

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

NiO İNCE FİLMLEİN DC SIÇRATMA TEKNİĞİ İLE BİRİKTİRİLMESİ
VE OPTOELEKTRONİK UYGULAMALARI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İlker Fatih GÜNGÖR

EKİM 2024

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

NiO İNCE FİLMLEİN DC SIÇRATMA TEKNİĞİ İLE BİRİKTİRİLMESİ
VE OPTOELEKTRONİK UYGULAMALARI

İlker Fatih GÜNGÖR

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"ELEKTRİK YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 13 / 09 / 2024

Tezin Savunma Tarihi : 23 / 10 / 2024

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Abdullah ÜZÜM

Trabzon 2024

ÖNSÖZ

“NiO İnce Filmlerin DC Sıçratma Tekniği ile Biriktirilmesi ve Optoelektronik Uygulamaları” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programında hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca desteğini ve yardımını hiçbir zaman eksik etmeyen, bilgi ve tecrübesiyle bana rehberlik eden sayın hocam Doç. Dr. Abdullah ÜZÜM’e teşekkürü bir borç bilirim. Ek olarak tez çalışması sürecinde bana her türlü imkânı sağlayan Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölüm Başkanlığına ve emeği geçen bütün hocalarıma en içten dileklerle teşekkür ederim.

Bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (KTÜ, BAP, Proje Numarası: FAY-2021-9279) tarafından kısmen desteklenmiştir.

Bu zamana kadar en büyük destekçilerim olan ve beni her koşulda destekleyen başta eşim olmak üzere bütün aileme en içten teşekkürlerimi sunarım. Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

İlker Fatih GÜNGÖR

Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “NiO İnce Filmlerin DC Sıçratma Tekniği ile Biriktirilmesi ve Optoelektronik Uygulamaları” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Abdullah ÜZÜM’ün sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, deneyleri 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. 23/10/2024

İlker Fatih GÜNGÖR

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ	IV
İÇİNDEKİLER	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ	XII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XIV
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. İnce Film Teknolojisi ve Nikel Oksit İnce Filmler	1
1.2. Fotovoltaik Elektrik Üretimi	5
1.3. Fotovoltaik Hücre Parametreleri	6
1.3.1. Kısa Devre Akımı	8
1.3.2. Açık Devre Gerilimi	8
1.3.3. Doldurma Faktörü	8
1.3.4. Verim	9
1.4. Güneş Hücrelerinin Çeşitleri	9
1.4.1. Kristal Silisyum Hücreler	9
1.4.2. III-V Güneş Hücreleri	10
1.4.3. İnce Film Güneş Hücreleri	11
1.4.4. Boya Duyarlı Güneş Hücreleri	11
1.4.5. Organik Güneş Hücreleri	12
1.4.6. Perovskit Güneş Hücreleri	13
1.5. Yarı İletkenler	15
1.5.1. P-N Ekleme	15
1.5.2. Yarı İletkenlerde Jenerasyon ve Rekombinasyon	16
1.6. Hall Etkisi	17
1.7. Elektromanyetik Spektrum ve Işınım	19
1.8. Fresnel Denklemleri	20
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR	22

2.1. Deneysel Çalışmalar.....	22
2.1.1. Numune Hazırlama Aşamaları.....	22
2.1.2. DC Sıçratma Tekniği.....	24
2.1.3. UV-VIS Spektrofotometre	25
2.1.4. Dört Noktalı Prob Ölçüm Sistemi.....	26
2.1.5. X-ışını Kırınımı (XRD) Ölçümü.....	27
2.1.6. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)	29
2.2. Simülasyon Çalışmaları.....	29
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	36
3.1. Deneysel Çalışmalar.....	36
3.1.1. NiO İnce Filmlerin Optik Ölçümleri.....	36
3.1.2. NiO İnce Filmlerin Elektriksel Ölçümleri.....	43
3.1.3. NiO İnce Filmlerin Yapısal Ölçümleri.....	48
3.2. Simülasyon Çalışmaları.....	56
3.2.1. Cs ₄ CuSb ₂ Cl ₁₂ Kalınlık Optimizasyonu	56
3.2.2. Cs ₄ CuSb ₂ Cl ₁₂ Kusur Yoğunluğu (Defect Density) Optimizasyonu.....	60
3.2.3. Spiro-OMeTAD Kalınlık Optimizasyonu	63
3.2.4. Spiro-OMeTAD Kusur Yoğunluğu Optimizasyonu	64
3.2.5. NiO Kalınlık Optimizasyonu	64
3.2.6. NiO Kusur Yoğunluğu (Defect Density) Optimizasyonu	65
3.2.7. NiO Mobilite Optimizasyonu.....	65
3.2.8. Cs ₄ CuSb ₂ Cl ₁₂ Soğurma Katsayısı (Absorption Coefficient) Optimizasyonu	66
3.2.9. Cs ₄ CuSb ₂ Cl ₁₂ Yakalama Kesit Alanı (Capture Cross Section) Optimizasyonu	69
3.2.10. Cs ₄ CuSb ₂ Cl ₁₂ - CH ₃ NH ₃ PbI ₃ Karşılaştırması	73
3.2.11. Boşluk Taşıyıcı Katman Karşılaştırması.....	80
3.2.12. Çift Boşluk Taşıyıcı Katmanlı Güneş Hücresi Tasarımı.....	82
3.2.13. Çift Boşluk Taşıyıcı Katmanlı Güneş Hücrelerinin Elektron İlgisine Bağlı Değişimleri	85
4. SONUÇLAR.....	88
5. ÖNERİLER.....	92
6. KAYNAKLAR	93
ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

NiO İNCE FİMLERİN DC SIÇRATMA TEKNİĞİ İLE BİRİKTİRİLMESİ VE OPTOELEKTRONİK UYGULAMALARI

İlker Fatih GÜNGÖR

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Abdullah ÜZÜM
2024, 99 Sayfa

Bu çalışmada NiO ince filmler cam ve Si alttaşlar üzerine DC sıçratma tekniği kullanılarak biriktirildi. Farklı kalınlıklarda biriktirilen NiO ince filmler oda sıcaklığından 330°C değerine kadar farklı sıcaklıklarda 30 dakika süreyle tavlandı. Tavlama sonrasında ince filmlerin elektriksel, optik ve yapısal ölçümleri gerçekleştirildi. Ölçümlerin analizi sonrasında NiO HTL olarak kullanılarak FTO/TiO₂/Cs₄CuSb₂Cl₁₂/NiO/Au hücre yapısı SCAPS programında oluşturuldu, optimize edildi ve FTO/TiO₂/CH₃NH₃PbI₃/NiO/Au hücre yapısı ile karşılaştırıldı. Soğurucu katman ve HTL optimizasyonları kalınlık, kusur yoğunluğu, mobilité, soğurma katsayısı ve yakalama kesit alanı parametreleri için gerçekleştirildi. NiO yerine farklı maddeler HTL olarak kullanıldı. Ardından CuSbS₂/NiO ve CNTS/NiO, FTO/TiO₂/Cs₄CuSb₂Cl₁₂/HTL1/HTL2/Au hücre yapısında HTL olarak kullanıldı. Sonuçlara örnek olarak; silisyum yüzeyindeki ortalama reflektans (380-1000 nm) yaklaşık %39'dan %8.72 değerine düşürüldü. En yüksek optimum hücre verim değeri Cs₄CuSb₂Cl₁₂ soğurucu katmanlı hücre için %19.84, CH₃NH₃PbI₃ soğurucu katmanlı hücre için %21.83 ve CNTS/NiO çift katman HTL için %19.95 olarak elde edildi.

Anahtar Kelimeler: Nikel Oksit, İnce film, Doğru akım sıçratma, Perovskit

Master Thesis

SUMMARY

THE DEPOSITION OF NiO THIN FILMS BY DC SPUTTERING TECHNIQUE AND THEIR OPTOELECTRONIC APPLICATIONS

İlker Fatih GÜNGÖR

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Electrical and Electronics Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Abdullah ÜZÜM
2024, 99 Pages

In this study, NiO thin films were deposited on glass and Si substrates using DC sputtering technique. NiO thin films deposited at different thicknesses were annealed at various temperatures ranging from room temperature to 330°C for 30 minutes. After annealing the electrical, optical and structural measurements were carried out. Following the analysis of the measurements, the NiO was used as a HTL to construct and optimize the cell structure FTO/TiO₂/Cs₄CuSb₂Cl₁₂/NiO/Au in the SCAPS program, and it was compared with the cell structure FTO/TiO₂/CH₃NH₃PbI₃/NiO/Au. Optimizations for the absorber layer and HTL were performed for parameters such as thickness, defect density, mobility, absorption coefficient, and capture cross section. Different materials were used as HTLs instead of NiO. Subsequently, CuSbS₂/NiO and CNTS/NiO were utilized as HTL in the FTO/TiO₂/Cs₄CuSb₂Cl₁₂/HTL1/HTL2/Au cell structure. As a result, the average reflectance on the silicon surface (380-1000 nm) was reduced from approximately 39% to 8.72%. The highest optimum cell efficiency values obtained were 19.84% for the cell with Cs₄CuSb₂Cl₁₂ as the absorber layer, 21.83% for the cell with CH₃NH₃PbI₃ as the absorber layer, and 19.95% for the cell with the CNTS/NiO double HTL.

