin ömrü açısından önemli olduğunu belirtmiştir (Bardakçı, 2007: 64). Film kalınlığının, katman sayısı ve süreç arası kurutma işlemleri ile değiştirdiğini belirtmiştir. Katman sayısının artırılması ile film kalınlığındaki artışın orantılı olmadığını bunun nedeninin süreç arası kurutma işleminde filmin tam olarak kurumaması sonucu sonraki daldırma işleminde altlık üzerindeki ıslak filmin bir kısmının tekrar çözünmesi şeklinde açıklamıştır.

Biçer (2019: 20) tezinde dönel kaplama yöntemi ile cam alttaşlar üzerine Mn katkılı ve katkısız TiO₂ ince filmleri oluşturmuştur. %1, 3 ve 5 oranlarda Mn katkılı TiO₂ filmlerin anti bakteriyel özelliklerini incelemiştir.

Çalığıülü ve arkadaşları (2021: 15) sol-jel döndürerek kaplama yöntemi ile TiO₂ ince filmler üretmişlerdir. Üretilen TiO₂ esaslı ince filmlerin Ca katkı oranıyla kristal yapısının değiştiğini gözlemlemişlerdir. Döndürerek kaplama işlemi için optimum döndürme süresini, döndürme hızını ve film katsayısını belirlemişlerdir. Ca katkılama oranının TiO₂ ince filmlerin özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Katkılamanın artması ile yasak enerji aralığının arttığını tespit etmişlerdir.

Alam ve Cameron (2022) çalışmasında, titanyum dioksit (TiO₂) kullanılarak sol-jel işlemiyle silikon ve cam alt tabakalar üzerinde biriktirilmiştir. TiO₂ ince filmlerinin bağ konfigürasyonu, 400 ila 4000 cm⁻¹ dalga sayısı aralığında FTIR kullanarak analiz etmişlerdir. TiO₂'nin kristalliğini belirlemek için X-ışını kırınım ölçümlerini yapmışlardır.

Garzella v.d. (2000: 20) çalışmasına baktığımızda, polimer bir matris içinde dağılmış yeni ince titanyum dioksit filmleri, kimyasal olarak modifiye edilmiş bir sol-jel tekniği ile hazırlanmıştır. Saf TiO₂'nin nanoyapılı filmler , 500°C'de tavlama sonra elde edilmiştir. TiO₂ filmlerinin yapı karakterizasyonu için SEM, TEM ve TG/DTA kullanılmaktadır. Polimerin mikro yapıyı kontrol etmedeki rolü doğrulanmıştır. Bu tekniğin gaz sensörü alanındaki uygulaması bu çalışmada sunulmaktadır. Etanol ve metanol algılama özellikleri test edilmiş ve raporlanmıştır.

Sonawane ve Dongare (2006: 24) çalışmasında, cam substratlar üzerinde Au/TiO₂'nin ince filmleri, bir kolloidal altın katkılı titanyum peroksit kullanılarak basit sol-jel daldırma

kaplama yöntemini ile hazırlanmıştır. Hem koloidal altın hem de titanya konsantrasyonuna bağlı olarak 1-3 saat sonra viskoz bir jel oluşturmuştur. Au/TiO₂yi biriktirmek için belirli viskozite aralığının (140–2800 cps) solu kullanıldı cam slaytlar ve cam sarmal halkaları gibi çeşitli substratlar üzerinde eşit kalınlıkta ince filmler meydana gelmiştir. Kurutulduktan sonra cam plakalar üzerine bırakılan filmler şeffaf, renk ve kalınlık bakımından tek tip olduğu gözlemlenmiştir. Optimum altın yükleme konsantrasyonunun %1-2 (ağırlıkça) olduğu bulunmuş, bunun ötesinde altın parçacıkları jel ağını bozarak jelatinimsi çökelti oluşumuna neden olmuştur. Hazırlanan ince film fotokatalizör UV-vis, TG-DTA, XRD, ICP-OES ve TEM gibi çeşitli tekniklerle karakterize edilmiştir. İnce filmlerin foto-aktivitesi, model kirletici olarak fenol kullanılarak güneş ışığında test edildi.

Evtushenko v.d. (2015: 5), jel prosesi ile hazırlanan titanyum dioksit ince filmleri incelemiştir. İnce filmlerin optik özellikleri entegre optik yöntemi ile ele alınmıştır. TiO₂ ince film numunelerinin yapısı, X-ışını kırınımı, elektron mikroskobu, Fourier görüntüleri ve diğer tekniklerle incelenmiştir. TiO₂ bazlı filmin birçok uygulamada kullanılabilen anizotropiye sahip olabileceği gösterilmiştir.

Selmi v.d. 2022 yılında çıkardığı makalede TiO₂ ince filmlerle H₂ üretimi için fotokatalitik su arıtımı ve su ayırımı araştırmışlardır. TiO₂ ince filmlerin kristal yapı, yüzey alanı, ortalama parçacık boyutu ve gözeneklilik ile fotokatalitik ve su ayırma verimliliği üzerindeki güçlü etkisi özetlenmiştir. TiO₂ ince filmler, güneş enerjisinden ve sudan önemli verimliliklerle hidrojen üretme olanağına sahiptir.

Kazan 2021 yılındaki çalışmasında, Pulse Laser Deposition (PLD) tekniği ile cam altlık üzerine büyütülen TiO₂ ince filmlerin yapısal, optik ve elektronik özelliklerini incelemiştir. Filmlerin stokiyometrisi ve oksidasyon derecesi, yüksek çözünürlüklü X-ışını Fotoelektron spektroskopisi (XPS) ile Ti 2p ve O 1s çekirdek enerji seviyeleri dikkate alınarak analiz edilmiştir. İnce filmlerin yapısal özellikleri X-ışını Kırınım (XRD) ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) tekniği ile incelenmiştir. Büyüme TiO₂ filmlerinin optik absorpsiyon bölgesi, Fotoluminesans spektroskopisi (PL) tekniği ile analiz edilmiştir. Ti 2p durumlarının spin-yörünge birleştirme bölünmesi 5.7 eV olarak ölçülmüştür. Karakterizasyonlar, film yüzeyinde metal ve oksijen boşluklarının varlığını desteklemektedir.

Ma v.d (2018: 12) TiO₂ ince filmlerini imal etmek için püskürtme, sol-jel daldırma kaplama yöntemi, buharlaştırma, kimyasal buhar biriktirme ve ayrıca avantajlı bir epitaksiyel büyüme tekniği olan metalorganik kimyasal buhar biriktirme (MOCVD) gibi birçok teknik

kullanıldığını belirtmiştir. Bu yöntemlerin yüksek kaliteli kristal yapıya sahip ince filmlerin üretilmesinde sınırlamaları bulunmaktadır. Nano ölçekli TiO₂ üretimi için ilk olarak iyon implantasyon yöntemini tanıtmıştır.

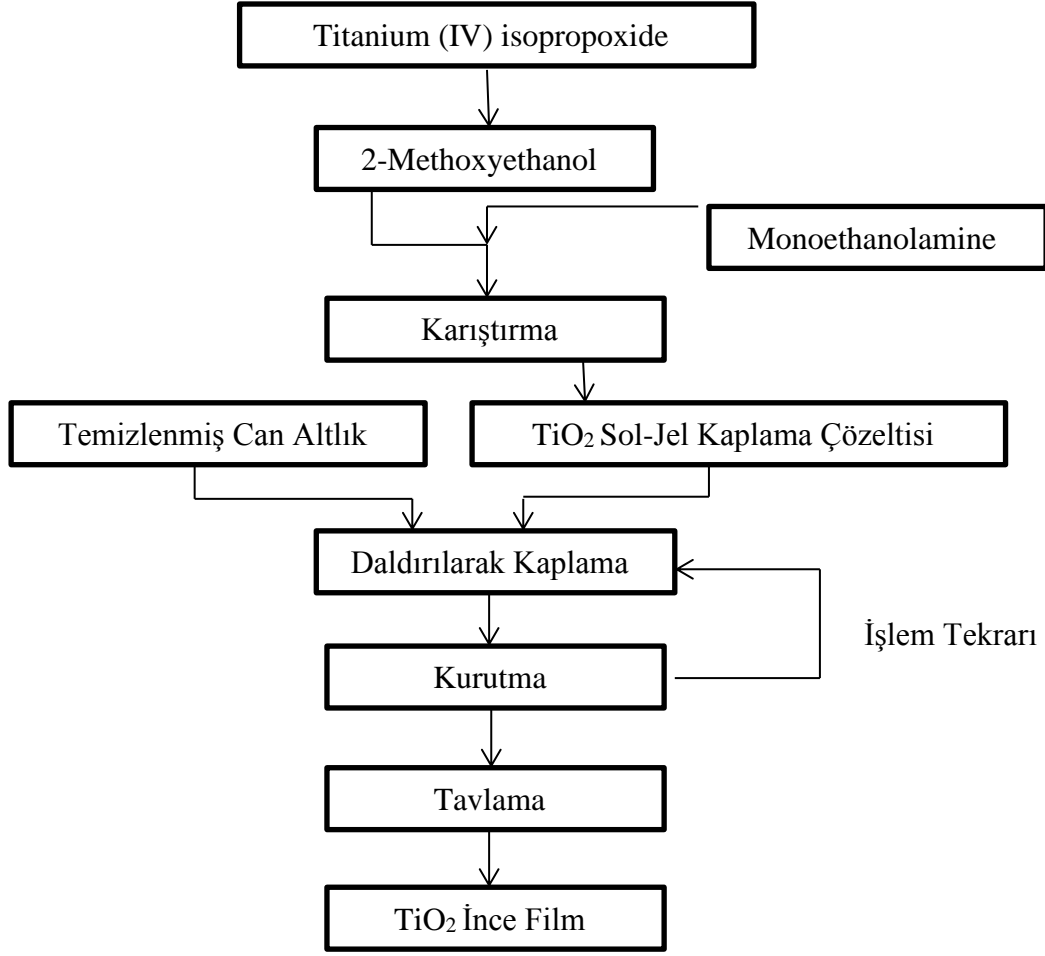
4. DENEYSEL YÖNTEM

4.1. Deney Parametrelerinin Belirlenmesi

Bu çalışma kapsamında TiO₂ ince filmlerin üretimi için, Sigma-Aldrich Titanium (IV) isopropoxide (TTIP) (Ti[OCH(CH₃)₂]₄) (Sigma-Aldrich 97% purity), 2-Methoxyethanol (CH₃OCH₂CH₂OH) (Sigma-Aldrich, ≥99% purity), Monoethanolamine (MEA) (NH₂CH₂CH₂OH) (Sigma-Aldrich) kullanılmıştır. Farklı Konsantrasyonlarda TTIP ile 2-Methoxyethanol içerisine 0,3 µl MEA ilave edilerek, 25°C sıcaklıkta, 150 dk karıştırılarak 100 ml Sol-jel çözeltisi hazırlanmış, 2 gün dinlendirerek kullanılmaya başlanmıştır. Al katkılama için alüminyum nitrat nonahidrat (Al(NO₃)₃.9H₂O) tuzu ve Cu katkılama için copper(II) acetate monohydrate (Cu(CO₂CH₃)₂.H₂O) tuzu ayrı ayrı 2-Methoxyethanol içerisinde çözülerek, oda sıcaklığında 2 saat süreyle karıştırılıp, 0,2 µl MEA stabilizatör olarak eklenmiştir. 100 ml olarak hazırlanan katkılama çözeltileri 2 gün oda sıcaklığında bekletilerek kullanıma hazır hale gelmiştir.

TiO₂ ince film kaplanacak malzeme olarak, ISOLAB firmasından mikroskop lamı seçilmiştir. Camlar 2cm yüksekliğinde 1cm eninde kesilerek, deiyonize su püskürtülerek yıkayıp, 100 °C sıcaklıkta kurutulduktan sonra, oda sıcaklığında bekletilerek kaplanmaya hazır hale getirilmiştir.

Kaplama yöntemi olarak daldırarak kaplama seçilmiştir. Şekil 4.1.'de kaplama prosesi yer almaktadır. Daldırarak kaplama yöntemini için ilk TiO₂ sol-jel kaplama çözeltisi belirlenen parametrelere hazırlanmıştır. Hazırlanan kaplama hazırlanan TiO₂ sol-jel kaplama çözeltisi içerisine temizlenmiş cam atıklar belirli sabit hızda daldırılmıştır. Cam atıklar çözelti içerisinde 90 saniye tutulmuştur. Çözelti içerisinden çıkarıldıktan sonra 110 °C fırında 150 saniye kurutma işlemi yapılmıştır.



