

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI/TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI

**CdS/CdTe GÜNEŞ HÜCRELERİNDE PENCERE VE SOĞURMA KATMANLARINA SELENYUM
KATKISININ HÜCRE PERFORMANSINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Ali ÇİRİŞ

**AĞUSTOS 2021
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI/TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI

**CdS/CdTe GÜNEŞ HÜCRELERİNDE PENCERE VE SOĞURMA KATMANLARINA
SELENYUM KATKISININ HÜCRE PERFORMANSINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Ali ÇİRİŞ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"DOKTOR (YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI/TEKNOLOJİLERİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 29 / 07 / 2021

Tezin Savunma Tarihi : 19 / 08 / 2021

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Emin BACAKSIZ

Trabzon 2021

ÖNSÖZ

Fotovoltaik piyasasında CdTe ince film güneş pilleri, düşük maliyetli basit üretim süreci ve yüksek aygıt verimi gibi özelliklerinden dolayı önemli bir konuma sahiptir. CdTe güneş pillerinde, n-tipi pencere katmanı olarak genellikle CdS ve p-tipi soğurma katmanı olarak CdTe kullanılmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında, p-n eklemine oluşturan CdS-pencere ve CdTe-soğurma katmanlarına selenyum (Se) katkısı yapılarak, Se'nin hücre performansı üzerindeki etkisi incelendi. Bu çalışmanın birinci kısmında CdS/CdSe, CdS, CdSe pencere katmanlarının hücre parametreleri üzerindeki etkisi belirlendi. İkinci kısımda ise $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}/\text{CdTe}$ soğurma katmanı yapısına sahip aygıtların hücre performansı üzerindeki etkisi araştırıldı.

Bütün örneklerin üretimi ve aygıt karakterizasyonları, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Katıhal Fiziği Araştırma Laboratuvarı'nda gerçekleştirildi. Örneklerin yapısal ve optik analizleri ise Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde yapıldı.

Doktora öğrenimim boyunca bana her konuda yol gösteren, bilgi ve tecrübelerini paylaşan değerli danışman hocam Prof. Dr. Emin BACAŞIZ'a en içten dileklerimle teşekkür ederim. Çalışmalarım sırasında görüş ve yardımlarını esirgemeyen kıymetli hocalarım Prof. Dr. Tayfur KÜÇÜKÖMEROĞLU'na, Dr. Öğr. Üyesi Yavuz ATASOY'a ve Dr. Bülent M. BAŞOL'a özel olarak teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca örneklerin üretim ve karakterizasyon sürecindeki emek ve katkılarından dolayı Prof. Dr. Murat TOMAKİN'e ve Arş. Gör. Abdullah KARACA'ya çok teşekkür ederim. Öğrenim hayatım boyunca bana her zaman destek olan ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocalarım Prof. Dr. Uğur ÇEVİK'e, Prof. Dr. Belgin KÜÇÜKÖMEROĞLU'na ve Doç. Dr. Mehmet Ali OLĞAR'a teşekkür ederim. Bu doktora tez çalışmasının gerçekleştirilmesinde verdikleri destekten dolayı Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (Proje No: 118F140) teşekkürlerimi sunarım. Çalışmaların gerçekleştirilmesi için sağladıkları olanaklardan dolayı K.T.Ü. Fizik Bölüm Bölümü'ne ayrıca teşekkür ederim. Çalışmalarım sırasındaki yardım ve anlayışları için, görev yaptığım Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Nanoteknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'ne teşekkürü bir borç bilirim.

Ali ÇİRİŞ

Trabzon 2021

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “CdS/CdTe Güneş Hücrelerinde Pencere ve Soğurma Katmanlarına Selenyum Katkısının Hücre Performansına Etkisinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Emin BACAKSIZ’ın sorumluluğunda tamamladığımı, örneklerin üretimini ve analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 02/09/2021

Ali ÇİRİŞ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
TABLolar DİZİNİ	XIV
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XV
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Güneş Pillerinin Çalışma Prensibi	4
1.2.1. Temel Yarıiletken Kavramlar	4
1.2.1.1. Yarıiletkenlerde Bant Kavramı ve Fermi Seviyesi	5
1.2.1.2. Doğrudan ve Dolaylı Optik Geçişler	6
1.2.1.3. p- ve n- Tipi Yarıiletkenler	7
1.2.1.4. p-n Ekleme.....	7
1.2.2. Fotovoltaik Aygıtta Enerji Dönüşümü.....	10
1.3. Güneş Pili Parametreleri	12
1.3.1. Güneş Spektrumu	12
1.3.2. Kısa Devre Akımı	14
1.3.3. Açık Devre Voltajı	14
1.3.4. Dolum Faktörü	15
1.3.5. Verim.....	16
1.3.6. Akım-Voltaj Karakteristiği ve Parazitik Dirençler	17
1.4. Güneş Pili Performansı Etkileyen Fiziksel Aktiviteler.....	20
1.4.1. Soğurma ve Üretim	20
1.4.2. Rekombinasyon.....	22
1.4.2.1. Işımalı Rekombinasyon.....	22
1.4.2.2. Işımalı Olmayan (Shockley-Read-Hall) Rekombinasyon	23
1.4.2.3. Auger Rekombinasyonu.....	25

1.4.2.4.	Yüzey, Ara Yüzey ve Tane Sınırı Rekombinasyonu	26
1.4.3.	Taşıyıcı İletimi	26
1.5.	Fotovoltaiklerin Sınıflandırılması.....	29
1.6.	CdTe Tabanlı Güneş Pilleri.....	35
1.6.1.	Giriş.....	35
1.6.2.	CdTe'nin Özellikleri	36
1.6.3.	CdTe Kaynakları ve Toksiklik.....	40
1.6.4.	CdTe Güneş Pillerinin Yapısı	41
1.6.4.1.	Altlık	42
1.6.4.2.	Saydam İletken Oksit Tabakası	43
1.6.4.3.	Pencere Tabakası.....	44
1.6.4.4.	Soğurma Tabakası.....	45
1.6.4.5.	CdCl ₂ İşlemi	46
1.6.4.6.	Geri Kontaklar.....	48
1.7.	Literatür Özeti ve Motivasyon	50
2.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	59
2.1.	Giriş.....	59
2.2.	Se-Katkısının Pencere Katmanına Etkisi	60
2.2.1.	CdS/CdSe Pencere Katmanlarının Üretimi ve Karakterizasyonu.....	60
2.2.2.	CdS/CdSe/CdTe Katmanlı Yapılarının Üretimi ve Karakterizasyonu	61
2.2.3.	CdS/CdSe Pencere Katmanlı Güneş Hücrelerinin Üretimi ve Karakterizasyonu	63
2.3.	Se-Katkısının Soğurma Katmanına Etkisi	65
2.3.1.	CdSe _{1-x} Te _x Alaşımlarının Üretilmesi ve Karakterizasyonu.....	65
2.3.2.	CdSe _{1-x} Te _x /CdTe Soğurma Katmanı Yapılı Güneş Hücrelerinin Üretilmesi	66
2.4.	İnce Filmlerin Üretimi	67
2.4.1.	Kimyasal Banyoda Biriktirme Yöntemiyle CdS İnce Filmlerinin Üretilmesi.....	67
2.4.2.	CdSe ve CdTe Filmlerinin Termal Buharlaştırma Yöntemi ile Üretilmesi	69
2.4.3.	Kapalı Hacimde Süblimleşme Yöntemiyle CdTe Katmanlarının Üretimi	71
2.4.4.	Elektron-Demeti Buharlaştırma Yöntemiyle Cu/Au Kontakların Üretilmesi	74
2.5.	İnce Filmlere İşlem Uygulanması.....	75
2.5.1.	CdCl ₂ Aktivasyon İşlemi ve Tavlama.....	75
2.5.2.	Dağlama İşlemi	76
2.6.	Karakterizasyon Teknikleri.....	76

2.6.1.	X-Işınları Kırınımı	76
2.6.2.	Taramalı Elektron Mikroskopu.....	79
2.6.3.	Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi	81
2.6.4.	Optik Ölçümler İçin Ultraviyole-Görünür Spektroskopisi	83
2.6.5.	Akım Yoğunluğu – Voltaj Ölçümleri	85
2.6.6.	Dış Kuantum Verimi.....	86
3.	BULGULAR VE TARTIŞMALAR.....	89
3.1.	Se-Katkısının Pencere Katmanları Üzerine Etkisinin İncelenmesi	89
3.1.1.	XRD Spektrumları	89
3.1.2.	FE-SEM Görüntüleri.....	95
3.1.3.	EDS Ölçümleri.....	98
3.1.4.	Optik Ölçümler	99
3.2.	CdS/CdSe/CdTe Katmanlı Yapılarının Karakterizasyonu	104
3.2.1.	XRD Sonuçları	104
3.2.2.	SEM Görüntüleri.....	118
3.2.3.	EDS Ölçümleri.....	120
3.3.	CdS/CdSe Pencere Katmanlı Güneş Hücrelerinin Karakterizasyonu.....	121
3.4.	Se-Katkısının Soğurma Katmanları Üzerine Etkisinin İncelenmesi.....	124
3.4.1.	XRD Spektrumları	124
3.4.2.	SEM Görüntüleri.....	128
3.4.3.	EDS Sonuçları.....	130
3.4.4.	Optik Ölçümleri	131
3.5.	Hücre Üretiminde Kullanılan CdSe _x Te _{1-x} Katmanlarının Karakterizasyonu	132
3.5.1.	XRD Spektrumları	132
3.5.2.	SEM Görüntüleri.....	135
3.5.3.	Optik Ölçümler	136
3.6.	CdSe _x Te _{1-x} /CdTe Soğurma-Katmanlı Güneş Hücrelerinin Karakterizasyonu	137
4.	SONUÇLAR	142
5.	ÖNERİLER	148
6.	KAYNAKLAR	150
ÖZGEÇMİŞ		

ÖZET

CdS/CdTe GÜNEŞ HÜCRELERİNDE PENCERE VE SOĞURMA KATMANLARINA SELENYUM KATKISININ HÜCRE PERFORMANSINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Ali ÇİRİŞ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Yenilenebilir Enerji Kaynakları/Teknolojileri Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Emin BACAŞIZ
2021, 174 Sayfa

Bu tez çalışmasının birinci kısmında ısıtma işleminin CdS/CdSe pencere tabakalarının karakteristiği ve hücre performansı üzerine etkisi incelendi. CdS/CdSe ikili yapılarında, 10 dakikaya kadar uygulanan ısıtma işlemi sonucunda, kübik CdS ve CdSe fazlarının oluştuğu görüldü. Bununla birlikte CdCl₂ varlığında 10 dk. ısıtma işleminden sonra CdSSe alaşımının oluştuğu ve başlangıçtaki kübik yapının hekzagonale dönüştüğü belirlendi. CdSe/CdTe, CdS/CdTe ve CdS/CdSe/CdTe yapılarına sahip güneş hücrelerinden sırasıyla % 8,39; %10,12 ve %11,47 verim elde edildi. Pencere tabakası olarak CdS/CdSe yapısının kullanılmasının aygıtın uzun dalga boyu tepkisini iyileştirerek kısa devre akım yoğunluğunu arttırdığı görüldü.

İkinci kısımda, CdSe_xTe_{1-x} alaşımlarının özellikleri incelenerek, CdS/CdSe_xTe_{1-x}/CdTe aygıt yapısının hücre parametrelerine etkisi incelendi. CdSe_xTe_{1-x} alaşımlarında, Se-konsantrasyonunun artmasıyla kristal yapının kübikten karışık faza (kübik+hekzagonal) dönüştüğü bulundu. Alaşımların optik bant aralığı değerleri, eğilme etkisinin varlığını ortaya koydu. Aygıtlarda kullanılan CdSe_xTe_{1-x} ince filmlerinin (CST-20, CST-25, CST-30) aşamalı bir alaşım yapısına ve yaklaşık olarak optimum bant aralığına sahip olduğu görüldü. Son olarak CST-20/CdTe, CST-25/CdTe ve CST-30/CdTe yapılarına sahip güneş hücrelerinden sırasıyla % 9,59; %11,69 ve %10,13 verim elde edildi. Aygıt yapısında CdTe soğurma tabakasının ön- tarafında bir CdSe_xTe_{1-x} alaşım tabakası kullanmanın, kısa devre akım yoğunluğunu arttırdığı gösterildi.

Anahtar Kelimeler: CdTe, CdS/CdSe, güneş hücresi verimi, CdCl₂ işlemi, CdSe_xTe_{1-x} alaşımı, difüzyon, CSS, GI-XRD, EQE yanıtı

PhD. Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF SELENIUM ADDITION TO WINDOW AND ABSORPTION LAYERS ON CELL PERFORMANCE IN CdS/CdTe SOLAR CELLS

Ali ÇİRİŞ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Renewable Energy Sources/Technologies Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Emin BACAŞIZ
2021, 174 Pages,

In the first part of this thesis, the effect of heat treatment on the characteristics of CdS/CdSe window layers and the cell performance was investigated. It was observed that cubic CdS and CdSe phases were formed in CdS/CdSe bilayer structures as a result of heat treatment applied for up to 10 minutes. However, after 10 minutes of heat treatment in the presence of CdCl₂, CdSSe alloy was formed and the initial cubic structure turned into hexagonal. Solar cells with CdSe/CdTe, CdS/CdTe and CdS/CdSe/CdTe stacks yielded 8.39%, 10.12% and 11.47% efficiency, respectively. Using a CdS/CdSe window layer in solar cell structure increased the short-circuit current density by improving the long wavelength response of the device.

In the second part, the effects of CdS/CdSe_xTe_{1-x}/CdTe device structure on cell parameters were investigated by examining the properties of CdSe_xTe_{1-x} alloys. In CdSe_xTe_{1-x} alloys, the crystal structure changed from cubic to mixed phase (cubic+hexagonal) with increasing Se-concentration. The optical band gap values of the alloys revealed the existence of bowing effect. It was showed that CdSe_xTe_{1-x} thin films (CST-20, CST-25, CST-30) used in devices have a graded alloy structure and nearly optimum band gap. Finally, the efficiencies of solar cells with CST-20/CdTe, CST-25/CdTe and CST-30/CdTe structures were obtained as 9.59%, 11.69% and 10.13%, respectively. These results shows that CdSe_xTe_{1-x} alloy layer in front of the CdTe absorption layer in the device structure can be concluded the short circuit current density.

Key Words: CdTe, CdS/CdSe, Solar cell efficiency, CdCl₂ treatment, CdSe_xTe_{1-x} alloy, diffusion, CSS, GI-XRD, EQE response

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. 2020-2050 yılları arasında küresel enerji tüketim tahmini (IEA, 2020a).....	1
Şekil 2. 1990 ve 2017 yıllarındaki enerji kaynaklarına bağlı olarak küresel enerji tüketim grafikleri (IEA, 2020b).....	2
Şekil 3. 1990-2019 yılları arasında yıllık fotovoltaik enerji üretimi (BP, 2019).....	4
Şekil 4. Bir yarıiletkende Fermi seviyesinin şematik gösterimi	6
Şekil 5. Yarıiletkenlerde a) doğrudan ve b) dolaylı optik geçişler	6
Şekil 6. p ve n tipi bölgeler ve enerji-bant diyagramı.....	8
Şekil 7. p-n eklemi ve enerji-bant diyagramı	9
Şekil 8. Bir CdS/CdTe güneş pilinin şematik diyagramı (Kwon, 2012).	12
Şekil 9. a) Hava kütlesi numarası referans koşullarının şematik gösterimi (URL-5, 2020) b) Standart güneş spektrumu (URL-6, 2020).....	13
Şekil 10. a) Aydınlatmada harici bir yük olmaksızın eşdeğer devre (Swaminathan, 2020). b) Bir güneş pilinin kısa devre akım yoğunluğunu gösteren J-V eğrisi (URL-7, 2020).	14
Şekil 11. Bir güneş pilinin açık devre voltajını gösteren J-V eğrisi (URL-8, 2020).	15
Şekil 12. Bir hücrenin dolum faktörünü gösteren J-V grafiği (URL-10, 2020).	16
Şekil 13. Bir güneş pilinin karanlık ve aydınlatma altındaki J-V eğrisi	17
Şekil 14. a) İdeal bir güneş hücresinin eşdeğer devresi, b) Bir güneş pili devre şeması (Lorenzo, 1994).....	18
Şekil 15. Bir güneş hücresinin J-V karakteristiği üzerine a) seri direncin, b) şönt direncin etkisi (Jäger vd., 2016).	20
Şekil 16. Bazı yarıiletken malzemelerin soğurma katsayılarının dalga boyuna bağlı olarak değişimi (URL-12, 2021).....	22
Şekil 17. Işımalı rekombinasyon sürecinin şematik gösterimi (Reinders vd., 2017).	23
Şekil 18. Işımalı olmayan rekombinasyonun şematik gösterimi (Reinders vd., 2017).	24
Şekil 19. Auger rekombinasyonunun şematik gösterimi (Reinders vd., 2017).	25
Şekil 20. Kesit alanı A olan bir yarıiletkende elektron ve deliklerin sürüklenme akımı (Reinders vd., 2017).....	27
Şekil 21. Güneş pillerinin birincil aktif malzemeye göre sınıflandırılması (Ibn-Mohammed vd., 2017).....	33
Şekil 22. İnce film PV modül üretim grafiği (Fraunhofer ISE, 2019).....	34
Şekil 23. Bant aralığı bağlı olarak maksimum teorik verim grafiği (Shockley ve Queisser, 1961).	36

Şekil 24. CdTe faz diyagramı (Zanio, 1978).....	38
Şekil 25. CdTe'nin (111) tercihli yönelimine göre zinko sülfür kristal yapısı (Cd atomları siyah ve Te atomları gridir. Cd-Te bağları ve fcc birim hücresi gösterilmiştir) (Luque ve Hegedus, 2003).	39
Şekil 26. a) Üst-tabaka ve b) alt-tabaka konfigürasyonunda CdTe güneş pillerinin yapısını gösteren diyagram.....	42
Şekil 27. 1980-2016 yılları arasında küçük alanlarda CdTe hücre verimleri (NREL, 2020).	52
Şekil 28. Tez çalışması kapsamında incelenen örneklerin üretim ve karakterizasyon şeması	59
Şekil 29. Bu kısımda üretilen CdS/CdSe, CdS ve CdSe yapılarının şematik gösterimi	60
Şekil 30. CdS/CdSe, CdS ve CdSe örneklerinin şematik gösterimleri	62
Şekil 31. CdS/CdSe, CdS ve CdSe pencere katmanlı hücrelerin üretim sürecinde izlenen deneysel aşamalar	64
Şekil 32. a) CdS/CdSe, b) CdS, c) CdSe pencere katmanlarına sahip güneş hücresi yapıları	64
Şekil 33. CST-20, CST-25, CST-30 ara-katmanlarına sahip güneş hücrelerinin üretim sürecinde izlenen deneysel aşamalar	67
Şekil 34. a) CST-20, b) CST-25, c) CST-30 ara-katmanlarına sahip güneş hücresi yapıları	67
Şekil 35. Kimyasal banyoda büyütme sisteminin şematik gösterimi (Djelloul vd., 2016)..	69
Şekil 36. İnce filmin biriktirme süreci (Adachi ve Wasa, 2012).	70
Şekil 37. CdSe ve CdTe ince filmlerini büyütme için kullanılan termal buharlaştırma sisteminin şematik gösterimi	71
Şekil 38. CSS sisteminin şematik gösterimi	73
Şekil 39. CSS yöntemiyle CdTe büyütme için kullanılan sıcaklık profili	74
Şekil 40. Elektron demeti buharlaştırma sisteminin şematik gösterimi (J. X. Zhang ve Hoshino, 2018).....	75
Şekil 41. Bragg yasasının şematik gösterimi	77
Şekil 42. XRD ölçümlerinde a) Bragg-Brentano, b) geliş açısına bağlı XRD (GI-XRD)...	78
Şekil 43. Taramalı elektron mikroskobunun şematik diyagramı (Joshi vd., 2008).	81
Şekil 44. EDS cihazının çalışma prensibi (URL-15, 2021).	82
Şekil 45. UV-Vis sisteminin şematik diyagramı (Mohanta, 2017).....	83
Şekil 46. Bir güneş simülatörünün şematik gösterimi (Dittrich, 2014).	86
Şekil 47. Dış kuantum verimi ölçüm cihazının şematik gösterimi (Hierrezuelo-Cardet vd., 2020).	88
Şekil 48. a) İşlem görmeyen (As dep.) CdS b) 10 dk. CdS c) 10 dk. CdS/CdCl ₂ ince filmlerinin XRD spektrumları	90

Şekil 49. a) İşlem görmeyen (As dep.) CdSe, b) 10 dk. CdSe, c) 10 dk. CdSe/CdCl ₂ ince filmlerinin XRD desenleri.....	91
Şekil 50. a) 1 dk. b) 5 dk. c) 10 dk. tavlanan CdS/CdSe ince filmlerinin XRD desenleri...	93
Şekil 51. a) 1 dk. b) 5 dk. c) 10 dk. tavlanan CdS/CdSe/CdCl ₂ ince filmlerinin XRD desenleri	94
Şekil 52. Hava ortamında 400°C’de 10 dakika tavlanan a) CdS, b) CdS/CdCl ₂ örneklerinin FE-SEM görüntüleri	96
Şekil 53. Hava ortamında 400°C’de 10 dakika tavlanan a) CdSe, b) CdSe/CdCl ₂ örneklerinin FE-SEM görüntüleri.....	97
Şekil 54. Hava ortamında 400°C’de 10 dakika tavlanan a) CdS/CdSe, b) CdS/CdSe/CdCl ₂ örneklerinin FE-SEM görüntüleri.....	98
Şekil 55. CdS ve CdS/CdCl ₂ ince filmlerine ait geçirgenlik ve soğurma grafiği	100
Şekil 56. CdSe ve CdSe/CdCl ₂ ince filmine ait geçirgenlik ve soğurma grafiği.....	101
Şekil 57. Hava ortamında 400°C’de 1, 5 ve 10 dk. tavlanan CdS/CdSe tabakalarının geçirgenlik grafiği.....	102
Şekil 58. 400 °C’de hava ortamında 1, 5 ve 10 dk. tavlanan CdS/CdSe/CdCl ₂ tabakalarının geçirgenlik grafiği (Ekte, 10 dk. tavlanan örneğin Tauc grafiği gösterilmektedir)	103
Şekil 59. a) 0,7°’de CdS/CdTe b) 0,7°’de CdS/CdCl ₂ /CdTe c) 3°’de CdS/CdTe d) 3°’de CdS/CdCl ₂ /CdTe örneklerinin XRD spektrumları (Ekte 23-25° arasındaki genişletilmiş XRD spektrumu görülmektedir)	106
Şekil 60. 0,7°’de ölçülen (a-b) CdS/CdTe, (c-d) CdS/CdCl ₂ /CdTe örneklerinin ters-evrişim işleminin sonucunda ayırt edilen piklerin gösterimi	107
Şekil 61. 3°’de ölçülen a) CdS/CdTe, b) CdS/CdCl ₂ /CdTe örneklerinin ters-evrişim işleminin sonucunda ayırt edilen piklerin gösterimi	107
Şekil 62. a) 0,7°’de CdSe/CdTe b) 0,7°’de CdSe/CdCl ₂ /CdTe c) 3°’de CdSe/CdTe d) 3°’de CdSe/CdCl ₂ /CdTe örneklerinin XRD spektrumları (Ek: Ana piklerin genişletilmiş XRD spektrumu)	110
Şekil 63. 0,7°’de CdSe/CdTe örneğine uygulanan ters-evrişim sürecinin gösterimi	110
Şekil 64. a) 0,7°’de CdS/CdSe/CdTe b) 0,7°’de CdS/CdSe/CdCl ₂ /CdTe c) 3°’de CdS/CdSe/CdTe d) 3°’de CdS/CdSe/CdCl ₂ /CdTe örneklerinin XRD spektrumları	114
Şekil 65. 0,7°’de ölçülen (a-b) CdS/CdSe/CdTe, (c-d) CdS/CdSe/CdCl ₂ /CdTe örneklerinin ters-evrişim işleminin sonucunda ayırt edilen piklerin gösterimi	115
Şekil 66. 3°’de ölçülen (a-b) CdS/CdSe/CdTe, (c-d) CdS/CdSe/CdCl ₂ /CdTe örneklerinin ters-evrişim işleminin sonucunda ayırt edilen piklerin gösterimi	116
Şekil 67. a) CdS/CdTe, b) CdS/CdCl ₂ /CdTe katmanlı yapılarının SEM görüntüleri.....	118
Şekil 68. a) CdSe/CdTe b) CdSe/CdCl ₂ /CdTe katmanlı yapılarının SEM görüntüleri	119
Şekil 69. a) CdS/CdSe/CdTe b) CdS/CdSe/CdCl ₂ /CdTe katmanlı yapılarının SEM görüntüleri	119

Şekil 70. Üç farklı yapıya sahip güneş pillerinin aydınlatılmış J-V özellikleri	123
Şekil 71. Şekil 70'deki üç hücreden toplanan kuantum verimi eğrileri	124
Şekil 72. a) CdTe, b) CST-10, c) CST-20, d) CST-30, e) CST-40, f) CST-50 ve g) CdSe alaşımlarının XRD spektrumları	126
Şekil 73. CdSe _x Te _{1-x} alaşımlarının 23-26° arasında genişletilmiş XRD spektrumları	127
Şekil 74. a) CST-20 b) CST-30 c) CST-40 d) CST-50 alaşımlarının 38-49° arasında genişletilmiş XRD spektrumu	127
Şekil 75. a) CdTe, b) CST-10 c) CST-20, d) CST-30, e) CST-40, f) CST-50 g) CdSe örneklerinin SEM görüntüleri	129
Şekil 76. CdSe _{1-x} Te _x alaşımlarının (α hv) ² -(hv) grafiği	132
Şekil 77. CST-20 örneğinin a) 0,7° b) 3° geliş açılarında XRD spektrumu	134
Şekil 78. CST-25 örneğinin a) 0,7° b) 3° geliş açılarında XRD spektrumu	134
Şekil 79. CST-30 örneğinin a) 0,7° b) 3° geliş açılarında XRD spektrumu	135
Şekil 80. a) CST-20 b) CST-25 c) CST-30 örneklerinin SEM görüntüleri	136
Şekil 81. Aygıt yapımında kullanılan CdSe _x Te _{1-x} ara-katmanlarının (α hv) ² -(hv) grafikleri	137
Şekil 82. CdSe _x Te _{1-x} /CdTe soğurma-katmanlı güneş hücrelerinin J-V değişim eğrileri ..	139
Şekil 83. CdSe _x Te _{1-x} /CdTe soğurma-katmanlı güneş hücrelerinin EQE eğrileri.....	141

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. CdTe'nin optoelektronik ve fizikokimyasal özellikleri (Zanio, 1978).....	37
Tablo 2. CdSe _x Te _{1-x} alaşımını için CdTe ve CdSe tozlarının nominal kütle oranları	65
Tablo 3. Hava ortamında 10 dakika tavlanan pencere katmanı örneklerinin atomik oranları	99
Tablo 4. 0,7 ° ve 3° geliş açılarında ölçülen XRD spektrumlarından elde edilen CdS _x Te _{1-x} , CdSe _x Te _{1-x} ve CdS _x Se _{1-x} alaşımlarındaki x-değerleri (S ve Se konsantrasyonları)	117
Tablo 5. (CdS, CdSe)/CdTe katmanlı yapılarındaki Cd, S, Se ve Te'nin atomik oranlarını gösteren EDS sonuçları.....	120
Tablo 6. Güneş hücrelerinin parametreleri.....	123
Tablo 7. CdTe _{1-x} Se _x alaşımlarının atomik dağılımları	130
Tablo 8. Tauc çizimlerinden yararlanarak hesaplanan alaşımların bant aralığı değerleri .	132
Tablo 9. Hücre yapısında kullanılan CdSe _x Te _{1-x} alaşımların bant aralığı değerleri	137
Tablo 10. CdSe _x Te _{1-x} ara-katmanına sahip aygıtların hücre parametre değerleri	139

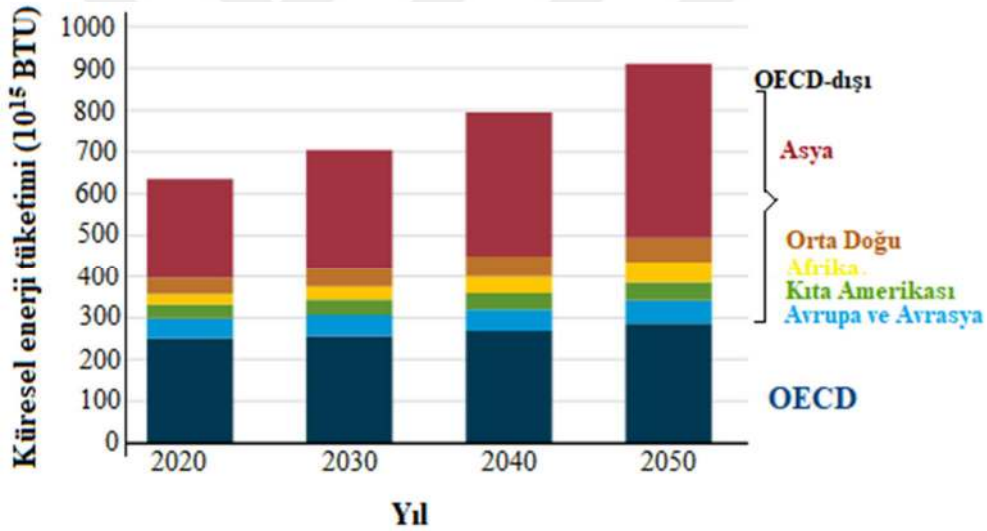
SEMBOLLER DİZİNİ

AM	: Hava kütlesi
CdTe	: Kadmiyum tellür
CdSe	: Kadmiyum selen
CdS	: Kadmiyum kükürt
F:SnO ₂	: Flor katkılı kalay oksit
CSS	: Kapalı hacimde süblimleşme
CBD	: Kimyasal banyoda biriktirme
EBD	: Elektron-demeti buharlaştırma
E _c	: İletim bandının taban enerji seviyesi
E _v	: Değerlik bandının tavan enerji seviyesi
E _g	:Yasak enerji aralığı
Te	:Tellür
Se	:Selenyum
S	:Kükürt
XRD	:X-ışınları difraktometresi
GI-XRD	:Açıya bağlı X-ışınları difraktometresi
SEM	:Taramalı elektron mikroskopu
FE-SEM	:Alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu
EDS	:Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi
J-V	:Akım yoğunluğu-Voltaj
EQE	:Dış kuantum verimi
R _s	:Seri direnç
R _{sh}	:Şönt direnci
V _{oc}	:Açık devre voltajı
J _{sc}	:Kısa devre akım yoğunluğu
FF	:Dolum faktörü
η	:Hücre verimi
α	:Soğurma katsayısı
TCO	:Saydam iletken oksit

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Küresel enerji tüketimi nüfus artışı, teknolojik gelişmeler ve ekonomik büyüme gibi sebeplerden dolayı sürekli olarak artmaktadır (IEO, 2020; OECD, 2011). Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) tarafından yayımlanan bir rapora göre, 2020 ile 2050 yılları arasında küresel enerji tüketiminin önemli oranda artacağı öngörülmektedir (IEA, 2020a). Şekil 1’de bu enerji tüketiminin yıllara göre değişimi verilmektedir. Buna göre, 2050 yılında enerji tüketiminin yaklaşık %43 oranında artacağı tahmin edilmektedir.

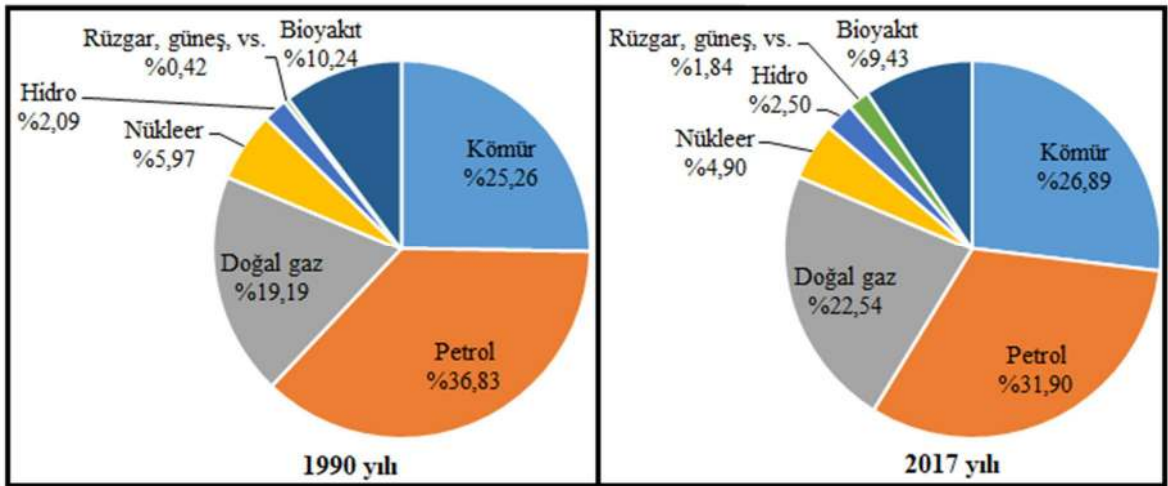


Şekil 1. 2020-2050 yılları arasında küresel enerji tüketim tahmini (IEA, 2020a).

Günümüzde enerji ihtiyacının önemli bir kısmı petrol, doğal gaz, kömür gibi fosil kaynaklardan; geriye kalan kısmı ise nükleer ve yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanmaktadır (IEA, 2020b). Ancak fosil yakıt rezervleri sınırlıdır ve yakıt gelecekte tükeneyeceği tahmin edilmektedir (Shafiee ve Topal, 2009). Ayrıca fosil yakıtların kullanımı, en önemli küresel sera gazı yayılım kaynağı olan karbondioksitin (CO_2) havaya salınmasına neden olmaktadır. CO_2 ise atmosferde ısıyı hapsederek küresel ısınmaya sebep olmaktadır (Kweku vd., 2017). İklim bilimciler, geçtiğimiz yüzyılda Dünya'nın ortalama sıcaklığının yaklaşık 1°C yükseldiğini ifade etmektedir (URL-1, 2020). Bu sıcaklık artışı devam ettiği

takdirde; deniz seviyelerinin yükselmesi, kuraklık, bitki ve hayvan türlerinin ölümü, su baskınları gibi olayların meydana geleceği öngörülmektedir (URL-2, 2020). Bunların yanında fosil yakıtların kullanılması sonucunda havaya, toprağa ve suya salınan kirleticilerden dolayı, çevre ve insan sağlığına da ciddi bir zarar verilmektedir (URL-3, 2020). Öte yandan atom çekirdeğindeki reaksiyonlar sonucu elde edilen nükleer enerji ise düşük maliyette elde edilebilmektedir (Ram vd., 2018). Ancak bu enerjinin kullanılması radyasyon yayımı, nükleer atıkların depolanması ve nükleer reaktörlerin patlama riski gibi tehlikeleri barındırmaktadır (URL-4, 2020).

Fosil enerji kaynaklarının sınırlı rezervi ve küresel ısınmaya sebep olması, nükleer enerjideki riskler, alternatif ve temiz enerji kaynaklarının kullanılmasını motive etmektedir. Bu nedenle çevre ve insan sağlığı açısından çok daha elverişli olan yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi, son yıllarda önemli bir artış gösterdi. Şekil 2’de 1990 ve 2017 yıllarında enerji ihtiyacını karşılamak için kullanılan farklı enerji kaynaklarının oranları gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde, yenilenebilir enerji kaynaklarının (hidro, rüzgar, güneş, biyoyakıt vs.) toplam enerji tüketimi içindeki payının %12,75’ten (1990 yılı) %13,77’ye (2017 yılı) çıktığı belirlendi (IEA, 2020b).



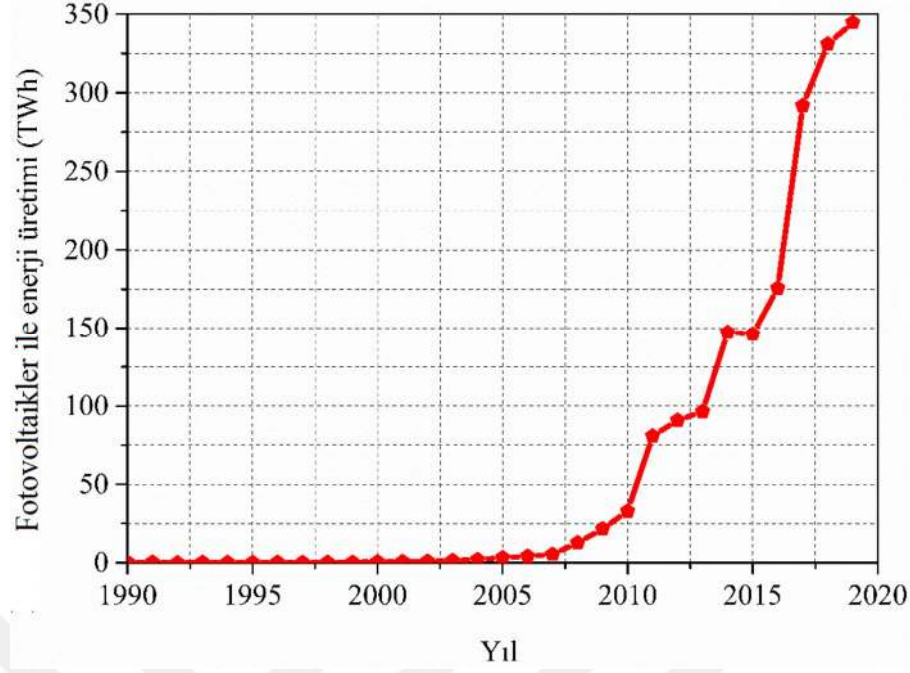
Şekil 2. 1990 ve 2017 yıllarındaki enerji kaynaklarına bağlı olarak küresel enerji tüketim grafikleri (IEA, 2020b).

Yenilenebilir enerji rüzgâr, su, biyokütle, jeotermal ve güneş gibi kaynaklardan sağlanan sürdürülebilir ve temiz enerjidir (Huang ve Wu, 2007). Yenilenebilir enerji teknolojisi, doğal kaynakları faydalı enerji formlarına dönüştürerek enerji üreten

çözümlerden biridir ve az miktarda kirletici ürettiklerinden dolayı çevreye çok daha duyarlıdır (Chen vd., 2007). Bu kaynaklar arasında, artan enerji ihtiyacını karşılamak için en umut verici enerji kaynağı Güneş'tir. Çünkü Güneş, tahmini 10 milyar yıl olan ömründen dolayı neredeyse tükenmez bir enerji kaynağıdır. Güneş'in yaydığı $3,8 \times 10^{23}$ kJ/s (ya da kW) enerjinin yaklaşık $1,8 \times 10^{14}$ kJ/s'ı dünyaya ulaşmaktadır. Dünya'ya ulaşan bu muazzam enerjiden dolayı; Güneş, terawatt mertebesindeki küresel enerji talebini karşılayabilecek oldukça büyük bir potansiyele sahiptir (Panwar vd., 2011).

Güneş ışığının elektrik enerjisine dönüşümü, güneş pilleri (fotovoltaikler) vasıtasıyla gerçekleşmektedir. Yapılan hesaplamalara göre, Dünya'nın kara alanının % 0,16'lık bir bölgesinin % 10 verimli güneş panelleri ile kaplanması durumunda; 20 TW'lık bir güç elde edileceği öngörülmektedir. Bu enerji miktarı, küresel ölçekte fosil enerji tüketiminin neredeyse iki katına ya da 20.000 adet 1 GW'lık nükleer fisyon santraline eşdeğer bir enerjiye karşılık gelmektedir. Bu karşılaştırma, günümüzde yoğun olarak kullanılan enerji teknolojilerinden çok daha güçlü bir enerji akışı sağlayan güneş enerjisinin etkileyici büyüklüğünü göstermektedir (Lewis vd., 2005). Şekil 3, 1990 ile 2019 yılları arasında fotovoltaikler vasıtasıyla elektrik enerjisi üretimini göstermektedir. Buna göre, küresel fotovoltaik endüstrisi özellikle son 15 yılda ciddi bir ilerleme kaydetmiş ve 2019 yılında gerçekleşen 345 TWh yıllık üretim ile rekor seviyeye ulaşmıştır (BP, 2019).

Fotovoltaikler vasıtasıyla elektrik enerjisi üretiminin, enerjinin geleceğinde önemli bir rol oynayacağı açıktır. 2050 yılında fotovoltaiklerin küresel elektrik üretiminin yaklaşık %11'ini karşılayabileceği tahmin edilmektedir (Blakers vd., 2009). Fotovoltaiklerin bu potansiyelinden dolayı, yüksek verimli ve düşük maliyetli güneş pillerinin üretimi ve bunların konut, fabrika, ulaşım aracı, uydu, vs. gibi farklı alanlarda kullanımı için yapılan çalışmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir (Bailey ve Flood, 1998; Jacobson, 2009; Jelle vd., 2012; MacKay, 2013; Pandey vd., 2016).



Şekil 3. 1990-2019 yılları arasında yıllık fotovoltaik enerji üretimi (BP, 2019).

1.2. Güneş Pillerinin Çalışma Prensibi

Güneş pilleri, malzemelerin üzerine düşen güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren aygıtlardır. Bu aygıtların temeli, yarıiletken malzemelerin kullanılmasıyla oluşturulan p-n eklemine dayanmaktadır. Aygıtlardaki enerji dönüşümü, eklem bölgesine gelen fotonların etkileşimi sonucu taşıyıcıların üretimine ve üretilen taşıyıcıların toplanarak elektrik akımı oluşturmaya dayanmaktadır (Hersch ve Zweibel, 1982).

1.2.1. Temel Yarıiletken Kavramlar

Güneş pillerinin performansını, aygıt yapımında kullanılan yarıiletken malzemelerin özellikleri ve bu malzemelerin birbirleriyle etkileşimi önemli ölçüde etkilemektedir. Bu nedenle yarıiletken malzemelerin bant yapıları, p-tipi ve n-tipi yarıiletkenlerin özellikleri, p-n eklemi gibi temel yarıiletken kavramların anlaşılması kritik bir öneme sahiptir.

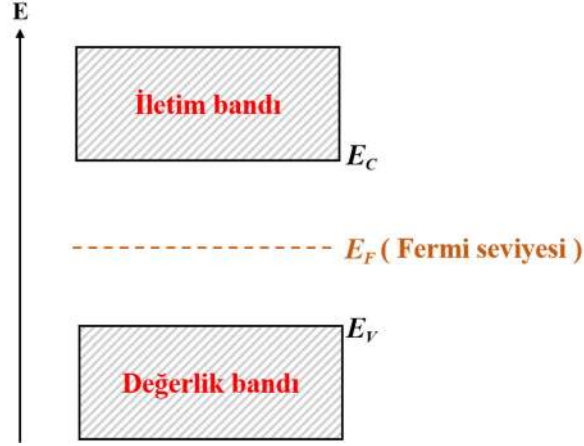
1.2.1.1. Yarıiletkenlerde Bant Kavramı ve Fermi Seviyesi

Kimyasal reaksiyonlar, atomların en dış kabuğundaki elektronların değiş-tokuşundan kaynaklanmaktadır. Benzer şekilde, bir kristalde atomlar arasındaki bağlar ve elektriksel iletim de en dış kabuktaki elektronlardan kaynaklanır. Enerji-bant teorisine göre bu elektronlar, taban durumundaki atomlar için en yüksek enerji seviyesine sahip son işgal edilen bantta bulunur. Bununla birlikte bir kristalde sonsuz sayıda enerji bandı bulunur. Bu nedenle elektronlar, ilk önce en düşük enerji bantlarındaki (1s) durumları işgal etmekte ve sonra daha yüksek enerjili bantları doldurmaya başlamaktadır. Elektronların bulunduğu en yüksek enerjiye sahip işgal edilen banda, değerlik bandı denir. Değerlik bandının hemen üstünde işgal edilmeyen (izinli) bant ise iletim bandı olarak adlandırılır. Mükemmel bir katıda, değerlik bandı ile iletim bandı arasındaki enerji durumları yasaktır ve işgal edilmemektedir (Colinge ve Colinge, 2005).

Mutlak sıcaklıkta (0 K) bir elektronun maksimum enerjisine Fermi seviyesi (E_F) denir. Başka bir ifadeyle elektronların işgal etme olasılığının 1/2 olduğu enerji seviyesi, Fermi seviyesi olarak tanımlanır. 0 K'de Fermi seviyesinin altındaki izinli enerji seviyeleri işgal edilirken, E_F 'nin üstündeki tüm seviyeler boştur. Belirli bir 'T' sıcaklığında bir enerji seviyesinin işgal edilme olasılığı, Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu ($f(E,T)$) ile belirlenir (Denk.1).

$$f(E, T) = \frac{1}{\exp[(E - E_F)/kT] + 1} \quad (1)$$

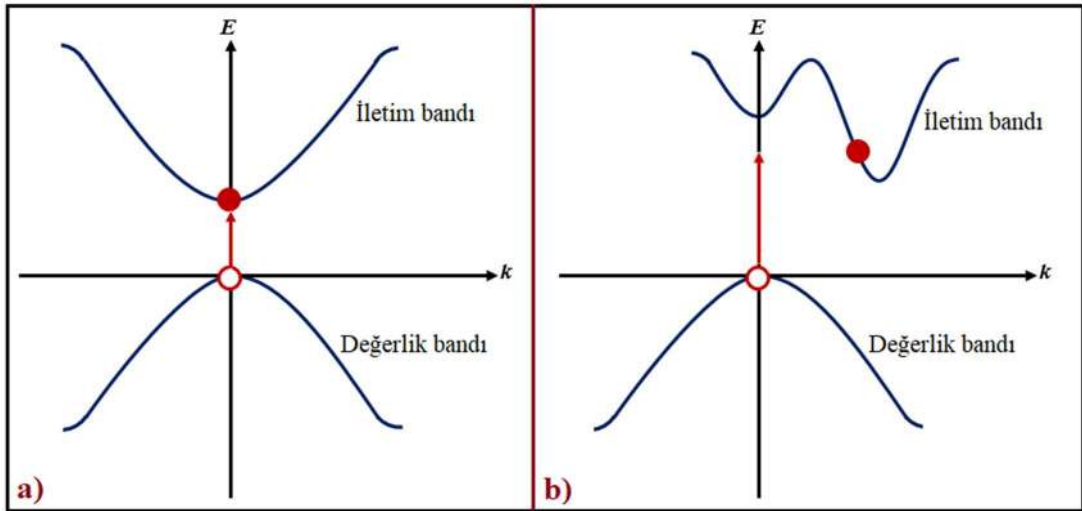
Bu denklemde ' E_F ' Fermi seviyesi, ' k_B ' Boltzmann sabiti ($8,617 \times 10^{-5}$ eV/K) ve 'T' (Kelvin (K) biriminde) sıcaklıktır. Bir yarıiletkende, 0 K'de değerlik bandının elektronlarla dolu olduğu ve iletim bandının ise boş olduğu bilinmektedir. Bu nedenle bir yarıiletkende Fermi seviyesi, iletim bandının taban enerji seviyesi (E_c) ile değerlik bandının tavan enerji seviyesi (E_v) arasında bulunmaktadır (Rothwarf ve Böer, 1975).



Şekil 4. Bir yarıiletkenin Fermi seviyesinin şematik gösterimi

1.2.1.2. Doğrudan ve Dolaylı Optik Geçişler

Yarıiletkenlerde bantlar arası taşıyıcı yüklerin geçişi, doğrudan ve dolaylı olmak üzere iki farklı şekilde gerçekleşebilir. Şekil 5a'da görüldüğü üzere, iletim bandının minimum enerjisi ile değerlik bandının maksimum enerjisi aynı k -değerinde ($k = 0$) bulunuyorsa; bu özelliği gösteren yarıiletkenlere, doğrudan geçişli yarıiletkenler denir. Doğrudan geçişli yarıiletkenlere CdTe, GaAs gibi bileşikler örnek olarak verilebilir. İletim bandının minimum enerjisi ile değerlik bandının maksimum enerjisi farklı k değerlerinde bulunuyorsa; bu özelliği gösteren yarıiletkenlere dolaylı geçişli yarıiletkenler denir (Şekil 5(b)). Dolaylı geçişli yarıiletkenlere Si ve Ge örnek olarak verilebilir.



Şekil 5. Yarıiletkenlerde a) doğrudan ve b) dolaylı optik geçişler

1.2.1.3. p- ve n- Tipi Yarıiletkenler

Özden (katkısız, intrinsic) yarıiletken, safsızlık atomlarının olmadığı bir yarıiletken türüdür. Termal dengede bulunan özden bir yarıiletkende, iletim bandındaki elektron sayısı ile değerlik bandındaki deliklerin sayısı birbirine eşittir. Ancak donör veya akseptör safsızlıkları katkılanarak, malzemenin elektriksel özellikleri değiştirilmektedir.

Örneğin bir silisyum (Si) yarıiletkeni, değerlik elektronu 3 olan bor atomları ile katkılандığında; p-tipi bir yarıiletken elde edilmektedir. Bor atomunun üç elektronu komşu Si'nin değerlik elektronlarıyla üçlü kovalent bağ yapacaktır. Si atomunun bir elektronu bağ yapamadığından dolayı, bir elektron eksikliği meydana gelir. Bu elektron eksikliğine 'delik (hol)' denir ve bu delikler elektriksel ilettime katkıda bulunur. Her bir bor atomu, kristale bir delik verdiği için dolayı; silisyumdaki bu bor atomlarına 'akseptör atomları' denir. Akseptör katkıları içeren bu yarıiletken, çoğunluk taşıyıcıları delikler olduğundan dolayı p-tipi yarıiletken özelliği göstermektedir.

Benzer şekilde n-tipi bir yarıiletken elde etmek için bir Si yarıiletkeni, değerlik bandında 5 elektronu bulunan arsenik atomu ile katkılanabilir. Arseniğin dört elektronu komşu Si'nin değerlik elektronlarıyla dördü kovalent bağ yapar. Arseniğin bağ yapmayan 1 elektronu, oda sıcaklığındaki termal enerjide bile serbest hale gelerek iletim bandında yer alır ve elektriksel ilettime katkıda bulunur. Her bir arsenik atomu kristale bir elektron verdiği için dolayı, silisyumdaki bu arsenik atomlarına 'donör atomları' denir. Donör katkıları içeren bu yarıiletken, çoğunluk taşıyıcıları elektronlar olduğundan dolayı n-tipi bir yarıiletken özelliği göstermektedir (Colinge ve Colinge, 2005).

1.2.1.4. p-n Eklemi

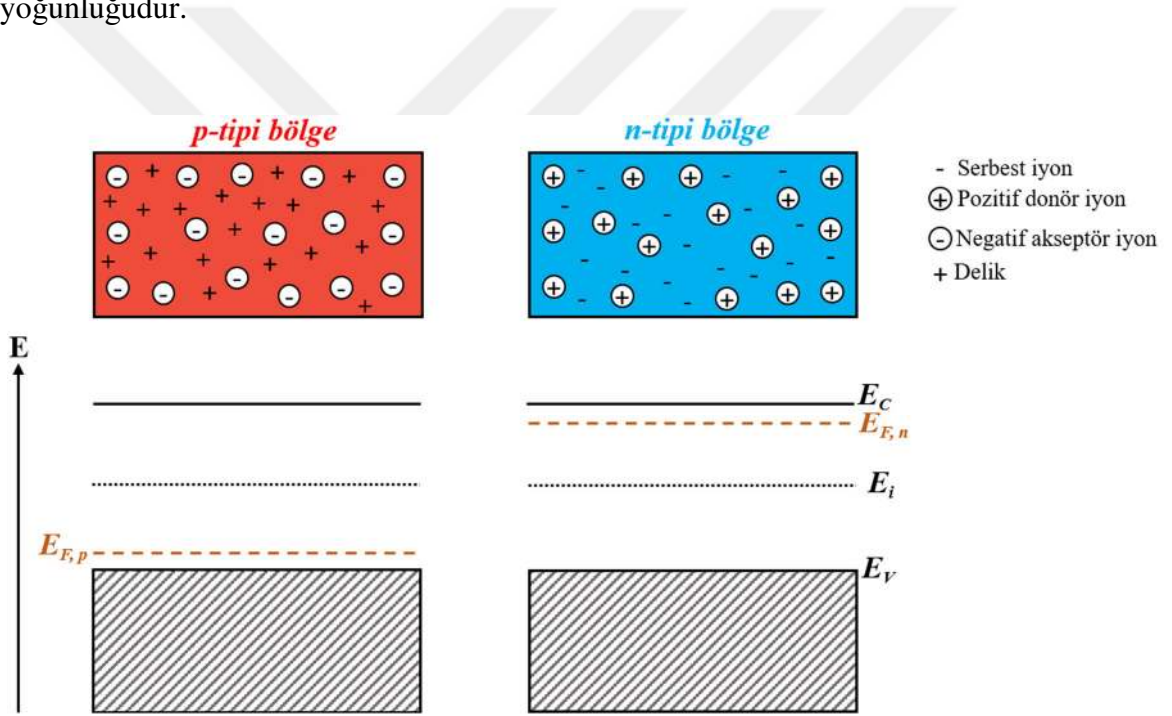
Bir fotovoltaik aygıtın temel bileşeni, p-n eklemidir. p-n eklemi, p-tipi ve n-tipi iki yarıiletkenin bir araya getirilmesiyle oluşturulur. p-n eklemi; p-tipi ve n-tipi bileşenlerin aynı tür yarıiletken malzemelerden oluştuğu durumda 'homoeklem', farklı tür yarıiletken malzemelerden oluştuğu durumda ise 'heteroeklem' olarak adlandırılır.

Termodinamik dengedeki bir p-n eklemi ele alınmadan önce, p-tipi ve n-tipi yarıiletkenin ayrı ayrı ele alındığı durum incelenmelidir. Basitlik açısından, n-tipi ve p-tipi bölgedeki katkılama konsantrasyonlarının eşit olduğu varsayalım ($N_a \approx N_d$). İki ayrı

bölgeden oluşan yarıiletkenlerin enerji-bant diyagramı Şekil 6’da gösterilmektedir. Bu durumda Fermi seviyeleri,

$$\left. \begin{array}{l} \text{n-tipi bölgede } E_{F,n} - E_i = kT \ln \left(\frac{N_d}{n_i} \right) \\ \text{p-tipi bölgede } E_i - E_{F,p} = kT \ln \left(\frac{N_a}{n_i} \right) \end{array} \right\} \quad (2)$$

olarak ifade edilebilir. Burada ‘ E_F ’ Fermi seviyesi, ‘ E_i ’ özden enerji seviyesi, ‘ N_d ’ donör taşıyıcı yoğunluğu, ‘ N_a ’ akseptör taşıyıcı yoğunluğu ve ‘ n_i ’ malzemenin özden taşıyıcı yoğunluğudur.



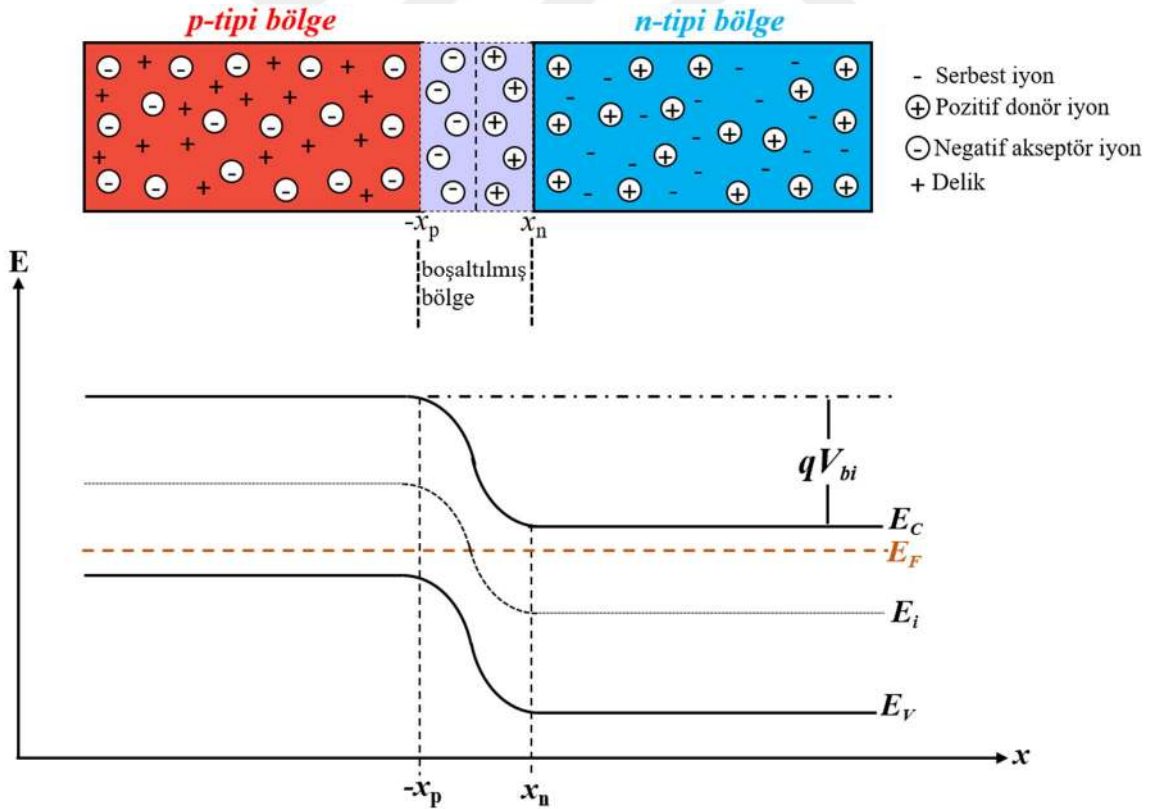
Şekil 6. p ve n tipi bölgeler ve enerji-bant diyagramı

p-n eklemi oluşturulduktan sonra, elektronların n-tipi bölgeden p-tipi bölgeye ve deliklerin p-tipi bölgeden n-tipi bölgeye difüzyonu gerçekleşir. Elektronlar n-tipi bölgeden p-tipi bölgeye difüzyona uğradıklarında, geride iyonize donör atomları bırakır. Bu atomlar, kristal örgüde yer-değişimi bölgelerini (substitutional site) işgal eder ve kristal içinde hareket etmezler. Bu pozitif yüklü iyonların bulunduğu bölgede, elektronlar tükendiği için "tükenme bölgesi" olarak adlandırılan bir uzay yük bölgesi oluşur (Şekil 7). Aynı zamanda tüm serbest yükler boşaltıldığından dolayı, bu bölge deplasyon bölgesi olarak da adlandırılır. Benzer

şekilde, deliklerin p-tipinden n-tipi bölgeye difüzyonu, p-tipi malzemede bir tükenme bölgesine yol açar. Bu bölge, negatif yüklü akseptör atomlarının varlığından dolayı net bir negatif yük taşır (Şekil 7).

n-tipi bölgedeki sabit pozitif iyonlar ve p-tipi bölgedeki sabit negatif iyonlar, n- tarafından p- tarafına doğru bir elektrik alanı oluşturur. Termal dengede tükenme bölgesindeki pozitif yük, elektronları öylesine çeker ki, elektronları p-tipi bölgesine iten difüzyon kuvveti, elektronları n-tipi bölgeye "geri çağırır" yerleşik elektrik alan kuvveti ile tam olarak dengelenir. Benzer şekilde, delikleri n-tipi bölgeye iten difüzyon kuvveti, delikleri p-tipi bölgeye "geri çağırır" yerleşik elektrik alan kuvveti ile tam olarak dengelenir.

p-n eklemi, farklı Fermi seviyelerine (kimyasal potansiyele) sahip p-tipi ve n-tipi yarıiletken malzemeler ile oluşturulduğunda; termal dengede Fermi seviyeleri hizalanır. Bu hizalanma, değerlik ve iletim bandının bükülmesine yol açar (Colinge ve Colinge, 2005). p-n ekleminin enerji-bant diyagramı Şekil 7'de gösterilmektedir.



Şekil 7. p-n eklemi ve enerji-bant diyagramı

p-n eklemının oluşumundan kaynaklanan elektrostatik potansiyel farka, ‘ V_{bi} ’ yerleşik eklem potansiyeli denir. Bu potansiyel, tükenme bölgesindeki pozitif ve negatif uzay yükünün yarattığı elektrik alandan kaynaklanır. qV_{bi} , eklemın iki tarafındaki Fermi seviyeleri arasındaki farktır. Aynı zamanda bu değer, dengede Fermi seviyesinin sabit ve düz olması için gereken bant bükülmesi derecesidir. Bir p-n ekleminde yerleşik eklem potansiyeli,

$$qV_{bi} = E_{F,n} - E_{F,p} = kT \ln \left(\frac{N_d}{n_i} \right) + kT \ln \left(\frac{N_a}{n_i} \right) = kT \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right) \quad (3)$$

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right) \quad (4)$$

denklemleri ile ifade edilmektedir (Rana, 2021).

1.2.2. Fotovoltaik Aygıtta Enerji Dönüşümü

Bir fotovoltaik aygıt, saydam iletken tabaka, pencere tabakası, soğurma tabakası ve geri kontak gibi çeşitli tabakaların belirli bir dizilim sırasıyla birleştirilmesinden sonra, kapalı bir devre oluşturularak tamamlanır. Aygıt üzerine gelen ışığın elektrik enerjisine dönüşümü ise üç adımda gerçekleşir:

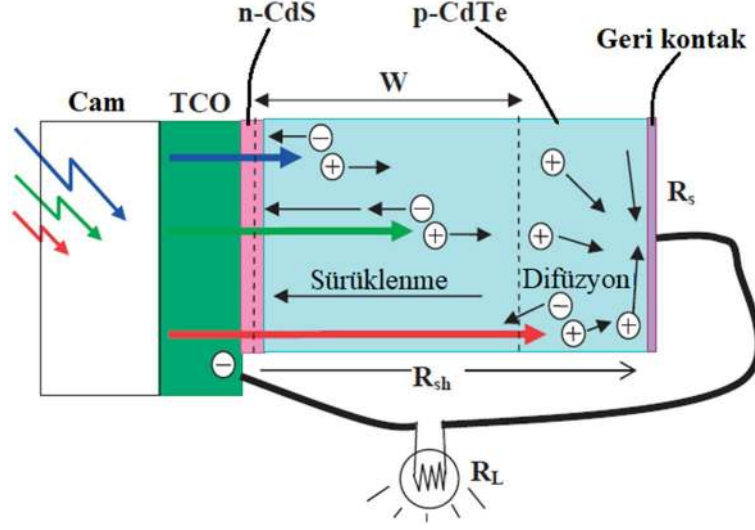
- i. Eklemi oluşturan yarıiletken malzemelerde fotonların soğurulmasından dolayı, elektron-delik çifti oluşumu: Yarıiletken bir malzemede bir fotonun soğurulması için, fotonunun enerjisinin malzemenin bant aralığına eşit ya da ondan daha büyük ($E_{ph} \geq E_g$) enerjide olması gerekir. Bununla birlikte ideal bir yarıiletkende, E_g 'den daha küçük enerjiye sahip fotonlar, soğurulmadan ve herhangi bir etkileşime uğramadan malzemedan geçmektedir. Foton soğurulduğu zaman değerlik bandındaki bir elektron, iletim bandına geçer ve geride bir delik bırakır. Sonuç olarak bir fotonun soğurulması, bir elektron-delik çiftinin oluşumuna yol açmaktadır (Fonash, 2012; Jäger vd., 2016).
- ii. Eklem bölgesinde foton ile üretilen yük taşıyıcılarının ayrılması: Bu aşamada, güneş ışığının soğurulması sonucunda üretilen serbest negatif yük taşıyıcıları (elektronlar) bir yönde (katot olarak adlandırılan kontağa) ve serbest pozitif yük taşıyıcıları (delikler) diğer yönde (anot olarak adlandırılan diğer kontağa) hareket ederler. Bu durum boşaltılmış

bölgedeki yerleşik elektrik alanının etkisi altındaki elektronların n-tipi bölgeye ve deliklerin p-tipi bölgeye doğru, zıt yönlerde süpürülmesi ile gerçekleşir.

iii. Eklem terminallerinde foton ile üretilen yük taşıyıcılarının toplanması: Son olarak yük taşıyıcıları, aygıtın önünde ve arkasında bulunan kontaklar vasıtasıyla toplanır. Dış bir devre bağlandığında, katoda gelen (foton ile üretilen) fazla elektronlar, fazla deliklerle yeniden birleşmek için dış devre boyunca hareket eder. Bu yolda giderken, elektriksel bir “yükte (load)” enerjilerini kaybeder ve sonunda hücrenin anotuna geri dönerler. Anota geri dönen elektronların her biri, fotovoltaik enerji dönüşümünün üçüncü adımını tamamlar. Sonuç olarak, elektron-delik çiftlerinin kimyasal enerjisi, elektrik enerjisine dönüştürülür (Fonash, 2012; Jäger vd., 2016).

Fotovoltaik enerji dönüşümünü örneklemek için, CdS/CdTe güneş pilinin şematik diyagramı, Şekil 8’de gösterilmektedir. Bu yapıda n-tipi tabaka olarak kullanılan CdS, güneş ışığında bulunan foton enerjilerine kıyasla nispeten yüksek bir bant aralığına ($\sim 2,4$ eV) sahiptir. Neredeyse tüm fotonlar n-tipi tabakadan geçer ve gelen foton enerjilerine benzer bir bant aralığına sahip olan p-tipi tabakada soğurulur.

Güneş pili karanlıkta bir diyot olarak davranır. p-CdTe'den n-CdS'ye akım oluşurken, ters yönde akım oluşmaz. Güneş pili aydınlatıldığında ise deplasyon bölgesinde veya çok yakınında fotonlar soğurulur. Bu aşamada kırmızı okla gösterilen düşük enerjili (daha uzun dalga boylu) fotonlar, yüksek girme derinliği nedeniyle filmin derinliklerine ulaşabilir, ancak soğurmaya önemli bir katkıda bulunmaz. Orta- (yeşil ok) ve yüksek-enerjili (mavi ok) fotonlar çoğunlukla tükenme bölgesinde ve/veya tükenme bölgesi yakınında soğurulur ve serbest yük taşıyıcılarının (elektron-delik çiftleri) üretimine katkıda bulunur. Daha sonra CdTe'deki elektronlar, elektron yoğunluğundaki değişim (gradyan) nedeniyle tükenme bölgesine difüzyona uğrar ve yerleşik eklem elektrik alanı tarafından CdS katmanına sürüklenir. Bundan sonraki aşamada ise elektronlar TCO katmanında toplanır. Güneş pili R_L -yük direncine bağlandığında, R_L 'deki voltaj farkı nedeniyle, p-CdTe tarafı daha yüksek bir voltaja sahip olurken, n-CdS tarafı ise daha düşük bir voltajda olacaktır. Elektronlar, R_L -dirençli tel boyunca akar ve sonunda bir delikle yeniden birleşmek için geri kontak tarafına ulaşır. Bu yük taşıyıcı hareketinden dolayı ise bir akım oluşur (Kwon, 2012).



Şekil 8. Bir CdS/CdTe güneş pilinin şematik diyagramı (Kwon, 2012).

1.3. Güneş Pili Parametreleri

1.3.1. Güneş Spektrumu

Güneş ışığının şiddeti, ışığın atmosferden geçerken gerçekleşen soğurma ve saçılma süreçlerinden dolayı azalmaktadır. Bu nedenle güneş pillerini karşılaştırmak için; standart bir güneş spektrumu geliştirildi.

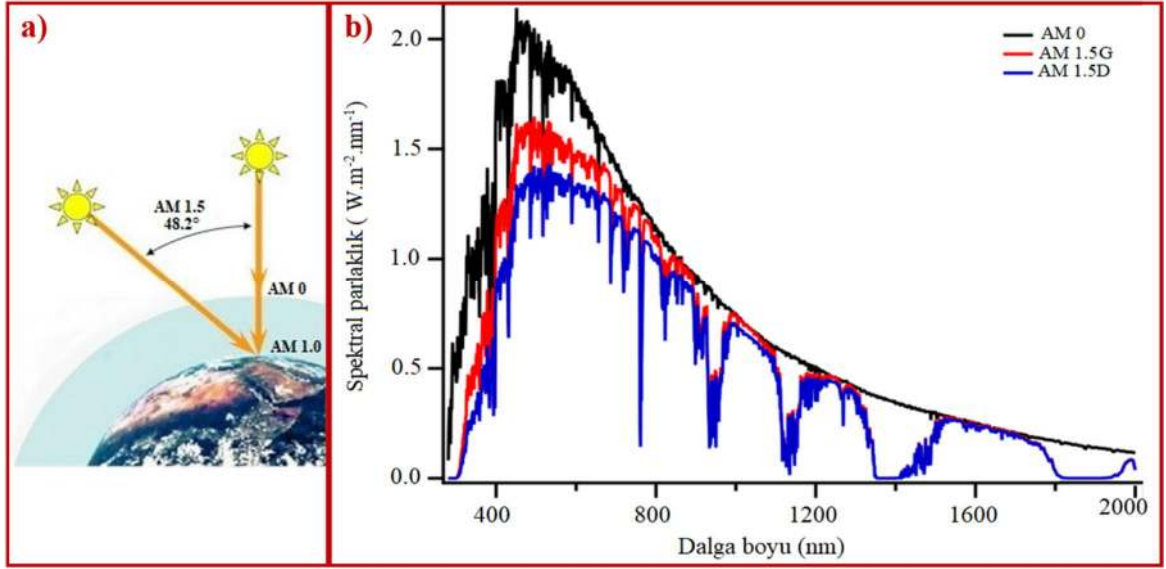
Hava kütlesi, atmosfer aracılığıyla dünya yüzeyine ulaşan güneş ışığının doğrudan bağlı yol uzunluğudur. Ayrıca ışığın atmosferden geçerken uğradığı fiziksel olayların radyasyonun şiddetini nasıl etkilediğinin bir ölçüsünü de göstermektedir. Hava kütlesi numarası,

$$AM = \frac{1}{\cos \theta} \quad (5)$$

ile ifade edilmektedir. Burada θ , güneş ile Zenith arasındaki açıdır (güneş doğrudan tepede olduğunda $\theta=0$). Dünya atmosferinin hemen üstünde radyasyon şiddeti, yaklaşık 1353 W/m^2 'dir. Bu spektral dağılım, hava kütlesi sıfır (AM0) radyasyon spektrumu olarak adlandırılır. Bu dağılım, güneş kadar sıcak bir materyal için siyah cisim ışımasına benzemektedir (Şekil 9a). Güneş pili performansını karşılaştırmak için yaygın olarak kullanılan AM1.5

spektrumu; $48,2^\circ$ güneş zenit açısına karşılık gelir. Şekil 9b, dalga boyuna bağlı standart güneş spektrumunu göstermektedir (Wakeling, 2010).

Dünya yüzeyindeki güneş ışığının spektral içeriği, atmosferdeki saçılma ve yansıma olaylarından dolayı difüze (indirekt) bir bileşene sahiptir. Bu nedenle hava kütlesi, spektrumun difüze bileşenini içerip içermediğine göre ayrıca tanımlanır. Bir AM 1.5G (global) spektrumu, direkt ve difüze bileşeni içerirken; AM 1.5D sadece direkt bileşeni içermektedir (Riordan ve Hulstron, 1990).



Şekil 9. a) Hava kütlesi numarası referans koşullarının şematik gösterimi (URL-5, 2020)
b) Standart güneş spektrumu (URL-6, 2020).

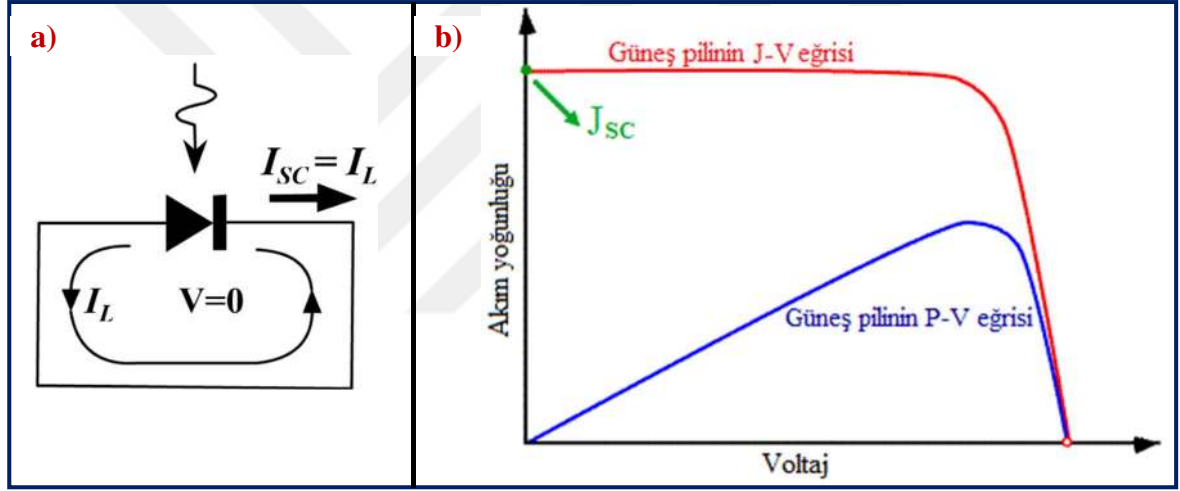
Akım yoğunluğu-voltaj karakteristiğini güvenilir bir şekilde ölçmek için, ölçümlerin standart test koşulları (STC) altında yapılması hayati önem taşımaktadır. Bu yüzden genellikle güneş hücrelerinin performansı, oda sıcaklığında AM1.5 spektrumunda 100 mW/cm^2 ışık şiddetinde gerçekleştirilmektedir.

Bir güneş hücresinin performansını karakterize etmek için kullanılan ana parametreler, ' J_{sc} ' kısa devre akım yoğunluğu, ' V_{oc} ' açık devre voltajı ve 'FF' dolum faktörü ve ' η ' foto-dönüşüm verimidir.

1.3.2. Kısa Devre Akımı

Kısa devre akımı (I_{sc}), güneş hücresinin elektrotları kısa devre yapıldığında, yani hücre boyunca voltaj sıfır olduğunda dış devreden geçen akımdır. Bir güneş pilinin I_{sc} değeri, hücreye gelen foton akısına, hücre alanına, hücrenin optik özelliklerine (yansırma ve soğurma vs.) ve toplanma olasılığına bağılı olarak değişmektedir. İdeal bir güneş pili için I_{sc} , foton ile üretilen akım (I_L) ile aynıdır (Şekil 10a)) (Jäger vd., 2016).

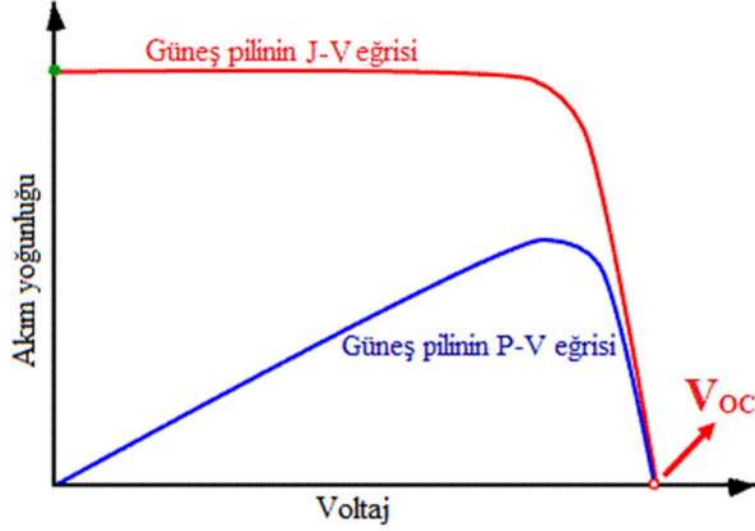
Genellikle I_{sc} 'nin hücre alanına bağımlılığını ortadan kaldırmak için, akım yerine 'akım yoğunluğu (J_{sc})' niceliğı kullanılır. Şekil 11'de bir akım yoğunluğu-voltaj (J-V) eğrisi üzerinde J_{sc} değeri gösterilmektedir.



Şekil 10. a) Aydınlatmada harici bir yük olmaksızın eşdeğer devre (Swaminathan, 2020).
b) Bir güneş pilinin kısa devre akım yoğunluğunu gösteren J-V eğrisi (URL-7, 2020).

1.3.3. Açık Devre Voltajı

Açık devre voltajı (V_{oc}), devre boyunca net akımın sıfır olduğu voltajdır. Aynı zamanda V_{oc} , bir güneş pilinin sağlayabileceğı maksimum voltajdır. Şekil 11'de bir akım J-V eğrisi üzerinde V_{oc} değeri gösterilmektedir.



Şekil 11. Bir güneş pilinin açık devre voltajını gösteren J-V eğrisi (URL-8).