Key Words: Nickel Oxide, Thin film, DC sputtering, Perovskite

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. İnce film üretim teknikleri.....	1
Şekil 2. Fotovoltaik hücrenin eşdeğer devresi.....	7
Şekil 3. Fotovoltaik hücrenin I-V ve P-V eğrisi.....	8
Şekil 4. Güneş hücresi üretim akışı (Görmez, 2021).....	10
Şekil 5. P-tipi ve n-tipi yarı iletkenler (Şenay, 2021).....	16
Şekil 6. Hall etkisi geometrik şeması.....	17
Şekil 7. Elektromanyetik spektrum (Arslanhan, 2024).....	19
Şekil 8. Spektral ışık şiddetinin dalga boyuna bağlı değişimi (URL-4, 2024).....	20
Şekil 9. Yüzeye gelen s-polarizeli ve p-polarizeli ışık ile düzlem arasındaki ilişki (URL-5, 2024).....	21
Şekil 10. DC sıçratma sisteminin şeması.....	24
Şekil 11. UV-VIS spektrofotometre yapısı (URL-3, 2024).....	25
Şekil 12. UV-VIS spektrofotometre cihazı.....	26
Şekil 13. Dört noktalı prob (FPP) ölçüm şeması.....	26
Şekil 14. Dört noktalı prob (FPP) ölçüm cihazı.....	27
Şekil 15. Kristal düzlem üzerinde kırınım açısının hesaplanması.....	28
Şekil 16. Güneş hücresi yapıları (a) FTO/TiO ₂ /Cs ₄ CuSb ₂ Cl ₁₂ /HTL/Au, (b) FTO/TiO ₂ /Cs ₄ CuSb ₂ Cl ₁₂ /HTL1/HTL2/Au.....	31
Şekil 17. 5 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki yansımaya grafikleri.....	36
Şekil 18. 10 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki yansımaya grafikleri.....	37
Şekil 19. 20 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki yansımaya grafikleri.....	38
Şekil 20. 30 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki yansımaya grafikleri.....	39
Şekil 21. 50 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki yansımaya grafikleri.....	40
Şekil 22. 70 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki yansımaya grafikleri.....	41
Şekil 23. 100 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki yansımaya grafikleri.....	42
Şekil 24. NiO ince filmlerin kalınlığa bağlı öz direnç değerleri.....	47

Şekil 25. NiO ince filmlerin kalınlığa bağlı iletkenlik değerleri	47
Şekil 26. Farklı sıcaklıklarda tavlanan NiO ince filmlerin XRD spektrumu.....	48
Şekil 27. Yüzey koşulları (a) 20k büyütülmüş, (b) 35k büyütülmüş, (c) 50k büyütülmüş	49
Şekil 28. İnce film yüzeyinin farklı alanlarındaki yuvarlak yapılar (a) 10k büyütülmüş, (b) 20k büyütülmüş, (c) 20k büyütülmüş daha yoğun yuvarlak şekilli yapılar	50
Şekil 29. Farklı alanlar için alan haritalama (a) Yüzey taraması, (b) Alttaş taraması.....	51
Şekil 30. Yüzeyden alttaşa kadar kesit alanı (a)-(b) O, Si ve Ni oranı, (c) O, Si ve Ni değerleri	52
Şekil 31. Farklı alanlar için EDS analizleri (a) Alan-1 analizi, (b) Alan-2 analizi, (c) Alan-3 analizi, (d) Alan-4 analizi	54
Şekil 32. Yuvarlak şekilli yapıların etkisi için EDS analizleri (a)-(b) Yuvarlak şekilli yapıların yakınındaki alanlar, (c) Yuvarlak şekilli yapıların olduğu alan.....	55
Şekil 33. Cs ₄ CuSb ₂ Cl ₁₂ soğurucu katman kalınlığına bağlı J-V grafiği.....	57
Şekil 34. Cs ₄ CuSb ₂ Cl ₁₂ soğurucu katman kalınlığına bağlı J _{SC} -V _{OC} grafiği.....	57
Şekil 35. Cs ₄ CuSb ₂ Cl ₁₂ soğurucu katman kalınlığına bağlı FF-Verim grafiği.....	58
Şekil 36. Cs ₄ CuSb ₂ Cl ₁₂ soğurucu katman kalınlığına bağlı QE-Dalga boyu grafiği	59
Şekil 37. Cs ₄ CuSb ₂ Cl ₁₂ soğurucu katman kusur yoğunluğuna bağlı J-V grafiği	60
Şekil 38. Cs ₄ CuSb ₂ Cl ₁₂ soğurucu katman kusur yoğunluğuna bağlı J _{SC} -V _{OC} grafiği	61
Şekil 39. Cs ₄ CuSb ₂ Cl ₁₂ soğurucu katman kusur yoğunluğuna bağlı FF-Verim grafiği	61
Şekil 40. Cs ₄ CuSb ₂ Cl ₁₂ soğurucu katman kusur yoğunluğuna bağlı QE-Dalga boyu grafiği	62
Şekil 41. Spiro-OMeTAD boşluk taşıyıcı katman kalınlığına bağlı FF-Verim grafiği	63
Şekil 42. Cs ₄ CuSb ₂ Cl ₁₂ soğurucu katman soğurma katsayısına bağlı J-V grafiği	66
Şekil 43. Cs ₄ CuSb ₂ Cl ₁₂ soğurucu katman soğurma katsayısına bağlı J _{SC} -V _{OC} grafiği	67
Şekil 44. Cs ₄ CuSb ₂ Cl ₁₂ soğurucu katman soğurma katsayısına bağlı FF-Verim grafiği	68
Şekil 45. Cs ₄ CuSb ₂ Cl ₁₂ soğurucu katman soğurma katsayısına bağlı QE-Dalga boyu grafiği	69
Şekil 46. Cs ₄ CuSb ₂ Cl ₁₂ soğurucu katman yakalama kesit alanına bağlı J-V grafiği	69
Şekil 47. Cs ₄ CuSb ₂ Cl ₁₂ soğurucu katman yakalama kesit alanına bağlı J _{SC} -V _{OC} grafiği	70

Şekil 48. $\text{Cs}_4\text{CuSb}_2\text{Cl}_{12}$ soğurucu katman yakalama kesit alanına bağlı FF-Verim grafiği	71
Şekil 49. $\text{Cs}_4\text{CuSb}_2\text{Cl}_{12}$ soğurucu katman yakalama kesit alanına bağlı QE-Dalga boyu grafiği	72
Şekil 50. $\text{Cs}_4\text{CuSb}_2\text{Cl}_{12}$ soğurucu katman yakalama kesit alanına bağlı QE-Dalga boyu grafiği	72
Şekil 51. Soğurucu katmanların enerji bant diyagramı karşılaştırması	73
Şekil 52. $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ soğurucu kalınlık değerlerine bağlı (a) J_{SC} , (b) V_{OC} , (c) FF ve (d) verim grafikleri	74
Şekil 53. $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ soğurucu katman kusur yoğunluğu değerlerine bağlı (a) J_{SC} , (b) V_{OC} , (c) FF ve (d) verim grafikleri	76
Şekil 54. $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ soğurucu katman soğurma katsayısına bağlı (a) J_{SC} , (b) V_{OC} , (c) FF ve (d) verim grafikleri	78
Şekil 55. $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ soğurucu katman yakalama kesit alanı değerlerine bağlı (a) J_{SC} , (b) V_{OC} , (c) FF ve (d) verim grafikleri	79
Şekil 56. Farklı boşluk taşıyıcı katmanlar kullanılarak oluşturulan güneş hücrelerinin enerji bant diyagramı.....	80
Şekil 57. Farklı boşluk taşıyıcı katmanlar kullanılarak oluşturulan güneş hücrelerinin $J_{\text{SC}}-V_{\text{OC}}$ ve FF-Verim grafikleri	81
Şekil 58. Farklı boşluk taşıyıcı katmanlar kullanılarak oluşturulan güneş hücrelerinin valans bant kenar farkı grafiği.....	81
Şekil 59. Çift boşluk taşıyıcı katmanlar kullanılarak oluşturulan güneş hücrelerinin enerji bant diyagramı.....	83
Şekil 60. Çift ve tek boşluk taşıyıcı katmanlar kullanılarak oluşturulan güneş hücrelerinin rekombinasyon dağılımı	83
Şekil 61. Çift boşluk taşıyıcı katmanlar kullanılarak oluşturulan güneş hücrelerinin $J_{\text{SC}}-V_{\text{OC}}$ ve FF-Verim grafikleri	84
Şekil 62. Elektron ilgisine bağlı $\text{CuSbS}_2/\text{NiO}$ çift boşluk taşıyıcı katmanlı güneş hücresinin (a) $J_{\text{SC}}-V_{\text{OC}}$ ve (b) FF-Verim grafikleri	85
Şekil 63. Elektron ilgisine bağlı CNTS/NiO çift boşluk taşıyıcı katmanlı güneş hücresinin (a) $J_{\text{SC}}-V_{\text{OC}}$ ve (b) FF-Verim grafikleri	86