Şekil 4.1. TiO₂ İnce Film Kaplama Prosesi

Daldırma işlem tekrarı yüzeyde istenilen kalınlıkta ve homojenlikte filmler üretebilmek için önemli bir parametredir. Daldırma süreç tekrar sayısı için birçok ön denemeler yapılmıştır. Daldırma tekrar sayısı 8'den az olduğunda yüzeyin tam ve homojen olarak kaplanmadığı ve 8. tekrardan sonra kaplanan yüzeyde yığılmaların başladığı, artarak devam ettiği ve jelleşmenin fazlaştığı gözlemlenmiştir. Daldırma kat sayı 8 kat olarak belirlenmiştir.

Çözelti başlangıç konsantrasyonu için 0.1M, 0.3M ve 0.5M belirlenerek ön denemeler yapılmıştır. Yapılan ön denemelerdeki gözlemler ve daha önceki çalışmalar incelendiğinde, Yazid vd. (2019); Maurani vd. (2020), TiO₂ sol-jel çözeltilerinin 0,5 M konsantrasyon da hazırlanmasına karar verilmiştir.

Tavlama sıcaklığı ince filmlerin yüzeyde oluşumu için bir diğer önemli parametredir. 0.5 M başlangıç çözeltisi ile 8 kat cam altlıklar üzerine biriktirilen TiO₂ ince filmler 300 °C,

400 °C ve 500°C’de tavlama yapılmıştır. Yapılan denemeler ve önceki çalışmalar incelendiğinde Dulian vd. (2019); Hakki vd. (2018); Timoumi vd. (2020); Beldjebli vd. (2022); Chibani vd. (2018) , daldırılarak kaplaması yapılan TiO₂ ince filmlerin yüzeyde kristalleşmenin sağlanması amacıyla 500°C’de tavlama yapılmasına karar verilmiştir. Daldırılarak kaplanan filmlerin serileri ve serilerin adlandırılması Tablo 4.1.’de gösterilmiştir.

İlk olarak 8 daldırma katsayısında 500°C tavlama sıcaklığında katkısız TiO₂ ince filmler üretilmiştir. Daha sonra %1, %3 ve %5 Al ve Cu katkılı TiO₂ ince filmler üretilmiştir. Daldırılarak kaplanan katkısız ve katkılı TiO₂ ince filmlerin serilerinin adlandırılması Tablo 4.1.’de gösterilmiştir.

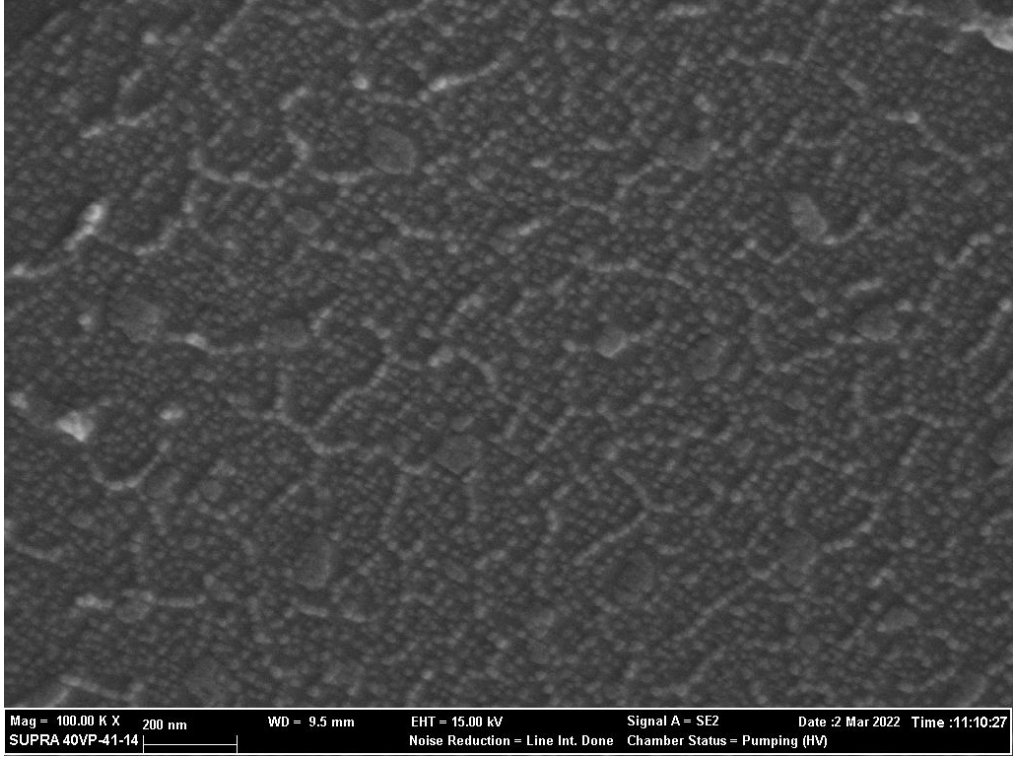
Tablo 4.1. Al ve Cu Katkılı TiO₂ Serilerin Adlandırılması

Katkı Malzemesi ve Miktarı	Seri Adı		Daldırma Sayısı	Tavlama Sıcaklığı (°C)
% 1 Al	TAL1	TAL	8	500 °C
% 3 Al	TAL3			
% 5 Al	TAL5			
% 1 Cu	TCU1	TCU		
% 3 Cu	TCU3			
% 5 Cu	TCU5			

4.2. Üretilen İnce Filmlerin Karakterizasyonu

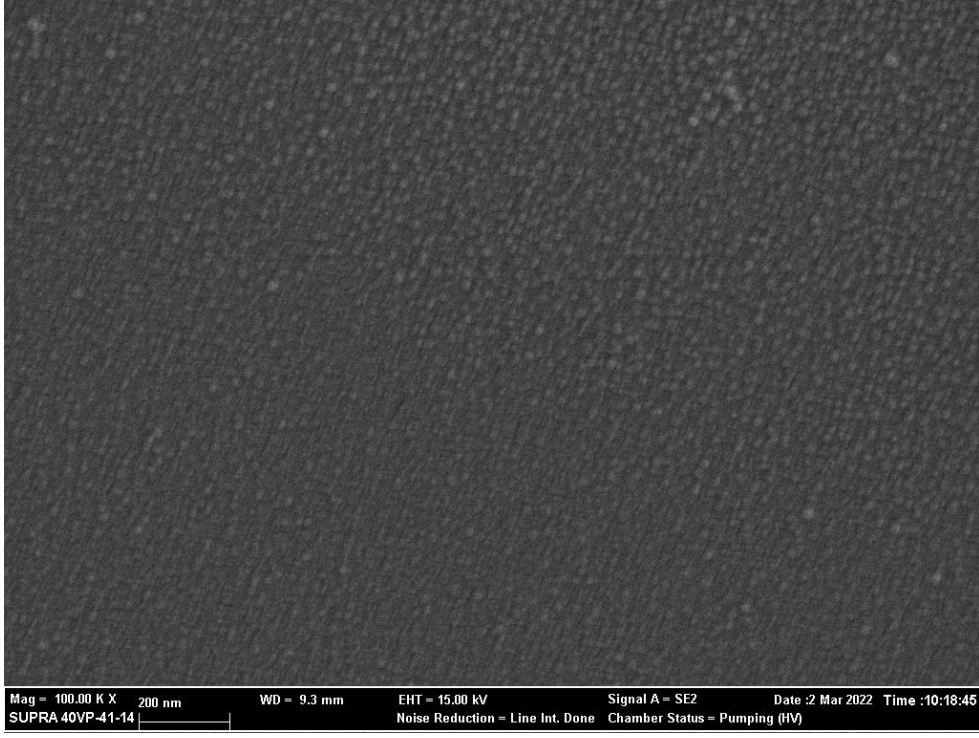
4.2.1. TiO₂ ve TAL Serisi İnce Filmlerinin Yüzeysel Karakterizasyonu

Daldırılarak kaplama yöntemiyle hazırlanan TiO₂, Al çözeltileri ile cam altlıkların üzerinde birikilerek Al katkılı ve katkısız TiO₂ ince filmler meydana gelmiştir. Üretilen katkılı ve katkısız TiO₂ filmlerin yüzey özellikleri ZEISS Supra 40VP Alan Emisyonu Taramalı Elektron Mikroskobu (FESEM) (Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvarı) kullanılarak incelenmiştir. Şekil 4.2 ‘de daldırılarak kaplama yöntemi ile cam altlıklar üzerine biriktirilen katkısız TiO₂ ince filmler gösterilmektedir.

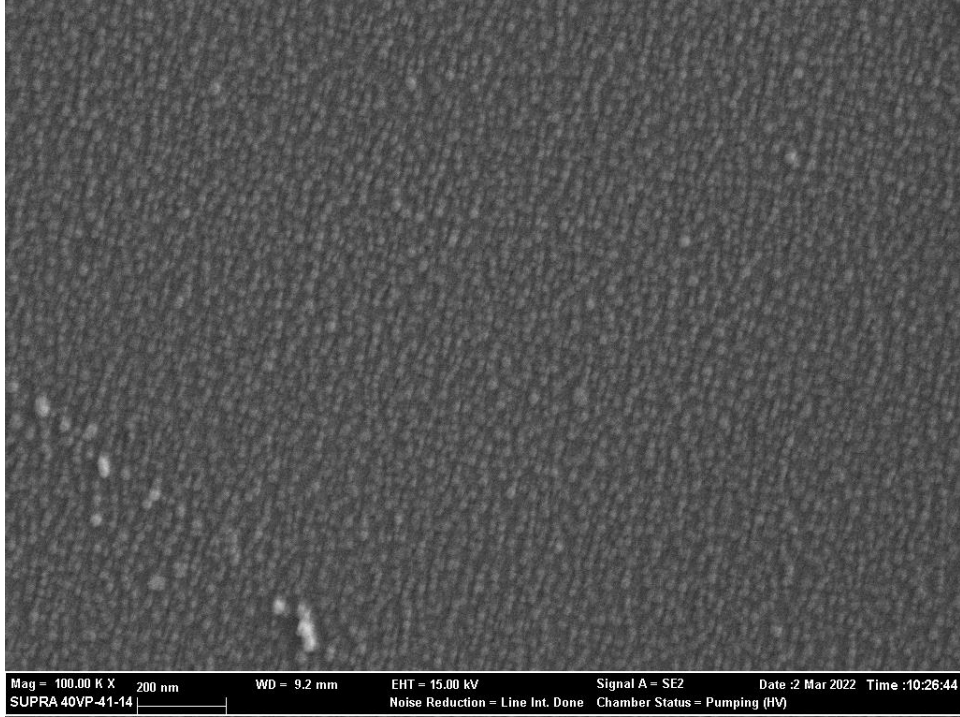


Şekil 4.2. TiO₂ Serisi İnce Film FESEM Görüntüleri

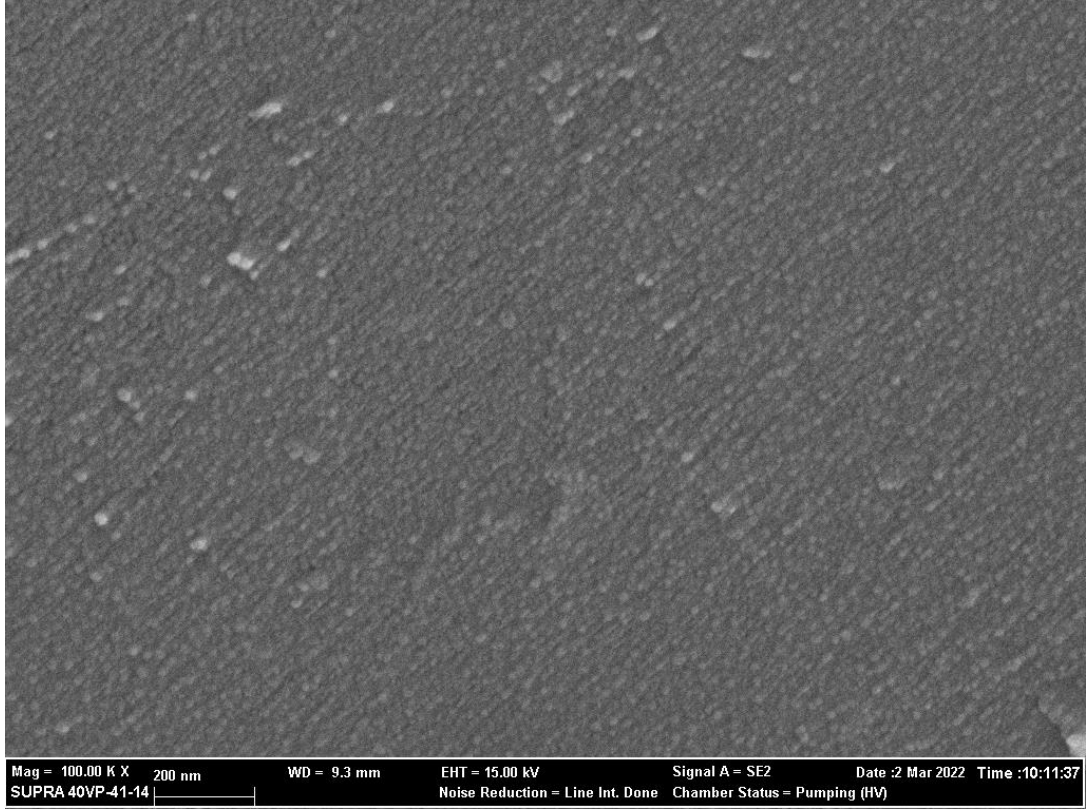
Şekil 4.3.- Şekil 4.4.- Şekil 4.5’de katkılı TAL serisi ince filmlere ait 100kx büyütme FESEM görüntüleri verilmektedir. Al katkılama ile TiO₂ İnce Filmlerinin yüzeyel özelliklerindeki değişiklikler gözlemlenmiştir. Katkılama miktarının yüzdelik olarak artırılması ile yüzeyde oluşan farklılıklar incelenmiştir.