V_{oc} , foto-üretim akım yoğunluğuna bağlıdır ve net akımın sıfır olduğu varsayılarak,

$$V_{oc} = \frac{nk_B T}{q} \ln \left(\frac{J_L}{J_0} + 1 \right) \quad (6)$$

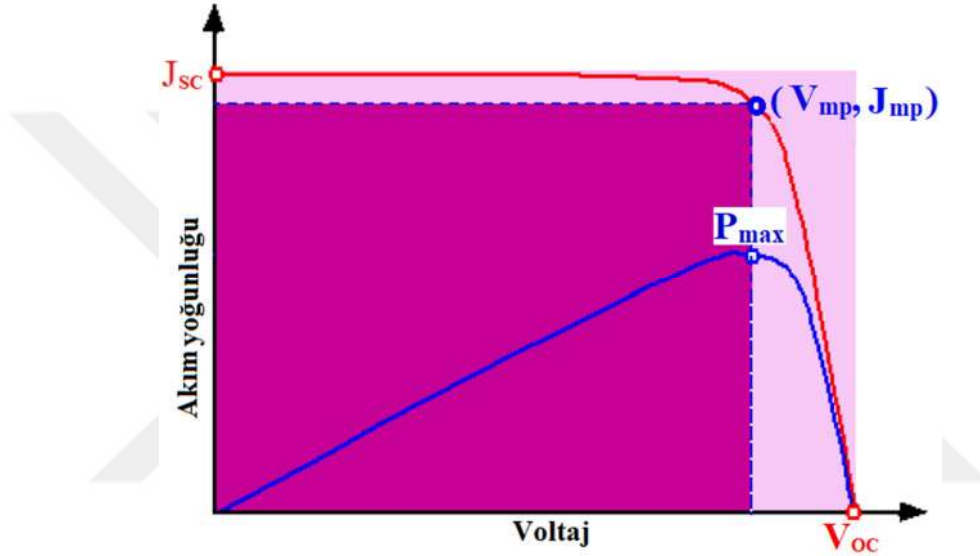
denklemleri ile hesaplanmaktadır. Denk.6, V_{oc} 'un güneş pilinin doyum (saturasyon) akım yoğunluğuna (J_0) ve foton ile üretilen akım yoğunluğuna (J_L) bağlı olduğunu göstermektedir. Burada J_L , tipik olarak küçük bir etkiye sahipken; kritik etki J_0 'ın değeridir. J_0 'nın büyüklüğü, güneş pilindeki rekombinasyona bağlı olduğundan dolayı; V_{oc} , aygıttaki rekombinasyon miktarının bir ölçüsünü de göstermektedir (Jäger vd., 2016; URL-9, 2020).

1.3.4. Dolum Faktörü

J_{sc} ve V_{oc} , bir güneş pilinden gelen maksimum akım ve voltajdır. Dolum faktörü (FF) ise, J_{sc} ve V_{oc} ile birlikte bir güneş pilinin sağladığı maksimum verimi belirleyen bir parametredir. FF, bir güneş pili tarafından üretilen maksimum gücün ($P_{max} = J_{mp} V_{mp}$), V_{oc} ve I_{sc} parametrelerinin çarpımına oranı olarak tanımlanır (URL-10, 2020).

$$FF = \frac{J_{mp} V_{mp}}{J_{sc} V_{oc}} \quad (7)$$

Bu denklemdeki “mp” indisi, güneş pilinin maksimum güç noktasını (MP), yani güneş pilinin maksimum güce sahip olduğu durumdaki J-V karakteristiği noktasını göstermektedir. Grafikselsel olarak FF, güneş pilinin "kareselliğinin" bir ölçüsüdür ve aynı zamanda J-V eğrisine sığan en büyük dikdörtgenin alanıdır. Şekil 12’de, bir J-V eğrisi vasıtasıyla FF değerinin belirlenmesi için kullanılan dikdörtgensel alanlar gösterilmektedir (Jäger vd., 2016). Yüksek performanslı hücreler için FF değerinin mümkün olduğunca 1'e yakın olması istenmektedir.



Şekil 12. Bir hücrenin dolum faktörünü gösteren J-V grafiği (URL-10, 2020).

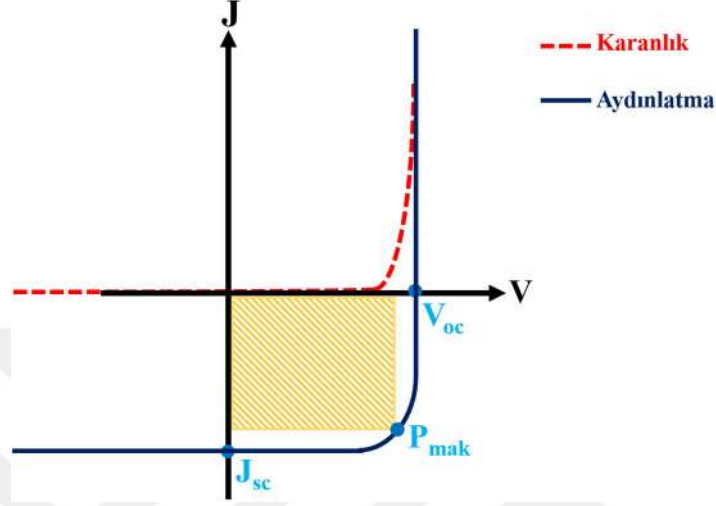
1.3.5. Verim

Bir güneş pilinin temel özelliği, gelen ışığı elektrik enerjisine dönüştürme yeteneğidir. Bu dönüşüm yeteneği, aygıt verimi ile karakterize edilir. Bir güneş pilinin verimi (η), aygıt üzerine gelen foton gücünün çıkış gücüne oranıdır. Verim,

$$\eta = \frac{P_{\text{çıkış}}}{P_{\text{giriş}}} = \frac{J_{sc} V_{oc} FF}{P_{\text{giriş}}} \quad (8)$$

denklemleri kullanılarak hesaplanabilir. Burada ‘ $P_{\text{çıkış}}$ ’ hücrenin çıkış gücünü, ‘ $P_{\text{giriş}}$ ’ hücrenin giriş gücünü, ‘FF’ dolum faktörünü, ‘ J_{sc} ’ kısa devre akım yoğunluğunu ve ‘ V_{oc} ’ açık devre

voltajını göstermektedir (URL-11, 2020). Bir güneş pilinin aydınlatma ve karanlıktaki J-V eğrisi, Şekil 13'te gösterilmektedir. Güneş pilinin verimi, J-V eğrisi vasıtasıyla hesaplanan J_{sc} , V_{oc} ve FF parametreleri yardımıyla hesaplanmaktadır.



Şekil 13. Bir güneş pilinin karanlık ve aydınlatma altındaki J-V eğrisi

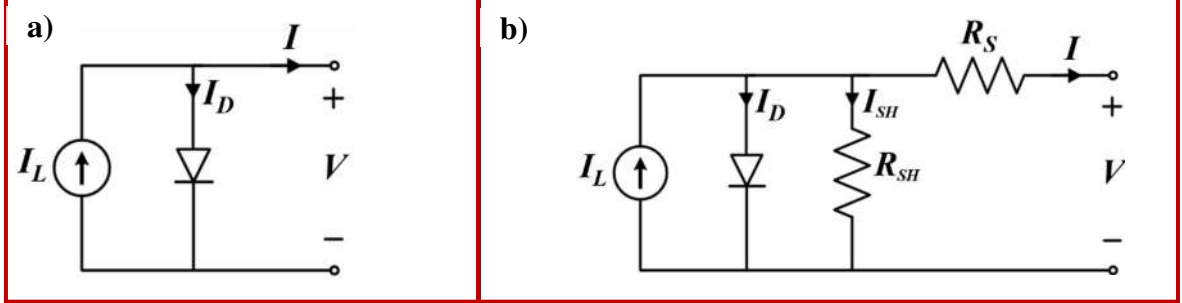
1.3.6. Akım-Voltaj Karakteristiği ve Parazitik Dirençler

Bir güneş pilinin I-V karakteristiği, elektriksel olarak eşdeğer bir model ile belirlenebilir. Fotovoltaik güneş pili, karanlıkta bir diyot gibi davranan iki terminalli bir aygıt olarak düşünülebilir. Aydınlatmada ise foto-üretim yoluyla bir foto-akım ve buna bağlı bir foto-voltaj üretilir. İdeal bir güneş pili, bir diyota paralel bir akım kaynağından oluşan basit bir eşdeğer devre ile modellenebilir (Şekil 14(a)). Aydınlatma altında ideal bir güneş hücresinin I-V karakteristiği,

$$I(V) = I_L - I_s \left[\exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right) - 1 \right] \quad (9)$$

ile belirlenir. Bu denklemdaki ' I_L ' foton ile üretilen akımı, ' I_s ' doyum akımını göstermektedir. Ancak pratikte hiçbir güneş pili ideal değildir ve parazitik dirençlerden dolayı güç kaybına uğrar. Bu nedenle modele parazitik direnç bileşenleri (bir şönt direnci

(paralel) ve bir seri direnç) eklenmelidir. Parazitik dirençlerin eklenmesiyle elde edilen güneş pilinin eşdeğer devresi Şekil 14 (b)'de gösterilmektedir.



Şekil 14. a) İdeal bir güneş hücresinin eşdeğer devresi, b) Bir güneş pili devre şeması (Lorenzo, 1994).

Kirchhoff akım yasasına göre eşdeğer devrede üretilen akım denklemleri,

$$I_L - I_D - I_{SH} - I = 0 \Rightarrow I = I_L - I_D - I_{SH} \quad (10)$$

Burada ' I ' çıkış akımı, ' I_L ' foton ile üretilen akımı, ' I_D ' diyot akımı ve ' I_{SH} ' şönt akımıdır. Bu devre elemanları yoluyla akan akım, kollar üzerindeki voltaj tarafından belirlenir. Kirchhoff voltaj yasasından yararlanarak şönt akımı

$$\begin{aligned} V + IR_S - I_{SH} R_{SH} &= 0 \Rightarrow I_{SH} R_{SH} = V + IR_S \\ \Rightarrow I_{SH} &= \frac{V + IR_S}{R_{SH}} \end{aligned} \quad (11)$$

denklemleri ile bulunur. Burada ' R_{SH} ' şönt direnci, ' V ' çıkış terminalleri boyunca voltaj, ' I ' çıkış akımı ve ' R_S ' seri dirençtir. Paralel bağlı bir devrede, karşılıklı kollar üzerindeki voltaj farkı birbirine eşit olduğundan dolayı, diyot üzerindeki voltaj (V_D),

$$V_D = I_{SH} R_{SH} \Rightarrow V_D = V + IR_S \quad (12)$$

Shockley denkleminde göre bir diyottan geçen akım,

$$I_D = I_0 \left\{ \exp \left[\frac{qV_D}{nk_B T} \right] - 1 \right\} \Rightarrow I_D = I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_S)}{nk_B T} \right] - 1 \right\} \quad (13)$$

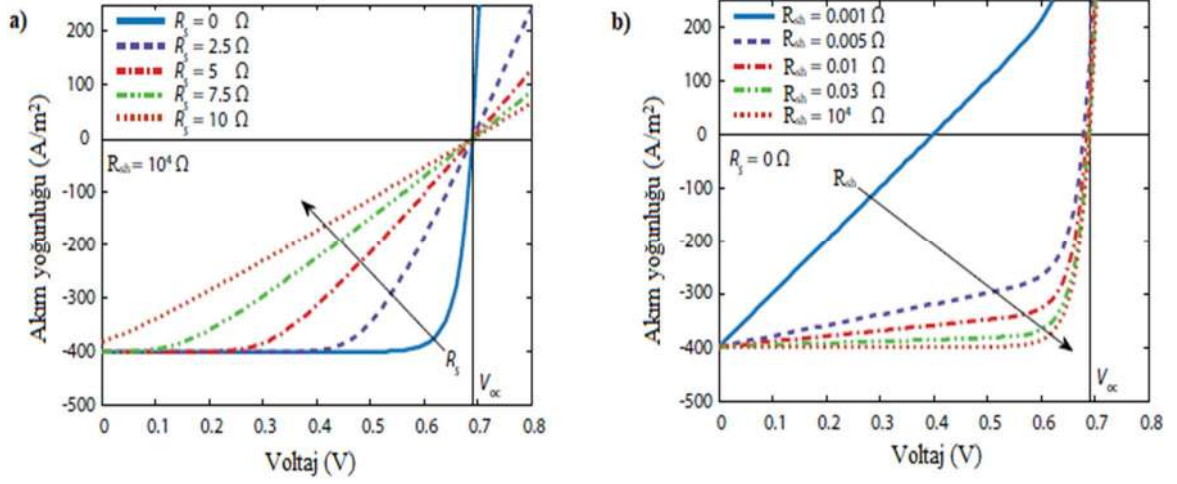
ifadesi ile bulunur. Bu ifade de 'I₀' ters saturasyon akımı, 'n' diyot idealite faktörü, 'q' elementer yük, 'k_B' Boltzmann sabiti ve 'T' mutlak sıcaklıktır. Şönt akımı (Denk.11) ve diyot akımı (Denk.13) eşitliklerini Denk.(10)'da yerine koyarak; bir güneş pilinin akım-voltaj karakteristik denklemini türetilir (Denk.14) (Lorenzo, 1994; Sinha vd., 2014).

$$I = I_L - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_S)}{nk_B T} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_S}{R_{SH}} \quad (14)$$

Seri direnç (R_s), akım toplanmasını engellemeye yönelik bir dirençtir. R_s'ye en büyük katkı, yarıiletken malzemenin bulk direnci, metalik kontaklar, ara eklemler ve metalik kontaklar ile yarıiletken arasındaki kontak direncinden gelir (Singh ve Ravindra, 2012; Yoon vd., 2015). İdealde artan yük taşıyıcı rekombinasyonu nedeniyle verim kayıplarını önlemek için, R_s'nin minimize edilmesi gerekir. R_s değerinin küçülmesi ise, güneş pillerinde kullanılan malzemelerin enerji seviyelerinin iyi hizalanması ile gerçekleştirilebilir (Wolf ve Rauschenbach, 1963). Seri direnç, birkaç farklı ışık şiddetinde J-V eğrileri ölçülerek ve çeşitli kısa devre akımları arasındaki farklar belirlenerek hesaplanabilir. Şekil 15(a), seri direncin güneş pili performansı üzerindeki etkisini göstermektedir.

Şönt direnci (R_{sh}) (paralel direnç), güneş pilinin kalınlığı boyunca oluşan dirençtir. Şönt direnci (R_{sh}), p-n eklem bölgesindeki kristal kusurlarından ve safsızlıklardan kaynaklanır. Şönt direnci (R_{sh}), bir fotovoltaiik hücre boyunca alternatif akım yollarının varlığını açıklar. Seri direncin aksine, bu alternatif yollardan akım kaçacağını önlemek için şönt direncinin oldukça yüksek olması gereklidir (Dhass vd., 2012; Singh ve Ravindra, 2012). Şekil 15(b), şönt direncinin bir güneş pilinin performansı üzerindeki etkilerini göstermektedir.

Kısacası, yüksek performanslı bir güneş pili için şönt direncinin oldukça büyük ve seri direncin ise oldukça küçük olması gerekmektedir.



Şekil 15. Bir güneş hücresinin J-V karakteristiği üzerine a) seri direncin, b) şönt direncin etkisi (Jäger vd., 2016).

1.4. Güneş Pilinin Performansı Etkileyen Fiziksel Aktiviteler

1.4.1. Soğurma ve Üretim

Bir güneş pilinin en önemli işlevi olan foto-akımın oluşumu için, öncelikle gelen ışığın soğurularak yük taşıyıcılarının (elektron-delik çiftleri) üretilmesi gerekmektedir. Bu yüzden güneş pilleri ile çalışırken foton ile üretilen taşıyıcıların oranı (G (EHP/cm³s)) belirlenmelidir. G 'yi hesaplamak için, önce bulk bir yarıiletken malzemedeki foton şiddetinin derinlik ve enerji ile nasıl değiştiğinin anlaşılması gereklidir.

' $\alpha(E)$ ' soğurma katsayısı (cm⁻¹), belirli bir dalga boyundaki ışığın bir malzemede soğurulmadan önce, ne kadar penetrasyon derinliğine ulaşabileceğini belirler. Aynı zamanda, E (eV) enerjili bir fotonunun soğurulma olasılığı olarak da tanımlanır. Mikroskobik bir dx kalınlığına sahip bulk bir yarıiletken, ışık şiddetinin soğurma katsayısı ile ilişkisi,

$$I(E, x) = I_0(E)e^{-\alpha(E)x} \quad (\text{Lambert-Beer yasası}) \quad (15)$$

ile verilir. Burada I_0 (mW/cm²) gelen ışık şiddetini ve I geçen ışık şiddetini göstermektedir. Soğurma katsayısı ise,

$$\alpha(x) = \frac{4\pi\kappa(\lambda)}{\lambda} \quad (16)$$

ifadesine bağlı olarak değişir. Burada ‘ α ’ soğurma katsayısı, ‘ κ ’ sönüm katsayısı ve ‘ λ ’ gelen ışığın (cm biriminde) dalga boyudur. Bazı yarıiletken malzemelerin dalga boyuna bağlı olarak soğurma katsayıları değişimi, Şekil 16’da gösterilmektedir. Buna göre, dalga boyu arttıkça (yani gelen fotonun enerjisi azaldıkça), malzemelerin soğurma katsayılarının azaldığı açık bir şekilde görülmektedir. Bunun yanında CdTe, CdS, InP gibi doğrudan geçişli yarıiletkenlerin bant aralıklarından daha düşük foton enerjilerinde (ya da daha yüksek dalga boylarında) soğurma katsayılarının hızlı bir şekilde düştüğü de görülmektedir.

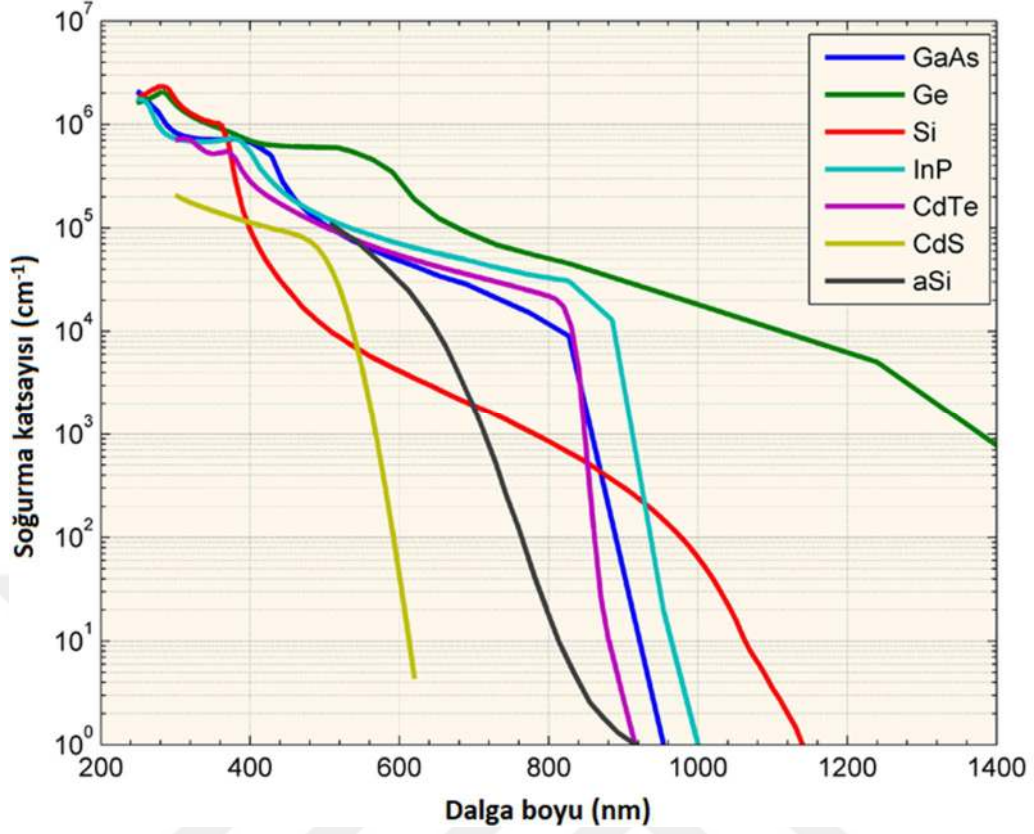
Spektral foto-üretim hızı ($g(E, x)$), gelen foton şiddetinin (birim hacim başına optik süreçler için) soğurma tesir kesitleri toplamının ve belirli bir ‘ x ’ derinliğindeki foton akısının ($b_s(E)$) fonksiyonudur. Yeterli minimum enerjiye sahip tüm fotonların soğurulduğu ve taşıyıcı üretimiyle sonuçlandığı varsayılırsa; belirli bir ‘ E ’ enerjisi ve ‘ x ’ derinliğindeki spektral foto-üretim hızı,

$$g(E, x) = (1 - R(E))\alpha(E)b_s(E)e^{-\alpha(E)x} \quad (17)$$

ile verilir. Bu denklemde ‘ $R(E)$ ’ malzemenin yüzeyindeki yansımayı ve ‘ b_s ’ (foton/cm²/s) foton akısını göstermektedir. Toplam üretim hızı ise, α ’nın sıfır olmadığı (yani bant aralığı enerjisinin üstünde) tüm enerjiler üzerinden integrasyon ile bulunur:

$$G(x) = \int_{E_g}^{E_{maks}} g(E, x) dx = \int_{E_g}^{E_{maks}} (1 - R(E))\alpha(E)b_s(E)e^{-\alpha(E)x} dx \quad (18)$$

Bu denklemde integralin sınırları, foton enerjilerinin E_g ile E_{maks} arasında değiştiği varsayılarak, belirlenmiştir (Nelson, 2003; Wolfe vd., 1989). Ancak bu denklemde foto-üretim hızını belirleyen, esasında gelen foton akısının toplam enerjisi değil, E_g ’den daha yüksek enerjilere sahip gelen fotonların sayısıdır (Reinders vd., 2017; Walton, 2010).



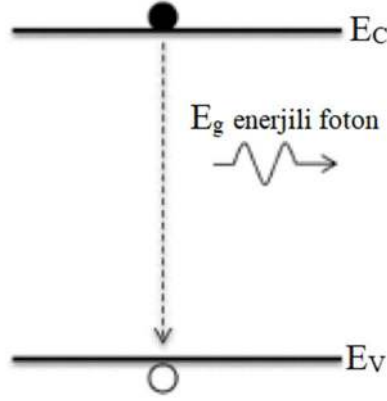
Şekil 16. Bazı yarıiletken malzemelerin soğurma katsayılarının dalga boyuna bağlı olarak değişimi (URL-12, 2021).

1.4.2. Rekombinasyon

Güneş pillerindeki önemli kavramlardan birisi de yük taşıyıcı rekombinasyonudur. Rekombinasyon süreçleri, hücre performansı için çok önemlidir. Bir güneş hücresinde yük taşıyıcıların oluşturulması denge-dışı bir durum yaratırken; rekombinasyon süreçleri ile tekrar denge sağlanmaya çalışılır. Bulk bir yarıiletkendeki rekombinasyon süreçleri ışımalı, ışımalı-olmayan, Auger ve yüzey rekombinasyonu olarak ifade edilmektedir.

1.4.2.1. Işımalı Rekombinasyon

Işımalı rekombinasyon (ya da banttan banta rekombinasyon), iletim bandındaki bir elektronun değerlik bandındaki bir delik ile rekombinasyonuna dayanmaktadır. Bu süreç sonunda, malzemenin bant aralığı enerjisine sahip bir foton yayımlanır (Şekil 17).



Şekil 17. Işımalı rekombinasyon sürecinin şematik gösterimi (Reinders vd., 2017).

Bir yarıiletkende ışımalı rekombinasyon hızı, fiziksel olarak malzemeye gelen foton akısına ve malzemenin soğurma katsayısına bağlıdır. Denge-dışı koşullar altında dejenere olmayan bir yarıiletken için, banttan banta rekombinasyon hızı (U ($\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$)),

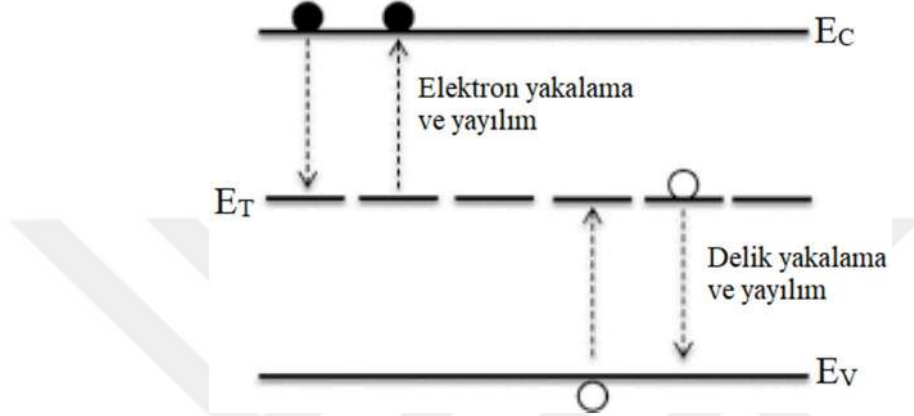
$$U = \beta_r (np - n_i^2) \quad (19)$$

ile ifade edilebilir. Bu ifadedeki β_r ($\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$) ışımalı rekombinasyon katsayısıdır ve malzemenin karakteristik bir özelliğidir. β_r , malzemenin bant aralığına ve soğurma katsayısına bağlı olarak değişmektedir. Bu ifadedeki ilk terim, denge dışı elektron-delik popülasyonuna (aydınlatmada), ikinci terim özden termal taşıyıcı popülasyonuna karşılık gelmektedir. Işımalı rekombinasyon, doğrudan bant aralıklı yarıiletkenler için baskın rekombinasyon sürecidir. GaAs gibi doğrudan bant aralıklı malzemeler için taşıyıcıların ışımalı rekombinasyonu, aygıt verimini olumsuz etkilemektedir. Bununla birlikte birçok güneş pilinin performansı, ışımalı olmayan süreçler ile sınırlandırılmaktadır (Hubbard, 2016; Reinders vd., 2017).

1.4.2.2. Işımalı Olmayan (Shockley-Read-Hall) Rekombinasyon

Birçok yarıiletken malzemenin büyütülmesi sırasında safsızlıklar veya atomik boşluklar (vacancy) oluşmaktadır. Bu safsızlıklar, serbest taşıyıcıları yakalama kabiliyetlerinden dolayı, genellikle tuzak durumları olarak adlandırılır. Bu tuzak durumları,

bulk yarıiletkenin bant aralığında kusur seviyelerine yol açar. Değerlik bandı ve iletim bandı arasındaki enerjilere sahip kristal örgüdeki bu kusurlar aracılığıyla rekombinasyon gerçekleşebilir. Buna Shockley-Read-Hall (SRH) rekombinasyonu denir. Şekil 18’de görüldüğü gibi, elektron ve delik tuzakları taşıyıcıları hem yakalayabilir hem de termal olarak yayabilir.



Şekil 18. Işımalı olmayan rekombinasyonun şematik gösterimi (Reinders vd., 2017).

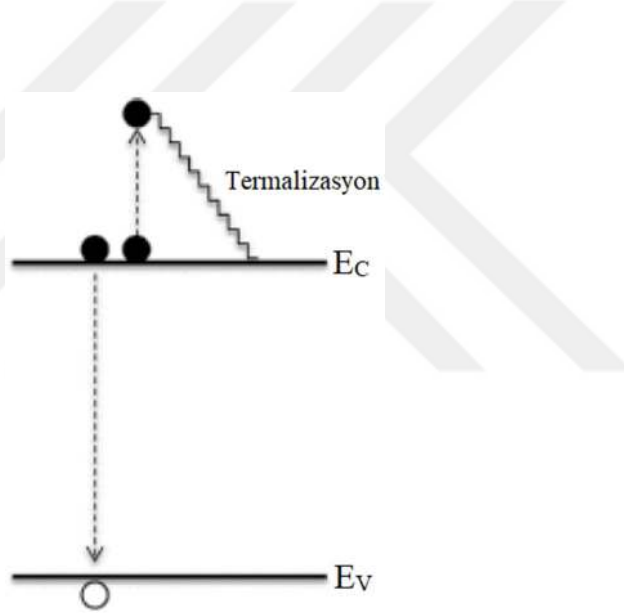
Tek bir tuzak için Shockley-Read-Hall rekombinasyon hızı,

$$U_{SRH} = \frac{np - n_i^2}{\tau_{p,SRH}(n + \hat{n}) + \tau_{n,SRH}(p + \hat{p})} \quad (20)$$

denklemini ile ifade edilmektedir. Burada $\tau_{n,SRH}$ ve $\tau_{p,SRH}$ tuzaklar zıt tipteki taşıyıcılarla doldurulduğunda elektronlar ve delikler için minimum ömrü; $\hat{n}$ ve $\hat{p}$, Fermi seviyesi tuzak durumunun enerjisine eşit olduğu zaman sırasıyla elektron ve delik yoğunluklarıdır. Denk.20 incelendiğinde, np çarpımının n_i^2 'den büyük olduğu durumda, taşıyıcı yoğunluklarını dengeye doğru geri getirmeye çalışan net bir pozitif rekombinasyon olduğu görülmektedir. Ancak np çarpımının n_i^2 'den küçük olduğu durumda, taşıyıcı yoğunluklarını denge değerine geri getirmeye çalışan net bir üretim (negatif rekombinasyon) vardır (Hubbard, 2016).

1.4.2.3. Auger Rekombinasyonu

Auger rekombinasyonu, foton ile üretilen taşıyıcının enerjisinin foton yayımı ile değil, başka bir serbest taşıyıcının kinetik enerjisini artırarak harcandığı (dissipated), ışıınımsız bir süreçtir. Auger rekombinasyonu sırasında açığa çıkan enerjinin başka bir taşıyıcıya verilmesinin sonucunda bir fonon salınır. Örneğin iki elektronun çarpışması, elektronlardan birinin bir delikle yeniden birleşmesine neden olabilir. Bu esnada açığa çıkan enerji, ikinci elektronun kinetik enerjisini artırmak için verilir. Bu kinetik enerji daha sonra çok hızlı bir şekilde (tipik olarak bir pikosaniyeden daha az), elektronun birden fazla fonon yaydığı ve bant kenarına yakın bir enerjiye geri döndüğü ısı işlem yoluyla dağıtılır. Bu süreç, şematik olarak Şekil 19'da gösterilmektedir.



Şekil 19. Auger rekombinasyonunun şematik gösterimi (Reinders vd., 2017).

Auger rekombinasyonu için, denge dışı koşullar altında iki elektron için rekombinasyon oranındaki net değişim,

$$U_{Auger} = B_{Auger,p} (n^2 p - n_0^2 p_0) \quad (21)$$

ile ifade edilir. Burada $B_{Auger,p}$ (cm^6 / s), delikler için Auger rekombinasyon katsayısıdır. İki delik için rekombinasyon oranındaki net değişim,

$$U_{Auger} = B_{Auger,n} (p^2 n - p_0^2 n_0) \quad (22)$$

ile ifade edilir. Burada $B_{Auger,n}$ (cm^6/s), elektronlar için Auger rekombinasyon katsayısıdır. Si ve GaAs için B_{Auger} değerleri $10^{-30} \text{ cm}^6/\text{s}$ düzeyindedir. Doğrudan bant aralıklı yarıiletkenlerde, kısa ışıma ömrü nedeniyle; çok yüksek enjeksiyon koşulları (örneğin, yüksek güneş konsantrasyonu altında) haricinde Auger rekombinasyonu tipik olarak gözlenmez. Bununla birlikte, dolaylı bant aralıklı malzemelerde; Auger süreçlerindeki momentum korunumundan dolayı, baskın rekombinasyon sürecidir. Bu nedenle yüksek saflıktaki Si veya Ge güneş pilleri için verimliliği sınırlayan bir kayıp mekanizmasıdır (Hubbard, 2016; Reinders vd., 2017).

1.4.2.4. Yüzey, Ara Yüzey ve Tane Sınırı Rekombinasyonu

Bir güneş hücresinin yüzeyindeki sarkan pasifleştirilmemiş bağlar ve soğurulan safsızlık atomları, çok yüksek yoğunlukta tuzak durumları yaratır. Bu tuzak durumları, bant aralığı boyunca neredeyse sürekli bir dağılım oluşturur. Bu nedenle yüzey durumları, taşıyıcı rekombinasyonu için sonsuz bir kaynak sağlar ve pasifleştirilmeden bırakılırsa, aygıtta büyük bir kayıp mekanizmasına neden olur (Hubbard, 2016; Reinders vd., 2017).

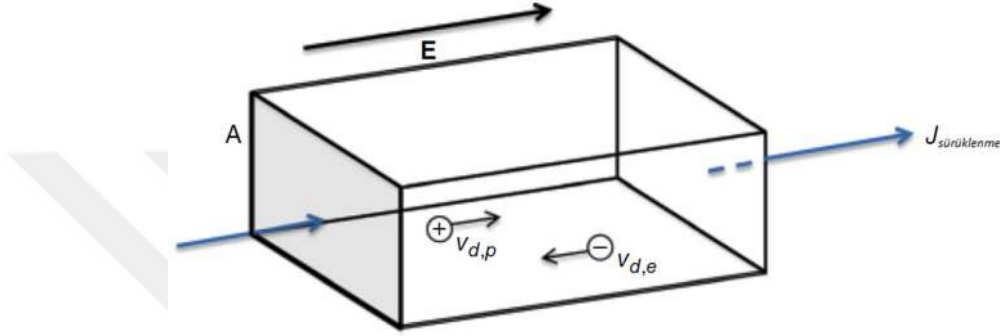
1.4.3. Taşıyıcı İletimi

Bir malzemede elektronlar ve delikler için denge-dışı koşullar oluştuğunda, sürüklenme ve difüzyon olayları meydana gelir. Sürüklenme akımı, elektrik alanındaki taşıyıcı hareketinden kaynaklanır. Sürüklenme akımı oluşturmak için, yerleşik bir beslemeden kaynaklanan bir elektrostatik alandan dolayı net bir elektrik alanı veya elektron çekiciliğindeki gradyant ve/veya bant aralığındaki gradyant nedeniyle efektif bir elektrik alanı olmalıdır (Walton, 2010).

Bir elektrik alanına maruz kalan yüklü parçacıklar (elektronlar veya delikler), elektrik alan yönünde veya alana zıt yönde hızlanarak net bir taşıyıcı hız bileşenine yol açılır (Şekil 20). Bu bileşen, sürüklenme hızı (v_d (cm/s)) olarak adlandırılır ve

$$v_d = \frac{q\tau_c}{m_{e,h}^*} E = \mu_{e,h} E \quad (23)$$

denklemleri ile belirlenir. Burada ' τ_c ' saçılma süresi, $m_{e,h}^*$ (kg) elektron veya delik etkin kütlesi ve $\mu_{e,h}$ ($\text{cm}^2/\text{V.s}$) mobilitedir. Sembollerdeki 'e' ve 'h' alt simgesi, elektron ve delik taşıyıcılarını göstermektedir.



Şekil 20. Kesit alanı A olan bir yarıiletkenle elektron ve deliklerin sürüklenme akımı (Reinders vd., 2017).

Esasen mobilitenin değeri, bir taşıyıcının uygulanan elektrik alanı altında yarıiletken boyunca ne kadar kolay hareket edebileceğinin bir göstergesidir. ' $J_{sürüklenme}$ (A/cm^2)' sürüklenme akım yoğunluğu, var olan tüm taşıyıcıların sürüklenme hızı dikkate alınarak;

$$J_{sürüklenme} = J_{n,sürüklenme} + J_{p,sürüklenme} = (nq\mu_n + pq\mu_p) E = \sigma_s E \quad (24)$$

ifadesi ile bulunur. Bu ifade de gösterilen σ_s (Siemens/cm) bileşenine, iletkenlik denir. İletkenliğin tersi ise öz direnç (ρ_s ($\Omega \text{ cm}$)) olarak adlandırılır.

$$\sigma_s = \frac{1}{\rho_s} = nq\mu_n + pq\mu_p \quad (25)$$

Bir yarıiletkenle taşıyıcıların mobilitesi (ve nihayetinde iletkenliği), malzemenin etkin kütlesine bağlıdır. Bunun yanında mobilitenin saçılma mekanizmalarına bağlı olmasından dolayı; sıcaklığa (fonon saçılması), katkılama (taşıyıcı-taşıyıcı saçılması), safsızlıklara, kusurlara ve ara yüzeylere bağlı olarak değişmektedir (Reinders vd., 2017).

Difüzyon akımı, bir yarıiletken içindeki serbest taşıyıcı konsantrasyonunun gradyanından kaynaklanır. Rastgele termal hareketlerinin bir sonucu olarak, taşıyıcılar her zaman yüksek konsantrasyonlu bölgelerden düşük konsantrasyonlu bölgelere doğru akma eğilimindedir. Kararlı durumda (bu durumda aydınlatma altında), hem delikler (F_p) hem de elektronlar (F_n) için kuvazi Fermi seviyeleri yaratılır. Bu kuvazi Fermi seviyeleri, taşıyıcı konsantrasyonlarının yeniden tanımlanmasına izin verir (Walton, 2010). Böylece

$$\left. \begin{array}{l} \text{Delikler için;} \quad p = n_i \exp \left[-\frac{(E_i - F_p)}{k_B T} \right] \\ \text{Elektronlar için;} \quad n = n_i \exp \left[-\frac{(F_n - E_i)}{k_B T} \right] \end{array} \right\} \quad (26)$$

Kararlı durum koşullarında parçacık akısı, taşıyıcı konsantrasyonunun gradyanı ile orantılı olarak değişmektedir. Bu nedenle bir boyutta elektronlar ve delikler için difüzyon akımı,

$$J_{dif} = J_{n,dif} + J_{p,dif} = qD_n \frac{dn}{dx} - qD_p \frac{dp}{dx} \quad (27)$$

şeklinde verilir. Burada D_n ve D_p orantı sabitleri, sırasıyla elektron ve delik için difüzyon katsayılarıdır (cm^2/s birimi). Difüzyon akımı üç boyutta genelleştirilirse,

$$\mathbf{J}_{dif} = \mathbf{J}_{n,dif} + \mathbf{J}_{p,dif} = qD_n \nabla n - qD_p \nabla p \quad (28)$$

denlemi elde edilmektedir. Bir katıdaki parçacık mekaniği dikkate alınarak, difüzyon katsayısının mobilite ile ilişkili olduğu gösterilebilir. Bunlar Einstein bağıntıları olarak bilinir ve

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{kT}{q} \quad \text{ve} \quad \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{kT}{q} \quad (29)$$

şeklinde verilir. Toplam taşıyıcı akımı, sürüklenme ve difüzyon bileşenlerinin lineer toplamıdır. Bunlar serbest taşıyıcı türüne göre,

$$\left. \begin{aligned} J_n &= J_{n,sür} + J_{n,dif} = q\mu_n nE + qD_n \nabla n \\ J_p &= J_{p,sür} + J_{p,dif} = q\mu_p pE - qD_p \nabla p \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

ile bulunur. Son olarak toplam serbest taşıyıcı akımı, her bir parçacık akımı bileşenin toplamı ile verilir (Reinders vd., 2017):

$$J_{top} = J_p + J_n \quad (31)$$

1.5. Fotovoltaiklerin Sınıflandırılması

Güneş pillerinin ticari uygulanabilirliği, modül verimi, üretim maliyeti ve çalışma ömrü gibi kriterlere bağlıdır (Bonnet ve Meyers, 1998). Bundan dolayı, optimum performans ve maliyete sahip güneş pilleri üretebilmek için, farklı yarıiletken malzemeler kullanılmaktadır. Fotovoltaik (PV) güneş pilleri, genellikle aygıt üretiminde kullanılan birincil soğurma tabakalarına göre adlandırılmaktadır (Şekil 21). PV teknolojileri, alttaş tabanlı ve ince film olmak üzere iki kategoride sınıflandırılabilir. Alttaş tabanlı aygıtlar, yarıiletken alttaşlar üzerinde üretilirken; ince film güneş pilleri ise cam, plastik veya metal altlık üzerine yarıiletken ince filmlerin kaplanmasıyla üretilmektedir (Jean vd., 2015).

Alttaş tabanlı aygıtlar, kristal silikon (c-Si) ve III-V grubu güneş pilleridir. c-Si teknolojisi, fotovoltaik piyasasındaki yaklaşık %95'lik pazar payıyla en uygun teknolojidir (Fraunhofer ISE, 2019). Bunun ana nedenlerinden biri, yeryüzündeki Si elementinin rezervinin yüksek olması ve toksik-olmayan bir malzeme olmasıdır (Aghaei vd., 2014). c-Si güneş pilleri, tek kristal-Si ve polikristal-Si alttaşları kullanılarak üretilmektedir. Bunların arasında tek kristal-Si, yaklaşık %66 pazar payıyla fotovoltaik piyasasına hakim durumdadır. Tek-kristal Si, yük çıkarımını (ekstraksiyonunu) ve dönüşüm verimliliğini artıran yüksek kristal kalitesine sahiptir. Öte yandan polikristal-Si hücreleri, elektron akışını veya yük çıkarımını sınırlandıran, rekombinasyona teşvik eden, rastgele yönlendirilmiş kristal yapısına sahiptir (Jean vd., 2015). Bu durum polikristal-Si hücrelerinin ($\eta \sim \% 24,4$), tek kristal-Si'den ($\eta \sim \% 26,7$) daha düşük verimli olmasına neden olmaktadır (Green vd., 2020). Ancak polikristal-Si güneş pillerinin maliyeti, tek-kristallere göre önemli ölçüde daha uygundur.

Si-teknolojilerinin önemli dezavantajlarından biri, c-Si'nin oda sıcaklığında yaklaşık 1,1 eV olan dolaylı bant aralığı nedeniyle fakir bir soğurucu olmasıdır. Bu durum gelen ışığın çoğunu soğurmak için oldukça kalın, sert ve kırılğan altaşların kullanılmasına neden olur. (Ibn-Mohammed vd., 2017). Bu yüzden kullanılan malzeme miktarından kaynaklanan maliyetler, diğer teknolojilere kıyasla nispeten yüksektir (Fraunhofer ISE, 2019).

Başlıca III-V grubu aygıtları, galyum arsenit (GaAs) ve galyum indiyum fosfit güneş pilleridir. GaAs, fotovoltaiik enerji dönüşümü için oldukça uygun yüksek optik soğurma katsayısına ($\sim 10^5 \text{ cm}^{-1}$), optimuma yakın doğrudan bant aralığına ($\sim 1,5 \text{ eV}$), yüksek azınlık taşıyıcı ömrüne ve mükemmel mobiliteye sahip III-V grubu yarıiletken bileşiktir. GaAs tabanlı güneş pillerinde laboratuvar hücreleri için % 29,1 ve modüller için % 25,1 rekor verimleri elde edilmiştir (Green vd., 2020). GaAs güneş pillerinin önemli bir dezavantajı, silikon ile karşılaştırıldığında epitaksiyel katmanların veya aygıt kalitesinde altlıkların üretim maliyetlerinin oldukça yüksek olmasıdır. Bu durum, büyük ölçüde aygıt verimliliğini azaltan ve düşük maliyetli depolama yollarını olanaksız hale getiren kristal kusurlar ve istenmeyen safsızlıklar gibi faktörlerden kaynaklanmaktadır. Bu faktörler, GaAs güneş pillerinin büyük ölçekli uygulamalarını sınırlandırarak, kullanımlarını daha sınırlı hale (genellikle uzay uygulamaları) getirmektedir (Ibn-Mohammed vd., 2017).

Yarıiletken malzemenin bant aralığının üzerindeki foton enerjilerinde fazla enerji ($E_f - E_g$), elektron-delik çiftleri üretimine katkıda bulunmaz ve hücre verimini sınırlayarak ısı şeklinde kaybedilir. III-V çok-eklemli (MJ) güneş pillerinde, ısı kayıpları en aza indirmek ve ışığı verimli bir şekilde soğurmak için farklı bant aralıklarına sahip iki veya daha fazla tek eklemli hücre yapısı kullanılır. Grup III (Al, Ga, In) ve grup V (N, P, As, Sb) elementlerinin yarıiletken bileşiklerinden değişken bant aralıklı yüksek kaliteli kristal filmler oluşturularak benzersiz dönüşüm verimlilikleri sağlanabilir (Jean vd., 2015). Örneğin, GaInAsP/GaInAs hücresi ile % 35,5 verim elde edilirken; GaInP/GaAs/GaInAs/GaInAs hücresi ile %45,7 rekor hücre verimi elde edilmiştir (Green vd., 2020). III-V grubu MJ'ler, yüksek radyasyon direnci, düşük sıcaklık hassasiyeti ve yüksek verimlilik ile uzay uygulamaları için önde gelen teknolojidir. Ancak karmaşık üretim süreçleri ve yüksek malzeme maliyetlerinden dolayı, bu hücrelerin geniş alanlı karasal uygulamaları bulunmamaktadır (Jean vd., 2015).

İnce film teknolojileri, üretim maliyetlerinin düşürülmesi için daha az malzemenin kullanıldığı bir teknolojidir. İnce film güneş pilleri için gereken yarıiletken malzeme miktarı, Si-güneş pillerine göre çok daha azdır. Bu yüzden ince film güneş pillerinin üretim maliyeti,

kristal silikon güneş pillerinden çok daha düşüktür (S. Hegedus, 2006). İnce film güneş pillerinde, gelen ışığın maksimum miktarının ince bir tabakada soğurulması için, yüksek soğurma katsayısına sahip malzemeler kullanılmaktadır. Ayrıca ince film güneş pilleri esnek, cam, seramik vs. gibi farklı altlıklar üzerinde üretilebilirken; basit bir üretim süreci ile oldukça yüksek dönüşüm verimleri elde edilmektedir. Bu grup, genellikle ticari güneş pilleri ve yeni gelişen film teknolojileri olarak ikiye ayrılmaktadır.

Ticari ince film güneş pilleri **i)** amorf silikon (a-Si) **ii)** bakır indiyum galyum diselenit (CIGS) **iii)** kadmiyum tellür (CdTe) olarak sınıflandırılabilir. Amorf silikon (a-Si), kristali oluşturan atomların periyodik uzayda sonsuzda kendini tekrarlamaması sonucu oluşur. Dolaylı bir yarıiletken olan a-Si, düşük proses sıcaklığı, esnek ve düşük maliyetli altlıkların kullanımı, geniş alanlı depolama olanağı ve düşük malzeme gereksinimi gibi özelliklerinden dolayı ince film güneş pili malzemesi olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. a-Si, c-Si ile karşılaştırıldığında daha yüksek soğurma katsayısına sahiptir. Yüksek soğurma katsayısı, malzemede $10^{19}/\text{cm}^3$ mertebelerindeki sarkan bağların doğasında var olan yüksek düzensizlikten kaynaklanır. Öte yandan düzensizlik, taşıyıcı ömrünü ciddi şekilde azaltan rekombinasyon merkezleri olarak davranır. Ancak kaplama sırasında filme belirli bir miktar hidrojenin bağlanması (a-Si:H) ile kusur yoğunluğu $10^{16}/\text{cm}^3$ 'e düşmektedir. a-Si:H, c-Si'nin 1,1 eV dolaylı bant aralığı ile karşılaştırıldığında daha yüksek bir bant aralığına (~1,7 eV) sahiptir. Kusur yoğunluğundaki azalma, a-Si:H malzemesini çeşitli malzemelerle katkılama, alaşımlama veya eklem oluşumu için uygun hale getirir. Bununla birlikte malzemenin ve aygıtın özellikleri, Staebler-Wronski etkisi olarak bilinen, ışık kaynaklı (indüklü) yarı-kararlı kusurların oluşumundan ciddi şekilde etkilenir. a-Si:H aygıtlarının ışık kaynaklı bozunması (degradation), kısmen a-Si:H kalınlığının azaltılmasıyla giderilir. Bununla birlikte tabakanın incilmesi, aynı zamanda ışığın daha az soğurulmasına neden olur (Chopra vd., 2004). a-Si:H güneş pilleri, düşük güç gereksinimi olan küçük ölçekli uygulamalar için çok uygundur, ancak diğer köklü ince film PV teknolojilerine kıyasla düşük verimlilikleri, fotovoltaik piyasasındaki kullanımlarını sınırlandırmıştır. Laboratuvar hücresi için kaydedilen en yüksek verimlilik, tek eklemli aygıtlarda %10,2 iken; üç eklemli aygıtlarda (a-Si/nc-Si/nc-Si), %14'e ulaşmıştır (Green vd., 2020).

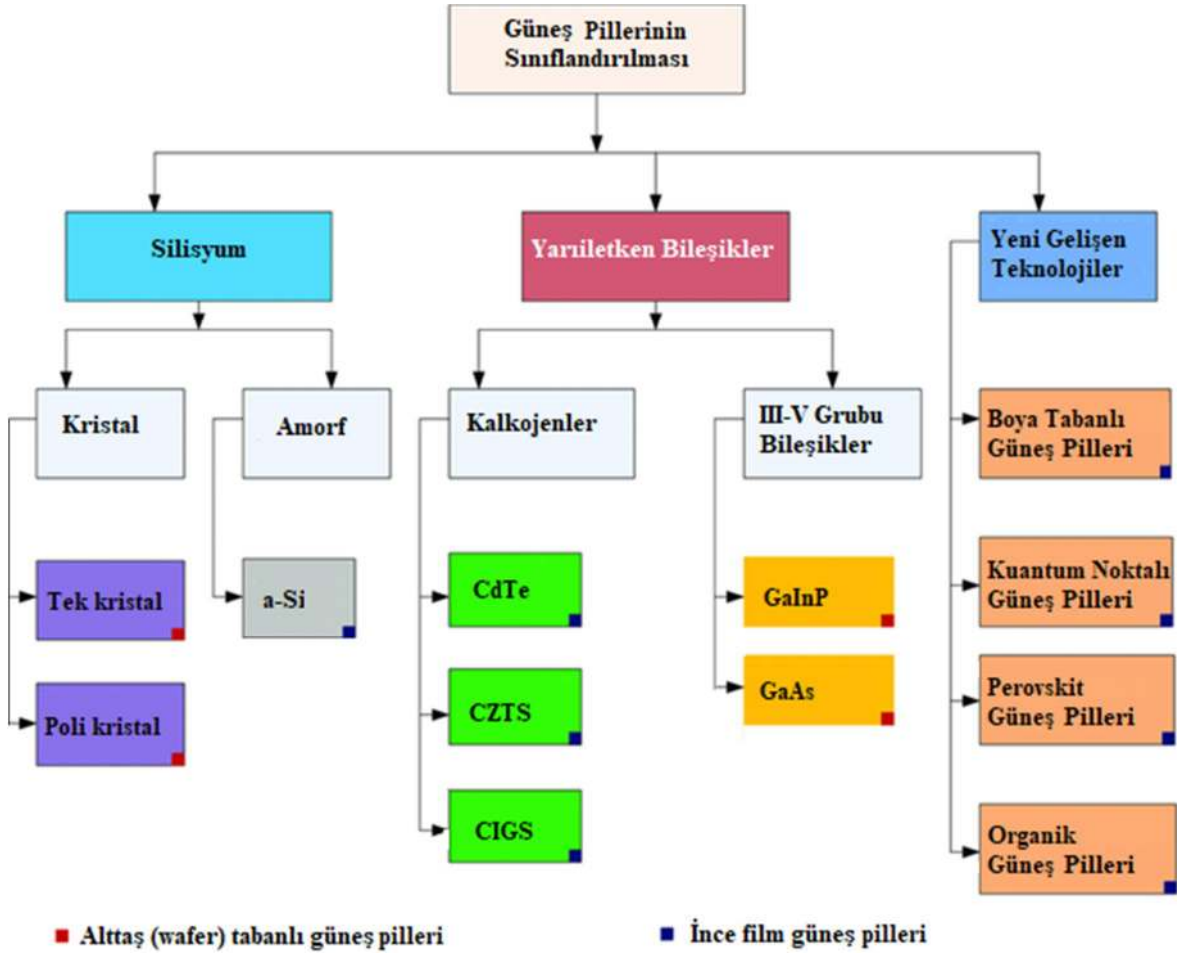
CdTe, CIGS gibi direkt geçişli yarıiletkenler, yüksek soğurma katsayılarına sahiptir (~ 10^5 cm^{-1}). Bu durum aynı miktarda ışığı soğurmak için, yaklaşık yüz mikron (μm) silisyum yerine, birkaç mikron (μm) kalınlığındaki ince film tabakasının yeterli olacağı anlamına gelmektedir (Tetali, 2005).

I–III–VI kalkopirit materyallerinden CuInS_2 yarıiletken bileşiği 1,53 eV'lik bant aralığı ile fotovoltaik uygulamalar için ideal bir malzeme olarak kabul edilir. Depolama sırasında kükürtün kontrol edilmesindeki zorluklar ve düşük sıcaklıklarda bile metallerin ve safsızlık türlerinin hızlı difüzyonu, bu malzemenin gelişimini yavaşlatmaktadır. Öte yandan 1 eV'lik bant aralığı ile CuInSe_2 , fotovoltaik uygulamalar için önde gelen bir başka adaydır. CuInSe_2 'nin yüksek soğurma katsayısına ($\sim 10^5 \text{ cm}^{-1}$) sahip yarıiletken malzemelerden biri olması nedeniyle, mükemmel bir p-tipi iletkenliğe sahip eklem ortağıdır. CuInSe_2 'nin bant aralığı artırılarak güneş spektrumuyla eşleştirildiğinde üstün aygıt performansı elde edilir. CuInSe_2 yarıiletken ince filmlerde, In yerine kademeli olarak galyum (Ga) katkısı yapılarak ($\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ veya CIGS) malzemenin bant aralığı 1,0 ile 1,7 eV aralığında değiştirilebilir. $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ bileşiğinde Ga'nın molar oranı 0,3'e ayarlandığında, bant aralığı 1,15 eV civarında elde edilmektedir. Optimum molar oranda üretilen CIGS tabanlı güneş hücrelerinde küçük alan için %23,4 ve geniş alan için % 19,2'lik rekor verimler elde edilmiştir (Green vd., 2020). Aygıt verimliliği ve kararlılığı ümit verici olsa da, bu tür cihazların büyük ölçekli üretimi için elverişli olmayan birkaç faktör vardır. $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ bileşiğinin çok sayıda elementten oluşması, stokiometriyi, yapısal ve elektriksel özelliklerinin kontrolünü zorlaştırmaktadır. Ayrıca soğurma katmanı olarak kullanılan $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ 'nin rezervleri az olan In ve Ga elementleri içermesi ise CIGS için bir başka sorundur (Chopra vd., 2004).

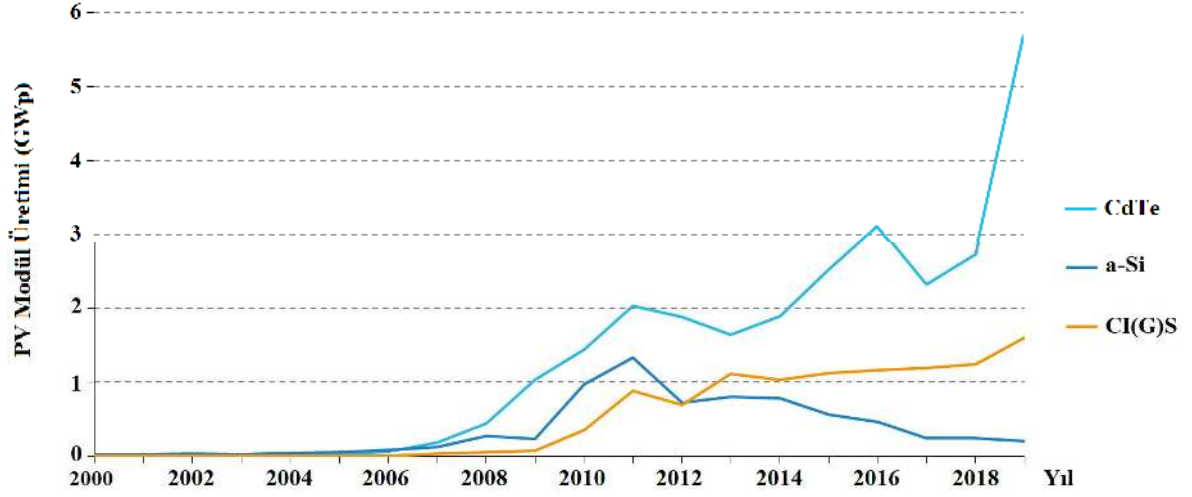
Yeryüzünde yüksek rezerv oranına sahip ve toksik olmayan elementlere dayanan alternatif güneş pili malzemeleri araştırmaları, bakır çinko kalay sülfür ($\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ veya CZTS) malzemesinin geliştirilmesi ile sonuçlandı. CZTS, benzer prosesleme stratejileri ve zorlukları ile CIGS'e alternatif bir malzemedir. CZTS, yüksek soğurma katsayısına ($\sim 10^4 \text{ cm}^{-1}$) ve yaklaşık 1,5 eV'lik doğrudan bant aralığına sahip dörtlü bir yarıiletken bileşiktir. CZTS tabanlı güneş pillerinde % 12,6 rekor dönüşüm verimliliği elde edilmiştir (Green vd., 2020). Ancak CZTS'deki önemli bir zorluk, katyon düzensizliği (disorder) olarak bilinen kusur durumlarının varlığıdır. Katyon düzensizliğinde Cu ve Zn katyonları, yük çıkarımını engelleyen ve V_{oc} 'yi düşüren nokta kusurların oluşumuna neden olur (Jean vd., 2015).

CdTe, yüksek verim ve düşük maliyeti ile en önde gelen ince film PV teknolojilerinden biridir. CdTe yaklaşık 1,5 eV olan neredeyse optimum yasak enerji değeri ile yüksek verimli tek eklemli hücreler için ideal bir yarıiletken bileşiktir. CdTe güneş pillerinde küçük alanlarda rekor verim % 22,1'e ulaşırken, modül verimi ise % 19 olarak elde edilmiştir (Green vd., 2019). CdTe üretmek için, yüksek işlem sıcaklığı gerektiren yüksek verimli

üretim teknikleri (örneğin kapalı hacimde süblimleşme) kullanılır. Bununla birlikte, bugün ticarileştirilen herhangi bir PV teknolojisine kıyasla oldukça düşük modül maliyeti sunar (Rix vd., 2015). Ayrıca CdTe güneş pilleri, yaklaşık %5 pazar payı ile ince film teknolojileri arasında en önde gelen teknolojidir (Şekil 22). Ancak kadmiyumun çevre dostu olmaması ve tellür rezervlerinin azlığı gibi sorunlar, CdTe güneş pillerinde dezavantaj oluşturmaktadır.



Şekil 21. Güneş pillerinin birincil aktif malzemeye göre sınıflandırılması (Ibn-Mohammed vd., 2017).



Şekil 22. İnce film PV modül üretim grafiği (Fraunhofer ISE, 2019).

Yeni gelişen ince film güneş pilleri, günümüzde ticari olarak uygulaması bulunmayan boya duyarlı (DSSC), organik, perovskit ve kuantum nokta güneş pillerini kapsamaktadır. Bunların arasında boya duyarlı güneş pilleri (DSSC), en olgun güneş pili teknolojisidir. Bir DSSC güneş pilinde fotonlar, anot üzerine yerleştirilen ince bir nanokristal yarıiletken tabakası üzerinde soğurulan bir foto-duyarlaştırıcı (photosensitiser) tarafından yakalanır. Diğer PV teknolojilerinin aksine elektron transferi için DSSC'lerde iyonları karşı elektrotta aktarmak için sıvı elektrolitleri (foto-elektrokimyasal hücre) kullanılır ve bu sayede elektrik akımı üretilir. Günümüzde DSSC'ler ile % 14,3'e ulaşan rekor verim değeri elde edildi (Kakiage vd., 2015). Ancak DSSC teknolojisi ile ilgili başlıca problemler arasında, düşük soğurma katsayısı ile güneş ışınımı ve yüksek sıcaklık altında uzun vadeli kararlılık bulunmaktadır (Ibn-Mohammed vd., 2017).

Organik güneş pilleri, düşük maliyetli aktif katman malzemeleri ve altlıkları, düşük enerji girdisi ve endüstriyel seviyeye yükseltme kolaylığı nedeniyle, PV çözümler için yüksek bir potansiyele sahiptir. Organik güneş pillerinde, ışığı soğurmak için küçük organik bileşikler veya polimer molekülleri kullanılır. Bunlar yeryüzünde bol bulunan elementlerden oluşur. Renkli veya şeffaf organik PV aygıtlarının üretimi için birçok soğurma tabakası opsiyonu nedeniyle, bina entegre uygulamaları için oldukça caziptir. Laboratuvar verimliliği % 18 olarak rapor edilmesine rağmen (Zhang vd., 2021); modül seviyesinde çok daha düşük verim elde edilmiştir. Bu güneş pillerinin başlıca problemleri, yük taşıyıcılarının etkisiz taşınması ve güneş ışığı altında zayıf uzun vadeli kararlılığının zayıf olması gelmektedir (Ibn-Mohammed vd., 2017).

Yakın zamanda geliştirilen bir başka PV teknolojisi, perovskit tabanlı güneş hücreleridir (Liu vd., 2013). DSSC'den esinlenen bu teknolojiye elektrolit boyası olarak katı bir malzeme kullanılır. Burada “perovskite” terimi ABX_3 kristal yapısına atıfta bulunur. Optik bant aralıkları, katyon (A, B) veya anyon (X) yer değiştirmesi ile 1,2 - 3,0 eV arasında ayarlanabilir. Bu malzeme sınıfının temel avantajları arasında yüksek taşıyıcı difüzyon uzunlukları, düşük rekombinasyon kayıpları, düşük malzeme maliyeti ve bant aralığı mühendisliği bulunur. Perovskit güneş pillerinde, V_{oc} değerleri 1,1 V'nin üzerinde elde edilerek, %25,5 rekor verim değerine ulaşılmıştır (Green vd., 2020). Başlıca problemler arasında film morfolojisi ve malzemenin karakteristik özelliklerinin kontrol edilmesi, neme karşı yüksek hassasiyet, hücre kararlılığı ve toksik bir element olan kurşun kullanımı bulunmaktadır (Jean vd., 2015).

Bir kuantum noktası (QD), kuantum mekaniği yasalarının hesaba katıldığı, yarıiletken bir malzemeden üretilen bir nanokristaldır. Nanopartiküllerin boyutunun değiştirilerek ayarlanabilen optik ve elektrik özelliklerinin yanı sıra, bant aralığına sahip olması nedeniyle güneş pillerinde soğurucu bir malzeme olarak kullanılmaktadır. Bu durum, güneş spektrumunun farklı bölgelerini soğurmak için kolayca imal edilmelerine olanak tanır ve bu sayede yakın kızılötesi fotonların verimli bir şekilde toplanması gerçekleşir. Kuantum nokta güneş pillerinde küçük alanlarda %16,6'lık rekor verimlilik rapor edilmiştir (Hao vd., 2020). Başlıca zorlukları arasında QD'nin yüzey kimyasının anlaşılmasındaki yetersizlik, düşük V_{oc} ve düşük yük taşıyıcı mobilitesi bulunmaktadır (Ibn-Mohammed vd., 2017).

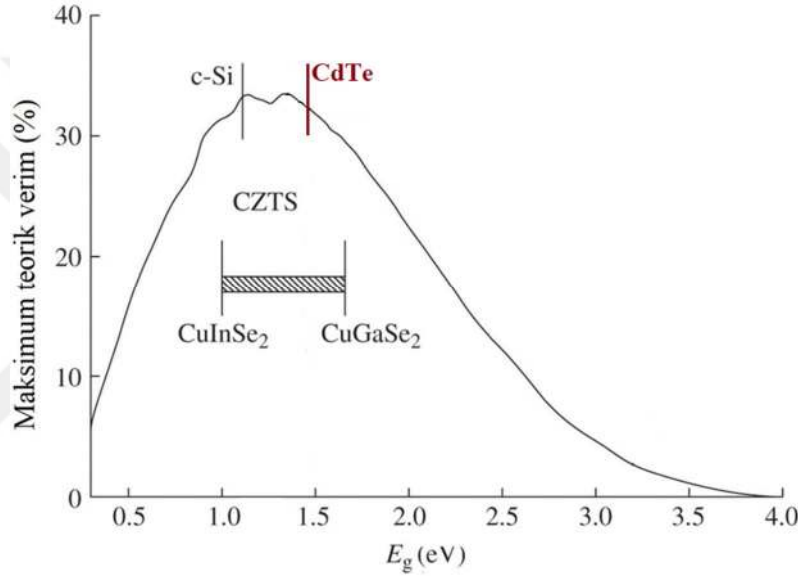
1.6. CdTe Tabanlı Güneş Pilleri

1.6.1. Giriş

CdTe, 1947 yılında Frerichs tarafından hidrojen atmosferinde Cd ve Te buharlarının reaksiyonu ile CdTe kristallerini sentezlediğinde ve fotoiletkenliklerini ölçtüğünde; yeni bir elektronik malzeme olarak ortaya çıktı (Frerichs, 1947).

CdTe, fotovoltaiik enerji dönüşümü için güneş spektrumuna neredeyse en uygun şekilde eşleşen, doğrudan optik bant aralığına sahip ($E_g \sim 1,5$ eV) II^B-VI^A grubu bir yarıiletken bileşiktir (McCandless ve Birkmire, 1991). Ayrıca CdTe yüksek optik soğurma katsayısından ($>10^4$ cm⁻¹) dolayı, gelen ışığın % 90'nını birkaç μ m film kalınlığı ile soğurulabilme özelliğine sahiptir (Morales-Acevedo, 2006).

CdTe güneş pilleri, basit ve düşük maliyetli (0,46 \$/Watt) üretim süreci, en kısa enerji geri ödeme zamanı (energy payback time) (0,94 yıl) ve yüksek ölçeklenebilirlik ile fotovoltaik dünyasında önemli bir yer tutmaktadır (Kim vd., 2014; Rix vd., 2015) . CdTe, yaklaşık %5 pazar payıyla en başarılı ince film fotovoltaik teknolojisidir (Fraunhofer ISE, 2019). Şekil 23’de görüldüğü üzere, CdTe ince film güneş pillerinde Shockley- Queisser limitine göre maksimum teorik verim %33 civarında (Shockley ve Queisser, 1961) olmasına rağmen, günümüzde deneysel olarak % 22,1 rekor hücre verimi elde edilmiştir (Green vd., 2019).



Şekil 23. Bant aralığı bağı olarak maksimum teorik verim grafiği (Shockley ve Queisser, 1961).

1.6.2. CdTe’nin Özellikleri

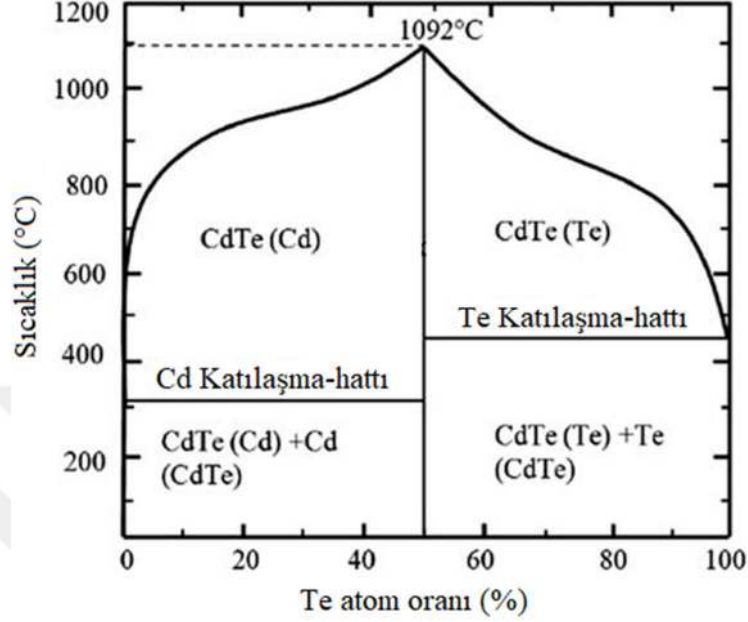
CdTe, II^B-VI^A bileşikleri arasında en düşük erime sıcaklığına, en düşük buhar basıncına, en büyük örgü parametresine ve en yüksek iyonikliğe sahip yarıiletken bileşiktir. Tablo 1, CdTe ile ilgili bazı fiziksel ve optoelektronik verileri göstermektedir (Luque ve Hegedus, 2003). Ancak bu değerler, sadece gösterge amaçlıdır. Çünkü biriktirme yöntemine, altlık sıcaklığına ve altlık türüne göre değerler farklılık gösterebilmektedir (Kalogirou, 2017).

Tablo 1. CdTe'nin optoelektronik ve fizikokimyasal özellikleri (Zanio, 1978).

Özellik	Değer veya aralık
300 K'de Optik bant aralığı (E_g)	~1,50 eV
Elektron çekiciliği (χ_e)	4,3 – 4,5 eV
600 nm'de soğurma katsayısı	$6 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$
600 nm'de kırılma indeksi	~ 3,1
Elektron mobilitesi (μ_e)	1000-1200 $\text{cm}^2/(\text{V.s})$
Delik mobilitesi (μ_h)	50-80 $\text{cm}^2/(\text{V.s})$
İyoniklik (Philips ölçeğinde)	0,717
Örgü parametresi (a_0) (300 K'de)	6,481 Å
Yoğunluk	~ 5,85 g/cm^3
Füzyon ısısı (ΔH_f^0) (300 K'de)	-24 kcal/mol
Süblimleşme reaksiyonu	$\text{CdTe} \rightarrow \text{Cd} + 1/2 \text{Te}_2$
Süblimleşme basıncı (p_{sat}) (bar biriminde)	$\log(P_s / \text{bar}) = -\frac{10650}{T(\text{K})} - 2,56 \log(T(\text{K})) + 15,80$
Erime noktası	1092°C
Molekül kütlesi	240,01 g/mol

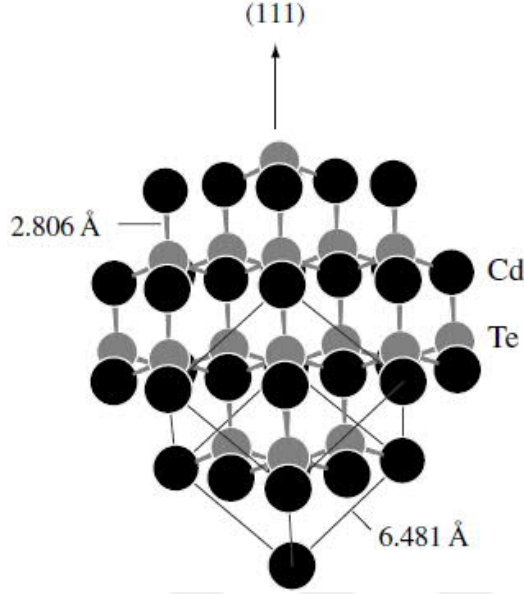
CdTe'nin 1 atm basınçta sıcaklık kompozisyon ($T-x$) faz diyagramı, Şekil 24'te gösterilmektedir. CdTe'nin faz dengesi, Cd ($x=0$) ve Te ($x=1$) uç noktaları ve stokiometrik CdTe bileşiği ($x=0,5$) ile nitelendirilmektedir. CdTe, eşleşik ara faz (sıvı ve katı fazın aynı anda oluşması) diyagramına sahiptir. CdTe'nin eşleşik buharlaşması, buhar tabanlı biriktirme tekniklerini kolaylaştırmaktadır. CdTe, depolama koşullarına bağlı olarak Cd-zengini veya Te-zengini olabilir. CdTe'nin $T-x$ grafiği ayrıntılı olarak incelendiğinde, yüksek sıcaklıklarda, oluşum bölgesi genişler. Bu oluşum, Cd- zengini tarafta 700°C'ye kadar asimetrik bir davranış sergilerken; daha yüksek sıcaklıklarda Te- zengini hale gelir (Aven ve Prener, 1967). Cd ve Te için nispeten yüksek süblimleşme basınçları, ~300°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda vakumda biriktirmede tek fazlı kompozisyonun oluşmasını sağlar. Atmosfer basıncında CdTe'nin erime sıcaklığı ($T_m = 1092^\circ\text{C}$); Cd ($T_m = 321^\circ\text{C}$) veya Te'den ($T_m = 450^\circ\text{C}$) (Hultgren vd., 1973) önemli ölçüde daha yüksektir. CdTe, oldukça negatif bir oluşum entalpisine sahiptir; hem Cd hem de Te'nin buhar basınçları CdTe'den çok daha yüksektir ve bu nedenle tavlama işlemleri, bileşiğin bütünlüğü korunarak gerçekleştirilebilir (Jianrong vd., 1995). İkili (binary) kaynaktan biriktirildiğinde, CdTe genellikle

stokiyometriktir. Ancak Cd'nin daha yüksek buhar basıncına sahip olmasından dolayı Cd atomu boşlukları meydana gelebilir (McCandless ve Sites, 2011).



Şekil 24. CdTe faz diyagramı (Zanio, 1978).

CdTe'nin kristalik özellikleri, CdTe'nin iyonik bağ karakteri ile belirlenir. II^B-VI^A grubu bileşikleri arasında CdTe, Phillips iyoniklik ölçeğine göre en yüksek iyonikliğe (=0,717) sahiptir (Phillip, 1973). Geometrik değerlendirmeler; 0,225 ile 0,732 arasında katyon/anyon yarıçap oranına sahip iyonik ikili bileşiklerde dört yüzlü koordinasyonun tercih edildiğini; 0,732'den daha büyük bir oranda ise oktahedral koordinasyonun tercih edildiğini göstermektedir (Huheey vd., 1993). CdTe'de katyon/anyon yarıçapı oranı $r(\text{Cd}^{2+})/r(\text{Te}^{2-}) = 0,444$ olduğundan dolayı tetrahedral koordinasyonu desteklemektedir. Diğer elementin en yakın dört komşusu ile tetrahedral atomik koordinasyon, tek atomlu katılarda elmas yapısına ve iki atomlu katılarda ise çinko sülfür ve hekzagonal yapılarında kristallenmektedir. Atmosfer basıncında CdTe; 6,481 Å örgü parametresine ve 2,806 Å bağ uzunluğuna sahip yüzey merkezli bir kübik (fcc) çinko sülfür yapısında bulunur. Şekil 25, CdTe çinko sülfür yapısının, sıkı paket (111) düzlemi boyunca görünümünü tasvir etmektedir. Bu yönelim, CdTe ince filmlerinde karşılaşılan baskın yönelimdir (Luque ve Hegedus, 2003).



Şekil 25. CdTe'nin (111) tercihli yönelimine göre zinko sülfür kristal yapısı (Cd atomları siyah ve Te atomları gridir. Cd-Te bağları ve fcc birim hücresi gösterilmiştir) (Luque ve Hegedus, 2003).

CdTe'nin kristal yapısı, yarıiletkenin optik ve elektriksel özelliklerini etkilemektedir. Bu yüzden, tek kristal ve polikristal CdTe'nin özellikleri arasında büyük bir fark vardır. Polikristal CdTe filmleri, tek kristal CdTe ile karşılaştırıldığında; daha yüksek bir bant aralığına ve daha düşük bir taşıyıcı ömrüne sahiptir. Örneğin, tek kristal CdTe için bant aralığı, sırasıyla 80 K'de 1,47 eV ve 200 K'de 1,41 eV olarak ölçülürken; polikristal CdTe için aynı sıcaklıkta sırasıyla 1,57 ve 1,50 eV olarak belirlendi (Abd El-Mongy vd., 1997).

CdTe'nin bulk optik ve elektronik özelliklerini, değerlik bandı maksimumuna (V_{BM}) ve iletim bandı minimumuna (C_{BM}) yakın periyodik örgüdeki elektronik bant yapısı belirler. V_{BM} ve C_{BM} , birinci Brillouin bölgesinde 300 K'de yaklaşık 1,5 eV'lik doğrudan bant aralığına neden olan aynı momentum konumunda meydana gelir. İletim bandı, katyonun ilk işgal edilmemiş seviyesinde, yani Cd'nin 5s seviyesinde ortaya çıkar. En üst değerlik bandı, anyonun işgal edilen en yüksek seviyesinde, yani Te'nin 5p seviyesinde oluşur (Wei ve Zunger, 1998).

Mükemmel tek kristallerden sapmalar, elektronik ve optik özelliklerde büyük değişikliklere neden olur. Kusurlar, periyodik yapıyı bozarak bant aralığı içinde lokalize elektronik durumlar üretir. Elektronik özellikleri kontrol eden kusur türleri, doğal kusurlar, kimyasal safsızlıklar ve bunların kompleksleridir. Bunların arasında doğal kusurlar ve safsızlıklar, yer değişimsel veya arayer olarak ortaya çıkabilir. İyonlaşma enerjisi $\sim E_g/2$ olan

durumlar "derin" ve bantların yakınında iyonlaşma enerjisine sahip durumlar ise "sığ" olarak nitelendirilir. Örneğin kadmiyum atomu boşluğu (V_{Cd}) ve tellürün kadmiyum ile yer değişimi (Cd_{Te}) sığ akseptör durumlarına yol açar. Arayer kadmiyum (Cd_i), nispeten sığ donör durumuna yol açarken; arayer tellür (Te_i), derin durumlara yol açar (Luque ve Hegedus, 2003).