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. İnce film biriktirme işlemi parametreleri	23
Tablo 2. Tavlama parametreleri.....	23
Tablo 3. Cs ₄ CuSb ₂ Cl ₁₂ hücre yapısında kullanılan parametreler (Anik vd., 2022; Uzum, 2021; Abdur vd., 2024).....	32
Tablo 4. Kusur katmanında kullanılan parametreler (Karmaker vd., 2024).....	32
Tablo 5. CH ₃ NH ₃ PbI ₃ hücre yapısında kullanılan parametreler (Anik vd., 2022; Uzum, 2021; Abdur vd., 2024).....	33
Tablo 6. Boşluk taşıyıcı katman olarak kullanılan malzemelerin parametreleri (Lunge vd., 2024; Siddique vd., 2024; Abena vd., 2022; Srivastava vd., 2024).....	33
Tablo 7. 5 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki yansıma değerleri	37
Tablo 8. 10 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki yansıma değerleri	38
Tablo 9. 20 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki yansıma değerleri	39
Tablo 10. 30 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki yansıma değerleri.....	40
Tablo 11. 50 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki yansıma değerleri.....	41
Tablo 12. 70 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki yansıma değerleri.....	42
Tablo 13. 100 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki yansıma değerleri	43
Tablo 14. 5 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki özdirenç ve iletkenlik değerleri	43
Tablo 15. 10 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki özdirenç ve iletkenlik değerleri	44
Tablo 16. 20 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki özdirenç ve iletkenlik değerleri	44
Tablo 17. 30 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki özdirenç ve iletkenlik değerleri	45
Tablo 18. 50 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki özdirenç ve iletkenlik değerleri	45
Tablo 19. 70 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki özdirenç ve iletkenlik değerleri	46

Tablo 20. 100 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki öz direnç ve iletkenlik değerleri.....	46
Tablo 21. $\text{Cs}_4\text{CuSb}_2\text{Cl}_{12}$ soğurucu katman kalınlığına bağlı güneş hücresi karakteristik değerleri.....	59
Tablo 22. $\text{Cs}_4\text{CuSb}_2\text{Cl}_{12}$ soğurucu katman kusur yoğunluğuna bağlı güneş hücresi karakteristik değerleri.....	62
Tablo 23. Spiro-OMeTAD boşluk taşıyıcı katman kalınlığına bağlı güneş hücresi karakteristik değerleri.....	64
Tablo 24. $\text{Cs}_4\text{CuSb}_2\text{Cl}_{12}$ soğurucu katman soğurma katsayısına bağlı güneş hücresi karakteristik değerleri	68
Tablo 25. $\text{Cs}_4\text{CuSb}_2\text{Cl}_{12}$ soğurucu katman yakalama kesit alanına bağlı güneş hücresi karakteristik değerleri	71
Tablo 26. $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ soğurucu katman kalınlık değerlerine bağlı güneş hücresi karakteristik değerleri.....	75
Tablo 27. $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ soğurucu katman kusur yoğunluğu değerlerine bağlı güneş hücresi karakteristik değerleri	77
Tablo 28. $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ soğurucu katman soğurma katsayısına bağlı güneş hücresi karakteristik değerleri.....	78
Tablo 29. $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ soğurucu katman yakalama kesit alanı değerlerine bağlı güneş hücresi karakteristik değerleri	80
Tablo 30. Farklı boşluk taşıyıcı katmanlar kullanılarak oluşturulan güneş hücrelerinin karakteristik değerleri.....	82
Tablo 31. Tek ve çift boşluk taşıyıcı katmanlar kullanılarak oluşturulan güneş hücrelerinin karakteristik değerleri.....	84
Tablo 32. Elektron ilgisine bağlı $\text{CuSbS}_2/\text{NiO}$ çift boşluk taşıyıcı katmanlı güneş hücresinin karakteristik değerleri	86
Tablo 33. Elektron ilgisine bağlı CNTS/NiO çift boşluk taşıyıcı katmanlı güneş hücresinin karakteristik değerleri	87

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Al	: Alüminyum
As	: Arsenik
Au	: Altın
B	: Bor
Bi	: Bizmut
C	: Kapasitans
CaTiO ₂	: Kalsiyum titanyum oksit
CdTe	: Kadmiyum tellür
CIGS	: Bakır indiyum galyum selenit
CIS	: Bakır indiyum diselenid
CNTS	: Bakır nikel kalay sülfür
cm	: Santimetre
CuI	: Bakır iyodür
CuO	: Bakır(II) oksit
Cu ₂ O	: Bakır(I) oksit
CuSbS ₂	: Bakır antimon sülfür
CuSCN	: Bakır tiyosiyanat
CZTSe	: Bakır çinko kalay sülfür
DC	: Doğru akım
D _n	: Elektron difüzyon katsayısı
D _p	: Boşluk difüzyon katsayısı
<i>e</i>	: Elektron yükü
<i>E</i>	: Elektrik alan şiddeti
EDS	: Enerji dağılımlı x-ışını spektroskopisi
E _F	: quasi-Fermi seviyeleri
E _g	: Bant enerjisi
ETL	: Elektron transfer katmanı
f	: Frekans
FF	: Doldurma faktörü
FPP	: Dört noktalı prob

FTO	: Flor katkılı kalay oksit
Ga	: Galyum
GaAs	: Galyum Arsenik
HTL	: Boşluk taşıyıcı katman
I	: Akım
I_0	: Ters doyma akımı
I_D	: Diyot akımı
In	: İndiyum
I_{ph}	: Güneş hücresinin akım değeri
J_{SC}	: Kısa devre akımı
InP	: İndiyum fosfat
J	: Akım yoğunluğu
k	: Boltzman sabiti
L	: Problar arası mesafe
mA	: Miliamper
MoO ₃	: Molibden trioksit
mTorr	: miliTorr
N	: Azot
N_A	: Akseptör yoğunluğu
N_C	: İletkenlik bandı etkin durum yoğunluğu
N_D	: Donör yoğunluğu
N_i	: İçsel taşıyıcı yoğunluğu
Ni	: Nikel
NiO	: Nikel Oksit
nm	: Nanometre
N_t	: Kusur yoğunluğu
n_t	: Termal elektron yoğunluğu
N_V	: Değerlik bandı etkin durum yoğunluğu
P	: Fosfor
P _{3HT}	: Poli (3-hekziltifen)
P_i	: Birim alana düşen güç değeri
P_{max}	: Maksimum güç değeri
p_t	: Termal boşluk yoğunluğu

q	: elektriksels yük
QE	: Kuantum verimliliği
r	: Yansıma katsayısı
RF	: Radyo frekans
R_p	: Paralel direnç
R_s	: Seri direnç
Ru	: Rutenyum
s	: Saniye
S	: Siemens
Sb	: Antimon
SCAPS	: Güneş hücresi kapasitans simülatörü
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
Si	: Silisyum
SiO_2	: Silisyum dioksit
t	: Geçirgenlik katsayısı
T	: Sıcaklık
TCO	: Şeffaf iletken katman
TiO_2	: Titanyum dioksit
UV-VIS	: Ultraviyole-görünür
V	: Gerilim
V_d	: Diyot gerilimi
V_H	: Hall gerilimi
V_{OC}	: Açık devre gerilimi
V_{th}	: Termal hız
W	: Güç
W_0	: Sıçratılan malzemenin miktarı
WS_2	: Tungsten disülfür
XRD	: X-ışın kırınımı
ZnTe	: Çinko tellür
$^{\circ}C$	: Santigrat
λ	: Dalga boyu
ρ	: Özdirenç
μ	: Mobilite

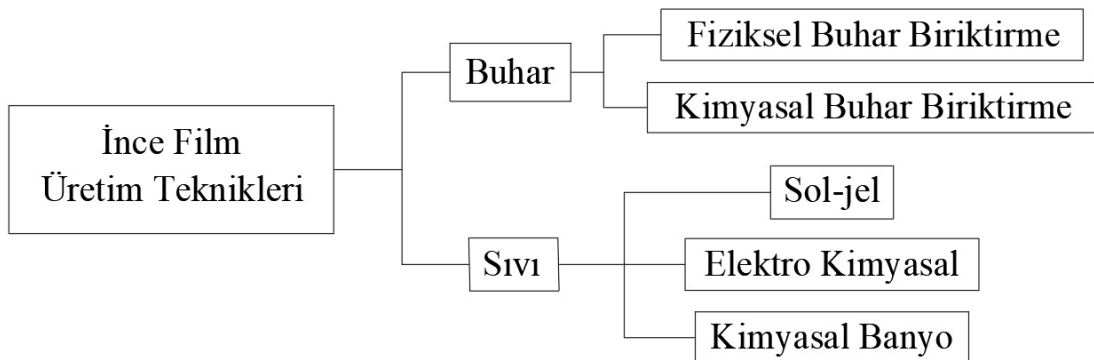
η	: Verim
ψ	: Elektriksel potansiyel
ε	: Dielektrik sabiti
ε_r	: Bağıl geçirgenlik
χ	: Elektron ilgisi
σ	: İletkenlik
σ_{yka}	: Yakalama kesit alanı
B	: Manyetik alan
v_s	: Yük taşıyıcılarının sürüklenme hızı
Ω	: Direnç
τ	: Taşıyıcı yaşam süresi
μm	: Mikrometre