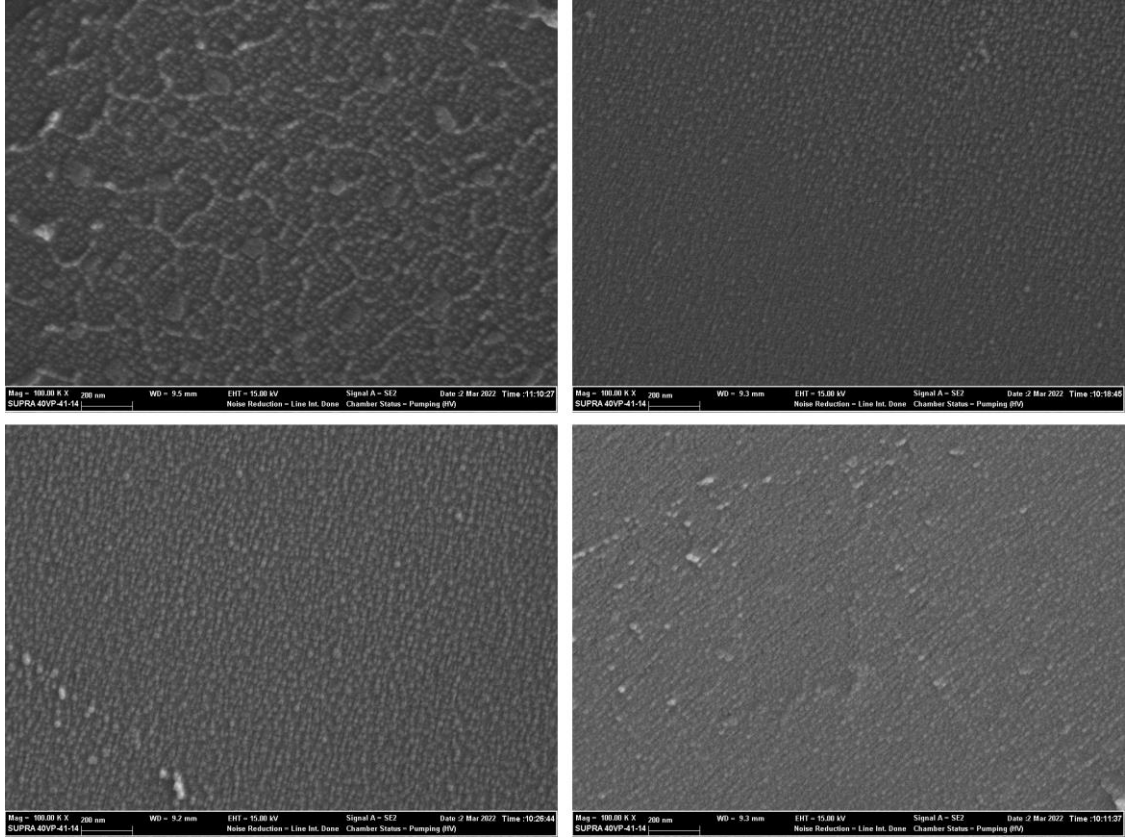
Şekil 4.3. TAL1 Serisi İnce Film FESEM Görüntüleri



Şekil 4.4. TAL3 Serisi İnce Film FESEM Görüntüleri



Şekil 4.5. TAL5 Serisi İnce Film FESEM Görüntüleri



Şekil 4.6. TiO₂ ve TAL Serisi İnce Filmlerin Karşılaştırmalı FESEM Görüntüleri.

Şekil 4.6.'da cam altlıklar üzerine katkısız TiO₂ ve TAL katkılı TiO₂ ince filmlerin yüzeysel özellikleri FESEM görüntüleri ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Görüntülere bakıldığında filmlerin yüzey üzerinde homojen ve boşluksuz bir şekilde dağıldığı gözlemlenmektedir. Al katkılamanın TiO₂ film katmanlarındaki tane boyutu ve yüzey düzgünlüğünü etkilediği, katkılama miktarının artırılması ile tane boyutunun küçüldüğü ve yüzeyin daha pürüzsüz olduğu görülmektedir.

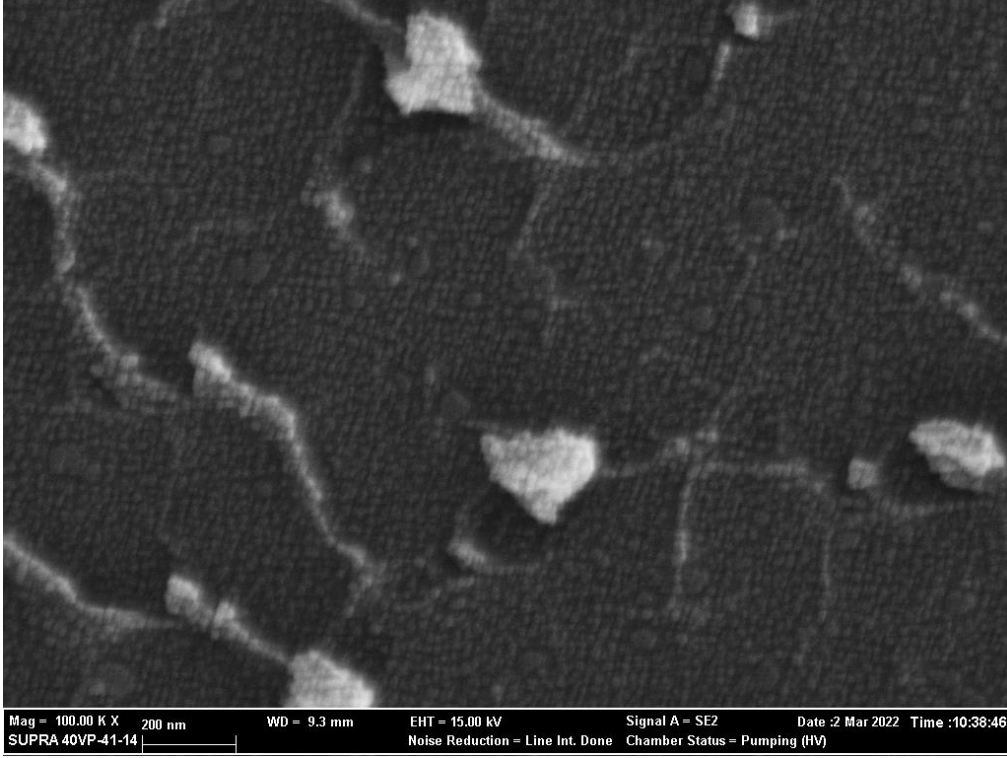
Tablo 4.2. TAL İnce Filmlere Ait EDX Sonuçları

Seri	Titanyum (Ti) Atomik Yüzde (%)	Oksijen (O) Atomik Yüzde (%)	Alüminyum (Al) Atomik Yüzde (%)
TiO ₂	36,18	63,82	-
TAL1	34,68	64,97	0,35
TAL3	33,55	64,88	1,57
TAL5	32,98	64,71	2,31

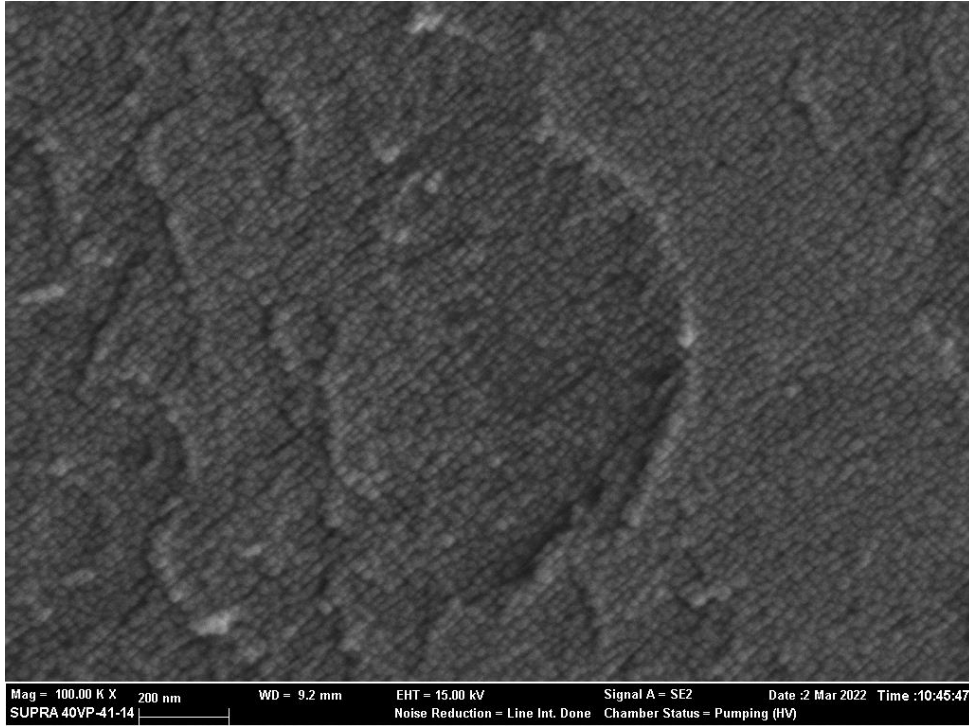
Tavlama işlemi ile yüzeyde kristalleşmenin sağlandığı TiO₂ filmlerin atomik yapıdaki bileşenlerini kontrol etmek için Enerji Dağılımlı X-Işını Spektrometresi (EDX) dedektörü kullanılarak kimyasal bileşimleri elde edilmiştir. Cam yüzey üzerinde büyütülen katkısız TiO₂ filmlerin spektrumunda Ti ve O dışında başka bir elemente rastlanmamış olup saf TiO₂ film oluşumu doğrulanmıştır. Tablo 4.2.'de TAL serisine ait EDX sonuçları incelendiğinde Al katkılama miktarının artması ile Ti atomik yüzdesinin azaldığı, O ve Al atomik yüzdesinin arttığı gözlemlenmiştir.

4.2.2. TCU Serisi İnce Filmlerin Yüzeysel Karakterizasyonu

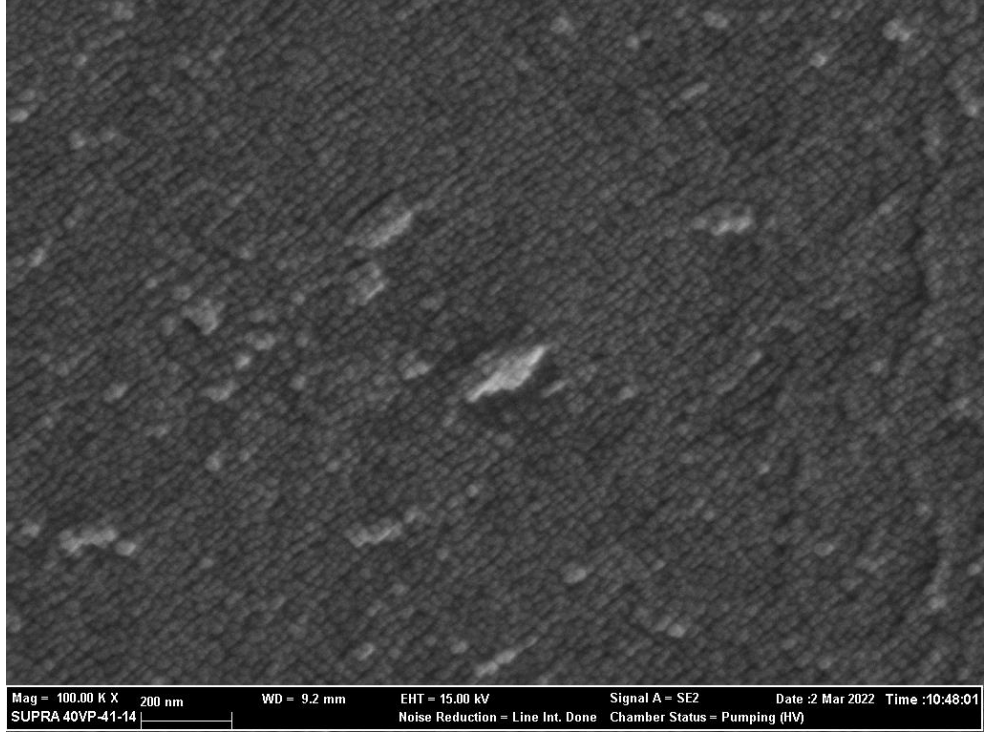
Daldırarak kaplama yöntemiyle hazırlanan TiO₂, Cu çözeltileri ile cam altlıkların üzerinde birikilerek Cu katkılı TiO₂ ince filmler üretilmiştir. Üretilen Cu katkılı TiO₂ filmlerin yüzey özellikleri alan Emisyonu Taramalı Elektron Mikroskobu ile incelenmiştir. Şekil 4.7–Şekil 4.8- Şekil 4.9'de katkılı TCU serisi ince filmlere ait 100kx büyütme FESEM görüntüleri verilmektedir. Cu katkılama ile TiO₂ İnce Filmlerinin yüzeysel özelliklerindeki değişiklikler gözlemlenmiştir. Cu katkılama miktarının yüzdelik olarak artırılması ile yüzeyde oluşan farklılıklar ve katkılama TiO tanecik boyut etkisi incelenmiştir.