CdTe'nin iletkenlik tipi, Cd/Te oranını bağlı olarak değişmektedir. Cd-zengini n-tipi iletkenlik gösterirken; Te-zengini p-tipi iletkenlik göstermektedir (Kröger ve De Nobel, 1955). CdTe, elektronik olarak amfoterik (bir yarıiletkende donör veya akseptör olarak davranma) yarı iletken davranış sergilediği için, katkılama ile p- ve n-tipi CdTe elde etmek mümkündür (Jenny ve Bube, 1954). Au, Cu ve Ag gibi katkılar, Cd ile yer değiştirerek sığ akseptör seviyeleri oluştururken; In, Ga, Al gibi katkılar Cd ile yer değiştirerek donör seviyeleri oluşturur (Wei ve Zhang, 2001).

1.6.3. CdTe Kaynakları ve Toksiklik

CdTe teknolojisi, sınırlı sera gazı ve ağır metal emisyonları, küçük karbon ayak izi ve kısa enerji geri ödeme süreleri (energy payback time) açısından cazip bir teknolojidir. Ancak Cd elementinin toksikliği ve sınırlı Te miktarı, CdTe teknolojinin büyümesi için sorun teşkil etmektedir (Başol ve McCandless, 2014). Ancak yapılan çalışmalarda, Cd elementinin kararlı bir bileşik olan CdTe'ye kıyasla çok daha fazla toksik olduğu belirlenmiştir (Kaczmar, 2011; Zayed ve Philippe, 2009).

CdTe ile ilgili endişe verici durumlardan biri, CdTe modüllerinin yüksek sıcaklığa maruz kalması durumunda toksik Cd elementinin yayımı konusudur. Ancak CdTe'nin yüksek erime noktasından ($T_m \sim 1050^\circ C$) dolayı, olası bir yangın durumunda, normal koşullarda konut yangınları sırasında bu sıcaklığa ulaşamadığından dolayı, atmosfere kadmiyum salınımı olmamaktadır (Kalogirou, 2017). Ancak modüllerin CdTe'nin erime noktasının üstünde sıcaklıklara maruz kalması durumunda bile, 1000 m² CdTe modülünün bulunduğu durumda ortalama Cd miktarı 66 g/m² ve ısı kaynağı 60 MW olması nedeniyle, en kötü yangın senaryosunda bile, potansiyel Cd emisyonları hala insan sağlığını riske eden seviyelerin önemli ölçüde altındadır (Beckmann ve Mennenga, 2011)

CdTe modülleri normal çalışma sırasında, herhangi bir toksik gaz üretmemektedir. Bunun nedeni, elektromanyetik spektrumun yüksek frekanslı fotonları ile soğurulan enerjinin, katı örgü yapısındaki bağları kırmak için yeterli olmamasıdır. Bir başka ifadeyle,

güneş spektrumundaki herhangi bir fotonun enerjisi, bir PV hücresinin CdTe veya CdS katmanlarındaki kimyasal bağlanma enerjisinden daha düşüktür. Bu, Cd içeren bileşikler kararlı hale getiren içsel bir özelliktir (Bonnet ve Meyers, 1998).

CdTe modülleri ile ilgili bir başka endişe, sınırlı tellür (Te) miktarıdır (Rix vd., 2015). Mevcut Te elementi, bakırın rafine edilmesinin bir yan ürünü olarak Te'nin geri kazanımı yoluyla elde edilmektedir. Bununla birlikte daha fazla Te'yi geri kazanmak için daha fazla bakırın nasıl elektro-rafine edilebileceğine yönelik araştırmalar bulunmaktadır (Ojebuoboh, 2008). Ayrıca, bakırın yanı sıra diğer birçok birincil metalde Te safsızlıkları bulunur. En yüksek Te konsantrasyonları, altın madenlerinde bulunmaktadır. Ayrıca Te, çinko ve kurşunun rafinesi ile de elde edilebilir (Newton, 1972). Ayrıca birincil cevher olarak hali hazırda Te kaynakları da mevcuttur (Zweibel, 2010). Son olarak, elementin ferromangan nodüllerinde bulunduğu okyanus tabanı rezervlerinden doğrudan doğruya tellür çıkarma olasılığı bulunmaktadır (Rix vd., 2015). Bu kaynaklar göz önüne alındığında, gelişen CdTe piyasasının talebini karşılayacak kadar yeterli Te-miktarına erişilebileceği öngörülmektedir.

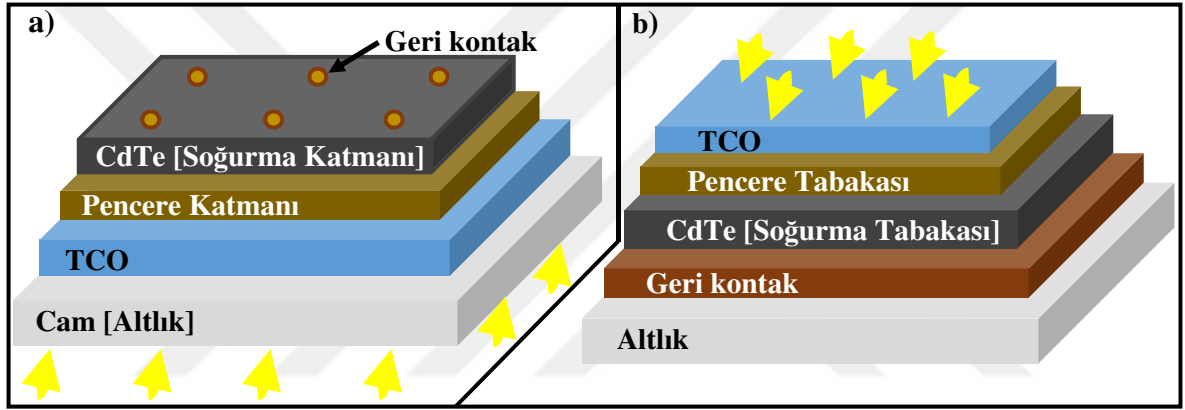
1.6.4. CdTe Güneş Pillerinin Yapısı

İnce film CdTe güneş pilleri, üst-tabaka (superstrate) veya alt-tabaka (substrate) konfigürasyonlarında üretilebilmektedir. Üst-tabaka konfigürasyonuna sahip aygıtlar, bir altlık üzerinde saydam iletken oksit (TCO)/pencere tabakası/CdTe/geri kontak dizilimi ile üretilmektedir (Şekil 27(a)). Bu konfigürasyonda ışık altlık tarafından aygıtı girdiği için; altlık saydam olmalıdır.

Alt-tabaka konfigürasyonuna sahip aygıtlar ise bir altlık üzerinde, geri kontak/CdTe/pencere tabakası/TCO dizilimi ile üretilmektedir (Şekil 27(b)). Alt-tabaka konfigürasyonunda ışık, TCO tabakasından pencere tabakasına ve son olarak soğurma katmanına (CdTe) gider. Bu konfigürasyonda kullanılan altlık, saydam olmak zorunda değildir. Esnek altlıklar, molibden, paslanmaz çelik, vs. gibi farklı altlıklar üzerinde aygıt yapısı oluşturulmaktadır (Chandramohan vd., 2006; Mathew vd., 2004). Bununla birlikte, alt-tabaka konfigürasyonunun önemli bir sınırlaması, CdTe güneş pillerinde tipik olarak en iyi performanslı hücrelerin geri kontak kısmında Cu'nun kullanılmasıdır. Alt-tabaka konfigürasyonunda geri kontak, aygıt yapısına Cu'nun doğal difüzyonunu arttıran ve bu yüzden de performansını kötüleştiren yüksek biriktirme sıcaklıklarına dayanmalıdır. Tüm bu nedenlerden dolayı, alt-tabaka konfigürasyonu ile üretilen CdTe aygıtları, uzun süre %10'un

üzerinde verimlilik göstermedi (Dhere vd., 2011; Romeo vd., 1992b). Bugüne kadar, alt-tabaka CdTe aygıtları üzerinde yapılan araştırmalar, üst-tabaka aygıtlara kıyasla çok daha düşüktür (Kalogirou, 2017).

Polikristal bir aygıt olarak bir CdTe hücresinin performansı, hücre yapısındaki katmanların biriktirme özelliklerine bağlı olarak her bir katmandan çeşitli derecelerde etkilenen tane sınırları ve film ara yüzeyleri gibi yüzeyler tarafından domine edilir. En yüksek verimli cihazlar üst-tabaka konfigürasyonu kullanılarak üretilmektedir (Başol ve McCandless, 2014). Bu yüzden üst-tabaka konfigürasyonunda aygıtı oluşturan her bir katmanın ayrıntılı olarak incelemek fayda sağlayacaktır.



Şekil 26. a) Üst-tabaka ve b) alt-tabaka konfigürasyonunda CdTe güneş pillerinin yapısını gösteren diyagram

1.6.4.1. Altık

Hücre tasarımında en önemli adımlardan biri, yüksek sıcaklıklara dayanan ve üzerine gelen ışığın geçmesine izin veren cam bir altlığın seçimidir (Okamoto vd., 1992). Burada cam altlık, aygıt için yapısal destek sağlar. Ayrıca üst-tabaka konfigürasyonunda ışık, yarıiletken malzemeler tarafından soğurulmadan önce camdan geçer. Bu nedenle camın optik geçirgenliğinin oldukça yüksek olması gerekir.

Aygıt üretiminde kullanılan camın özellikleri, hücrenin performansını doğrudan etkilemektedir (Başol ve McCandless, 2014). CdTe güneş pillerinde cam altlık olarak genellikle soda-kireç camı (SLG) veya borosilikat cam kullanılmaktadır (Ferekides ve Britt, 1994; Ferekides vd., 1994). Üst tabaka konfigürasyonunda üretilen %10 verimli hücrelerin bazılarında altlık olarak düşük maliyetli soda-kireç camı kullanıldı (Başol ve McCandless,

2014). Ancak, SLG'nin gerilme (strain) noktası 515°C ve optik geçirgenliği <450 ve >700 nm dalga boylarında %80'in altındadır (Kosyachenko vd., 2012). Bu nedenle rekor verimli hücrelerin üretiminde, genellikle yüksek gerilme noktasına sahip oldukça saydam camlar kullanılmaktadır. Örneğin, %16,7 verimli hücrede 660°C 'ye ulaşan bir proses sıcaklığına dayanan ince bir borosilikat cam kullanılmıştır (Wu, 2004).

1.6.4.2. Saydam İletken Oksit Tabakası

Üst-tabaka konfigürasyonlu bir hücrede cam üzerine kaplanacak ilk katman, hem yüksek iletkenliğe (ya da düşük elektrik direncine) hem de yüksek optik geçirgenliğe (fotonların soğurucuya ulaşmasına izin vermek için mümkün olduğu kadar ince olma) sahip bir saydam iletken oksit (TCO) katmanıdır.

Aygıt yapısında TCO katmanı, bir ön kontak olarak işlev görmektedir. Ancak TCO $\sim 4,5$ eV'nin altında elektron çekiciliğine sahip olmalıdır. Çünkü pencere tabakasının TCO ile omik bir kontak oluşturması gerekir. Aksi takdirde elektronların TCO/pencere katmanı ekleminde serbestçe hareket etmesini engelleyen bir Schottky kontağı oluşur. Bu yüzden, TCO katmanının seçimi oldukça önemli bir konudur.

CdTe'nin yüksek sıcaklıkta biriktirilmesi durumunda, TCO'daki (ön kontaktaki) kirlilikler CdTe tabakasına kadar yayılabilir. Ayrıca TCO'nun cam içindeki safsızlıkların yarıiletken malzemeye difüzyonunu engellemesi gerekir. Öte yandan, TCO üzerine CdS'nin büyütülmesi ve büyütme sonrası tavlanması, TCO katmanının özelliklerini ve CdS/TCO ara yüzey özelliklerini değiştirebilir (Alamri ve Brinkman, 2000). Dahası, TCO'ların morfolojisi CdS ve CdTe büyümesini de etkilemektedir (Romeo vd., 1998). Dolayısıyla, TCO'lar için sadece çok yüksek elektriksel iletkenlik ve saydamlık değil, aynı zamanda yüksek kimyasal ve fiziksel kararlılığa da ihtiyaç duyulmaktadır (Romeo vd., 2003).

CdTe tabanlı güneş pillerinde, birçok farklı TCO tabakası kullanılabilmektedir. Ancak çoğunlukla, flor katkılı kalay oksit (SnO_2/F ya da FTO)(Shen vd., 2016), alüminyum katkılı çinko oksit ($\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ya da AZO)(Gupta ve Compaan, 2004), indiyum kalay oksit ($\text{In}_2\text{O}_3/\text{SnO}_2$ ya da ITO)(Kim vd., 2018) ve kadmiyum stanit (Cd_2SnO_4 ya da CTO)(Wu vd., 2001) tercih edilmektedir. Bu tabakalardan ITO ve AZO'nun her ikisi de düşük tabaka direncine ve yüksek optik saydamlığa sahiptir. Ancak CdTe güneş pillerinde bu katmanların kullanımı, bazı problemlere sebep olabilmektedir. AZO, 400°C 'den daha yüksek

sıcaklıklarda parçalanma eğilimi gösterir ve iletkenliğini kaybeder. ITO da ise n-tipi bir katkı maddesi olan indiyum, CdTe tabakasına difüze olabilir (Baines vd., 2018).

Günümüzde rekor verimli hücreler, aygıt yapısında FTO katmanının kullanılmasıyla elde edildi (Romeo ve Artegiani, 2021). Çünkü FTO kararlıdır ve zamanla renk değiştirmez. Aşınmaya dayanıklıdır ve yüksek sıcaklıklarda bozunmadan işlenebilir. Özellikle 500°C'nin üzerindeki yüksek depolama sıcaklıkları için standart bir seçim olarak F:SnO₂ (FTO) kullanılmaktadır (Baines vd., 2018).

1.6.4.3. Pencere Tabakası

Aygıt yapısında TCO ile CdTe soğurma katmanı arasında, n-tipi bir pencere katmanı bulunmaktadır. p-n eklemine n-tipi kısmını oluşturan pencere tabakası, eklem bölgesinde uygun bir bant hizalanması sağlamaktadır. Pencere katmanının ışığın soğurma katmanına kadar geçmesine izin verecek kadar ince, ön kontağı kapatacak ve CdTe ile p-n eklemi oluşturacak kadar kalın olması gerekir. Bu katmanda fotonların soğurulmasıyla üretilen elektron-delik çiftleri, akıma katkıda bulunmaz. Çünkü eklem elektrik alanı, delikleri iterken elektronları çeker (Mukerjee ve Thakur, 2011). Bu yüzden, pencere tabakasının bant aralığının mümkün olduğu kadar yüksek olması gerekir.

CdTe tabanlı güneş pillerinde n-tipi pencere katmanı olarak çoğunlukla CdS ince filmleri kullanılmaktadır (Heo vd., 2003). CdS, yaklaşık 2,4 eV bant aralığına ve düşük soğurma katsayısına sahip direkt geçişli bir yarıiletkenidir. CdS, yüksek fotoiletkenlik, nispeten kolay katkılama ve düşük dirençli omik kontak gibi özelliklere sahiptir (Moualkia vd., 2009a; Moualkia vd., 2009b).

Son zamanlarda CdS'ye alternatif olarak farklı pencere katmanları kullanılmaya başlanmıştır. Bu katmanlardan biri, Mg_{1-x}Zn_xO (MZO) ince filmleridir. MZO tabakası, CdS'den daha yüksek bir bant aralığına ($E_g \approx 3,2- 3,7$ eV arası) sahiptir. MZO tabakası kullanılan aygıtlarda daha yüksek bir V_{oc} elde edilse de özellikle akım yoğunluğu değeri azalmıştır (Kephart vd., 2016).

Pencere katmanı olarak CdSe'nin kullanıldığı tabakalar ile uzun dalga boyu bölgesinde akım toplanması iyileşirken, V_{oc} değeri kötüleşmiştir (Paudel ve Yan, 2014). Bu yüzden son yıllarda CdS/CdSe ikili pencere yapısının uygulanması önerilmiştir. Bu ikili yapı ile hem aygıtın kısa ve uzun dalga boyu bölgesinde akım toplanması iyileşirken, V_{oc} değerinin de korunması sağlanmıştır (Yang vd., 2016a).

1.6.4.4. Soğurma Tabakası

Bir güneş pili yapısında soğurma tabakası, aygıt üzerine gelen fotonların büyük kısmının soğurulduğu ve elektron-delik çiftlerinin üretildiği tabakadır. Soğurma tabakası, p-n ekleminin p- tarafını oluşturmaktadır. Soğurma tabakasının kristal yapısı ve kalitesi, sadece net taşıyıcı konsantrasyonunu değil, aynı zamanda V_{oc} ve J_{sc} 'yi güçlü bir şekilde etkileyen taşıyıcı ömrünü de etkilediği için aygıtın en önemli parçasıdır.

Yüksek verimli hücreler için soğurma tabakasının, optimum bant aralığına ($\sim 1,4$ eV) ve yüksek soğurma katsayısına sahip olması gerekmektedir (Shockley ve Queisser, 1961). CdTe ise neredeyse optik bant aralığı ($E_g \sim 1,5$ eV) ve yüksek optik soğurma katsayısı ($> 10^4$ cm⁻¹) ile fotovoltaik uygulamalar için en ideal soğurma tabakalarından biridir.

CdTe tabakaları büyütüldüğünde, özden ya da zayıf bir p-tipi olma eğilimindedir. Ancak klorür işlemi veya Cu-katkılama (geri kontak aşamasında) gibi temel büyüme-sonrası işlemlerle CdTe'nin iletkenliği artırılır. Soğurma tabakasının kalitesi, kullanılan biriktirme tekniğine büyük ölçüde bağlıdır. CdTe filmleri, çeşitli yöntemler kullanılarak büyütülebilmektedir. Biriktirme yöntemleri, altlık sıcaklığına göre ikiye ayrılabilir:

- Yüksek altlık sıcaklığı (genellikle 400°C'nin üzerindeki sıcaklıklar): kapalı hacimde süblimleşme (Amin ve Rahman, 2017) ve buhar taşıma ile biriktirme (VTD) (Hanket vd., 2006),
- Düşük altlık sıcaklığı (genellikle 400°C'nin altındaki sıcaklıklar): termal buharlaştırma (Kumarasinghe vd., 2017), RF saçtırma (Gupta ve Compaaan, 2004), elektrodepolama (Dharmadasa vd., 2014), sprey depolama (Nikale vd., 2011).

Büyütme sıcaklığı, filmlerin yapısını doğrudan etkilemektedir. Düşük altlık sıcaklığında büyütülen CdTe filmlerinde daha küçük bir tane yapısı oluşurken; yüksek altlık sıcaklıklarında ise daha büyük bir tane yapısı oluşmaktadır (Amin ve Rahman, 2017; Dharmadasa, 2014). Genelde, daha küçük tane büyüklüğünün (ve dolayısıyla daha fazla tane sınırının) rekombinasyonu arttırdığı kabul edildiğinden dolayı; daha büyük taneli bir yapının oluşması tercih edilmektedir (Major, 2016).

Fotovoltaik uygulamalarda kullanılan biriktirme tekniğinden bağımsız olarak CdTe tabakasının kalınlığı, 1 ila 8 μ m kalınlığı arasında değişmektedir. 1 μ m'den daha ince katmanlara sahip hücreler, düşük optik soğurma nedeniyle düşük performans gösterirken (Paudel vd., 2011); 8 μ m'den daha kalın katmanlarda, aşırı kalın soğurucudaki ilave direnç nedeniyle performans kaybı meydana gelir.

CdTe'ye ilişkin problemlerden biri, Si ile ($>100 \mu\text{m}$ kalınlık) kıyaslandığında, CdTe'nin tipik olarak 10 ns'den daha düşük olan taşıyıcı ömürleridir (Kanevce vd., 2014). Düşük taşıyıcı ömürleri, tane sınırlarının davranışı ile ilişkilendirilmektedir (Major vd., 2016). Taneler arası boşlukların, baskın rekombinasyon merkezleri olarak davrandığına inanılmaktadır. CdTe güneş pillerinde tane sınırlarının rolünün anlaşılması için yapılan çalışmalarda filmlerin polikristal doğası olmasından dolayı komşu taneler arasında yönelim bozukluğunun olduğu belirlendi (Nowell vd., 2011). Bu durum, tane sınırlarındaki yüksek kusur yoğunluğunun tercihli rekombinasyon merkezleri olarak davranacağı anlamına gelmektedir. Bu yüzden, CdTe ince filmlerinde yüzey yapısının iyileşmesi için büyüme sonrası işlemler gerekmektedir (Baines vd., 2018).

1.6.4.5. CdCl₂ İşlemi

CdCl₂ aktivasyon işleminin CdTe güneş hücresinin performansının gelişimi için kilit bir rolü bulunmaktadır. Bu yüzden standart bir süreç olarak, CdCl₂ işlemi uygulanmaktadır. CdTe filmine CdCl₂ işleminin uygulanması, CdTe'nin ve CdS/CdTe katmanlı yapısının özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. CdCl₂ işleminin birtakım olumlu etkileri şunlardır:

- Tane büyüklüğünün artması
- Tane şeklinin değişimi
- Tane sınırı sayısının azalması
- Tanelerin yeniden yönelimi
- p-tipi iletkenliğin artması
- CdS/CdTe arayüzünde Fermi seviyesinin sabitlenmesi
- CdS ve CdTe arasındaki ara difüzyon mekanizması ile optik kayıpların azalması,
- Düzlemsel kusur yoğunluğunun azalmasıyla birlikte ara yüzey kusurlarının pasifleştirilmesi,
- Tuzak durumlarının konsantrasyonu ve dağılımındaki değişiklik,
- Taşıyıcı yaşam süresinin artması
- Artan taşıyıcı toplanması ve yük ayrılması
- Artan akseptör yoğunluğu nedeniyle J_{sc} gelişimi
- Daha iyi yapısal kalite nedeniyle V_{oc} gelişimi

Aktivasyon işleminden sonra, malzemelerde yeniden-kristallenme (tanelerin yeniden yönelimi ve/veya tanelerin büyümesi) süreci meydana gelebilir. Yeniden kristallenme sonucunda, düşük gerilim (strain) enerjili yeni bir örgü yapısı oluşur (Terheggen vd., 2004).

p-n eklemine oluşturan CdS ile CdTe arasında örgü uyumsuzluğu (yaklaşık %11) meydana gelmektedir. Bu nedenle ara yüzey bölgesi (CdS-CdTe ara yüzeyi), oldukça kusurlu bir yapıya ve dolayısıyla yüksek bir rekombinasyon oranına sahiptir (Abbas vd., 2012; Consonni vd., 2006; Yoo vd., 2014). CdCl₂ işleminin uygulanması, ara-yüzey bölgesinde CdTe ile CdS arasındaki difüzyonu ve alaşımlanmayı artırır. S'nin CdTe'ye difüzyonu sonucu ara yüzeyde örgü uyumsuzluğunu azaltan CdTe_{1-x}S_x alaşımı oluşurken; Te'nin CdS'ye difüzyonu sonucu CdS_{1-y}Te_y alaşım bölgesi oluşur (Durose vd., 2002; Terheggen vd., 2003). CdCl₂ ısıtılmasından sonra oluşan CdTe_{1-x}S_x alaşımından dolayı ara yüzeydeki kusur yoğunluğu azalmaktadır. Bunun sonucunda ara-yüzey bölgesindeki rekombinasyon oranı da düşmektedir.

Aktivasyon sürecinde gözlemlenen bir başka etki, taşınma mekanizmasındaki değişiktir. CdCl₂ işleminden önce taşınma süreci, tünelleme/ara yüzey kombinasyonu ile gerçekleşirken; eklem rekombinasyonu baskındır (Durose vd., 1999). CdCl₂ işleminden sonra tane sınırları ve seri direnç azalır. Akseptör dağılımı daha homojen hale gelir ve derin akseptör yoğunluğu artar (Jahn vd., 2001). CdCl₂ işleminin sonucu olarak, difüzyon uzunluklarıyla birlikte taşıyıcı ömrü de artar (Sites ve Pan, 2007). CdCl₂ işleminin uygulanmadığı hücreler, genişleyen uzay-yük bölgesi nedeniyle zayıf mavi spektral tepki sergilerken; CdCl₂ işleminin uygulandığı hücrelerde, artan akseptör yoğunluğunun sonucu olarak daha iyi bir akım toplanması gerçekleşir (Birkmire vd., 1992). Taşıyıcı ömrü ve konsantrasyonu arttıkça V_{oc}'de iyileşir.

CdCl₂ işlemi, CdS katmanını da etkilemektedir. Bileşikteki Cd atomları, CdS'nin Cd kenarlarında bulunurken, Cd atomik boşlukları Cl ile doldurulur. Bu durumun, CdS'nin n-tipi iletkenliğini etkiler ve performans kaybına neden olabilir (Kumar ve Rao, 2014).

CdCl₂ işleminin etkileri, malzemelerin biriktirme sıcaklığına bağlı olarak farklılık gösterebilir. Yüksek sıcaklıklarda biriktirme ile daha kaliteli filmler (daha büyük taneler, daha az tane sınırı konsantrasyonu, vs.) elde edilebilir. Bu durum, CdCl₂ ısıtılmasından önceki etkisini sınırlamaktadır. Örneğin; oldukça yüksek sıcaklıklarda filmlerin büyütüldüğü CSS yöntemi ile üretilen numunelerde, CdCl₂'nin etkisi belirgin bir şekilde görülmeyebilir (Moutinho vd., 1995; Moutinho vd., 1997). Ancak termal buharlaştırma (Romeo vd., 1998), saçırtma (Shao vd., 1996) veya elektro-depolama (Soliman vd., 2001) gibi yöntemler

kullanılarak üretilen numunelerde, CdCl_2 'nin etkisi daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Örneğin, termal buharlaştırma veya elektro-depolama yoluyla büyütülen CdTe, CdCl_2 işleminin uygulanmasından sonra kademeli olarak kaybolan polikristal yapısından dolayı, güçlü (111) tercihli yönelim sergileyebilmektedir.

CdCl_2 işlemi, biriktirme esnasında (in-situ) ya da biriktirme sonrasında (ex-situ) uygulanabilmektedir. CdTe film yüzeyinde kalıntı oluşumunu önleyen biriktirme esnasındaki işlemler, sprej, CSS gibi yöntemler ile gerçekleştirilebilir (Krishna ve Dutta, 2004; Paulson ve Dutta, 2000). Biriktirme-sonrası işlem, genellikle CdTe tabakası kaplandıktan sonra CdCl_2 işleminin uygulanması ve sonrasında atmosferik koşullar altında belirli bir süre (genellikle 20-60 dk. arasında) yüksek bir sıcaklıkta (genellikle 350-450°C arasında) tavlınması ile gerçekleştirilmektedir (Dharmadasa, 2014). Biriktirme sonrası süreç, buhar taşıma ile biriktirme (McCandless ve Buchanan, 2008), termal buharlaştırma (Khrypunov vd., 2006) ve kimyasal işlem (Pinheiro vd., 2008) gibi çeşitli yöntemler kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemler arasında, basit ve düşük maliyetinden dolayı kimyasal yöntem en çok tercih edilen yöntemler arasındadır.

1.6.4.6. Geri Kontaklar

Akım oluşumu için aygıt yapısındaki en önemli katmanlardan biri, geri kontaktır. Foton ile üretilen taşıyıcıların hücreden bir dış devreye aktarılması, geri kontaklar vasıtasıyla gerçekleşmektedir. Geri kontağın kararlı ve yüksek bir iletkenliğe sahip olması gerekir. Bir diğer önemli özellik ise metalik geri kontağın iş fonksiyonudur. Metalik geri kontak ve yarıiletkenin ara yüzeyinde Fermi seviyesi hizalanacaktır. Bu durum yarıiletkenin bant bükülmesine yol açar. Bu nedenle omik kontak oluşturmak için metalin iş fonksiyonu, yarıiletkenin iş fonksiyonundan daha yüksek olmalıdır. Aksi takdirde bir Schottky engeli oluşturacaktır. Engelin yüksekliği,

$$q\Phi_B = q\phi_m - [\chi_s + (E_c - E_F)] \quad (32)$$

ifadesi ile bulunur. Bu ifade de 'q' elektronik yük, ' ϕ_m ' metalin iş fonksiyonu, ' E_c ' yarıiletkenin iletim bandı seviyesi, ' E_F ' yarıiletkenin Fermi seviyesi ve ' χ_s ' p-tipi yarıiletkenin elektron çekiciliğidir. Oldukça yüksek elektron çekiciliği ve bant aralığına

sahip olan CdTe'nin yüksek iş fonksiyonundan (~5,8 eV) dolayı, herhangi bir metal ile omik bir kontak oluşturmaları için malzemenin iş fonksiyonunun 5,8 eV'den daha büyük olması gerekmektedir (Abken ve Bartelt, 2002). Bu yüzden, CdTe güneş pili için uygun bir geri kontak bulmak oldukça zordur.

CdTe güneş pillerinde yarıiletken/metal omik kontak oluşumu için, metal geri kontaklar (Cu, Mo, vs.), metal oksit geri kontaklar ($\text{Cu}_2\text{O}/\text{Au}$, MoO_x/Cu , vs.), metal Te- geri kontaklar (Cu_xTe , CuTeNi , HgTe/Cu , NiTe_2 , ZnTe/Cu , $\text{ZnTe}/\text{Cu}/\text{ITO}$, ZnTe/Sb vs.), metal Se- geri kontaklar (TiSe_2 , VSe_2 , vs.), metal S- geri kontaklar (CuS , CuInS_2 , CuInS_2/N , CuS/ZnS , FeS_2 , MoS_2 , vs.), metal halojenür (CuI , vs.) gibi birçok geri kontak malzemesi kullanılmaktadır (Hall vd., 2021). Ancak kullanılan geri kontak malzemeleri arasında en ideal seçeneklerden biri, geri eklem bölgesinde yüksek katkı konsantrasyonu sağlayan Cu katkılı bir kontakın kullanılmasıdır (Bonnet, 1992; Ferekides vd., 1997; Romeo vd., 1992a). Örneğin, EMPA'da geliştirilen MoO_x gibi çok başarılı geri kontakta bile, verimliliği artırmak için çok az miktarda bakıra (yaklaşık 1 nm) ihtiyaç duyulmuştur (Kranz vd., 2013).

Cu, CdTe için önemli bir p-tipi katkı elementidir. Cu, Cd ile bir yer-değişimi akseptörü olarak davranabilir ve CdTe yüzeyine yakın bölgede katkılama konsantrasyonunu arttırabilir. Bakırın geri kontakta p-tipi katkı maddesi olarak kullanılması ile 10^{15} cm^{-2} delik yoğunluklarına ulaşılarak en başarılı kontaklama tekniği olmuştur (Baines vd., 2018). Bakır, Cu katkılı grafit (Britt ve Ferekides, 1993), ZnTe/Cu (Gessert vd., 2003), Cu/Au (Chou vd., 1995) veya Cu_xTe (Ferekides vd., 1997) vs. gibi katkılı bir kontak malzemesi kullanılarak CdTe'ye difüze olabilir. Bununla birlikte bu kontaklama malzemeleri arasında Cu/Au iki tabakalı yapısı, yüksek verimli hücrelerde yoğun olarak kullanılmaktadır (Chou vd., 1995).

Cu, geri kontak bölgesinde başarı ile uygulanmasına rağmen; Cu'nun CdTe/CdS ara yüzeyine kadar difüzyona uğradığı ve bunun sonucunda aygıtın elektriksel özelliklerini bozduğu rapor edildi. Ayrıca CdTe tabakasında Cu'nun hızlı difüzyonunun, kararlılık sorunlarına da yol açtığı belirlendi (Dobson vd., 2000). Bu yüzden omik geri kontağı koruyarak Cu'nun hızlı difüzyonunu önlemek için Cu-katkı miktarının çok hassas bir şekilde ayarlanması büyük önem taşımaktadır.

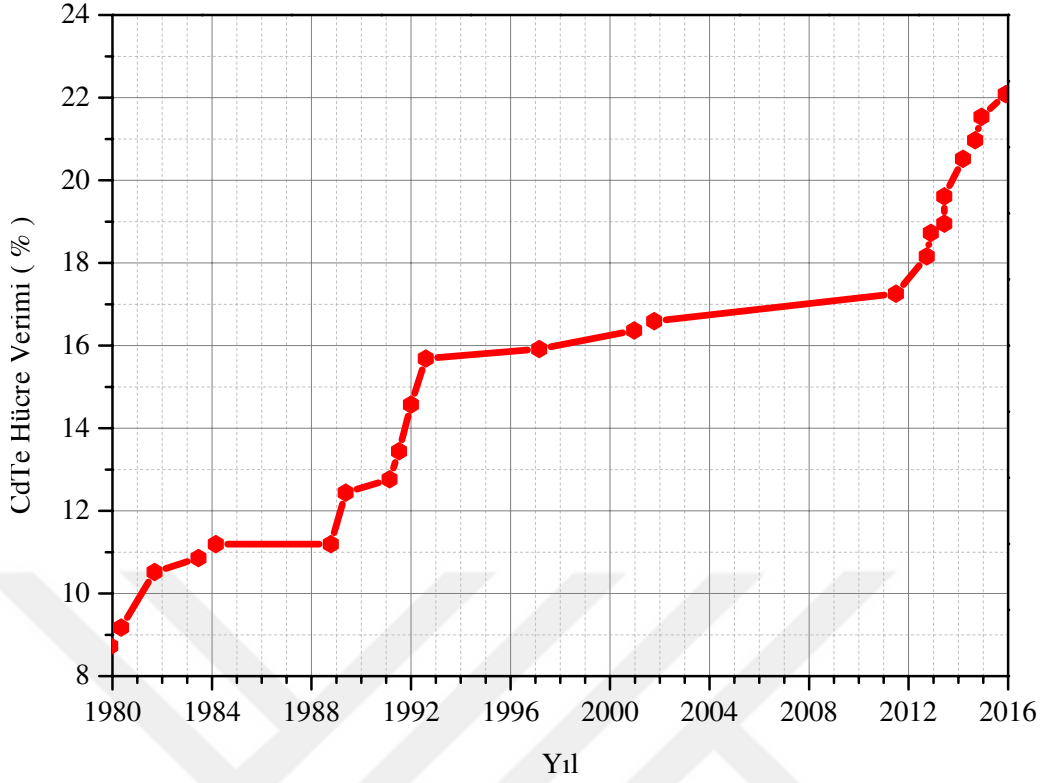
1.7. Literatür Özeti ve Motivasyon

CdTe ince film güneş pillerinde ilk ümit verici sonuçlar, 1980'li yılların başında çeşitli film büyütme tekniklerini kullanan gruplar tarafından %10 verimli aygıtların üretilmesiyle elde edildi. Kodak grubu, CSS yöntemiyle üretilen CdTe'nin depolama sıcaklığını ve depolama ortamındaki oksijen miktarını optimize ederek %10,5 hücre verimine ulaştı (Y.-S. Tyan ve Perez-Albuern, 1982). ISET grubu, elektrodepolama yöntemini kullanarak büyüttükleri n-HgCdTe'yi "tip dönüşümü-eklem oluşumu" ile (400°C'de ısıtma işlemi) p-HgCdTe'ye dönüştürerek ürettikleri CdS/CdTe güneş hücrelerinde %10,6 verim sağladı (Basol, 1988). 1989 yılında Photon Energy grubu tarafından düşük maliyetli ıslak kimyasal biriktirme yöntemiyle büyütülen CdTe'nin kullanıldığı aygıtlarda %12,3 verim elde edildi (Albright vd., 1989). Chu vd. yaptıkları çalışmada, F:SnO₂ kaplı cam altlık üzerinde sulu çözeltide CdS filmlerini kapladılar. Daha sonra CSS yönteminde kaynak malzemenin sıcaklığının, kompozisyonunun ve altlık sıcaklığının optimize edilmesiyle CdTe filmlerini büyütürken CdS/CdTe heteroeklem güneş hücrelerini ürettiler. 1 cm² alanlı güneş hücrelerinde % 13,4 aygıt verimi elde edildi (Chu vd., 1991). 1992'de CdS ince filmlerinin ve geri kontağın optimizasyonu (Cu:Grafit pasta) ve MgF₂ yansıma önleyici (AR) kaplamanın uygulanması ile % 14,6'lık hücre verimi elde edildi (Chu vd., 1992). Romeo vd. tarafından omik davranış gösteren kararlı bir geri kontak olarak geliştirilen Sb₃Te₂'nin hücreye uygulanması ile % 14,6 verim elde edildi (Romeo vd., 2000). 1993 yılında Cl-ışlemleri/kontak/katkılama süreçlerinin optimizasyonu ile % 15,8 verimli hücre elde edildi (Britt ve Ferekides, 1993). 1997 yılında Matsushita grubu tarafından gerçekleştirilen çalışmada, ITO kaplı borosilikat cam üzerine metal organik kimyasal buhar biriktirme (MOCVD) yöntemiyle CdS (50 nm) ve CSS yöntemi ile CdTe filmleri kaplandı. CdCl₂ aktivasyon işleminden sonra, karbon ve gümüş elektrotların serigrafi baskı ve sinterleme yöntemiyle üretildiği güneş hücresinde % 16'lık verim sağlandı (Aramoto vd., 1997).

2000'lerin başlarında daha kaliteli cam altlıkların, daha saydam iletken oksitlerin uygulanması, CdS tabakası altında yüksek dirençli saydam bir tabakanın (HRT) eklenmesi, daha yüksek depolama sıcaklıkları, klorlama işlemi, katkılama ve kontak yaklaşımları ile %16'dan daha yüksek verimli hücrelerin üretimi sağlandı. Bu dönemde ilk olarak, daha yüksek sıcaklıklarda soğurma katmanının büyütülmesi, TCO olarak oldukça saydam bir kadmiyum stannat (Cd₂SnO₄ veya CTO) katmanı ve TCO ve CdS tabakaları arasında HRT katmanı olarak çinko stannatın (Zn₂SnO₄ veya ZTO) başarılı bir şekilde uygulanması ile

hücre verimliliği % 16,5'e çıkarıldı (Wu vd., 2001). 2011 yılında First Solar Inc., akım yoğunluğunun arttırıldığı süreçler ($J_{sc} \sim 29$ mA) ile $1,066 \text{ cm}^2$ alanlı güneş hücresinde % 17,3 verim elde etti (Green vd., 2012a). 2012'nin sonunda General Electric (GE), $\sim 1 \text{ cm}^2$ alanlı hücre için % 18,3'lük yeni bir rekor verim sundu (Green vd., 2012b). J. M. Burst ve diğerleri, 620°C 'ye kadar uygulanan sıcaklıklarda büyütülen CdTe için ZnTe:Cu geri kontağının etkisini inceledi. Yüksek sıcaklıkta ($600 - 620^\circ\text{C}$ 'de) CSS ile büyütülen soğurma katmanlarına sahip CdTe güneş pillerinin, daha düşük sıcaklıklarda (550°C 'de) büyütülen CdTe'ye göre daha stabil ve kontak sıcaklığına daha dayanaklı olduğunu gözlemlediler. Ayrıca CdTe'nin yüksek sıcaklıkta PV cam üzerine kaplandığı aygıtlarda, verimlilikte $\sim$ %1'lik bir mutlak artış gözlemlendi (Burst vd., 2012). 2013 yılında General Electric %19,6 verimli rekor hücreyi elde etti (Green vd., 2014). CdTe aygıt verimliliğindeki en çarpıcı gelişmeler, laboratuvar ölçeğindeki hücre dönüşüm verimliliğinin %20'nin üzerine çıkarıldığı 2014 yılında gerçekleştirildi (Başol ve McCandless, 2014). 2014 yılında First Solar grubu tarafından %20,4 hücre verimi kaydedildi (URL-13, 2014). 2014 yılında First Solar grubu, % 21,0 dönüşüm verimliliğine sahip aygıtların üretildiği bildirildi (Green vd., 2015). Son olarak 2016 yılında yine First Solar grubu tarafından $0,48 \text{ cm}^2$ alanlı hücrelerde %22,1 verim elde edilerek; bugünkü rekor verime ulaşıldı (Green vd., 2019; Solar, 2016). CdTe tabanlı güneş pillerinde, 1980 yılından 2016 yılına kadar verimdeki bu değişim, Şekil 27'de grafiksel olarak gösterilmektedir.

CdTe ince film güneş pillerinde maksimum teorik verim ($\sim$ %33) ile ulaşılan rekor deneysel verim (% 22,1) arasında yaklaşık %11 fark vardır (Shockley ve Queisser, 1961; Green vd., 2020). Teorik ve deneysel verim değerleri arasındaki bu farktan dolayı, CdTe güneş pilleri hala büyük bir gelişim potansiyeline sahiptir.



Şekil 27. 1980-2016 yılları arasında küçük alanlarda CdTe hücre verimleri (NREL, 2020).

CdTe ince film güneş pillerinde, CdS-pencere ve CdTe-soğurma katmanlarının özelliklerini iyileştirmek ve hücre verimini arttırmak için birçok uygulama gerçekleştirildi. Bunların bazıları, CdS'nin oksijen ile tepkimeye sokulması (CdS:O), CdS'nin kalınlığının azaltılması, farklı pencere katmanlarının kullanılması, CdTe'ye CdCl₂ işleminin uygulanması ve CdTe'nin katkılanması şeklinde sıralanabilir (Burst vd., 2016; Contreras-Puente vd., 2000; Echendu ve Dharmadasa, 2015; Grice vd., 2016; Razykov vd., 2011).

CdTe tabanlı güneş hücrelerinde; geniş bant aralıklı (~2,4 eV), düşük soğurma katsayılı ve doğrudan geçişli bir yarıiletken olması nedeniyle pencere katmanı olarak çoğunlukla CdS ince filmleri kullanılır. CdS'nin bu üstün özelliklerine rağmen, hücre üzerine gelen ışığın bir kısmı, CdS-pencere katmanı tarafından soğurulmaktadır. Ancak yalnızca CdTe katmanında üretilen taşıyıcılar, etkin bir şekilde toplandığından dolayı; CdS katmanındaki optik soğurmadan dolayı foto-akım kaybı oluşmaktadır (Dhere vd., 1997). Foto-akımın düşmesine neden olan bu parazitik soğurmayı azaltmak için önerilen çözümlerden biri, CdS ince filminin oksijen ile tepkimeye (CdS:O) sokulmasıdır. Bu sayede CdS ince filminin optik geçirgenliği artar ve bant aralığı değeri de yükselir. Bunun sonucunda da daha fazla foton soğurma katmanına iletilir. Ayrıca CdS:O filmlerindeki

yüksek oksijen miktarı, CdTe'den CdS filmine doğru gerçekleşen Te difüzyonunu önemli derecede engellemektedir. Böylece, kısa dalga boyu bölgesinde spektral tepkinin azalmasına neden olan $\text{CdTe}_y\text{S}_{1-y}$ alaşımının oluşumu engellenir. CdS:O/CdTe hücresi, V_{oc} ve FF değerleri korunurken, J_{sc} değeride büyük ölçüde iyileşmektedir (Meysing vd., 2015; Wu vd., 2004).

CdS tabakasındaki soğurmayı azaltmak için önerilen çözümlerden biri de, CdS ince filminin kalınlığının azaltılmasıdır. CdS'nin kalınlığının azalması, optik geçirgenliği artırarak; kısa dalga boyu bölgesinde (mavi bölge) spektral tepkinin iyileşmesine neden olmaktadır. Örneğin hücre yapısında 40 nm ile 250 nm arasındaki kalınlıklara sahip CdS pencere katmanlarının kullanıldığı bir çalışmada; CdS'nin bant aralığının (~520 nm) altındaki dalga boyu bölgesinde, en ince ve en kalın CdS tabakalarının kullanıldığı hücre yapısında yaklaşık 5 mA/cm² foto-akım ve %3 verim kaybı olduğu belirlendi (Granata vd., 1996). Bir başka çalışmada ise CdS kalınlığının 100 nm'nin altına düşmesiyle birlikte kısa dalga boyu bölgesinde spektral tepkinin iyileştiği ve J_{sc} 'de büyük bir artış olduğu rapor edildi (Nakamura vd., 2003).

CdS'nin oksijen ile bağlanması ya da kalınlığının azaltılması gibi uygulamalar, hücrenin kısa dalga boyu bölgesindeki tepkisini iyileştirmesine rağmen; uzun dalga boyu bölgesinde belirgin bir etkiye neden olmamaktadır. Bu nedenle uzun dalga boyu tepkisini iyileştirmek için farklı uygulamalar gerçekleştirilmektedir. Bunlardan biri, CdS-pencere ile CdTe soğurma katmanı arasında lokal (yerel) alaşımlanma ile daha düşük bant aralıklı bir bölge oluşturmaktadır. Bu sayede CdS-CdTe ara yüzeyi yakınında daha uzun dalga boylu fotonlar soğurularak, hücre parametrelerinin iyileşmesi sağlanmaktadır. CdTe'nin biriktirilmesi sırasında ve/veya biriktirme sonrası işlemler sonucu, CdS-CdTe ara yüzeyinde tabakalar-arası difüzyon meydana gelir. Bu difüzyondan dolayı, soğurma katmanı tarafında $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ve pencere katmanı tarafında $\text{CdTe}_y\text{S}_{1-y}$ alaşımları oluşur. $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ alaşımlarının bant aralığı değeri, eğilme etkisinden dolayı CdTe'ye kıyasla daha küçüktür (Lane, 2006). $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ alaşım bölgesi foto-aktif olduğundan dolayı; bu alaşım uzun dalga boyu bölgesinde foto-akımın artmasına neden olur. Ancak foto-akımın artması için $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ alaşımının bant aralığının önemli oranda azalması gerekir. Bu durum ise ancak yüksek miktarda S'nin CdTe tabakasına difüzyonu ile gerçekleşir. Bununla birlikte CdS ile CdTe arasındaki örgü uyumsuzluğundan dolayı, S'nin CdTe'deki çözünürlüğünün oldukça düşük olduğu bilinmektedir (McCandless vd., 2002). Bu nedenle S'nin CdTe'ye difüzyonu yoluyla uzun dalga boyu bölgesinde akım toplanmasının iyileşmesi, etkili bir uygulama değildir.

Ayrıca $\text{CdS}_{1-y}\text{Te}_y$ alaşım tabakasının son derece kusurlu ve foto-inaktif bir bölge olmasından dolayı; bu katmanda soğurulan fotonlar, foto-akıma hiçbir katkıda bulunmamaktadır (Duffy vd., 2002).

Hücre performansını iyileştirmek için önerilen yaklaşımlardan biri de, alternatif bir pencere katmanının kullanılmasıdır. Son zamanlarda, CdS'ye alternatif olarak önerilen en önemli pencere katmanı CdSe'dir (Başol ve McCandless, 2014). Bu yaklaşım, i) Güneş spektrumunun uzun dalga boyu bölgesinde foto-akım artışı sağlayan düşük bant aralıklı tabaka olması ii) CdSe/CdTe heteroeklemindeki örgü uyumsuzluğunun CdS/CdTe'ye göre daha küçük olması gibi özelliklerden dolayı ilgi çekicidir. Ancak CdSe'nin (~1,7 eV), CdS'den (~2,4 eV) daha küçük bir bant aralığına sahip olması; CdS'nin yerine CdSe kullanılmanın daha kötü bir pencere katmanı olacağını düşündürmektedir. Ancak CdSe tabakasının kalınlığının optimizasyonu ile kısa dalga boyu bölgesinde spektral tepkinin iyileştiğini rapor eden çalışmalar vardır (Paudel ve Yan, 2014).

CdSe-CdTe ara yüzeyindeki oluşan güçlü difüzyon sonucu, $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ alaşımı oluşur. Bu alaşım tabakası, CdTe'nin yüksek sıcaklıklarda (600°C üzeri) biriktirilmesi, biriktirme-sonrası tavlama ve klorlama işlemiyle oluşabilmektedir. Eğilme etkisinden dolayı $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ alaşımı, CdTe'den daha küçük bant aralıklarına sahip olduğundan dolayı, uzun dalga boyu bölgesinde J_{sc} artışı sağlamaktadır (Başol ve McCandless, 2014). Paudel vd., CdSe/CdTe hücrelerinde CdSe kalınlığının (60-750 nm arası) hücre performansına etkisini inceledi. CdSe kalınlığının 60 nm ile 150 nm olduğu hücrelerde yüksek J_{sc} değerleri elde edildi. Bu durum, yüksek sıcaklıkta CdTe'nin büyütülmesi ve büyütülme-sonrası CdCl_2 ısıtıl işlemi sırasında; CdSe-CdTe arayüzeyindeki tabakalar-arası difüzyon nedeniyle CdSe'nin büyük bir kısmının tüketildiğini göstermektedir. CdSe'nin kalınlığı ≥ 350 nm olduğunda, J_{sc} değerlerinin düştüğü görüldü. J_{sc} 'deki azalma, hücre yapısı tamamlandıktan sonra CdSe'nin önemli bir kısmının alaşımlanmaya katılmadığını ve foto-akımı katkıda bulunmayan serbest bir CdSe katmanının oluştuğuna atfedilmektedir (Paudel ve Yan, 2014). Elde edilen sonuçlar ışığında pencere katmanı yapısında CdS ve CdSe'nin birlikte kullanılmasının, hücre performansını iyileştirebileceğini düşündürmektedir. Çünkü CdS ve CdSe ince filmlerine kıyasla CdS/CdSe iki-tabakalı yapısı,

- i) Daha iyi iletim özelliklerine,
- ii) Daha küçük bant aralıklı bir ara yüzeye
- iii) Eklem bölgesinde daha düşük örgü uyumsuzluğuna

sahip olacaktır. Bu özelliklerden dolayı, pencere katmanı olarak sadece CdSe yerine CdS/CdSe'nin kullanılmasının, J_{sc} artışını sağlarken V_{oc} değerini de koruyabileceği öngörüldü (Başol ve McCandless, 2014). Yang vd., CdS/CdSe ikili pencere yapısını kullandıkları hücre yapısında, CdS/CdSe pencere katmanlı aygıtların, CdS/CdTe referans hücresine kıyasla hem kısa hem de uzun dalga boyu bölgelerinde J_{sc} artışı sağladığını b. Bu artışın temel sebebi ise, CdS/CdSe süper-örgü yapısının değerlik ve iletkenlik bantlarında alt bantların oluşumuna yol açması olarak ifade edildi. Bu alt bantların oluşması, elektronların ve deliklerin tüm engelleri tünelleyebilmesini sağlayarak, yük taşıyıcılarının iletimini ve toplanmasını sağlamaktadır. Böylece kısa dalga boyu bölgesinde akım yoğunluğu iyileşmektedir. Buna ek olarak, CdSe-CdTe ara yüzeyindeki tabakalar-arası difüzyon sonucu oluşan $CdTe_{1-x}Se_x$ alaşımından dolayı; soğurma kıyısı, uzun dalga boyu bölgesine kayar. Bunun sonucunda CdS/CdSe/CdTe hücrelerinde, CdS/CdTe'ye oranla daha yüksek J_{sc} ve daha iyi bir kuantum verimi elde edilir. Referans CdS/CdTe hücresinden % 10,7 verim elde edilirken, CdS/CdSe ikili yapının kullanıldığı aygıtta % 12,6 verime ulaşılar (Yang vd., 2016a). Aynı araştırma grubu tarafından altlık sıcaklığının CdS/CdSe yapısına etkisinin incelendiği bir çalışmada, optimum altlık sıcaklığı $200^{\circ}C$ olarak belirlendi. İkili yapıda CdS'in, $CdTe_{1-x}Se_x$ tabakası ile SnO_2 tabakası arasındaki etkileşimi engellediği, böylece V_{oc} artışının korunduğu görüldü. Optimum altlık sıcaklığında üretilen CdS/CdSe pencere katmanlı hücresinde kaydedilen %13,5 verim değerinin, sadece CdS'nin kullanıldığı referans hücresinden daha yüksek olduğu belirlendi (Yang vd., 2016b).

Paudel vd. yaptıkları çalışmada, CdSe pencere tabakası yerine, CdS:O/CdSe yapısını kullandılar. İkili pencere katmanı için en optimum kalınlığı, CdS için ~10-15 nm ve CdSe için ~100 nm olarak belirlediler. Bu kalınlıkların kullanıldığı CdS:O/CdSe/CdTe yapısında, CdSe/CdTe güneş pillerinden % 1 daha yüksek hücre verimine sahip olduğu tespit edildi. Ayrıca, ultra ince bir CdS:O pencere tabakası kullanıldığı zaman, J_{sc} ve FF parametreleri korunurken V_{oc} değerinde önemli bir artış (~40 mV) olduğunu belirlediler. V_{oc} değerindeki bu iyileşme, CdS:O tabakasının $SnO_2/CdSe_{1-y}Te_y$ ara yüzeyinin oluşumunu engelleyerek p-n eklemine iyileştirmesine ve dolayısıyla da hücrenin şönt direncini (paralel direnç) arttırmasına atfedildi. Standart CdS/CdTe hücresi ile karşılaştırıldığında, hücresinin spektral tepkisinin hem uzun hem de kısa dalga boyu bölgelerinde iyileştiği gözlemlendi. En yüksek verimli CdS:O/CdTe hücresi ($\eta = \%15$) ile kıyaslandığında, CdS:O/CdSe/CdTe hücresinin verimin ($\eta = \%15,2$) bir miktar arttığı görüldü (Paudel vd., 2015). Baines vd., pencere katmanı olarak CdS, CdSe ve CdS/CdSe'nin kullanıldığı "CdTe/pencere katmanı" hücre

yapısında, ara yüzey bölgesindeki Se-difüzyonunun CdTe üzerindeki etkisini araştırdılar. CdSe ve CdTe filmleri arasında neredeyse hiç alaşımlanmanın olmadığını; aksine CdS ve CdSe arasındaki yoğun tabakalar-arası difüzyon sonucu, CdS/CdSe/CdTe hücre performansında azalmanın (degration) meydana geldiği görüldü. Ayrıca, CdSe/CdTe ara yüzeylerinde boşlukların (void) oluştuğu belirlendi (Baines vd., 2020).

CdTe filmlerinin biriktirme yöntemi ve koşullarına bağlı olarak kusurlar içerebileceği ve düşük elektronik kalitede olabileceği bilinmektedir. Bu nedenle CdTe büyütüldükten sonra; yüksek sıcaklıkta bir klorlama işlemine tabi tutulur (Başol, 1992; McCandless ve Sites, 2011). Bu klorlama işlemi, genellikle CdTe tabakası üzerine CdCl_2 işlemi uygulanarak gerçekleştirilir. CdCl_2 aktivasyon işlemi, CdTe filmlerinde tane büyüklüğünün artmasına, yeniden kristalizasyona, özellikle tane sınırlarında kusur konsantrasyonunun azalmasına neden olur. Ayrıca CdCl_2 işlemi, CdS'nin örgü parametresini arttırarak CdTe ile arasındaki örgü uyumsuzluğunun azalmasına ve CdS/CdTe eklem bölgesinde tabakalar-arası difüzyonun artmasına katkıda bulunur. Bunların yanında film içine klor ve daha fazla oksijenin girmesini sağlayarak, heteroeklem kalitesini ve hücre performansını önemli ölçüde artırır (Başol, 1992; Terheggen vd., 2004).

Bazı gruplar tarafından CdCl_2 işleminin CdS ince filmleri üzerindeki etkileri incelendi. Örneğin Lincot vd., CBD yöntemiyle ürettikleri CdS ince filmlerine CdCl_2 işlemi uygulandıktan sonra CdS'nin kristal yapısının kübik fazdan hekzagonal faza dönüştüğü görüldü (Lincot vd., 1997). Liu vd., pulslu lazer depolama (PLD) tekniğini kullanarak, farklı altlık sıcaklıklarında hazırladıkları CdS ince filmlerine CdCl_2 işlemi uygulanmasının, katmanların kristal kalitesini ve tane boyutunu arttırdığını tespit ettiler (Liu vd., 2016). Bai vd., CdCl_2 işleminin CdS ince filmleri ve CdTe/CdS güneş hücreleri üzerindeki etkisini inceledikleri çalışmada, CdCl_2 'siz hava ortamında tavlanan örneklerde CdS'nin yüzeyinde CdO ve CdSO_4 oksit fazlarının oluştuğunu, CdTe/CdS güneş hücresinin seri direncinin artmasının sonucunda FF'ye değerinin düştüğünü kaydettiler. Bununla birlikte, CdCl_2 ısıtma işlemi uygulanmasının CdS filminin yeniden kristalleşmesini teşvik ettiğini ve sonuç olarak 50 ile 150 nm arasında değişen tane büyüklüklerine sahip sıkı-paket bir yapının oluştuğunu gözlemlediler (Bai vd., 2011).

CdSe ve CdTe'nin bir araya getirilmesiyle oluşan $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ bileşikler, hücre yapısında pencere katmanı ile CdTe arasında bir ara-katman (pencere katmanı/ $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ /CdTe) olarak uygulama alanı bulmaktadır. $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ alaşım tabakasının bant aralığı, Se katkısı ile birlikte eklem yakınında $\sim 1,4$ eV'ye ($x \sim 0,4$) kadar düşebilmektedir. Hücre

yapısının bant aralığındaki bu kayma, aygıtın uzun dalga boyu bölgesinde spektral tepkinin iyileşmesini sağlamaktadır (Lingg vd., 2019). CdTe güneş hücresinin üst-tabaka konfigürasyonunda yaygın olarak kullanılan bu ara-tabaka, ya pencere katmanı ile CdTe arasına bir $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ katmanı kaplanarak ya da CdCl_2 işlemi sırasında CdTe ile reaksiyona giren bir CdSe tabakasının kaplanmasıyla oluşturulur (Poplawsky vd., 2016; T. Wang vd., 2020). Ablekim vd. yaptıkları çalışmada, CdSe ve CdTe'yi ardışık olarak termal buharlaştırma yöntemiyle biriktirip, ardından CdCl_2 ısıtma işlemi uygulayarak aşamalı bant yapısına sahip yoğun ve büyük-taneli CdSeTe filmlerini elde ettiler. Aygıt yapısının cam/ $\text{F:SnO}_2/\text{MgZnO}/\text{CdSeTe}/\text{CdTe}/\text{Au}$ tabakaları ile oluşturulduğu hücrede, % 19 dönüşüm verimliliği kaydettiler (Ablekim vd., 2020). Bothwell vd. CSS yöntemi ile ürettikleri $\text{CdSeTe}(0,5 \mu\text{m})/\text{CdTe}(1,0 \mu\text{m})$ iki-tabakalı soğurucuya sahip hücrede, J_{sc} değerinin $24,0 \text{ mA/cm}^2$ 'den (CdTe için) $25,5 \text{ mA/cm}^2$ 'ye (için) arttığını belirlediler. Bu durum, CdSeTe/CdTe iki-tabakalı soğurma katmanının uzun dalga boyu bölgesinde daha fazla fotonun soğurulması ve bu soğurulan fotonların foto-akımın iyileşmesine katkıda bulunması ile açıklanmaktadır (Bothwell vd., 2020). Guo vd., Se difüzyonunun CdTe filminin bant aralığını azalttığını, kusurların pasifleştirilmesinde önemli bir rol oynadığını ve böylece CdSeTe/CdTe soğurma yapısına sahip hücrelerin verimini arttırdığını tespit ettiler. Aynı çalışmada CdSeTe/CdTe aygıtlarında Se ve Cl ayrışmasının rolü de araştırıldı. Buna göre, CdTe tabakasında Se ve Cl'nin varlığının, orta-boşluk (midgap) kusur durumlarının azalmasına neden olduğundan dolayı, azınlık taşıyıcı yaşam sürelerinin iyileştiği belirlendi (Guo vd., 2019).

Bu tez çalışması kapsamında yukarıda verilen literatür bilgisi esas alınarak, yüksek verimli CdTe güneş hücrelerinin üretilmesi amaçlandı. Bu süreç, optimum tabaka kalınlıklarına sahip CdTe hücre yapısında, özellikle Se-katkısının ve CdCl_2 aktivasyon işleminin katmanlı yapılar ve hücre performansı üzerine etkilerinin ayrıntılı olarak incelenmesiyle gerçekleştirildi.

$(\text{CdS}, \text{CdSe})/\text{CdTe}$ sistemi karmaşık yapıya sahiptir. Katmanlı yapının üretim aşamasında kullanılan film büyütme yöntemleri ve uygulanan ısıtma adımları, CdS, CdSe ve CdTe tabakaları arasındaki etkileşimleri etkileyen parametrelerdir. Tezin ilk kısmında, CdCl_2 aktivasyon işleminin CdS/CdSe ve CdS/CdSe/CdTe katmanlı yapılarının yapısal, optik özellikleri ile hücre performansı üzerindeki etkisi incelendi. Bu kapsamda ilk olarak farklı tavlama sürelerinde CdCl_2 ısıtma işleminin CdS/CdSe pencere katmanları üzerinde etkisi araştırıldı. Bunun yanında sadece CdS/CdSe örneklerine uygulanan CdCl_2 işleminin,

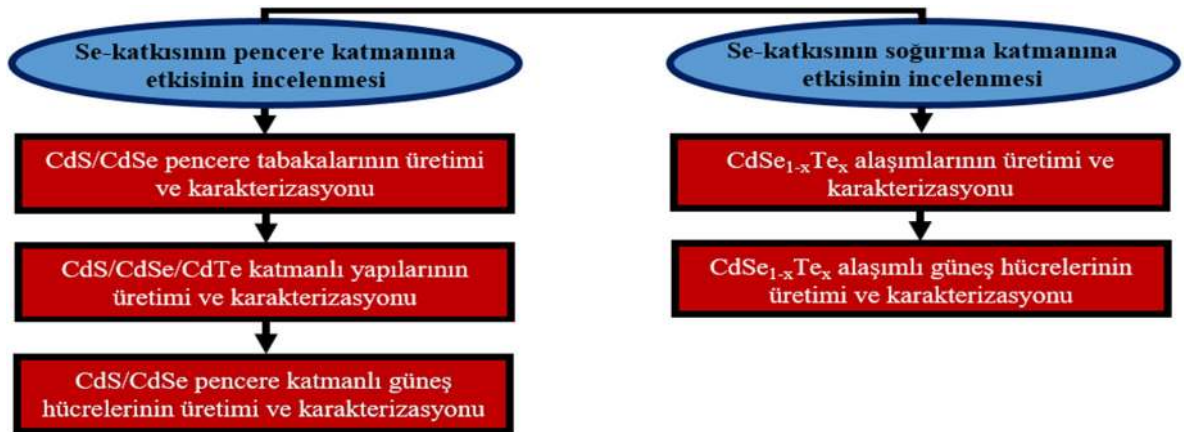
pencere katmanı ile CdTe arasındaki olası difüzyon süreci üzerindeki etkisi de incelendi. Son olarak CdS/CdSe, CdS, CdSe pencere katmanlarının CdTe güneş hücrelerinin parametreleri üzerine etkisi araştırıldı.

CdTe filmine aşamalı Se-katkısıyla oluşturulan $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ alaşımlarının hücre yapısındaki varlığı, özellikle uzun dalga boyu bölgesinde foto-akım artışı sağlamaktadır. Ancak $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}/\text{CdTe}$ soğurma katmanı yapısına sahip güneş hücrelerinin performansını arttırmak için, $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ alaşımlarının büyüme mekanizmasının ve foto-aktivitesinin ayrıntılı olarak incelenmesi gereklidir (Poplawsky vd., 2016). Tezin ikinci kısmında, $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ alaşımlarının, ara-soğurma katmanı ($\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}/\text{CdTe}$) olarak kullanıldığı hücrelerin performansı ayrıntılı olarak araştırıldı. Bu aşamada ilk olarak CdTe filmine Se-katkısının yapısal ve optik özellikler üzerine etkisini incelemek için, termal buharlaştırma yöntemi kullanılarak, belirli stokiometrik oranlarda CdSe ve CdTe tozlarının homojen bir şekilde karıştırılmasıyla ultra-ince kalınlıkta $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ ince filmleri üretildi. Üretilen $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ ($x=0-1$ arası) ince filmlerin özellikleri incelenerek, fotovoltaik uygulamalar için optimum özelliklerdeki $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ alaşımları belirlendi. Son olarak CdS/ $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}/\text{CdTe}$ yapısında aygıtlar üretilerek, Se-katkılı soğurma tabakalarının hücre performansı üzerindeki etkisi incelendi.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Giriş

Bu tez çalışması kapsamında, CdTe tabanlı güneş pillerinde, ‘Se’ katkılı CdS-pencere ve CdTe-soğurma katmanları üretilerek hücre parametreleri üzerine etkisi incelendi. Bu kapsamda üretilen örnekler, pencere katmanı örnekleri ve soğurma katmanı örnekleri olmak üzere iki ana grupta toplandı. Se- katkısının yapısal ve optik özellikleri ile hücre performansı üzerine etkisinin ayrıntılı olarak incelendiği örnek grupları, Şekil 28’de gösterilmektedir. Buna göre, Se-katkısının pencere katmanları üzerindeki etkisini incelemek için, ilk olarak CdS/CdSe pencere katmanları üretilti. Daha sonra tabakalar-arası difüzyon sürecinin incelendiği CdS/CdSe/CdTe üç-katmanlı yapıları üretilti. Son olarak, CdS/CdSe pencere katmanının hücre parametreleri üzerine etkisi incelendi. Bu kısımda CdS/CdSe pencere katmanının etkisini karşılaştırmak için CdS/CdTe ve CdSe/CdTe yapısında kontrol örnekleri de üretilerek, hücre performansları incelendi. Tez çalışmasının ikinci ana kısmı olan Se-katkısının CdTe-soğurma katmanlarına etkisini incelemek için, ilk olarak $CdSe_xTe_{1-x}$ alaşımları elde edilerek, yapısal ve optik özellikleri ayrıntılı olarak araştırıldı. $CdSe_xTe_{1-x}$ ince filmlerinde eğilme etkisinin sebep olduğu minimum bant aralığına karşılık gelen x değeri (molar oranı) belirlendi. Belirlenen x değerindeki $CdSe_xTe_{1-x}$ alaşımı, CdS ile CdTe arasına kaplanarak CdS/ $CdSe_xTe_{1-x}$ /CdTe yapısında güneş hücreleri üretilti ve hücre performansı araştırıldı.



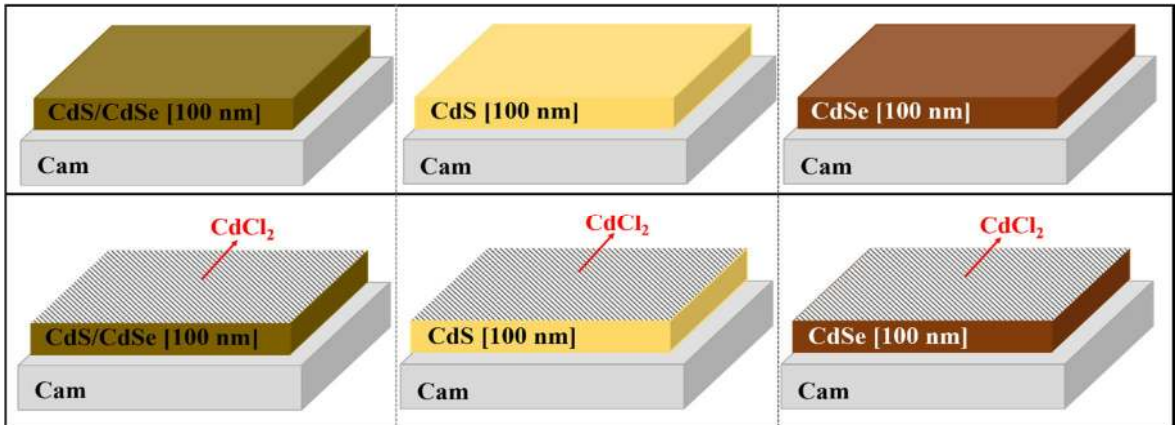
Şekil 28. Tez çalışması kapsamında incelenen örneklerin üretim ve karakterizasyon şeması

2.2. Se-Katkısının Pencere Katmanına Etkisi

2.2.1. CdS/CdSe Pencere Katmanlarının Üretimi ve Karakterizasyonu

CdS/CdSe, CdS ve CdSe pencere katmanları, 20 mm² alanlı cam altlıklar üzerinde büyütüldü. Pencere katmanları biriktirilmeden önce cam altlıklar, ultrasonik temizleyicide sırasıyla aseton, metanol ve saf suda toplam 15 dakika boyunca temizlendi. Depolama için hazırlanan cam altlıklar üzerine kimyasal banyoda depolama yöntemi (CBD) kullanılarak, CdS ince filmleri büyütüldü. Daha sonra CdSe ince filmleri, termal buharlaştırma yöntemi ile hem cam altlıklar üzerinde (kontrol örnekleri için) hem de CBD yöntemiyle büyütülen CdS filmleri üzerinde (CdS/CdSe iki tabakalı yapısı için) büyütüldü. CdS/CdSe örneklerinde, CdS'nin kalınlığı 50 nm ve CdSe'nin kalınlığı 50 nm olarak (toplam kalınlık 100 nm) ayarlandı. Kontrol örneklerinde ise 100 nm CdS ve 100 nm CdSe ince filmleri üretildi.

CdS/CdSe, CdS ve CdSe ince filmlerinde CdCl₂'nin etkisini incelemek için, bazı örneklerle CdCl₂ aktivasyon işlemi uygulandı. Sonuçları karşılaştırmak için geri kalan örneklerle ise CdCl₂ işlemi uygulanmadı. Şekil 32'de bu kapsamda elde edilen tüm örnekler gösterilmektedir. CdCl₂ işlemi uygulanan ve uygulanmayan tüm CdS/CdSe yapıları, ısıtma işlem süresinin etkisini incelemek için, 400°C'de hava atmosferinde 1, 5 ve 10 dakika tavlandı. CdS ve CdSe kontrol örneklerinde ısıtma işlem süresinin etkisi incelenmeyeceğinden dolayı, tüm kontrol örnekleri 10 dk. tavlandı. Bu aşamada 10 dk. tavlama süresi, CdS/CdSe örneklerinin karakterizasyon sonuçları referans alınarak belirlendi.



Şekil 29. Bu kısımda üretilen CdS/CdSe, CdS ve CdSe yapılarının şematik gösterimi

Numunelerin yapısal özelliklerini incelemek için, oda sıcaklığında $\text{CuK}\alpha$ radyasyonlu ($\lambda=1,5406 \text{ \AA}$) Rigaku SmartLab difraktometresi ile X-ışınları kırınım (XRD) ölçümleri gerçekleştirildi. Morfolojik bilgiler, FEI Quanta FEG 450 taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) ile elde edildi. EDS verileri, Oxford Instruments EDS cihazı ile elde edildi. Optik ölçümler, Dongwoo Optron UV-Vis spektrofotometre kullanılarak gerçekleştirildi.

2.2.2. CdS/CdSe/CdTe Katmanlı Yapılarının Üretimi ve Karakterizasyonu

Pencere katmanları ile CdTe katmanı arasındaki tabakalar-arası difüzyonu (inter-difüzyon) ayrıntılı olarak araştırmak amacıyla CdS/CdSe/CdTe, CdS/CdTe ve CdSe/CdTe katmanlı yapıları üretildi. Ultrasonik banyoda temizlenen cam altlıklar üzerine CdS ince filmleri CBD yöntemi ile büyütülürken; CdSe ve CdTe katmanları ise termal buharlaştırma yöntemiyle üretildi. CdS/CdSe/CdTe katmanlı-yapısında tabaka kalınlıkları sırasıyla 50 nm, 50 nm ve 150 nm olarak ayarlandı. CdS/CdTe ve CdSe/CdTe kontrol örneklerinde ise CdS ve CdSe ince filmlerinin kalınlığı 100 nm ve CdTe'nin kalınlığı 150 nm olarak ayarlandı. Böylece incelenen tüm yapılar için toplam kalınlık 250 nm ile sınırlandırıldı.

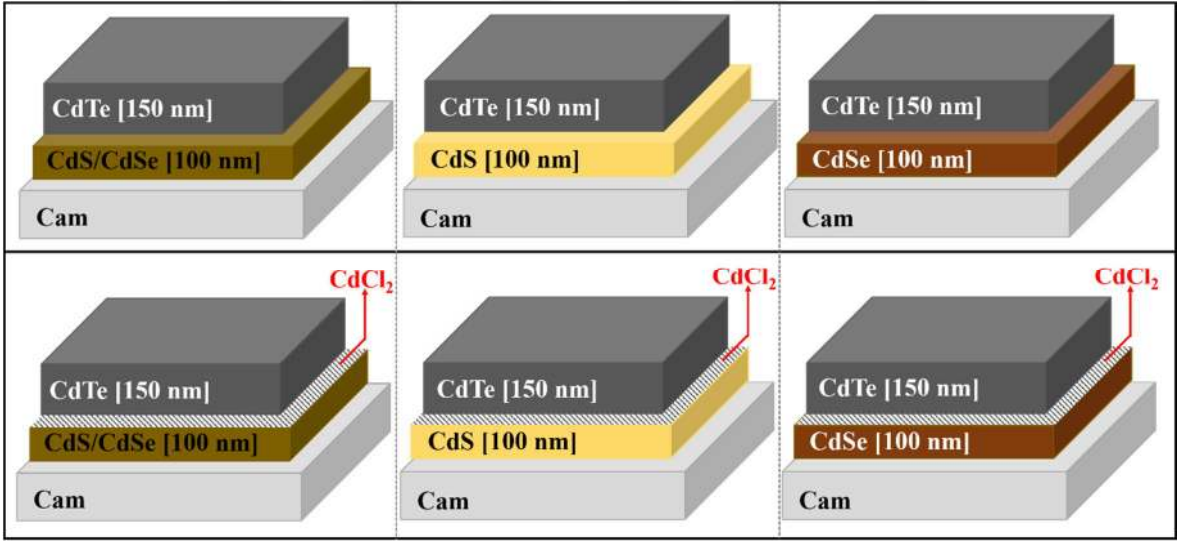
Bu kısımda üretilen örneklerde, CdTe tabakaları termal buharlaştırma yöntemi ile üretildi. Ancak yüksek verimli hücrelerde CdTe, genellikle CSS yöntemi ile üretilmektedir. Bunun sebebi CSS yönteminin doğasından dolayı (yüksek depolama hızı vs.) ince, homojen bir CdTe filmi üretmek oldukça zordur. Bu yüzden sadece tabakalar-arası difüzyonun incelendiği örneklerde CdTe ince filmleri termal buharlaştırma yöntemi ile büyütüldü.

CdS/CdSe, CdS ve CdSe örneklerinin bir kısmına, üzerlerine CdTe tabakası kaplanmadan önce CdCl_2 aktivasyon işlemi uygulandı. CdCl_2 aktivasyon işleminin ara yüzey üzerindeki etkisini incelemek için, diğer örneklerle herhangi bir klorlama işlemi uygulanmadı. Daha sonra, üretilen tüm örnekler hava ortamında 400°C 'de 10 dk. ön-ısıtım işlemi uygulandı. Ön-tavlama işleminden sonra tüm örnekler, termal buharlaştırma yöntemi kullanılarak 150 nm kalınlığında CdTe filmi ile kaplandı. CdTe filmleri kaplandıktan sonra, tüm örnekler 10 dk. boyunca hava ortamında 400°C 'de tavlandı. Bu örnek grubunda üretilen tüm örnekler, Şekil 30'da gösterilmektedir.

Bu numune grubunun etikenlenmesinde, " CdCl_2 'nin bulunması" alttaki katmana CdCl_2 ön-işleminin uygulandığını göstermektedir. Örneğin CdS/CdTe katmanlı yapısı; CdS katmanının üzerine CdTe filmi kaplanmadan önce, CdCl_2 işlemi uygulanmadan 400°C 'de tavlandığını, daha sonra CdTe'nin kaplandığını ve son olarak toplam yapıya tekrar 400°C 'de

10 dakika boyunca hava ortamında ısıtılma işlemi uygulandığını göstermektedir. Diğer yandan "CdS/CdCl₂/CdTe" örneği, CdS katmanına CdCl₂ işlemi uygulanıp 400°C'de 10 dakika hava ortamında tavlandığını, daha sonra üzerine CdTe'nin kaplandığını ve toplam yapının son olarak 400°C'de 10 dakika boyunca hava ortamında tavlandığını göstermektedir.