1. GENEL BİLGİLER

1.1. İnce Film Teknolojisi ve Nikel Oksit İnce Filmler

İnce filmler, optoelektronik malzeme endüstrisinin temelini oluşturmaktadır. İnce filmler kaplanacak olan malzemenin bir alttaş üzerine oluşturulmasıyla elde edilir. Günümüzde ince filmlerin kullanım alanları yarı iletken cihazlar, yalıtım ve iletim kaplamaları, devre elemanları, yansıma önleyici kaplamalar ve sensörler başta olmak üzere oldukça yaygındır. İnce filmler farklı üretim teknikleriyle oluşturulabilir. İlk ince film, 1838 yılında elektroliz yöntemi sayesinde elde edilmiştir. Sonrasında kimyasal reaksiyon yöntemi, asal gaz içerisinde buharlaştırma yöntemi ve Joule ısıtması yöntemi gibi yöntemlerle ince filmler üretilmeye devam etmiştir. İnce film teknolojisinde vakum cihazlarının kullanılmasıyla modern üretim yöntemleri oluşturulabilmiştir (Sönmezoğlu vd., 2012).

İnce film üretim teknikleri sıvı ve buhar fazında olmak üzere iki ana başlıkta incelenebilir. Sıvı fazda büyütme sol-jel, elektrokimyasal yöntem ve kimyasal banyo olarak üç alt başlıkta verilebilir. Sıvı fazda büyütme için ince film üretiminde yaygın olarak kullanılan püskürtme ve döndürme ile kaplama yöntemleri verilebilir. Buhar fazda kaplama ise kendi içinde fiziksel ve kimyasal buhar biriktirme yöntemleri olarak ikiye ayrılır. Fiziksel buhar biriktirmeye sıçratma ve termal buharlaştırma yöntemleri örnek verilebilir. Kimyasal buhar biriktirmeye ise atomik kaplama ve metal organik kimyasal buhar biriktirme yöntemleri örnek verilebilir. Şekil 1’de ince film üretim teknikleri temel başlıklar altında verilmiştir (Sönmezoğlu vd., 2012).



Şekil 1. İnce film üretim teknikleri

Dönel Kaplama yöntemi, 1846 yılında keşfedilmiştir. Geffcken 1939 yılında dönel kaplama yöntemi ile silisyum dioksit (SiO_2) alttaş üzerine kaplama yapılabileceğini öne sürmüştür. Bu yöntem, Schott Glass tarafından 1950 yılında kapsamlı olarak çalışılmıştır ve günümüzde de sert veya az eğimli alttaşlar üzerinde ince film oluşturmak için kullanılmaktadır (Özden, 2019). Bu sistem temel olarak motor, vakum pompası ve alttaştan oluşmaktadır. Döndürme işlemi için motor kullanılır. Döndürülecek olan tabanın platformda sabit kalması için vakum pompası kullanılır. Alttaş ise kaplama yapılacak olan taban malzemesidir (Kök, 2020). Bu yöntemle film oluşturabilmek için ilk olarak, başlangıç çözeltisi olan sol hazırlanır. Hazırlanan bu çözelti tabana damlatılır. Daha sonra cihaza dönüş devri, dönüş süresi ve dönüş devrine ne kadar sürede ulaşacağı gibi parametreler girilir. Bu ayarlardan sonra dönme işlemi başlatılır. Döndürme sürecinde, damlatılan sıvı tüm yüzeye yayılır ve fazla çözelti ise dönme etkisiyle dışarı doğru atılır. Döndürme aşaması tamamlandıktan sonra alttaşta kalan ıslak kaplama kurutulur. Kurutma işleminde, fazla çözelti buharlaştırılır. Bu işlemler, istenilen kalınlıkta katman oluşturana kadar devam eder (Altuncu, 2012). Bu yöntem kullanılarak nikel oksit (NiO) ince filmler oluşturulabilir. Ahmed ve arkadaşları (2019) tarafından dönel kaplama yöntemi kullanılarak silisyum alttaş üzerine oluşturulan NiO ince filmlerin elektriksel, optik ve yapısal özellikleri incelenmiştir (Ahmed vd., 2019).

Sprey biriktirme yöntemi ile ince film güneş hücresi uygulaması, ilk olarak 1966 yılında R.R. Chamberlin tarafından inorganik sülfür ve selenür bileşiklerinin elde edilmesi ile yapılmıştır. Bu yöntem ile kaplama işlemi, vakum ortamına ihtiyaç duymadan uygun bir çözeltinin işlem görmesiyle oluşturulmaktadır. Sprey biriktirme sistemi üç ana parçadan oluşmaktadır. Bunlar; püskürtücü başlık, ısıtıcı ve şırınga pompasıdır. Bu sisteme ek olarak, akış ölçerler de eklenebilir (Aydın, 2016). Sprey biriktirme, hazırlanan çözeltinin önceden ısıtılan alttaş üzerine belirli bir akış hızında, azot (N) gibi gazlar kullanılarak püskürtülmesine dayanan bir yöntemdir (Şahsuvar, 2019). Bu yöntem kullanılarak NiO ince filmler oluşturulabilir. Hassan (2014) tarafından yapılan çalışmada cam alttaş üzerine oluşturulan NiO ince filmlerin elektriksel, optik ve yapısal özellikleri incelenmiştir (Hassan, 2014).

Atomik kaplama yöntemi, birbiri ardına tamamlanmış yüzey reaksiyonlarından faydalanılarak bir kısım kimyasallarla gaz fazında ince film biriktirme işlemi için kullanılmaktadır. Bu yöntemde, öncüllerin ayrı ayrı döngülerde yüzeye gönderilmesiyle kimyasal buhar biriktirmenin düzenlenmiş şekli olarak tanımlanmaktadır (Durna, 2019).

Alttaş yüzeyine gelen öncül gaz yüzey ile reaksiyona girerek ilk katmanı oluşturur. Büyütme çemberi ilk tepkimede oluşabilecek yan ürünlerden veya yüzeyin doyuma ulaşması sebebiyle reaksiyona girmemiş öncül gazlardan arındırılarak, ikinci öncül gazla bu maddeler arasında oluşabilecek istenmeyen gaz fazında reaksiyonların önüne geçilmiş olur. Bu durum büyütülen filmlerde kusurların azaltılması için önemli bir rol oynar. İlk öncül gazla yüzey aktif hale gelir. İkinci öncül gaz ilk molekülle reaksiyona girer. Büyütme çemberi tekrar arındırılarak işlem tekrar edilir (Alasağ, 2014; Güngör, 2013). Hsu ve arkadaşları (2015) tarafından atomik katman biriktirme yöntemi kullanılarak polimer güneş hücresine boşluk taşıyıcı katman olarak NiO biriktirilmesi üzerine çalışma yapılmıştır (Hsu vd., 2015).

Termal buharlaştırma yönteminde, vakum ortamı içerisinde bulunan kaynak materyal buharlaştırılır. Buharlaştırma sonucunda koparılan iyonlar, alttaş üzerinde birikirler. Böylece kaplama işlemi gerçekleşir. Bu yöntemde bir pota bulunur. Kaynak malzeme, buharlaştırılmak üzere bu potaya yerleştirilir. Bu pota, yüksek erime sıcaklığına ve yüksek elektriksel iletkenliğe sahip malzemelerden üretilir. Bunlar genellikle tungsten, tantal ve molibden gibi refrakter metallere imal edilir. Termal buharlaştırma yöntemi rezistans, indüksiyon, ark ve elektron demeti ile buharlaştırma olarak dört farklı şekilde uygulanabilir. Rezistans ile buharlaştırma yönteminde, rezistans teller sayesinde potadan akım geçirilerek kaynak malzeme ısıtılır ve buharlaştırma işlemi gerçekleştirilir. Buharlaştıran kaynak malzeme, potaya göre daha soğuk olan alttaş üzerinde birikmiş olur (Aytuğ, 2020). Ark ile buharlaştırma yönteminde, kaynak malzemeyi buharlaştırmak için gerekli olan ısı ark ile elde edilmektedir. Bu yöntemde düşük gerilimle ve yüksek akımla, katot üzerinde ark meydana getirilir. Katot yüzeyinde ark meydana gelen noktalarda yaklaşık 2500°C gibi yüksek bir sıcaklık elde edilir. Elde edilen bu ısı neticesinde kaynak malzeme buharlaşır ve biriktirme gerçekleşir (Aytuğ, 2020; Tosun, 2019). Elektron demeti ile buharlaştırma yöntemi, bir elektron kaynağı sayesinde sağlanan yüksek enerjili elektronların, hedef malzemeye yönlendirilmesi sonucunda açığa çıkan enerjinin malzemeyi buharlaştırılması prensibine dayanmaktadır. Elektronlar, elektron tabancası veya oyuk katot kullanılarak üretilebilmektedir (Karakız, 2014). Dastan ve arkadaşları (2023) tarafından termal buharlaştırma yöntemi ile biriktirilen NiO ince filmlerin gaz sensörlerinde kullanımı üzerine çalışma yapılmıştır (Dastan vd., 2023).