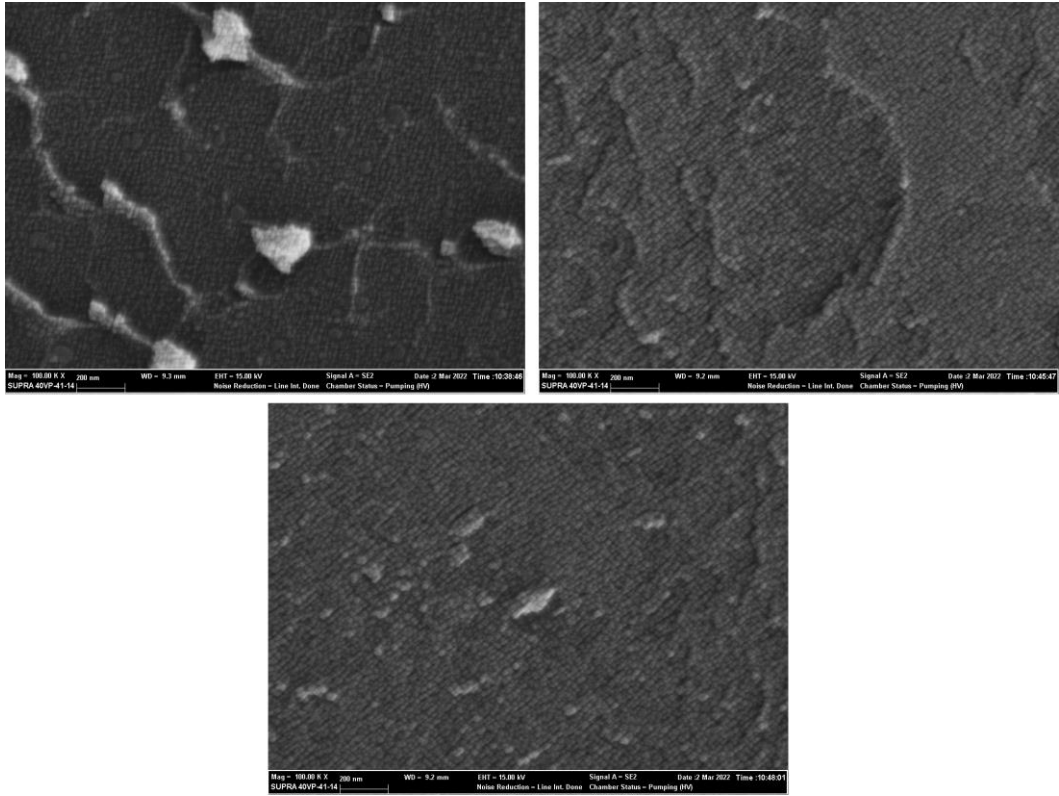
Şekil 4.7. TCU1 Serisi İnce Film FESEM Görüntüleri



Şekil 4.8. TCU3 Serisi İnce Film FESEM Görüntüleri



Şekil 4.9. TCU5 Serisi ince film FESEM Görüntüleri



Şekil 4.10. TCU Serisi İnce Filmlerin Karşılaştırmalı FESEM Görüntüleri

TCU Serisi için Şekil 4.10.'da gösterilen FESEM görüntüleri incelendiğinde, yüzeyin tümünde hemen hemen homojen nano boyutta tanelerin oluştuğu, tanelerin birebirleri ile iyi tutunduğu, aralarında boşluk olmadığı gözlemlenmiştir. Cu katkılama yüzdesi arttıkça Cu taneleri de görülmeye başladığı ve katkının yüzey üzerindeki TiO₂ filmi oluşturan taneciklerin yapısına dahil olduğu, katkılama ile tanecikleri büyüdüğü görülmektedir.

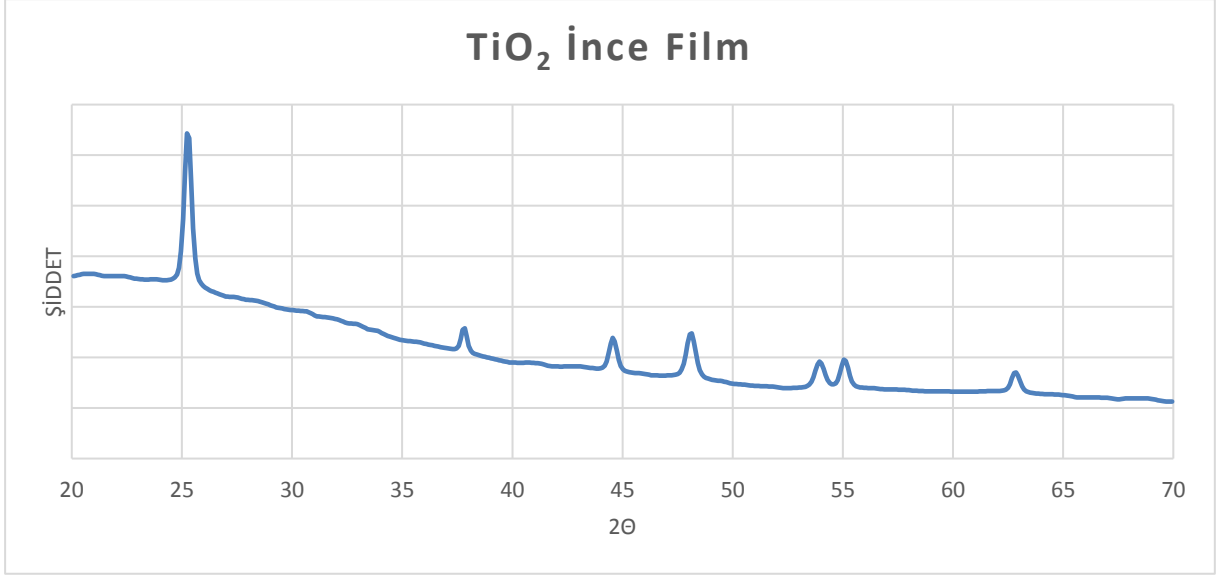
Tablo 4.3. TCU İnce Filmlere Ait EDX Sonuçları

Seri	Titanyum (Ti) Atomik Yüzde (%)	Oksijen (O) Atomik Yüzde (%)	Bakır (Cu) Atomik Yüzde (%)
TCU1	33,66	65,92	0,43
TCU3	21,79	77,18	1,03
TCU5	20,88	77,27	1,85

TCU serisi %1,%3 ve %5 Cu katkılı TiO₂ filmlerin atomik yapıdaki bileşenleri Tablo 4.3.'de karşılaştırılmıştır. Katkılama oranının artması ile yapıdaki Cu ve O miktarı artmakta, Ti miktarında ise belirgin oranda azalmaktadır. Bu da Cu yapısının TiO₂ film yapısına dahil olduğunu göstermektedir.

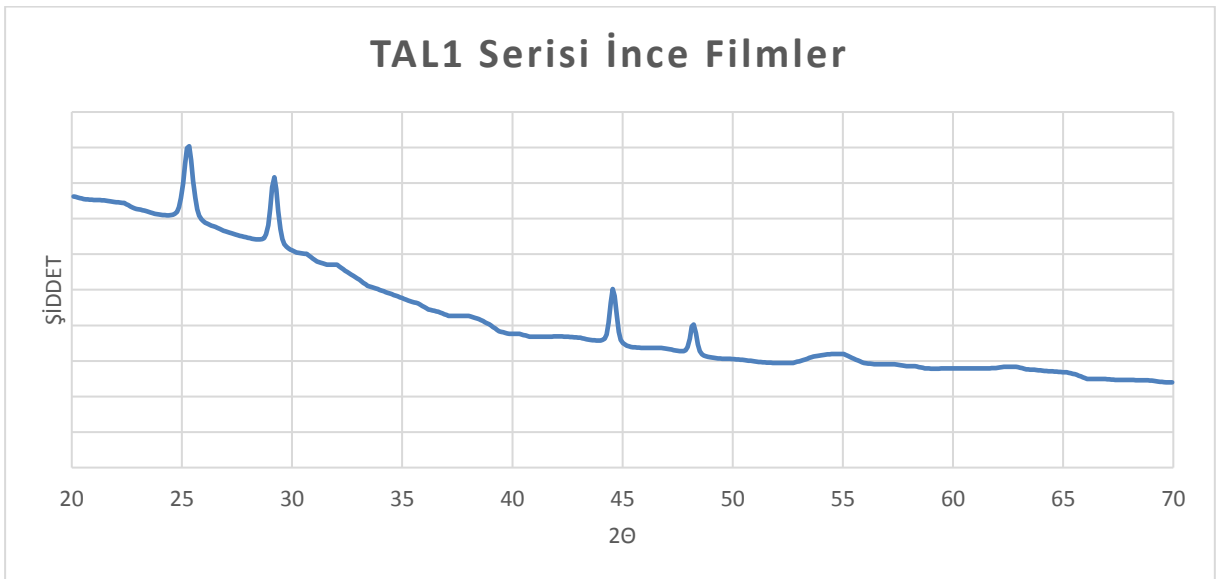
4.2.3. TiO₂ ve TAL Serisi İnce Filmlerinin Yapısal Karakterizasyonu

Kristal yapı analizinde ve karakterizasyonunda genellikle X-Işınım kırınımı tercih edilmektedir. Üretilen katkısız ve Cu, Al katkılı TiO₂ filmlerin yapısal özellikleri PANALYTICAL Empryan X-Işını Kırınımı (XRD) cihazıyla (Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvarı) incelenmiştir. Cihazın olarak 45 kV voltaj ve 40 mA akım çalışma şartlarında tarama hızı 2 derece/dakika seçilmiş, dalga boyu 1,5406 Å olan CuK α ışını kullanılmış ve numuneler $20^{\circ} \leq 2\theta \leq 70^{\circ}$ sınır değerlerinde incelenmiştir.