CdCl₂ işlemi uygulandıktan sonra, yüzeyde kalan (rezidü) CdCl₂'yi uzaklaştırmak amacıyla, örneklere yıkama işlemi yapılmadı. Çünkü CdCl₂ çözeltisi yüksek oranda seyreltiğinden dolayı, bu türdeki katmanlı yapılarda aşırı miktarda klorür beklenmemektedir. Bu grupta CdTe güneş hücrelerinde kullanılan 4-5 µm tabaka kalınlıkları ile karşılaştırıldığında, çok ince CdTe katmanları (150 nm) kullanıldı. CdTe kalınlığı, ısıtılma işleminden sonra katmanlı yapı kompozisyonundaki ölçülebilir değişiklikleri inceleyebilmek için çok ince tutuldu. Bu kalınlık değeri 1,8 µm CdTe kalınlığına sahip CdS/CdTe heteroekleminde 400°C ısıtılma işleminden sonra; ara yüzeyde 100-200 nm kalınlığındaki bir bölgede CdS_xTe_{1-x} fazının oluşumunu rapor eden çalışma referans alınarak belirlendi (Metin ve Esen, 2003).



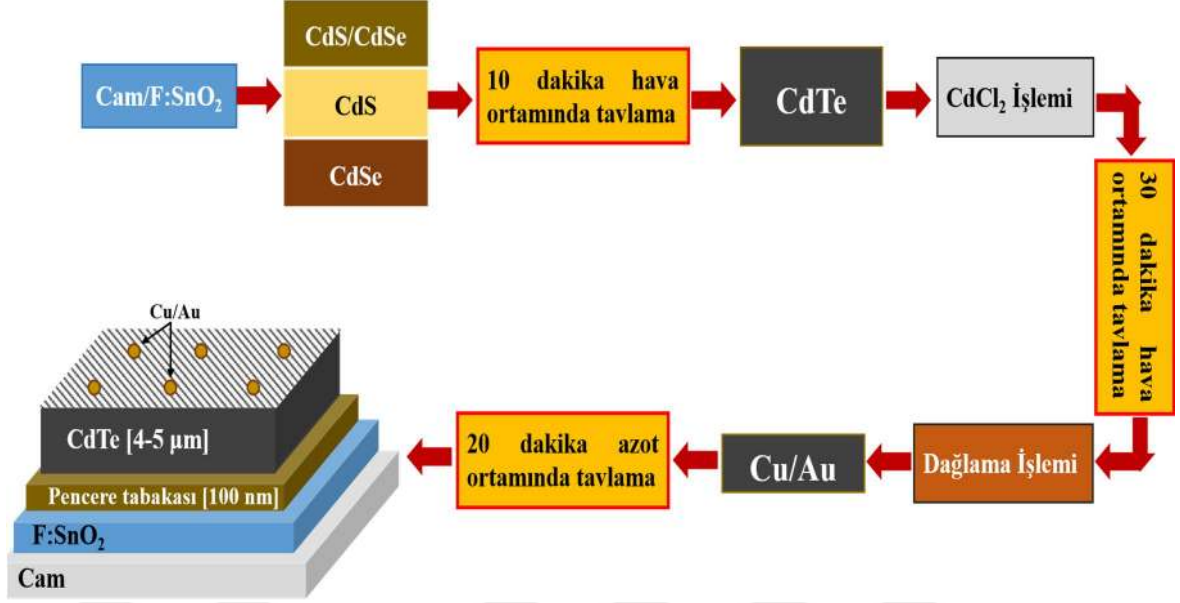
Şekil 30. CdS/CdSe, CdS ve CdSe örneklerinin şematik gösterimleri

Örneklerin yapısal özelliklerini ve faz içeriğini incelemek için, açığa bağlı X-ışını kırınımı (GI-XRD) spektrumları 0,7° ve 3° geliş açılarında ölçüldü. JEOL JSM 6610 cihazı ile SEM görüntüleri elde edildi. EDS sonuçları, Oxford Instruments EDS cihazı ile belirlendi.

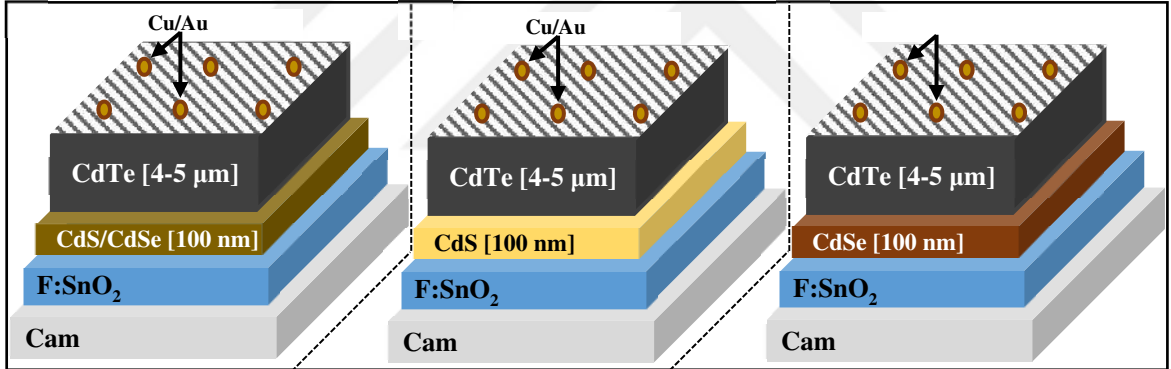
2.2.3. CdS/CdSe Pencere Katmanlı Güneş Hücrelerinin Üretimi ve Karakterizasyonu

CdS/CdSe, CdS ve CdSe pencere katmanlarına sahip güneş hücreleri, $\sim 15 \Omega/\text{sq}$ tabaka direnci olan flor katkılı kalay oksit (F:SnO_2) kaplı cam altlıklar üzerinde üretildi. F:SnO_2 kaplı altlıklar üzerine CBD yöntemiyle CdS ince filmleri ve termal buharlaştırma yöntemiyle CdSe ince filmleri büyütüldü. CdSe ince filmlerin $\text{Cam/F:SnO}_2/\text{CdS}$ altlıklar üzerinde büyüme sürecinde altlık sıcaklığı 200°C 'ye ayarlandı. CdS/CdSe pencere katmanlı hücrede, CdS'in kalınlığı 50 nm ve CdSe'nin kalınlığı 50 nm (toplam kalınlık 100 nm) olarak belirlendi. Kontrol örneklerinde ise CdS 100 nm ve CdSe 100 nm olarak ayarlandı. Daha sonra tüm örnekler 400°C 'de hava atmosferinde 10 dakika ön-ısıtma işlemi uygulandı.

$\text{Cam/F:SnO}_2/(\text{CdS}, \text{CdSe})$ yapısı tamamlanan örnekler, kapalı hacimde süblimleşme (CSS) yöntemi kullanılarak CdTe ($4,5\text{-}5 \mu\text{m}$) ile kaplandı. CdTe'nin biriktirilmesi esnasında kaynak sıcaklığı 640°C 'ye ve altlık sıcaklığı ise 580°C 'ye ayarlandı. CdTe tabakaları biriktirildikten sonra, standart bir süreç olarak ıslak kimyasal yöntem ile CdCl_2 işlemi uygulandı. Daha sonra tüm yapı, hava ortamında 400°C 'de 30 dakika boyunca tavlandı. Bu işlemten sonra CdTe yüzeyinde oluşabilecek CdO ve CdTe_2O_5 gibi bileşikler uzaklaştırmak ve yüzeyde Te-zengini bir bölge oluşturmak için seyreltik (% 0,3) brom+metanol çözeltisinde dağlama işlemi uygulandı. Son olarak $0,049 \text{ cm}^2$ kontak alanına sahip $\text{Cu}(3 \text{ nm})/\text{Au}(30 \text{ nm})$ metal kontaktları, elektron demeti buharlaştırma yöntemi ile buharlaştırıldı. Ardından Cu katkılmasını kolaylaştırmak için 200°C 'de 30 dakika tavlandı. Aygıt üretiminde izlenen deneysel aşama, Şekil 31'de şematik olarak gösterilmektedir. Son çıkan güneş pili yapıları ise Şekil 32'de gösterilmektedir.



Şekil 31. CdS/CdSe, CdS ve CdSe pencere katmanlı hücrelerin üretim sürecinde izlenen deneysel aşamalar



Şekil 32. a) CdS/CdSe, b) CdS, c) CdSe pencere katmanlarına sahip güneş hücresi yapıları

Güneş hücrelerinin akım yoğunluğu-voltaj (J-V) karakteristiği AM1.5 koşullarında OPT-7000 Solar Simulator ile belirlendi. Dış kuantum verimliliği (EQE) ölçümleri, 380-920 nm dalga boyu aralığında OptoSense Kuantum Verimlilik ölçüm sistemi ile gerçekleştirildi.

2.3. Se-Katkısının Soğurma Katmanına Etkisi

2.3.1. $\text{CdSe}_{1-x}\text{Te}_x$ Alaşımlarının Üretilmesi ve Karakterizasyonu

Polikristal $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ ince filmleri, cam altlıklar üzerinde termal buharlaştırma yöntemi kullanılarak büyütüldü. Bu alaşımların elde edilmesi için kaynak malzeme olarak CdSeTe alaşımı yerine yüksek saflıkta CdSe (% 99,99) ve CdTe (% 99,98) tozları kullanıldı. İlk olarak, stokiometrik ince filmler elde etmek için karışımdaki CdSe ve CdTe tozlarının nominal miktarları hesaplandı. Stokiometriye bağlı olarak hesaplanan CdSe ve CdTe tozlarının nominal miktarları Tablo 2’de gösterilmektedir. Biriktirme işleminden önce, tabloda gösterilen nominal miktarlardaki CdSe ve CdTe tozları homojen bir şekilde karıştırıldı. $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ alaşımlarının büyütme işlemi, 250°C altlık sıcaklığında ve 650°C kaynak sıcaklığında gerçekleştirildi. 2 dakikalık bir biriktirme süresi ile ~ 100 nm kalınlığında $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ filmleri üretildi. Farklı stokiometrilere üretilen $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ alaşımlarının örnek kodları da, Tablo 2’ de verilmektedir.

Tablo 2. $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ alaşımı için CdTe ve CdSe tozlarının nominal kütle oranları

x	CdTe 'nin Kütlesi (mg)	CdSe 'nin Kütlesi (mg)	Örnek Kodları
0	50	0	CdTe
0,10	45,03	4,97	CST-10
0,15	42,54	7,46	CST-15
0,20	40,05	9,95	CST-20
0,25	37,56	12,44	CST-25
0,30	35,07	14,93	CST-30
0,40	30,08	19,92	CST-40
0,50	25,09	24,91	CST-50
1	0	50	CdSe

İlerleyen bölümlerde açıklanacağı üzere, $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ alaşımlarının optik sonuçlarına göre CST-20 kodlu örneğin en küçük bant aralığı değerine sahip olduğu, ancak CST-30 kodlu örnekte ise bant aralığının tekrar artmaya başladığı belirlendi. Hücre yapısında yüksek verim elde etmek için genellikle minimum bant aralıklı $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ alaşımları kullanılmaktadır. Bu yüzden hücre yapısında CST-20 ve CST-30 alaşımları kullanıldı. Ancak bant aralığının daha da azaldığı bir alaşım varsa, bunu tespit etmek için CST-20 ve CST-30 örnekleri arasında bir katkı oranına sahip olan %25 nominal Se-katkı oranına sahip

CST-25 örnekleri de üretildi. Bu alaşımın minimum bant aralığına sahip olduğu belirlendiğinden dolayı, bu alaşım tabakasına sahip hücrenin de uygulaması yapıldı.

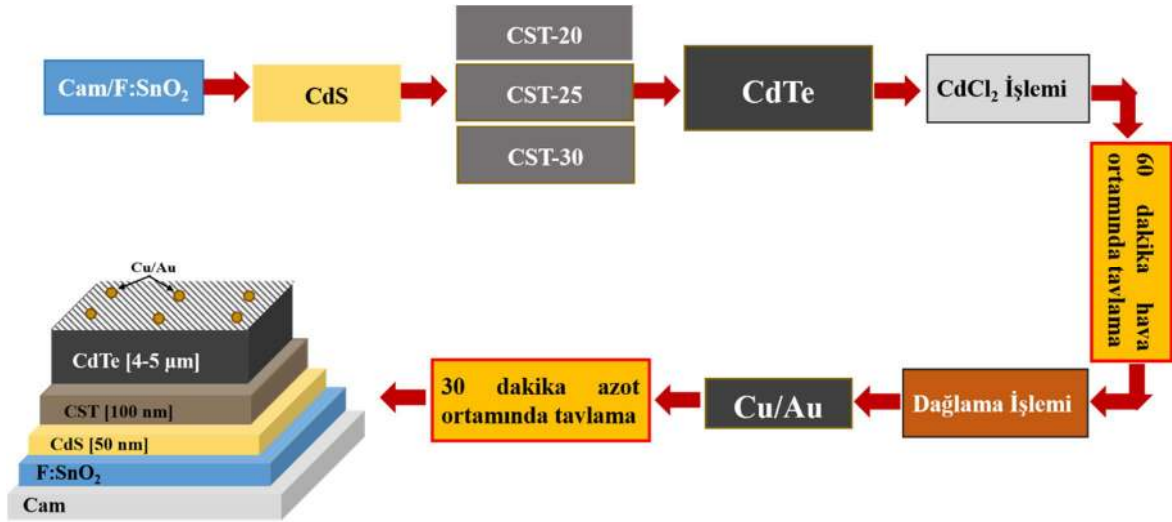
Numunelerin kalınlıkları spektroskopik elipsometre ile ölçüldü. XRD spektrumları Rigaku Smartlab difraktometresi ile $\text{CuK}\alpha$ radyasyonu kullanılarak $2\theta = 10^\circ - 60^\circ$ aralığında elde edildi. Numunelerin yüzey morfolojisi, Zeiss EVO LS10 SEM ile incelendi. Optik ölçümler Dongwoo Optron UV-Vis spektrofotometre ile gerçekleştirildi.

2.3.2. $\text{CdSe}_{1-x}\text{Te}_x/\text{CdTe}$ Soğurma Katmanı Yapılı Güneş Hücrelerinin Üretilmesi

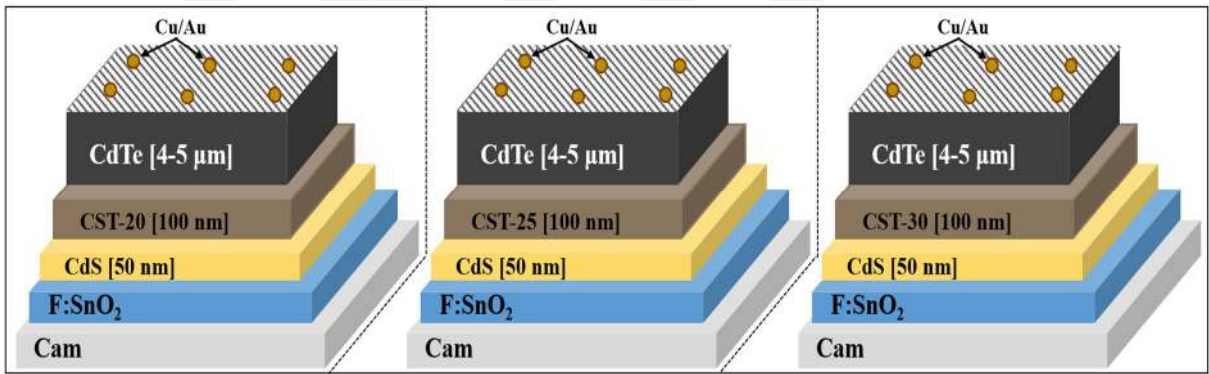
$\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x/\text{CdTe}$ soğurma katmanı yapısında, $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ara-tabakası olarak CST-20, CST-25 ve CST-30 örnekleri kullanıldı. Bu ara katmanlara sahip güneş hücreleri, $\text{F}:\text{SnO}_2$ ($\sim 15 \Omega/\text{sq}$) kaplı cam altlıklar üzerinde üretildi. $\text{F}:\text{SnO}_2$ üzerine CBD yöntemiyle CdS ve termal buharlaştırma yöntemiyle $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ ince filmleri büyütüldü. Hücre yapısında CdS'nin kalınlığı ~ 50 nm ve $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ alaşımlarının kalınlığı ~ 100 nm olarak ayarlandı.

Cam/ $\text{F}:\text{SnO}_2$ /CdS/ $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ katmanlı-yapısının üzerine CSS yöntemi ile CdTe (4,5-5 μm) tabakaları kaplandı. Daha sonra, CdTe'nin üzerine standart bir aşama olarak CdCl_2 işlemi uygulandı ve tüm yapıya hava ortamında 400°C 'de farklı sürelerde (30-60 dk. arası) ısıtım işlemi uygulandı. Analiz sonuçlarına göre, optimum tavlama süresi 60 dakika olarak tespit edildi. Bu tavlama işleminden sonra, CdTe yüzeyindeki kirlilikleri gidermek ve yüzeyde Te-zengini bir bölge oluşturmak için seyreltik (% 0,3) Br_2 +metanol çözeltisinde dağlama işlemi uygulandı. Son olarak $0,049 \text{ cm}^2$ kontak alanına sahip Cu(3 nm)/Au(30 nm) metal kontakları, elektron demeti buharlaştırma yöntemi ile kaplandı. Ardından kontak yapısındaki Cu'nun difüzyonunu arttırmak için hücre azot ortamında 200°C 'de 30 dakika boyunca tavlandı. Hücrelerin üretiminde takip edilen deneysel aşamalar, Şekil 33'de şematik olarak gösterilmektedir. Son durumda elde edilen güneş hücreleri ise Şekil 34'de şematik olarak gösterilmektedir.

Üretilen güneş hücrelerinin J-V ölçümleri, AM1.5 koşullarında OPT-7000 Solar Simulator ile alındı. EQE ölçümleri ise 330-930 nm dalga boyu aralığında OptoSense Kuantum Verimlilik ölçüm sistemi ile gerçekleştirildi.



Şekil 33. CST-20, CST-25, CST-30 ara-katmanlarına sahip güneş hücrelerinin üretim sürecinde izlenen deneysel aşamalar



Şekil 34. a) CST-20, b) CST-25, c) CST-30 ara-katmanlarına sahip güneş hücresi yapıları

2.4. İnce Filmlerin Üretimi

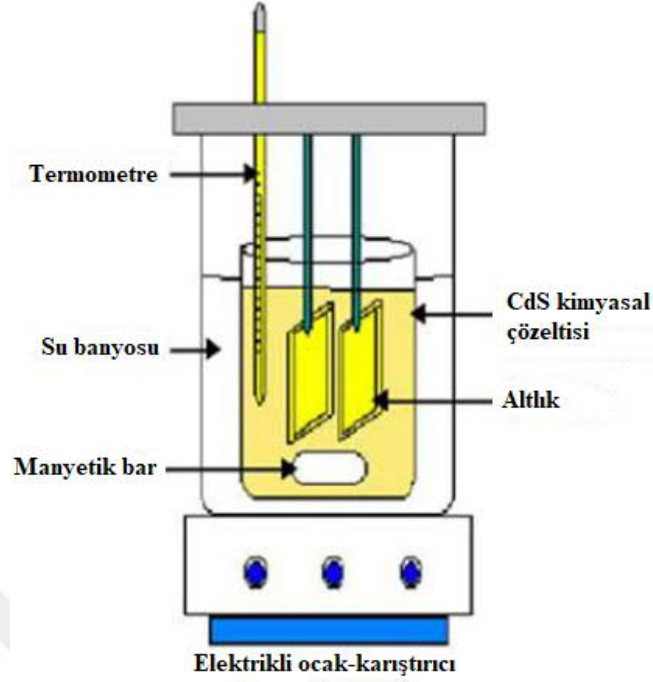
2.4.1. Kimyasal Banyoda Biriktirme Yöntemiyle CdS İnce Filmlerinin Üretilmesi

CdS ince filmleri, CBD (Moutinho vd., 2003), elektrodepolama (Salim vd., 2016), termal buharlaştırma (Khrypunov vd., 2006), CSS (Moutinho vd., 2003; Wu vd., 2001) ve saçırma (Romeo vd., 2010) gibi birçok yöntemle üretilmektedir. Ancak CdTe hücre yapıları için uygun, stokiometrik, yüksek kalitede CdS filmleri genellikle CBD yöntemi ile üretilmektedir (Wu vd., 2001).

Çözelti tabanlı yöntemlerden biri olan CBD yöntemi, basit ve düşük maliyetli üretim, geniş alanlarda biriktirme, tekrarlanabilir ve kontrollü üretim süreci ile diğer yöntemlere göre daha avantajlıdır. Bu yöntem ile düşük özdirençli, homojen, düzgün ve yüksek adezyonlu ince filmler üretilmektedir. Ayrıca CBD yönteminde, film kalınlığı, depolama hızı, çözelti pH değeri, sıcaklık ve çözelti konsantrasyonu gibi ince film büyüme parametreleri de kolaylıkla kontrol edilebilmektedir (Kathalingam vd., 2010).

CdS film büyümesi, alkali bir çözeltide Cd^{+2} ve S^{-2} iyonları arasındaki reaksiyonla meydana gelmektedir. Çözeltide, ana reaktant olarak genellikle thiourea (N_2H_4CS) ve kadmiyum tuzu kullanılmaktadır. Metal hidroksitlerin çökmesini önlemek ve çözeltide bir kadmiyum kompleksi türü oluşturmak için Cd tuzuna bir kompleks oluşturu (ligand) eklenmektedir (Dona ve Herrero, 1997; Kim vd., 2018).

CdS ince filmlerini büyütmek için kullanılan CBD sistemi, Şekil 35’de gösterilmektedir. CBD ile CdS ince filmlerini büyütmek ilk olarak Cd ve S-öncül (prekürsör) çözeltileri hazırlandı. Bu aşamada Cd-öncül çözeltisi 0,015 M $3CdSO_4 \cdot 8H_2O$ (0,38 gr) tuzunun 100 ml saf suda çözünmesiyle ve S-öncül çözeltisi 1,5 M N_2H_4CS (11,42 gr) tuzunun 100 ml saf suda çözünmesiyle hazırlandı. Daha sonra, $85^\circ C$ ’ye ayarlanan kimyasal banyoya reaksiyon kabı daldırıldı. CdS çözeltisinin hazırlanması için, ilk olarak 8,8 ml $CdSO_4$ çözeltisi ve 64 ml saf su reaksiyon kabına alınarak karıştırılmaya başlandı. Çözeltinin sıcaklığı $40^\circ C$ ’ye ulaştığında, 11 ml amonyum hidroksit (NH_4OH) ilave edildi. Amonyum hidroksit eklendikten hemen sonra, 12 ml thiourea çözeltisi yavaş yavaş çözeltiye eklendi. Çözelti hazırlandıktan sonra, altlık tutucu reaksiyon kabına daldırıldı ve biriktirme süresi başlatıldı. 10 dk. biriktirme süresi için 50 nm ve 15 dk. biriktirme süresi için 100 nm CdS filmleri elde edildi. Büyütülen CdS ince filmleri, çözeltiden çıkarıldıktan sonra, saf su ile yıkandı ve ardından kurutuldu. Son olarak büyüme esnasında altlıkların iki tarafı da kaplandığı için, altlıkların arka yüzeyi seyreltik hidroklorik asit (HCl) ile temizlendi.



Şekil 35. Kimyasal banyoda büyütme sisteminin şematik gösterimi (Djelloul vd., 2016).

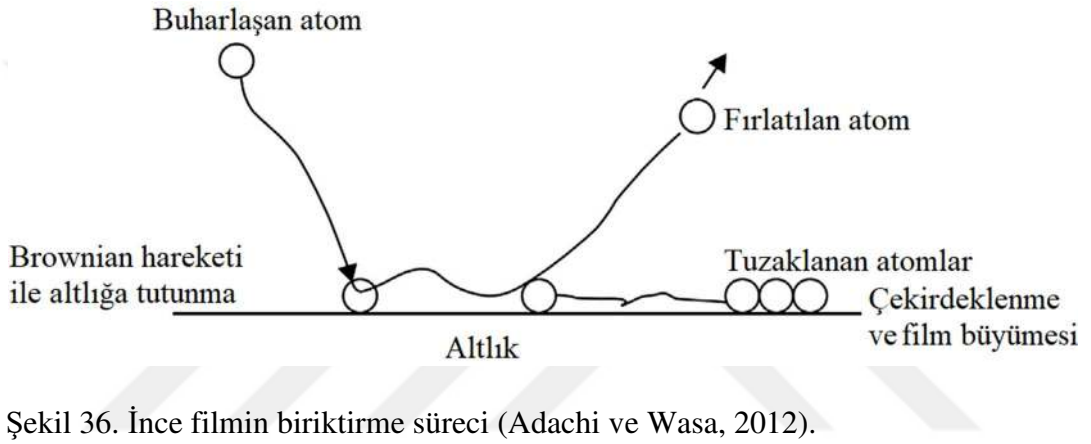
2.4.2. CdSe ve CdTe Filmlerinin Termal Buharlaştırma Yöntemi ile Üretilmesi

CdSe ve CdTe ince filmleri, elektrodepolama (Diso vd., 2016; Gudage vd., 2009), termal buharlaştırma (Chander ve Dhaka, 2018; Patel vd., 2009), CSS (Ferekides vd., 2000; Gnatenko vd., 2014), saçtırma (Kulkarni vd., 2017; Li vd., 2018), kimyasal buhar biriktirme (CVD) (Kevin vd., 2015; Yi vd., 1988), elektron demeti buharlaştırma (Patel vd., 2019; Punitha vd., 2014) gibi birçok yöntemle üretilmektedir. Bunların arasında termal buharlaştırma yöntemi basit, düşük maliyetli, geniş alanlarda biriktirme, tekrarlanabilir ve kontrollü üretim süreci ön plana çıkmaktadır. Ayrıca termal buharlaştırma yöntemiyle homojen, pürüzsüz, yüksek saflık ve kalitede filmler elde edilebilmektedir. Bu yöntem özellikle düşük erime sıcaklığına sahip malzemeler için uygundur (URL-14, 2020). Cd(S,Se,Te), Zn(Se,Te) vs. gibi yarıiletkenler, Al, Au, Cu gibi birçok metal bu yöntem kullanılarak ince film formunda büyütülebilmektedir.

Termal buharlaştırma yöntemi, film büyüme sürecinin atomik olarak gerçekleştiği, atomların bir kaynaktan altlığa kontrollü olarak transfer edildiği bir süreçtir (URL-15, 2021). Bu yöntemde malzeme katı fazdan buhar fazına ve daha sonra tekrar katı faza geçerek kaplanacak yüzeyde kademeli olarak bir film oluşumu gerçekleşmektedir (URL-14, 2020).

Bir ince filmin normal büyüme süreci, Şekil 36'da verilmektedir. Normal bir büyüme sürecinin bazı özellikleri,

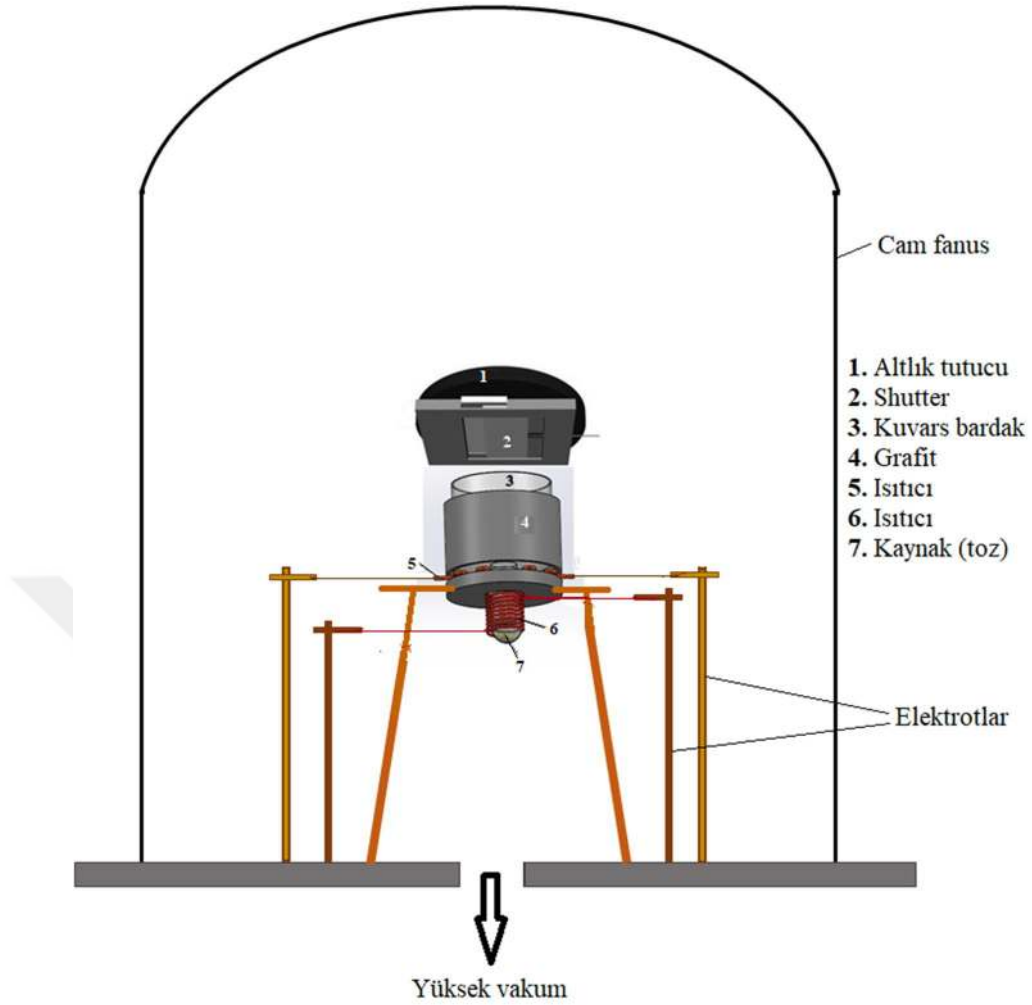
- i. Buharlaştan atomlar, altlık yüzeyine rasgele tutunmaya başlar. Bunu çekirdeklenme ve büyüme aşamaları izler.
- ii. Bunların her ikisi de, sıcaklık, altlık yüzeyinin kimyası ve büyüme hızı gibi farklı biriktirme koşullarına bağlıdır.
- iii. Çekirdeklenme aşaması, dış eylemlerle (elektronların veya iyonların bombardımanı) değiştirilebilir (Bashir vd., 2020).



Şekil 36. İnce filmin biriktirme süreci (Adachi ve Wasa, 2012).

Bu tez çalışmasında kullanılan termal buharlaştırma sistemi, Şekil 37'de şematik olarak gösterilmektedir. Buharlaştırma işlemi, yüksek saflıktaki CdSe (% 99,99) ve CdTe (% 99,98) tozları kullanılarak 2×10^{-3} Pa'lık bir taban basıncında gerçekleştirildi. Film büyütme için kullanılan kuvazi kapalı buharlaşma (quasi closed in volume) düzeneği, grafit kaplı kuvars bardak ve difüzör görevi gören bir kuvars filtreden oluşmaktadır. Altlıklar, kuvars filtrenin 8 cm yukarısına yerleştirilen bir altlık tutucuya monte edildi. Kaynak ve altlık sıcaklıkları termočiftler kullanılarak ayrı ayrı kontrol edildi (Bacaksız vd., 2007). Altlık sıcaklığı, CdSe için 200°C (Yang vd., 2016b) ve CdTe için 250°C (Kumarasinghe vd., 2017) olarak ayarlandı. Büyüme hızı, hem CdSe hem de CdTe filmleri için yaklaşık 1,2 nm/s olarak belirlendi.

CdSe filmleri, CdS/CdSe iki-tabakalı yapının kullanıldığı örneklerde 50 nm ve kontrol örneklerinde 100 nm olarak büyütüldü. Sadece tabakalar-arası difüzyon sürecinin incelendiği örneklerde, termal buharlaştırma yöntemiyle üretilen CdTe ince filmlerinin kalınlığı, 150 nm olarak ayarlandı.



Şekil 37. CdSe ve CdTe ince filmlerini büyütmek için kullanılan termal buharlaştırma sisteminin şematik gösterimi

2.4.3. Kapalı Hacimde Süblimleşme Yöntemiyle CdTe Katmanlarının Üretimi

CdTe tabakalarının üretim yöntemi, malzemenin özelliklerini ve hücre performansını önemli derecede etkilemektedir. CdTe, CSS (Amin ve Rahman, 2017; Aramoto vd., 1997; Nagayoshi ve Suzuki, 2004; Potamialis vd., 2016), buhar taşıma ile biriktirme (VTD) (Hanket vd., 2006; Kestner vd., 2004), elektrodepolama (ED) (Basol, 1988; Diso vd., 2016), termal buharlaştırma (S. Chander ve Dhaka, 2016; Khairnar vd., 2003), metal-organik kimyasal buhar biriktirme (MOCVD) (Chou vd., 1996; Rohatgi vd., 1991), saçtırma (Gupta ve Compaan, 2004; Paudel vd., 2012), moleküler demet epitaksi (MBE) (Farrow vd., 1981; Ringel vd., 1991) gibi farklı yöntemler kullanılarak üretilmektedir. Ancak yüksek verimli CdTe güneş hücreleri, CSS yöntemi kullanılarak elde edildi (Amin ve Rahman,

2017). CSS yöntemiyle 800°C'nin altında buharlaşan yarıiletken malzemeler, hem vakumda hem de atmosfer basıncında kaplanabilmektedir (C. S. Ferekides vd., 2000; McCandless ve Dobson, 2004; N. Romeo vd., 2010). CSS yöntemiyle, özellikle CdTe gibi II^B-VI^A grubu yarıiletken ince filmler, geniş yüzey alanları üzerine yüksek biriktirme hızıyla kaplanmaktadır. Bundan dolayı CSS yöntemi, CdTe filmlerinin biriktirilmesi için cazip bir yöntem olarak yoğun bir şekilde kullanılmaktadır (Britt ve Ferekides, 1993; CS Ferekides vd., 1993). Genellikle CSS yöntemi ile ince filmlerin kaplanma süreci;

- Kaynak yüzeyinde süblimleşme işlemi (Süblimleşme, katı ve gaz hali arasındaki doğrudan faz geçişi)
- Kaynaktan altlık yüzeyine gaz formunda taşınma işlemi
- Altlığın yüzeyinde süblimleşme işlemi

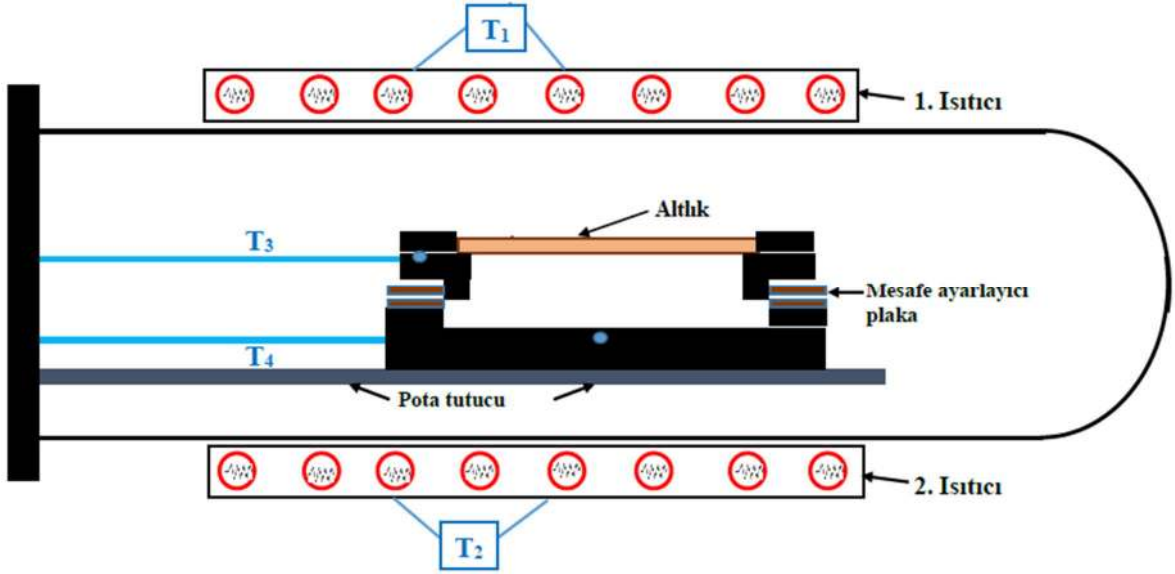
aşamaları ile gerçekleşir. CSS yöntemi ile CdTe'nin büyütülmesi, yüksek sıcaklıklarda CdTe'nin tersinir ayrışması (reversible dissociation) ilkesine dayanmaktadır. Buna göre,



reaksiyonu ile süblimleşme işlemi gerçekleşmektedir. Bu reaksiyonda parantez içindeki 's' katı fazı ve 'g' ise gaz fazını göstermektedir (De Lary vd., 1983).

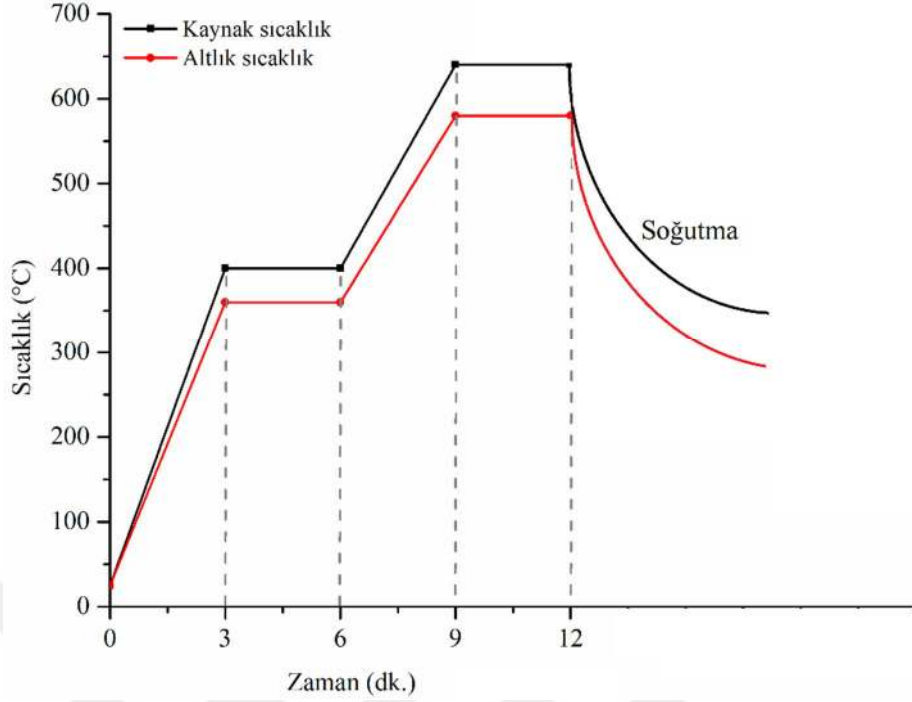
Bu tez çalışmasında kullanılan CSS sistemi, Şekil 38'de şematik olarak gösterilmektedir. Sistemde altlık tutucu ve kaynak (toz) arası, küçük bir mesafe olacak şekilde ayarlanır. Ayrıca kontrollü bir ortam sağlamak için gaz giriş ve çıkış vanalarına sahip bir kuvars tüp düzeneği kullanılır. Sistemde istenilen sıcaklıklar, halojen lambalar kullanılarak ayarlanır. Kaynak ve altlık tutuculara yerleştirilen termočiftler ile sıcaklık değerleri kontrol edilir.

CSS yöntemiyle yüksek kalitede ince filmleri üretmek için ortam basıncı, kaynak ve altlık sıcaklıkları, kaynak ile altlık arasındaki mesafe gibi parametrelerin optimum değerleri taşınması gerekir. Buharlaştırılan malzemelerin süblimleşme sıcaklığına bağlı olarak ayarlanan kaynak ile altlık sıcaklıkları, CdTe için sırasıyla 640°C ve 580°C olarak ayarlandı. Bu optimizasyon sonucunda ortamın Ar basıncı, oda sıcaklığında 2 Torr'a ayarlandı. Film kalınlıklarının ve büyüme hızının kaynak ile altlık arasındaki mesafe ile kontrol edilebildiği sistemde, altlık-kaynak arası 2 mm olarak kalibre edildi. CdTe filmlerinin büyüme hızı ise yaklaşık 25 nm/s olarak belirlendi.



Şekil 38. CSS sisteminin şematik gösterimi

CSS yöntemi ile yüksek film kalitesine ve istenilen film kalınlığına ulaşmak için en önemli hususlardan biri de sıcaklık profilinin belirlenmesidir (Amin ve Rahman, 2017). Optimizasyon sonucunda filmleri büyütmek için uygulanan sıcaklık profili, Şekil 39’da gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, CdTe’yi büyütmek için ilk olarak 3 dakikada 400°C 'de kaynak sıcaklığına ulaşıldı. Bu sıcaklıkta 3 dakikalık bir bekleme süresinden sonra, 3 dakikada sıcaklık 640°C'ye çıkarıldı ve biriktirme işlemi başlatıldı. Bu aşamada 4-5 μm kalınlığındaki CdTe tabakaları, yaklaşık 3 dakikalık bir biriktirme süresinde elde edildi.



Şekil 39. CSS yöntemiyle CdTe büyütme için kullanılan sıcaklık profili

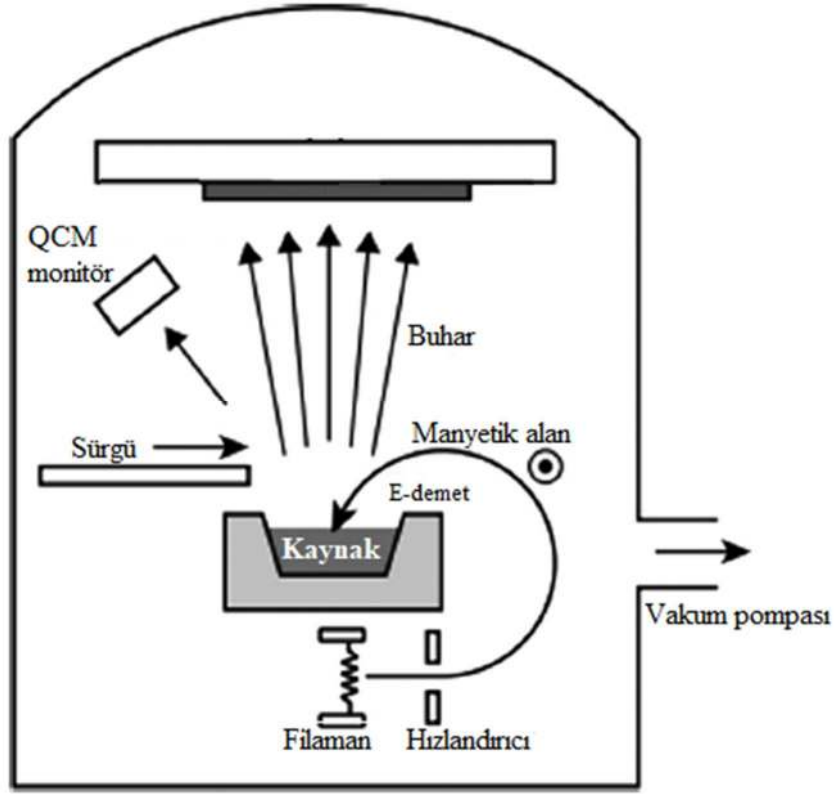
2.4.4. Elektron-Demeti Buharlaştırma Yöntemiyle Cu/Au Kontakların Üretilmesi

Yüksek sıcaklıklarda buharlaşan malzemelerin büyütülmesinde yoğun olarak kullanılan elektron demeti buharlaştırma (EBD) yöntemi ile yüksek saflıkta, homojen ve kaliteli ince fimler üretilmektedir. EBD sistemi, yüksek vakumda anottaki kaynak malzemenin bir tungsten filament tarafından salınan elektron demetiyle bombardımana tutulmasına dayanan bir üretim yöntemidir (Z. Wang ve Zhang, 2016).

Sistemde, ilk olarak bir tungsten filamentten akım geçirilmesi sonucunda elektronun termoiyonik yayımı gerçekleşir. Serbest bırakılan bu elektronların kaynak malzemenin bulunduğu potaya doğru yönelmesi için filament ve ocak arasına manyetik alan uygulanır. Güçlü manyetik alan, elektronları bir demete odaklayarak elektron demetinin enerjisinin kaynak malzemeye aktarılmasını sağlar. Bu enerji aktarımı, kaynak atomlarının buharlaşmasına ve altlık yüzeyi üzerinde birikmesine neden olur (Bashir vd., 2020; URL-14, 2021; URL-15, 2021; Z. Wang ve Zhang, 2016).

Bu tez çalışması kapsamında kullanılan EBD sistemi, şematik olarak Şekil 40'da gösterilmektedir. EBD sistemi kullanılarak, kontak haricinde geri kalan bütün tabakaların tamamlandığı hücre yapıları üzerinde, ilk olarak 3 nm kalınlığında Cu ince filmleri kaplandı.

Daha sonraki aşamada Au tabakası (30 nm) kaplanarak Cu/Au kontak dizilimi oluşturuldu. Katmanların buharlaşma sürecinde, vakum değeri 2×10^{-6} Torr olarak kaydedildi. Bütün katmanlar oda sıcaklığında buharlaştırıldı. Cu ve Au katmanı, 4-5 Å/s arasında değişen birikrime hızı ile büyütüldü.



Şekil 40. Elektron demeti buharlaştırma sisteminin şematik gösterimi (Zhang ve Hoshino, 2018).

2.5. İnce Filmlere İşlem Uygulanması

2.5.1. CdCl₂ Aktivasyon İşlemi ve Tavlama

CdCl₂ işlemi, metanolde doymuş bir stok çözelti kullanılarak gerçekleştirildi. İlk olarak, stok çözelti hacimsel olarak 1:8 oranında seyreltildi. Daha sonra, bir damlalık vasıtasıyla cm² başına yaklaşık 50 µl hacminde olacak şekilde film yüzeylerine uygulandı. CdCl₂ işlemi uygulandıktan sonra, örnekler yaklaşık hava ortamında 60°C sıcaklıkta 1 dk. boyunca kurutuldu.

Isıl işlemin uygulanması için örnekler grafit bir potaya yüklendi. Daha sonra hızlı tavlama fırını (RTP) kullanılarak örnekler ısıtılarak işlem uygulandı. RTP ile ısıtma işlemi uygulanması, birçok faydalı sonuç doğurmaktadır. Çünkü RTP çok yüksek artış hızları, yüksek sıcaklıkta kısa işlem süreleri, efektif maliyet, termal kaynaklar üzerinde hassas kontrol ve farklı tavlama atmosferi seçenekleri gibi özellikleriyle oldukça elverişli bir yöntemdir (Chakrabarti vd., 1999). Ayrıca tavlama işlemi sırasında stokiometrik sapmaların ve faz ayrışmalarının önlenmesi, oldukça önemli bir problemdir. Bu kayıp mekanizmalarının önlenmesi açısından da RTP'nin kullanılması daha avantajlıdır. Çünkü işlem süreleri, geleneksel termal fırınlardan (CTP) çok daha kısadır. Bu nedenle kinetik olarak teşvik edilen tane büyüme işlemlerinin termodinamik olarak teşvik edilen ayrışma reaksiyonlarından daha hızlı ilerlemesine izin verir (Fairbrother vd., 2014).

2.5.2. Dağlama İşlemi

Cu/Au geri kontakları buharlaştırılmadan önce CdTe'nin arka yüzeyinde kirlilikleri ortadan kaldırmak ve Te-zengini bir bölge oluşturmak için, dağlama işlemi gerçekleştirildi (McCandless ve Birkmire, 1991; Moutinho vd., 2006). Bu işlem, 20 ml metanol ve 0,06 ml brom ile hazırlanan bir Br+metanol çözeltisi kullanılarak gerçekleştirildi. Dağlama işlemi için örnekler ilk olarak saf suda yıkandı. Daha sonra örnekler 6 saniye boyunca Br+metanol çözeltisinde tutuldu. Ardından örnekler çözeltiden çıkarıldı ve saf suda tekrar yıkandı. Bu işlemten sonra örnekler, son olarak yüksek saflıktaki azot gazı ile kurutuldu.

2.6. Karakterizasyon Teknikleri

2.6.1. X-Işınlari Kırınımı

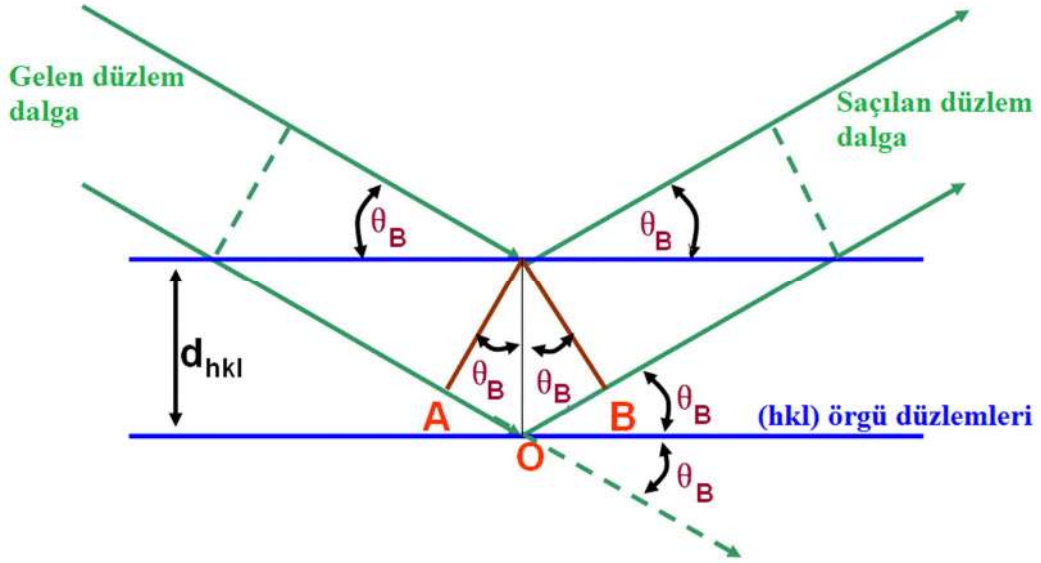
X-ışınları kırınımı (XRD), malzemelerin kristal doğası hakkında kantitatif bilgi sağlayan güçlü, tahribatsız bir analiz tekniğidir. XRD analizi ile kristal malzemelerin faz dağılımı, tercihli yönelimi, ortalama kristal boyutu, gerinim ve dislokasyon yoğunluğu gibi birçok yapısal parametresi hakkında bilgi sağlamaktadır.

XRD analizi, atomlardan oluşan periyodik bir örgüde, belirli açılarda koherent saçılan monokromatik X-ışınları demetinin yapıcı girişimine dayanmaktadır (Speakman, 2011).

Burada, örgü düzlemlerindeki atomlardan saçılan dalgalar arasındaki faz farkı, 2π 'nin katı olduğunda koherent saçılma meydana gelir. Geometrik olarak, saçılan dalgaların yol uzunluğu farkı, dalga boylarının tam katı olduğunda bu saçılma gerçekleşir (Le Pevelen, 2017). XRD analizinin çalışma prensibi, Bragg yasasına dayanmaktadır (Denk. 33). Bragg yasası, geometrik olarak Şekil 41'de gösterilmektedir. Bu yasaya göre belirli bir $\langle hkl \rangle$ yönüne ait d_{hkl} - düzlemler arası mesafesi için gelen ve kırınımlı demetler arasındaki açısal bağıntı, dalga boyunun tam katı olduğu zaman kırınımlı dalga cephesinde bir maksimum şiddet değeri sağlanır.

$$2d \sin \theta_B = n\lambda \quad (\text{Bragg yasası}) \quad (33)$$

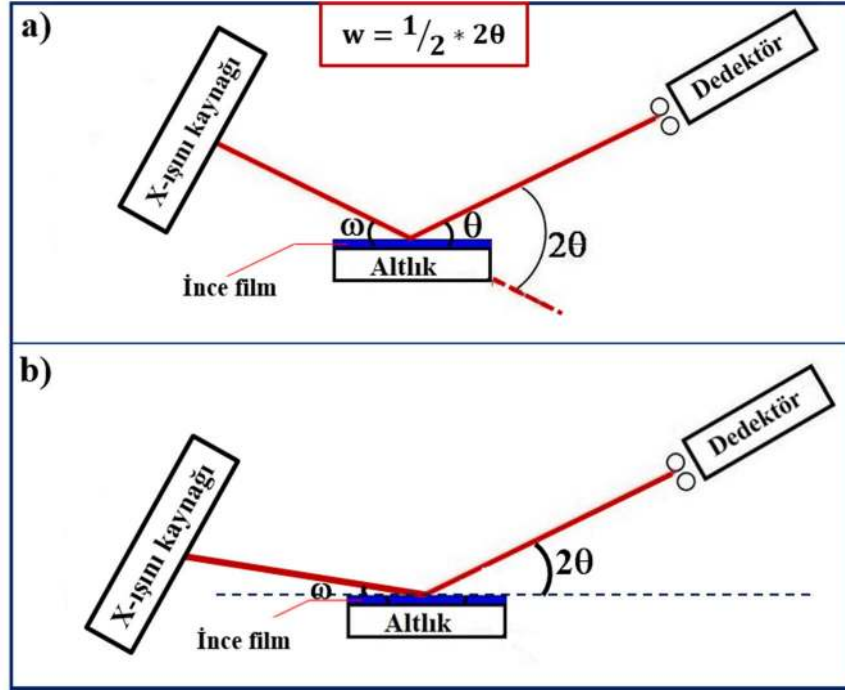
Bu ifadede 'd' düzlemler arası mesafe, ' θ_B ' Bragg kırınım açısı, ' λ ' X-ışını dalga boyu ve 'n' kırınım derecesini gösteren bir tamsayıdır (Cullity, 1956; Durose vd., 2004).



Şekil 41. Bragg yasasının şematik gösterimi

İnce filmlerin XRD analizi, simetrik (Bragg – Brentano geometrisi) ya da asimetrik (Seeman – Bohlin geometrisi) konfigürasyonlar kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir (Şekil 42) (King vd., 1969). Simetrik ($\omega = \theta$) ölçüm düzeneğinde toplanan veri, yalnızca odaklanma dairelerine teğet olan, yani numune yüzeyine veya altlık tutucusuna paralel olan örgü düzlemleri ile sınırlıdır. İnce filmlerin karışım ve düzgün-olmayan gerinim (strain) gibi

özelliklerinin, simetrik tek eksenli XRD ölçümleri ile belirlenmesi zordur. Bu yüzden asimetrik koşul ($w \neq \theta$) ile sabit bir geliş açısı kullanılması, numune düzlemine göre eğimli (tilted) örgü düzlemlerinden de veri toplanmasını sağlar. Gelen XRD demet açısının küçük olduğu asimetrik ölçümler, geliş açısına bağlı X-ışını kırınımı (GI-XRD) olarak adlandırılır. GI-XRD ölçümleri, genliği azalan ve yansıyan dalgaların daha eksiksiz analizi ile çok katmanlı ince film yapılarının kantitatif özelliklerinin belirlenmesine olanak sağlar (Cappuccio ve Terranova, 1996). Farklı geliş açılarında asimetrik GI-XRD ölçümü, yüzey fazlarının bulk fazlarından ayrılmasına ve rezidü gerilmenin dağılımının belirlenmesine olanak tanır (Ma vd., 2002).



Şekil 42. XRD ölçümlerinde a) Bragg-Brentano, b) geliş açısına bağlı XRD (GI-XRD)

Bragg yasası ve kristal yapı denklemleri kullanılarak, malzemelerin örgü parametreleri,

$$d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta_B} \Rightarrow \begin{cases} \frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} & (\text{Kübik yapı için}) \\ \frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \frac{(h^2 + hk + k^2)}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} & (\text{Hekzagonal yapı için}) \end{cases} \quad (34)$$

denklemleri ile hesaplanmaktadır. Burada ‘h, k, l’ Miller indisleri, ‘d’ düzlemler-arası mesafe, ‘a ve c’ örgü parametreleridir. Numunelerin ortalama kristal boyutu, Scherrer formülünden (Denk. 35) hesaplanmaktadır (Scherrer, 1918).

$$D = \frac{K\lambda}{\beta_{hkl} \cos \theta} \quad (\text{Scherrer formülü}) \quad (35)$$

Bu denklemde, ‘K’ Scherrer sabiti (K=0,94), ‘λ’ X-ışını dalga boyu (λ = 1,5406 Å), ‘β_{hkl}’ yarı maksimumda tam genişlik (FWHM) ve ‘θ’ Bragg kırınım açısıdır. Mikro-gerinim değerleri ve dislokasyon yoğunluğu (Lalitha vd., 2004),

$$\varepsilon = \frac{\beta_{hkl} \cos \theta}{4} \quad (36)$$

$$\delta = \frac{1}{D^2} \quad (37)$$

eşitlikleri ile hesaplanmaktadır. Burada ‘ε’ mikro-gerinim karekök ortalama değeri ve ‘δ’ dislokasyon yoğunluğudur.

Bu tez çalışmasında, ince filmlerin ve katmanlı yapıların kristal özelliklerini ve tabakalar-arası difüzyonu incelemek için Bragg Brentano ve GI-XRD geometrilerinde XRD ölçümleri gerçekleştirildi. Ölçümler, bir Cu K_α X-ışını kaynağı (λ = 1.5418 Å) kullanılarak Rigaku Smartlab toz difraktometresi ile gerçekleştirildi. XRD spektrumları, 0,02° açısal adım genişliği ile alındı.

2.6.2. Taramalı Elektron Mikroskobu

Taramalı elektron mikroskobu (SEM), odaklanmış yüksek enerjili elektron demetinin yüzeyi tarayarak malzemenin yüzey görüntülerinin elde edildiği bir elektron mikroskobu türüdür. Elektronlar, numunedeki atomlarla etkileşime girerek numunenin yüzey morfolojisi ve kompozisyonu hakkında bilgi içeren çeşitli sinyaller üretir (Stokes, 2008).

Şekil 43’de, SEM cihazı şematik olarak gösterilmektedir. SEM cihazında elektron tabancası, numuneyi bombardıman eden elektronları temin eder. Daha sonra bu elektronlar,

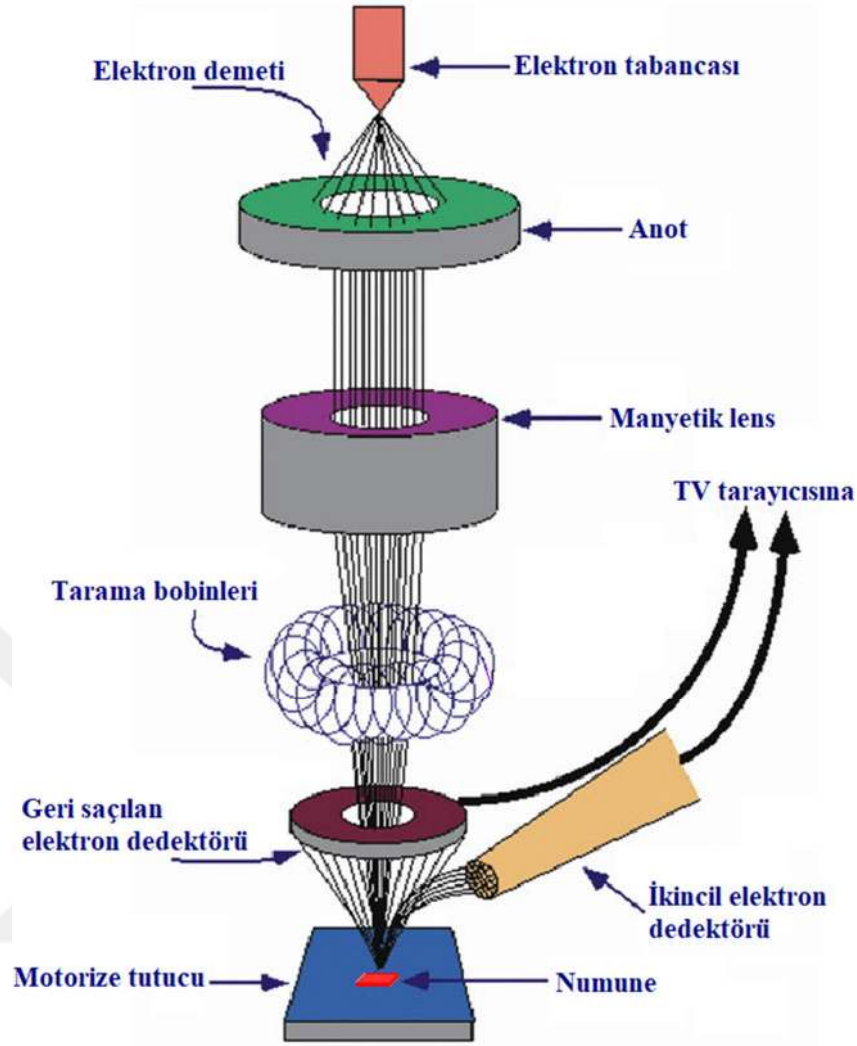
pozitif yüklü anot tarafından hızlandırılır ve çekilirler. Manyetik lens, elektron demetini kaynaktan aşağıya doğru hareket ederken odaklar. Demet ne kadar dar olursa, yüzeyle temas ettiği nokta da o kadar küçük olur. Demet odaklandıktan sonra, X ve Y eksenlerindeki ışını saptırmak için tarama bobinleri kullanılır. Böylece numune boyunca hareket ederek, numune yüzeyini raster (kafes) bir şekilde tarayabilir.

Elektron demeti numunenin yüzeyine çarptığında ve numunenin atomları ile etkileşime girdiğinde, numunenin yüzey morfolojisi, kompozisyonu, kristal yapısı ve yönelimi hakkında bilgi içeren ikincil elektronlar, geri saçılan elektronlar (BSE) ve karakteristik X-ışınları şeklinde sinyaller üretilir. Birincil dedeksiyon modunda yani ikincil elektronların dedeksiyonu ile numunelerin morfolojisi ve topografisi hakkında ayrıntılı bilgi elde edilmektedir. İkincil elektronlar, yörünge elektronları ile olan etkileşimi sonucunda yörüngelerinden fırlatılan veya enerjisi azalan elektronlardır. SEM cihazında, hücresel tarama düzeni ile yüzey taranır ve elektron demetinin konumu ile ikincil elektronların oluşturduğu sinyaller eşleştirilerek görüntü oluşturulur (Atasoy, 2018; Stokes, 2008).

Karakteristik X-ışınları, SEM için en yaygın ikinci görüntüleme modudur. Bu modda karakteristik X-ışınları, enerji dağılımlı X-ışını (EDX) spektroskopisi olarak bilinen bir teknikle numunenin elementel kompozisyonunu tanımlamak için kullanılır.

Geri saçılan elektronlar, ikincil elektronlardan daha yüksek enerjiye sahip olduğundan dolayı, daha derin bir bölge hakkında bilgi edinilebilir. Geri saçılan elektronlar, numunenin kompozisyonuna oldukça duyarlıdır. Numunede bileşen atomların atom sayısı büyüdükçe, geri saçılan elektron sayısı daha da büyür. Geri saçılan elektron görüntüsünde daha ağır atomlardan oluşan görüntü daha parlak görünür. Böylece bu görüntü, çok fazlı numunelerde kompozisyondaki farkları göstermek için oldukça uygundur (JEOL, 2020; Joshi vd., 2008). Çoğu uygulamada veriler, numunenin yüzeyinin seçilen bir alanı üzerinden toplanır ve bu özelliklerdeki uzamsal varyasyonları gösteren 3 boyutlu bir görüntü oluşturulur.

Bu tez çalışması kapsamında örneklerin yüzey görüntüleri, sadece ikincil elektronların dedeksiyonu ile elde edildi. Yüzey görüntüleri, örneklerin tane büyüklüğüne bağlı olarak JEOL JSM 6610 SEM cihazı ve FEI QUANTA FEG 450 FE-SEM cihazı ile alındı. Bu görüntüler, farklı kV değerleri ve farklı büyütme değerlerinde alındı. Ancak tez çalışmasında sadece en uygun SEM fotoğrafları kullanıldı.



Şekil 43. Taramalı elektron mikroskopunun şematik diyagramı (Joshi vd., 2008).

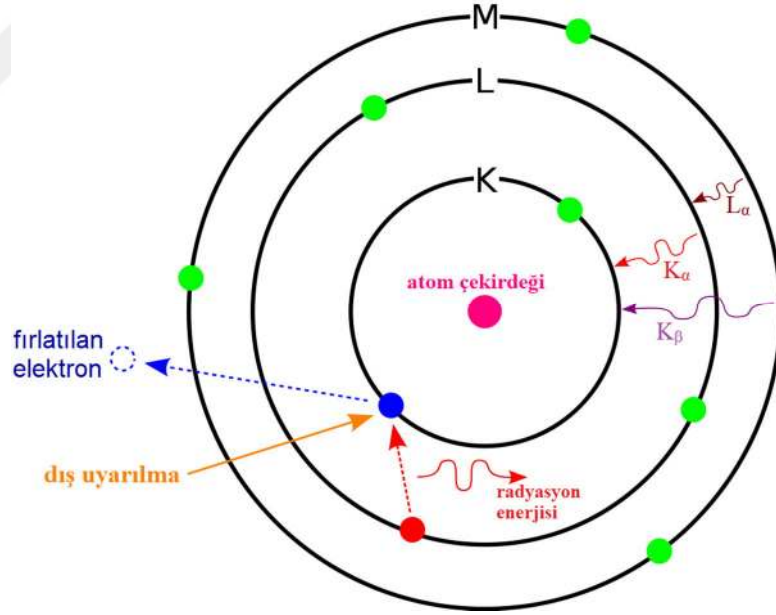
2.6.3. Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi

Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS), bir numunede hangi elementlerin bulunduğunu ve bu elementlerin atomik oranlarını belirlemek için kullanılan bir analiz yöntemidir. EDS eipmanı, SEM cihazı ile bütünleşik olarak kullanılır. Bu yöntem, dışarıdan yüksek enerjili elektron demeti ile uyarılan örneklerin yaydığı X-ışınlarının dedeksiyonuna dayanmaktadır.

Şekil 44’de, EDS'nin çalışma prensibi gösterilmektedir. Şekildeki K, L ve M harfleri, bir atomun farklı enerji seviyelerindeki elektron kabuklarını; α ve β ise geçişin boyutunu göstermektedir. Örneğin L_{α} , M'den L'ye geçişi; K_{β} ise M'den K'ya geçişi göstermektedir

(URL-16, 2021). Elektron tabancasından gönderilen yüksek enerjili elektronlar, malzemenin düşük enerji seviyelerinde bulunan iç kabuktaki elektronlar ile etkileşime girer. Etkileşim sonucunda bağlanma enerjisi uyarılma enerjisinden daha az olan iç kabuktaki elektronlar dışarıya fırlatılır ve bu olay sonucunda elektronun bulunduğu yerde bir boşluk oluşur. Daha sonra, yüksek enerjili bir kabuktan gelen bir elektron, fırlatılan elektrondan dolayı oluşan bu boşluğu doldurur. Bu olayın gerçekleşmesi sırasında enerji korunumundan dolayı yüksek enerjili kabuk ile düşük enerjili kabuk arasındaki enerji farkına eşit enerjide olan bir X-ışını yayınlanır. Bu süreçte yayınlanan X-ışınlarının enerjisi, her bir element için karakteristik özelliğindedir. Bu karakteristik özellikten dolayı, örnekten yayılan X ışınlarının sayısı ve enerjisinin enerji dağılımlı bir spektrometre ile ölçülmesiyle numunenin temel atomik kompozisyonu hakkında bilgi edinilmektedir (Goldstein vd., 2017).

Bu tez çalışması kapsamında örneklerin atomik oranları, SEM cihazına bağlı olan Oxford Instruments EDS ekipmanı ile belirlendi. Bu atomik oranlar, farklı kV değerlerinde yüzey üzerinde farklı noktalardan toplanan verilerin ortalamasının alınmasıyla belirlendi.

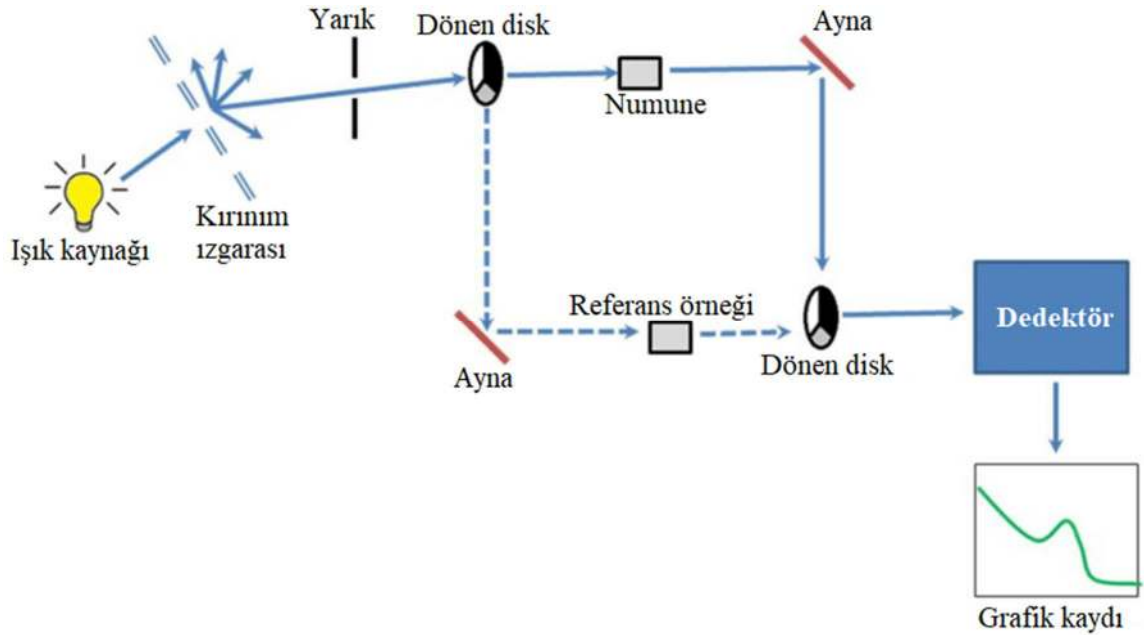


Şekil 44. EDS cihazının çalışma prensibi (URL-16, 2021).

2.6.4. Optik Ölçümler İçin Ultraviyole-Görünür Spektroskopisi

Ultraviyole-Görünür (UV-Vis) spektroskopisi, elektromanyetik spektrumun ultraviyole ve görünür bölgesinden yararlanarak malzemenin optik özelliklerini belirlemeye yarayan bir spektroskopi tekniğidir. Şekil 45’de UV-Vis spektrofotometresi, şematik olarak gösterilmektedir. UV-Vis spektrofotometreler ışık kaynağı, referans ve numune demetleri, monokromatör ve dedektörden oluşur. Spektrofotometrede, ışık kaynağından (bir ksenon lambası gibi) çıkan fotonlar numuneye ulaşmadan önce iki ayrı demete bölünür. Birinci demet numuneden geçerken, ikincisi ise referans olarak kullanılır. Spektrofotometrede bulunan referans demeti, örnekle etkileşime girmeden dedektöre gider. Değişen dalga boyuna sahip numune demeti, örnekle etkileşime girdikten sonra dedektöre girer. Referans ve numune demetlerinden sağlanan verilerin nicel olarak karşılaştırılmasıyla örneğin optik özellikleri belirlenir (De Caro ve Haller, 2015; Joshi vd., 2008).

Optik geçirgenlik ölçümünde, belirli bir dalga boyu aralığında, numune üzerine gelen ışığın ne kadarının numuneden geçtiği belirlenir (Solé vd., 2005). Üst-tabaka konfigürasyonunda üretilen bir güneş hücresi için, bu geometri oldukça elverişlidir. Çünkü üst-tabaka yapısında ışık, camdan geçtikten sonra ince filmlere ulaşır. Bu geometri ile camın ve filmin farklı kırılma indislerinden kaynaklanan değişikliklerde hesaba katılmaktadır.



Şekil 45. UV-Vis sisteminin şematik diyagramı (Mohanta, 2017).

Lambert-Beer kanunu, ışığın soğurması ve malzemenin özellikleri arasında bir ilişki kurar. Mikroskobik bir dx kalınlığına sahip bulk bir yarıiletken, ışık şiddetinin soğurma katsayısı ile ilişkisi,

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \text{ (Lambert-Beer yasası)} \quad (38)$$

denklemleri ile belirlenir. Bir malzeden ışık geçtiğinde dedektöre ulaşan ışık şiddeti ile gelen ışık şiddeti arasındaki oran, o malzemenin geçirgenliğini verir ve

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (39)$$

olarak ifade edilir. Bu ifadede ' I_0 ' malzeme üzerine gelen ışık şiddeti ve ' I ' malzemedan geçen ışık şiddetidir. Geçirgenlik genellikle yüzdelik olarak verilir ve

$$T (\%) = \frac{I}{I_0} \times 100 \quad (40)$$

ile bulunur (Mehta, 2012). Soğurma katsayısı, bir materyalde belirli bir dalga boyundaki ışığının soğurulmadan önce ne kadar penetrasyon derinliği belirler. Soğurma katsayısı,

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left(\frac{1-R}{T} \right) \quad (41)$$

ifadesiyle bulunabilir. Burada ' α ' soğurma katsayısını (cm^{-1}), ' d ' malzemenin kalınlığını (cm), ' R ' belirli dalga boyundaki malzemedan yansımayı ve ' T ' belirli dalga boyundaki malzemenin geçirgenliğini göstermektedir. Ancak bu ifadede ki yansıma terimi genellikle ihmal edilir ve soğurma katsayısı

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left(\frac{1}{T} \right) \quad (42)$$

ifadesinden bulunur. Soğurma katsayısı, malzemelerin bant aralığı enerjisi ile yakından ilişkilidir ve

$$\alpha(\nu) = \frac{C}{h\nu} (h\nu - E_g)^n \quad (43)$$

denlemi ile malzemelerin bant aralıkları elde edilebilir (Tauc vd., 1966). Bu ifadede ki, 'hν' fotonunun enerjisi, 'E_g' bant aralığı, C sabittir. Bu ifadedeki 'n' geçişin doğasını gösterir ve direkt geçişli yarıiletkenler için n=1/2 ve indirekt geçişli malzemeler için n=2 olarak alınır. Soğurma katsayısı bilinen bir materyalin bant aralığı, (αhν)²-hν grafiğinden bulunabilir. Bu grafikte, soğurma eğrisinin x- eksenini (hν) kestiği nokta, o malzemenin bant aralığını vermektedir.

Bu tez çalışması kapsamında örneklerin optik özellikleri, Dongwoo Optron UV-Vis spektrofotometre kullanılarak belirlendi. Ölçümler, genellikle 10 nm dalga boyu adım aralıkları ile 400-1000 nm aralığında alındı.

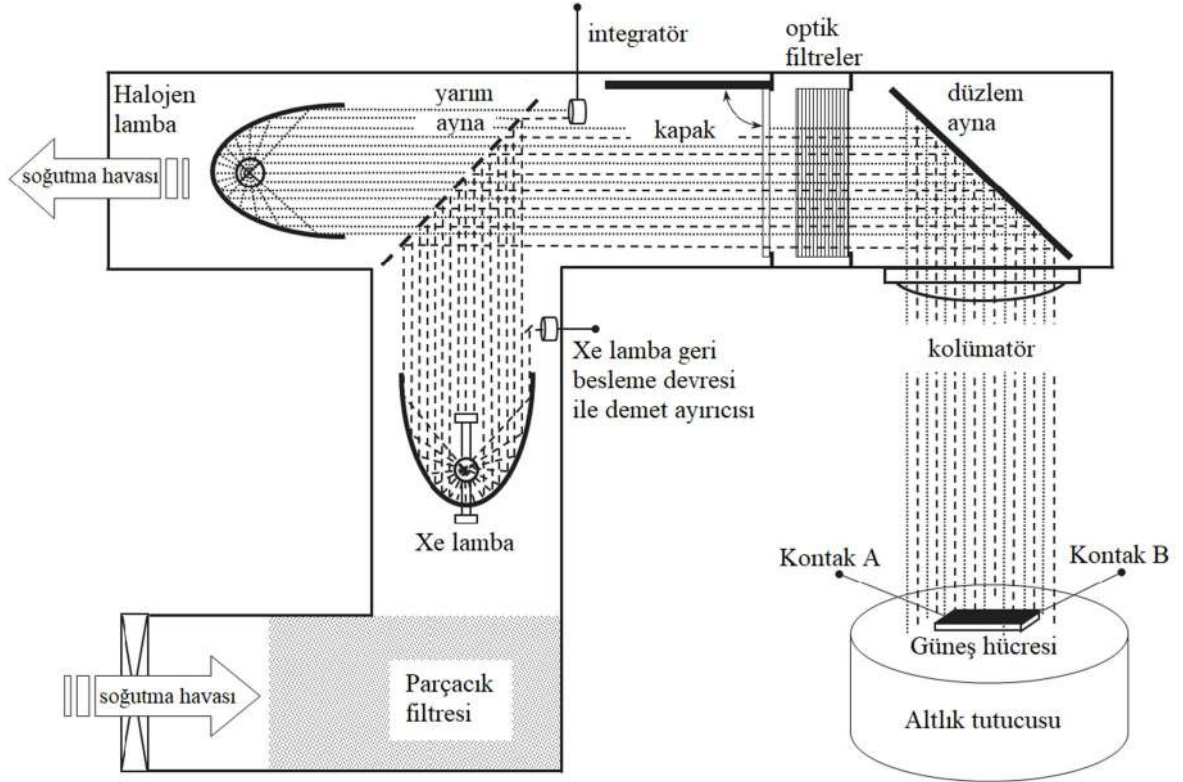
2.6.5. Akım Yoğunluğu – Voltaj Ölçümleri

Bir güneş hücresinin performansını belirleyen J_{sc}, V_{oc}, FF ve η parametreleri, akım yoğunluğu-voltaj (J-V) eğrileri ile belirlenmektedir. J-V eğrileri, AM1.5 güneş spektrumunu yapay olarak yeniden türeten bir güneş simülatörü vasıtasıyla elde edilmektedir.