Sıçratma tekniği ilk olarak 1852 yılında doğru akım gaz parlama deşarj tübünde Grove tarafından gözlemlenmiştir. Sıçratma ile biriktirme işlemi temel olarak şu şekilde gerçekleşir; Hedef malzeme yüzeyi, ısı enerjisi kullanmadan plazma veya iyon tabancası

sayesinde hızlandırılan atomik boyuttaki yüksek enerjili gaz iyonlarıyla bombardıman edilir. Böylece atomlar yüzeyden sıçratılmış olurlar ve sıçratılan bu atomlar buhar fazına geçerek istenilen alttaş üzerine birikirler. Sıçratma tekniğinin farklı basınç değerlerinde farklı buharlaşma hızlarına sahip alaşımların, bileşimleri değişmeksizin başarıyla biriktirilebilmesi ve film yapısına makro parçacıkların girme olasılığının çok düşük olması en önemli avantajıdır. Dezavantaj olarak ise limitli kaplama kalınlığı verilebilir. Bu teknik sayesinde fotodedektörler, sensörler, optoelektronik aygıtlar ve güneş hücrelerinde kullanılabilir (Wasa vd., 2012; Sönmezoğlu, 2019).

Sıçratma ile biriktirme diyot, manyetik alan ve iyon demeti ile sıçratma şeklinde farklı tekniklerle uygulanabilir. Diyot ile sıçratmanın yapısı şöyledir; Biri anot diğeri katot olmak üzere birbirlerine paralel olarak yerleştirilmiş iki düzlemsel elektrottan oluşur. Katodun üst yüzeyinde kaplama malzemesi, altında ise su soğutmalı hazne bulunur. Kaplanacak olan malzeme ise anoda yerleştirilir (Sönmezoğlu, 2019). Manyetik sıçratma tekniği diyot sıçratma tekniğiyle aynı çalışma prensibinde biriktirme yapar. Manyetik sıçratma tekniğinde ek olarak kaplanacak malzemenin alt kısmına mıknatıs eklenerek iyonize moleküllerin alttaşa yönelmesini sağlayıp bu sayede film kalitesinin artırılması hedeflenir. Bu mıknatıslar kaplanacak malzemenin altına birbirlerine ters olacak şekilde yerleştirilir. Bu sayede elektriksel ve manyetik alan birbirlerine dik bir şekilde oluşturulur ve alttaş üzerinde halkalar şeklinde alan elde edilir. Bu alan sayesinde daha fazla molekülün alttaş üzerine biriktirilmesi sağlanabilir. İyon demeti ile sıçratma ise hedef malzemenin iyon bombardımanına tutulmasıyla gerçekleşir. İyon bombardımanı sonrasında hedef malzeme yüzeyinden moleküller sıçratılmış olurlar. Sıçratılan bu moleküller alttaşa yönlendirildiğinde ince film biriktirilebilir (Karakuş & Koç, 2023).

Reddy ve arkadaşları (2021) tarafından yürütülen çalışmada cam alttaş üzerine doğru akım (DC) sıçratma tekniği kullanılarak NiO ince filmler üretilmiştir. Sıçratma işlemi esnasında kullanılan parametreler güç değeri 100 W ile 200 W arasında, alttaş mesafesi 7 cm, çalışma basıncı 30 mTorr, sıcaklık değeri 249,85 °C, biriktirme hızı 9,25 nm/dak ile 21,5 nm/dak arasında ve kullanılan gazlar Ar ve O₂ olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında sıçratma güç değerinin biriktirilen ince film üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Güç değerinin artışına bağlı olarak öz direnç azalırken optik geçirgenlik iyileşmiştir (Reddy vd., 2021).

Kumar ve arkadaşları (2023) tarafından yürütülen farklı bir çalışmada, cam alttaş üzerine DC sıçratma tekniği kullanılarak NiO ince filmler üretilmiştir. Sıçratma işlemi

esnasında kullanılan parametreler güç değeri 100 W, alttaş mesafesi 15 cm, çalışma basıncı 30 mTorr, alttaş sıcaklık değeri 26°C ve 300°C, vakum tavlama sıcaklık değeri 1 saat süreyle 300°C ve kullanılan gazlar Ar ve O₂ olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. İncelenen bu çalışma kapsamında alttaş sıcaklığının biriktirilen ince film üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Alttaş sıcaklık değerinin artışına bağlı olarak öz direnç değeri düşüş göstermiştir (Kumar vd., 2023).

Reddy ve arkadaşları (2023) tarafından yürütülen farklı bir çalışmada, cam alttaş üzerine DC sıçratma tekniği kullanılarak NiO ince filmler üretilmiştir. Sıçratma işlemi esnasında kullanılan parametreler güç değeri 150 W, çalışma basıncı 30 mTorr, tavlama sıcaklık değeri 199,85°C ile 399,85°C arasında, ince film kalınlığı 350 nm değerinde ve kullanılan gazlar Ar ve O₂ olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. İncelenen bu çalışma kapsamında tavlama sıcaklığının biriktirilen ince film üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Tavlama sıcaklığı değerinin artışına bağlı olarak öz direnç değeri de artış göstermiştir (Reddy vd., 2023).

1.2. Fotovoltaik Elektrik Üretimi

Fotovoltaik güneş hücreleri, genel tanım itibarıyla güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarı iletken aygıtlardır. Güneşten gelen fotonlar, yarı iletken malzemelerde elektronların hareketini etmesini sağlayarak bir elektrik akımı meydana getirirler.

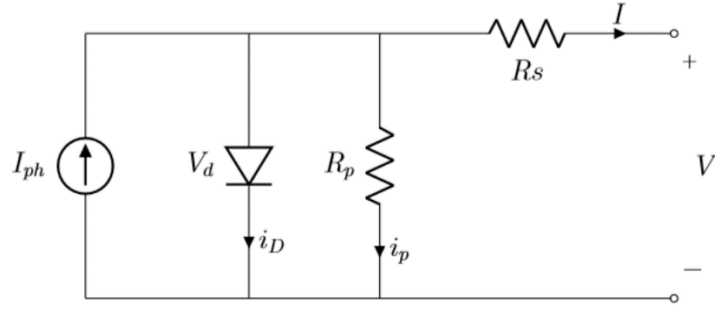
Fotovoltaik olay, ilk olarak 1839 yılında Edmund Becquerel tarafından keşfedilmiştir. Becquerel, elektrolit içerisine daldırılmış elektrotlar arasındaki gerilimin, elektrolit üzerine düşen ışığa bağımlı olduğunu gözlemleyerek fotovoltaik olayı keşfetmiştir. Katı cisimlerde fotovoltaik olay ise ilk kez 1876 yılında G.W. Adams ve R.E. Day tarafından selenyum kristalleri üzerinde gösterilmiştir. İlerleyen yıllarda bu çalışmalara istinaden bakır oksit ve selenyuma dayalı foto diyotlar, yaygın olarak fotoğrafçılık alanında ışık metrelerinde kullanılmıştır (Öztürk & Kaya, 2019). 1941 yılında ilk yarı iletken p-n bağlantılı güneş hücreleri Russel Ohl tarafından tanımlanmıştır (Green, 2002). 1954 yılında Chapin ve arkadaşları tarafından gerçek anlamda ilk güneş hücresi üretilmiştir. Bu yapı güneş enerjisini %6 verimlilikle elektrik enerjisine dönüştüren silisyum tabanlı fotovoltaik hücrelerdir. Bu buluş, fotovoltaik sistemler için önemli bir dönüm noktasıdır. Bu buluş ışığında izleyen yıllarda yapılan araştırmalar ve ilk tasarımlar, uzay araçlarında kullanılabilecek sistemler üzerine yapılmıştır. 1960 yılından itibaren fotovoltaik güç

sistemleri uzay çalışmalarında kullanılmaktadır. 1970’li yılların ilk dönemlerine kadar fotovoltaiik alandaki çalışmalar bu uygulamalarda sınırlı kalmıştır. Güneş hücresi yapılarının gerçek anlamda gelişimi 1954 yılından itibaren başlamasına rağmen bu yapılara olan ilgi 1973’lü yıllardan itibaren olmuştur (Öztürk & Kaya, 2019). Bunun sebebi ise 1973 yılında Petrol ihracatı yapan Arap Ülkeleri Birliği’nin Yom Kippur savaşında ABD’nin İsrail Ordusuna destek vermesine karşılık ilan ettiği ve Birinci Petrol Krizi olarak adlandırılan petrol ambargosudur(URL-1, 2024). Buna karşılık büyük bütçeli ve geniş kapsamlı araştırma projelerine başlanmıştır. Bu projeler kapsamında uzay çalışmalarında da kendini kanıtlamış silisyum kristaline dayalı güneş hücrelerinin verimini artırmaya yönelik çalışmalar yapılırken aynı zamanda daha az yarı iletken malzeme içerdiği için daha ucuz maliyetlerle üretimi gerçekleştirilebilen ince film güneş hücreleri üzerinde çalışmalar yapılmıştır (Öztürk & Kaya, 2019).