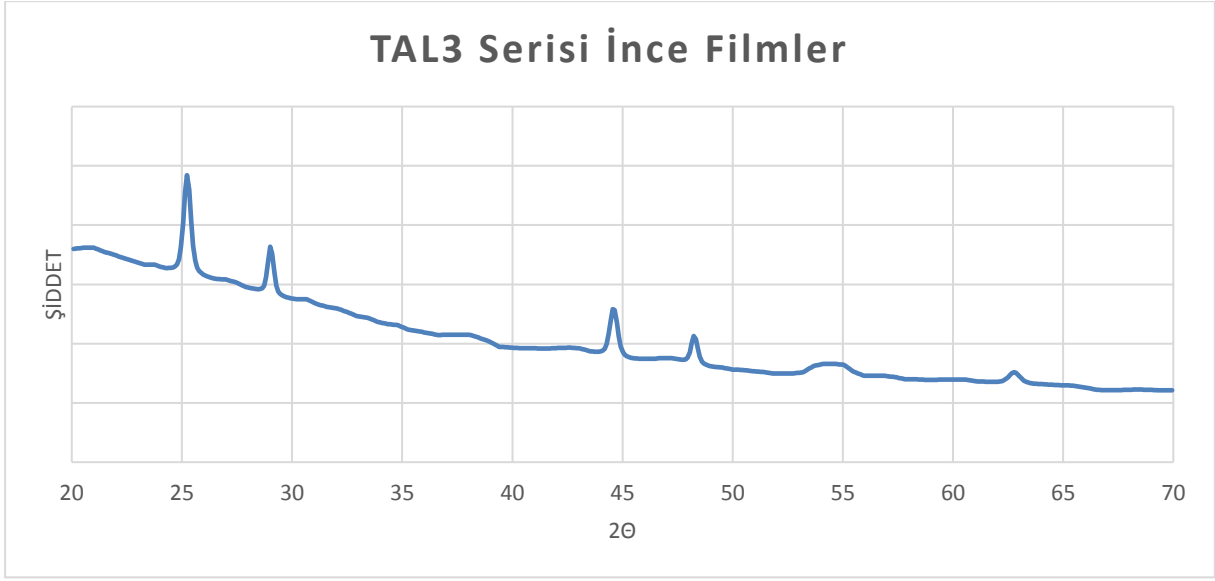


Şekil 4.11. TiO₂ Serisi İnce Filmlerin XRD Analiz Spektrumu

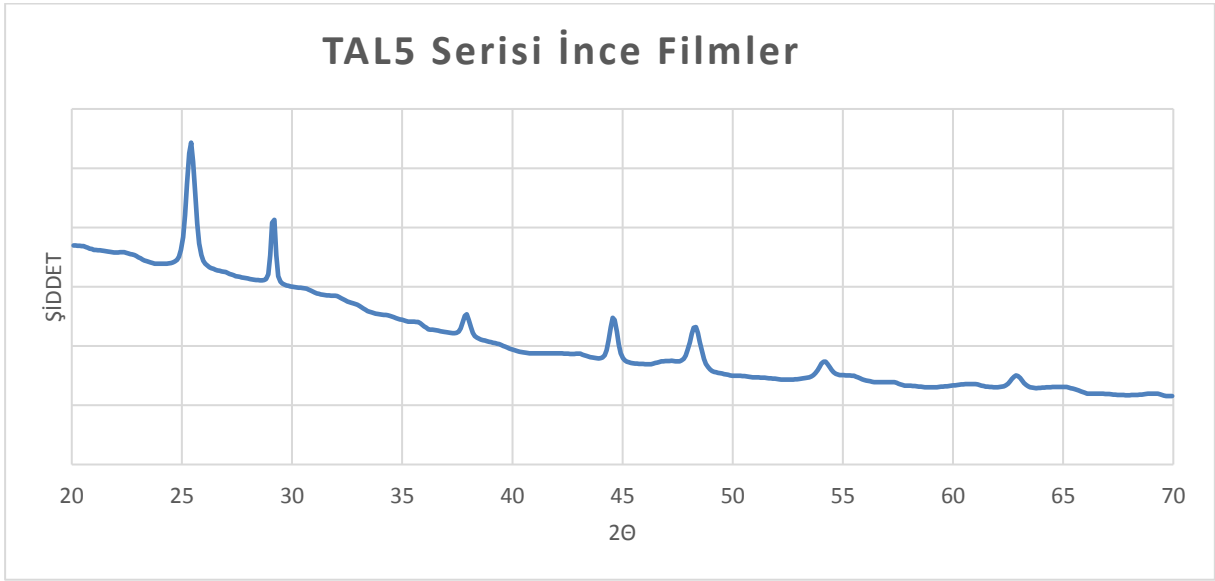
Şekil 4.11.'de Katkısız TiO₂ ince filminin $20^\circ \leq 2\theta \leq 70^\circ$ sınır değerlerinde, X-ışını Kırınımı (XRD) incelendiğinde, en yüksek pik şiddeti 2θ açısında ($25,25^\circ$) TiO₂ yapısına ait (0,1,1) piki olarak belirlenmiştir. Ayrıca TiO₂ ince film yapısına ait 2θ açısına göre pikler sırasıyla $37,37^\circ$ (0,0,4), $48,06^\circ$ (0,2,0), $53,90^\circ$ (0,1,5), $55,03^\circ$ (1,2,1), $62,7^\circ$ (0,2,4) olmak üzere toplamda 6 adet pik gözlemlenmiştir. TiO₂'nin anataz fazına karşılık gelen bilinen, net tepe noktaları sergilemektedir. Şekil 4.12.- Şekil 4.13.- Şekil 4.14.'de katkılı TAL serisi ince filmlere ait XRD analiz spektrumu verilmiştir.



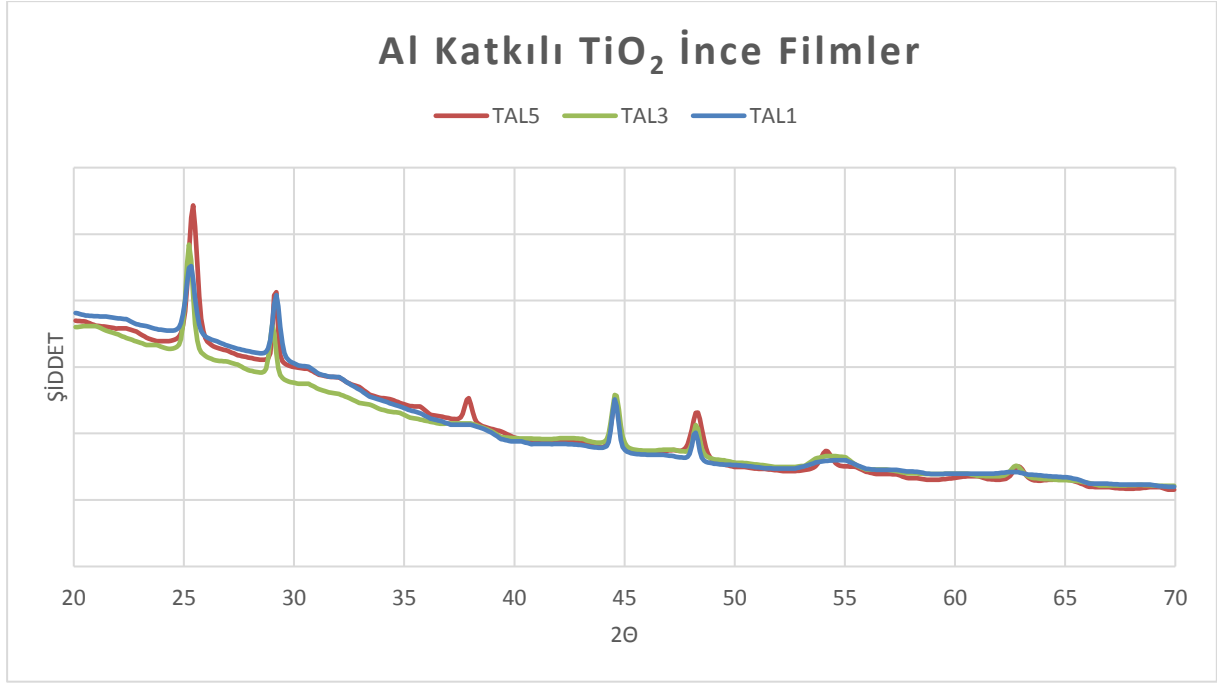
Şekil 4.12. TAL1 Serisi İnce Filmlerin XRD Analiz Spektrumu



Şekil 4.13. TAL3 Serisi İnce Filmlerin XRD Analiz Spektrumu



Şekil 4.14. TAL5 Serisi İnce Filmlerin XRD Analiz Spektrumu

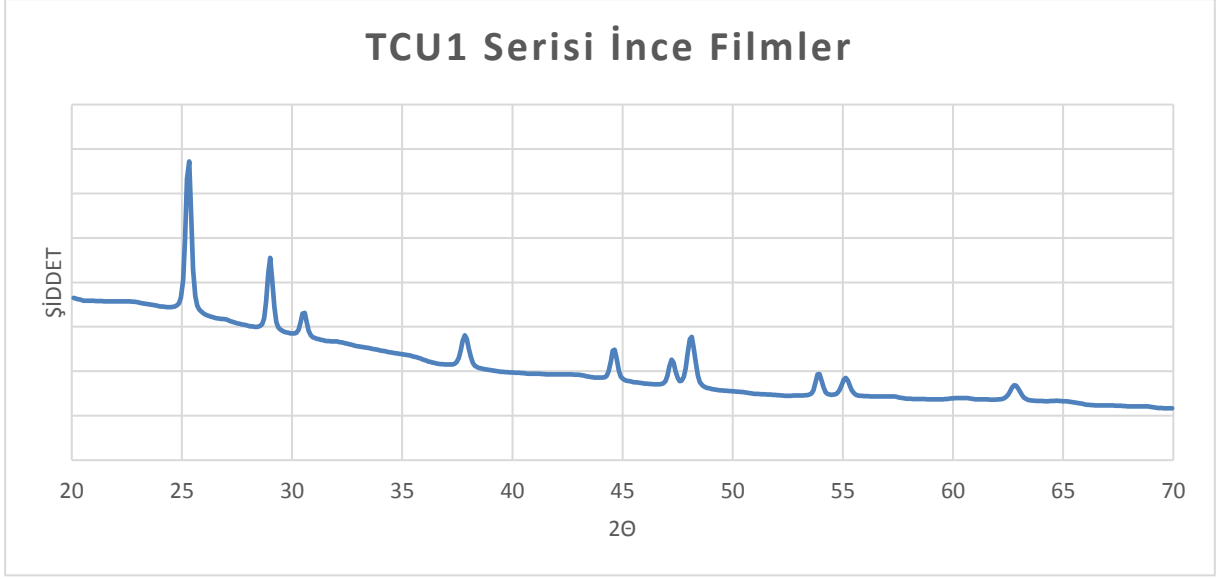


Şekil 4.15. TAL Serisi İnce Filmlerin Karşılaştırmalı XRD Analiz Spektrumu

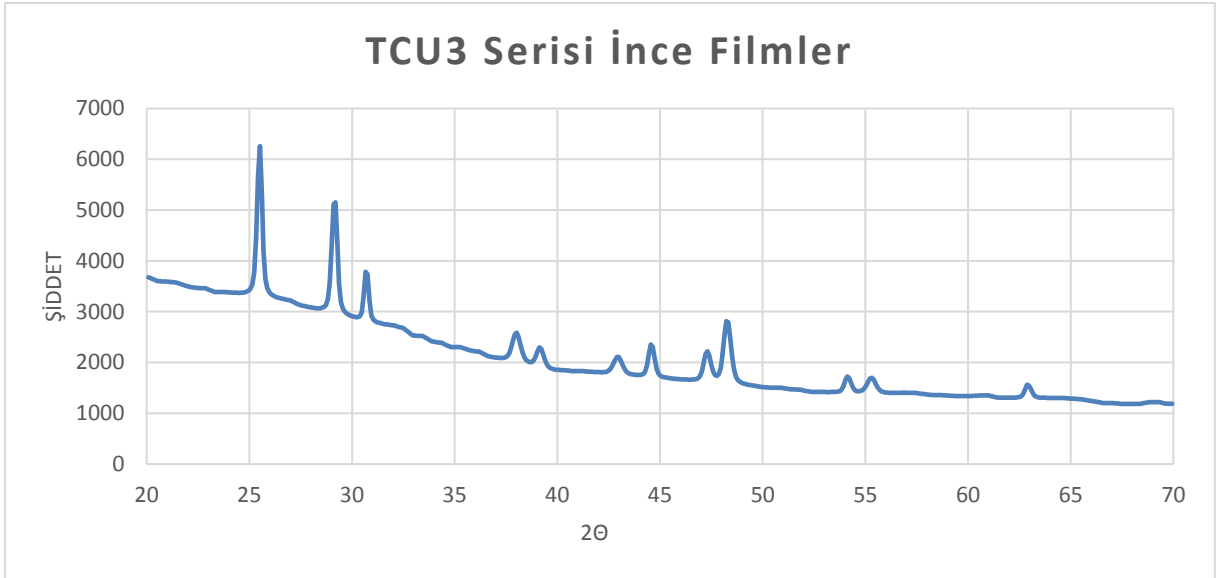
TAL serisinin Şekil 4.15.'de gösterilen XRD analiz spektrumunda, tüm serilerin polikristal yapıda olduğu görülmektedir. Tespit edilen (h,k,l) tepe noktaları, sırasıyla 2θ açıları yaklaşık 25° ve 48° karşılık gelen kafes düzlemleri (0,1,1),(0,2,0) TiO₂ 'nin anataze fazına aittir. TAL serisinin tümü için yaklaşık 29° ve 44,5° 2θ açılarında Al katkısından kaynaklanan (2,0,-3) ve (1,1,0) pikleri tespit edilmiştir.