Bir güneş simülatörünün temel konfigürasyonu, Şekil 46'da gösterilmektedir. Simülatörde AM1.5 güneş spektrumu, uygun ışık kaynakları ve ışığın filtrelenmesi ile türetilmektedir. Bu yüzden genellikle, hem kısa dalga boyu hemde uzun dalga boyu bölgesinde spektrumu elde etmek için, simülatörde halojen lamba (uzun dalga boyu bölgesi için) ve ksenon lamba (kısa dalga boyu bölgesi için) birlikte kullanılmaktadır. Halojen ve ksenon ark lambalarından çıkan ışık, bir yarım aynanın içinden ışığın kolimatöre yansıdığı bir düzlem aynaya geçer. Işık, kolimatörden geçer ve güneş pilini aydınlatır. Güneş simülatöründe, AM1.5 spektrumunda şiddetin azaldığı bölgelerde ışığı soğurmak için ilave filtreler bulunmaktadır. Ayrıca, karanlıkta J-V özelliklerini belirlemek için bir sürgü (shutter) kullanılmaktadır. Ksenon ark lambasının sabit ve yüksek düzeydeki şiddetini korumak ve lamba akımını ayarlamak için ksenon lamba geri besleme devresine sahip bir demet ayırıcıya (splitter) ihtiyaç vardır. İntegratör (toplayıcı), ışınlama süresi hakkında bilgi verir. Güneş hücresi, oda sıcaklığındaki bir altlık tutucusuna sabitlenir ve kaynak-metreye (sourcemeeter) kontaklar bağlanarak, J-V ölçüm düzeneği hazır hale getirilir (Dittrich, 2014).

Güneş simülatöründe akım, giriş voltajının fonksiyonu olarak ölçülür ve bir eğri oluşturulur. En önemli noktalar, sırasıyla J_{sc} ve V_{oc} 'ye karşılık gelen akım yoğunluğu ve voltaj eksenleri ile kesişim noktalarıdır. Ayrıca eğrinin şekli, FF hakkında bilgi verir.

J-V ölçümleri, oda sıcaklığında AM 1.5G spektrumu ile 100 mW/cm^2 ışık şiddetinde ölçüldü. Bu çalışmada 150W Xenon ark lambalı bir OptoSense (OPT-7000) güneş simülatörü kullanıldı.



Şekil 46. Bir güneş simülatörünün şematik gösterimi (Dittrich, 2014).

2.6.6. Dış Kuantum Verimi

Bir güneş pilinin hassasiyeti, güçlü bir şekilde uyarma ışığının dalga boyuna bağlıdır. Bu durum, eşit şiddette ancak farklı dalga boyundaki ışıkta çok farklı foto-akımlar oluşabileceği anlamına gelir. Bu özellik, spektral tepki (SR) olarak tanımlanır. SR, belirli bir dalga boyunda ölçülen foto-akım ile buna karşılık gelen ışık şiddeti arasındaki oran ile belirlenir.

$$SR(\lambda) = \frac{I_{ph}(\lambda)}{P_{ışık}(\lambda)} \quad (44)$$

Foto-akım, birim zaman başına foton ile üretilen yüküdür. Güç ise birim zaman başına enerjidir. Foton ile üretilen yük, toplanan foto-üretim elektron sayısı $N_e(\lambda)$ ile q 'nın çarpımıdır; ışığın enerjisi ise $N_{ph}(\lambda)$ foton sayısı ile E_{ph} sayısının çarpımıdır. Bu nedenle SR denklemi,

$$SR(\lambda) = \frac{q \cdot \lambda}{h \cdot c} \cdot \frac{N_e(\lambda)}{N_{ph}(\lambda)} = SR_{max}(\lambda) \cdot \frac{N_e(\lambda)}{N_{ph}(\lambda)} \quad (45)$$

denklemine dönüştürülebilir. Aygıt tarafından toplanan elektronların sayısının aygıt üzerine gelen foton sayısına oranı, bir güneş pilinin dış kuantum verimliliği (EQE) olarak tanımlanır.

$$EQE(\lambda) = \frac{N_e(\lambda)}{N_{ph}(\lambda)} \quad (46)$$

EQE, güneş pilleri tarafından toplanan yük taşıyıcı sayısı ile gelen foton sayısı arasındaki orandır (Ananda, 2017; Poortmans ve Arkhipov, 2006). EQE eğrileri, güneş pillerindeki optik kayıplar ve toplanma kayıpları hakkında bilgi edinmeye izin verir. Bir güneş pilinin J_{sc} yoğunluğu, EQE spektrumu vasıtasıyla hesaplanabilir. Bunun için, EQE spektrum değerleri ve güneşin foton akı spektrumu ' $\Phi_{güneş}(\lambda)$ ' dalga boyu üzerinden integre edilir.

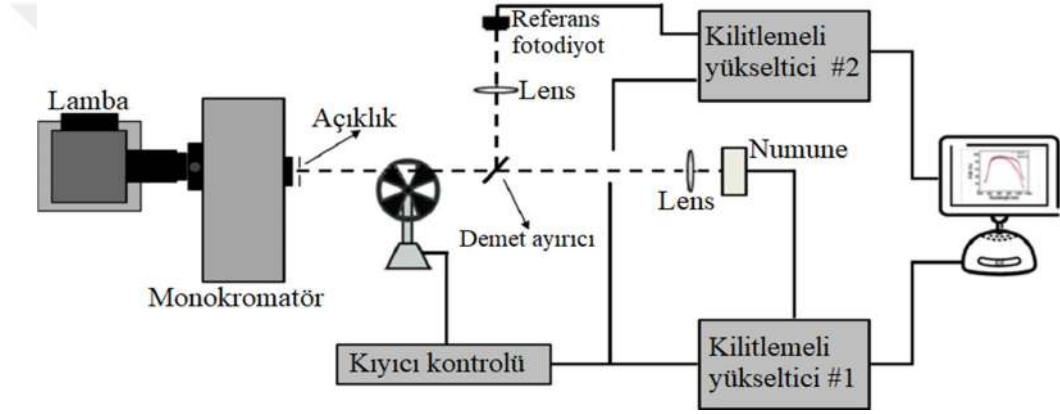
$$EQE(\lambda) = \frac{1}{q} \frac{hc}{\lambda} \frac{J_{sc}(\lambda)}{P(\lambda)} \quad (47)$$

$$J_{sc} = q \int_0^{\infty} EQE(\lambda) \cdot \Phi_{güneş}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (48)$$

Güneş simülatörü ile yapılan ölçümler ile EQE spektrumundan elde edilen J_{sc} değerleri, güneş simülatörü ve QE analizi için referans güneş hücresi iyi kalibre edilmişse eşit olmalıdır. Bu nedenle, EQE ölçümleri, J_{sc} 'nin bağımsız ve doğru bir şekilde belirlenmesine izin verir (Hegedus ve Shafarman, 2004; Hierrezuelo-Cardet vd., 2020). EQE ölçüm düzeneği, şematik olarak Şekil 47'de gösterilmektedir. Bu düzeneğin kilit bileşeni, ızgara

(grating) gibi dispersif (dağıtıcı) bir elemana sahip bir lamba spektrumundan gerekli dalga boylarını filtreleyen monokromatördür. Gelen beyaz ışık, bir optik kısıyıcı ile modüle edilir ve kilitleme amplifikatörü (lock-in amplifier) ile foto-akım ölçülür. Kilitleme amplifikatörü, foto-akımın yalnızca modüle edilmiş ışığın neden olduğu kısmını kaydeder, yani gürültü sinyalleri ve besleme ışığına duyarlılık güçlü bir şekilde bastırılır. Kilit yükselticisindeki sinyal, dalga boyunun fonksiyonu olarak ölçülür (Dittrich, 2014).

Bu tez çalışması kapsamında güneş hücrelerinin EQE ölçümleri, OptoSense Kuantum Verimi Ölçüm Cihazı ile gerçekleştirildi. Ölçümler, 10 nm dalga adım aralılarında 380-920 nm arasında alındı.



Şekil 47. Dış kuantum verimi ölçüm cihazının şematik gösterimi (Hierrezuelo-Cardet vd., 2020).

3. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

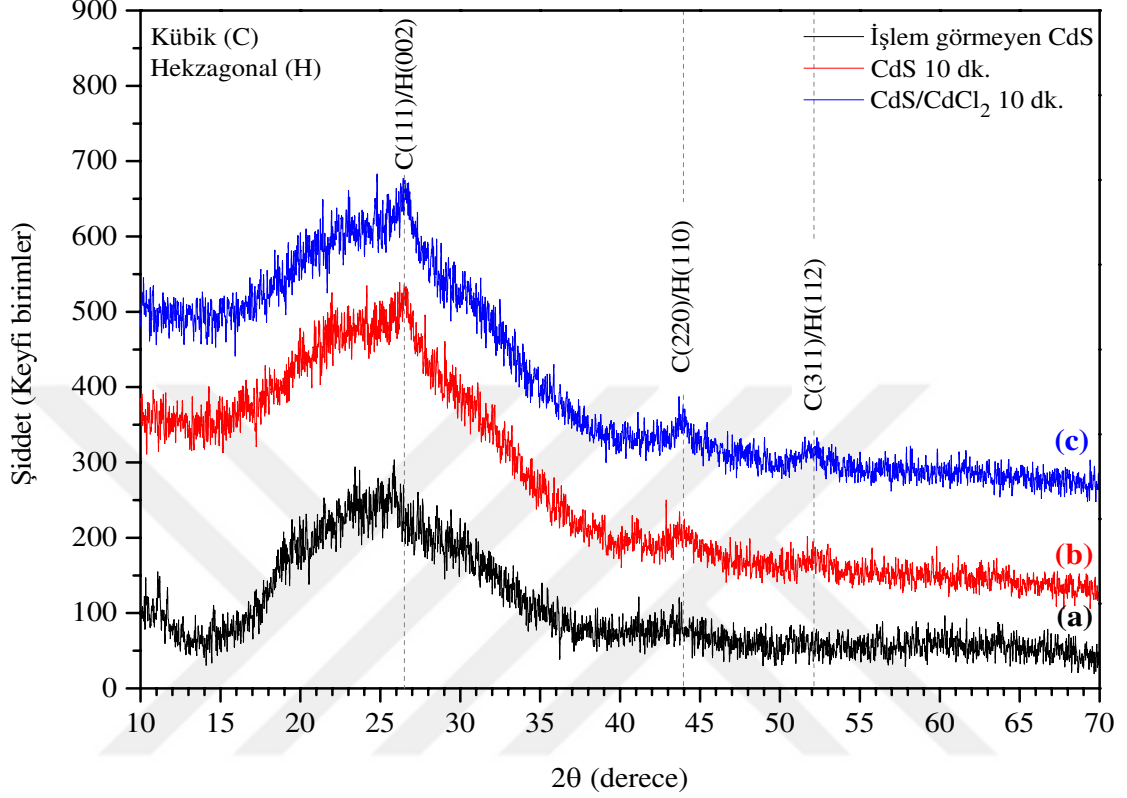
3.1. Se-Katkısının Pencere Katmanları Üzerine Etkisinin İncelenmesi

3.1.1. XRD Spektrumları

CBD yöntemiyle üretilen CdS ince filmlerinin XRD spektrumları, Şekil 48 ile verilmektedir. Kırınım desenleri incelendiğinde, işlem görmeyen (as-deposited) örnekte $2\theta=15^{\circ}$ - 35° arasında çok geniş (broad) bir pikin olduğu görüldü. Bu durum, işlem görmeyen CdS filminin nano-amorf yapıda büyüdüğünü göstermektedir (Azmi vd., 2020; Liu vd., 2010; Yusoff vd., 2015). CdS ince filmine hava ortamında 400°C 'de 10 dakika ısıtıl işlem uyguladıktan sonra, $2\theta=26,5^{\circ}$; $43,9^{\circ}$ ve $52,1^{\circ}$ civarında keskin olmayan piklerin olduğu gözlemlendi. CdS'nin doğada kübik, hekzagonal ya da karışık fazda kristalleştiği rapor edilmektedir. Bu bileşik için hekzagonal yapının kararlı bir faz olduğu, daha düşük sıcaklıklarda oluşabilen kübik yapının ise kararsız bir faz olduğu bilinmektedir (Senthil vd., 2001). Ancak kübik yapı ile hekzagonal yapının bazı pikleri benzer açısız konumdadır. Bu nedenle 10 dk. tavlama CdS ince filminin kristal yapısının kübik kristal yapının karışık fazda olduğu söylenebilir (Metin ve Esen, 2003). CdS filmine CdCl_2 işlemi uygulandıktan sonra, örneğin kristal kalitesinde hafifçe iyileşme olduğu, fakat faz yapısında bir değişiklik olmadığı gözlemlendi. Bu durum CBD yöntemiyle büyütülen CdS filmlerinin, karışık faz yapısından kararlı hekzagonal faz yapısına geçişini sağlamak ve yüksek kalitede kristallenmesi için uygulanan deneysel koşulların yeterli olmadığını göstermektedir. Bir başka ifadeyle, 10 dk. ısıtıl işlem uygulanan CdS filmlerinde, yeniden kristallenme sürecinin başlayarak amorf yapıdan karışık faz yapısına dönüştüğü, ancak yeniden kristallenme sürecinin tamamlanması için 10 dakikalık tavlama süresinin yeterli olmadığı söylenebilir. Literatürde ince filmlerin yeniden-kristallenmesi için yoğun olarak kullanılan CdCl_2 varlığında ısıtıl işlem uygulanması (Bai vd., 2011) dahi, CdS filminin kristallenme sürecinin tamamlanması için yeterli şartların oluşmadığı sonucuna varıldı.

CdS filmlerinin spektrumlarında, genel olarak kırınım şiddetlerinin düşük olduğu ve gaussiyen piklerin olduğu görüldü. Bu durum, güneş pili uygulamalarında CdS

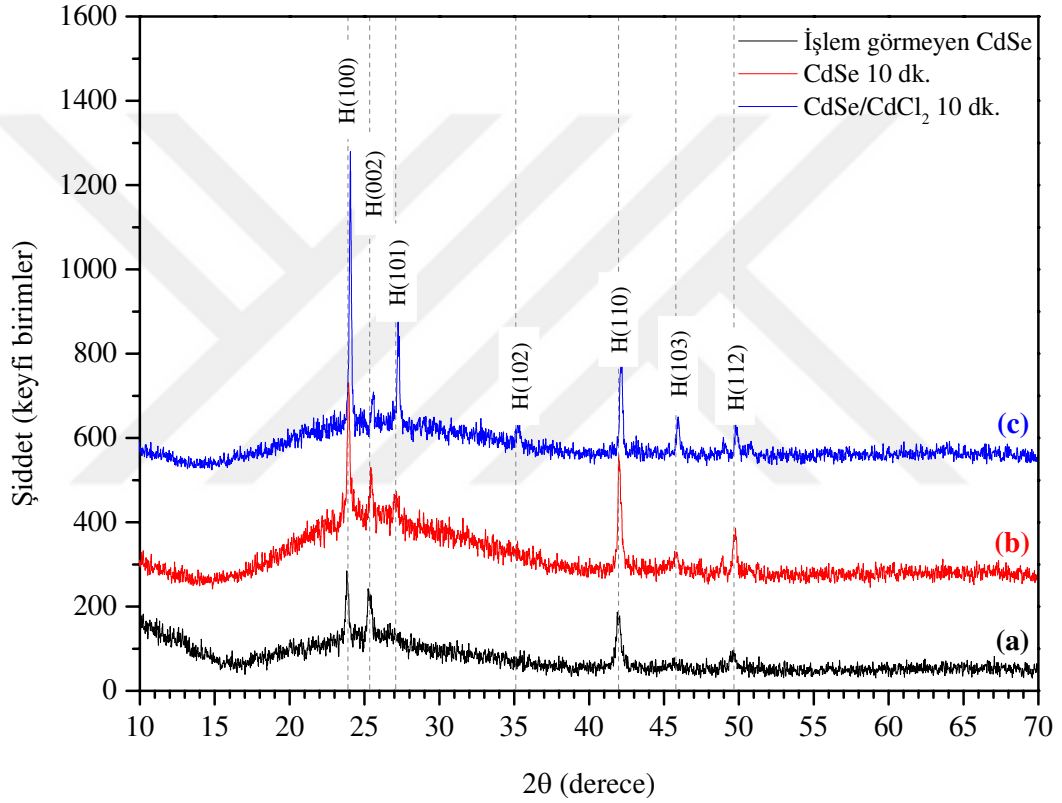
katmanının, yüksek miktarda ışık geçirgenliğini sağlamak için çok ince üretilmesinden kaynaklanmaktadır (Guillén vd., 1998; Kuranouchi vd., 1994; Vázquez-Monroy vd., 2016).



Şekil 48. a) İşlem görmeyen (As dep.) CdS b) 10 dk. CdS c) 10 dk. CdS/CdCl₂ ince filmlerinin XRD spektrumları

Termal buharlaştırma yöntemiyle üretilen CdSe ince filmlerinin XRD spektrumları, Şekil 49’da gösterilmektedir. İşlem görmeyen CdSe filminin spektrumunda $2\theta=23,9^\circ$; $25,4^\circ$; $41,9^\circ$ ve $49,5^\circ$ açılarında Bragg yansıma piklerinin oluştuğu görüldü. Veri tabanı incelendiğinde bu piklerin CdSe’nin hekzagonal fazının sırasıyla (100), (002), (110) ve (112) kırınım düzlemlerine karşılık geldiği tespit edildi (JCPDS Kart No: 00-008-0459) (Baban ve Rusu, 2003; Patel vd., 2009). CdSe filmi, hava ortamında 400°C ’de 10 dakika boyunca tavlandıktan sonra, işlem görmeyen örneğin spektrumunda görülen düzlemlerin yanı sıra, hekzonal CdSe’nin (101) ve (103) düzlemlerinin de oluştuğu görüldü. CdSe örneğine CdCl₂ işlemi uygulandıktan sonra ise, hekzagonal yapıya ait (102) düzleminin de oluştuğu belirlendi. Bu sonuçlara dayanarak, kristalografik düzenlemelerin yüksek sıcaklıkta tavlama ve CdCl₂ işlemi ile birlikte arttığı söylenebilir. Bir başka ifadeyle, CdSe’nin spektrumlarında yeni piklerin ortaya çıkması, rasgele yönelimin arttığını göstermektedir (Ndiaye ve Youm,

2003; Patel vd., 2019). Isıl işlem sonucunda (100) ana pikinin daraldığı ve pik şiddetinin arttığı belirlendi. Ana pikin şiddetinin artması, düzenlenim ve kristalizasyonun arttığı gösterirken; pikteki daralma (dolayısıyla FWHM'nin azalması), CdSe'nin kristal boyutunun arttığını göstermektedir. XRD spektrumlarında elde edilen bulgular değerlendirildiğinde, CdSe ince filmlerini büyütmek için kullanılan termal buharlaştırma yönteminin ve uygulanan deneysel koşulların yüksek kaliteli ince filmlerin üretimi için optimum şartları taşıdığını ortaya koymaktadır.



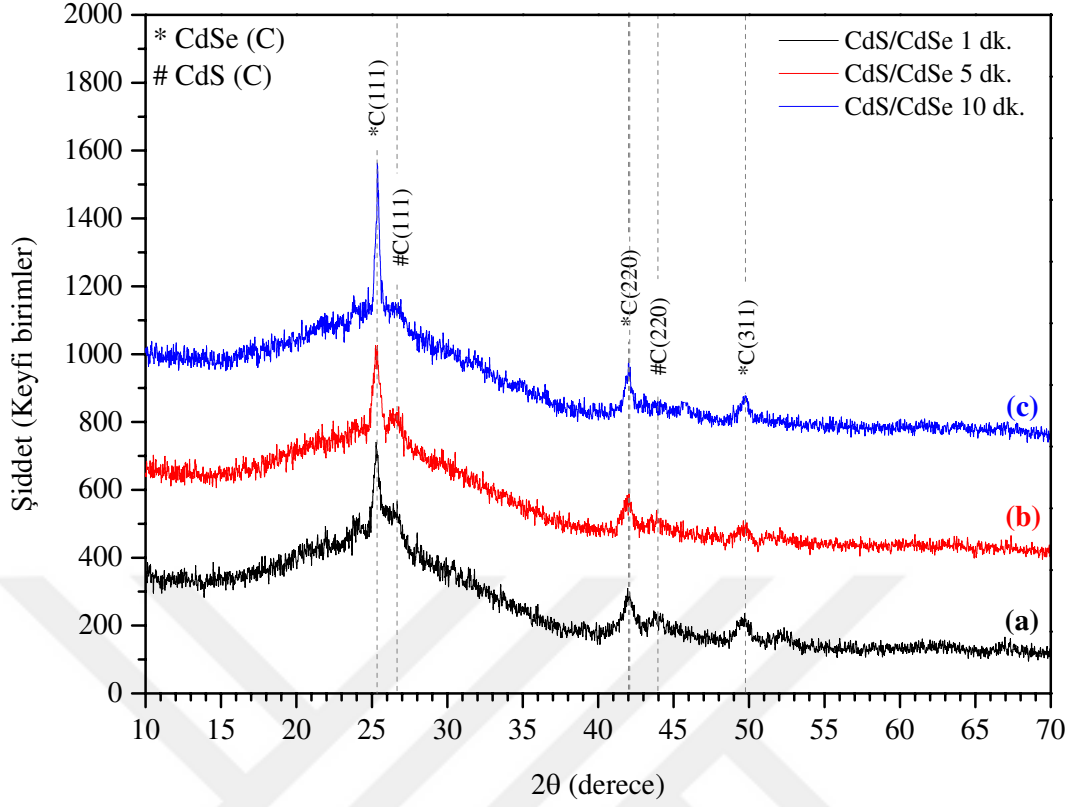
Şekil 49. a) İşlem görmeyen (As dep.) CdSe, b) 10 dk. CdSe, c) 10 dk. CdSe/CdCl₂ ince filmlerinin XRD desenleri

CdS ve CdSe filmleri arasındaki potansiyel karışma (mixing) ve alaşımlanma, CdS/CdSe iki-tabakalı yapıları ile araştırıldı. Buradaki amaç, tabakalar-arası karışmanın başlayabileceği koşulları belirlemektir. Ancak CdS/CdSe ikili yapısında CdS ve CdSe katmanlarının kalınlıkları, 50 nm olarak (toplam kalınlık 100 nm) ayarlandı. Yüksek verimli fotovoltaiik uygulamalarda, CdSe kalınlığının seçilen kalınlık değerinden daha büyük olduğu ve CdS kalınlığının ise seçilen kalınlık değerinden biraz daha küçük olduğu bilinmektedir (Granata vd., 1996; Paudel ve Yan, 2014). Bu kalınlıkların seçilmesinin nedeni, katmanlı

yapılardaki potansiyel alaşım miktarını arttırarak, ölçümlerde bu alaşımları daha verimli bir şekilde tespit edebilmektir.

CdS/CdSe iki-tabakalı yapıları, CBD ile büyütölen CdS'nin üzerine CdSe ince filmlerinin buharlaştırılması ile elde edildi. Şekil 50'de 400°C'de hava ortamında 1, 5 ve 10 dakika boyunca tavlanan CdS/CdSe ince filmlerinin XRD spektrumlarını gösterilmektedir. Şekilden göröldüğü üzere, tavlama süresine bakılmaksızın kırınım desenlerinde $2\theta=25,3^\circ$; $26,6^\circ$; $41,9^\circ$; $43,8^\circ$ ve $49,7^\circ$ civarında yansıma pikleri yer almaktadır. Spektrumlardaki pik konumlarının CdSe'in kübik yapısına ait sırasıyla (111), (220) ve (311) yansıma düzlemleri (JCPDS Kart No: 00-019-0191) ile CdS'in kübik yapısına ait sırasıyla (111) ve (220) yansıma düzlemlerine (JCPDS Kart No: 00-010-0454) karşılık geldiğı tespit edildi. XRD spektrumlarında CdS pikleri oldukça zayıftır. Ancak tavlama süresi 1 dakikadan 5 dakikaya çıktığında $2\theta = 26,6^\circ$ civarındaki ana pikin şiddetinin arttığı göröldü. Bu durum, tavlama süresinin artmasıyla birlikte CdS'nin kristal kalitesinin iyileştiğini göstermektedir. Ancak tavlama süresi 10 dakikaya çıktığında CdS'nin ana pikinin şiddetinin azaldığı görölmektedir. Bunun sebebi, 10 dk. tavlama süresinde oldukça yüksek bir kristalizasyon sağılayan CdSe'nin CdS'nin kristal yapısını baskılamasıdır.

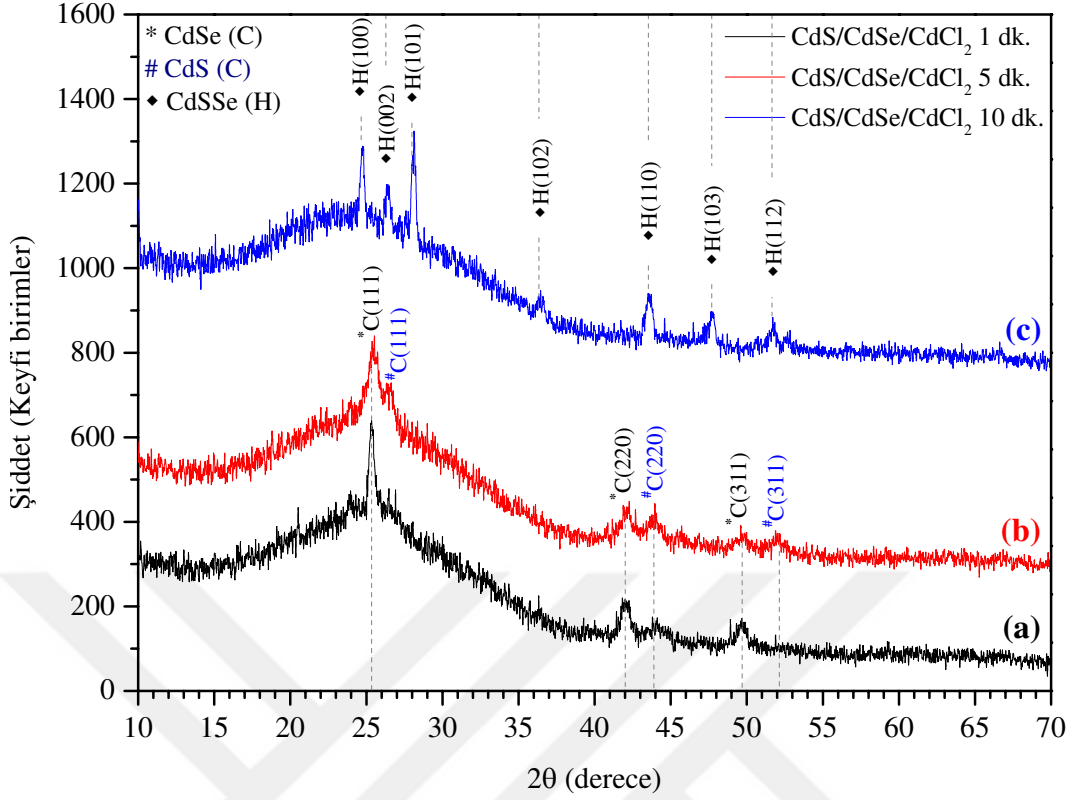
Spektrumlarda elde edilen veriler incelendiğinde, CdSe ile CdS arasında karışma veya alaşım oluşumuna dair herhangi bir gösterge olmadığı göröldü. Bu durum CdSe'yi büyötmek için kullanılan 200°C altlık sıcaklığının ve/veya CdS/CdSe yapısının 10 dakika boyunca 400°C hava tavlamasının bu etkileşimi tetiklemek için yeterli olmadığını göstermektedir.



Şekil 50. a) 1 dk. b) 5 dk. c) 10 dk. tavlanan CdS/CdSe ince filmlerinin XRD desenleri

CdS/CdSe iki katmanlı yapılarının CdCl_2 işlemi uygulandıktan sonra hava ortamında 400°C 'de 1, 5 ve 10 dakika boyunca tavlanan örneklerin XRD spektrumları, Şekil 51'de gösterilmektedir. Kırınım desenleri incelendiğinde, 1 ve 5 dakika tavlanan örnekler için spektrumların CdCl_2 işlemi uygulanmayan örnekler ile benzer olduğu, yani kübik CdSe ($2\theta = 25,3^\circ$; $42,0^\circ$ ve $49,7^\circ$) ve kübik CdS ($2\theta = 26,4^\circ$; $43,9^\circ$ ve $52,1^\circ$) fazlarının oluştuğu belirlendi. Bununla birlikte tavlama süresi 10 dakikaya çıktığında $2\theta = 24,6^\circ$; $26,0^\circ$; $27,9^\circ$; $36,1^\circ$; $43,4^\circ$; $47,1^\circ$ ve $51,5^\circ$ 'de yeni bir pik seti oluştuğu belirlendi. Bu pik setinin hekzagonal yapıda kristalleşen bir CdSSe alaşımına karşılık geldiği tespit edildi (JCPDS Kart No: 01-089-3682). Alaşımdaki Se-oranının ise % 46 civarında olduğu görüldü.

Kısacası, CdS/CdSe iki-tabakalı yapısına 10 dakikaya kadar ısı işlem uygulandığında faz ayrışmasının olduğu ve alaşımlanma meydana gelmediği; ancak CdCl_2 işlemi uygulanıp 10 dakikalık tavlamadan sonra kristal yapısının başlangıçtaki kübik CdS ve CdSe fazlarından hekzagonal faza dönüştüğü ve CdS ile CdSe tabakaları arasında bir CdSSe alaşımının oluştuğu belirlendi. Bu durum, uygulanan deneysel koşullar altında CdCl_2 işleminin hem alaşım oluşumunda hem de faz dönüşümünde etkin bir rol oynadığını göstermektedir.



Şekil 51. a) 1 dk. b) 5 dk. c) 10 dk. tavlanan CdS/CdSe/CdCl₂ ince filmlerinin XRD desenleri

Diaz-Reyes vd. tarafından yapılan çalışmada, CBD yöntemi ile büyütülen CdS_{1-y}Se_y ince filmlerine ait XRD spektrumlarına gaussiyen pikler uydurularak filmlerin hekzagonal yapıda büyüdüğü rapor edildi (Diaz-Reyes vd., 2015). Reyes-Banda vd. tarafından yapılan bir çalışmada, CdS/CdSe yapısı, CBD ile büyütülen CdS'nin üzerine PLD yöntemi ile CdSe ince filmlerinin büyütülmesiyle elde edildi. Elde ettikleri verilere göre, hem hekzagonal yapıda kristalleşen CdSe ve CdS fazlarının oluştuğu görüldü. Aynı çalışmada CdSe'nin kalınlığının azalmasıyla birlikte H(002) pikinin düşük açılara kaydığı belirlendi. Bu durumun S'nin Se bölgesinde yer-değişimi işgalini (substitutional occupation) ve ardından CdS_{1-y}Se_y alaşımının oluşumunu gösterdiği ifade edildi (Reyes-Banda vd., 2019). Lu vd. yaptıkları çalışmada, CBD ile CdS ince filmlerini, ardından elektrodepolama yöntemi ile CdSe ince filmlerini üreterek CdS/CdSe yapısını elde ettiler. Yaptıkları incelemede, CdS/CdSe ince filmlerinin kübik çinko sülfür CdS ve CdSe fazlarında kristallendiğini gösterdiler (Lu vd., 2014). Kevin vd. yaptıkları çalışmada, tek-kaynak prekürsörleri kullanarak aeresol destekli kimyasal buhar biriktirme (AACVD) yöntemi ile ürettikleri CdSSe ince filmlerinin hekzagonal yapıda kristalleştiğini ve prekürsör çözeltisinde Se

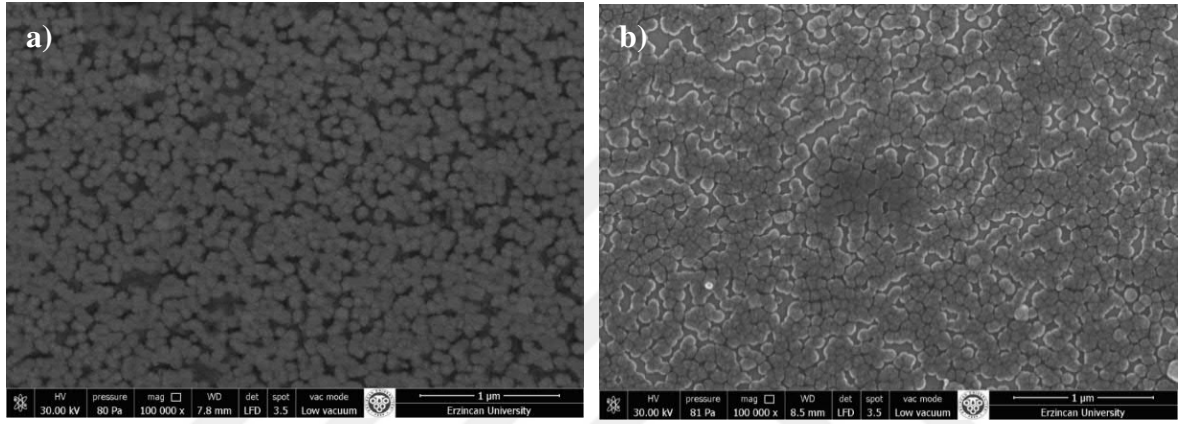
oranının artmasıyla XRD piklerinin şiddetlerinin azaldığını ancak alaşımdaki Se/(Se+S) oranının ise değişmediğini ortaya koydular (Kevin vd., 2015). Yapılan bir başka çalışmada, kübik CdSe filmlerinin Ar+Se₂ atmosferinde ~350°C'de tavlandıktan sonra hekzagonal faza dönüştüğü bulundu (Portillo-Moreno vd., 2002). CBD ile büyütülen CdS ince filmlerine CdCl₂ işleminin etkisinin incelendiği bir çalışmada, yarı-kararlı kübik yapıda kristalleşen CdS ince filmlerinin CdCl₂ varlığında tavlandıktan sonra kararlı hekzagonal faza dönüştüğü görüldü. Bu değişikliğin düşük gerilimli (stress) ve büyük taneli bir yapının oluştuğu yeniden kristalleşme süreci ile gerçekleştiği belirlendi (Han vd., 2011). CdCl₂'nin CBD yöntemiyle büyütülen CdS ince filmleri üzerindeki etkisini inceleyen başka bir çalışmada, CdCl₂'nin Cd atomlarının boşluk (V_{Cd}) konsantrasyonunu arttırdığını, doğal kusurların ve komplekslerinin oluşumunun CdS'nin kübik fazdan hekzagonal faza dönüşümüne neden olabileceği bildirildi (Wan vd., 2010). CdCl₂'nin CdSe filmleri üzerine etkisinin incelendiği çalışmada ise, tavlanan CdSe filmlerinin hekzagonal yapıda büyüdüğü, filme CdCl₂ işlemi uygulanmasının, yeniden kristallenmeyi ve tane büyümesini teşvik ettiği belirlendi (Ndiaye ve Youm, 2003). CdS ve CdSe katmanları üzerine yapılan tüm bu çalışmalar, CdS/CdSe iki tabakalı yapıları için farklı tavlama koşullarında elde edilen mevcut bulgularımızla tutarlıdır.

3.1.2. FE-SEM Görüntüleri

CdCl₂ işleminin CdS ince filmlerinin yüzey morfolojisi üzerindeki etkisini incelemek için, örneklerin FE-SEM görüntüleri alındı. Hava ortamında 400°C'de 10 dakika tavlanan CdS ve CdS/CdCl₂ örneklerinin yüzey görüntüleri, Şekil 52'de gösterilmektedir. CdS'nin FE-SEM görüntüsü incelendiğinde, küresel bir tane dağılımına sahip olduğu ve bazı bölgelerde boşlukların oluştuğu görüldü. Küçük taneli bir yapısı olan CdS'nin tane büyüklüğünün 70-80 nm arasında olduğu ve tanelerin film yüzeyi boyunca homojen dağıldığı belirlendi. CdS/CdCl₂ örneğinin yüzey görüntüsü incelendiğinde, CdCl₂ işleminin tanelerin şekli, büyüklüğü ve dağılımı üzerine belirgin bir etkisinin olmadığı, ancak taneler arası boşluklarda kısmen bir azalma olduğu görüldü. CdS'nin tane yapısı, daha çok ayrık (individual) tanelerden oluşuyorken; CdCl₂ işleminden sonra kısmen tane sınırı sayısının azaldığı, kümelenmelerin arttığı ve filmin daha büyük tanelerden oluşma eğiliminde olduğu gözlemlendi. CdCl₂ işleminin tanelerin büyümesini ve tane sınırlarının azalmasını teşvik ettiği bilinmektedir. Ancak bu çalışmada incelenen CdS örneğinin yüzey görüntüsünde, CdCl₂'nin bu iyileştirici etkileri ile kısmen karşılaşıldı. Bu durumun en temel nedeni yaklaşık 100 nm

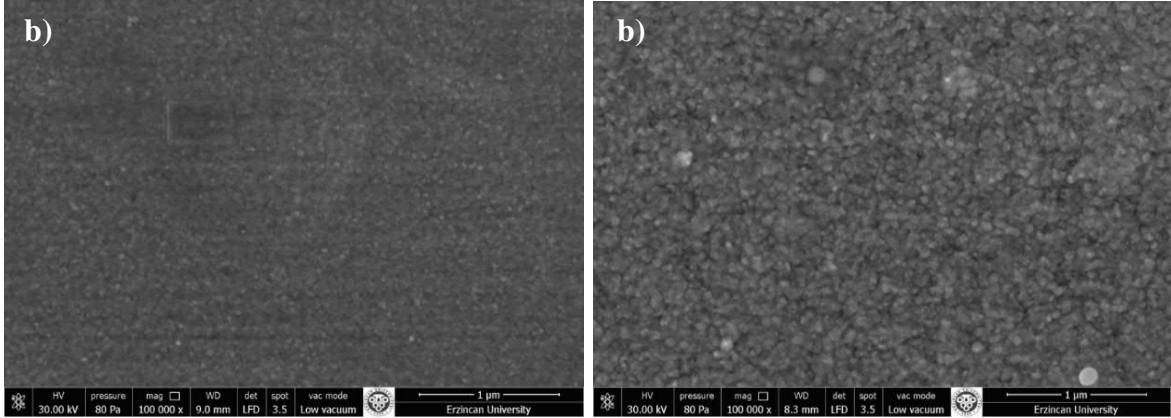
kalınlığında olan CdS ince filminin CdCl₂ işleminin iyileştirici etkilerini görebilmek için yeteri kadar kalın olmamasıdır. Film kalınlığı arttıkça CdCl₂ işleminin etkisi de daha belirgin bir şekilde görülebilir. Ayrıca CdS ince filmlerinin F:SnO₂ kaplı cam atıklar yerine doğrudan cam üzerine kaplanması, CdCl₂ işleminin etkisini sınırlandıran bir başka etmendir.

CdS ve CdS/CdCl₂ örneklerinin yüzey görüntülerinden elde edilen bu sonuçlar, XRD verileri ile uyumludur. XRD sonuçlarında da, bu iki örnek arasında belirgin bir fark gözlenmezken; benzer sonuçlar, FE-SEM ölçümleri ile de desteklenmektedir.



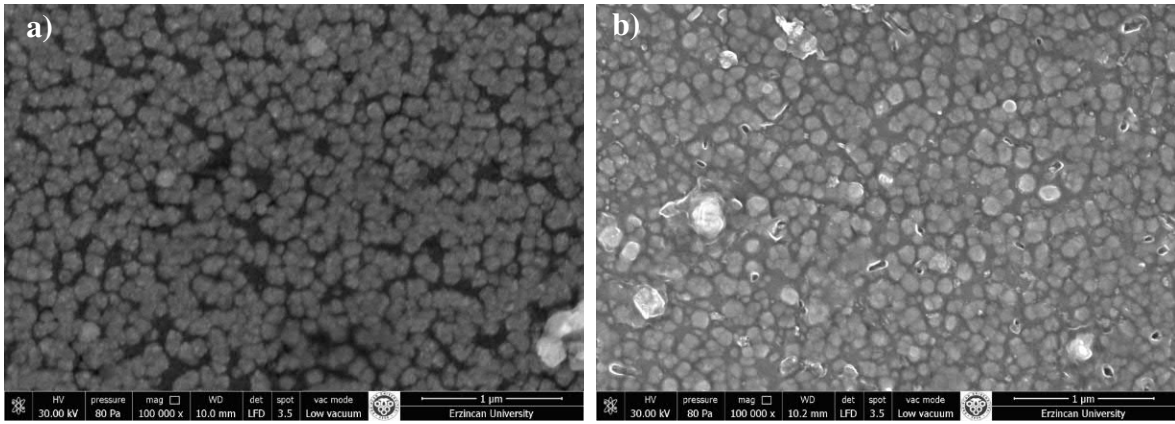
Şekil 52. Hava ortamında 400°C’de 10 dakika tavlanan a) CdS, b) CdS/CdCl₂ örneklerinin FE-SEM görüntüleri

Hava ortamında 400°C’de 10 dakika tavlanan CdSe ve CdSe/CdCl₂ örneklerinin yüzey görüntüleri, Şekil 53’de gösterilmektedir. CdCl₂ işlemi uygulanmayan CdSe filminin ait FE-SEM görüntüsü incelendiğinde, film yüzeyinin çok küçük küresel tanelerden oluştuğu, tanelerin dağılımının ve büyüklüğünün homojen olduğu ve oldukça kompakt bir morfolojiye sahip olduğu görüldü. CdSe filmlerine CdCl₂ işlemi uygulandıktan sonra filmin morfolojisinin belirgin bir değişikliğe uğradığı, tane sınırı sayısının azaldığı ve tane büyüklüklerinin arttığı görüldü. İrili-ufaklı bir tane yapısına sahip olan filmin yoğun paketlenmiş bir yüzey yapısına sahip olduğu tespit edildi. Bu durumun CdCl₂ işleminden sonra, CdSe filminde gerçekleşen yeniden-kristallenme sürecinden kaynaklandığı söylenebilir.



Şekil 53. Hava ortamında 400°C’de 10 dakika tavlanan a) CdSe, b) CdSe/CdCl₂ örneklerinin FE-SEM görüntüleri

CdCl₂ işleminin CdS/CdSe ikili yapılarının yüzey morfolojisi üzerindeki potansiyel etkilerini araştırmak için, hava atmosferinde 400°C’de 10 dakika tavlanan örneklerin FE-SEM ölçümleri gerçekleştirildi (Şekil 54). CdS/CdSe örneği incelendiğinde, içlerinde bir veya birden daha fazla tane içerebilen küresel tanelerin altlık yüzeyi boyunca homojen bir şekilde dağıldığı, ancak bazı bölgelerde boşluklar oluştuğu görüldü. Filmin yüzey yapısında boşlukların oluşması, örneklerin TCO kaplı cam altlıklar yerine doğrudan cam üzerine büyütülmesinden dolayıdır. Toplam 100 nm kalınlığındaki CdS/CdSe yapısında, tane büyüklükleri 100-120 nm arasında değişmektedir. Şekil 54(b) 'de görüldüğü üzere, CdS/CdSe yapısına CdCl₂ işleminin uygulanması, filmin morfolojisini önemli derecede etkilemektedir. Yüzey görüntüsü incelendiğinde; CdCl₂ işleminin CdS/CdSe ikili tabakasında, küçük kristalitlerin bir kısmının daha büyük olanlarla bir araya gelerek yeniden kristalize olduğu görüldü. CdCl₂ işlemi uygulanan iki-tabalı yapı için, tanelerin daha fazla erimiş (fused) gibi görüldüğü, bu durumun tane büyüklüklerinin 100-200 nm aralığına yükselmesine neden olduğu belirlendi. Ancak örneklerin toplam kalınlığının 100 nm ile sınırlı olmasının CdCl₂ uygulanan ince filmin tane büyüklüğünü sınırlandırdığı söylenebilir.



Şekil 54. Hava ortamında 400°C’de 10 dakika tavlanan a) CdS/CdSe, b) CdS/CdSe/CdCl₂ örneklerinin FE-SEM görüntüleri

3.1.3. EDS Ölçümleri

Hava ortamında 10 dakika tavlanan pencere katmanı örneklerinin atomik oranları, Tablo 3’te verilmektedir. Tablo incelendiğinde, CdS ince filminin neredeyse stokiometrik olduğu ($[Cd]/[S] \sim 1,06$) görüldü. Genellikle kükürt (S) içeren CdS, ZnS vs. gibi yarıiletken bileşiklerde, S-eksikliği görülmesinden dolayı, bileşiklerde istenen özellikler sağlanamamaktadır. Ancak bu çalışmada CdS filmlerini büyütmek için kullanılan CBD yöntemi ile neredeyse ideal stokiometride filmler elde edildi. Bu durum ideal atomik oranlarda CdS filmlerini büyütmek için, CBD yönteminin en uygun yöntemlerden biri olduğunun göstermektedir.

CdSe filminin atomik oranları incelendiğinde, örneğin stokiometriden saptığı ($[Cd]/[Se] \sim 1,16$) ve belirgin biçimde Cd-zengini (ya da Se-fakiri) olduğu belirlendi. Se-fakiri film kompozisyonu, termal buharlaştırma yöntemi ile üretilen CdSe bileşiğinde Cd ve Se’nin farklı buhar basınçlarına sahip olmasından kaynaklanmaktadır (Madelung, 2004; Stull ve Sinke, 1956).

CdS/CdSe ikili yapılarında, filmlerin kalınlıkları ve yoğunlukları hesaba katılarak atomik oranlar hesaplandığında S/Se oranının $\sim 1,10$ civarında olması beklenmektedir. Ancak EDS sonuçları incelendiğinde örnekteki S/Se oranının 0,44 olduğu, yani örneklerin S-fakiri olduğu görüldü. Bunun sebebi, CdS’in CBD yöntemi ile üretimi esnasında film yapısına O, OH⁻ gibi safsızlıkların girmesidir (Metin ve Esen, 2003). CdS/CdSe ince filmlerinin tavlama işlemi, CdSe ince filmlerinin kaplanmasından sonra gerçekleştirildiğinden dolayı; CdS’nin büyümesi sırasında filme giren safsızlıklar, büyük

oranda örnek yapısında kalmaktadır. EDS analizinde sadece Cd, S ve Se'nin oranları belirlendiğinden ve ince film yapısında bulunan O, H gibi safsızlık atomları ölçülmediğinden dolayı; S'nin atomik konsantrasyonu beklenen değerden daha düşük çıkmaktadır.

CdCl₂ işlemi uygulanan örneklerin atomik konsantrasyonları incelendiğinde, tüm örneklerin Cd miktarında oldukça küçük bir artış olduğu tespit edildi. Bu artışın, örneklerin yüzeyinde kalan fazlalık (rezidü) CdCl₂'den kaynaklandığı söylenebilir. Klorlama işlemi için seyreltik bir CdCl₂ çözeltisi kullanıldı. Ancak seyreltik bir CdCl₂ çözeltisi kullanıldığı için, işlem gerçekleştirildikten sonra örneklerle herhangi bir yıkama işlemi uygulanmadı. Bunun sonucunda örneklerde eser miktarda CdCl₂ bileşiği bulunabileceğinden dolayı, Cd oranında hafifçe bir artış olduğu tahmin edilmektedir.

Tablo 3. Hava ortamında 10 dakika tavlanan pencere katmanı örneklerinin atomik oranları

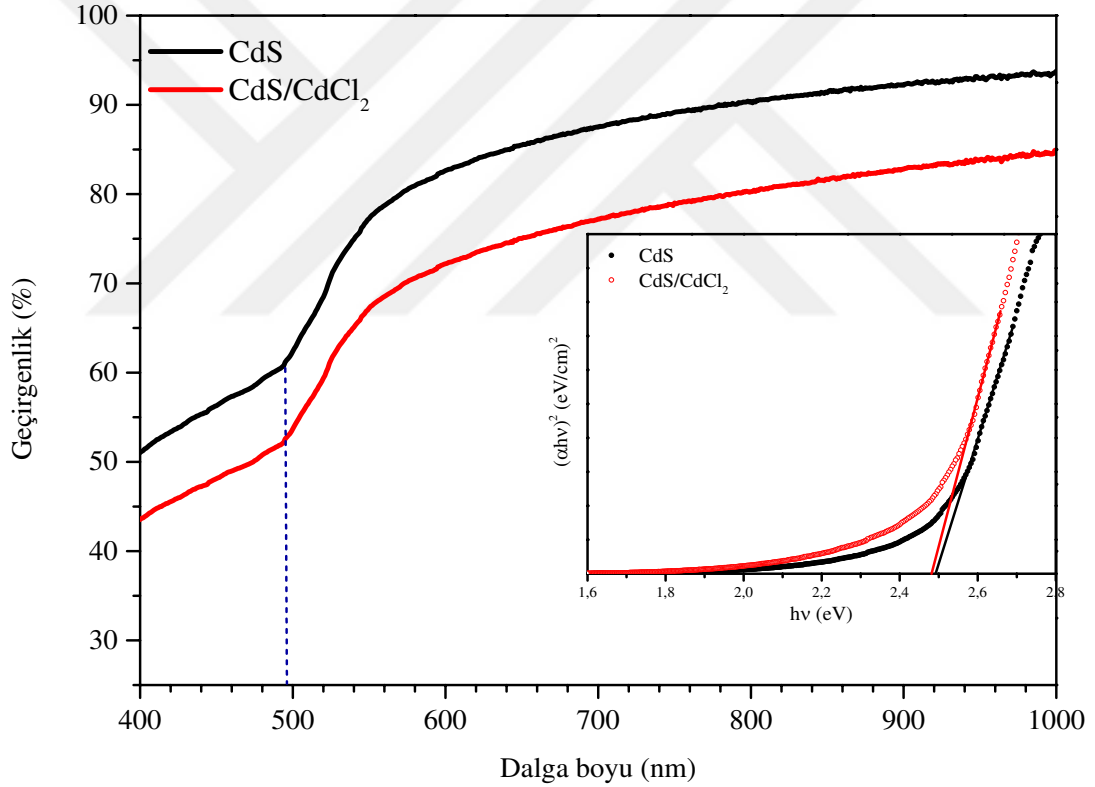
Numune	Cd (%)	S (%)	Se (%)	Elementel oranlar
CdS	51,5	48,5	-	[Cd]/[S] ~1,06
CdS/CdCl ₂	51,6	48,4	-	
CdSe	53,8	-	46,2	[Cd]/[Se]~1,16
CdSe/CdCl ₂	54,0	-	46,0	
CdS/CdSe	45,5	16,6	37,9	[S]/[Se] ~ 0,44
CdS/CdSe/CdCl ₂	45,7	16,5	37,8	

3.1.4. Optik Ölçümler

CdCl₂ işleminin CdS ince filmlerinin optik özelliklerine etkisini belirlemek için, oda sıcaklığında 400-1000 nm dalga boyu aralığında geçirgenlik (transmitans) ölçümleri alındı. CdS ve CdS/CdCl₂ örneklerinin geçirgenlik eğrileri, Şekil 55'de gösterilmektedir. CdS ve CdS/CdCl₂ örnekleri için yaklaşık 500 nm'de bant kenarı açıkça görülmektedir. Ancak CdS filmine CdCl₂ işlemi uygulanması, filmin geçirgenliğinde belirgin bir azalmaya neden olduğu görüldü. Filmlerin bant aralıklarını belirlemek için çizilen $(\alpha h\nu)^2 - (h\nu)$ grafiği, Şekil 55'in ekinde verilmektedir. Grafikte eğrinin lineer kısmının x-eksenini kestiği nokta, bileşiğin yasak enerji değerini vermektedir. Şekilden CdS'nin bant aralığının 2,49 eV olduğu belirlendi. CdCl₂ işleminin uygulanması sonucunda örneğin bant aralığının hafifçe azalarak 2,48 eV değerine düştüğü görüldü. Bu değerler, önceki çalışmalar ile karşılaştırıldığında,

yaklaşık 0,1 eV daha yüksektir (Han vd., 2011). Bant aralığındaki bu küçük değişimin, üretim ve tavlama koşullarına bağlı olarak yapıya daha fazla oksijenin girmesinden kaynaklandığı söylenebilir.

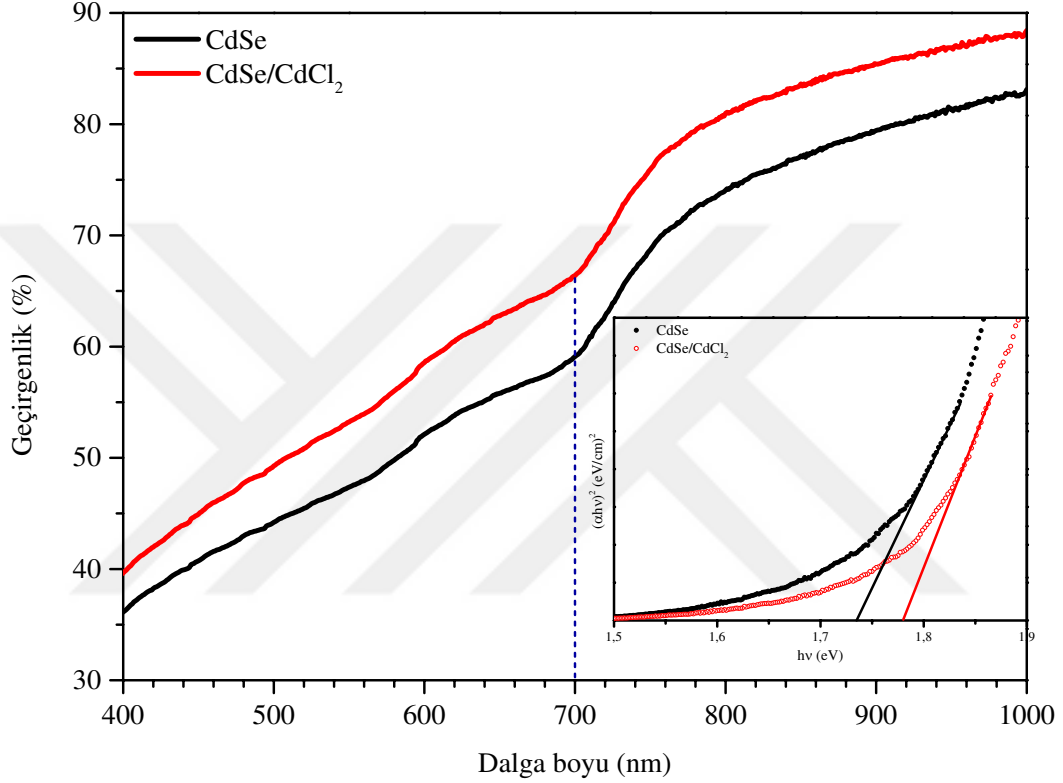
CdCl₂ işlemi, ince filmler üzerinde yeniden kristalizasyon, tane yapısının gelişimi, elektriksel özelliklerin iyileşmesi gibi belirgin bir etkiye sahiptir (Başol, 1992; McCandless ve Sites, 2011; Terheggen vd., 2004). Ancak XRD ve FE-SEM analizlerinden görüldüğü üzere, CdCl₂ işlemi örneklerin kristal kalitesinde ve tane yapısında önemli bir etkiye sebep olmamıştır. Bant aralığı değişimi, malzemenin yapısal özellikleri (örgü sabiti, kristal yapısı, vs.) ile doğrudan ilişkili olmasından dolayı (Ortuño-López vd., 2004), CdS/CdCl₂ bant aralığı değeri CdS örneği kıyasla önemli bir değişime uğramamıştır.



Şekil 55. CdS ve CdS/CdCl₂ ince filmlerine ait geçirgenlik ve soğurma grafiği

CdSe ve CdSe/CdCl₂ örneklerinin geçirgenlik eğrileri, Şekil 56’da verilmektedir. Şekil incelendiğinde, örneklerin 700 nm civarında bant kenarına sahip olduğu açıkça görülmektedir. Ancak CdSe filmine CdCl₂ işlemi uygulanması, filmin geçirgenliğinin artmasına neden oldu. CdSe örneklerinin $(\alpha hv)^2 - (hv)$ grafiği, Şekil 56’nın ekinde gösterilmektedir. Grafikten yararlanarak CdSe için 1,73 eV ve CdSe/CdCl₂ için 1,78 eV

yasak enerji değeri hesaplandı. CdSe için hesaplanan bant aralığı, literatür ile uyumludur (Sze vd., 2021). Ancak CdSe filmine CdCl₂ işleminin uygulanması, ince filmin bant aralığında 0,05 eV'lık bir artışa neden oldu. Filmin bant aralığındaki bu artışın, XRD ve FE-SEM verilerinden görüldüğü gibi, malzemenin yapısal özelliklerinde meydana gelen değişiklikten kaynaklandığı söylenebilir (Ndiaye ve Youm, 2003).

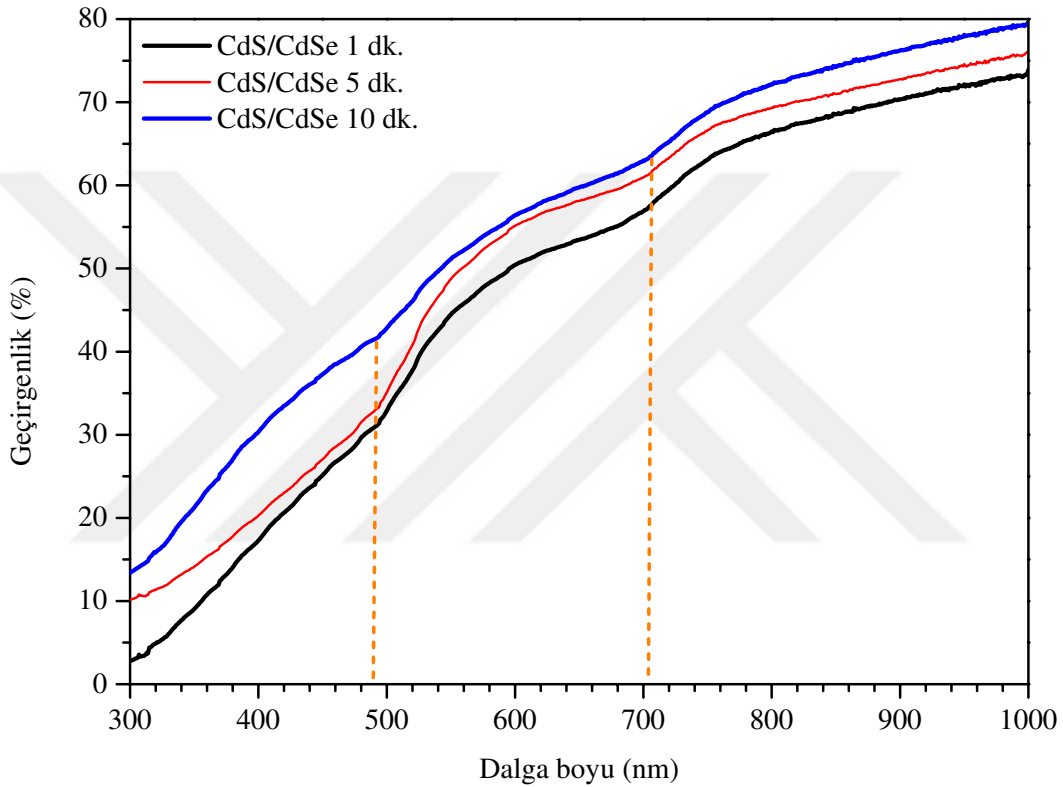


Şekil 56. CdSe ve CdSe/CdCl₂ ince filmine ait geçirgenlik ve soğurma grafiği

CdS/CdSe ince filmlerinin optik özelliklerini incelemek için 1, 5 ve 10 dakika tavlanan örneklerin 400-1000 nm dalga boyu aralığında geçirgenlik ölçümleri alındı. Şekil 57'de görüldüğü üzere, tavlama süresine bakılmaksızın bütün numunelerin yapılarında CdS (~490 nm'de bant kenarı) ve CdSe'ye (~700 nm'de bant kenarı) karşılık gelen iki farklı bant aralığı olduğunu gösteren özellikler (iletimde ani artış) sergilenmektedir. Bu sonuç, hava ortamında 400°C'de 10 dakikaya kadar tavlanan CdS/CdSe örneklerinde alaşımlanma olmadığını gösteren XRD verileriyle tutarlıdır.

490 nm'nin altındaki dalga boylarında, hem CdS hem de tabakaları soğurduğundan dolayı çok düşük iletim vardır. 700 nm'nin üzerinde aniden artan geçirgenlik ise CdSe'nin bant aralığı (~1,75 eV) ile uyumludur (Sze vd., 2021). 1 dakika tavlanan CdS/CdSe

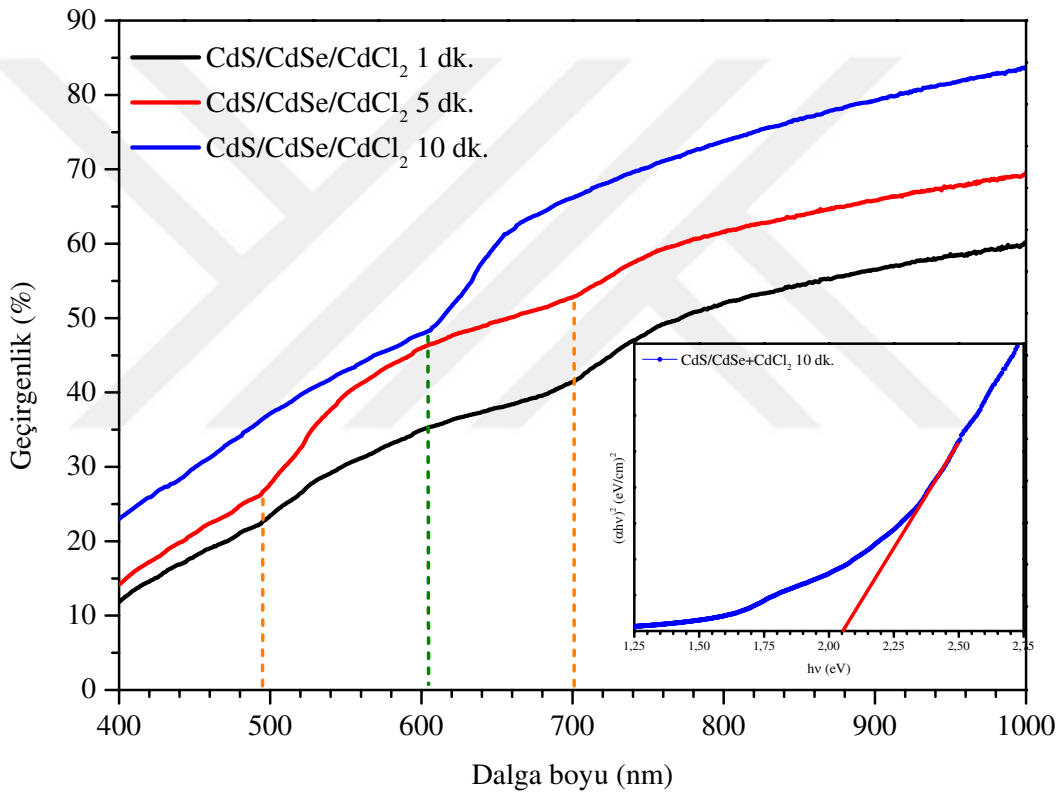
örneğinde 700 nm'den daha uzun dalga boylarında geçirgenliğin % 60'ın üzerinde olduğu, tavlama süresinin artmasıyla, örneklerin geçirgenliğinin de biraz yükseldiği görüldü. Aygıt yapısında pencere katmanı olarak kullanılan CdS/CdSe ince filmlerinin geçirgenliğinin mümkün olduğu kadar yüksek (ya da soğurmasının düşük) olması istenmektedir. Tavlama süresinin 1 dakikadan 10 dakikaya çıkmasının sonucunda geçirgenliğin yükselmesi, tavlama süresi artışının optik özelliklerin iyileşmesi açısından uygun olduğunu göstermektedir.



Şekil 57. Hava ortamında 400°C'de 1, 5 ve 10 dk. tavlanan CdS/CdSe tabakalarının geçirgenlik grafiği

CdCl₂ işleminin CdS/CdSe ince filmlerinin optik özellikleri üzerine etkisini incelemek için, örneklerin 400-1000 nm dalga boyu aralığında geçirgenlik ölçümleri alındı. 400°C'de hava ortamında 1, 5 ve 10 dakika tavlanan CdS/CdSe/CdCl₂ ince filmlerinin geçirgenlik eğrileri, Şekil 58'de gösterilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere, 1 ve 5 dakika tavlanan numuneler, CdCl₂ işlemi uygulanmayan örneklerle benzer şekilde, 495 nm ve 700 nm civarında iki bant kenarı davranışını sergilemektedir. Buradaki iki bant kenarı, CdS ve CdSe tabakalarına karşılık gelmektedir. Bu sonuç, CdCl₂ işlemi uygulansa dahi, 400°C'de 5 dakikaya kadar tavlamanın, CdS ve CdSe katmanları arasında alaşım oluşması için yeterli

olmadığını göstermektedir. Bununla birlikte tavlama süresi 10 dakikaya çıktığında, geçirgenlik verilerinde 605 nm civarında tek bir bant kenarının olduğu görüldü. Bu örneğin bant aralığı değerinin daha iyi anlaşılması için çizilen $(\alpha h\nu)^2-(h\nu)$ grafiği, Şekil 58'in ekinde gösterilmektedir. Eğrinin doğrusal kısmının 'hv' eksenine kesiştiği nokta ~2,05 eV'lik bir bant aralığı değerine işaret etmektedir. Bu değer, yaklaşık % 45-50 oranında Se içeren bir CdSSe alaşımına karşılık gelmektedir. Bu alaşımların varlığı, önceki bölümlerde sunulan XRD verileriyle uyumludur. XRD verilerinde de bu numune için yaklaşık % 46 Se içeren bir alaşım oluşumu önerilmektedir.



Şekil 58. 400 °C'de hava ortamında 1, 5 ve 10 dk. tavlanan CdS/CdSe/CdCl₂ tabakalarının geçirgenlik grafiği (Ekte, 10 dk. tavlanan örneğin Tauc grafiği gösterilmektedir)

3.2. CdS/CdSe/CdTe Katmanlı Yapılarının Karakterizasyonu

3.2.1. XRD Sonuçları

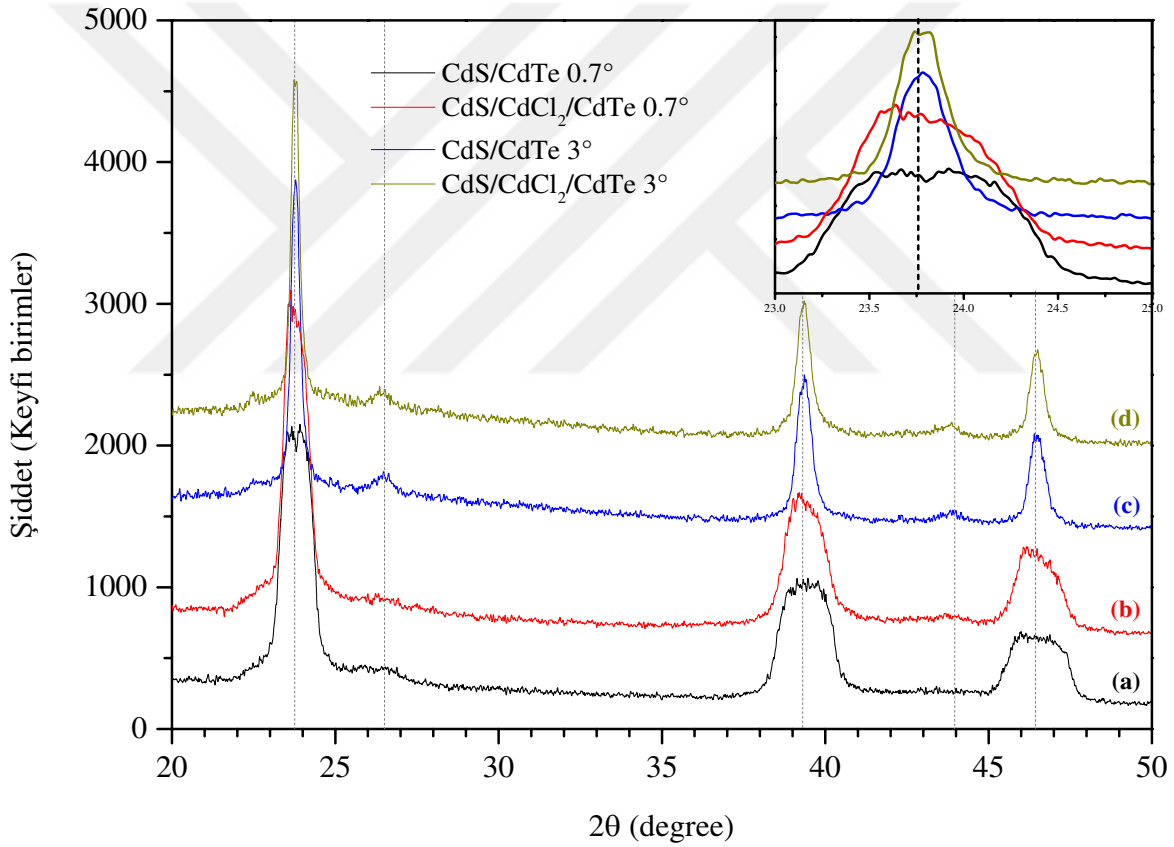
CdS/CdTe katmanlı yapısı, CBD yöntemiyle üretilen CdS üzerine CdTe katmanının buharlaştırılması ile elde edildi. CdCl₂ işlemi uygulanan ve uygulanmayan şekilde üretilen örnekler, hava ortamında 400°C’de 10 dakika ısıtılma tabi tutuldu. Yüzeye yakın ve derin bölgelerinde katmanlı yapının faz dağılımını inceleyebilmek için GI-XRD ölçümleri gerçekleştirildi. 0,7° ve 3° geliş açılarında ölçülen XRD spektrumları, Şekil 59’da gösterilmektedir. Spektrumların 23-25° arasındaki genişletilmiş XRD spektrumu, şeklin ekinde gösterilmektedir. CdS/CdTe katmanlı yapılarından elde edilen tüm XRD verilerinde, ince film yapısında birden fazla faz ve/veya kompozisyonun olabileceğini gösteren omuzlu (shoulder), geniş ve/veya ikili (double) pik noktaları gözlemlendi. Bu pikleri ayırt etmek amacıyla spektrumun bazı bölgeleri için ters-evrişim (deconvolution) işlemi gerçekleştirildi. Ters-evrişim, Origin 9.0 programında pik analizörü alt-kodu kullanılarak yapıldı. Piklerin fitlenmesi için Gauss dağılım fonksiyonu kullanıldı. Spektroma uydurulan fitlerin eşleşme derecesi (veya güvenilirliği) kümülatif piklerin R² değerleri kontrol edilerek belirlendi. Bu aşamada optimum fitlemeyi sağlamak için, R² değerleri 1’e en yakın olacak şekilde ayarlandı. 0,7° geliş açısında ölçülen spektrumda 24° ve 39° civarındaki toplanan veriler için uygulanan ters evrişim işleminin sonuçları, Şekil 60’da gösterilmektedir. Şek.60(a-b) incelendiğinde, Cd_xTeO_y fazına karşılık gelen 23,53° ve 38,92°’de (Abdul-Manaf vd., 2015; Ojo ve Dharmadasa, 2019) ve CdS_xTe_{1-x} alaşımına karşılık gelen 24,07° ve 39,80°’de piklerin oluştuğu belirlendi. CdS_xTe_{1-x} alaşımının pik konumları incelendiğinde, bu piklerin kübik CdTe’ye kıyasla 0,3°-0,5° arasında sağ tarafta (büyük açılara doğru) olduğu görüldü. CdS_xTe_{1-x} alaşımındaki x değerini belirlemek için i) Bragg yasası kullanılarak düzlemler arası mesafe hesaplandı, ii) bu değer ve kristal yapı denklemi kullanılarak örgü parametresi belirlendi ve iii) örgü parametresi ile kompozisyon arasında doğrusal bir ilişki olduğu varsayılarak x değeri belirlendi. Buna dayanarak CdS_xTe_{1-x} alaşımının ~0,12 ’lık bir x değerine sahip olduğu hesaplandı. Fotovoltaik uygulamalarda kullanılan tabaka kalınlıklarının aksine, örneğin daha ince CdTe ve daha kalın CdS katmanlarını içermesinden dolayı; alaşımda daha yüksek ‘S’ konsantrasyonu beklenmektedir. Bununla birlikte, CdS/CdTe örneğinde 400°C’de 10 dk. ısıtılma uygulanmasından sonra CdS ve CdTe katmanları arasında oluşan %12 S-konsantrasyonlu CdS_xTe_{1-x} alaşımı, önceki çalışmanın

bulgularını desteklemektedir. Gibson vd. tarafından yapılan araştırmada çok daha kalın CdTe tabakası kullanılmasına rağmen, benzer alaşım kompozisyonunun, CdS/CdTe ara yüzeyinin 200 nm kalınlığındaki bir bölgesinde tespit edildi (Gibson vd., 2002). Bu durum, CdS/CdTe örneğinde kullanılan CdS ve CdTe kalınlıklarının arttırılmasına bağlı olmaksızın, $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ alaşımındaki S-konsantrasyonunun sınırlı bir değere kadar ulaşabileceğini göstermektedir.

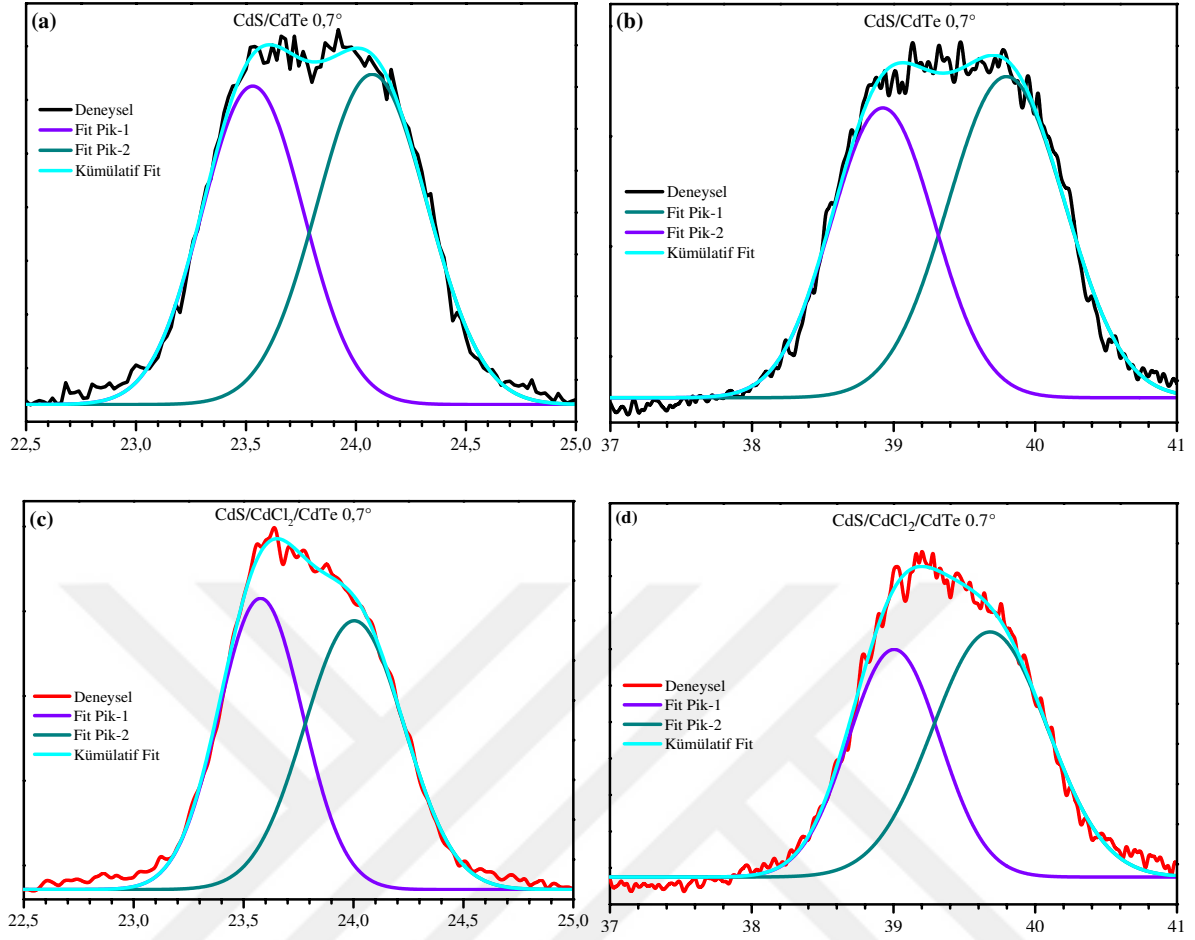
Şekil 60(c-d)'de incelendiğinde, CdS/CdCl₂/CdTe katmanlı yapısı, CdCl₂ işlemi uygulanmayan örneklerle kıyaslandığında, Cd_xTeO_y fazının pik konumlarında belirgin bir değişiklik olmadığı tespit edildi. $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ alaşımına ait piklerin ise yaklaşık 0,1°- 0,2° arasında daha düşük açılara doğru kaydığı gözlemlendi. Bu kayma, CdS katmanına CdCl₂ işlemi uygulanmasının, CdS/CdTe'nin üst yüzeyine yakın bölgedeki S miktarının azalmasına neden olduğunu göstermektedir. Örgü parametrelerinden yararlanarak alaşımdaki S-konsantrasyonu hesaplandığında, x değerinin ~0,08 olduğu belirlendi. Bu değer, CdS/CdTe örneği için hesaplanan değerden daha düşüktür. Bu sonuçlara dayanarak CdS'nin CdCl₂ ile ön ısıtılmasının, CdS ve CdTe katmanları arasındaki difüzyonu azalttığı söylenebilir.