Günümüzde bu hücreler oldukça gelişerek hem üretim hem de yapı itibariyle farklı şekillerde oluşturulmaktadır. Günümüzde üretilen güneş hücrelerinin; geleneksel kristal silisyum hücre yapısındaki verimlilik oranları $\%29.1 \pm 0.6$, $\%26.8 \pm 0.4$ değerlerinde iken III-V grubu hücre yapısındaki verimlilik oranları $\%47.6 \pm 2.6$ şeklindedir (Green vd., 2023).

1.3. Fotovoltaiik Hücre Parametreleri

Fotovoltaiik hücreler geniş alanlı yarı iletken diyotlar olarak tanımlanabilir. Bu hücrelerde ışınım altında foton enerjisi elektrik akımına dönüşür (Qi & Ming, 2012). Şekil 2’de fotovoltaiik hücrenin eşdeğer devresi verilmiştir. Bu hücrenin ürettiği akım değeri I_{ph} ile gösterilmiştir ve bu değer ışınım ile orantılıdır. İdeal durumlarda fotovoltaiik hücrenin eşdeğer devresi bir diyot ve bir akım kaynağı şeklinde oluşturulabilir ancak gerçek durumları karşılaması açısından devreye seri ve paralel direnç eklenmelidir. Seri ve paralel dirençler Şekil 2’de sırasıyla R_s ve R_p olarak verilmiştir. Hücre bağlantılarından, p-n eklem derinliğinden ve hücrede kullanılan malzemelerin saflık özelliklerinden kaynaklanan direnç, seri dirençtir. Paralel direnç ise p-n eklemi sızıntı akımlarından kaynaklanmaktadır (İşen & Koçan, 2020).



Şekil 2. Fotovoltaik hücrenin eşdeğer devresi

Şekil 2’de verilen eşdeğer devrenin kirchhoff yasası ile elde edilen çıkış akımı denklem 1’de verilmiştir.

$$I = I_{ph} - I_D - I_p \quad (1)$$

Denklem 1’de I_D olarak verilen diyot akımı denklem 2 ile hesaplanmaktadır. Bu denklemde I_0 ters doyma akımını, V_d diyot gerilim değerini, T_c sıcaklığını, q elektron yükünü, n idealite faktörünü ve k Boltzman sabitini ifade eder.

$$I_D = I_0 \left[\exp \left(\frac{qV_d}{nkT_c} \right) - 1 \right] \quad (2)$$

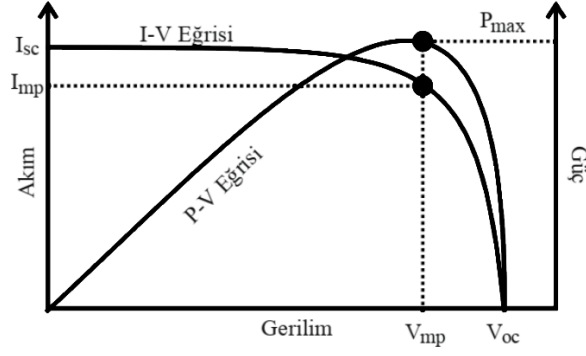
Denklem 3’de çevre gerilimlerinden elde edilen diyot gerilim değeri yer almaktadır.

$$V_d = V + IR_s \quad (3)$$

Denklem 2 ve 3 ile elde edilen akım değerleri denklem 1’de yerine yazıldığında denklem 4’te verilen çıkış akımı denklemi elde edilir.

$$I_D = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{nkT_c} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (4)$$

Şekil 3’te güneş hücresinin karakteristik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan I-V eğrisi verilmiştir. Bu eğri sayesinde güneş hücresinin kısa devre akımı (J_{SC}), açık devre gerilimi (V_{OC}), doldurma faktörü (FF) ve verim (η) değerleri elde edilir. I-V eğrisinin altında kalan en büyük dörtgenin alanından maksimum güç değeri (P_{max}) elde edilir.



Şekil 3. Fotovoltaik hücrenin I-V ve P-V eğrisi

1.3.1. Kısa Devre Akımı

Kısa devre akımı (I_{sc}), her iki kontak kısa devre durumundayken veya iki kontak arasındaki gerilim değeri sıfıra eşitken ölçülen akım değeridir. Kısa devre akımı ışımının oluşturduğu yük taşıyıcılarının sayısına ve bu yüklerin devrede ayrılıp toplanma hızlarına bağlıdır (Aydoğan, 2015). Ek olarak güneş hücresinin verimi belirlenirken kullanılan kısa devre akım yoğunluğu, kısa devre akımının hücre alanına bölünmesiyle edilir.

1.3.2. Açık Devre Gerilimi

Açık devre gerilimi (V_{oc}), devre açık konumdayken yani devreden akım geçmediği durumdaki ölçülen gerilim değeridir. Denklem 5'te açık devre gerilimi denklemi verilmiştir.

$$V_{oc} = \frac{nkT_c}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right) \quad (5)$$

1.3.3. Doldurma Faktörü

Doldurma faktörü, güneş hücresinden elde edilen elektriksel güç değerinin yüzdesidir. Doldurma faktörünü, maksimum güç değerinin kısa devre akımı ve açık devre geriliminin çarpımına olan oranı belirler. Denklem 6'da doldurma faktörü denklemi verilmiştir.

$$FF = \frac{P_{max}}{J_{sc} V_{oc}} \quad (6)$$

1.3.4. Verim

Verim, maksimum güç noktasına karşılık gelen güç değerinin birim alana düşen güç değerine oranıyla elde edilir. Denklem 7’de verim değerinin formülü verilmiştir.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_0} \quad (7)$$

Güneş hücrelerinde verimi fotonların etkin şekilde soğrulması, mümkün olduğu kadar fazla elektron-boşluk çiftlerinin oluşturulması ve rekombinasyon gibi olaylar etkiler. Bu doğrultuda verim değerini artırmak için güneş hücrelerinde yeni malzemeler ve bunların farklı kombinasyonları yapılmaktadır (Aydoğan, 2015).

1.4. Güneş Hücrelerinin Çeşitleri

Güneş hücrelerinin, yeni enerji kaynakları aranması ve teknolojik gelişmeler sayesinde hem verim kapasitesi artırılmış hem de tasarımları çeşitlendirilmiştir. Bu farklı tasarımlar sınıflandırılırken nesil kelimesiyle tanımlanmaktadır. Bu sınıflandırma yapısında tek kristal Si (c-Si) tabanlı hücreler birinci nesil, ince film teknolojisi kullanılan güneş hücreleri ikinci nesil ve foto elektrokimyasal, organik ve perovskit maddeler kullanılan güneş hücreleri yapıları ise üçüncü nesil olarak tanımlanmaktadır (Şenel, 2022).

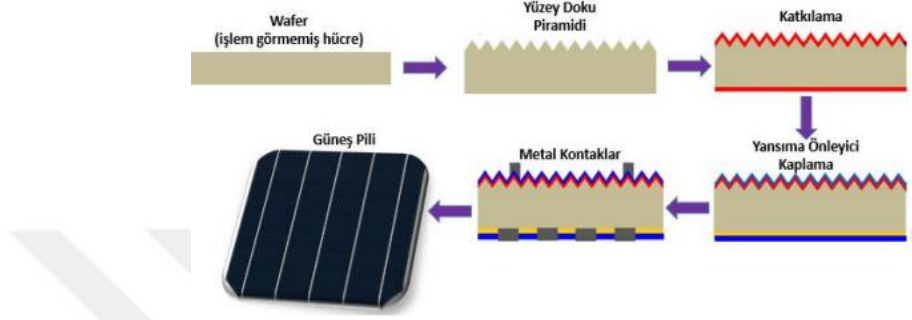
1.4.1. Kristal Silisyum Hücreler

Kristal silisyum güneş hücreleri iki farklı yapıda oluşturulabilir. Bunlar; tek kristal güneş hücreleri ve çok kristal güneş hücreleridir. Günümüzde bu güneş hücrelerinin verimi, tek kristal için 26.8 ± 0.4 ve çok kristal için 24.4 ± 0.3 değerlerine ulaşmıştır (Green vd., 2023).

Geleneksel bir kristal silisyum güneş hücresinin üretim akışı farklı süreçlerden oluşmaktadır. Bunlar; yüzey doku piramidi oluşturma, katkılama, yansıma önleyici katman ve metal kontak oluşturma aşamalarıdır.