4.2.4. TCU Serisi İnce Filmlerin Yapısal Karakterizasyonu

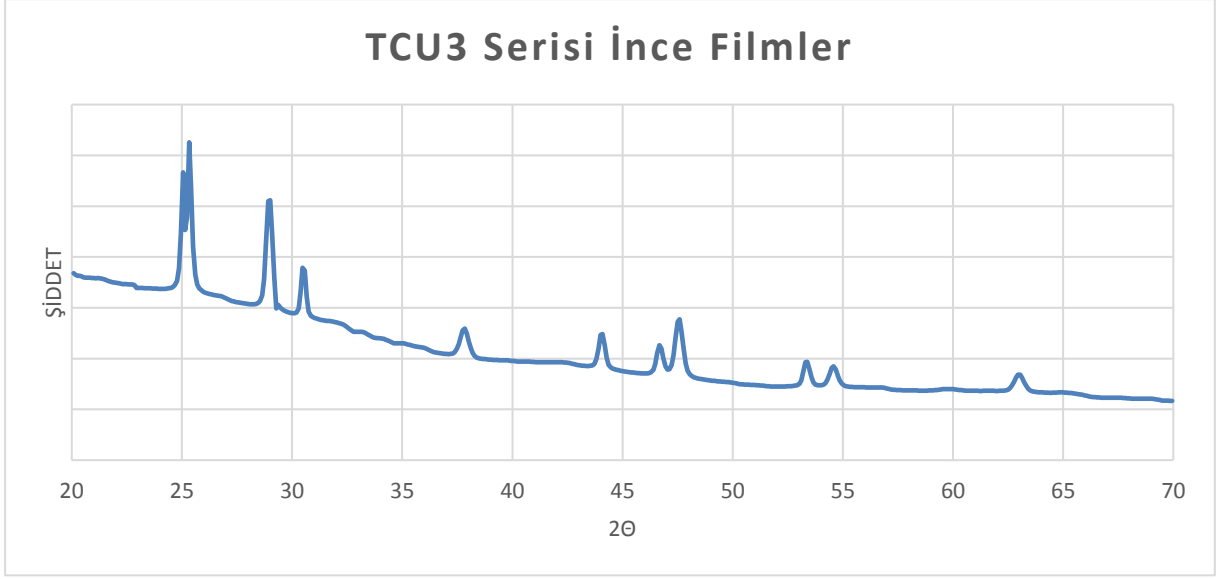
Şekil 4.16.- Şekil 4.17.- Şekil 4.18. katkı TCU serisi ince filmlere ait XRD analiz spektrumu verilmiştir.



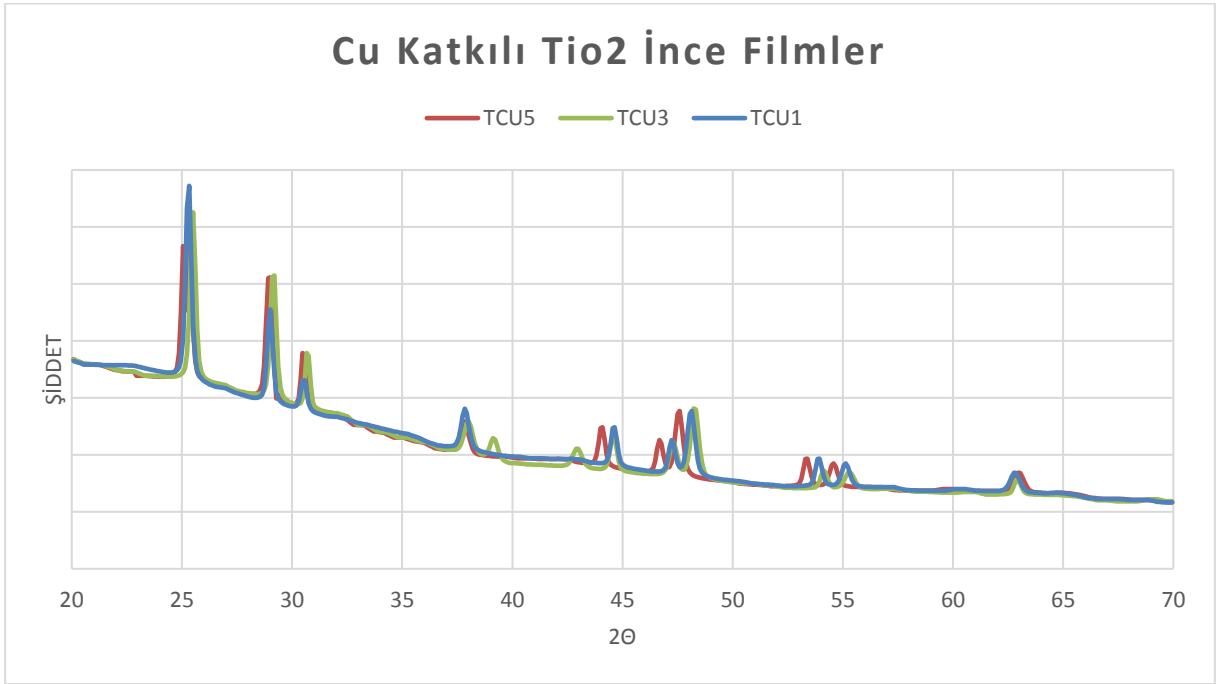
Şekil 4.16. TCU1 Serisi İnce Filmlerin XRD Analiz Spektrumu



Şekil 4.17. TCU3 Serisi İnce Filmlerin XRD Analiz Spektrumu



Şekil 4.18. TCU5 Serisi İnce Filmlerin XRD Analiz Spektrumu



Şekil 4.19. TCU Serisi İnce Filmlerin Karşılaştırmalı XRD Analiz Spektrumu

Şekil 4.19.'da TCU serisine ait Cu katkılı TiO_2 ince filmlerin spektrumları incelendiğinde, TiO_2 'nin anataze faz kafes yapısına ait yaklaşık 25° , 37° , 48° , 55° , 62° 2θ açılara sırasıyla karşılık gelen (0,1,1), (0,04),(0,2,0), (1,2,1), (0,2,4) pikleri tespit edilmiştir. Cu katkılama ile kafes yapısına 2θ yaklaşık 29° , $44,5^\circ$, $47,2^\circ$ açılarında sırasıyla (0,2,2), (0,4,4), (1,3,5) pikler dahil olmuştur.

XRD spektrumlarından elde edilen veriler analiz edilerek yarı pik genişlikleri (FWHM) ve kristalleşme hakkında bilgi veren bir diğer parametre ortalama tanecik boyutu Scherrer Formülü kullanılarak hesaplanmıştır.

$$D = \frac{0,9\lambda}{\beta \cos\theta_B}$$

Eşitlik 4.1. Formül

Burada λ ; x-ışınlarının dalga boyu, β ; radyan cinsinden yarı pik genişliğidir. Tane boyutu değerlerinin artması, tane sınırlarının azalması anlamına gelmektedir.

Katkısız TiO₂ ince filmleri tespit edilen 0,3621 FWHM değeri için ortalama tanecik boyutu 25,7 nm olarak hesaplanmıştır. Tablo 4.4.'de TAL serisi TiO₂ ince filmlerin XRD spektrumundan elde edilen yarı pik genişlikleri (FWHM) ve Scherrer Formülü ile hesaplanan tane boyutu değerleri verilmiştir. TiO₂ ince filmlerde Al katkılama miktarı arttıkça ortalama tanecik boyutu belirgin olarak azalma görülmüştür.

Tablo 4.4. TAL Serisi Yarı Pik Genişliği ve Tanecik Boyutu

Seri	FWHM	D (nm)
TAL1	0,36	25,7
TAL3	0,44	21,4
TAL5	0,45	20,4

TCU serisi için elde edilen yarı pik genişlikleri ve Scherrer Formülü ile hesaplanan tane boyutu değerleri Tablo 4.5.'de verilmiştir. TiO₂ ince filmlere Cu katkılama ile yapının tanecik boyutu belirgin şekilde arttığı, katkılama miktarının artmasının tanecik boyutunu değiştirmedığı, yarı pik genişliği değerinin 0,27 ve ortalama tanecik boyutunun 34,7 nm de sabit kaldığı görülmüştür.

Tablo 4.5. TCU Serisi Yarı Pik Genişliği ve Tanecik Boyutu

Seri	FWHM	D (nm)
TCU1	0,27	34,7
TCU3	0,27	34,7
TCU5	0,27	34,7

4.3. İnce Filmlerin Optik Karakterizasyonu

UV-Vis Spektroskopisi ile katkısız TiO₂, TAL serisi ve TCU serisi ince filmler için temel absorpsiyon spektrumu verileri incelenerek, filmlerin bant yapıları tespit edilmiş, filmin

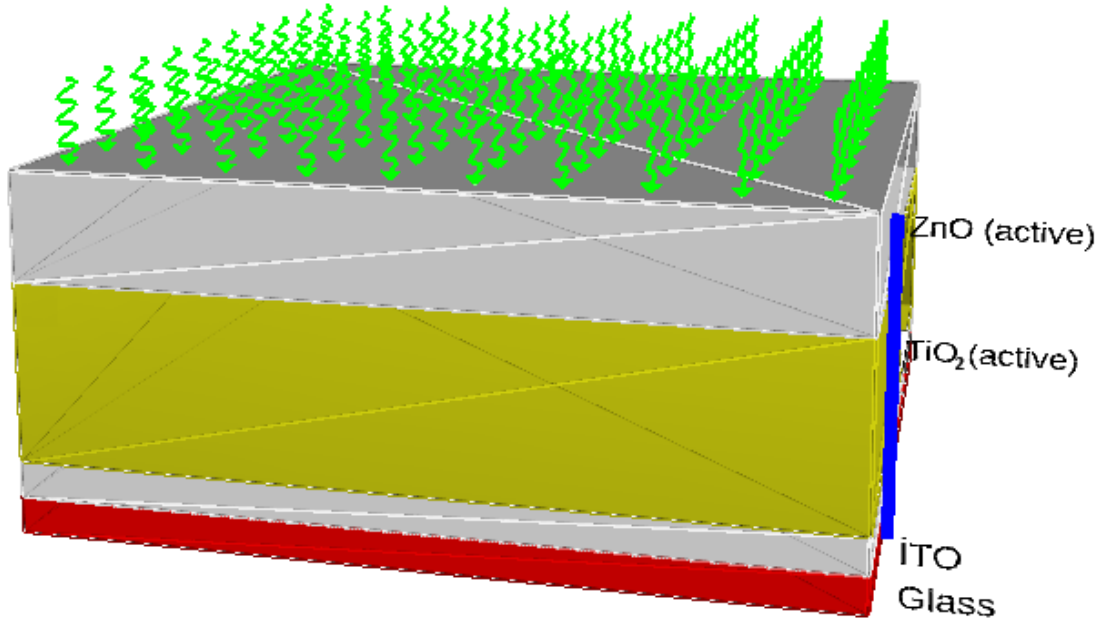
ayrı ayrı $(\alpha h\nu)^2$ 'nin $h\nu$ 'ye göre değişim grafiklerinden Tauc Metodu ile yasak enerji aralıkları belirlenmiş ve Tablo 4.6.'da gösterilmiştir.

Tablo 4.6. Katkısız ve Cu, Al katkılı TiO₂ İnce Filmlerin Yasak Enerji Aralığı Değerleri

Series	Yasak Enerji Aralığı (eV)
TiO ₂	3,21
TAL1	3,32
TAL3	3,38
TAL5	3,43
TCU1	3,05
TCU3	2,97
TCU5	2,91

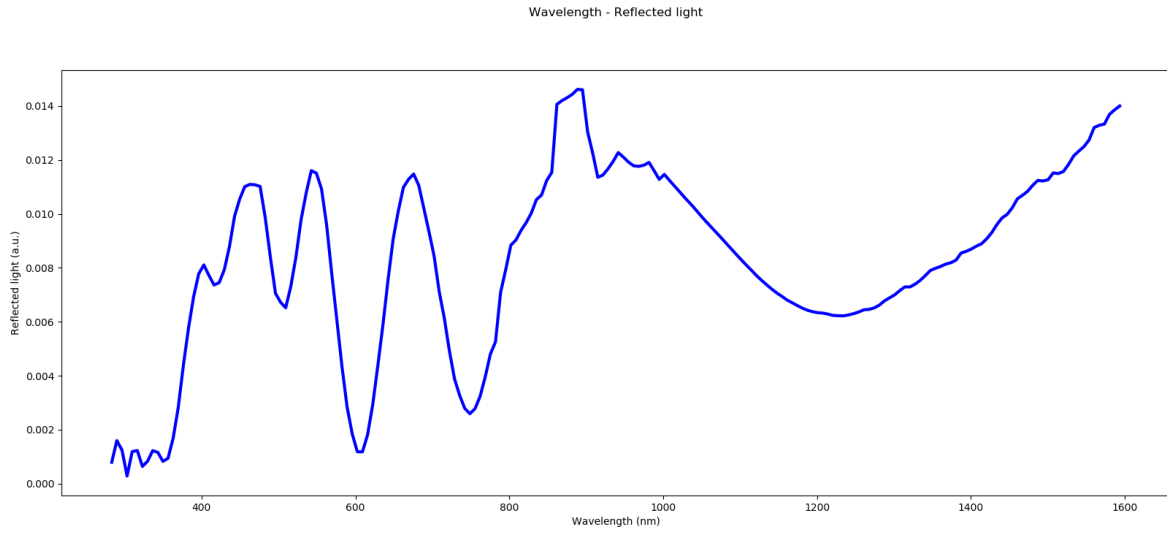
Anataz TiO₂ yapıları için hesaplanan 3,21eV yasak enerji aralığı değerinin literatürde yapılan diğer alışmalar Yazid vd. (2019) ve Maurani vd. (2020) ile uyumlu olduğu grlmştir. TAL serisi Al katkılı TiO₂ ince filmlere ait yasak enerji aralıkları incelendiğinde, katkılama ile ince film yapısına ait yasak enerji aralığının arttığı, katkılama miktarı arttıka bu değerin 3,43 eV değerine kadar artarak devam ettiği ve daha önceki yapılan alışmalar Frank vd. (2004) ve Dulian vd. (2019) ile benzer şekilde olduğu belirlenmiştir. TCU serisi Cu katkılı TiO₂ ince filmler ait hesaplamalar incelendiğinde ise katkılama ile yasak enerji aralığının belirgin şekilde düştüğü, katkılama miktarının artmasıyla azalmanın devam ettiği, 2,91 eV değerine kadar düştüğü ilgili alışmalar Timoumi vd. (2020); Beldjebli vd. (2022); Chibani vd. (2018) ile uyumlu olduğu grlmştir.