Şekil 59 incelendiğinde, CdS/CdTe ve CdS/CdCl₂/CdTe örneklerinin 3 °'de ölçülen XRD spektrumlarında, $2\theta=23,8^\circ$; $39,4^\circ$ ve $46,5^\circ$ civarında Bragg yansıma piklerinin olduğu belirlendi. Bununla birlikte 39° civarındaki spektrum bölgesinde, omuzlu ve geniş pik noktaları görüldüğünden dolayı, ters evrişim süreci uygulandı (Şekil 61(a-b)). CdS/CdTe örneği için ters-evrişim işlemi sonucunda $39,34^\circ$ ve $39,47^\circ$ piklerin olduğu belirlendi. Bu piklerin sırasıyla kübik yapıda kristalleşen CdTe'ye (JCPDS Kart No: 00-015-0770) ve $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ alaşımına ait olduğu tespit edildi. Burada oluşan alaşımın örgü parametresi, Bragg yasası ve kübik kristal yapı denklemi aracılığıyla hesaplandı ($a=6,452\text{\AA}$). Hesaplanan değer, CdTe'nin örgü parametresinden yaklaşık % 0,45 daha küçük olduğu, buna dayanarak $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ alaşımındaki S-kompozisyonunun, % 4 civarında olduğu hesaplandı. CdCl₂ ön-ısıtıl işlemine tabi tutulan CdS/CdCl₂/CdTe örneğinin 3° geliş açısındaki XRD spektrumu incelendiğinde, pik konumlarının CdS/CdTe örneğine kıyasla yaklaşık 0,05° ile 0,10° sola doğru kaydığı gözlemlendi. Bu durum, CdS'ye CdCl₂ ön-ısıtıl işlemi uygulanmasının $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ alaşımını azalttığını göstermektedir. Belirlenen pik noktalarından alaşımdaki S-miktarının %3 civarında olduğu hesaplandı. Bunların yanında, 3°'de ölçülen spektrumlarda, $2\theta=26,52^\circ$ ve $43,97^\circ$ 'de minör (düşük şiddetli) piklerin var olduğu görüldü. Pik konumları incelendiğinde, bu minör piklerin CdS'nin kübik fazına karşılık geldiği tespit edildi (JCPDS Kart No: 00-010-0454).

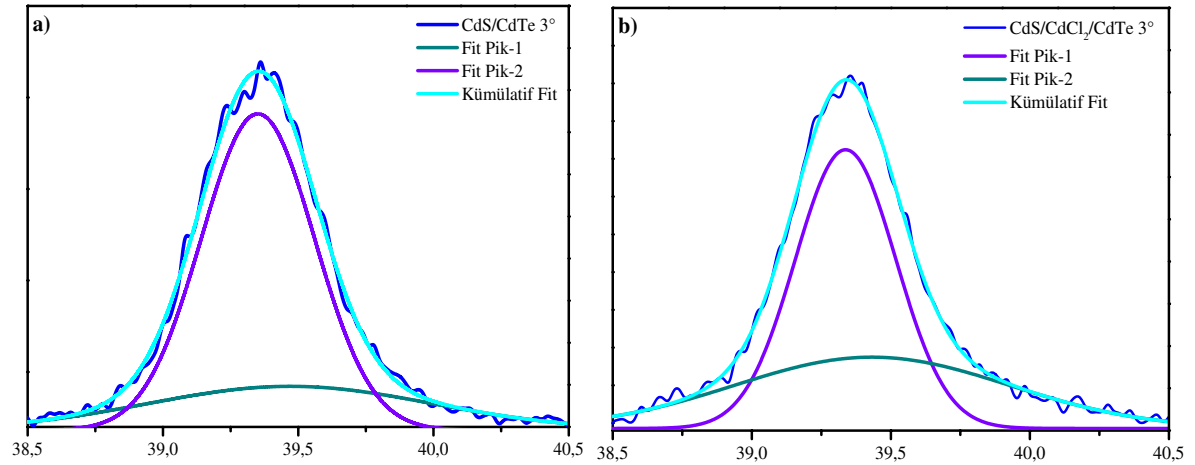
Li vd., CdTe/CdS örneğinde CdTe'nin iç kısımlarında birkaç nanometrede önemli derecede Te-S tabakalar-arası difüzyonun meydana geldiğini gözlemledi. Bu difüzyon, biriktirme sonrası CdCl₂ işleminin uygulanıp uygulanmadığına bağlı olmaksızın gerçekleşmektedir (Li vd., 2014). Ancak Terheggen vd. tarafından yapılan çalışmada, biriktirme sonrası uygulanan CdCl₂ ısıtıl işleminin, ara yüzey boyunca S ve Te'nin tabakalar-arası difüzyonunu desteklediği rapor edildi (Terheggen vd., 2004) . Bununla birlikte Te'nin CdS'ye difüzyonundan ziyade, S'nin CdTe'ye difüzyonunun baskın olduğu belirlendi (Dhere vd., 2008). Ancak tüm bu sonuçların aksine, bu tez çalışmasında CdS-CdTe ara bölgesine uygulanan CdCl₂ işleminin S-Te difüzyonunu azalttığı görüldü.



Şekil 59. a) 0,7°'de CdS/CdTe b) 0,7°'de CdS/CdCl₂/CdTe c) 3°'de CdS/CdTe d) 3°'de CdS/CdCl₂/CdTe örneklerinin XRD spektrumları (Ekte 23-25° arasındaki genişletilmiş XRD spektrumu görülmektedir)



Şekil 60. 0,7°'de ölçülen (a-b) CdS/CdTe, (c-d) CdS/CdCl₂/CdTe örneklerinin ters-evrişim işleminin sonucunda ayırt edilen piklerin gösterimi



Şekil 61. 3°'de ölçülen a) CdS/CdTe, b) CdS/CdCl₂/CdTe örneklerinin ters-evrişim işleminin sonucunda ayırt edilen piklerin gösterimi

CdSe/CdTe katmanlı yapısı, termal buharlaştırma yöntemi kullanılarak CdSe ve CdTe katmanlarının büyütülmesi ile elde edildi. Bu aşamada ara-bölgede (CdSe ile CdTe arasında) CdCl₂ işleminin etkisini incelemek için, örnekler CdCl₂ işlemi uygulanan ve uygulanmayan şekilde üretildi. CdSe/CdTe ve CdSe/CdCl₂/CdTe örneklerinde katmanlı yapı boyunca faz dağılımı ve alaşımlanma hakkında bilgi edinmek için 0,7° ve 3° geliş açılarında elde edilen XRD spektrumları, Şekil 62'de gösterilmektedir. Ayrıca şeklin ekinde, ana pik bölgesinin genişletilmiş XRD spektrumu görülmektedir. CdSe/CdTe örneğinin 0,7° geliş açısıyla ölçülen XRD spektrumunda, daha fazla alaşım ve aşamalı (graded) kompozisyon dağılımına işaret eden genişleyen pik noktaları gözlemlendiğinden dolayı, pikleri belirgin hale getirmek için ters-evrişim prosedürü uygulandı. Uygulanan ters-evrişim prosedürünün sonuçları, Şekil 65'de verilmektedir. Şekil 63 incelendiğinde 23,63°'de Bragg pikinin Cd_xTeO_y fazına karşılık geldiği tespit edildi. Bunun yanında 24,13°'de pikin CdSe_xTe_{1-x} (x~0,25) alaşımına ve 25,03°'de pikin ise CdSe_yTe_{1-y} (y~0,80) alaşımına ait olduğu belirlendi. Bu alaşımlardaki Se-konsantrasyonları ('x' ve 'y'), daha önceden ifade edilen kristal yapı ve örgü parametresi denklemlerinden hesaplandı. Ayrıca 25,63°'de CdSeO_x fazına karşılık gelen bir pikin daha olduğu görüldü (Bao vd., 2017). Bu sonuçlar, CdSe ile CdTe filmleri arasında büyük ölçüde tabakalar-arası difüzyonunun gerçekleştiğini göstermektedir.

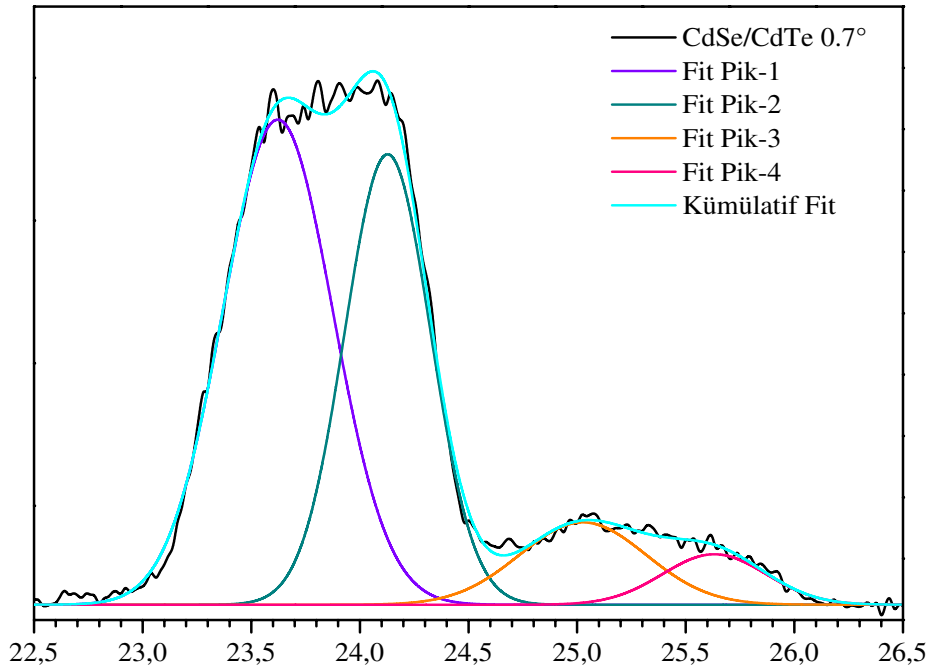
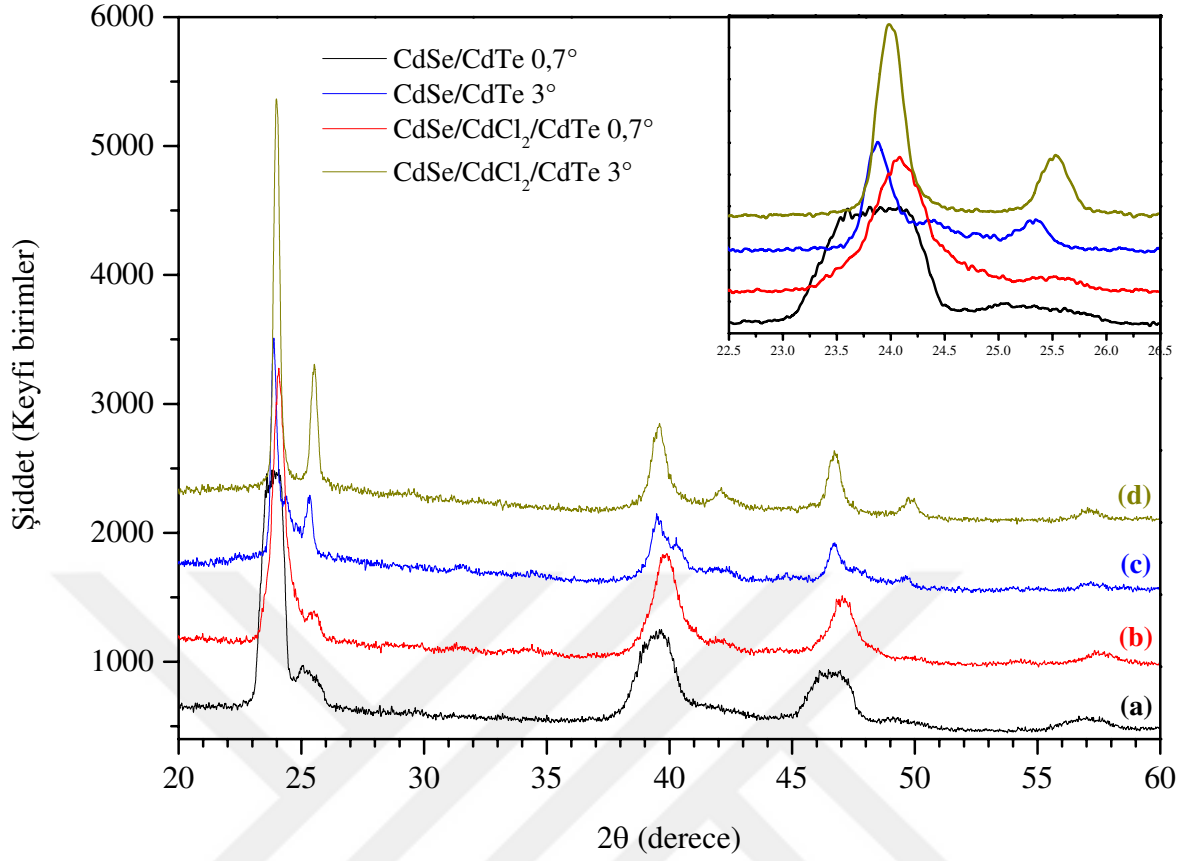
Şekil 62(b)'de görüldüğü gibi 0,7°'de CdSe/CdTe için gözlemlenen geniş pikler, CdSe/CdCl₂/CdTe örneğinde yerini daha keskin piklere bıraktı. 2θ= 24,06°; 39,85° ve 47,02°'de bulunan bu pik setinin x~0,20 olan bir CdSe_xTe_{1-x} alaşımına karşılık geldiği belirlendi. Aynı spektrumda 25,45°'de bulunan pikin ise CdSeO_x fazına ait olduğu tespit edildi (Bao vd., 2017). Bu bulgular, CdSe katmanının CdCl₂ ile ön ısıtılma işlemi tabi tutulduğunda CdSe-CdTe tabakaları arasındaki difüzyonun azaldığına işaret etmektedir.

CdSe/CdTe örneğinin 3° geliş açısı ile ölçülen spektrumu incelendiğinde (Şekil 62(c)), 23,88°; 39,49° ve 46,71° 'de; x~0,08 alaşımına karşılık gelen kübik CdSe_xTe_{1-x} fazının oluştuğu görüldü. Aynı spektrumda bulunan 25,31° ve 49,62° 'deki pik setinin ise kübik CdSe fazına karşılık gelmektedir (JCPDS Kart No: 00-019-0191). Ayrıca CdSe_xTe_{1-x}'in x~0,40 ile alaşımına karşılık gelen 24,38° ve 40,25°'de iki düşük şiddetli pikin daha oluştuğu belirlendi. Tüm bu sonuçlar, katmanlı yapı boyunca büyük ölçüde değişen Se konsantrasyonuna, dolayısıyla alttaki CdSe ile üstteki CdTe katmanları arasındaki karışmayı göstermektedir. CdSe/CdCl₂/CdTe örneğinin 3°'de ölçülen spektrumu incelendiğinde, 2θ=23,99°, 39,59° ve 46,72°'deki piklerin x~0,15 atomik oranı olan bir CdSe_xTe_{1-x} alaşımına karşılık geldiği tespit edildi. Aynı spektrumda 25,51° ve 42,10°'de gözlenen

piklerin ise CdSeO_x fazına ait olduğu belirlendi. Bu sonuçlar, CdS/CdTe örnekleri için elde edilen sonuçlar ile uyumludur.

Collins vd. yaptıkları çalışmada $\text{CdTe}(4 \mu\text{m})/\text{CdSe}$ iki-tabakalı yapılarını tavlایarak, CdSe kalınlığı değişiminin ($75\text{-}1500 \text{ \AA}$ arasında) örneklerin özellikleri üzerine etkisini incelediler. Sonuç olarak, tüm örneklerin farklı kompozisyonlara sahip aşamalı bir $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ alaşım yapısında olduğunu ve örnek yapısındaki CdSe 'nin kalınlığı arttıkça, filmlerdeki Se- konsantrasyonunun da arttığını kaydettiler (Collins vd., 2018). Baines vd., CdCl_2 işlemi uygulanmadan 610°C 'de tavlanan CdSe/CdTe ($4\text{--}6 \mu\text{m}$) katmanlı yapılarını incelediler. Analizlerin sonucunda, ısıt işlem uygulandıktan sonra CdSe fazının tamamen ortadan kalktığı gözlemlendi (Baines vd., 2020). Literatürdeki sonuçlar değerlendirildiğinde, bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçların, daha önceden rapor edilen bulguları desteklediği söylenebilir. Çünkü bu tez çalışmasında örnekler, hem 400°C gibi çok daha düşük bir sıcaklıkta tavlandı, hem de CdTe kalınlığı da (150 nm) literatürdeki kalınlıklara kıyasla çok daha küçük tutuldu.

Majid vd., termal buharlaştırma yöntemiyle ürettikleri CdSe/CdTe katmanlı yapısına Ar atmosferinde 400°C 'de ısıt işlem uyguladılar. XRD spektrumları, CdSe/CdTe katmanlı yapısında kübik CdTe ve hekzagonal CdSe fazlarının oluştuğunu, fakat bir alaşımlanmanın ise meydana gelmediğini gösterdi (Majid vd., 2019). Kumar vd. termal buharlaştırma yöntemini kullanarak farklı alt-tabaka (CdTe veya CdSe) kalınlıklarına sahip ince CdTe/CdSe katmanlı-yapılarını ürettiler. Çalışmanın sonucunda, örneklerin fakir bir kristallenmeye sahip olduğunu ve kübik CdTe ile hekzagonal CdSe fazlarının oluştuğunu rapor ettiler (Kumar ve Devadason, 2013). Bu sonuçlar, bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar ile farklılıklar göstermektedir. Bu durumun sebebi, üretim yöntemleri aynı olmasına rağmen, bu çalışmada örneklerin belirli bir altlık sıcaklığında üretilmesi, örnekler ö-tavlama işleminin uygulanması ve CdTe kaplandıktan sonra uygulanan son tavlama parametrelerinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır.



CdS/CdSe/CdTe ve CdS/CdSe/CdCl₂/CdTe katmanlı yapılarında, CdS tabakaları CBD yöntemiyle, CdSe ile CdTe tabakaları ise termal buharlaştırma yöntemiyle kaplandı. Bu katmanlı yapı boyunca faz yapısını incelemek için 0,7° ve 3° sabit geliş açılarında gerçekleştirilen XRD ölçümleri, Şekil 64'de gösterilmektedir. Önceki örneklerde olduğu gibi, 0,7° ve 3° geliş açısıyla ölçülen örneklerin XRD spektrumunda, farklı alaşım kompozisyonları ve faz dağılımının varlığını gösteren genişleyen ve/veya ikili pik noktaları gözlemlendiğinden dolayı, 23-28° ve 40-44° arasındaki spektrum bölgelerine ters-evrişim işlemi uygulandı. Uygulanan ters-evrişim işleminin sonuçları, Şek.(65-66)'de gösterilmektedir. Bununla birlikte, Şekil 64 incelendiğinde, spektrumların başka bölgelerinde de (örneğin 49° civarı) geniş piklerin var olduğu gözlenmektedir. Ancak bu bölgelerdeki pikleri ayırt etmek için ters-evrişim işlemi uygulanmadı. Çünkü spektrumlardaki en şiddetli piklerin bulunduğu iki bölgedeki pikleri tanımlamanın, katmanlı-film yapısı boyunca faz dağılımı ve alaşımlanma hakkında yeterli bilgi sağlayacağı düşünüldü.

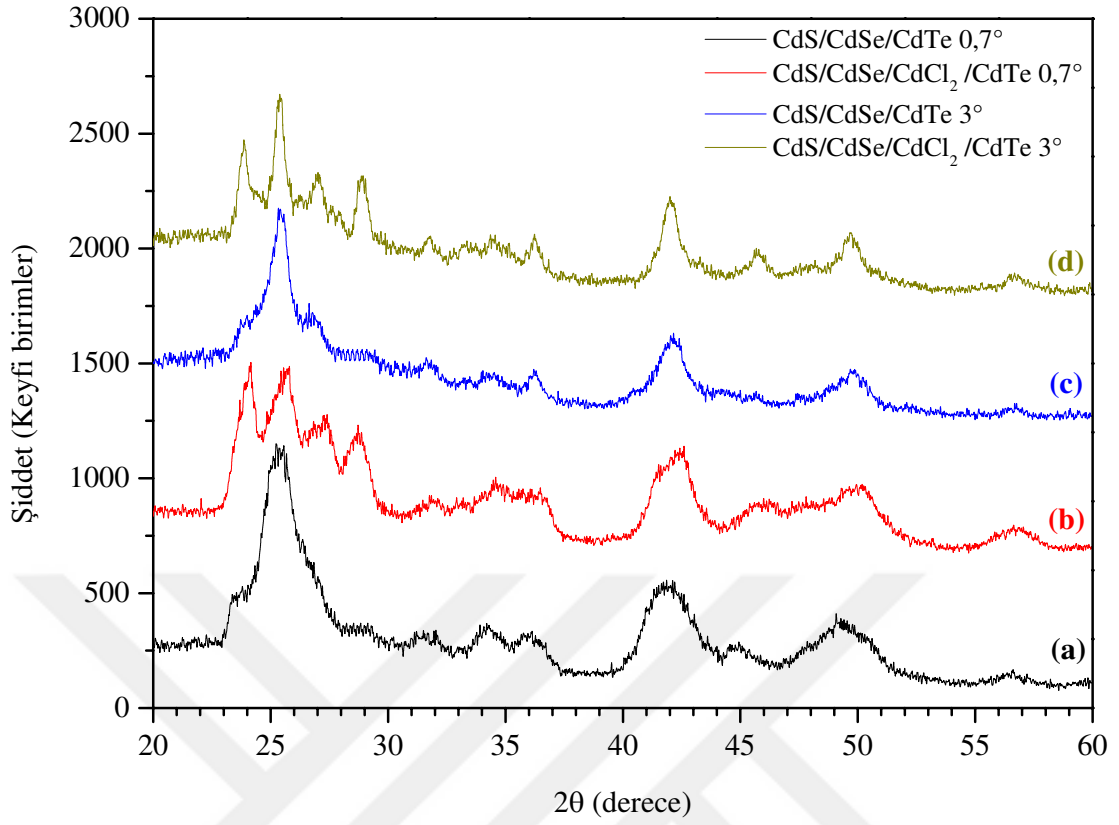
Şekil 65(a-b) incelendiğinde 0,7°'de ölçülen CdS/CdSe/CdTe örneğinin ters-evrişim sonuçlara göre $2\theta = 23,38^\circ; 23,93^\circ; 24,80^\circ; 25,42^\circ; 26,45^\circ; 41,11^\circ$ ve $42,07^\circ$ açılarında pikler oluşmaktadır. Ayrıca örneğin 20-60° aralığında ölçülen spektrumu (Şek.66(a)) incelendiğinde, ters-evrişim süreci ile elde edilen piklere ilaveten $31,5^\circ; 34,2^\circ; 36,0^\circ; 44,9^\circ$ ve $49,2^\circ$ civarında keskin olmayan piklerin olduğu da belirlendi. Bu pik pozisyonları incelendiğinde $23,38^\circ$ 'de bulunan pikin Cd_xTeO_y fazına (Abdul-Manaf vd., 2015; Ojo ve Dharmadasa, 2019) ve $23,93^\circ$ 'de bulunan pikin kübik yapıda kristalleşen CdSe_xTe_{1-x} ($x \sim 0,11$) alaşımına ait olduğu tespit edildi. Aynı spektrumda bulunan $24,80^\circ$ ve $41,11^\circ$ 'deki piklerin ise kübik CdSe_yTe_{1-y} alaşımına ait olduğu belirlendi. Spektrumda bulunan $49,2^\circ$ civarında bulunan pik de, bu alaşımın varlığını desteklemektedir. Bu alaşım, muhtemelen CdSe-CdTe ara yüzeyine yakın bir bölgede oluşmasından dolayı, alaşımdaki Se-konsantrasyonunun oldukça yüksek ($y \sim 0,66$) olduğu belirlendi. Aynı spektrumda bulunan $25,42^\circ$ ve $42,07^\circ$ 'deki piklerin yaklaşık %5 S-konsantrasyonuna sahip CdS_xSe_{1-x} alaşımına karşılık geldiği tespit edildi. Yine $49,2^\circ$ civarındaki geniş pik, CdS ile CdSe arasındaki bu alaşım oluşumunu desteklemektedir. Ayrıca spektrumdaki $26,45^\circ$ 'de bulunan pikin ise kübik CdS fazına ait olduğu görüldü (JCPDS Kart No: 00-010-0454). Son olarak aynı spektrumda bulunan $31,5^\circ$ ve $44,9^\circ$ 'deki piklerin CdTeO fazına (JCPDS Kart No: 98-003-5084) ve $34,2^\circ; 36,0^\circ$ 'daki piklerin ise TeO₂ fazlarına (JCPDS Kart No: 00-009-0433) karşılık geldiği belirlendi.

0,7°'de ölçülen CdS/CdSe/CdCl₂/CdTe örneğine ait spektrum incelendiğinde, faz yapısının belirgin bir şekilde değiştiği görüldü. Şekil 65(c-d) incelendiğinde, $2\theta=23,74^\circ$; $23,91^\circ$; $24,13^\circ$; $25,35^\circ$; $25,78^\circ$; $27,01^\circ$; $27,40^\circ$; $41,35^\circ$ ve $42,36^\circ$ açılarında Bragg yansıma piklerinin oluştuğu tespit edildi. Bu piklerin yanında, aynı spektrumda $31,8^\circ$; $34,5^\circ$; $36,5^\circ$; $46,0^\circ$ ve $50,2^\circ$ civarında keskin olmayan, geniş piklerin olduğu da görüldü. Bu pikler indislendiğinde $23,91^\circ$; $25,35^\circ$ ve $27,01^\circ$ açılarındaki piklerin, hekzagonal yapıda kristalleşen CdSe'ye ait olduğu belirlendi (JCPDS Kart No: 00-008-0459). CdSe'nin bu hekzagonal yapısı, spektrumdaki $46,0^\circ$ civarında bulunan pik ile de desteklenmektedir. Bunların yanında $24,13^\circ$; $25,78^\circ$; $27,40^\circ$; $42,36^\circ$ açılarındaki piklerin hekzagonal CdS_xSe_{1-x} fazına ait olduğu tespit edildi. Bu alaşım fazını, spektrumdaki $46,0^\circ$ ve $50,2^\circ$ civarındaki piklerin varlığı da desteklemektedir. Alaşımdaki 'S' konsantrasyonunun %34 civarında olduğu hesaplandı. Ters-evrişim işleminde ortaya çıkan $23,74^\circ$ ve $41,35^\circ$ konumundaki piklerin ise hekzagonal CdTe_zSe_{1-z} ($z\sim 0,22$) alaşımına karşılık geldiği görüldü. Son olarak aynı spektrumda bulunan $31,6^\circ$ 'deki pikin CdTeO fazına (JCPDS Kart No: 98-003-5084) ve $34,5^\circ$; $36,5^\circ$ 'deki piklerin ise TeO₂ fazlarına (JCPDS Kart No: 00-009-0433) ait olduğu belirlendi.

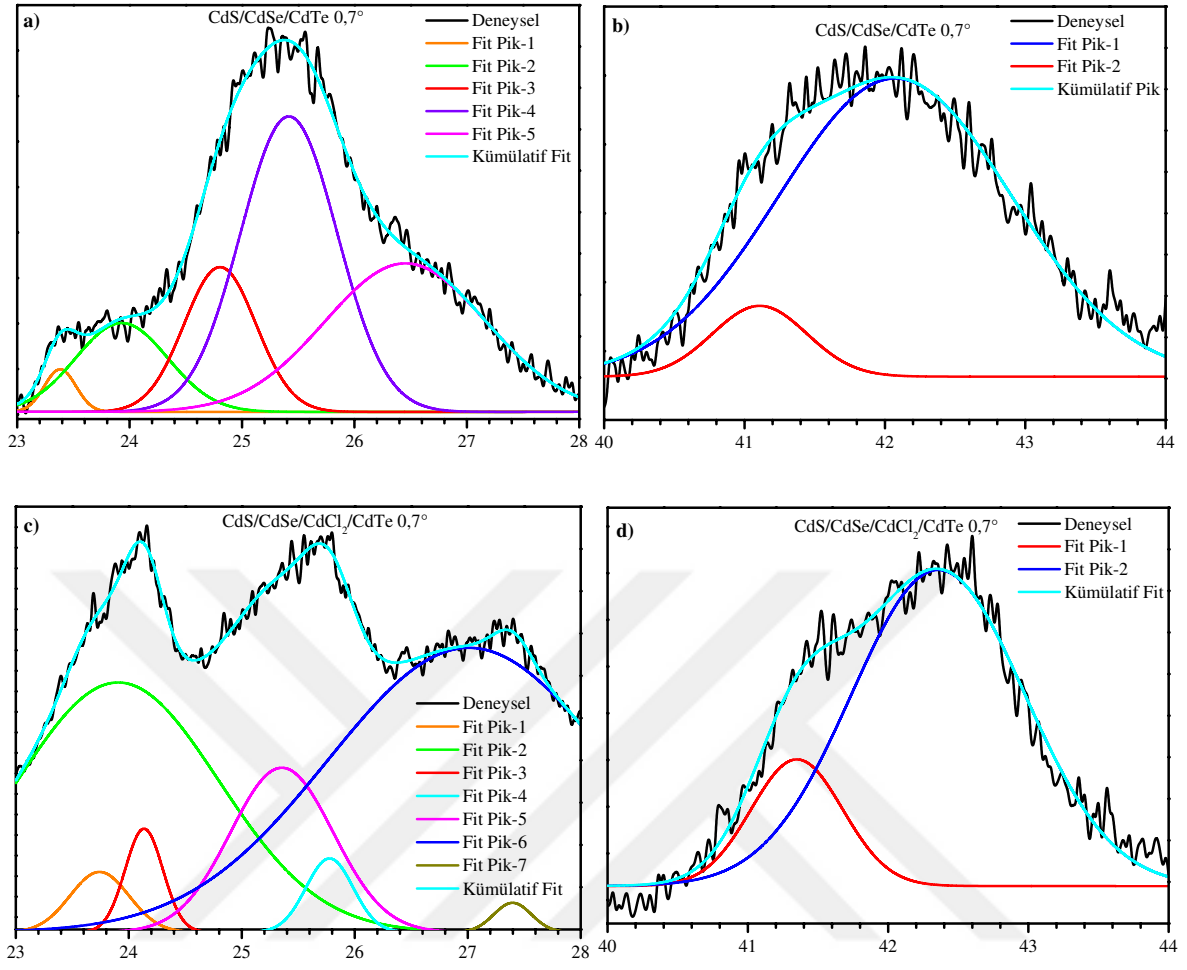
Örnekler 3° geliş açısıyla ölçüldüğünde 0,7° geliş açısındaki ölçülen spektruma benzer verilerin oluştuğu görüldü. Bununla birlikte, 0,7°'ye kıyasla pik pozisyonlarında kayma ve kristallenmede iyileşme olduğu da gözlemlendi. CdS/CdSe/CdTe örneğinin 3°'de ters-evrişim sonuçları incelendiğinde (Şekil 66(a-b)), $2\theta=24,03^\circ$; $25,27^\circ$; $25,50^\circ$; $26,74^\circ$; $40,44^\circ$; $41,78^\circ$ ve $42,20^\circ$ açılarındaki yansıma piklerinin oluştuğu tespit edildi. Bu piklerin yanında örneğin ana spektrumundan (Şekil 64) yararlanarak $31,8^\circ$; $34,4^\circ$; $36,2^\circ$ ve $49,8^\circ$ 'de belirgin piklerin oluştuğu da belirlendi. Pik konumları incelendiğinde $24,03^\circ$ ve $40,44^\circ$ 'deki piklerin kübik CdSe_xTe_{1-x} ($x\sim 0,18$) alaşımına ve $25,27^\circ$ ve $41,78^\circ$ 'de bulunan piklerin kübik CdTe_ySe_{1-y} ($y\sim 0,06$) alaşımına karşılık geldiği tespit edildi. Spektrumda $25,50^\circ$ ve $42,20^\circ$ 'de bulunan yansıma piklerinin yaklaşık %12 S atomik oranı ile kübik CdS_xSe_{1-x} alaşımına ait olduğu belirlendi. Bu alaşımı $49,8^\circ$ 'de bulunan yansıma pikinin varlığı da desteklemektedir. Aynı spektrumda bulunan $26,74^\circ$ 'de bulunan pikin CdSSe alaşımına ait olabileceği düşünülmektedir. Ancak, buradaki CdSSe alaşımının yüzeydeki (0,7°'de) kübik yapının aksine, hekzagonal yapıda kristallendiği tahmin edilmektedir. Bu durum uygulanan deneysel koşullarda, cam altlığı yakın taraftan itibaren yeniden-kristalizasyonunun (ve dolayısıyla faz değişimin) başladığını, ancak 10 dakika tavlama süresinin yetersiz olmasından dolayı yeniden kristallenme sürecinin tamamlanmadığını göstermektedir. Son olarak spektrumdaki

31,8°'deki piklerin CdTeO fazına (JCPDS Kart No: 98-003-5084) ve 34,4°; 36,2°'deki piklerin ise TeO₂ fazlarına (JCPDS Kart No: 00-009-0433) ait olduğu görüldü.

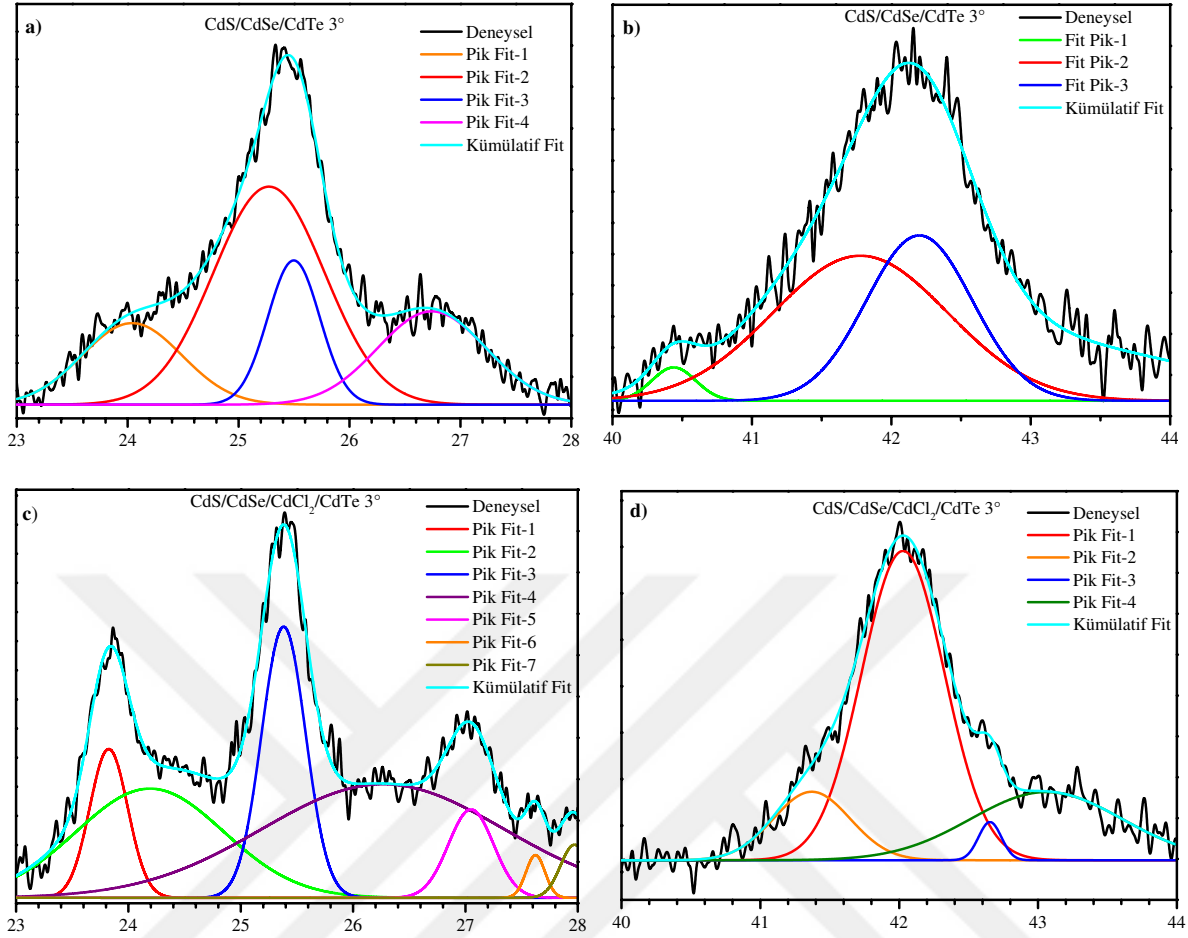
CdS/CdSe/CdCl₂/CdTe örneğinin 3°'de ölçülen spektrumu incelendiğinde, CdCl₂ işlemi uygulanmayan örneğe göre, verilerin belirgin bir şekilde değiştiği görüldü. Şek.68(c-d) incelendiğinde, $2\theta=23,82^\circ$; $24,19^\circ$; $25,36^\circ$; $26,27^\circ$; $27,05^\circ$; $27,62^\circ$; $27,97^\circ$; $41,37^\circ$; $42,03^\circ$; $42,65^\circ$ ve $43,06^\circ$ açılarında piklerin olduğu belirlendi. Bu pik takımının yanında ana spektrumdan $31,8^\circ$; $34,5^\circ$; $36,5^\circ$; $45,7^\circ$ ve $49,8^\circ$ civarında belirgin piklerin olduğu da görüldü. Bu pik konumları incelendiğinde $23,88^\circ$; $25,36^\circ$; $27,05^\circ$ ve $42,03^\circ$ açılarındaki piklerin, hekzagonal yapıda kristalleşen CdSe'ye karşılık geldiği tespit edildi (JCPDS Kart No: 00-008-0459). Hekzagonal CdSe'nin varlığı, spektrumdaki $45,7^\circ$ civarındaki pik ile de desteklenmektedir. Bunun yanında $24,19^\circ$; $27,62^\circ$ ve $43,06^\circ$ açılarında oluşan piklerin % 33 S-konsantrasyonlu hekzagonal CdS_xSe_{1-x} alaşımına ait olduğu belirlendi (JCPDS Kart No: 00-050-0721). Bu alaşım fazını, spektrumdaki $46,7^\circ$ civarındaki pikin varlığı da desteklemektedir. Aynı spektrumda görünen $26,27^\circ$; $27,97^\circ$ ve $42,65^\circ$ 'deki piklerin hekzagonal CdSe_zS_{1-z} ($z\sim 0,21$) alaşımına ait olduğu belirlendi. Ters-evrişim işleminde ortaya çıkan $41,37^\circ$ civarındaki gausiyen dağılıma sahip minör pikin hekzagonal CdTe_xSe_{1-x} ($x\sim 0,22$) alaşımına ait olduğu tespit edildi. Bu alaşımın varlığı $23,80^\circ$ civarında bulunan pikte desteklemektir. Çünkü hem bu alaşımdaki hem de CdSe'deki (002) pikinin açılal konumu birbirine çok yakındır. XRD ölçümlerinde ayırt edilemediği gibi, ters-evrişim işlemi ile de ayırt edilemeyebilmektedir. Önceki spektrumda olduğu gibi $31,80^\circ$ 'deki pikin CdTeO fazına (JCPDS Kart No: 98-003-5084) ve $34,50^\circ$; $36,50^\circ$ 'deki piklerin ise TeO₂ fazlarına (JCPDS Kart No: 00-009-0433) karşılık geldiği belirlendi. Baines vd. yaptıkları çalışmada, RF saçırma yöntemiyle CdS ve CdSe tabakalarını ve CSS yöntemi ile CdTe'yi büyütürerek CdS/CdSe/CdTe yapılarını ürettiler. Yapılan değerlendirmeler neticesinde, CdS ve CdSe katmanları arasında CdS_{1-x}Se_x alaşımının oluştuğunu ve bunun sonucunda da istenen Se/Te karışmasının (yani CdSe_xTe_{1-x} alaşımını) sınırlandığını gösterdiler. Bu sonuçlar, aygıt yapısında var olan CdS/CdSe tabakalarının etkileşimi sonucu oluşan CdS_{1-x}Se_x fazının, temel olarak hücre performanslarını sınırlayabileceğini göstermektedir (Baines vd., 2020). Bu sonuç, tez kapsamında elde edilen sonuçlarla uyum içindedir. Ancak Baines vd.'lerinin sonuçlarına ek olarak üretilen örneklerde katmanlı yapının derinliği boyunca farklı kompozisyonlara sahip CdSSe ve CdSeTe alaşımlarının varlığı saptandı. Bunların yanında filmlerin hem ön-tavlama işleminin ve hem de son-tavlama işleminin hava ortamında gerçekleştirilmesinden dolayı örneklerde oksit fazlarının olduğu da belirlendi.



Şekil 64. a) 0,7°'de CdS/CdSe/CdTe b) 0,7°'de CdS/CdSe/CdCl₂/CdTe c) 3°'de CdS/CdSe/CdTe d) 3°'de CdS/CdSe/CdCl₂/CdTe örneklerinin XRD spektrumları



Şekil 65. 0,7°'de ölçülen (a-b) CdS/CdSe/CdTe, (c-d) CdS/CdSe/CdCl₂/CdTe örneklerinin ters-evrişim işleminin sonucunda ayırt edilen piklerin gösterimi



Şekil 66. 3°'de ölçülen (a-b) CdS/CdSe/CdTe, (c-d) CdS/CdSe/CdCl₂/CdTe örneklerinin ters-evrişim işleminin sonucunda ayırt edilen piklerin gösterimi

Tabakalar-arası difüzyon sürecinin incelendiği tüm örneklerde belirlenen CdS_xTe_{1-x}, CdSe_xTe_{1-x} ve CdS_xSe_{1-x} alaşımlarının x değerleri cinsinden hesaplanan atomik oranları, Tablo 4'te özetlenmektedir. Bu verilerden aşağıdaki genel sonuçlar çıkarılabilir:

- Benzer deneysel koşullar altında CdSe-CdTe difüzyonu, CdS-CdTe difüzyonundan daha baskındır.
- CdS/CdSe örneklerinde 0,7°'lik geliş açısında yapılan ölçümler için daha yüksek x değerleri elde edildi. Bu durum, düşük açılı ölçümlerde üst katmanların etkisinin baskın olduğu, ancak yüksek açılı ölçümlerde ara yüzey ve altındaki katmanı daha baskın olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca S ve Se'nin tane sınırları boyunca hızla difüzyona uğradığı, tane sınırları ve katmanlı yapının üst yüzeyi dahil olmak üzere tüm yüzeylerde biriktiği bilinmektedir. CdTe filmleri, oldukça ince üretildiğinden dolayı katmanlı yapının üst yüzeyinde yüksek S veya Se kompozisyonu oluşturmak mümkündür.

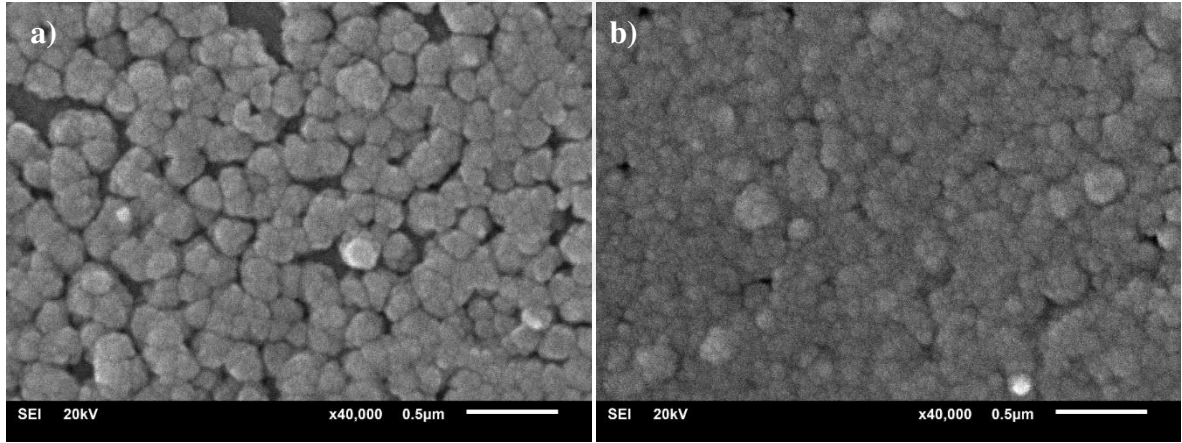
- c) Pencere tabakası-CdTe arasındaki difüzyon, pencere katmanının (CdS, CdSe veya CdS/CdSe) CdCl₂ ile ön ısıtılma işlemi tabi tutulmasıyla kontrol edilebilmektedir. CdCl₂ işleminin uygulanmadığı, CdS-CdTe ve CdSe-CdTe tabakaları arasındaki difüzyon için elde edilen sonuçlar, çok daha kalın CdTe katmanlarının kullanıldığı önceki çalışmalarda elde edilen bulgular ile uyumludur. Bununla birlikte, CdTe ince filmi biriktirilmeden önce CdCl₂ işleminin uygulandığı CdS veya CdSe katmanlarında, bir miktar artık (fazlalık) CdCl₂ kalmasına rağmen, CdTe ile difüzyonu büyük ölçüde azaltabileceği gösterildi. Buradaki kritik nokta, eğer pencere katmanına CdCl₂ işlemi uygulanırsa, katmanlı yapı tamamlandıktan sonra CdCl₂ varlığında ısıtılma işlemi uygulansa bile pencere katmanı-CdTe etkileşiminin güçlü olmayacağıdır.
- d) Katmanlı yapılardaki oksit fazları, CdCl₂ işlemi uygulanmasından bağımsız olarak, kırınım desenlerinde ortaya çıkmaktadır. Genellikle ‘pencere katmanı/CdTe’ yapısındaki güneş hücrelerinde, CdTe üzerine CdCl₂ kaplanıp hava atmosferinde ısıtılma işlemi uygulanması sonucu oksit fazlarının oluştuğu bilinmektedir. Güneş hücresi yapısında kontak atılmadan önce, bu istenmeyen fazları yok etmek için dağlama işlemi uygulanmaktadır. Ancak çalışmanın bu kısmında güneş hücresi yapısı yerine sadece katmanlı yapının ara yüzey özellikleri incelendiği için, dağlama işlemi uygulanmamıştır. Bu yüzden yapıda oksit fazlarının oluşması beklenen bir durumdur.

Tablo 4. 0,7 ° ve 3° geliş açılarında ölçülen XRD spektrumlarından elde edilen CdS_xTe_{1-x}, CdSe_xTe_{1-x} ve CdS_xSe_{1-x} alaşımlarındaki x-değerleri (S ve Se konsantrasyonları)

Numuneler	CdS _x Te _{1-x}		CdSe _x Te _{1-x}		CdS _x Se _{1-x}	
	0,7°	3°	0,7°	3°	0,7°	3°
CdS/CdTe	0,12	0,04	-	-	-	-
CdS/CdCl ₂ /CdTe	0,08	0,03	-	-	-	-
CdSe/CdTe	-	-	0,25 - 0,80	0,08-0,40	-	-
CdSe/CdCl ₂ /CdTe	-	-	0,20	0,15	-	-
CdS/CdSe/CdTe	-	-	0,11 - 0,66	0,18 - 0,94	0,05	0,12
CdS/CdSe/CdCl ₂ /CdTe	-	-	0,78	0,22	0,34	0,33 - 0,79

3.2.2. SEM Görüntüleri

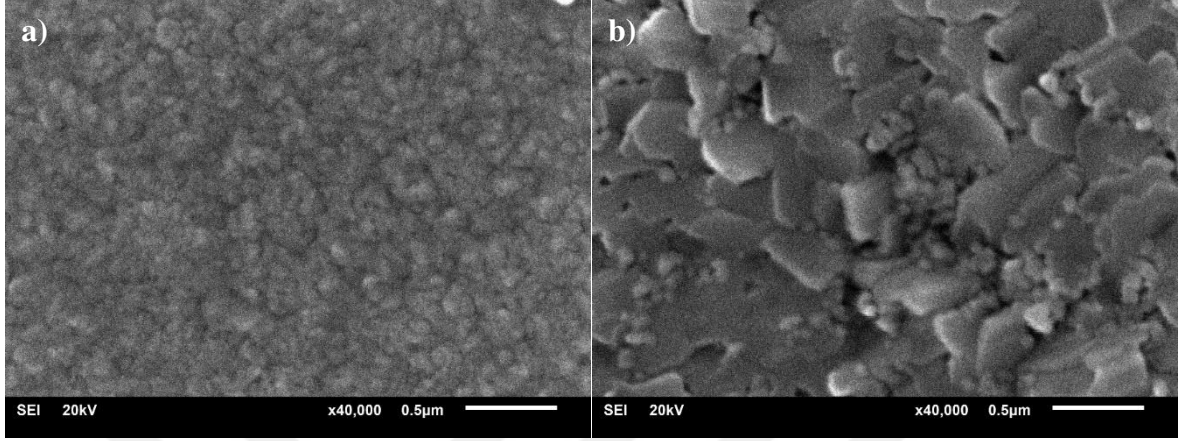
CdS/CdTe ve CdS/CdCl₂/CdTe katmanlı yapılarının yüzey görüntüleri, Şekil 67'de gösterilmektedir. CdS/CdTe örneği, yaklaşık 100 nm ile 250 nm arasında değişen tane büyüklüklerine sahip bir mikro yapı sergilemektedir. Ancak film morfolojisi, süreksiz bir yapıda görünmektedir. Gözlemlenen mikro yapı, esasında küresel taneler arasında boşluklar bulunan alttaki CBD yöntemi ile büyütülen CdS katmanına aittir. Şekil 67(b)'de görüldüğü üzere, CdS katmanına CdCl₂ işlemi uygulandıktan sonra, katmanlı yapının sürekliliğinin geliştiği belirlendi. Bu durum CdCl₂ işleminin, CdS katmanının geride bıraktığı boşluklarda biriktirilen CdTe filminin daha iyi çekirdeklenmesine yardımcı olacağını göstermektedir.



Şekil 67. a) CdS/CdTe, b) CdS/CdCl₂/CdTe katmanlı yapılarının SEM görüntüleri

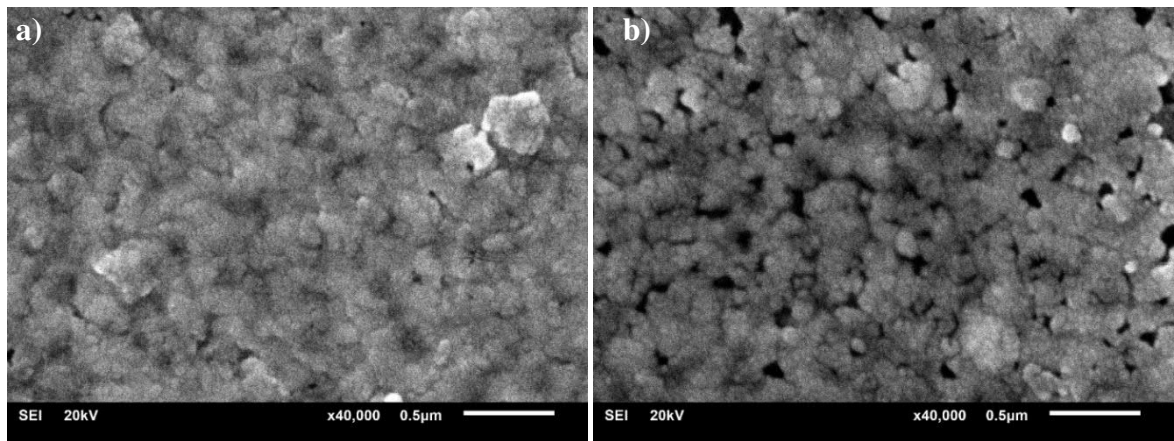
CdSe/CdTe ve CdSe/CdCl₂/CdTe katmanlı yapılarının SEM görüntüleri, Şekil 70'de gösterilmektedir. CdSe/CdTe örneğinin oldukça küçük ve homojen bir tane dağılımına sahip olduğu, tanelerin yüzey üzerinde kompakt ve sürekli bir yapıda olduğu gözlemlendi. CdSe/CdCl₂/CdTe örneğinin mikroyapısı ise CdCl₂ işlemi uygulanmayan örnekten çok farklıdır. CdCl₂ işleminden sonra tane büyüklüklerinin arttığı ve pul (flake) benzeri tanelerin oluştuğu görüldü. CdSe katmanına CdCl₂ ön işleminin etkisi, daha iyi erime (fusing) ve kristallik gösteren örneğin yüzey görüntülerinde belirgindir. Burada film morfolojisi, erimiş tanelerden oluşmaktadır. Bunun nedeni, seyreltik bir CdCl₂ çözeltisi kullanılmasına rağmen, alt tabakada bulunan CdSe filminin yüzeyinde kalan fazlalık CdCl₂'nin, CdTe filmine difüzyonundan kaynaklanabilir. Ancak üstteki CdTe morfolojisinin, alttaki CdCl₂ işlemi uygulanan CdSe katmanının mikro yapısının değişmesinden etkilenme olasılığı vardır. Fakat

her durumda, XRD verilerinden, artık CdCl_2 'nin bu tür potansiyel etkisinin CdSe ve CdTe katmanları arasındaki herhangi bir etkileşimi teşvik etmediği açıkça görüldü.



Şekil 68. a) CdSe/CdTe b) $\text{CdSe/CdCl}_2/\text{CdTe}$ katmanlı yapılarının SEM görüntüleri

CdS/CdSe/CdTe ve $\text{CdS/CdSe/CdCl}_2/\text{CdTe}$ örneklerine ait yüzey görüntüleri, Şek.72 ile verilmektedir. CdS/CdSe/CdTe örneğinin SEM görüntüsü incelendiğinde, irili-ufaklı tanelerin düzgün bir şekilde yüzeye dağıldıkları, oldukça kompakt bir yüzey morfolojisine sahip örneğin sürekli yapıda olduğu görüldü. CdCl_2 uygulandıktan sonra, yüzey morfolojilerinde belirgin bir değişim gözlemlendi. Küresel tanelerin daha belirgin hale geldiği ve boşlukların oluştuğu gözlemlendi. Büyüme sürecindeki ve tavlama esnasındaki gerilmeler sonucu, tanelerde kısmi erimeler (grain fusing) ve taneler arasında süreksizlikler oluştuğu belirlendi.



Şekil 69. a) CdS/CdSe/CdTe b) $\text{CdS/CdSe/CdCl}_2/\text{CdTe}$ katmanlı yapılarının SEM görüntüleri

3.2.3. EDS Ölçümleri

CdS/CdTe, CdSe/CdTe ve CdS/CdSe/CdTe katmanlı yapılarının EDS ölçüm sonuçları, Tablo 5 ile verilmektedir. Bu tablodan, Cd'nin toplam kalkojenlere (S, Se, Te) oranının 0,73 ile 0,95 arasında değiştiği görülmektedir. Deneysel hata göz önüne bulundurulduğunda, CdS/CdTe ve CdSe/CdTe örneklerinin neredeyse stokiometrik olduğu; ancak CdS/CdSe/CdTe örneklerinde azalan Cd konsantrasyonundan dolayı stokiometriden sapmaların olduğu belirlendi. Bununla birlikte, ölçülen S değerleri (%16,6 ve %18,5), filmlerin hedeflenen kalınlıkları için hesaplanan değerlerden (S~%23,9) daha düşüktür. CdS içeren CdS/CdTe numunelerinde düşük S miktarı kısmen büyütme yöntemine bağlı olabilir. CBD ile büyütülen CdS katmanlarının, S'ye ek olarak (O, OH) türleri içerdiği bilinmektedir (Metin ve Esen, 2003). Ayrıca CBD işlemindeki kalınlık kontrolü, buharlaştırma tekniklerindeki kadar iyi olmadığından dolayı, S-miktarı beklenenden daha az çıktığı tahmin edilmektedir. CdSe/CdTe katmanlı yapıları için ölçülen ve hesaplanan değerler, çok daha uyumludur. CdSe/CdTe ve CdSe/CdCl₂/CdTe örneklerinde, deneysel olarak ölçülen % 20,5 ve 24,2'lik Se'nin atomik oranları verileri, hesaplanan % 22,7 Se konsantrasyonu ile uyumludur. CdS/CdSe/CdTe örneklerinde EDS analizi ölçülen S ve Se değerleri, kalınlığa bağlı olarak hesaplanan teorik konsantrasyon değerleri (S için %12,2 ve Se için %11,1) ile uyumlu olarak değişirken; Te'nin değerinde ise ölçülen değer, hesaplanan (%26,7) değerden daha yüksek olduğu belirlendi.

Tablo 5. (CdS, CdSe)/CdTe katmanlı yapılarındaki Cd, S, Se ve Te'nin atomik oranlarını gösteren EDS sonuçları

Numune	Cd (%)	Te (%)	Se (%)	S (%)	Cd/(S+Se+Te)
CdS/CdTe	47,9	35,5	-	16,6	0,92
CdS/CdCl ₂ /CdTe	48,0	33,5	-	18,5	0,92
CdSe/CdTe	48,6	30,9	20,5	-	0,95
CdSe/CdCl ₂ /CdTe	47,7	28,1	24,2	-	0,91
CdS/CdSe/CdTe	42,2	35,2	12,2	10,4	0,73
CdS/CdSe/CdCl ₂ /CdTe	45,1	34,5	9,9	10,5	0,82

3.3. CdS/CdSe Pencere Katmanlı Güneş Hücrelerinin Karakterizasyonu

CdS/CdSe, CdS ve CdSe pencere katmanlarına sahip üç farklı tipte güneş hücresi üretildi. Pencere katmanlarının toplam kalınlığı sabit tutuldu. Bir başka ifadeyle, ilk iki yapıdaki CdS ve CdSe katmanlarının her biri 100 nm kalınlığındayken; CdS/CdSe ikili yapısındaki CdS ve CdSe katmanlarının kalınlıkları 50 nm'dir. Tüm aygıt yapılarındaki CdTe kalınlıkları ise 4,5-5 μm olarak ayarlandı. Pencere katmanları büyütüldükten sonra cam/F:SnO₂/CdS, cam/F:SnO₂/CdSe ve cam/F:SnO₂/CdS/CdSe katmanlı yapıları hava ortamında 10 dakika boyunca 400°C'de ısıtılma tabi tutuldu. CdTe tabakası kaplandıktan sonra, tüm yapıların CdCl₂ varlığında 400°C'de 30 dakikalık tavlama işlemi gerçekleştirildi. Son olarak Cu/Au kontakları, daha önce açıklanan prosedürler izlenerek kaplandı.

Aydınlatma altında üç farklı yapıya sahip güneş hücrelerinden elde edilen akım yoğunluğu-voltaj (J-V) eğrileri, Şek.70'de gösterilmektedir. Bu güneş hücrelerinin normalize kuantum verimi (EQE) ölçümleri, Şekil 71'de verilmektedir. Tablo 6'da, J-V eğrilerinden belirlenen tüm güneş pili parametreleri gösterilmektedir. Tablodan görüldüğü gibi, CdS/CdSe, CdS ve CdSe pencere katmanlarına sahip hücrelerin verimleri sırasıyla % 11,47, %10,12 ve % 8,39 olarak bulundu. Tabloda verilen J_{sc} değerleri, EQE verilerinin integre edilmesiyle hesaplanan J_{sc} değerleri ile uyumlu olarak değişmektedir.

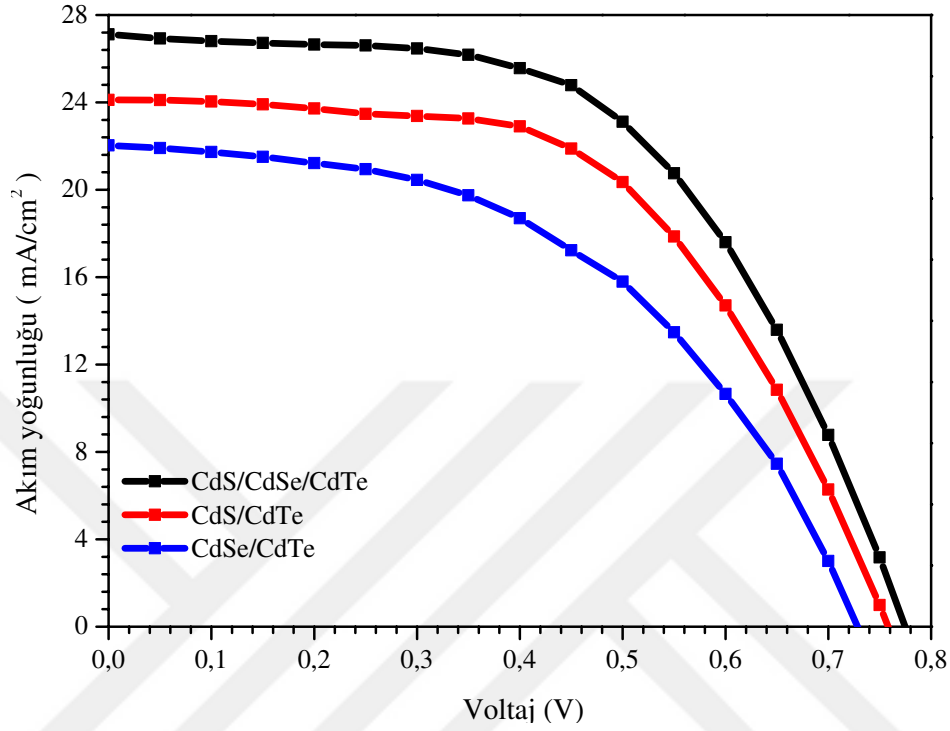
EQE verilerinden görüldüğü üzere, CdSe/CdTe hücresinin kısa dalga boyu yanıtı çok zayıftır. Ancak uzun dalga boyu yanıtı, CdS/CdTe cihazının bant kenarının ötesine kadar uzanmaktadır. Bu durum, p-n eklemine yakın bir CdSeTe alaşımının varlığını göstermektedir. Bu alaşım tabakası, daha uzun dalga boylu ışığın soğurularak serbest taşıyıcı üretimine katkıda bulunmasını sağlamaktadır. CdSe/CdTe hücresinin kısa dalga boyu yanıtı, uygulanan deneysel koşullarda CdSe kalınlığının oldukça yüksek olduğunu ve TCO/CdSe ara yüzeyinin yakınında toplanan akıma çok fazla katkıda bulunmayan ölü bir CdSe bölgesi olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda bu hücrenin düşük voltaj değeri, alan-destekli taşıyıcı toplanmasının zayıf olduğunu göstermektedir.

CdS/CdTe güneş hücresi, beklenen EQE davranışını gösterdi. Aygıt yapısında daha yüksek geçirgenliği olan CdS penceresinin CdSe/CdTe hücresine kıyasla kısa dalga boyu yanıtını geliştirdiği görüldü. Uzun dalga boyu yanıtı ise, CdSe-CdTe katmanlı yapısına kıyasla, CdS-CdTe tabakaları arasındaki sınırlı reaksiyon nedeniyle daha zayıftır. Bu güneş hücreleri arasında CdS/CdSe/CdTe hücresi, en yüksek akım yoğunluğu ve voltaj değerlerine sahiptir. Bu hücrenin EQE verilerinde hem kısa dalga boyu hem de uzun dalga boyu

yanıtının iyileştiği gözlemlendi. Kısa dalga boyu yanıtının iyileşmesi, bu aygıt için kullanılan CdS kalınlığının (50 nm), CdS(100nm)/CdTe hücresinden daha küçük olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca CdTe tabakası kaplandıktan sonra uygulanan CdCl₂ ısıtma işlemi sırasında, CdSe-CdTe arasında oluşan alaşımlanma nedeniyle, CdS'nin etkin kalınlığının daha da azaldığı söylenebilir. Uzun dalga boyu bölgesindeki bant kenarının CdS/CdTe hücresine kıyasla yaklaşık 0,05 eV kaydığı belirlendi. Bu durum, uygulanan deneysel koşullar altında alaşımdaki Se konsantrasyonunun %20-25 civarında olduğunu göstermektedir. CdS/CdSe/CdTe ve CdSe/CdTe hücrelerindeki CdSe katmanlarının kalınlıkları sırasıyla 50 nm ve 100 nm olduğundan, CdSe/CdTe hücresinde özellikle kısa dalga boyu bölgesinde akım yoğunluğu değerinin azalmasına neden olan en az 50 nm kalınlığında reaksiyona girmeyen CdSe tabakası olduğu tespit edildi. Bu çalışmada gözlenen Se'nin alaşımlanması yoluyla CdTe hücresinin uzun dalga boyu yanıtının iyileştirilmesi, daha önce başka gruplar tarafından da rapor edildi (Paudel ve Yan, 2014; Yang vd., 2016b).

Ayrıca aynı deneysel koşullarda CdS/CdCl₂, CdSe/CdCl₂ ve CdS/CdSe/CdCl₂ pencere katmanlarına sahip güneş hücresi CdTe katmanları depolanmadan önce, hava ortamında 10 dakika boyunca 400°C'de CdCl₂ işlemi uygulanan CdS, CdSe ve CdS/CdSe pencere katmanlarına sahip güneş hücresi yapıları üretildi. Bu hücrelerin, yukarıda deneysel prosedürleri ayrıntılı olarak açıklanan hücrelerden tek farkı, CdS/CdSe, CdS ve CdSe pencere tabakaları kaplandıktan sonra CdCl₂ işleminin uygulanmasıdır. Geriye kalan bütün üretim aşamaları, diğer hücreleri ile aynıdır. Ancak bu CdS/CdCl₂/CdTe, CdSe/CdCl₂/CdTe ve CdS/CdSe/CdCl₂/CdTe yapısındaki hücrelerin tümü, %7'nin altında verimlilik ile zayıf bir performans sergiledi. Aslında bu durum, uygulanan güneş hücresi üretim şartlarında, CdTe biriktirilmeden önce pencere katmanlarının kristalleşmesinin olumsuz etkiye neden olduğunu göstermektedir. Çünkü iki katmanlı ve üç katmanlı yapılar hakkındaki bulgular, CdCl₂ işleminin istenmeyen CdS-CdSe etkileşimini arttıracaklarını, ancak istenen CdSe-CdTe etkileşimini azaltacağını gösterdi. Mathew vd., CdS/CdTe hücresinde CdS katmanına CdCl₂ ön ısıtma işlemi uygulanmasının, CdTe kaplandıktan sonra uygulanan CdCl₂ işlemi sırasında CdS-CdTe katmanları arasındaki difüzyonu/alaşımlanmayı azalttığını ve bunun sonucunda da hücrenin akım yoğunluğu değerinin düştüğünü rapor ettiler (Mathew vd., 2012). Ayrıca CdS'nin tükenmemesinden ve daha da incelmemesinden dolayı, kısa dalga boyu yanıtı da istenilen düzeyde olamayabilmektedir. Sonuçlar, CdTe biriktirilmeden önce pencere katmanlarına CdCl₂ işlemi uygulanmasının, CdTe ile pencere katmanları arasındaki alaşımlanmayı azaltarak güneş hücresinin performansını düşürdüğünü göstermektedir. Bu

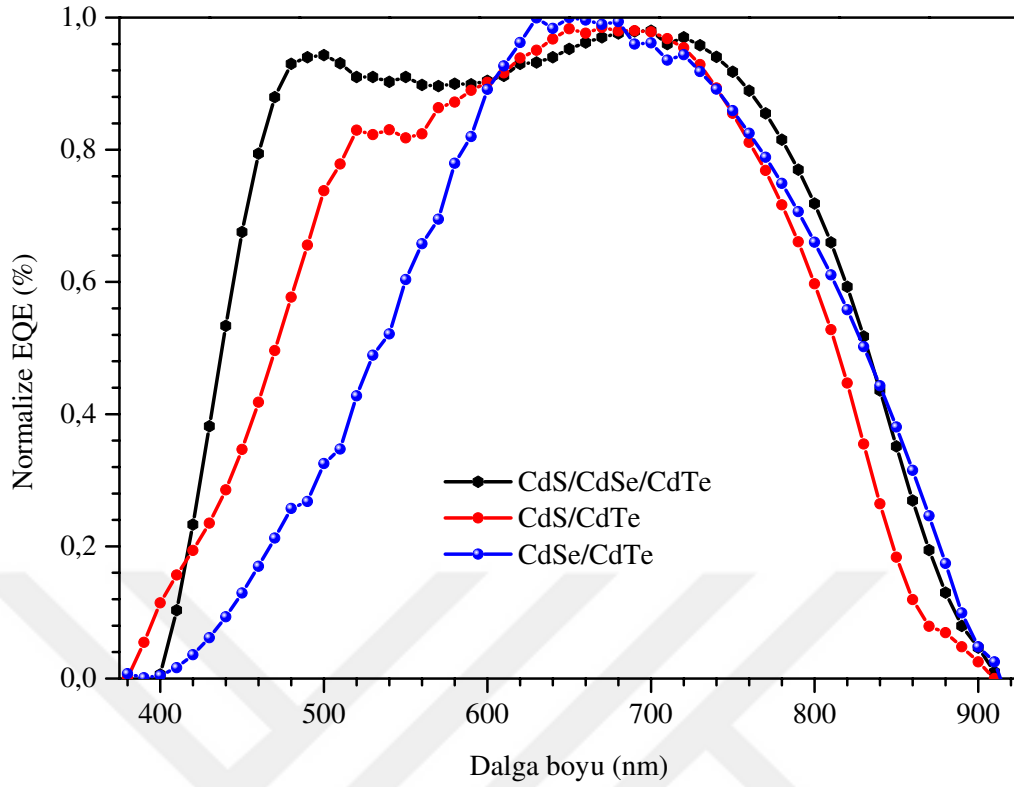
sonuç, daha önceden sunulan (CdS,CdSe)/CdCl₂/CdTe örneklerinin XRD spektrumları ile elde edilen bulgular ile de uyumludur.



Şekil 70. Üç farklı yapıya sahip güneş pillerinin aydınlatılmış J-V özellikleri

Tablo 6. Güneş hücrelerinin parametreleri

Numune	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF	Verim (%)
CdS/CdSe/CdTe	0,77	27,10	0,55	11,47
CdS/CdTe	0,75	24,10	0,56	10,12
CdSe/CdTe	0,72	22,00	0,53	8,39



Şekil 71. Şekil 70'deki üç hücreden toplanan kuantum verimi eğrileri

3.4. Se-Katkısının Soğurma Katmanları Üzerine Etkisinin İncelenmesi

3.4.1. XRD Spektrumları

Farklı Se-konsantrasyonlarına sahip $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ ($x=0-1$) ince filmlerinin 20° - 60° arasındaki XRD spektrumları, Şekil 72'de gösterilmektedir. CdTe örneğinin XRD spektrumu (Şek.74(a)) incelendiğinde, $2\theta=23,77^\circ$; $39,28^\circ$; $46,48^\circ$ ve $56,86^\circ$ konumlarında yansıma piklerinin olduğu, bu piklerin CdTe'nin kübik kristal yapısının (111), (220), (311) ve (400) düzlemlerine karşılık geldiği tespit edildi (JCPDS Kart No: 00-015-0770).

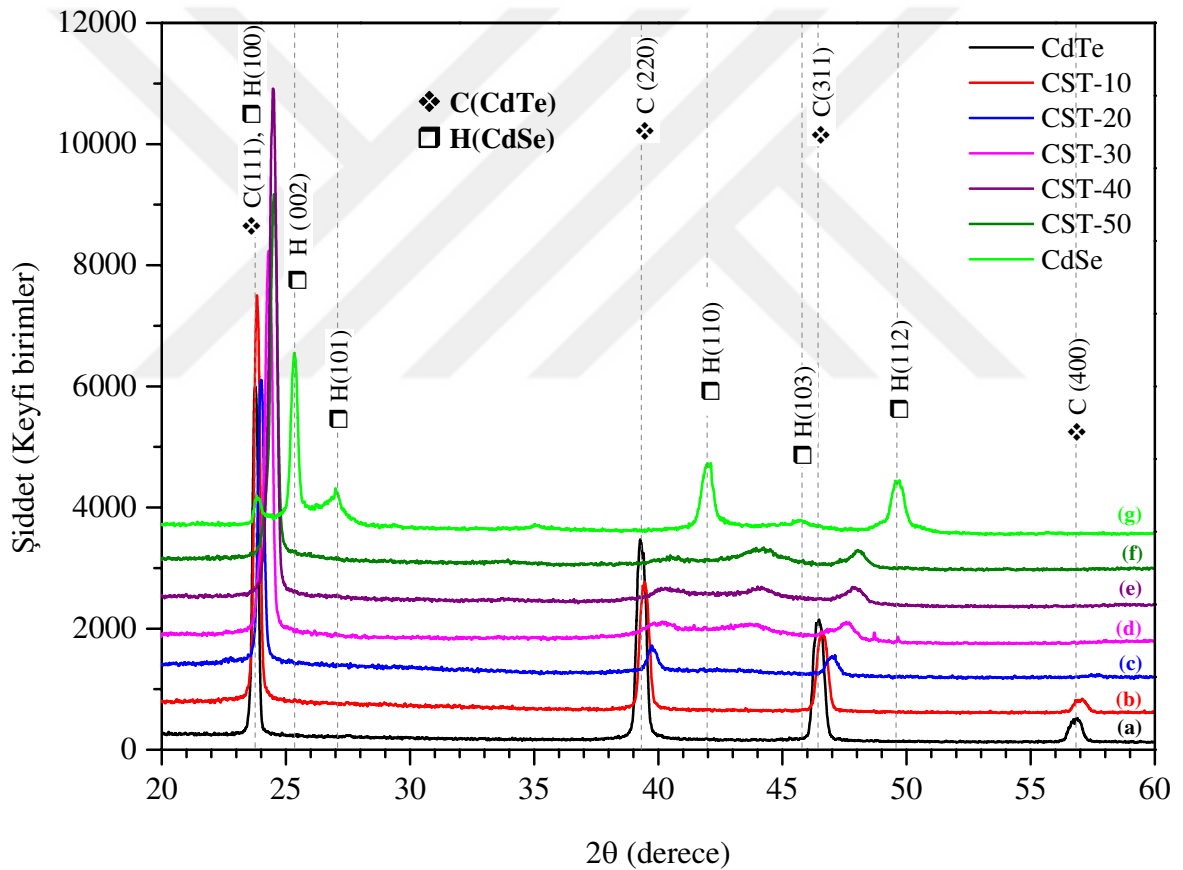
En düşük Se-katkılı $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ (CST-10) örneği incelendiğinde, $2\theta=23,84^\circ$, $39,45^\circ$, $46,59^\circ$ ve $56,95^\circ$ de yapısal piklerin ortaya çıktığı belirlendi. CdTe ince filmi ile kıyaslandığında, bu pik konumlarının CdTe'nin hafifçe sağ tarafında olduğu tespit edildi. Açısal konumlar göz önüne alındığında, bu pik setinin kübik yapıda kristalleşen CdSeTe alaşımına ait olduğu belirlendi. Diğer $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ örnekleri incelendiğinde, Se-konsantrasyonu arttıkça (CST-10'dan CST-50 örneğine doğru), pik setinde yüksek açılara doğru kaydığı görüldü. Pik konumlarındaki bu kayma, $23-26^\circ$ arasındaki genişletilmiş

normalize-XRD spektrumunda da açıkça görülmektedir (Şekil 73). Şekil incelendiğinde, CST-10 örneğinde $23,84^\circ$ 'de bulunan ana pikin CST-20 örneğinde $24,00^\circ$ 'ye, CST-30 örneğinde $24,31^\circ$ 'ye, CST-40 örneğinde $24,48^\circ$ 'ye ve CST-50 örneğinde $24,53^\circ$ 'ye kaydığı belirlendi.