Yüzey doku piramidi, hücre yüzeyinde piramit biçiminde bir yapı oluşturulmasını sağlayarak verim artışına katkıda bulunur. Katkılama işlemi, işlem silisyuma diyot özelliği kazandırarak fotovoltaiik etkiyi sağlamak amacıyla p-n eklemi oluşturulması olarak tanımlanabilir. Yansıma önleyici katmanlar, yüzeydeki tekstüre yapıya ek olarak ışığın

yansımısını engelleyerek soğurulan foton miktarını artırmak amacıyla hücre yüzeyinde oluşturulan katman olarak tanımlanabilir. Bu kaplama, yansıma önleyici katman olarak kullanılacak malzemenin yapısına göre farklı yöntemlerle oluşturulabilir. Metal kontaklar, hücrede üretilen akımı devreye iletebilmek için hücrenin ön ve arka yüzeyi metal kaplanarak oluşturulur. Bu metal kaplamalar farklı maddeler kullanılarak tasarlanabilir (Görmez, 2021).



Şekil 4. Güneş hücresi üretim akışı (Görmez, 2021)

1.4.2. III-V Güneş Hücreleri

Bu güneş hücrelerinin yapısını temel olarak; foton soğurucu katmanda bileşik veya alaşım halinde bulunan III grubundan galyum (Ga), indiyum (In), alüminyum (Al) ve V grubundan arsenik (As), fosfor (P), azot, antimon (Sb) elementleri oluşturur (Sertel, 2020). Bu hücre yapısında yaygın olarak galyum arsenik (GaAs) ve indiyum fosfat (InP) alttaşlar kullanılmaktadır. Tüm güneş hücreleri arasında en yüksek verim düzeyine ulaşılabilen hücre yapısını III-V güneş hücreleri oluşturmaktadır. Günümüzde tek hücre yapısında verimleri 30.8 ± 1.9 değerindedir. Çok eklemlili yapıda (GaInP/GaInAs; GaInAsP/GaInAs) ise verimleri 47.6 ± 2.6 değerine ulaşmıştır (Green vd., 2023).

Güneş hücreleri tasarımlarında III-V güneş hücreleri hem teorik olarak hem de uygulamada en yüksek verim değerlerine sahiptirler. Bu verim üstünlüklerine ek olarak, radyasyona karşı daha dayanıklıdırlar bu sayede radyasyon nedeniyle yapılarında bir bozulma meydana gelmez. Bu sayede bu güneş hücreleri uzay uygulamalarında etkin bir şekilde kullanılmaktadırlar. Ticari amaçlı üretilen uyduların yarısından fazlasında III-V güneş hücreleri kullanılmaktadır. Çoklu eklem yapısı oluşturabilirler ve bu yapılar zaten yüksek seviyede olan verim değerlerini daha da artırmalarına olanak sağlamaktadır. Dezavantajları ise maliyetlerinin yüksek olmalıdır. Hem malzeme maliyetleri hem de üretim aşamasındaki maliyetleri oldukça yüksektir (Zaimler, 2019).

1.4.3. İnce Film Güneş Hücreleri

Güneş hücrelerinde kullanılan malzemenin, maliyetin ve işçiliğin azaltılmasına yönelik yapılan araştırma çalışmaları yarı iletken malzemelerin geniş yüzeyler üzerine ince bir film şeklinde kaplanmasını ortaya çıkarmıştır. Bu sayede ince film güneş hücreleri geliştirilmiştir. Bu güneş hücreleri isimlerini genellikle soğurucu katmanlarından almaktadır. İnce film güneş hücreleri, üst üste yerleştirilen ince yarı iletken katmanlardan oluşur. İnce filmlerin tasarımı için kullanılabilecek çok sayıda malzeme bulunmaktadır. Bu güneş hücreleri esnek yapıdadır. Bu ince filmler döndürerek biriktirme yöntemi, sıçratma ile biriktirme yöntemi, püskürtme ile biriktirme yöntemi ve kimyasal buhar biriktirme gibi yöntemlerle üretilebilirler (Öztürk & Kaya, 2019). Günümüzde ince film güneş hücrelerinin verimi 23.35 ± 0.5 değerine ulaşmıştır (Green vd., 2023).

Polikristal ince film güneş hücreleri; üst katmanın, alt yarı iletken katmanından farklı tasarlandığı heteroeklem yapısına sahiptir. Genellikle n-tipi olan üst katman, genellikle p-tipi olan soğurucu katmana doğru neredeyse bütün ışığı geçirir. Omik kontaklar, alttaşa neredeyse kayıpsız bir şekilde elektrik akımı sağlamak için kullanılır (URL-2, 2024). İnce film güneş hücrelerinde, çoğu tek kristal güneş hücresi yapısından farklı olarak elektrik kontağı için metal ızgara kullanılmaz. Bunun yerine ince bir şeffaf iletken oksit katmanı kullanılır. Bu oksit katmanlarını genellikle kalay oksit, indiyum kalay oksit ve çinko oksit gibi malzemeler oluşturur. Bu malzemeler hem şeffaf hem de elektriksel olarak iletken oldukları için, güneş hücresinin ışığı soğurmasına olanak tanır ve elektriksel bağlantıları sağlarlar. Buna karşılık verimleri diğer hücrelere göre düşüktür (Öztürk & Kaya, 2019).

İnce film güneş hücrelerinin kadmiyum tellür (CdTe), bakır indiyum diselenid (CIS), bakır indiyum galyum selenit (CIGS) ve amorf silisyum güneş hücreleri gibi farklı yapılarda oluşturulabilmektedir. Günümüzde CdTe güneş hücresinin verimi 21.0 ± 0.4 , CIS güneş hücresinin verimi 14 , CIGS güneş hücresinin verimi 23.35 ± 0.5 , amorf silisyum güneş hücrelerinin verimi 11.9 ± 0.3 değerlerindedir (Öztürk & Kaya, 2019; Green vd., 2023).

1.4.4. Boya Duyarlı Güneş Hücreleri

Boya duyarlı güneş hücreleri üçüncü nesil güneş hücreleri grubunda yer alır. Bu güneş hücreleri tasarımında fotosentez olayından esinlenilmiştir. Boya duyarlı güneş hücreleri, genellikle silisyum gibi bir yarı iletken ve su gibi bir çözücü sıvı içerisinde eriyen tuzla oluşturulmuş bir elektrolit sıvı içerir. Yarı iletken ve elektrolit, güneşten gelen fotonlar

hücreye ulaştığında elektron-boşluk çiftlerini ayırmaya çalışır. Işınım tarafından indüklenen yük taşıyıcıların kaynağı, bu güneş hücre yapısına da adını veren ışığa duyarlı boyalardır. Boya olarak yaygın olarak iyodür kullanılır. Ayrıca titanyum dioksit (TiO_2) gibi maddeler boya moleküllerini iskelet gibi bir yapıda tutmak için kullanılır (Öztürk & Kaya, 2019). Bu güneş hücrelerindeki en önemli gelişme 1991 yılında gerçekleşmiştir.

Bu dönemde, TiO_2 nano parçacıkları, daha verimli ve daha kararlı özelliklere sahip rutenyum (Ru) bazlı kompleks bir boya ile birleştirilmiştir. Bu sayede güneş ışığındaki fotonların daha etkili bir şekilde soğurulmasını sağlamıştır (Gratzel, 2005). Boya duyarlı güneş hücrelerinin günümüzdeki verimi 11.9 ± 0.4 değerindedir (Green vd., 2023).

Orijinal Gratzel tasarımı, boya duyarlı güneş hücresi temel olarak üç bölümden oluşur. En üst katmanda, cam malzemeden tasarlanan arka plaka üzerinde çökeltilerek elde edilen flor katkılı kalay oksitten (FTO) oluşan geçirgen özellikte bir anot yer alır. İletken plakanın arkasında, geniş bir yüzey alanına sahip gözenekli bir yapı oluşturabilmek amacıyla kullanılan ince bir TiO_2 yer alır. TiO_2 , fotonların sadece küçük bir bölümünü soğurur. Plaka, ışıma duyarlı rutenyum boya ve çözücünden oluşan karışım içerisine daldırılır. Bu aşamada boya çözeltisi içerisindeki filmi doyurma işlemi gerçekleştirilir. Böylece ince bir boya katmanı, TiO_2 yüzeyine kovalent olarak bağlanır. Genellikle, platinyum malzemesi ile tasarlanan iletken tabaka üzerine ince bir iyodür katmanı püskürtülerek ayrı bir destekleme yapılır. Ön ve arka katmanlar birleştirilerek elektrolit sızıntılarını önlemek için birlikte yalıtılırlar (Öztürk & Kaya, 2019).

Boya duyarlı güneş hücreleri, geleneksel hücre tasarımı silisyum tarafından sağlanan iki işlevle ayrılır. Silisyum bir akım oluşturabilmek için elektrik alanı sağlamakla birlikte, foto elektronların kaynağı gibi davranır. Boya duyarlı güneş hücrelerinde ise yarı iletkenlerin büyük kısmı yalnızca yük taşıma için kullanılır. Foto elektronlar ayrı bir ışık renginden temin edilir. Yük ayırma işlemi boya, yarı iletken ve elektrolit arasındaki yüzeyde meydana gelir (Öztürk & Kaya, 2019).

1.4.5. Organik Güneş Hücreleri

Organik yarı iletkenler, yarı iletken özelliğine sahip karbon malzemelerdir. Bu malzemeler üzerindeki çalışmalar esnek ışık kaynakları, esnek ekranlar, düşük maliyetli baskı devreler ve yeni güneş hücreleri üretebilmek amacıyla yapılmaktadır (Canımkuşbey & Mucur, 2019).