4.4. TiO₂ Katmanlı Fotovoltaik Hücre Simülasyonu

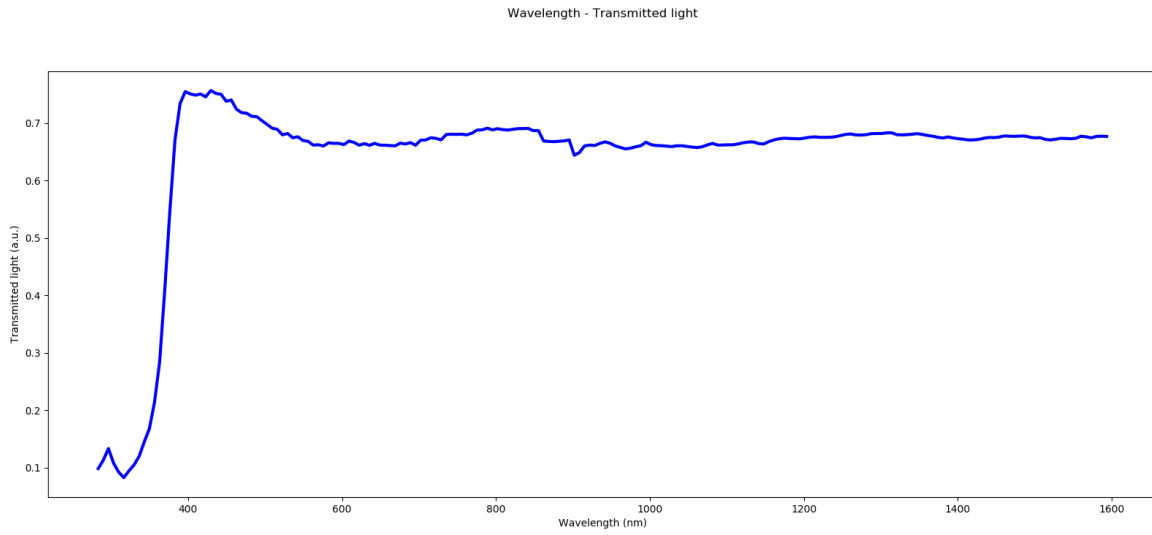


Şekil 4.20. Simülasyonu Yapılan Fotovoltaik Hücreleri Yapısının Şematik Gösterimi

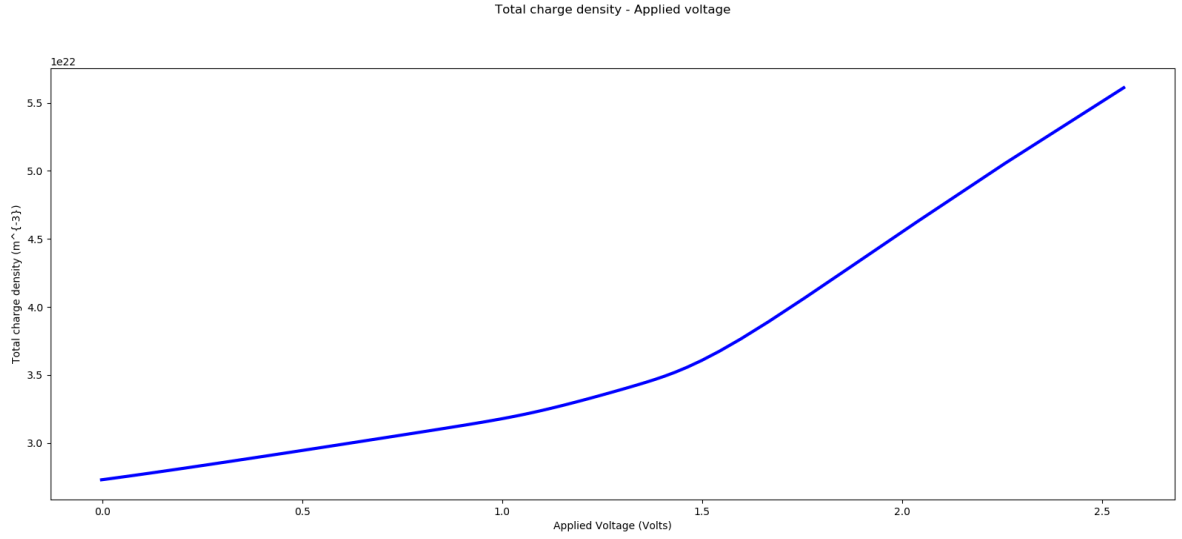
Üretilen TiO₂ ince filmlerin fotovoltaik hücrelerin katmanlarında kullanımı için gpvdm (General- Purpose Photovoltaic Device Mode) yazılımı ile çok katmanlı fotovoltaik pille simülasyonu yapılmıştır. Gpvdm yazılımı veri tabanı ile elektriksel ve optik parametreler istenilen şekilde seçilerek simülasyon yapılabilir. Bu çalışma kapsamında üretilen TiO₂ ince filmlerin katman olarak kullanımı için gpvdm yazılımı ile yapılan optik simülasyon tekniğinde, güneş pilinin cihaz yapısı; ZnO/TiO₂/İTO/Cam olarak belirlenmiştir. Şekil 4.20'de Simülasyonu yapılan TiO₂ katmanlı fotovoltaik hücreleri yapısının şematik gösterimi verilmiştir. Katman kalınlıkları ZnO; $3 \cdot 10^{-7}$ nm, TiO₂; $5 \cdot 10^{-7}$ nm, İTO; $1 \cdot 10^{-7}$ nm, Cam; $1 \cdot 10^{-7}$ nm olarak ayarlanmıştır.



Şekil 4.21. Simülasyonu Yapılan Fotovoltaik Pilin Yansıma Spektrumu



Şekil 4.22. Simülasyonu Yapılan Fotovoltaik Pilin İletim Spektrumu



Şekil 4.23. Simülasyonu Yapılan Fotovoltaik Pili Boyunca Uygulanan Voltaj Şarj Yoğunluğu

Simülasyonu yapılan fotovoltaik pilinin yansıma spektrumu, iletim spektrumu ve fotovoltaik pili boyunca uygulanan voltaj şarj yoğunluğu sırasıyla Şekil 4.21,4.22, 4.23 ' de verilmiştir. Enerji dönüşümü için sistemin görünür bölgede çalıştığı yapılan simülasyonda görülmektedir. Görünür bölge aktif katmanlar tarafından ışığın emildiği ve fotonik elektrik enerjisine dönüştüğü gözlemlenmiştir.

5. SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Daldırarak kaplama yöntemi ile üretilen katkısız TiO₂ ince filmlerin morfolojik özellikleri incelendiğinde filmin cam yüzeye homojen bir şekilde dağıldığı, Al katkılama ile TiO₂ film katmanlarındaki tane boyutunu küçülttüğü ve yüzey düzgünsüzlüğünü azalttığı, Cu katkılama da ise katkının film yapısına dahil olarak tane boyutunu büyüttüğü görülmüştür. Her iki katkılama da katkılama miktarı arttıkça Al, Cu, O nin atomik yüzde miktarı artmakta Ti'nin ise azalmaktadır.

Üretilen filmlerin yapısal özellikleri incelendiğinde, TiO₂ anataz kafes yapısına ait 2 θ açıları yaklaşık 25° ve 48° karşılık gelen (0,1,1) ve (0,2,0) piki tüm serilerde görülmüştür. Al katkılama da 29° ve 44,5° 2 θ açılarında Al katkısından kaynaklanan (2,0,-3) ve (1,1,0) pikleri, Cu katkılama ile ise 29°,44,5°,47,2° 2 θ açılarında sırasıyla (0,2,2), (0,4,4), (1,3,5) pikler yapıya dahil olmuşlardır. TiO₂ ince filmlerin ortalama tanecik boyutunun 25,7 nm olduğu tespit edilmiştir. Al katkılama işlemi ile yüzeyde tanecik boyutunu azalmış ve %5 al katkılama ile ortalama tanecik boyutunun 20,4 nm'e kadar küçülmüştür. Cu katkılama ile yapının tanecik boyutu net bir şekilde atmış ve %5 Cu katkılama da ortalama tanecik boyutu 37,7 nm olarak bulunmuştur.

Katkısız olarak üretilen TiO₂ İnce film için yasak enerji aralığı 3,21eV, Al katkılı TiO₂ ince filmlere ait sırasıyla %1, %3 ve %5 katkılama ile yasak enerji aralıkları 3,32eV, 3,38 eV 3,43 eV iken, Cu katkılı TiO₂ ince filmlere ait sırasıyla %1, %3 ve %5 katkılama ile yasak enerji aralıkları 3,05 eV, 2,97 eV 2,91 eV olarak bulunmuştur. Al katkılama ile TiO₂ ince filmlerin yasak enerji aralıkları arttırılabildiği ve Cu katkılama ile azaltılabildiği tespit edilmiştir.

Bu çalışma kapsamında cam altlıklar üzerine kaplanan TiO₂ ince filmlerin fotovoltaiik hücrelerde katman olarak kullanımının simülasyonu gpvdm yazılımı ile yapılmıştır. Yapılan Simülasyondan alınan veriler incelendiğinde TiO₂ ince filmlerin farklı fotovoltaiik hücre katmanı olarak kullanılabilir olduğu görülmüştür.

KAYNAKÇA

- Alam, M. J., & Cameron, D. C.** (2002). Preparation and Characterization Of TiO_2 Thin Films By Sol-Gel Method. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. 25(2): 137-145.
- Ali, J. M.** (2013). *Fotovoltaik Ge-Zno Nanokompozit İnce Filmlerin Hazırlanması ve Fiziksel Özelliklerinin Araştırılması*. Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Atar K.C.** (2013). *Nanoyapılı SnO₂ Filmlerinin Sol Jel Daldırarak Kaplama Metodu İle Elde Edilmesi ve Optik Özellikleri*. Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Atay, B.** (2008). *Nanofilm Fotokromik Kaplamalar*. Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Aydın, E.** (2016). *Bakır İndiyum Sülfür İnce Film Güneş Pillerinin Bükülebilir ve Cam Alt Taşlar Üzerine Sprey Piroliz Yöntemi İle Üretimi*. TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Aytaç A. & Malayoğlu U.** (2018). Fiziksel Buhar Biriktirme Yöntemlerinden PVD ve JVD/DVD İnce Film Kaplamaların Karşılaştırılması ve DVD Kaplama Teknolojisinin Endüstriyel Uygulamaları Üzerine Kavramsal, Akademik ve Teorik Bir Analiz. *Savun Bilim Dergisi*. 131–164.
- Bal, İ.** (2019). *Kimyasal Banyo Biriktirme Yöntemiyle Üretilen CdS İnce Filmlerin Optiksel, Yapısal Özelliklerinin ve Morfolojisinin Nanokarakterizasyonu*. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Baptista, A., Silva, F., Porteiro, J., Míguez, J., & Pinto, G.** (2018). Sputtering Physical Vapour Deposition (PVD) Coatings: A Critical Review On Process Improvement and Market Trend Demands. *Coatings*. 8(11).
- Baptista, A., Silva, F. J. G., Porteiro, J., Míguez, J. L., Pinto, G., & Fernandes, L.** (2018). On the Physical Vapour Deposition (PVD): Evolution of Magnetron Sputtering Processes for Industrial Applications. *Procedia Manufacturing*. 17, 746–757.
- Bardakçı, S.** (2007). *Sol-Jel Yöntemi İle Hazırlanan TiO_2 İnce Filmlerin Optik Özelliklerinin Belirlenmesi*. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Barher, A.M., Vahid M.M., & Mohsen M.** (2016). Types Of Solar Cells and Application. *American Journal of Optics and Photonics*. 3(5),94.