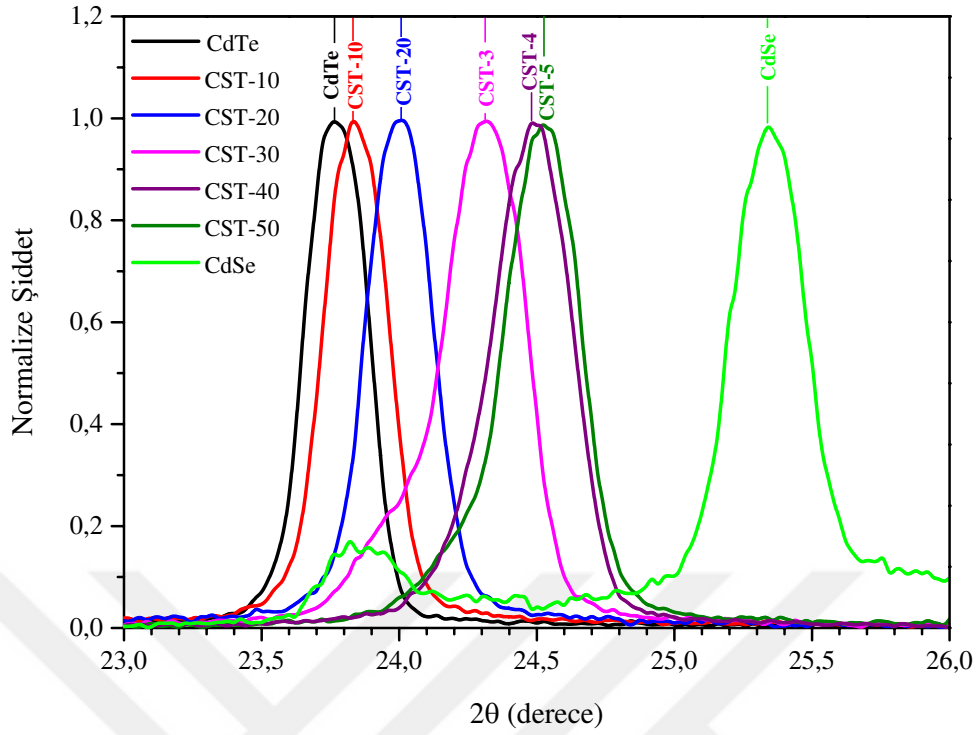
$\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ alaşımlarının kristal yapısı incelendiğinde, CST-10 ve CST-20 örneklerinin kübik yapıda olduğu tespit edildi. Ancak, CST-30 örneğinden itibaren kristal yapısının kübik fazdan karışık faza (hekzagonal+kübik) dönüştüğü görüldü. Bu faz dönüşümü, $38-49^\circ$ arasında genişletilmiş XRD spektrumundan da net bir şekilde görülmektedir (Şekil 74). Şekil incelendiğinde, CST-20 örneğinde $39,74^\circ$ ve $47,04^\circ$ 'de Bragg yansıma piklerinin ortaya çıktığı tespit edildi. JCPDS kartları incelendiğinde, bu piklerin kübik $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ alaşımına ait (220) ve (311) düzlemlerine karşılık geldiği belirlendi (JCPDS Kart No: 00-041-1324). Ancak CST-30 örneğinde $40,20^\circ$ ve $47,62^\circ$ konumlarında, kübik CdSeTe (JCPDS Kart No: 98-062-0445) alaşımına ait pikler açığa çıkarken; aynı spektrumda $43,60^\circ$ 'de bir pik daha görülmektedir. Bu pikin, farklı kristal yapılarında benzer pik konumlarının olduğu örneklerde, hekzagonal fazı kübik fazdan ayıran en önemli pik olan (103)'e karşılık geldiği tespit edildi (Bacaksız, 2002). CST-40 ve CST-50 örneklerine ait spektrum incelendiğinde, Se-katkesi ile beraber açılal pik konumlarının sağa doğru kaydığı ve karışık faz yapısının (kübik + hekzagonal) oluştuğı belirlendi. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, başka gruplar tarafından yapılan çalışmalar ile de desteklenmektedir. Muthukumarasamy vd. yaptığı çalışmada, sıcak duvarlı (hot wall) biriktirme yöntemiyle ürettikleri $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ alaşımlarında $x=0,4$ 'e kadar kübik faz, $x=0,4-0,6$ arasında karışık faz ve $x=0,7-1$ arasında ise hekzagonal faz yapısının oluştuğunu gözlemledi (Muthukumarasamy vd., 2009). Swanson vd., CSS yöntemiyle ürettikleri CdSeTe alaşımlarının, $x=0,35$ 'e kadar kübik yapıda iken, $x=0,6$ 'dan sonra hekzagonal yapıya dönüştüğünü kaydettiler (Swanson vd., 2017). Bu sonuçlar ışığında, CdSeTe 'nin kristal yapısının alaşımdaki atomik oranlarına bağılı olarak; kübik, hekzagonal ya da karışık fazda (kübik+hekzagonal) olabileceğı söylenebilir. $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ alaşımlarında Se-miktarı arttıkça (CST-10'den CST-50'e), örgü parametresi de $6,46 \text{ \AA}$ 'dan $6,28 \text{ \AA}$ 'a kadar azalmaktadır. Hem örgü parametresindeki azalma hem de pik konumlarındaki sağa doğru kayma, biriktirme ve biriktirme sonrası ısıı işlemler sırasında, Se-atomlarının CdTe 'de difüzyona uğrayarak Te-atomları ile yer değıştirdiğini göstermektedir. Çünkü Se-atomlarının iyonik yarıçapının ($0,50 \text{ \AA}$), Te-atomlarının iyonik yarıçapından ($0,97 \text{ \AA}$) çok daha küçük olmasından dolayı, örgü parametreleri azalmaktadır. Bragg yasasına göre, örgü

parametresi ile açılal pik konumu ters orantılı olarak değiştiğinden dolayı, pik konumlarının da daha yüksek açılara (sağa doğru) kayması beklenen bir durumdur.

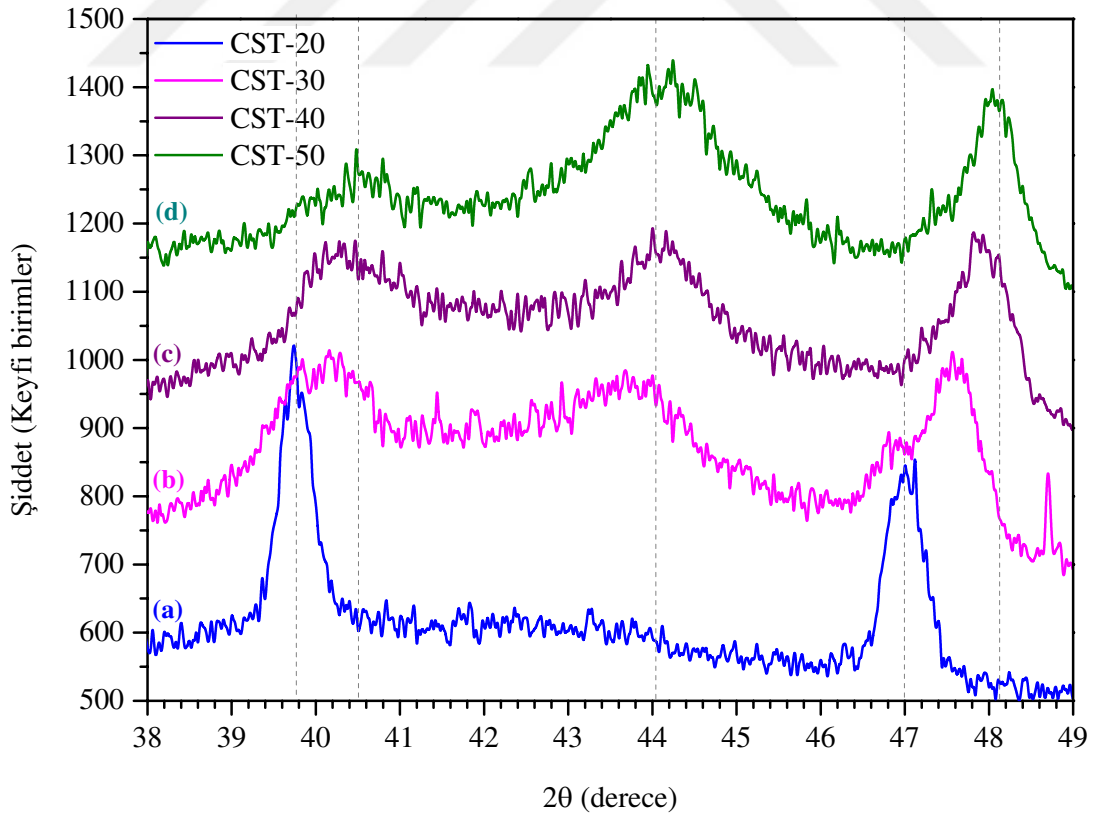
CdSe filminin XRD spektrumu incelendiğinde (şekil 72(g)), CdSe'nin hekzagonal yapısına ait (100), (002), (101), (110), (103) ve (112) düzlemlerine karşılık gelen piklerin ortaya çıktığı belirlendi (JCPDS Kart No: 00-008-0459). Geęmiř yıllarda yapılan bazı çalışmalarda, vakumda buharlaştırma ile üretilen CdSe filmlerinin kübik yapıda büyüdüğü rapor edildi (Priya vd., 2016; Purohit vd., 2015). Ancak bu çalışmada ise, 250°C altlık sıcaklığı ve 650°C biriktirme sıcaklığında üretilen CdSe filmlerinin daha kararlı olan hekzagonal fazda büyüdüğü görüldü.



şekil 72. a) CdTe, b) CST-10, c) CST-20, d) CST-30, e) CST-40, f) CST-50 ve g) CdSe alaşımlarının XRD spektrumları



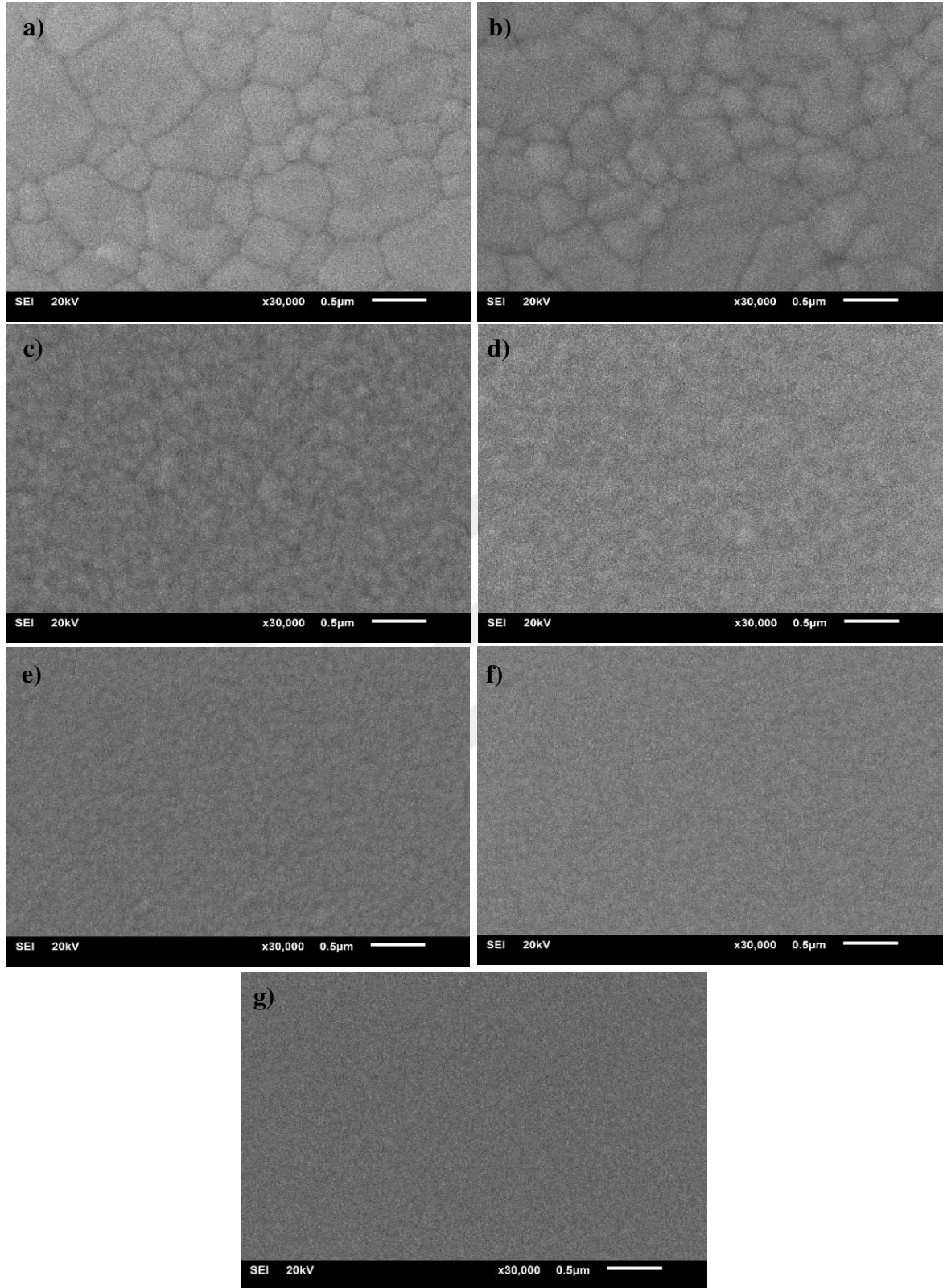
Şekil 73. $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ alaşımlarının $23\text{-}26^\circ$ arasında genişletilmiş XRD spektrumları



Şekil 74. a) CST-20 b) CST-30 c) CST-40 d) CST-50 alaşımlarının $38\text{-}49^\circ$ arasında genişletilmiş XRD spektrumu

3.4.2. SEM Görüntüleri

$\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ alaşımlarının SEM görüntüleri, Şekil 75’de verilmektedir. CdTe ’nin yüzey görüntüsü incelendiğinde, filmin boşluk, çatlak, iğne delikleri içermeyen yoğun şekilde paketlenmiş bir tane yapısına sahip olduğu görüldü. İrili-ufaklı bir tane yapısı olan CdTe filminin tane büyüklükleri, 200 nm ile 1 μm arasında değişmektedir. Se-katkılı örnekler incelendiğinde, filmlerin yüzey morfolojisinin ve ortalama tane büyüklüğünün alaşımın Se-oranına bağlı olarak büyük ölçüde değiştiği görüldü. En düşük Se-katkılı örnek olan CST-10 incelendiğinde, filmin CdTe ile benzer bir morfolojiye sahip olduğu tespit edildi. Bu durum, CST-10 örneğindeki Se-konsantrasyonun filmin morfolojisini belirgin bir şekilde etkileyecek düzeyde olmadığını göstermektedir. Ancak, alaşımlardaki Se-miktarının daha yüksek olduğu örneklerde, tane büyüklükleri ve tane dağılımlarında önemli bir değişim gözlemlendi. Se-katkısının artması ile birlikte, tane dağılımının daha homojen bir davranış sergilediği, ancak tane büyüklüklerinin ise artan Se katkısı ile beraber küçüldüğü tespit edildi. Artan Se-katkısı ile tane büyüklüklerinin küçülmesi beklenen bir durumdur. Çünkü CdTe film yapısında, Te atomlarının yerine Se atomlarının girmesiyle CdSeTe alaşımları oluşmaktadır. Alaşımın tane büyüklükleri, artan Se konsantrasyonu ile birlikte azalmaktadır. Ayrıca CST örneklerinin yüzey morfolojisinde boşluklar ve çatlaklar içermediği ve oldukça kompakt bir tane yapısına sahip olduğu görüldü. Artan Se-konsantrasyonu, örneklerin tane yapısında önemli değişikliklere sebep olmasına rağmen; filmlerin morfolojisinde rekombinasyon merkezi gibi davranan ve hücrede performans kaybına neden olan boşluk ve çatlakların oluşmaması, uygulanan deneysel koşulların kusur konsantrasyonunu azaltmak ve kristal kalitesini iyileştirmek için uygun olduğunu göstermektedir. CdSe filmi ise kompakt, homojen ve boşluklar içermeyen bir tane yapısına sahiptir. Bununla birlikte diğer örneklerle kıyaslandığında, çok daha küçük taneli bir yapıya sahiptir.



Şekil 75. a) CdTe, b) CST-10 c) CST-20, d) CST-30, e) CST-40, f) CST-50 g) CdSe örneklerinin SEM görüntüleri

3.4.3. EDS Sonuçları

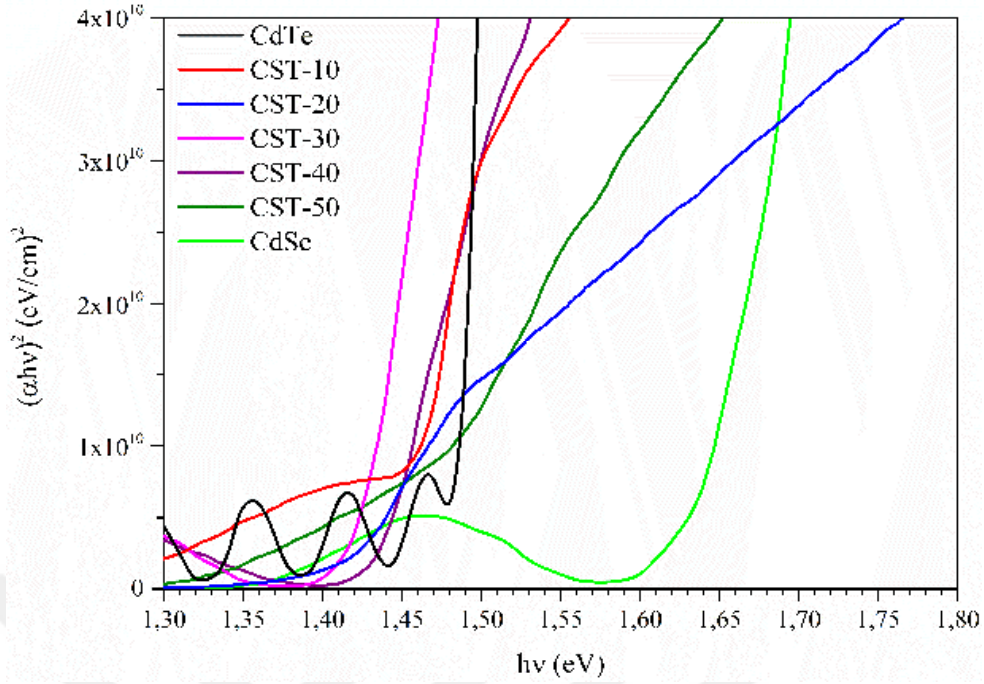
Farklı stokiometrilere üretilen $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ alaşımlarının EDS analizi ile ölçülen atomik oranları, Tablo 7’de verilmektedir. EDS ölçümlerinin güvenilirliğini arttırmak için yüzey üzerinde farklı noktalardan ölçümler alındı. Tabloda verilen atomik oranlar, bu ölçümlerin ortalama değerleridir. EDS sonuçları incelendiğinde, CdTe ve CdSe ince filmlerinin atomik oranlarının, neredeyse stokiometrik olduğu görüldü. $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ alaşımlarında ise Se- katkısının artması ile birlikte Cd’nin atomik oranlarında çok küçük bir değişim gözlenirken; $\text{Se}/(\text{Se}+\text{Te})$ oranı, beklendiği gibi belirgin bir artış olduğu tespit edildi. Diğer alaşımların kendi arasındaki Se- oranları kıyaslandığında, CST-40 ile CST-50 örnekleri arasındaki Se- farkının oldukça yakın değerlerde olduğu belirlendi. Bu durum, CdTe bileşiği içerisindeki Se atomunun çözünürlük sınırından kaynaklanmaktadır. Se atomu, CdTe’de maksimum çözünürlüğe ulaştıktan sonra; fazlalık Se, CdTe içerisinde herhangi bir etkileşime girmeden elementel formda bulunabilir. Element formda bulunan Se, biriktirme ve/veya ısıtma işlem sürecinde buharlaşarak, Se kaybına neden olabilmektedir. Dahası, $\text{CdSe}_{1-x}\text{Te}_x$ alaşımdaki her elementin erime noktası ve buhar basıncı farklıdır. Bu elementlerden Se, diğer iki elemente göre en düşük erime noktasına ve ayrıca buharlaşma sıcaklığında en yüksek buhar basıncına sahiptir. Se’nin bu özelliğinden dolayı, malzemelerde Se eksikliği oluşabilmektedir. Son olarak, stokiometrik alaşımlı bileşiklerin oluşumunda elementlerin yapışma katsayısı ($S_{\text{Te}} > S_{\text{Cd}} > S_{\text{Se}}$) de önemli rol oynamaktadır (Santhosh vd., 2017).

Tablo 7. $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ alaşımlarının atomik dağılımları

Numune	Cd (%)	Te (%)	Se (%)	Se/(Se+Te)	Alaşımların Kompozisyonu
CdTe	50,65	49,35	-	-	CdTe
CST-10	48,60	46,60	4,80	0,09	$\text{CdSe}_{0,09}\text{Te}_{0,91}$
CST-20	47,60	39,60	12,80	0,24	$\text{CdSe}_{0,24}\text{Te}_{0,76}$
CST-30	47,15	32,20	20,65	0,39	$\text{CdSe}_{0,39}\text{Te}_{0,61}$
CST-40	46,20	25,90	28,45	0,52	$\text{CdSe}_{0,52}\text{Te}_{0,48}$
CST-50	45,95	24,55	29,45	0,55	$\text{CdSe}_{0,55}\text{Te}_{0,45}$
CdSe	48,25	-	51,75	-	CdSe

3.4.4. Optik Ölçümleri

Termal buharlaştırma yöntemiyle üretilen $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ alaşımlarının optik özelliklerini incelemek için, oda sıcaklığında 400-1000 nm dalga boyu aralığında geçirgenlik ölçümleri alındı. Bu geçirgenlik verileri kullanılarak çizilen $(\alpha h\nu)^2-(h\nu)$ değişim eğrileri (Tauc grafiği), Şekil 76'de gösterilmektedir. Bu eğrilerden yararlanarak hesaplanan bant aralığı değerleri ise Tablo 8'de verilmektedir. Tablodan görüldüğü üzere, CdTe'nin bant aralığı 1,48 eV ve CdSe'nin bant aralığı 1,60 eV olarak belirlendi. Bu bant aralıkları, önceki çalışmalarda elde edilen değerler ile uyum içindedir (Madelung, 2004). $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ ince filmlerinin bant aralığı değerleri incelendiğinde, alaşımdaki Se-miktarına bağlı olarak bant aralığının da değiştiği görüldü. Buna göre, alaşımdaki Se- miktarı arttıkça, yasak enerji değeri CST-20 örneğine kadar kademeli olarak azalmakta (1,48 eV'den 1,41 eV'ye), ancak CST-30 örneğinden itibaren tekrar artmaya başlamaktadır (1,42 eV'den 1,63 eV'ye). Bant aralığındaki bu değişimin nedeni, eğilme (bowing) etkisidir (Lingg vd., 2019; Tit vd., 2009). Optik eğilme etkisi, farklı kompozisyonlarına sahip alaşımların iyonik boyut, elektronegativite ve örgü sabitlerindeki farklılıklar nedeniyle ortaya çıkan yerel yapısal düzenleme sonucu ortaya çıkmaktadır. $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ alaışının elektronik bant yapılarını araştıran çalışmaların birinde, tüm atomların iyoniklik derecesinin katkı oranı ile doğrusal olarak değiştiği belirlendi. Tuzaklanan/kaybolan yüklerde anyonlar (Se ve Te) arasında güçlü bir rekabetin olduğu ve bu rekabetin eğilme etkisinin temel nedeni olduğu ortaya konuldu (Tit vd., 2009).



Şekil 76. $\text{CdSe}_{1-x}\text{Te}_x$ alaşımlarının $(\alpha hv)^2 - (hv)$ grafiği

Tablo 8. Tauc çizimlerinden yararlanarak hesaplanan alaşımların bant aralığı değerleri

Numune	Bant Aralığı Değeri (eV)
CdTe	1,48
CST-10	1,45
CST-20	1,41
CST-30	1,42
CST-40	1,44
CST-50	1,45
CdSe	1,63

3.5. Hücre Üretiminde Kullanılan $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ Katmanlarının Karakterizasyonu

3.5.1. XRD Spektrumları

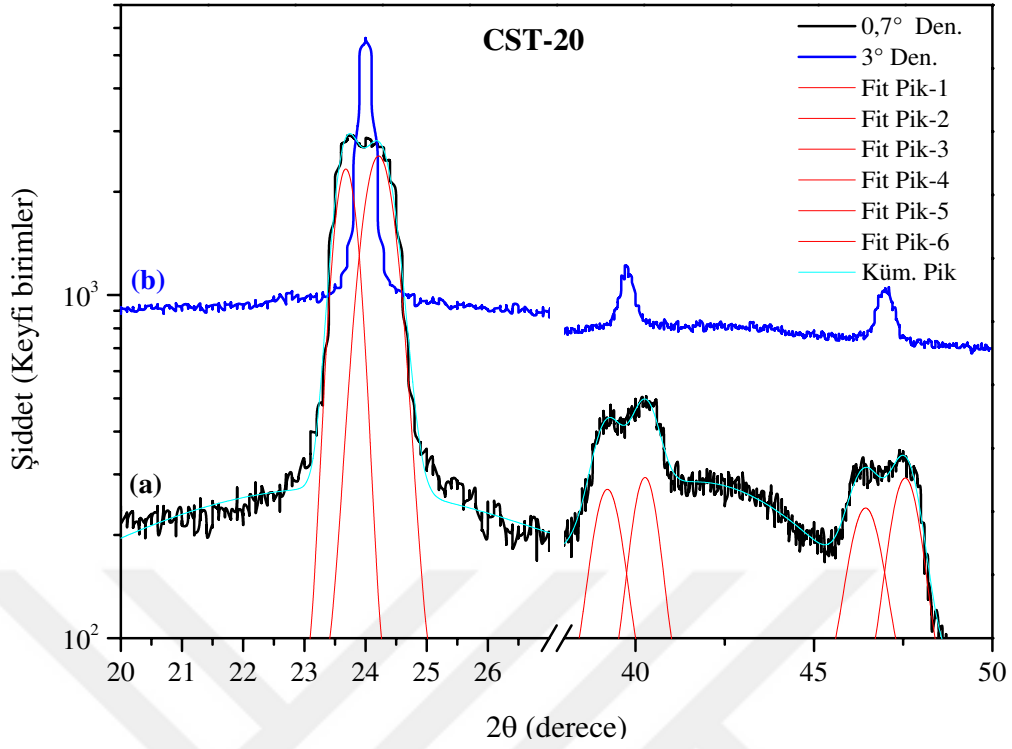
Hücre üretiminde kullanılan $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ alaşımlarında (CST-(20, 25, 30)), Se'nin CdTe içerisinde dağılımını ve film boyunca aşamalı bir alaşım yapısının oluşup oluşmadığını kontrol etmek için $0,7^\circ$ ve 3° geliş açılarında XRD ölçümleri alındı. Ancak $0,7^\circ$ geliş açısındaki XRD spektrumunda, piklerde üst-üste binme ve omuzlanma görünmesinden dolayı, pikleri ayırt etmek amacıyla ters-evrişim işlemi uygulandı. Şekil 77'de CST-20

örneği için $0,7^\circ$ ve 3° 'de XRD spektrumları ile uygulanan ters-evrişim işleminin sonuçları gösterilmektedir. $0,7^\circ$ 'deki spektrumun ters-evrişim sonuçları incelendiğinde, CdTe'nin kübik yapısının (111), (220) ve (311) düzlemlerine karşılık gelen sırasıyla $23,70^\circ$; $39,25^\circ$ ve $46,44^\circ$ 'de yansıma pikleri olduğu görüldü (JCPDS Kart No: 00-015-0770). Aynı spektrumda, $24,21^\circ$; $40,26^\circ$ ve $46,56^\circ$ kırınım açılarında da bir pik setinin var olduğu görüldü. Pik konumları incelendiğinde, bunların $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ alaşımına ait olduğu belirlendi. Örgü parametrelerinden yararlanarak alaşımdaki Se-konsantrasyonunun, %29 civarında olduğu hesapladı. Aynı örneğin 3° geliş açısındaki XRD spektrumu incelendiğinde $24,00^\circ$; $39,73^\circ$ ve $46,99^\circ$ açılarında piklerin oluştuğu ve bu piklerin yaklaşık olarak %16 Se-konsantrasyonuna sahip $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ alaşımına ait olduğu tespit edildi.

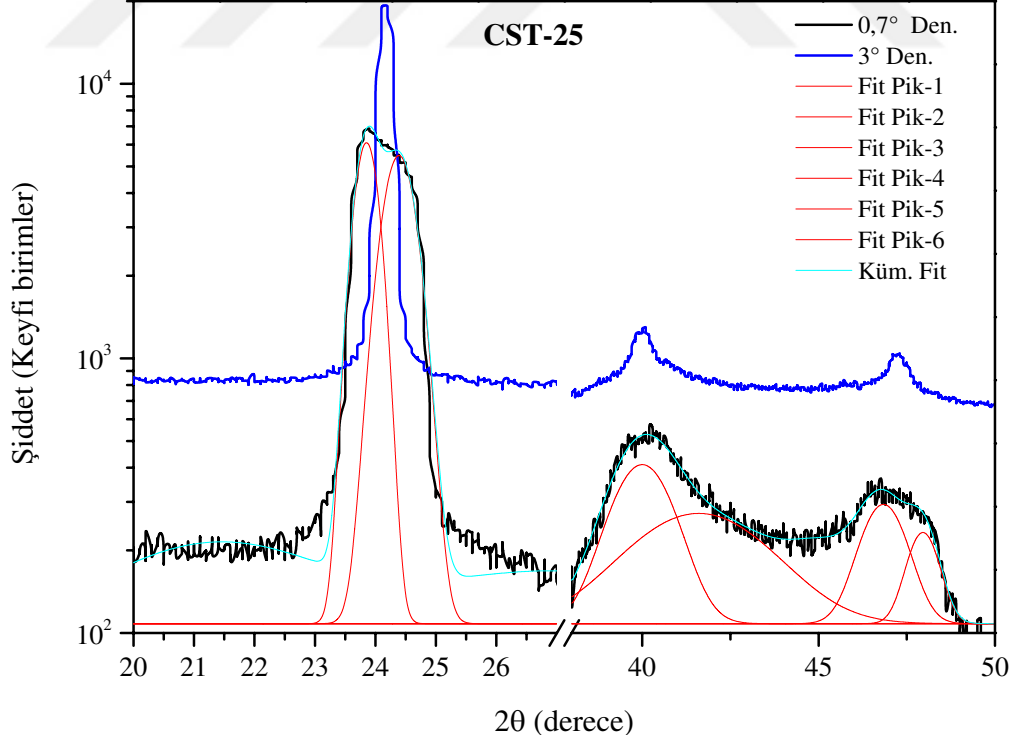
Aygıt yapısında kullanılan CST-25 örneğinin XRD spektrumu, Şekil 78'de gösterilmektedir. Se-katkısı arttığından dolayı, CST-20 örneğine kıyasla pik konumlarında sağa doğru kayma olduğu görüldü. Spektrumlar incelendiğinde $0,7^\circ$ geliş açısında, $2\theta=23,86^\circ$; $39,96^\circ$; $46,83^\circ$ ve $2\theta=24,41^\circ$; $41,67^\circ$; $47,97^\circ$ açılarında iki farklı pik setinin oluştuğu belirlendi. Bu pik setleri incelendiğinde, bunların iki farklı stokiometrideki $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ ($x\sim 0,07$) ve $\text{CdSe}_y\text{Te}_{1-y}$ ($y\sim 0,41$) alaşımlarına ait olduğu belirlendi. 3° 'de geliş açısında ölçülen XRD spektrumu incelendiğinde ise $24,14^\circ$; $39,96^\circ$ ve $47,21^\circ$ 'de yansıma piklerinin oluştuğu ve bu pik konumlarının $\sim$ %26 Se-katkılı $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ alaşımına karşılık geldiği belirlendi.

CST-30 örneğinin XRD spektrumu Şekil 79'da gösterilmektedir. $0,7^\circ$ geliş açılı spektrum incelendiğinde, $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ ($x\sim 0,16$) alaşımına ait $24,00^\circ$; $40,30^\circ$ $47,40^\circ$ 'de yansıma piklerin oluştuğu görüldü. Aynı spektrumda bulunan $24,49^\circ$; $43,60^\circ$ ve $47,98^\circ$ 'de pik setinin ise $\text{CdSe}_y\text{Te}_{1-y}$ ($y\sim 0,47$) alaşımına ait olduğu belirlendi. 3° geliş açısıyla ölçülen XRD spektrumu incelendiğinde, Se-konsantrasyonu artmasından dolayı piklerin sağa doğru kaymasının devam ettiği ve pik pozisyonları dikkate alındığında $\sim$ %35 Se-konsantrasyonuna sahip $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ alaşımının oluştuğu tespit edildi.

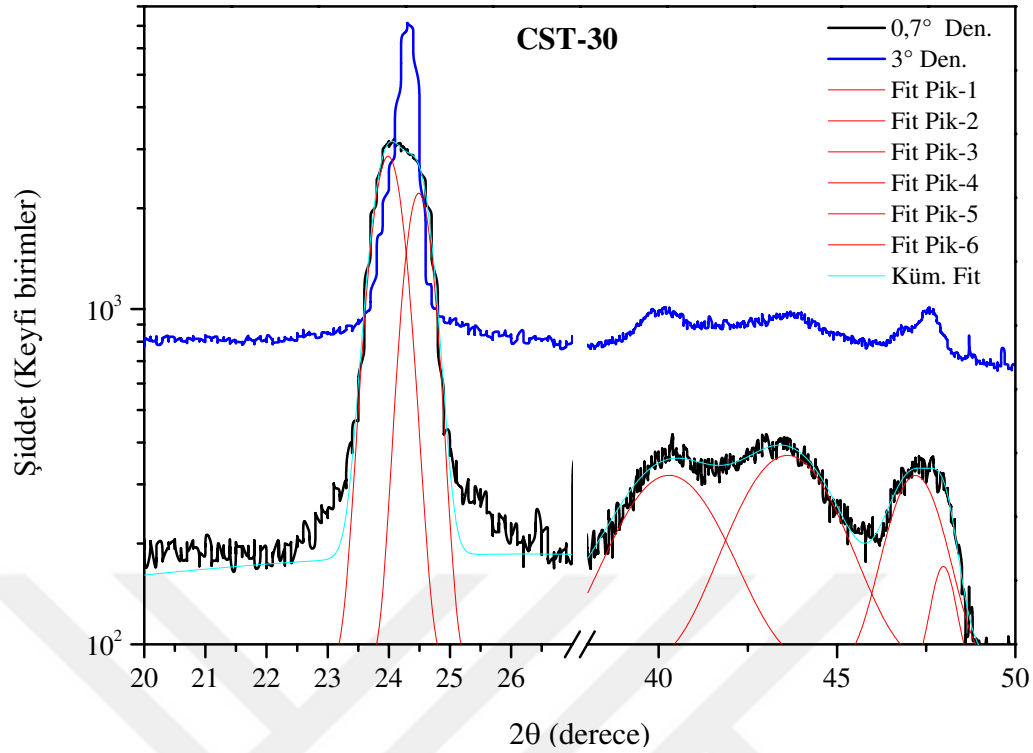
Hücre yapısında kullanılan tüm $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ ince fimleri incelendiğinde, $0,7^\circ$ geliş açısında ölçülen spektrumlarda farklı Se-konsantrasyonlarına sahip aşamalı bir alaşım yapısının oluştuğu görüldü. Ancak 3° geliş açısında çok daha keskin piklerin oluştuğu ve buna bağlı olarak aşamalı alaşım yapısının yerine tek bir alaşım kompozisyonunun oluştuğu belirlendi. Örneklerdeki Se-miktarı, CST-20 örneğinden CST-30 örneğine doğru artmaktadır. Bu doğrultuda da CST-20 örneğinden CST-30 örneğine doğru, alaşımlardaki Se-konsantrasyonunun beklendiği gibi, arttığı tespit edildi.



Şekil 77. CST-20 örneğinin a) $0,7^\circ$ b) 3° geliş açılarında XRD spektrumu



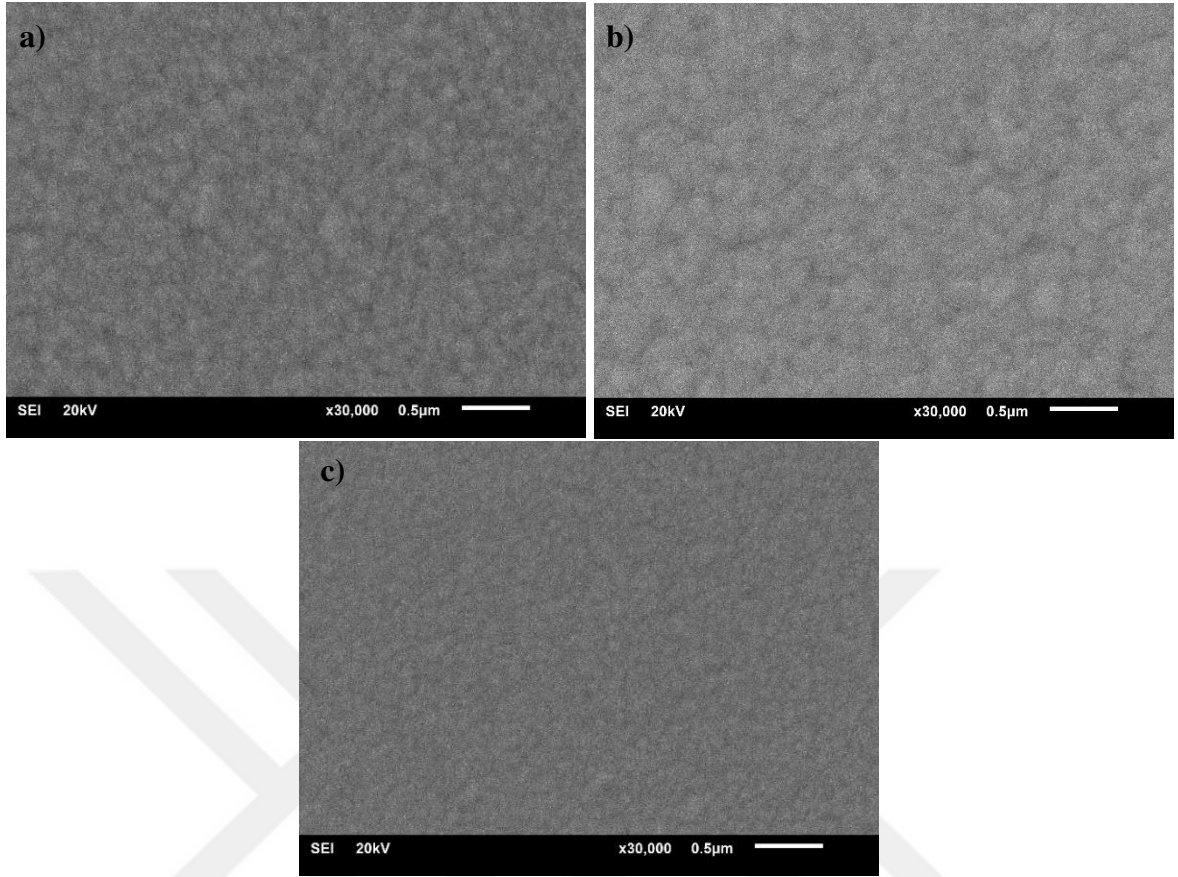
Şekil 78. CST-25 örneğinin a) $0,7^\circ$ b) 3° geliş açılarında XRD spektrumu



Şekil 79. CST-30 örneğinin a) 0,7° b) 3° geliş açılarında XRD spektrumu

3.5.2. SEM Görüntüleri

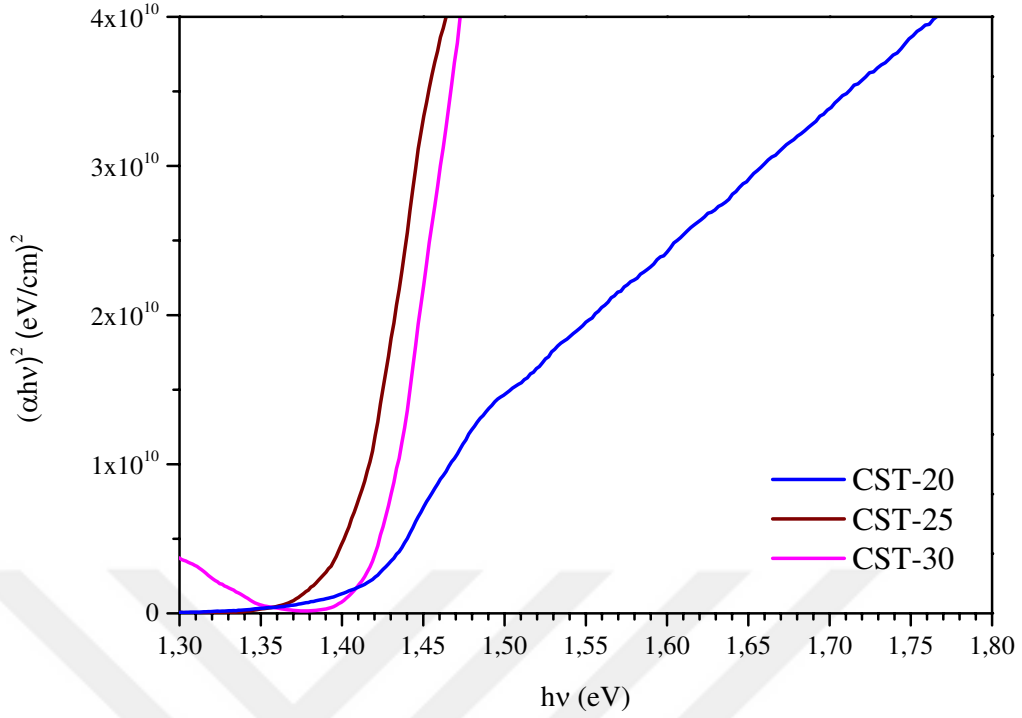
Aygıt üretiminde kullanılan CST-20, CST-25 ve CST-30 ince filmlerinin SEM görüntüleri, Şekil 80’de gösterilmektedir. SEM görüntüleri incelendiğinde ince filmlerdeki Se-miktarına bağlı olarak filmlerin yüzey morfolojisi ve ortalama tane büyüklüğü, değiştiği belirlendi. Ancak tüm filmlerin, yoğun paketlenmiş, boşluk, çatlak ve iğne deliği içermeyen bir yapıda olduğu görüldü. Küresel şekillenimli ve irili-ufaklı tane dağılımına sahip filmlerin tane büyüklüklerinin beklendiği gibi, Se-kontrasyonu arttıkça azaldığı görüldü. Se-konsantrasyonu ile tane büyüklüğü arasındaki ters orantı, Se-konsantrasyon farkının daha büyük olduğu CST-20 ve CST-30 örnekleri kıyaslandığında daha açık bir şekilde görülmektedir. Bunların yanında Se- katkısının artması ile tanelerin küçülerek film yüzeyinde daha homojen bir dağılım sergilediği de görüldü.



Şekil 80. a) CST-20 b) CST-25 c) CST-30 örneklerinin SEM görüntüleri

3.5.3. Optik Ölçümler

$\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ ara katmanına sahip hücrelerin üretiminde kullanılan CST-20, CST-25 ve CST-3 örneklerine ait $(\alpha h\nu)^2 - (h\nu)$ eğrileri, Şekil 81’de gösterilmektedir. Bu eğrilerden yararlanarak hesaplanan bant aralığı değerleri Tablo 9’da verilmektedir. Tablodan görüldüğü üzere, eğilme etkisinden dolayı, bant aralığı değerleri 1,4 eV civarında elde edildi. Örneklerdeki farklı Se- konsantrasyonlarından bağımsız olarak, hesaplanan bu değerlerin CdTe’nin (1,48 eV) bant aralığından oldukça düşük olduğu görülmektedir. CST-20 örneğinde 1,41 eV bant aralığı hesaplanırken, CST-25 örneğinde 1,40 eV ‘ye düşmüş; ancak CST-30 örneğinde tekrar artmaya başladı. Bu durum, uygulanan deneysel koşullarda elde edilebilecek minimum bant aralığının CST-25 örneği ile sağlandığını ortaya koymaktadır. Buna göre, $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ ara katmanının kullanıldığı fotovoltaiik uygulamalarda, en uygun alaşım tabakasının CST-25 olacağını göstermektedir.



Şekil 81. Aygıt yapımında kullanılan $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ ara-katmanlarının $(\alpha hv)^2-(hv)$ grafikleri

Tablo 9. Hücre yapısında kullanılan $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ alaşımların bant aralığı değerleri

Numune	Bant Aralığı Değeri (eV)
CST-20	1,41
CST-25	1,40
CST-30	1,42

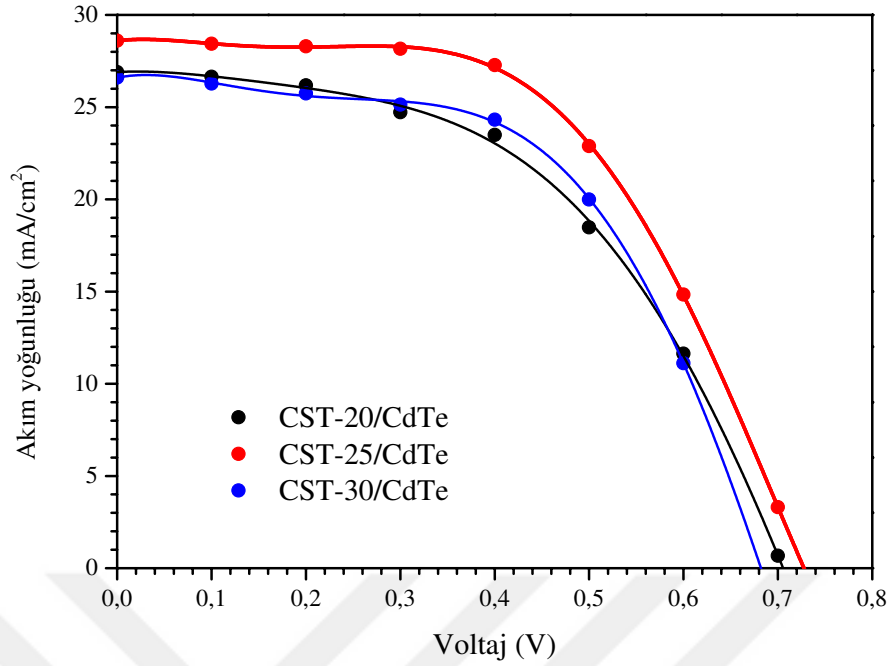
3.6. $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}/\text{CdTe}$ Soğurma-Katmanlı Güneş Hücrelerinin Karakterizasyonu

$\text{CdS}/(\text{CST-20})/\text{CdTe}$, $\text{CdS}/(\text{CST-25})/\text{CdTe}$ ve $\text{CdS}/(\text{CST-30})/\text{CdTe}$ yapılarına sahip üç farklı tipte güneş hücresi üretildi. CST ara katmanının kalınlığı (~100nm) ve CdTe kalınlığı (4,5-5 μm) olarak sabit tutuldu. Üretilen güneş hücrelerinden elde edilen akım yoğunluğu-voltaj (J-V) değişim eğrileri, Şekil 82’de gösterilmektedir. Tablo 10’da, J-V eğrileri kullanılarak belirlenen hücre parametreleri yer almaktadır. Tablodan görüldüğü üzere, $\text{CdS}/(\text{CST-20})/\text{CdTe}$, $\text{CdS}/(\text{CST-25})/\text{CdTe}$ ve $\text{CdS}/(\text{CST-30})/\text{CdTe}$ yapısında üretilen hücrelerin verimleri sırasıyla % 9,59; % 11,69 ve % 10,13’tür. Tablo incelendiğinde, hücrelerin V_{oc} değerlerinin 0,68 V ile 0,73 V arasında değiştiği görülmektedir. Bu durum,

alan destekli taşıyıcı toplanmasının nispeten zayıf olduğunu göstermektedir. Ayrıca soğurma katmanı yapısındaki ($\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}/\text{CdTe}$) alaşım tabakalarının daha düşük bant aralığına sahip olmasından dolayı, V_{oc} 'nin azalması beklenen bir durumdur. Bu durum, tezin birinci kısmında üretilen standart CdS/CdTe güneş hücreleri ($V_{oc} = 0,75 \text{ V}$) ile aşamalı alaşım yapısına sahip soğurucular arasındaki V_{oc} farkını da açıklamaktadır (Geisthardt vd., 2015; Lingg vd., 2018). Güneş hücrelerinin parametreleri incelendiğinde tüm aygıtların J_{sc} değerlerinin 26 mA/cm^2 'nin üstünde olduğu belirlendi. Aşamalı alaşım yapısına sahip $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ ince filmleri, eğilme etkisi nedeniyle ara-yüzeyin ön bölgesindeki soğurma tabakasının bant aralığını azaltmaktadır. Ara-bölgedeki $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ alaşımının ($E_g \sim 1,4 \text{ eV}$) CdTe 'den daha düşük bant aralığına sahip olmasından dolayı, gelen fotonların soğurulma oranı artmakta ve bunun sonucunda daha düşük enerjili fotonlar serbest taşıyıcıların üretimine katkıda bulunarak foto-akımın artmasına neden olmaktadır.

Bu aygıtlar arasında $\text{CdS}/\text{CST-25}/\text{CdTe}$ yapısındaki güneş hücresi; $V_{oc} = 0,73 \text{ V}$ değeri ve $J_{sc} = 28,6 \text{ mA/cm}^2$ değeri ile en iyi hücre verimine ($\eta = \%11,69$) sahiptir. Bu hücredeki en yüksek J_{sc} değeri, CST-25 alaşımının minimum bant aralığına ($E_g = 1,40 \text{ eV}$) sahip olması ve farklı konsantrasyonlara sahip aşamalı alaşım yapısı nedeniyle beklenen bir durumdur. CST-25/ CdTe örneğindeki en yüksek V_{oc} değeri, diğer örneklerle kıyasla daha büyük düz bant (flat band) potansiyeli değerine atfedilebilir (Kathalingam vd., 2010).

CST-25 numunesinden maksimum verim elde edilirken; CST-30 örneğinde ise aygıt veriminde düşüş gözlemlendi. Bunun sebebi, CdSeTe alaşımının artan bant aralığından dolayı, akım toplanmasının indirgenmesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 82. $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}/\text{CdTe}$ soğurma-katmanlı güneş hücrelerinin J-V değişim eğrileri

Tablo 10. $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ ara-katmanına sahip aygıtların hücre parametre değerleri

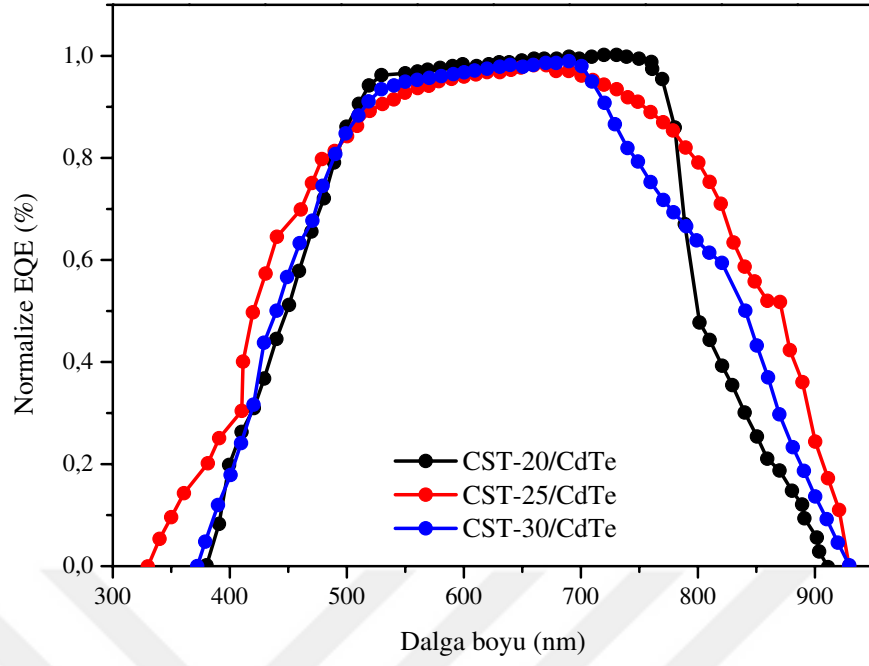
Numune	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF	Verim (%)
CST-20/CdTe	0,71	26,90	0,50	9,59
CST-25/CdTe	0,73	28,60	0,56	11,69
CST-30/CdTe	0,68	26,60	0,56	10,13

Üç farklı tipte üretilen $\text{CdSeTe}/\text{CdTe}$ aygıt yapılarına ait EQE verileri, Şek.83’de gösterilmektedir. EQE verileri incelendiğinde, CST-20/CdTe ve CST-30/CdTe örneklerinin 700 nm’nin altındaki spektral tepkisi oldukça benzer bir davranış sergilerken; CST-25/CdTe örneğinin spektral tepkisi 330 nm’ye kadar uzanmaktadır. CST-25/CdTe aygıtının kısa dalga boyu yanıtının iyileşmesi, güneş hücresinin üretimi esnasında uygulanan ısı işlemler sonucu oluşan alaşımlanmalar nedeniyle, CdS’nin etkin kalınlığının azalmasından dolayı olduğu söylenebilir. 700 nm’nin üzerindeki bölgede ise, aygıt yapısındaki CdSeTe alaşımlarının varlığından dolayı 930 nm’ye kadar ulaşan spektral tepki görüldü. Bu durum, aygıt yapısındaki CdSeTe katmanlarının 930 nm dalga boyuna kadar gelen ışığı soğurduğunu göstermektedir. Bu, CdTe’ye ($E_g \sim 830$ nm) kıyasla alaşımların daha düşük yasak enerjiye

($E_g > 830$ nm) sahip olmalarından dolayı beklenen bir durumdur. Ancak EQE eğrilerinin uzun dalga boyu bölgesinde, CdSeTe alaşımlarındaki farklılıklar (aşamalı alaşım oranları, optik bant aralığı, vs.) daha açık bir şekilde görülmektedir. Buna göre, özellikle 830 nm'den daha uzun bölge dikkate alındığında, en düşük bant aralığına sahip CST-25 örneğinin en iyi tepkiyi gösterdiği gözlemlendi. CST-25 örneğinin uzun dalga boyu yanıtı, CST-20/CdTe aygıtının bant kenarının ötesine uzanmaktadır. Bu durum, açıkça p-n eklemine yakınında CdSeTe alaşımının en düşük bant aralığına sahip olduğunu göstermektedir. Bu alaşım tabakası, daha uzun dalga boylu ışığın soğurularak elektron-delik çiftleri üretimine katkı sağlamaktadır.

Farklı $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ alaşımlarına sahip aygıtların performansındaki değişiklik, sadece alaşımların optik bant aralığı ve taşıyıcıların transfer özelliklerine (taşıyıcı mobilitesi, vs.) bağlı değildir. Düşük Se-oranına sahip $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ alaşımlarının örgü parametresi, CdTe'nin örgü parameteresine daha yakın olduğu ve tavlama sonrasında ara yüzey ($\text{CdTe}/\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$) kusurlarının indirildiği tahmin edilmektedir. Alaşım katmanı ve CdTe katmanı arasındaki azalan kusurlar, taşıyıcının ayrılmasını ve toplama verimliliğini optimize etmektedir. Bu nedenle, düşük Se-konsantrasyonuna sahip bir CdSeTe alaşımı kullanılması, aygıt performansını yükseltecektir. Aksine, yüksek Se-katkısına sahip $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ tabakası ile CdTe filmleri arasındaki büyük örgü uyumsuzluğundan dolayı, taşıyıcı toplama verimliliği ve aygıt performansını azalacaktır (Wen vd., 2017).

Artan $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}/\text{CdTe}$ ara yüzey rekombinasyonu, malzeme kristallliği değiştikçe minimum bant aralığındaki performansı potansiyel olarak azaltabilir. Ancak $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ alaşımının bant aralığı en aza indirilirken kübik yapının korunması, performans iyileştirmesinin sürdürülmesi için kritik bir öneme sahiptir (Swanson vd., 2017). Bu kapsamda üretilen örnekler arasında en yüksek performansa sahip CST-25/CdTe aygıtı incelendiğinde CST-25 örneğinde kübik yapının korunduğu XRD spektrumları ile gösterilmiştir. Eğer CdTe'nin önüne $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ yerine CdSe ince filmi konulsaydı, fotoaktif olmayan hekzagonal $\text{CdTe}_{1-y}\text{Se}_y$ 'in oluşma olasılığı artacaktır. Bu durum, J_{sc} kaybına neden olacaktır. Sonuç olarak, hassas bir bant aralığı gradyanı, aygıtta yüksek miktarlarda Se eklenmesiyle ayarlanabilir. Bu, bitmiş cihazda daha kalın bir fotoaktif düşük bant aralıklı $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ katmanı ile sonuçlanır. $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ 'ten maksimum J_{sc} kazancı için, CdSe katmanı yerine bir $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ katmanının yerleştirilmesinin gerekli olduğu sonucuna varılabilir (Lingg vd., 2019).



Şekil 83. CdSe_xTe_{1-x}/CdTe soğurma-katmanlı güneş hücrelerinin EQE eğrileri

4. SONUÇLAR

Bu tez çalışması iki ana kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısımda Se-katkılı pencere katmanlarının aygıt performansına etkisini incelendi. Bu kapsamda ilk olarak cam altlıklar üzerine CdS/CdSe iki-tabakalı yapısını elde etmek için, CBD ile CdS (~50 nm) ve ardından termal buharlaştırma yöntemiyle CdSe (~50 nm) ince filmleri kaplandı. Klorlama işleminin ince filmlerin özellikleri üzerine etkisini araştırmak için örneklerin bazılarında ıslak kimyasal yöntem ile CdCl₂ işlemi uygulandı. Daha sonra CdCl₂ işlemi uygulanan ve uygulanmayan tüm örnekler hava atmosferinde, 400°C'de 1, 5 ve 10 dakika boyunca ısıtılma işlemi uygulandı. Bunların yanında kontrol örnekleri olarak, cam altlıklar üzerine CdS (~100 nm) ve CdSe (~100 nm) ince filmleri de üretildi. CdCl₂ işlemi uygulanan ve uygulanmayan şekilde üretilen kontrol örnekleri, hava atmosferinde 400°C'de 10 dakika boyunca tavlandı. Üretilen tüm örneklerin yapısal ve optik özellikleri ayrıntılı olarak incelendi. Hücre yapısında bulunan tabakalar arasında oluşan difüzyon, alaşımlanma vs. gibi fiziksel süreçleri daha detaylı olarak inceleyebilmek için, 'cam altlık/pencere katmanı/CdTe' katmanlı yapıları üretildi. Bu katmanlı yapıları üretebilmek için, yukarıda ifade edildiği gibi, ilk olarak cam altlıklar üzerine CdS/CdSe, CdS ve CdSe ince filmleri üretildi. Daha sonra, pencere katmanı ve CdTe arasına uygulanan klorlama işleminin katmanlı yapı üzerindeki etkisini inceleyebilmek için, üretilen ince filmlerin bir kısmına CdCl₂ işlemi uygulandı. Ardından üretilen örnekler, hava atmosferinde, 400°C'de 10 dakika süreyle ön-ısıtılma işlemi uygulandı. Ön-ısıtılma işlemi adımından sonra örnekler termal buharlaştırma yöntemi kullanılarak ince bir CdTe (~150 nm) tabakası kaplandı. CdTe kaplanan tüm örnekler, hava atmosferinde, 400°C'de 10 dakika boyunca son bir tavlama işlemi uygulandı. Üretilen bu katmanlı yapıların özellikleri ayrıntılı olarak incelendikten sonra, güneş hücrelerinin üretimi gerçekleştirildi. Güneş hücrelerinin üretimi için, ilk olarak F:SnO₂ kaplı cam altlıklar üzerine CdS/CdSe, CdS ve CdSe pencere katmanları büyütüldü ve ardından hava atmosferinde, 400°C'de 10 dakika boyunca ön-ısıtılma işlemi uygulandı. Daha sonra CSS yöntemi kullanılarak 4,5-5 µm kalınlığında CdTe-soğurma katmanları kaplandı ve standart bir adım olarak CdCl₂ varlığında hava atmosferinde, 400°C'de 30 dakika boyunca tavlandı. Elde edilen katmanlı yapılar, yüzeyde oluşan kirlilikleri ortadan kaldırmak için Br+Metanol çözeltisinde dağlandı. Son olarak aygıt yapısını tamamlamak için elektron demeti buharlaştırma yöntemi kullanılarak Cu/Au geri kontaktları kaplandı ve

ardından azot ortamında 20 dakika boyunca son tavlama işlemi gerçekleştirildi. Güneş hücrelerinin performansı, J-V ve EQE ölçümleri ile incelendi.

1, 5 ve 10 dk. tavlanan CdS/CdSe ince filmlerinin XRD spektrumları incelendiğinde, CdS ve CdSe tabakaları arasında herhangi bir alaşımlanma oluşmadığı belirlendi. Tavlama süresinden bağımsız olarak, faz ayrışmasının meydana geldiği, başka bir ifadeyle kübik CdS ve kübik CdSe fazlarının oluştuğu görüldü. Bununla birlikte, tavlama süresinin 1 dakikadan 10 dakikaya artmasıyla birlikte, kristalik özelliklerin iyileştiği gözlemlendi. CdCl₂ işlemi uygulanan örnekler incelendiğinde, 1 ve 5 dk. tavlanan örneklerde, CdCl₂ işlemi uygulanmayan örneklerde olduğu gibi, kübik CdS ve CdSe fazlarının oluştuğu belirlendi. CdS/CdSe/CdCl₂ örneği 10 dk. tavlendiğinde ise, kristalik özelliklerinin tamamen değiştiği gözlemlendi. Örneğin XRD spektrumu incelendiğinde, CdSSe alaışımının oluştuğu ve kristal yapısının kübik fazdan hekzagonal faza dönüştüğü belirlendi. Bu sonuçlara dayanarak, CdCl₂ varlığında 10 dk. tavlama süresinin CdS/CdSe örneklerinin kristal yapısının değişmesi için yeterli olduğu görüldü. 10 dk. tavlanan CdS/CdSe örneğinin FE-SEM görüntüsü incelendiğinde, 100-120 nm arasında değişen küresel tanelerden oluştuğu, homojen bir tane dağılımına sahip olduğu, ancak bazı bölgelerde boşluklar olduğu tespit edildi. CdS/CdSe ince filmlerine CdCl₂ işlemi uygulanmasının, filmin morfolojisini önemli ölçüde etkilediği görüldü. CdCl₂ işleminden sonra, tanelerin eridiği ve küçük kristalitlerin daha büyük olanlarla birleşerek yeniden kristalize olduğu ve tane boyutunun 100-200 nm aralığına yükseldiği belirlendi. Optik ölçümleri, 10 dk. tavlanan CdS/CdSe örneğinde CdS (~500 nm) ve CdSe (~700 nm)'ye ait iki soğurma kenarının olduğunu, dolayısıyla faz ayrışmasının meydana geldiğini gösterdi. CdS/CdSe/CdCl₂ örneğinde ~605 nm civarında tek bir soğurma kenarının olduğu, bu soğurma kenarının CdSSe alaışımına karşılık geldiği tespit edildi. Optik ölçümler ile elde edilen sonuçların, XRD verileri ile uyumlu olduğu görüldü.

Aygıt yapılarında kullanılan CdS/CdSe, CdS ve CdSe pencere katmanlarına CdCl₂ işlemi uygulandıktan sonra (CdS/CdSe)/CdTe, CdS/CdTe ve CdSe/CdTe katmanlı yapılarındaki tabakalar-arası difüzyon üzerindeki etkisi araştırıldı. Bu örneklerde standart yaklaşımdan farklı olarak, CdTe biriktirilmeden önce yalnızca pencere katmanlarına (CdS/CdSe, CdS ve CdSe) CdCl₂ varlığında ön-ısıtıl işlem uygulandı. Örnekler 0,7° ve 3°'lik sabit geliş açılarında alınan XRD spektrumları kullanılarak karakterize edildi. XRD spektrumlarında, omuzlu geniş ve/veya ikili pikler görüldüğü için, spektrumdaki bazı

bölgelere ters-evrişim işlemi uygulandı. Katmanlı yapıların incelenmesi, ters-evrişim işlemi sonuçları hesaba katılarak yapıldı.

CdCl_2 işlemi uygulanmayan CdS/CdTe katmanlı yapısının XRD spektrumları incelendiğinde tabakalar-arası difüzyonun meydana geldiği ve ara yüzeye yakın bölgede alaşımlanmanın olduğu görüldü. $0,7^\circ$ 'deki XRD spektrumunda CdSTe alaşımlarındaki S konsantrasyonunun %12 civarında olduğu görüldü. Bu değerin S'nin CdTe 'deki maksimum çözünürlük sınırına yakın olduğu belirlendi. 3° 'de ölçülen spektrumda ise alaşımdaki S konsantrasyonunun %4 civarında olduğu tespit edildi. CdCl_2 işlemi uygulanan CdS/CdTe örneğinde ise tabakalar-arası difüzyonun önemli ölçüde azaldığı görüldü. $0,7^\circ$ 'de S miktarının %8'e ve 3° 'de ölçülen spektrumda ise %3'e kadar düştüğü belirlendi. CdSe/CdTe katmanlı yapıları incelendiğinde, benzer sonuçlar elde edildi. CdSe-CdTe örneklerinde $0,7^\circ$ 'de Se miktarı %25-80 arasında değişirken; 3° 'deki spektrumda %8-40 arasında değiştiği görüldü. Bu durum, CdSe/CdTe örneklerinde farklı alaşım kompozisyonlarına sahip aşamalı (graded) bir yapının oluştuğunu göstermektedir. CdCl_2 ön-işlemi uygulanan CdSe/CdTe örneğinde ise alaşımlanma oranının azaldığı belirlendi. $0,7^\circ$ 'de $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ alaşımdaki Se-atomik oranının (x-değeri) yaklaşık olarak 0,2 civarındayken, 3° 'deki spektrumda 0,15 civarında olduğu görüldü. Bununla birlikte tüm durumlar için, tabakalar-arası difüzyonun ve alaşımlanmanın CdS/CdTe etkileşiminden daha belirgin olduğu tespit edildi.

CdS/CdSe iki-tabakalı yapısı üzerine CdTe ince filminin kaplandığı CdS/CdSe/CdTe örneğinin $0,7^\circ$ 'de ölçülen XRD spektrumu incelendiğinde, kübik yapıda kristalleşen $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ ($x \sim 0,11$) ve $\text{CdSe}_y\text{Te}_{1-y}$ ($y \sim 0,66$) alaşımlarının ve Cd_xTeO_y fazının oluştuğu belirlendi. Bunun yanında aynı spektrumda yaklaşık %5 S-atomik oranına sahip $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$ alaşımı oluşurken, ekstra kübik CdS fazında oluştuğu görüldü. $0,7^\circ$ 'de ölçülen $\text{CdS/CdSe/CdCl}_2/\text{CdTe}$ örneği incelendiğinde ise spektrumdaki faz dağılımının belirgin bir şekilde değiştiği görüldü. Spektrumdaki pikler indislendiğinde, hekzagonal yapıda kristalleşen $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$ ($x \sim 0,34$) alaşımının ve CdSe fazının oluştuğu belirlendi. Bunların yanında aynı spektrumda hekzagonal $\text{CdTe}_z\text{Se}_{1-z}$ ($z \sim 0,22$) alaşımının oluştuğu da görüldü. Geliş açısının 3° 'ye artmasıyla, örneklerin $0,7^\circ$ geliş açısındaki spektruma benzer verilere sahip olduğu görüldü. Bununla birlikte, $0,7^\circ$ 'ye kıyasla pik pozisyonlarında kayma ve kristallenmede iyileşme olduğu da gözlemlendi. 3° 'de CdS/CdSe/CdTe örneğinin ters-evrişim sonuçları incelendiğinde kübik yapıda kristalleşen $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ ($x \sim 0,18$) ve $\text{CdTe}_x\text{Se}_{1-x}$ ($x \sim 0,06$) alaşımlarının oluştuğu görüldü. Yine aynı spektrumda yaklaşık %12 S içeren ve

kübik yapıda kristalleşen $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$ alaşımının oluştuğu belirlendi. $\text{CdS}/\text{CdSe}/\text{CdCl}_2/\text{CdTe}$ örneğinin 3° 'de ölçülen spektrumu incelendiğinde, CdCl_2 işlemi uygulanmayan örneğe göre, verilerin belirgin bir şekilde değiştiği görüldü. Spektrum indislendiğinde, hekzagonal CdSe 'nin ve % 33 S-oranına sahip hekzagonal $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$ alaşımlarının oluştuğu tespit edildi. Ayrıca aynı spektrumda hekzagonal $\text{CdSe}_z\text{S}_{1-z}$ ($z \sim 0,21$) alaşımının ve hekzagonal $\text{CdTe}_x\text{Se}_{1-x}$ ($x \sim 0,22$) alaşımının oluştuğu tespit edildi.

Bu bulgular, yüksek verimli güneş pili yapılarında $(\text{CdS}, \text{CdSe})/\text{CdTe}$ ara yüzey difüzyonunu kontrol etmek için oldukça önemlidir. Çünkü bu aygıtlarda CdSeTe katmanının kalınlığını ve kompozisyonun kontrol etmek kritik bir konudur ve güneş pili performansını büyük ölçüde etkilemektedir. Elde edilen sonuçlar, CdCl_2 ön-işleminin p-tipi ve n-tipi katmanlar arasındaki alaşımlanmayı etkili bir şekilde ayarlamak için bir araç olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Üretilen $\text{CdSe}(100\text{nm})/\text{CdTe}$, $\text{CdS}(100\text{nm})/\text{CdTe}$ ve $\text{CdS}(50\text{nm})/\text{CdSe}(50\text{nm})/\text{CdTe}$ katmanlı-yapılarına sahip güneş hücrelerinde sırasıyla %8,39; %10,12 ve %11,47 verim değerleri elde edildi. Bu verim değerleri göz önüne alındığında en yüksek hücre verimi CdS/CdSe pencere katmanına sahip hücrede kaydedildi. EQE ölçümleri, CdS pencere katmanının kısa dalga boyu tepkisini iyileştirdiğini gösterdi. Ayrıca CdSe ile CdTe arasındaki $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ alaşımı oluşumunun, hücrenin uzun dalga boyu tepkisini iyileştirdiğini ve bunun sonucunda da J_{sc} değerlerinin arttığı belirlendi. Sonuç olarak, CdS/CdSe iki-tabakalı pencere katmanının aygıtın hem kısa dalga boyu hem de uzun dalga boyu bölgesinde yüksek spektral tepkiye sahip olmasından dolayı, bu hücrede en yüksek J_{sc} değerine ($27,1 \text{ mA}/\text{cm}^2$) ulaşıldı. CdS , CdSe ve CdS/CdSe pencere katmanları üzerine CdTe kaplanmadan önce CdCl_2 işlemi uygulanan örneklerde, hücrelerin verim değerlerinde ciddi bir azalma olduğu gözlemlendi. Bu durumun pencere katmanlarına CdCl_2 işlemi uygulandıktan sonra kristallenme olduğu ve bunun sonucunda da ara-yüzey etkilerinin pasif (inaktif) hale gelmesinden kaynaklandığı söylenebilir.

Tez çalışmasının ikinci kısmında Se-katkılı soğurma katmanlarının hücre parametrelerine etkisini incelemek için, farklı stokiyometrilere $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ alaşımlarının özellikleri ile ara-bölgede (pencere katmanı ve soğurma katmanı arasında) yaklaşık olarak optimum bant aralıklı $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ alaşımlarının hücre performansına etkisi incelendi. Bu kapsamda, ilk olarak farklı kompozisyonlara sahip $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ alaşımlarını üretmek için, belirlenen nominal oranlarda ($x=0-1$ arasında) CdSe ve CdTe tozları homojen bir şekilde karıştırıldı. Daha sonra SLG altlıklar üzerine termal buharlaştırma yöntemiyle 250°C altlık

sıcaklığında $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ ince filmleri büyütüldü. Üretilen $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ örneklerinin yapısal ve optik özellikleri ayrıntılı olarak incelendi. Karakterizasyon sonuçları değerlendirildikten sonra, yaklaşık olarak optimum bant aralığına sahip $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ ara-katmanına sahip güneş hücrelerinin üretimi gerçekleştirildi. Güneş hücrelerinin üretimi için, ilk olarak F:SnO_2 kaplı cam altlıklar üzerine CBD yöntemiyle CdS (~50 nm) pencere katmanları büyütüldü. Daha sonra termal buharlaştırma yöntemi kullanılarak ~100 kalınlığında $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ ara-katmanları kaplandı. Daha sonra CSS yöntemiyle 4,5-5 μm kalınlığında CdTe filmleri kaplandı ve standart bir süreç olarak CdCl_2 varlığında hava atmosferinde, 400°C 'de 60 dakika boyunca tavlandı. Son çıkan katmanlı yapılar $\text{Br}+\text{Metanol}$ çözeltisinde dağlama işlemi uygulandıktan sonra; elektron demeti buharlaştırma yöntemi ile Cu/Au geri kontaktları kaplandı ve ardından azot ortamında 20 dakika ısıtıl işlem gerçekleştirildi. Güneş hücrelerinin performansları, J-V ve EQE ölçümleri ile incelendi.

Farklı kompozisyonlara sahip $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ alaşımlarının XRD spektrumları incelendiğinde, Se içeren $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ filmlerinin kübik yapıda kristalleştiği, ancak %30'un üzerinde ise üretilen filmlerin karışık (kübik+hekzagonal) fazda kristalleştiği tespit edildi. $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ filmlerine ait SEM görüntülerinde, örneklerin tane büyüklüklerinin homojen olmadığı, ancak oldukça kompakt bir tane yapısının olduğu görüldü. Bunun yanında, alaşımlardaki Se-miktarı arttıkça, tane büyüklüklerinin azaldığı belirlendi. Optik ölçümler ile alaşımlardaki Se-konsantrasyonu ile bant aralığının değişimi incelendi. Bunun sonucunda CST-20 örneği için en küçük bant aralığı ($E_g = 1,41 \text{ eV}$) elde edildi. Sonuçların değerlendirilmesinden sonra, yaklaşık olarak optimum bant aralıklı $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ (CST-20, CST-25 ve CST-30) ince filmleri üretildi. Bu alaşımlardaki Se-konsantrasyonunun film boyunca değişimini analiz etmek için GI-XRD ölçümleri alındı. GI-XRD sonuçlarına göre, her üç örnekte de farklı Se konsantrasyonlarına sahip alaşım tabakalarının (yani aşamalı alaşım yapısı) olduğu belirlendi. Aynı zamanda, CST-20 örneğinden CST-30 örneğine doğru, alaşımlardaki Se-miktarının arttığı görüldü. Bu optimum alaşım tabakalarının optik sonuçlarına göre, en düşük bant aralığı CST-25 (1,40 eV) örneğinde elde edildi. CST-20, CST-25 ve CST-30 ara-tabakalarına sahip güneş hücreleri üretildi. Hücrelerin J-V eğrileri incelendiğinde, $\text{CdS}/(\text{CST-20})/\text{CdTe}$, $\text{CdS}/(\text{CST-25})/\text{CdTe}$ ve $\text{CdS}/(\text{CST-30})/\text{CdTe}$ konfigürasyonlarındaki aygıtlar için verim değerleri sırasıyla %9,59; % 11,69 ve %10,13 olarak hesaplandı. Bu verim değerleri göz önüne alındığında, eğilme etkisinden dolayı minimum bant aralığına sahip olan CST-25 hücresinde, en yüksek V_{oc} (0,73 V), J_{sc} (28,6 mA/cm^2) ve η (%11,69) değerleri elde edildi. Elde edilen hücrelerin parametreleri

incelendiğinde, özellikle $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ ara-tabakalarına sahip güneş hücrelerinde artan yük taşıyıcı üretiminden dolayı, J_{sc} değerlerinin iyileştiği gözlemlendi. EQE verileri incelendiğinde, kısa dalga boyu bölgesinde CST-20/CdTe ve CST-30/CdTe örnekleri benzer davranış gösterirken, CST-25/CdTe örneğinin spektral tepkisinin 330 nm'ye kadar uzandığı görüldü. Bu durumun hücrenin üretimi esnasında uygulanan ısı prosedürlerinden dolayı, CdS'nin aktif kalınlığının azalmasından kaynaklandığı söylenebilir. Hücrelerin uzun dalga boyu bölgesindeki EQE verileri incelendiğinde, CdSeTe ara-tabakasının varlığından dolayı spektral tepkinin iyileştiği ve en iyi örnekte spektral tepkinin 930 nm'ye kadar arttığı gözlemlendi. Burada minimum bant aralığına sahip CST-25 ara-katmanlı örneğin, en yüksek spektral tepkiye sahip olduğu ortaya çıktı. CST-25/CdTe aygıtının hem kısa hem de uzun dalga boyu bölgesindeki yüksek spektral tepkisi foto-akımın iyileşmesine katkıda bulunarak, en yüksek J_{sc} değerinin ($28,6 \text{ mA/cm}^2$) elde edilmesini sağladı.

Tez çalışmasının birinci kısmında üretilen hücreler arasında en iyi performansı gösteren CdS/CdSe pencere katmanlı hücresi, $V_{oc}=0,77 \text{ V}$; $J_{sc}= 27,10 \text{ mA/cm}^2$ ve $\eta=11,47$; ikinci kısımda üretilen örnekler arasında en iyi performansı gösteren CST-25/CdTe hücresi ise $V_{oc}=0,73 \text{ V}$; $J_{sc}= 28,60 \text{ mA/cm}^2$ ve $\eta=11,69$ parametre değerlerine sahiptir. Bu iki hücrenin parametreleri karşılaştırıldığında, hücre yapısındaki CdS ile CdTe tabakaları arasında, CdSe yerine optimum bant aralıklı bir $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ alaşımı kullanmanın V_{oc} değerinin düşmesine neden olduğu görüldü. Bu durum, alan-destekli taşıyıcı toplanmasının CST-25/CdTe hücresinde daha zayıf olduğunu göstermektedir. J_{sc} değerleri incelendiğinde ise, $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ alaşımının daha uzun dalga boylarında foto-üretime katkıda bulunmasından dolayı; CdS/CST-25/CdTe hücresi, CdS/CdSe/CdTe hücresinden daha yüksek bir J_{sc} değerine sahiptir. Hücre verimleri karşılaştırıldığında, CdS/CST-25/CdTe hücresi, CdS/CdSe/CdTe hücresine kıyasla daha yüksek verime sahiptir. Bu durum, hücre yapısında CdS ile CdTe tabakaları arasında CdSe yerine optimum bant aralığına sahip bir $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ alaşımı kullanmanın daha uygun olduğunu göstermektedir. Bunun sebebi CdSe yerine $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ alaşımı kullanıldığı zaman; tabakalar-arasında nispeten daha kontrollü bir difüzyon ve alaşımlanma sürecinin oluşmasıdır. Bunun yanında CdTe ile arasındaki örgü uyumsuzluğu da azalarak heteroeklem kalitesi artmaktadır

5. ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında, Se-katısıyla pencere ve soğurma katmanlarının özelliklerinin iyileştirilerek, hücre veriminin artırılması amaçlandı. Pencere katmanları olarak kullanılan CdS/CdSe iki-tabakalı yapılarının özellikleri, belirli bir tavlama atmosferi ve sıcaklıkta, tavlama süresi ve CdCl₂ işlemine bağlı olarak incelendi. Bu kapsamda tavlama süresi 1-10 dk. arasında sınırlı tutuldu. Optimizasyon parametrelerini genişleterek, daha yüksek kaliteli filmler elde etmek için, daha yüksek tavlama sürelerinde (>10 dk.) ısıtım işlemi uygulanarak, filmlerin karakteristiği üzerindeki etkisi belirlenebilir. Bunun yanında, hava atmosferi ve 400°C sabit tavlama sıcaklığının yerine N, Ar ya da Ar+O₂ gibi farklı tavlama atmosferleri ile 100°C ile 500°C arasındaki farklı sıcaklıklar denenerek, kristal yapısı, alaşımlanma, bant aralığı vs. gibi aygıt performansına doğrudan etki eden parametreler optimize edilebilir. Bunların yanında CdS/CdSe tabakasının kalınlığı bu çalışmada sabit tutuldu. CdS/CdSe ikili yapısında CdS ve CdSe'nin farklı kalınlıklar kullanılarak, hücre parametrelerine etkisi incelenebilir. Ayrıca filmlerin kristal yapısını iyileştirmek için uygulanan klorlama işleminde CdCl₂ yerine MgCl₂ kullanılarak, alternatif bir klorlama işleminin film yapısı ve hücre performansı üzerindeki etkisi incelenebilir. CdS/CdSe pencere katmanının aygıt yapısında tampon (buffer) tabakası ve yüksek direçli saydam (HRT) tabakalar kullanılarak, hücre verimleri daha yüksek değerlere arttırılabilir.

Se-katkılı soğurma tabakalarının aygıt performansına etkisini incelemek için termal buharlaştırma yöntemi kullanılarak farklı kompozisyonlara sahip CdSe_{1-x}Te_x alaşımları üretilti ve yaklaşık olarak optimum bant aralığına sahip olan alaşımlar belirlendi. Bu alaşımların fotovoltaiik uygulaması, pencere katmanı ve CdTe tabakası arasında ara-soğurma tabaka olarak gerçekleştirildi. Ancak bu ara-tabakanın kalınlığı (~100 nm) sabit tutuldu. Aygıt yapısında soğurma katmanının toplam kalınlığı (CdTe+ CdSe_{1-x}Te_x alaşımı) sabit tutularak, farklı kalınlıklara sahip CdSe_{1-x}Te_x ara-tabakalarının aygıt performansı üzerindeki etkisi incelenebilir. Bunun yanında sadece optimum yakın bant aralığına sahip alaşım tabakalarından ziyade, x=0-0,6 arasındaki kompozisyonlara sahip alaşımların fotovoltaiik performansı incelenebilir. Ayrıca klorlama adımının bilinen iyileştirici etkilerinden faydalanmak için CdSe_{1-x}Te_x tabakasının üzerine CdCl₂ işlemi uygulandıktan sonra CdTe tabakası kaplanarak, hücre verimine etkisi belirlenebilir. Dahası, CdSe_{1-x}Te_x alaşımlarının üretildiği termal buharlaştırma yönteminden başka, üretim yöntemleri

denenerek (örneğin CSS, elektron demeti buharlaştırma, vs.), $\text{CdSe}_{1-x}\text{Te}_x/\text{CdTe}$ ara-yüzey etkileri incelenebilir. Ara-yüzey etkilerini optimize etmek için, en uygun tavlama parametreleri (atmosfer, süre, sıcaklık, basınç, vs.) belirlenebilir ve fotovoltaik uygulamaları gerçekleştirilebilir.



6. KAYNAKLAR

- Abbas, A., West, G., Bowers, J., Isherwood, P., Kaminski, P., Maniscalco, B., Rowley, P., Walls, J., Barricklow, K. ve Sampath, W. S., 2012. The effect of cadmium chloride treatment on close spaced sublimated cadmium telluride thin film solar cells, IEEE 38th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC) PART 2, Haziran, Texas, Proceedings: 1-6.
- Abd El-Mongy, A., Belal, A., El Shaikh, H. ve El Amin, A., 1997. A comparison of the physical properties of CdTe single crystal and thin film, Journal of Physics D: Applied Physics, 30,2, 161.
- Abdul-Manaf, N. A., Salim, H. I., Madugu, M. L., Olusola, O. I. ve Dharmadasa, I. M., 2015. Electro-plating and characterisation of CdTe thin films using CdCl₂ as the cadmium source, Energies, 8,10, 10883-10903.
- Abken, A. ve Bartelt, O., 2002. Sputtered Mo/Sb₂Te₃ and Ni/Sb₂Te₃ layers as back contacts for CdTe/CdS solar cells, Thin Solid Films, 403, 216-222.
- Ablekim, T., Duenow, J. N., Zheng, X., Moutinho, H., Moseley, J., Perkins, C. L., Johnston, S. W., O'Keefe, P., Colegrove, E. ve Albin, D. S., 2020. Thin-film solar cells with 19% efficiency by thermal evaporation of CdSe and CdTe, ACS Energy Letters, 5,3, 892-896.
- Adachi, H. ve Wasa, K., 2012. Thin films and nanomaterials, Handbook of Sputter Deposition Technology: Fundamentals and Applications for Functional Thin Films, Nano-Materials and MEMS, 3-39.
- Aghaei, M., Damanafshan, S., Abyari, M., Imamzai, M., Pourdadash, M. H. ve Thayoob, Y. H. M., 2014. An Overview of Solar Cells Materials Classification, Proceedings of the 2nd National Graduate Conference, Şubat, Selangor, Proceedings: 18-19.
- Alamri, S. ve Brinkman, A., 2000. The effect of the transparent conductive oxide on the performance of thin film CdS/CdTe solar cells, Journal of Physics D: Applied Physics, 33,1, L1.
- Albright, S., Jordan, J., Ackerman, B. ve Chamberlin, R., 1989. Developments on CdS/CdTe photovoltaic panels at Photon Energy, Inc., Solar Cells, 27,1-4, 77-90.
- Amin, N. ve Rahman, K. S., 2017. Close-Spaced Sublimation (CSS): A Low-Cost, High-Yield Deposition System for Cadmium Telluride (CdTe) Thin Film Solar Cells, Modern Technologies for Creating the Thin-film Systems and Coatings, 361.
- Ananda, W., 2017. External quantum efficiency measurement of solar cell, 15th International Conference on Quality in Research (QiR): International Symposium on Electrical and Computer Engineering, Temmuz, Bali, Proceedings: 450-456.

- Aramoto, T., Kumazawa, S., Higuchi, H., Arita, T., Shibutani, S., Nishio, T., Nakajima, J., Tsuji, M., Hanafusa, A. ve Hibino, T., 1997. 16.0% efficient thin-film CdS/CdTe solar cells, Japanese Journal of Applied Physics, 36,10R, 6304.
- Atasoy, Y., 2018. Tellür Katkılı Cu(In,Ga)Se₂ İnce Filmlerinin Üretimi ve Bazı Yapısal, Optik ve Elektrik Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Aven, M. ve Prener, J. S., 1967. Physics and chemistry of II-VI compounds, Noord-Hollandsche UM, Amsterdam.
- Azmi, N., Chelvanathan, P., Yusoff, Y., Shahahmadi, S., Tiong, S., Sopian, K. ve Amin, N., 2020. A comprehensive study on the effects of alternative sulphur precursor on the material properties of chemical bath deposited CdS thin films, Ceramics International, 46,11, 18716-18724.
- Baban, C. ve Rusu, G., 2003. On the structural and optical characteristics of CdSe thin films, Applied surface science, 211,1-4, 6-12.
- Bacaksız, E., 2002. CdS İnce Filmlerin Farklı Yöntemlerle Büyütülmesi, Yapısal, Elektriksel ve Optiksel Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Bacaksız, E., Basol, B., Altunbaş, M., Yılmaz, S., Tomakin, M. ve Abay, B., 2007. Effect of substrate temperature and post-deposition annealing on the properties of evaporated CdSe thin films, Physica Status Solidi (B), 244,2, 497-504.
- Bai, Z., Wan, L., Hou, Z. ve Wang, D., 2011. Effect of CdCl₂ annealing treatment on CdS thin films and CdTe/CdS thin film solar cells, physica status solidi (c), 8,2, 628-630.
- Bailey, S. G. ve Flood, D. J., 1998. Space photovoltaics, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 6,1, 1-14.
- Baines, T., Bowen, L., Mendis, B. G. ve Major, J. D., 2020. Microscopic Analysis of Interdiffusion and Void Formation in CdTe_(1-x)Se_x and CdTe Layers, ACS Applied Materials & Interfaces, 12,34, 38070-38075.
- Baines, T., Shalvey, T. P. ve Major, J. D., 2018. A Comprehensive Guide to Solar Energy Systems, CdTe Solar Cells, Elsevier, 215-232.
- Bao, Z., Liu, L., Yang, X., Tang, P., Yang, K., Lu, H., He, S., Liu, J., Liu, X. ve Li, B., 2017. Synthesis and characterization of novel oxygenated CdSe window layer for CdTe thin film solar cells, Materials Science in Semiconductor Processing, 63, 12-17.
- Bashir, A., Awan, T. I., Tehseen, A., Bilal Tahir, M. ve Ijaz, M., 2020. Chemistry of Nanomaterials: Fundamentals and Applications, Interfaces and surfaces, Elsevier, 51-81.

- Basol, B. M., 1988. Electrodeposited CdTe and HgCdTe solar cells, Solar Cells, 23,1-2, 69-88.
- Başol, B. M., 1992. Processing high efficiency CdTe solar cells, International journal of solar energy, 12,1-4, 25-35.
- Başol, B. M. ve McCandless, B., 2014. Brief review of cadmium telluride-based photovoltaic technologies, Journal of Photonics for Energy, 4,1, 040996.
- Beckmann, J. ve Mennenga, A., Calculation of emissions when there is a fire in a photovoltaic system made of cadmium telluride modules, <https://www.lfu.bayern.de/luft/doc/pvbraende.pdf>, 03 Aralık 2020
- Birkmire, R. W., McCandless, B. ve Hegedus, S., 1992. Effects of processing on CdTe/CdS materials and devices, International journal of solar energy, 12,1-4, 145-154.
- Blakers, A., Devine-Wright, P., Gazzoni, D., Hestnes, A., Kituyi, E. ve Kretzschmar, J., 2009. Research and development on renewable energies: A global report on photovoltaic and wind energy, International Science Panel on Renewable Energies, Aralık, Paris, Proceedings: 1-44.
- Bonnet, D. ve Meyers, P., 1998. Cadmium-telluride—Material for thin film solar cells, Journal of Materials Research, 13,10, 2740-2753.
- Bonnet, D., 1992. The CdTe thin film solar cell-an overview, International Journal of Solar Energy, 12,1-4, 1-14.
- Bothwell, A. M., Drayton, J. A., Jundt, P. M. ve Sites, J. R., 2020. Close-space sublimation-deposited ultra-thin CdSeTe/CdTe solar cells for enhanced short-circuit current density and photoluminescence, JoVE (Journal of Visualized Experiments), 157, e60937.
- BP, 2019. BP Statistical Review of World Energy 2019 | 68th edition, BP Statistical Review of World Energy & Ember.
- Britt, J. ve Ferekides, C., 1993. Thin-film CdS/CdTe solar cell with 15.8% efficiency, Applied physics letters, 62,22, 2851-2852.
- Burst, J. M., Duenow, J. N., Albin, D. S., Colegrove, E., Reese, M. O., Aguiar, J. A., Jiang, C.-S., Patel, M., Al-Jassim, M. M. ve Kuciauskas, D., 2016. CdTe solar cells with open-circuit voltage breaking the 1 V barrier, Nature Energy, 1,3, 1-8.
- Burst, J., Rance, W., Barnes, T., Reese, M., Li, J. V., Kuciauskas, D., Steiner, M., Gessert, T., Zhang, K. ve Hamilton, C., 2012. The effect of CdTe growth temperature and ZnTe: Cu contacting conditions on CdTe device performance, 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 000188-000191.

- Cappuccio, G. ve Terranova, M. L., Thin film characterisation by advanced X-ray diffraction techniques, <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/465281>, 15 Aralık 2020
- Chakrabarti, R., Ghosh, S., Chaudhuri, S. ve Pal, A., 1999. Rapid thermal processing for the preparation of CdTe film, Journal of Physics D: Applied Physics, 32,11, 1258.
- Chander, S. ve Dhaka, M. S., 2016. Thermal evolution of physical properties of vacuum evaporated polycrystalline CdTe thin films for solar cells, Journal of Materials Science-Materials in Electronics, 27,11, 11961-11973.
- Chander, S. ve Dhaka, M., 2018. Enhancement in microstructural and optoelectrical properties of thermally evaporated CdTe films for solar cells, Results in physics, 8, 1131-1135.
- Chandramohan, S., Sathyamoorthy, R., Lalitha, S. ve Senthilarasu, S., 2006. Structural properties of CdTe thin films on different substrates, Solar energy materials and solar cells, 90,6, 686-693.
- Chauhan, A. ve Chauhan, P., 2014. Powder XRD technique and its applications in science and technology, J Anal Bioanal Tech, 5,5, 1-5.
- Chen, F., Duic, N., Alves, L. M. ve da Graça Carvalho, M., 2007. Renewislands—Renewable energy solutions for islands, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11,8, 1888-1902.
- Chopra, K., Paulson, P. ve Dutta, V., 2004. Thin-film solar cells: an overview, Progress in Photovoltaics: Research and applications, 12,2-3, 69-92.
- Chou, H., Rohatgi, A., Jokerst, N., Kamra, S., Stock, S., Lowrie, S., Ahrenkiel, R. ve Levi, D., 1996. Approach toward high efficiency CdTe/CdS heterojunction solar cells, Materials Chemistry and Physics, 43,2, 178-182.
- Chou, H., Rohatgi, A., Thomas, E., Kamra, S. ve Bhat, A., 1995. Effects of Cu on CdTe/CdS heterojunction solar cells with Au/Cu contacts, Journal of The Electrochemical Society, 142,1, 254.
- Chu, T., Chu, S. S., Britt, J., Ferekides, C., Wang, C., Wu, C. ve Ullal, H., 1992. 14.6% efficient thin-film cadmium telluride heterojunction solar cells, IEEE electron device letters, 13,5, 303-304.
- Chu, T., Chu, S. S., Ferekides, C., Wu, C., Britt, J. ve Wang, C., 1991. 13.4% efficient thin-film CdS/CdTe solar cells, Journal of applied physics, 70,12, 7608-7612.
- Colinge, J.-P. ve Colinge, C. A., 2005. Physics of semiconductor devices, Springer Science & Business Media.
- Collins, S., Hsu, C. A., Palekis, V., Abbas, A., Walls, M. ve Ferekides, C., 2018. Se profiles in CST films formed by annealing CdTe/CdSe bi-layers, IEEE 7th World Conference

- on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC)(A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC), Haziran, Hawaii, Proceedings: 0114-0118.
- Consonni, V., Baier, N., Renet, S., Brambilla, A. ve Feuillet, G., 2006. Compensation and defect passivation processes in polycrystalline CdTe: Cl layers, Physica Status Solidi C, 3,4, 807-811.
- Contreras-Puente, G., Vigil, O., Ortega-Lopez, M., Morales-Acevedo, A., Vidal, J. ve Albor-Aguilera, M., 2000. New window materials used as heterojunction partners on CdTe solar cells, Thin Solid Films, 361, 378-382.
- Cullity, B. D., 1956. Elements of X-ray Diffraction, Addison-Wesley Publishing.
- De Caro, C. ve Haller, C., 2015. UV/VIS spectrophotometry-fundamentals and applications, Mettler-Toledo International, 4-14.
- De Largy, B., Finch, A. ve Gardner, P. J., 1983. Thermodynamic functions for the congruent sublimation of cadmium telluride, Journal of Crystal Growth, 61,2, 194-198.
- De Nobel, D., 1959. Phase equilibria and semiconducting properties of cadmium telluride, Philips Res. Repts, 14, 361-399.
- Dharmadasa, I.M., 2014. Review of the CdCl₂ treatment used in CdS/CdTe thin film solar cell development and new evidence towards improved understanding, Coatings, 4,2, 282-307.
- Dharmadasa, I., Bingham, P. A., Echendu, O., Salim, H., Druffel, T., Dharmadasa, R., Sumanasekera, G., Dharmasena, R., Dergacheva, M. ve Mit, K., 2014. Fabrication of CdS/CdTe-based thin film solar cells using an electrochemical technique, Coatings, 4,3, 380-415.
- Dhass, A., Natarajan, E. ve Ponnusamy, L., 2012. Influence of shunt resistance on the performance of solar photovoltaic cell, International Conference on Emerging Trends in Electrical Engineering and Energy Management (ICETEEEM), Aralık, Tamil Nadu, Proceedings: 382-386.
- Dhere, R., Duenow, J., DeHart, C., Li, J., Kuciauskas, D., Young, M., Alberi, K., Mascarenhas, A. ve Gessert, T., 2011. Analysis of the junction properties of CdS/CdTe devices in substrate and superstrate configurations, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Eylül, Hamburg, Proceedings: 2456-2459.
- Dhere, R., Rose, D., Albin, D., Asher, S., Al-Jassim, M., Cheong, H., Swartzlander, A., Moutinho, H., Coutts, T. ve Ribelin, R., 1997. Influence of CdS/CdTe interface properties on the device properties, Conference Record of the Twenty Sixth IEEE Photovoltaic Specialists Conference-1997, Eylül-Ekim, California, Proceedings: 435-438.

- Dhere, R., Zhang, Y., Romero, M., Asher, S., Young, M., To, B., Noufi, R. ve Gessert, T., 2008. Investigation of junction properties of CdS/CdTe solar cells and their correlation to device properties, 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference 2008, May18, San Diego, Proceedings: 1-5.
- Diaz-Reyes, J., Contreras-Rascón, J., Arias-Cerón, J., Sanchez-Ramirez, J. F., Galván-Arellano, M., Martínez-Juárez, J. ve Balderas-Lopez, J. A., 2015. Structural and optical characterisation of CdSe_{1-y}S_y, Materials Science in Semiconductor Processing, 37, 199-206.
- Diso, D., Fauzi, F., Echendu, O., Olusola, O. ve Dharmadasa, I., 2016. Optimisation of CdTe electrodeposition voltage for development of CdS/CdTe solar cells, Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 27,12, 12464-12472.
- Dittrich, T., 2014. Materials concepts for solar cells, Basic Characteristics and Characterization of Solar Cells, World Scientific Publishing Company.
- Djelloul, A., Adnane, M., Larbah, Y., Zerdali, M., Zegadi, C. ve Messaoud, A., 2016. Effect of annealing on the properties of nanocrystalline CdS thin films prepared by CBD method, Journal of Nano- And Electronic Physics, 8,2, 02005(7pp).
- Dobson, K. D., Visoly-Fisher, I., Hodes, G. ve Cahen, D., 2000. Stability of CdTe/CdS thin-film solar cells, Solar Energy Materials and Solar Cells, 62,3, 295-325.
- Dona, J. ve Herrero, J., 1997. Chemical bath deposition of CdS thin films: an approach to the chemical mechanism through study of the film microstructure, Journal of the Electrochemical Society, 144,11, 4081.
- Duffy, N., Peter, L. ve Wang, R., 2002. Characterisation of CdS| CdTe heterojunctions by photocurrent spectroscopy and electrolyte electroreflectance/absorbance spectroscopy (EEA/EER), Journal of Electroanalytical Chemistry, 532,1-2, 207-214.
- Durose, K., Asher, S. E., Jaegermann, W., Levi, D., McCandless, B. E., Metzger, W., Moutinho, H., Paulson, P., Perkins, C. L. ve Sites, J. R., 2004. Physical characterization of thin-film solar cells, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 12,2-3, 177-217.
- Durose, K., Cousins, M., Boyle, D., Beier, J. ve Bonnet, D., 2002. Grain boundaries and impurities in CdTe/CdS solar cells, Thin Solid Films, 403, 396-404.
- Durose, K., Edwards, P. ve Halliday, D., 1999. Materials aspects of CdTe/CdS solar cells, Journal of Crystal Growth, 197,3, 733-742.
- Echendu, O. K. ve Dharmadasa, I. M., 2015. Graded-bandgap solar cells using all-electrodeposited ZnS, CdS and CdTe thin-films, Energies, 8,5, 4416-4435.
- Fairbrother, A., Fourdrinier, L., Fontané, X., Izquierdo-Roca, V., Dimitrievska, M., Pérez-Rodríguez, A. ve Saucedo, E., 2014. Rapid thermal processing of Cu₂ZnSnSe₄ thin

- films, IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), Haziran, Colorado, Proceedings: 2317-2320.
- Farrow, R., Jones, G., Williams, G. ve Young, I., 1981. Molecular beam epitaxial growth of high structural perfection, heteroepitaxial CdTe films on InSb (001), Applied Physics Letters, 39,12, 954-956.
- Ferekides, C. S., Marinskiy, D., Viswanathan, V., Tetali, B., Palekis, V., Selvaraj, P. ve Morel, D., 2000. High efficiency CSS CdTe solar cells, Thin Solid Films, 361, 520-526.
- Ferekides, C. ve Britt, J., 1994. CdTe solar cells with efficiencies over 15%, Solar Energy Materials and Solar Cells, 35, 255-262.
- Ferekides, C., Britt, J., Ma, Y. ve Killian, L., 1993. High efficiency CdTe solar cells by close spaced sublimation, Conference Record of the Twenty Third IEEE Photovoltaic Specialists Conference-1993 (Cat. No. 93CH3283-9), Mayıs, Kentucky, Proceedings: 389-393.
- Ferekides, C., Dugan, K., Ceekala, V., Killian, J., Oman, D., Swaminathan, R. ve Morel, D., 1994. The effects of CdS processing and glass substrates on the performance of CdTe solar cells, Proceedings of 1994 IEEE 1st World Conference on Photovoltaic Energy Conversion-WCPEC (A Joint Conference of PVSC, PVSEC and PSEC), Aralık, Hawaii, Proceedings: 99-102.
- Ferekides, C., Viswanathan, V. ve Morel, D., 1997. RF sputtered back contacts for CdTe/CdS thin film solar cells, Conference Record of the Twenty Sixth IEEE Photovoltaic Specialists Conference-1997, Eylül-Ekim, California, Proceedings: 423-426.
- Fonash, S., 2012. Solar Cell Device Physics, Elsevier.
- Frerichs, R., 1947. The photo-conductivity of "incomplete phosphors", Physical Review, 72,7, 594.
- Geisthardt, R. M., Topič, M. ve Sites, J. R., 2015. Status and potential of CdTe solar-cell efficiency, IEEE Journal of photovoltaics, 5,4, 1217-1221.
- Gessert, T., Romero, M., Dhere, R. ve Asher, S., 2003. Analysis of the ZnTe: Cu contact on CdS/CdTe solar cells, Materials Research Society Spring Meeting, Nisan, California, Proceedings: 1-9.
- Gibson, P., Baker, M. ve Özsan, M., 2002. Investigation of sulphur diffusion at the CdS/CdTe interface of thin-film solar cells, Surface and Interface Analysis: An International Journal devoted to the development and application of techniques for the analysis of surfaces, interfaces and thin films, 33,10-11, 825-829.
- Gnatenko, Y. P., Opanasyuk, A., Ivashchenko, M. M., Bukivskij, P. ve Faryna, I. O., 2014. Study of the correlation between structural and photoluminescence properties of

CdSe thin films deposited by close-spaced vacuum sublimation, Materials science in semiconductor processing, 26, 663-668.

- Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Michael, J. R., Ritchie, N. W., Scott, J. H. J. ve Joy, D. C., 2017. Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis, Springer.
- Granata, J., Sites, J., Contreras-Puente, G. ve Compaan, A., 1996. Effect of CdS thickness on CdS/CdTe quantum efficiency [solar cells], Conference Record of the Twenty Fifth IEEE Photovoltaic Specialists Conference, May18, Washington, Proceedings: 853-856.
- Green, M. A., Dunlop, E. D., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., Kopidakis, N. ve Hao, X., 2020. Solar cell efficiency tables (version 56), Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 28,7, 629-638.
- Green, M. A., Dunlop, E. D., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., Kopidakis, N. ve Hao, X., 2020. Solar cell efficiency tables (Version 57), Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 29,1, 3-15.
- Green, M. A., Dunlop, E. D., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., Kopidakis, N. ve Ho-Baillie, A. W., 2019. Solar cell efficiency tables (Version 55), Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 28,1, 3-15.
- Green, M. A., Dunlop, E. D., Levi, D. H., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M. ve Ho-Baillie, A. W., 2019. Solar cell efficiency tables (version 54), Progress in photovoltaics: research and applications, 27,7, 565-575.
- Green, M. A., Emery, K., Hishikawa Yoshihiro, Warta, W. ve Dunlop, E. D., 2012a. Solar cell efficiency tables (version 40), Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 20, 606-614.
- Green, M. A., Emery, K., Hishikawa Yoshihiro, Warta, W. ve Dunlop, E. D., 2012b. Solar cell efficiency tables (version 41), Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 21, 1-11.
- Green, M. A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W. ve Dunlop, E. D., 2015. Solar cell efficiency tables (Version 45), Progress in photovoltaics: research and applications, 23, 1-9.
- Green, M.A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W. ve Dunlop, E., 2014. Solar cell efficiency tables (version 43), Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 22.
- Grice, C. R., Archer, A., Basnet, S., Paudel, N. R. ve Yan, Y., 2016. Characterization of CdS/CdSe window layers in CdTe thin film solar cells, 2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Haziran, Oregon, Proceedings: 1459-1463.

- Gudage, Y., Deshpande, N. ve Sharma, R., 2009. Influence of pH on microstructural and optical properties of electrosynthesized CdSe thin films, Journal of Physics and Chemistry of Solids, 70,6, 907-915.
- Guillén, C., Martínez, M. ve Herrero, J., 1998. Accurate control of thin film CdS growth process by adjusting the chemical bath deposition parameters, Thin Solid Films, 335,1-2, 37-42.
- Guo, J., Mannodi-Kanakithodi, A., Sen, F. G., Schwenker, E., Barnard, E., Munshi, A., Sampath, W., Chan, M. K. ve Klie, R. F., 2019. Effect of selenium and chlorine co-passivation in polycrystalline CdSeTe devices, Applied Physics Letters, 115,15, 153901.
- Gupta, A. ve Compaan, A. D., 2004. All-sputtered 14% CdS/CdTe thin-film solar cell with ZnO: Al transparent conducting oxide, Applied Physics Letters, 85,4, 684-686.
- Hall, R. S., Lamb, D. ve Irvine, S. J. C., 2021. Back contacts materials used in thin film CdTe solar cells—A review, Energy Science & Engineering, 9, 606-632.
- Han, J., Spanheimer, C., Haindl, G., Fu, G., Krishnakumar, V., Schaffner, J., Fan, C., Zhao, K., Klein, A. ve Jaegermann, W., 2011. Optimized chemical bath deposited CdS layers for the improvement of CdTe solar cells, Solar Energy Materials and Solar Cells, 95,3, 816-820.
- Hanket, G., McCandless, B., Buchanan, W., Fields, S. ve Birkmire, R., 2006. Design of a vapor transport deposition process for thin film materials, Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 24,5, 1695-1701.
- Hao, M., Bai, Y., Zeiske, S., Ren, L., Liu, J., Yuan, Y., Zarrabi, N., Cheng, N., Ghasemi, M. ve Chen, P., 2020. Ligand-assisted cation-exchange engineering for high-efficiency colloidal $\text{Cs}_{1-x}\text{FA}_x\text{PbI}_3$ quantum dot solar cells with reduced phase segregation, Nature Energy, 5,1, 79-88.
- Hegedus, S. S. ve Shafarman, W. N., 2004. Thin-film solar cells: device measurements and analysis, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 12,2-3, 155-176.
- Hegedus, S., 2006. Thin film solar modules: the low cost, high throughput and versatile alternative to Si wafers, Progress in photovoltaics: research and applications, 14,5, 393-411.
- Heo, J., Ahn, H., Lee, R., Han, Y. ve Kim, D., 2003. Influence of ITO surface modification on the growth of CdS and on the performance of CdS/CdTe solar cells, Solar Energy Materials and Solar Cells, 75,1-2, 193-201.
- Hersch, P. ve Zweibel, K., 1982. Basic photovoltaic principles and methods, <https://www.nrel.gov/docs/legosti/old/1448.pdf>, 17 Kasım 2020
- Hierrezuelo-Cardet, P., Palechor-Ocampo, A. F., Caram, J., Ventosinos, F., Pérez-del-Rey, D., Bolink, H. J. ve Schmidt, J. A., 2020. External quantum efficiency measurements

- used to study the stability of differently deposited perovskite solar cells, Journal of Applied Physics, 127,23, 235501.
- Huang, Y. ve Wu, J.-H., 2007. Technological system and renewable energy policy: a case study of solar photovoltaic in Taiwan, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11,2, 345-356.
- Hubbard, S., 2016. Recombination, Photovoltaic Solar Energy: From Fundamentals to Applications, 39-46.
- Huheey, J., Keiter, E. ve Keiter, R., 1993. Principles and applications of inorganic chemistry, Harper Collins, New York.
- Hultgren, R., Desai, P. D., Hawkins, D. T., Gleiser, M. ve Kelley, K. K., 1973. Selected values of the thermodynamic properties of binary alloys, American Society for Metals, Ohio.
- Ibn-Mohammed, T., Koh, S., Reaney, I., Acquaye, A., Schileo, G., Mustapha, K. ve Greenough, R., 2017. Perovskite solar cells: An integrated hybrid lifecycle assessment and review in comparison with other photovoltaic technologies, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 80, 1321-1344.
- IEA., 2020a. World Energy Outlook 2020, International Energy Agency.
- IEA., 2020b. World Energy Balances 2020 Edition Database Documentation, International Energy Agency.
- IEO., 2020. International Energy Outlook 2020, U.S. Energy Information Administration.
- Fraunhofer ISE, Photovoltaics Report, <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>, 12 Kasım 2020.
- Jacobson, M. Z., 2009. Review of solutions to global warming, air pollution, and energy security, Energy & Environmental Science, 2,2, 148-173.
- Jäger, K.-D., Isabella, O., Smets, A. H., van Swaaij, R. A. ve Zeman, M., 2016. Solar energy: fundamentals, technology and systems, UIT Cambridge.
- Jahn, U., Okamoto, T., Yamada, A. ve Konagai, M., 2001. Doping and intermixing in CdS/CdTe solar cells fabricated under different conditions, Journal of Applied Physics, 90,5, 2553-2558.
- Jean, J., Brown, P. R., Jaffe, R. L., Buonassisi, T. ve Bulović, V., 2015. Pathways for solar photovoltaics, Energy & Environmental Science, 8,4, 1200-1219.
- Jelle, B. P., Breivik, C. ve Røkenes, H. D., 2012. Building integrated photovoltaic products: A state-of-the-art review and future research opportunities, Solar Energy Materials and Solar Cells, 100, 69-96.

- Jenny, D. A. ve Bube, R. H., 1954. Semiconducting cadmium telluride, Physical Review, 96,5, 1190.
- JEOL, Scanning Electron Microscope A To Z - Basic Knowledge For Using The SEM, https://www.jeol.co.jp/en/applications/pdf/sm/sem_atoz_all.pdf, 17 Aralık 2020.
- Jianrong, Y., Silk, N., Watson, A., Bryant, A. ve Argent, B., 1995. Thermodynamic and phase diagram assessment of the Cd-Te and Hg-Te systems, Calphad, 19,3, 399-414.
- Joshi, M., Bhattacharyya, A. ve Ali, S. W., 2008. Characterization techniques for nanotechnology applications in textiles, Indian Journal of Fibre & Textile Research, 33, 304-317.
- Kaczmar, S., 2011. Evaluating the read-across approach on CdTe toxicity for CdTe photovoltaics, Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) North America 32nd Annual Meeting, Kasım, Boston, Proceedings: 226.
- Kakiage, K., Aoyama, Y., Yano, T., Oya, K., Fujisawa, J.-i. ve Hanaya, M., 2015. Highly-efficient dye-sensitized solar cells with collaborative sensitization by silyl-anchor and carboxy-anchor dyes, Chemical communications, 51,88, 15894-15897.
- Kalogirou, S., 2017. McEvoy's handbook of photovoltaics: fundamentals and applications, Academic Press.
- Kanevce, A., Levi, D. ve Kuciauskas, D., 2014. The role of drift, diffusion, and recombination in time-resolved photoluminescence of CdTe solar cells determined through numerical simulation, Progress in photovoltaics: Research and Applications, 22,11, 1138-1146.
- Kathalingam, A., Ambika, N., Kim, M., Elanchezhian, J., Chae, Y. ve Rhee, J., 2010. Chemical bath deposition and characterization of nanocrystalline ZnO thin films, Materials Science-Poland, 28,2, 513-522.
- Kathalingam, A., Kim, M.-R., Chae, Y.-S., Rhee, J.-K., Thanikaikarasan, S. ve Mahalingam, T., 2010. Study on electrodeposited $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ semiconducting thin films, Journal of alloys and compounds, 505,2, 758-761.
- Kephart, J., McCamy, J., Ma, Z., Ganjoo, A., Alamgir, F. ve Sampath, W., 2016. Band alignment of front contact layers for high-efficiency CdTe solar cells, Solar Energy Materials and Solar Cells, 157, 266-275.
- Kestner, J. M., McElvain, S., Kelly, S., Ohno, T. R., Woods, L. M. ve Wolden, C. A., 2004. An experimental and modeling analysis of vapor transport deposition of cadmium telluride, Solar energy materials and solar cells, 83,1, 55-65.
- Kevin, P., Alghamdi, Y. G., Lewis, D. J. ve Malik, M. A., 2015. Morphology and band gap controlled AACVD of CdSe and $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$ thin films using novel single source precursors: Bis (diethyldithio/diselenocarbamate) cadmium (II), Materials Science in Semiconductor Processing, 40, 848-854.

- Khairnar, U. P., Bhavsar, D. S., Vaidya, R. U. ve Bhavsar, G. P., 2003. Optical properties of thermally evaporated cadmium telluride thin films, Materials Chemistry and Physics, 80,2, 421-427.
- Khrypunov, G., Romeo, A., Kurdesau, F., Bätzner, D., Zogg, H. ve Tiwari, A. N., 2006. Recent developments in evaporated CdTe solar cells, Solar energy materials and solar cells, 90,6, 664-677.
- Kim, H., Cha, K., Fthenakis, V. M., Sinha, P. ve Hur, T., 2014. Life cycle assessment of cadmium telluride photovoltaic (CdTe PV) systems, Solar Energy, 103, 78-88.
- Kim, M. J., Kim, C. ve Sohn, S. H., 2018. Effects of chemical bath deposition conditions on the growth of CdS thin-films, Molecular Crystals and Liquid Crystals, 677,1, 81-90.
- Kim, S., Jeon, J., Suh, J., Hong, J., Kim, T., Kim, K. ve Cho, S., 2018. Comparative Study of Cu₂Te and Cu Back Contact in CdS/CdTe Solar Cell, Journal of the Korean Physical Society, 72,7, 780-785.
- King, H., Gillham, C. ve Huggins, F., 1969. A Versatile Bragg-Brentano/Seeman-Bohlin Powder Diffractometer, Advances in X-ray Analysis, 13, 550-597.
- Kosyachenko, L., Grushko, E. a. ve Mathew, X., 2012. Quantitative assessment of optical losses in thin-film CdS/CdTe solar cells, Solar Energy Materials and Solar Cells, 96, 231-237.
- Kranz, L., Gretener, C., Perrenoud, J., Schmitt, R., Pianezzi, F., La Mattina, F., Blösch, P., Cheah, E., Chirilă, A. ve Fella, C. M., 2013. Doping of polycrystalline CdTe for high-efficiency solar cells on flexible metal foil, Nature Communications, 4,1, 1-7.
- Krishna, K. V. ve Dutta, V., 2004. Effect of in situ CdCl₂ treatment on spray deposited CdTe/CdS heterostructure, Journal of applied physics, 96,7, 3962-3971.
- Kröger, F. ve De Nobel, D., 1955. XXIV. Preparation and Electrical Properties of CdTe Single Crystals, International Journal of Electronics, 1,2, 190-202.
- Kulkarni, R., Rondiya, S., Pawbake, A., Waykar, R., Jadhavar, A., Jadkar, V., Bhorde, A., Date, A., Pathan, H. ve Jadkar, S., 2017. Structural and optical properties of CdTe thin films deposited using RF magnetron sputtering, Energy Procedia, 110, 188-195.
- Kumar, M. M. D. ve Devadason, S., 2013. Structural and optical properties of CdTe/CdSe heterostructure multilayer thin films prepared by physical vapor deposition technique, Applied Nanoscience, 3,5, 453-459.
- Kumar, S. G. ve Rao, K. K., 2014. Physics and chemistry of CdTe/CdS thin film heterojunction photovoltaic devices: fundamental and critical aspects, Energy & Environmental Science, 7,1, 45-102.

- Kumarasinghe, P., Dissanayake, A., Pemasiri, B. ve Dassanayake, B., 2017. Thermally evaporated CdTe thin films for solar cell applications: Optimization of physical properties, Materials Research Bulletin, 96, 188-195.
- Kuranouchi, S. i., Nakazawa, T., Ashida, A. ve Yamamoto, N., 1994. Cadmium sulfide thin films prepared by chemical bath deposition method, Solar energy materials and solar cells, 35, 185-191.
- Kweku, D. W., Bismark, O., Maxwell, A., Desmond, K. A., Danso, K. B., Oti-Mensah, E. A., Quachie, A. T. ve Adormaa, B. B., 2017. Greenhouse Effect: Greenhouse Gases and Their Impact on Global Warming, Journal of Scientific Research and Reports, 1-9.
- Kwon, D., 2012. Studies of sputtered CdTe and CdSe solar cells, Doktora Tezi, University of Toledo, Ohio.
- Lalitha, S., Sathyamoorthy, R., Senthilarasu, S., Subbarayan, A. ve Natarajan, K., 2004. Characterization of CdTe thin film—dependence of structural and optical properties on temperature and thickness, Solar energy materials and solar cells, 82,1-2, 187-199.
- Lane, D., 2006. A review of the optical band gap of thin film $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$, Solar energy materials and solar cells, 90,9, 1169-1175.
- Le Pevelen, D. D., 2017. Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry (Third Edition), X-ray Crystallography of Small Molecules: Theory and Workflow, Elsevier, 624-639.
- Lewis, N. S., Crabtree, G., Nozik, A. J., Wasielewski, M. R., Alivisatos, P., Kung, H., Tsao, J., Chandler, E., Walukiewicz, W. ve Spitler, M., 2005. Basic research needs for solar energy utilization, Report of the basic energy sciences workshop on solar energy utilization, Nisan, Washington, 1-276.
- Li, C., Poplawsky, J., Paudel, N., Pennycook, T., Haigh, S., Al-Jassim, M., Yan, Y. ve Pennycook, S., 2014. S–Te interdiffusion within grains and grain boundaries in CdTe solar cells, IEEE Journal of Photovoltaics, 4,6, 1636-1643.
- Li, C., Wang, F., Chen, Y., Wu, L., Zhang, J., Li, W., He, X., Li, B. ve Feng, L., 2018. Characterization of sputtered CdSe thin films as the window layer for CdTe solar cells, Materials Science in Semiconductor Processing, 83, 89-95.
- Li, C., Wu, Y., Poplawsky, J., Pennycook, T. J., Paudel, N., Yin, W., Haigh, S. J., Oxley, M. P., Lupini, A. R. ve Al-Jassim, M., 2014. Grain-boundary-enhanced carrier collection in CdTe solar cells, Physical Review Letters, 112,15, 156103.
- Lincot, D., Mokili, B., Froment, M., Cortès, R., Bernard, M. C., Witz, C. ve Lafait, J., 1997. Phase transition and related phenomena in chemically deposited polycrystalline cadmium sulfide thin films, The Journal of Physical Chemistry B, 101,12, 2174-2181.

- Lingg, M., Buecheler, S. ve Tiwari, A. N., 2019. Review of $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ thin films in solar cell applications, Coatings, 9,8, 520.
- Lingg, M., Spescha, A., Haass, S. G., Carron, R., Buecheler, S. ve Tiwari, A. N., 2018. Structural and electronic properties of $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ films and their application in solar cells, Science and technology of advanced materials, 19,1, 683-692.
- Liu, B., Luo, R., Li, B., Zhang, J., Li, W., Wu, L., Feng, L. ve Wu, J., 2016. Effects of deposition temperature and CdCl_2 annealing on the CdS thin films prepared by pulsed laser deposition, Journal of Alloys and Compounds, 654, 333-339.
- Liu, F., Lai, Y., Liu, J., Wang, B., Kuang, S., Zhang, Z., Li, J. ve Liu, Y., 2010. Characterization of chemical bath deposited CdS thin films at different deposition temperature, Journal of alloys and compounds, 493,1-2, 305-308.
- Liu, M., Johnston, M. B. ve Snaith, H. J., 2013. Efficient planar heterojunction perovskite solar cells by vapour deposition, Nature, 501,7467, 395-398.
- Lorenzo, E., 1994. Solar electricity: engineering of photovoltaic systems, Earthscan/James & James.
- Lu, C., Zhang, L., Zhang, Y., Liu, S. ve Liu, G., 2014. Electrodeposition of CdSe layers of various thickness to improve the photocatalytic performance of the CdS/CdSe bilayer structure, Chalcogenide Letters, 11,9, 425-431.
- Luque, A. ve Hegedus, S., 2003. Handbook of photovoltaic science and engineering, Wiley Online Library.
- Ma, C.-H., Huang, J.-H. ve Chen, H., 2002. Residual stress measurement in textured thin film by grazing-incidence X-ray diffraction, Thin solid films, 418,2, 73-78.
- MacKay, D. J., 2013. Solar energy in the context of energy use, energy transportation and energy storage, Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 371,1996, 20110431.
- Madelung, O., 2004. Semiconductors: data handbook, Springer Science & Business Media.
- Majid, F., Malik, A., Ata, S., Hussain, Z., Bibi, I., Iqbal, M., Rafay, M. ve Rizvi, H., 2019. Structural and Optical Properties of Multilayer Heterostructure of CdTe/CdSe Thin Films, Zeitschrift für Physikalische Chemie, 233,9, 1215-1231.
- Major, J. D., 2016. Grain boundaries in CdTe thin film solar cells: a review, Semiconductor Science and Technology, 31,9, 093001.
- Major, J., Al Turkestani, M., Bowen, L., Brossard, M., Li, C., Lagoudakis, P., Pennycook, S. J., Phillips, L., Treharne, R. ve Durose, K., 2016. In-depth analysis of chloride treatments for thin-film CdTe solar cells, Nature Communications, 7,1, 1-10.

- Mathew, X., Cruz, J. S., Coronado, D. R., Millán, A. R., Segura, G. C., Morales, E. R., Martínez, O. S., Garcia, C. C. ve Landa, E. P., 2012. CdS thin film post-annealing and Te–S interdiffusion in a CdTe/CdS solar cell, Solar Energy, 86,4, 1023-1028.
- Mathew, X., Enriquez, J. P., Romeo, A. ve Tiwari, A. N., 2004. CdTe/CdS solar cells on flexible substrates, Solar energy, 77,6, 831-838.
- McCandless, B. E. ve Birkmire, R. W., 1991. Analysis of post deposition processing for CdTe/CdS thin film solar cells, Solar cells, 31,6, 527-535.
- McCandless, B. E. ve Buchanan, W. A., 2008. High throughput processing of CdTe/CdS solar cells with thin absorber layers, 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, May18, San Diego, Proceedings: 1-6.
- McCandless, B. E. ve Dobson, K. D., 2004. Processing options for CdTe thin film solar cells, Solar Energy, 77,6, 839-856.
- McCandless, B. E. ve Sites, J. R., 2011. Handbook of photovoltaic science and engineering, Cadmium telluride solar cells, John Wiley & Sons., 600-641.
- McCandless, B. E., Hanket, G. M., Jensen, D. G. ve Birkmire, R. W., 2002. Phase behavior in the CdTe–CdS pseudobinary system, Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 20,4, 1462-1467.
- Mehta, A., Ultraviolet-visible (UV-Vis) spectroscopy-derivation of beer-lambert law, <https://pharmaxchange.info/2012/04/ultraviolet-visible-uv-vis-spectroscopy-%E2%80%93-derivation-of-beer-lambert-law/>, 04 Mart 2021
- Metin, H. ve Esen, R., 2003. Annealing studies on CBD grown CdS thin films, Journal of Crystal Growth, 258,1-2, 141-148.
- Meysing, D. M., Wolden, C. A., Griffith, M. M., Mahabaduge, H., Pankow, J., Reese, M. O., Burst, J. M., Rance, W. L. ve Barnes, T. M., 2015. Properties of reactively sputtered oxygenated cadmium sulfide (CdS: O) and their impact on CdTe solar cell performance, Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 33,2, 021203.
- Mohanta, D., 2017. A Detailed Study on Optical and Physical Properties of Rice and Its By-Products, Tezpur University.
- Morales-Acevedo, A., 2006. Thin film CdS/CdTe solar cells: research perspectives, Solar Energy, 80,6, 675-681.
- Moualkia, H., Hariech, S. ve Aida, M., 2009a. Structural and optical properties of CdS thin films grown by chemical bath deposition, Thin Solid Films, 518,4, 1259-1262.
- Moualkia, H., Hariech, S., Aida, M., Attaf, N. ve Laifa, E., 2009b. Growth and physical properties of CdS thin films prepared by chemical bath deposition, Journal of Physics D: Applied Physics, 42,13, 135404.

- Moutinho, H., Albin, D., Yan, Y., Dhere, R., Li, X., Perkins, C., Jiang, C.-S., To, B. ve Al-Jassim, M., 2003. Deposition and properties of CBD and CSS CdS thin films for solar cell application, Thin Solid Films, 436,2, 175-180.
- Moutinho, H., Al-Jassim, M., Abulfotuh, F., Levi, D., Dippo, P., Dhere, R. ve Kazmerski, L., 1997. Studies of recrystallization of CdTe thin films after CdCl₂ treatment, Conference Record of the Twenty Sixth IEEE Photovoltaic Specialists Conference-1997, Eylül-Ekim, California, Proceedings: 431-434.
- Moutinho, H., Dhere, R., Jiang, C.-S., Al-Jassim, M. ve Kazmerski, L., 2006. Electrical properties of CdTe/CdS solar cells investigated with conductive atomic force microscopy, Thin Solid Films, 514,1-2, 150-155.
- Moutinho, H., Hasoon, F., Abulfotuh, F. ve Kazmerski, L., 1995. Investigation of polycrystalline CdTe thin films deposited by physical vapor deposition, close-spaced sublimation, and sputtering, Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 13,6, 2877-2883.
- Mukerjee, A. ve Thakur, N., 2011. Photovoltaic Systems: Analysis and Design, PHI Learning Pvt. Ltd.
- Muthukumarasamy, N., Jayakumar, S., Kannan, M. ve Balasundaraprabhu, R., 2009. Structural phase change and optical band gap bowing in hot wall deposited CdSe_xTe_{1-x} thin films, Solar Energy, 83,4, 522-526.
- Nagayoshi, H. ve Suzuki, K., 2004. Growth of thick CdTe films by close-space-sublimation technique, IEEE Symposium Conference Record Nuclear Science 2004, Ağustos, Roma, Proceedings: 4411-4414.
- Nakamura, K., Gotoh, M., Fujihara, T., Toyama, T. ve Okamoto, H., 2003. Influence of CdS window layer on 2- μ m thick CdS/CdTe thin film solar cells, Solar energy materials and solar cells, 75,1-2, 185-192.
- Ndiaye, A. ve Youm, I., 2003. Effects of post-deposition processing on microstructural properties of cadmium selenide thin films grown from solution, The European Physical Journal Applied Physics, 23,2, 75-82.
- Nelson, J. A., 2003. The physics of solar cells, World Scientific Publishing Company.
- Newton, R. H., 1972. Tellurium, Van Nostrand Reinhold Co., New York.
- Nikale, V., Shinde, S., Bhosale, C. ve Rajpure, K., 2011. Physical properties of spray deposited CdTe thin films: PEC performance, Journal of Semiconductors, 32,3, 033001.
- Nowell, M., Scarpulla, M., Compaan, A., Liu, X., Paudel, N., Kwon, D. ve Wieland, K., 2011. Electron backscatter diffraction and photoluminescence of sputtered CdTe thin films, 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference 2011, Haziran, Washington, Proceedings: 001327-001332.

- NREL, Best Research-Cell Efficiencies: Thin-Film Technologies, <https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/cell-pv-eff-thinfilm.202001042.pdf>. 23 Aralık 2020.
- OECD, 2011. Green Growth Studies Energy, Organisation for Economic Co-operation and Development.
- Ojebuoboh, F., 2008. Selenium and tellurium from copper refinery slimes and their changing applications, World of Metallurgy-ERZMETALL, 61,1, 255-261.
- Ojo, A. A. ve Dharmadasa, I., 2019. Factors affecting electroplated semiconductor material properties: The case study of deposition temperature on cadmium telluride, Coatings, 9,6, 370.
- Okamoto, H., Schlesinger, M. E. ve Mueller, E. M., 1992. Handbook: Volume 3: Alloy Phase Diagrams, ASM International, Ohio.
- Ortuño-López, M., Sotelo-Lerma, M., Mendoza-Galván, A. ve Ramirez-Bon, R., 2004. Optical band gap tuning and study of strain in CdS thin films, Vacuum, 76,2-3, 181-184.
- Pandey, A., Tyagi, V., Jeyraj, A., Selvaraj, L., Rahim, N. ve Tyagi, S., 2016. Recent advances in solar photovoltaic systems for emerging trends and advanced applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 53, 859-884.
- Panwar, N., Kaushik, S. ve Kothari, S., 2011. Role of renewable energy sources in environmental protection: A review, Renewable and sustainable energy reviews, 15,3, 1513-1524.
- Patel, K., Jani, M., Pathak, V. ve Srivastava, R., 2009. Deposition of CdSe thin films by thermal evaporation and their structural and optical properties, Chalcogenide Letters, 6,6.
- Patel, S., Chander, S., Purohit, A., Kannan, M. ve Dhaka, M., 2019. Understanding the physical properties of CdCl₂ treated thin CdSe films for solar cell applications, Optical Materials, 89, 42-47.
- Paudel, N. R. ve Yan, Y., 2014. Enhancing the photo-currents of CdTe thin-film solar cells in both short and long wavelength regions, Applied Physics Letters, 105,18, 183510.
- Paudel, N. R., Poplawsky, J. D., Moore, K. L. ve Yan, Y., 2015. Current enhancement of CdTe-based solar cells, IEEE Journal of Photovoltaics, 5,5, 1492-1496.
- Paudel, N. R., Wieland, K. A. ve Compaan, A. D., 2012. Ultrathin CdS/CdTe solar cells by sputtering, Solar Energy Materials and Solar Cells, 105, 109-112.
- Paudel, N., Wieland, K. ve Compaan, A., 2011. Improvements in ultra-thin CdS/CdTe solar cells, 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference 2011, Haziran, Washington, Proceedings: 002784-002786.

- Paulson, P. ve Dutta, V., 2000. Study of in situ CdCl_2 treatment on CSS deposited CdTe films and CdS/CdTe solar cells, Thin Solid Films, 370,1-2, 299-306.
- Phillip, J., 1973. Bonds and Bands in Semiconductors, Elsevier, New York.
- Pinheiro, W., Fernandes, J., Caboclo, G., To, B., Ferreira, C., Quadros, J. ve Cruz, L., 2008. Fabrication of TCO/CdS/CdTe/Au solar cells using different CdCl_2 treatments, 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference 2008, Mayis, California, Proceedings: 1-4.
- Poortmans, J. ve Arkhipov, V., 2006. Thin film solar cells: fabrication, characterization and applications, John Wiley & Sons.
- Poplawsky, J. D., Guo, W., Paudel, N., Ng, A., More, K., Leonard, D. ve Yan, Y., 2016. Structural and compositional dependence of the $\text{CdTe}_x\text{Se}_{1-x}$ alloy layer photoactivity in CdTe-based solar cells, Nature communications, 7, 12537.
- Portillo-Moreno, O., Zelaya-Angel, O., Lozada-Morales, R., Rubín-Falfán, M. ve Rivera-Marquez, J. A., 2002. CdSe band-splitting on thermal annealed films, Optical Materials, 18,4, 383-389.
- Potamialis, C., Lisco, F., Bowers, J. ve Walls, J., 2016. Fabrication of CdTe thin films by close space sublimation, 12th Photovoltaic Science Application and Technology Conference, C98, 199-202.
- Priya, S. S., Shree, B. L., Ranjani, P. T., Karthick, P., Jeyadheepan, K. ve Sridharan, M., 2016. Electrical properties of thermally evaporated CdSe and ZnCdSe thin films, Materials Today: Proceedings, 3,6, 1487-1493.
- Punitha, K., Sivakumar, R., Sanjeeviraja, C., Sathe, V. ve Ganesan, V., 2014. Physical properties of electron beam evaporated CdTe and CdTe: Cu thin films, Journal of Applied Physics, 116,21, 213502.
- Purohit, A., Chander, S., Nehra, S. ve Dhaka, M., 2015. Effect of air annealing on structural, optical, morphological and electrical properties of thermally evaporated CdSe thin films, Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, 69, 342-348.
- Ram, M., Child, M., Aghahosseini, A., Bogdanov, D., Lohrmann, A. ve Breyer, C., 2018. A comparative analysis of electricity generation costs from renewable, fossil fuel and nuclear sources in G20 countries for the period 2015-2030, Journal of Cleaner Production, 199, 687-704.
- Rana, F., 2021. Semiconductor Optoelectronics, Semiconductor Heterostructures, Cornell University.
- Razykov, T. M., Ferekides, C. S., Morel, D., Stefanakos, E., Ullal, H. S. ve Upadhyaya, H. M., 2011. Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects, Solar Energy, 85,8, 1580-1608.

- Reinders, A., Verlinden, P., Van Sark, W. ve Freundlich, A., 2017. Photovoltaic solar energy: from fundamentals to applications, John Wiley & Sons.
- Reyes-Banda, M. G., Regalado-Perez, E., Pintor-Monroy, M., Hernández-Gutiérrez, C., Quevedo-López, M. ve Mathew, X., 2019. Effect of Se diffusion and the role of a thin CdS buffer layer in the performance of a CdSe/CdTe solar cell, Superlattices and Microstructures, 133, 106219.
- Ringel, S., Smith, A., MacDougall, M. ve Rohatgi, A., 1991. The effects of CdCl₂ on the electronic properties of molecular-beam epitaxially grown CdTe/CdS heterojunction solar cells, Journal of applied physics, 70,2, 881-889.
- Riordan, C. ve Hulstron, R., 1990. What is an air mass 1.5 spectrum? (solar cell performance calculations), IEEE Conference on Photovoltaic Specialists 1990, Mayıs, Florida, Proceedings: 1085-1088.
- Rix, A.J., Steyl, J.D.T., Rudman, J., Terblanche, U. ve Van Niekerk, J.L., First Solar's CdTe module technology–performance, life cycle, health and safety impact assessment, https://www.firstsolar.com/-/media/First-Solar/Sustainability-Documents/Sustainability-Peer-Reviews/CRSES2015_06_First-Solar-CdTe-Module-Technology-Review-FINAL.ashx, 26 Mart 2021
- Rohatgi, A., Sudharsanan, R., Ringel, S. ve MacDougall, M., 1991. Growth and process optimization of CdTe and CdZnTe polycrystalline films for high efficiency solar cells, Solar Cells, 30,1-4, 109-122.
- Romeo, A. ve Artegiani, E., 2021. CdTe-Based Thin Film Solar Cells: Past, Present and Future, Energies, 14,6, 1684.
- Romeo, A., Tiwari, A., Zogg, H., Wagner, M. ve Günter, J., 1998. Influence of transparent conducting oxides on the properties of CdTe/CdS solar cells, Proceedings of the 2nd World Photovoltaic Solar Energy Conference, Temmuz, Vienna, Proceedings: 1105-1108.
- Romeo, N., Bosio, A. ve Romeo, A., 2010. An innovative process suitable to produce high-efficiency CdTe/CdS thin-film modules, Solar Energy Materials and Solar Cells, 94,1, 2-7.
- Romeo, N., Bosio, A. ve Canevari, V., 1992a. Large crystalline grain CdTe thin films for photovoltaic application, International Journal of Solar Energy, 12,1-4, 183-186.
- Romeo, N., Bosio, A. ve Canevari, V., 1992b. A new method to prepare efficient CdTe/CdS thin film backwall solar cells, Proceedings of the 11th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Ekim, Montreux, Proceedings: 972-973.
- Romeo, N., Bosio, A., Canevari, V., Terheggen, M. ve Roca, L. V., 2003. Comparison of different conducting oxides as substrates for CdS/CdTe thin film solar cells, Thin Solid Films, 431, 364-368.

- Romeo, N., Bosio, A., Tedeschi, R. ve Canevari, V., 2000. Growth of polycrystalline CdS and CdTe thin layers for high efficiency thin film solar cells, Materials Chemistry and Physics, 66,2-3, 201-206.
- Rothwarf, A. ve Böer, K., 1975. Direct conversion of solar energy through photovoltaic cells, Progress in Solid State Chemistry, 10, 71-102.
- Salim, H., Olusola, O., Ojo, A., Urasov, K., Dergacheva, M. ve Dharmadasa, I., 2016. Electrodeposition and characterisation of CdS thin films using thiourea precursor for application in solar cells, Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 27,7, 6786-6799.
- Santhosh, T., Bangera, K. V. ve Shivakumar, G., 2017. Synthesis and band gap tuning in $\text{CdSe}_{(1-x)}\text{Te}_{(x)}$ thin films for solar cell applications, Solar Energy, 153, 343-347.
- Scherrer, P., 1918. Bestimmung der Größe und der inneren Struktur von Kolloidteilchen mittels Röntgenstrahlen, Math. Klasse., Nachrichten von Der Gesellschaft Der Wissenschaften Zu Göttingen Math. Klasse., 26, 98-100.
- Senthil, K., Mangalaraj, D. ve Narayandass, S. K., 2001. Structural and optical properties of CdS thin films, Applied Surface Science, 169, 476-479.
- Shafiee, S. ve Topal, E., 2009. When will fossil fuel reserves be diminished?, Energy Policy, 37,1, 181-189.
- Shao, M., Fischer, A., Grecu, D., Jayamaha, U., Bykov, E., Contreras-Puente, G., Bohn, R. ve Compaan, A., 1996. Radio-frequency-magnetron-sputtered CdS/CdTe solar cells on soda-lime glass, Applied Physics Letters, 69,20, 3045-3047.
- Shen, K., Bai, Z., Deng, Y., Yang, R., Wang, D., Li, Q. ve Wang, D., 2016. High efficiency CdTe solar cells with a through-thickness polycrystalline CdTe thin film, RSC Advances, 6,57, 52326-52333.
- Shockley, W. ve Queisser, H. J., 1961. Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells, Journal of Applied Physics, 32,3, 510-519.
- Singh, P. ve Ravindra, N. M., 2012. Analysis of series and shunt resistance in silicon solar cells using single and double exponential models, Emerging Materials Research, 1,1, 33-38.
- Sinha, D., Das, A. B., Dhak, D. K. ve Sadhu, P. K., 2014. Equivalent circuit configuration for solar PV cell, 2014 1st International Conference on Non Conventional Energy (ICONCE 2014), Ocaik, West Bengal, Proceedings: 58-60.
- Sites, J. ve Pan, J., 2007. Strategies to increase CdTe solar-cell voltage, Thin Solid Films, 515,15, 6099-6102.
- Solar, F., First Solar Achieves Yet Another Cell Conversion Efficiency World Record, <https://investor.firstsolar.com/news/press-release-details/2016/First-Solar->

- Achieves-Yet-Another-Cell-Conversion-Efficiency-World-Record/default.aspx, 19 Mart 2021
- Solé, J., Bausa, L. ve Jaque, D., 2005. An introduction to the optical spectroscopy of inorganic solids, John Wiley & Sons.
- Soliman, M., Kashyout, A., Shabana, M. ve Elgamal, M., 2001. Preparation and characterization of thin films of electrodeposited CdTe semiconductors, Renewable Energy, 23,3-4, 471-481.
- Speakman, S.A., Basics of X-ray powder diffraction, <http://prism.mit.edu/xray/Basics%20of%20X-Ray%20Powder%20Diffraction.pdf>, 29 Mart 2021
- Stokes, D., 2008. Principles and practice of variable pressure/environmental scanning electron microscopy (VP-ESEM), John Wiley & Sons.
- Stull, D. ve Sinke, G., 1956. Thermodynamic Properties of the elements, Am. Chem. Soc, Washington D.C.
- Swaminathan, P., 2020. Solar cells, Fundamentals of Electronic Materials And Devices, NPTEL, 1-16.
- Swanson, D. E., Sites, J. R. ve Sampath, W. S., 2017. Co-sublimation of CdSe_xTe_{1-x} layers for CdTe solar cells, Solar Energy Materials and Solar Cells, 159, 389-394.
- Sze, S. M., Li, Y. ve Ng, K. K., 2021. Physics of Semiconductor Devices, John Wiley & Sons.
- Tauc, J., Grigorovici, R. ve Vancu, A., 1966. Optical properties and electronic structure of amorphous germanium, Physica Status Solidi (B), 15,2, 627-637.
- Terheggen, M., Heinrich, H., Kostorz, G., Baetzner, D., Romeo, A. ve Tiwari, A., 2004. Analysis of bulk and interface phenomena in CdTe/CdS thin-film solar cells, Interface Science, 12,2, 259-266.
- Terheggen, M., Heinrich, H., Kostorz, G., Romeo, A., Baetzner, D., Tiwari, A., Bosio, A. ve Romeo, N., 2003. Structural and chemical interface characterization of CdTe solar cells by transmission electron microscopy, Thin Solid Films, 431, 262-266.
- Tetali, B. R., 2005. Stability studies of CdTe/CdS thin film solar cells, Doktora Tezi, University of South Florida, Florida.
- Tit, N., Obaidat, I. M. ve Alawadhi, H., 2009. Origins of bandgap bowing in compound-semiconductor common-cation ternary alloys, Journal of Physics: Condensed Matter, 21,7, 075802.
- Tyan, Y.-S. ve Perez-Albuerné, E., 1982. Efficient thin-film CdS/CdTe solar cells, 16th Photovoltaic Specialists Conference, Eylül, California, Proceedings: 794-800.

- Uda, H., Matsumoto, H., Komatsu, Y., Nakano, A. ve Ikegami, S., 1982. All screen printed CdS/CdTe solar cell, 16th Photovoltaic Specialists Conference, Eylül, California, Proceedings: 801-804.
- URL-1, <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-temperature> Climate Change: Global Temperature. 14 Kasım 2020.
- URL-2, <https://www.accion.com/climate-change/> What is climate change and how does it affect you?. 14 Mart 2020.
- URL-3, <https://blog.arcadia.com/10-health-problems-fossil-fuels/> 10 Health Problems from Fossil Fuels. 21 Ekim 2020.
- URL-4, <https://www.eia.gov/energyexplained/nuclear/nuclear-power-and-the-environment.php#:~:text=Nuclear%20energy%20produces%20radioactive%20waste,health%20for%20thousands%20of%20years> Nuclear reactors and power plants have complex safety and security features. 01 Aralık 2020.
- URL-5, <https://ww2.mathworks.cn/matlabcentral/fileexchange/59480-calculate-airmass?focused=6928020&tab=function> Calculate airmass. 25 Ocak 2020.
- URL-6, <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra.html> ASTM G173 - 03 Reference Spectra. 25 Ocak 2020.
- URL-7, <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/short-circuit-current> Short-Circuit Current. 11 Aralık 2020.
- URL-8, <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/open-circuit-voltage#:~:text=The%20open%2Dcircuit%20voltage%2C%20V,with%20the%20light%2Dgenerated%20current> Open-Circuit Voltage. 26 Ekim 2020.
- URL-9, http://www.eng.uc.edu/~beaucag/Courses/SolarPowerForAfrica/BookPartsPVTech/Behavior%20of%20PV_03.pdf The behaviour of solar cells 11 Kasım 2020.
- URL-10, <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/fill-factor> Fill Factor. 11 Aralık 2020.
- URL-11, <https://www.ossila.com/pages/solar-cells-theory> Solar Cells: A Guide to Theory and Measurement. 15 Kasım 2020.
- URL-12, <https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/absorption-coefficient> Absorption Coefficient. 11 Şubat 2021.
- URL-13, <https://investor.firstsolar.com/news/press-release-details/2014/First-Solar-Sets-World-Record-for-CdTe-Solar-Cell-Efficiency/default.aspx> First Solar Sets World Record for CdTe Solar Cell Efficiency. 12 Nisan 2021.

- URL-14, https://www.ndsu.edu/pubweb/~qifzhang/Tech_Sputter-01.pdf Thin Film Deposition. 06 Mayıs 2020.
- URL-15, http://www.dsod.pl/materials/PP0203_IFE.pdf Exercise 3 Physical Vapor Deposition. 06 Nisan 2021.
- URL-16, [https://chem.libretexts.org/Courses/Franklin_and_Marshall_College/Introduction_to_Materials_Characterization__CHM_412_Collaborative_Text/Spectroscopy/Energy-Dispersive_X-ray_Spectroscopy_\(EDS\)](https://chem.libretexts.org/Courses/Franklin_and_Marshall_College/Introduction_to_Materials_Characterization__CHM_412_Collaborative_Text/Spectroscopy/Energy-Dispersive_X-ray_Spectroscopy_(EDS)) Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS). 07 Mayıs 2021.
- Vázquez-Monroy, F., García-Barrientos, A., Hoyo-Montaño, J., Valencia-Palomo, G., Gomez-Pozos, H. ve Bernal, J. L., 2016. Fabrication and characterization of CdS thin film synthesized by CBD deposited from pH-controlled growth solutions for solar cells applications, Metallography, Microstructure, and Analysis, 5,1, 62-68.
- Wakeling, B. R., 2010. Close space sublimation of CdTe for solar cells and the effect of underlying layers, Doktora Tezi, Cranfield University, Bedford.
- Walton, J. K., 2010. Thin Film Group II-VI Solar Cells Based on Band-Offsets, Yüksek Lisans Tezi, Portland State University, Oregon.
- Wan, L., Bai, Z., Hou, Z., Wang, D., Sun, H. ve Xiong, L., 2010. Effect of CdCl₂ annealing treatment on thin CdS films prepared by chemical bath deposition, Thin Solid Films, 518,23, 6858-6865.
- Wang, T., Zhu, X., Li, W., Zhang, J. ve Wang, W., 2020. Incorporation of metal selenide thin films as the secondary absorber in the CdTe solar cells, Journal of Alloys and Compounds, 828, 154415.
- Wang, Z. ve Zhang, Z., 2016. Advanced Nano Deposition Methods, Electron beam evaporation deposition, Wiley Online Library, 33-58.
- Wen, S., Li, M., Yang, J., Mei, X., Wu, B., Liu, X., Heng, J., Qin, D., Hou, L. ve Xu, W., 2017. Rationally controlled synthesis of CdSe_xTe_{1-x} alloy nanocrystals and their application in efficient graded bandgap solar cells, Nanomaterials, 7,11, 380.
- Wei, S. ve Zhang, S., 2001. Theoretical study of doping limits of CdTe, NCPV Program Review Meeting Lakewood, Ekim, Colorado, Proceedings: 201-202.
- Wei, S.-H. ve Zunger, A., 1998. Calculated natural band offsets of all II-VI and III-V semiconductors: Chemical trends and the role of cation d orbitals, Applied Physics Letters, 72,16, 2011-2013.
- Wolf, M. ve Rauschenbach, H., 1963. Series resistance effects on solar cell measurements, Advanced Energy Conversion, 3,2, 455-479.

- Wolfe, C. M., Holonyak, N. ve Stillman, G. E., 1989. Physical Properties of Semiconductors First Edition, Prentice Hall Series in Solid State Physical Electronics.
- Wu, X., 2004. High-efficiency polycrystalline CdTe thin-film solar cells, Solar Energy, 77,6, 803-814.
- Wu, X., Dhere, R., Albin, D., Gessert, T., DeHart, C., Keane, J., Duda, A., Coutts, T., Asher, S. ve Levi, D., 2001. High-efficiency CTO/ZTO/CdS/CdTe polycrystalline thin-film solar cells, NCPV Program Review Meeting Lakewood, Ekim, Colorado, Proceedings: 47-48.
- Wu, X., Yan, Y., Dhere, R., Zhang, Y., Zhou, J., Perkins, C. ve To, B., 2004. Nanostructured CdS: O film: preparation, properties, and application, Physica Status Solidi (C), 1,4, 1062-1066.
- Yang, X., Liu, B., Li, B., Zhang, J., Li, W., Wu, L. ve Feng, L., 2016a. Preparation and characterization of pulsed laser deposited a novel CdS/CdSe composite window layer for CdTe thin film solar cell, Applied Surface Science, 367, 480-484.
- Yang, X., Bao, Z., Luo, R., Liu, B., Tang, P., Li, B., Zhang, J., Li, W., Wu, L. ve Feng, L., 2016b. Preparation and characterization of pulsed laser deposited CdS/CdSe bi-layer films for CdTe solar cell application, Materials Science in Semiconductor Processing, 48, 27-32.
- Yi, X., Wang, L., Mochizuki, K. ve Zhao, X., 1988. The growth and the characteristics of cadmium telluride thin films prepared by chemical vapour deposition, Journal of Physics D: Applied Physics, 21,12, 1755.
- Yoo, S.-H., Butler, K. T., Soon, A., Abbas, A., Walls, J. M. ve Walsh, A., 2014. Identification of critical stacking faults in thin-film CdTe solar cells, Applied Physics Letters, 105,6, 062104.
- Yoon, J.-H., Park, J.-K., Kim, W. M., Lee, J., Pak, H. ve Jeong, J.-h., 2015. Characterization of efficiency-limiting resistance losses in monolithically integrated Cu (In, Ga) Se 2 solar modules, Scientific Reports, 5,1, 1-9.
- Yusoff, Y., Chelvanathan, P., Huda, Q., Akhtaruzzaman, M., Alam, M. M., Al-Othman, Z. A. ve Amin, N., 2015. High quality CdS thin film growth by avoiding anomalies in chemical bath deposition for large area thin film solar cell application, Journal Of Nanoscience And Nanotechnology, 15,11, 9240-9245.
- Zanio, K., 1978. Semiconductors and semimetals, Academic Press.
- Zayed, J. ve Philippe, S., 2009. Acute oral and inhalation toxicities in rats with cadmium telluride, International Journal of Toxicology, 28,4, 259-265.
- Zhang, J. X. ve Hoshino, K., 2018. Molecular Sensors and Nanodevices: Principles, Designs and Applications in Biomedical Engineering, Academic Press.

- Zhang, M., Zhu, L., Zhou, G., Hao, T., Qiu, C., Zhao, Z., Hu, Q., Larson, B. W., Zhu, H. ve Ma, Z., 2021. Single-layered organic photovoltaics with double cascading charge transport pathways: 18% efficiencies, Nature Communications, 12,1, 1-10.
- Zweibel, K., 2010. The impact of tellurium supply on cadmium telluride photovoltaics, Science, 328,5979, 699-701.



ÖZGEÇMİŞ

İlkokulu Bakırköy İbni Sina ilköğretim okulunda, ortaokulu Sultangazi Hüseyin Ersu ilköğretim okulunda ve lise öğrenimini Gaziosmanpaşa Vefa Poyraz lisesinde tamamladı. 2006 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü'nde başladığı lisans öğrenimini 2011 yılında tamamladı. 2011-2012 yılları arasında yedek subay olarak askerlik görevini yerine getirdi. 2012 yılında KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında Yüksek Lisans öğrenimine başladı. 2014 yılında yüksek lisans öğrenimini tamamlayarak mezun oldu. 2015 yılının güz döneminde KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında başladığı doktora programından 2017 yılından ayrıldı. Aynı yıl KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü bünyesinde kurulan Yenilenebilir Enerji Kaynakları/Teknolojileri Anabilim Dalında doktora öğrenimine tekrar başladı. 2019 yılında Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Nanoteknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezine öğretim görevlisi olarak atandı. Halen Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi'nde öğretim görevlisi olan Ali ÇİRİŞ, orta derecede İngilizce bilmektedir.

Bu tez çalışmasında "SCI-Expanded" kapsamında taranan dergilerde 2 adet araştırma makalesi yayınlanmıştır. Yayınlanan bu makaleler,

- A1.** Çiriş, A., Başol, B. M., Atasoy, Y., Karaca, A., Tomakin, M., Küçükömeroğlu, T. ve Bacaksız, E., 2021. Processing CdS and CdSe containing window layers for CdTe solar cells, Journal of Physics D: Applied Physics.
- A2.** Çiriş, A., Başol, B. M., Atasoy, Y., Küçükömeroğlu, T., Karaca, A., Tomakin, M. ve Bacaksız, E., 2021. Effect of CdS and CdSe pre-treatment on interdiffusion with CdTe in CdS/CdTe and CdSe/CdTe heterostructures, Materials Science in Semiconductor Processing, 128, 105750.