Beldjebli, O., Bensaha, R., & Panneerselvam, P. (2022). Effect of Both Sn Doping And Annealing Temperature On The Properties of Dip-Coated Nanostructured TiO₂ Thin Films. *Journal of Inorganic And Organometallic Polymers And Materials*. 1-13.

Biçer, Ö. (2019). *Mn Katkılı TiO₂ İnce Filmlerin Antibakteriyel Özelliklerinin İncelenmesi*. Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır.

Bilgen, Y. (2015). *İnce Film Teknikleri*.

Boyle, G. (2004). *Renewable Energy: Power For A Sustainable Future*, 1-566. Oxford University Press.

Boz, O.H. (2011). *Günümüzün Alternatif Enerji Kaynağı: Fotovoltaik Güneş Pilleri*. Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.

Chibani, O., Touam, T., Chelouche, A., & Ouarez, L. (2018). Investigation of The Effects of Acidic Ph And Annealing On The Properties Of Nanostructured TiO₂ Thin Films For Waveguiding Applications. *Journal of Alloys and Compounds*. 768, 866-874.

Coşkun, A., Taşcıoğlu, A., & Yılmaz, G. (2021). İnce Film Üretiminde Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemi ve Çeşitleri. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. 12 (2): 351-363.

Çakmak, M. (2011). *Metal-Oksit İnce Film Yapıların Üretilmesi ve Elektiriksel Karakteristiklerinin İncelenmesi*. Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

Çalgül, U., Orhan, A., Barlas, Z., & Darcan, N. (2021). Döndürerek Kaplama Yöntemi İle Hazırlanan Ca Katkılı TiO₂ İnce Filmlerin Optik ve Morfolojik Özellikleri. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 3(1): 315-327.

Çelik, A.N., & Koç, F. (2020). Polikristal Tür Bir Fotovoltaik Panelin I-V Karakteristiğinin Analitik Modellenmesi ve Deneysel Doğrulanması. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8, 2491-2515.

Çetin, E., & Sazak, B.S. (2004). Fotovoltaik Enerji Dönüşüm Sistemlerinde Kullanılabilecek Seri Rezonans İntertör Devresinin İncelenmesi. *Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 10(3): 339-346.

Çetinkaya, Ş. (2011). *Kimyasal Buhar Reaksiyon Yöntemi İle Nanokristal Malzemelerin Sentezi*. İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Çıtanok, N.** (2014). *Güneş Enerjisi Kaynağından Elektrik Enerjisi Üretimi*. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elâzığ.
- Çolak, S.** (2002). *Reaktif DC Magnetron Sıçratma İle ITO Üretimi ve Karakterizasyonu*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Çoşğun, A., Taşcıoğlu, A., & Yılmaz, G.** (2021). İnce Film Üretiminde Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemi ve Çeşitleri. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. 12(2), 351-363.
- Demir, S.F.** (2007). *CrN Kaplamalara Antibakteriyel Özellik Kazandırmak Amacıyla Ag ve AgPd Katkılandırılması*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Demiriz, T.M.** (2019). *Kadmiyum Tellür İnce Filmlerinin Üretilmesi ve Karakterizasyonu*. Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Demiroğlu, D.** (2019). *Organik Yarıiletken Tabanlı Fotovoltaik Aygıtlar İçin Şekilli İnce Film Altlıkların Kullanımı ve Etkilerinin İncelenmesi*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Dikici, M.** (2012). *Katıhal Fiziği*. Seçkin Yayıncılık.
- Dulian, P., Nachit, W., Jaglarz, J., Zięba, P., Kanak, J., & Żukowski, W.** (2019). Photocatalytic Methylene Blue Degradation On Multilayer Transparent TiO₂ Coatings. *Optical Materials*. 90, 264-272.
- Ertürk, E.** (2019). *Fotovoltaik Uygulamalarda Kullanılmak Üzere Elektro-Kimyasal Biriktirme Yöntemi İle Üretilen Yarıiletken ZnS İnce Filmlerin Karakterizasyonu*. Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- Evtushenko, Y. M., Romashkin, S. V., Trofimov, N. S., & Chekhlova, T. K.** (2015). Optical Properties of TiO₂ Thin Films. *Physics Procedia*. 73: 100-107.
- Frank, A. J., Kopidakis, N., & Van De Lagemaat, J.** (2004). Electrons İn Nanostructured TiO₂ Solar Cells: Transport, Recombination And Photovoltaic Properties. *Coordination Chemistry Reviews*. 248(13-14), 1165-1179.
- Garzella, C., Comini, E., Tempesti, E., Frigeri, C., & Sberveglieri, G.** (2000). TiO₂ Thin Films By a Novel Sol–Gel Processing for Gas Sensor Applications. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 68(1-3): 189-196.

Gençyılmaz, O. (2013). *ZnO Filmlerin Bazı Fiziksel Özellikleri Üzerine Co Katkısının Etkisi*. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Gezeroğlu, B. (2019). *Kimyasal Sprey Püskürtme Yöntemi İle Büyütülen MgPc İnce Filmlerin Elektriksel ve Optiksel Özelliklerinin İncelenmesi*. Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.

Goetzberger, A., Hebling, C., & Schock H. W. (2003). Photovoltaic Materials, History, Status and Outlook. *Materials Science And Engineering: R: Reports*. 40, 1–46.

Gözükızıl, M.F. (2020). *Katkılı Metal Oksit İnce Filmlerin Üretimi ve Bazı Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi*. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik.

Grätzel, M. (2003). Dye- Sensitized Solar Cells. *Jornal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviewa*. 4, 145-153.

Günday, G. (2010). *Polifenilenvinilen (PPV) Bazlı Konjuge Polimerlerle Hazırlanan Organik Fotovoltaik Hücreler*. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Hakki, H. K., Allahyari, S., Rahemi, N., & Tasbihi, M. (2018). The Role of Thermal Annealing In Controlling Morphology, Crystal Structure and Adherence of Dip Coated TiO₂ Film on Glass and Its Photocatalytic Activity. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 85, 24-32.

Halme, J. (2002). *Dye-Sensitized Nanostructured and Organic Photovoltaic Cells: Technical Review and Preliminary Tests*. Helsinki University of Technology, Department of Engineering Physics and Mathematics, Finlandiya.

Hanania, J., Stenhouse, K., & Donev, J. (2015). Energy Education. [Erişim: 13.02.2022, https://energyeducation.ca/encyclopedia/Photovoltaic_effect]

Karamanav, M. (2007). *Güneş Enerjisi ve Güneş Pilleri*. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

Karşlı, A. (2011). *Politiyofen ve Fulleren İçeren Organik Fotovoltaik Hücrelerin Optimum Çalışma Şekillerinin Belirlenmesi*. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Kazan, S. (2021). Growth and Characterization of TiO₂ Thin Films by PLD Technique. *Journal of the Institute of Science and Technology*. 11(1): 221-226.

Köse, S. (1986). *Yarıiletken Güneş Pilleri ve Verimlilikleri*. Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Küpeli, A.Ö. (2005). *Güneş Pilleri ve Verimleri*. Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri, Eskişehir.

Luque, A., & Hegedus, S. (2011). *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering* (2nd ed.). JohnWileySons, UK.

Ma, Y. J., Lu, F., Xiang, B. X., Zhao, J. L., & Ruan, S. C. (2018). Fabrication of TiO₂ Thin Films With Both Anatase and Rutile Structures Together Using the Ion-Implantation Method. *Optical Materials Express*. 8(3): 532-540.

Maurani, R. N., Purnamasari, D., & Zainul, R. (2020). Preparation of TiO₂ Thin Layer on Ceramics Using Dip Coating Method for Degradation Humic Acid. *Journal of Physics: Conference Series*. 1481, 1-8.

Museum, M.F. (2019). Kimyasal Banyo Biriktirme Yöntemiyle Üretilen CdS İnce Filmlerin Optiksel, Yapısal. 45(45), 95–98.

Navruz, T.S. (2013). Auger Etkili Araband Yapılı Güneş Pillerinde Akımın Araband Seviyesine Göre Değişimi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*. 28(3): 455-463.

Özkan, İ. (2006). Nanoteknolojik Yöntemler İle Malzemenin Yüzey Özelliklerinin İyileştirilmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

Öztürk, H.H. (2017). Güneş Enerjisinden Fotovoltaik Yöntemle Elektrik Üretiminde Güç Dönüşüm Verimi ve Etkili Etmenler. *V. Elektrik Tesisat Ulusal Kongre ve Sergisi Bildirileri*. 1, 1-14.

Öztürk, S. (2011). *TiO₂ İnce Filmlerin Üretilmesi ve Fotovoltaik Özelliklerin İncelenmesi*. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Poortmans, J., & Arkhipov, V. (2006). Thin Film Solar Cells: Fabrication, Characterization And Applications. *John Wiley & Sons*. 18, 1-502.

Perednis, D. & Gauckler, L. J. (2005). Thin Film Deposition Using Spray Pyrolysis,. *Journal of Electroceramics*. 14(2), 103-111.

Rathore, N., Panwar, N.L., Yettou, F., & Gama, A. (2021). A Comprehensive Review of Different Types of Solar Photovoltaic Cells and Their Applications. *International Journal of Ambient Energy*. 42(10), 1200-1217.

Sarıca, E. (2017). *Fotovoltaik Güneş Hücrelerinde Kullanılabilecek N-Cds:F Ve P-Pbs:Ag İnce Filmlerinin Üretimi ve Karakterizasyon*. Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çanakkale.

Selmi, W., Hosni, N., Naceur, J. B., Maghraoui-Meherzi, H., & Chtourou, R. (2022). Titanium Dioxide Thin Films for Environmental Applications. *IntechOpen*. 69-128.

Sezgin, N. (2010). *Galyum Oksit İnce Filmlerin Elektron Demeti Buharlaştırma Yöntemiyle Üretimi ve Karakterizasyonu*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Sharma, S., Jain, K. K., & Sharma, A. (2015). Solar Cells: In Research and Applications—A Review. *Materials Sciences and Applications*. 6(12), 1145-1155.

Sonawane, R. S., & Dongare, M. K. (2006). Sol–Gel Synthesis of Au/TiO₂ Thin Films for Photocatalytic Degradation of Phenol in Sunlight. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*. 243(1): 68-76.

Sönmezoğlu, S., Koç, M. & Akın, S., (2012). İnce Film Üretim Teknikleri. *Erciyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. 28(5), 389–401.

Tanıšan, B. & Tosun, T. (2019). Seramik Karoların Altın Dekorasyonda Katodik Ark – FBB Tin Kaplama Proses Parametrelerinin Optimizasyonu. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 186-192.

Tatar. B. (2007). *β -FeSi₂ İnce Filmlerin Elde Edilmesi ve Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi*. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Tavşanoğlu, T. (2001). *Reaktif Dc Magnetron Sıçratma / Pecvd Hibrit Tekniğiyle Biriktirilen Ti / Tixcy / Dlc İnce Film Kaplamaların Üretim Koşullarının Belirlenmesi ve Karakterizasyonu*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Timoumi, A., Albetran, H. M., Alamri, H. R., Alamri, S. N., & Low, I. M. (2020). Impact of Annealing Temperature on Structural, Morphological and Optical Properties of GO-TiO₂ Thin Films Prepared By Spin Coating Technique. *Superlattices and Microstructures*. 139, 1-8.

Toygun, V. (2013). Sol- Jet Yöntemi Genel Prensipleri. *Journal of Medical Case Reports*, 31, 456–476.

Waldauf, C., Schilinsky, P., Hauch, J., & Brabec, C. J. (2004). Material and Device Concepts for Organic Photovoltaics: Towards Competitive Efficiencies. *Thin Solid Films*. 451, 503-507.

Valiulis, A. V., & Silickas, P. (2007). Liquid Phase Deposition Methods Monitoring Techniques Influence For Solid Substrates And Thin Metal Oxide Films Properties. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 24(1), 188-192.

Yazid, S. A., Rosli, Z. M., & Juoi, J. M. (2019). Effect of Titanium (IV) İsopropoxide Molarity on the Crystallinity and Photocatalytic Activity of Titanium Dioxide Thin Film Deposited Via Green Sol–Gel Route. *Journal of Materials Research and Technology*. 8(1), 1434-1439.