Organik güneş hücresi ilk kez 1986 yılında Tang ve arkadaşları tarafından üretilmiştir (Tang, 1986). Üretilen bu hücrenin verimi %1.1 değerindedir. Bu hücrenin verim değerinin düşük olmasının sebebi elektron-boşluk çiftinin yeterli miktarda ayırlamamasıdır. Bu problemin önüne geçebilmek 1990'lı yılların başında çift katmanlı heteroeklem ve hacim heteroeklem yapıları geliştirilmiştir. Bu yapılarda donör ve akseptör kullanılmıştır bu sayede gerekli olan yük ayrımı en yüksek seviyeye ulaşabilmiştir (Akman, 2013).

Organik yarı iletkenler kullanılarak üretilen güneş hücreleri III. nesil güneş hücresi olarak adlandırılmaktadır. Organik güneş hücrelerinin farklı türleri mevcuttur. Organik malzemeler ile hazırlanan güneş hücreleri diğerine göre daha düşük maliyetlidir, daha düşük sıcaklıklarda uygulanabilmektedir ve esnek yapıda olabilmektedir. Dahası yüksek soğurma yapısına sahip yarı iletkenler ile kalınlığı oldukça ince olan güneş hücrelerinin üretilmesi mümkündür (Demiroğlu, 2019). Günümüzde organik güneş hücrelerinin verimleri 15.2 ± 0.2 değerlerine ulaşmıştır (Green vd., 2023).

1.4.6. Perovskit Güneş Hücreleri

Perovskit, 1839 yılında Gustav Rose tarafından keşfedilmiştir. Perovskit, kalsiyum titanyum oksitten (CaTiO_2) oluşan bir mineraldir. Bu mineral yapısının ismini mineralog Lev Perovski'den almaktadır. İlerleyen zamanlarda da CaTiO_2 mineraliyle aynı yapıya sahip olan malzemelere perovskit adı verilmiştir. Işık soğurma katmanı olarak perovskit bileşenleri kullanılan hücreler perovskit güneş hücreleri olarak adlandırılmaktadır (Mallahasan, 2022). Perovskit güneş hücrelerinin günümüzdeki verimi 23.7 ± 0.5 değerindedir (Green vd., 2023).

Perovskit güneş hücrelerinin yapısı; genel itibariyle soğurucu katman, boşluk taşıyıcı katman (HTL), elektron transfer katmanı (ETL) ve kontaklardan oluşmakta olup HTL ve ETL'nin konumuna göre iki farklı yapı ile tasarlanmaktadır. n-i-p tasarımında, ETL şeffaf iletken katman (TCO) üzerine kaplanır ve fotonlar soğurucu katman olan perovskit katmanına ulaşmadan önce ETL üzerinden geçer. Diğer tasarım olan p-i-n tasarımında ise, FTO katmanı üzerine HTL kaplanır. Bu tasarım ters konfigürasyon olarak da adlandırılmaktadır. Düzlemsel perovskit güneş hücrelerinin yapılarında, yük taşıyıcı katman üzerine doğrudan soğurucu katman olan perovskit katmanı kaplanmaktadır. Mezoskopik perovskit güneş hücrelerinin yapılarında ise, yük taşıyıcı ile soğurucu katman arasında mezo-gözenekli yarı iletken ya da yalıtkan bir film kaplanmaktadır (Mallahasan, 2022).

Soğurucu katman olarak kullanılan perovskit malzemeler, tüm tasarım çeşitlerinde boşluk taşıyıcı katman ve elektron transfer katmanı arasında bulunmaktadır. Perovskit güneş hücrelerinin çalışma prensibi sırasıyla şöyledir; güneşten gelen fotonlar soğurucu katman olan perovskit katmanında soğurulur. Soğurulan edilen bu fotonlar, elektron-boşluk çiftlerini oluştururlar. ETL, soğurucu katmanında fotonlar ile uyarılan elektronları katoda iletir. HTL ise soğurucu katmanda meydana gelen boşluğun diğer elektrot olan anoda iletilmesini sağlar (Mallahasan, 2022).

Perovskit güneş hücreleri basit yapıdadırlar ve yüksek verim potansiyeline sahiptirler. Perovskit güneş hücreleri farklı yapılarda oluşturulabilir. Bu farklı yapılardan biri, optik ve elektriksel özellikleri nedeniyle ilgi gören kurşun yapıli perovskit güneş hücreleridir. Bu tip hücrelerde güç dönüşüm verimliliğinin çok yüksek olmasına karşın bu malzemelerin kararlılık ve kurşunun toksik doğası gibi sebepleri ticarileşmesinin önüne geçmektedir. Bu sebeplerden dolayı perovskit güneş hücrelerinde kurşunsuz soğurucu katmanlarının geliştirilmesi gerekmektedir (He vd., 2021). Son zamanlarda genel formülü $A_2M^I M^{III} X_6$ (A ve M metal iyonlar ve X=Cl, Br, I) olan halojen çift perovskit kristal yapısı, düşük toksik doğası, yüksek ortam ve ışık kararlılığı ile optoelektronik uygulamalar için büyük ilgi görmüştür (Singhal vd., 2018; Muscarella & Hutter, 2022). Bu alternatiflerden biri güneş hücresi uygulamaları için 1.6 eV değeriyle uygun bant aralığında olan ve yüksek verim potansiyeline sahip çift perovskit $Cs_4CuSb_2Cl_{12}$ malzemesidir (Khan vd., 2024). Bu malzeme toksik olmayan bileşenleri, üstün termal kararlılığı ve ayarlanabilir bant aralığı gibi özellikleri sayesinde sürdürülebilir fotovoltaiik uygulamalar için uygun bir aday olarak öne çıkmaktadır (Cai vd., 2020; Ashtiha vd., 2021).

He ve arkadaşları (2021) tarafından yapılan çalışmada SCAPS programı kullanılarak FTO/TiO₂/Cs₄CuSb₂Cl₁₂/nanocrystals/Cu₂O/Au hücre yapısı kullanılarak Cs₄CuSb₂Cl₁₂ maddesinin güneş hücreleri üzerindeki potansiyeli araştırılmıştır. Bu simülasyon sonucunda güç dönüşüm verimliliği %23.07, kısa devre akım yoğunluğu 21.35 mA/cm², açık devre gerilimi 1.30 V ve doldurma faktörü ise %83.02 değerlerinde elde edilmiştir (He vd., 2021).

Anik ve arkadaşları (2022) tarafından yapılan çalışmada SCAPS programı kullanılarak FTO/CZTSe/Cs₄CuSb₂Cl₁₂/PCBM hücre yapısı kullanılarak Cs₄CuSb₂Cl₁₂, MAPbI₃ ve CsSnGeI₃ maddelerinin soğurucu katman olarak karşılaştırılması ve güneş hücreleri üzerindeki potansiyeli araştırılmıştır. Bu simülasyon sonucunda güç dönüşüm verimliliği %29.17, kısa devre akım yoğunluğu 25.59 mA/cm², açık devre gerilimi 1.307 V ve doldurma faktörü ise %86.89 değerlerinde elde edilmiştir (Anik vd., 2022).

Karmaker ve arkadaşları (2024) tarafından yapılan çalışmada SCAPS programı kullanılarak FTO/WS₂/Cs₄CuSb₂Cl₁₂/CuSbS₂/Ni hücre yapısı kullanılarak Cs₄CuSb₂Cl₁₂ maddesinin güneş hücreleri üzerindeki potansiyeli araştırılmıştır. Bu simülasyon sonucunda güç dönüşüm verimliliği %23.10, kısa devre akım yoğunluğu 23.75 mA/cm², açık devre gerilimi 1.1675 V ve doldurma faktörü ise %83.33 değerlerinde elde edilmiştir (Karmaker vd., 2024).

1.5. Yarı İletkenler

Maddeler elektrik iletim kabiliyetlerine göre üç sınıftan oluşur. Bunlar iletken, yarı iletken ve yalıtkanlardır. İletkenler ve yalıtkanların karakteristik özellikleri çok net olmakla birlikte kullanım alanlarının çeşitlendirilmesi yarı iletkenlere kıyasla daha düşüktür. Yarı iletkenler dış bir etken olmadığı sürece yalıtkan özellik gösterirken, dış etkiyle beraber iletken gibi davranır. Bu sebeple yarı iletkenlerin transistörler, diyotlar, fotodedektörler, sensörler ve güneş hücreleri gibi birçok kullanım alanı vardır (Sze vd., 2021).

Bu tez çalışmasında kullanılan NiO yüksek kararlılıktaki yapısıyla bilinen önemli bir yarı iletkendir (Ai vd., 2008; Meng vd., 2020). NiO süper kapasitörler, fotodedektörler gibi kullanım alanlarına sahiptir (Dai vd., 2017; Ahmed vd., 2017). Farklı tip güneş hücrelerinde ise boşluk taşıyıcı katman ve yansıma önleyici katman olmak üzere kullanılmaktadır (Ahmmed vd., 2020; Jlassi vd., 2017).

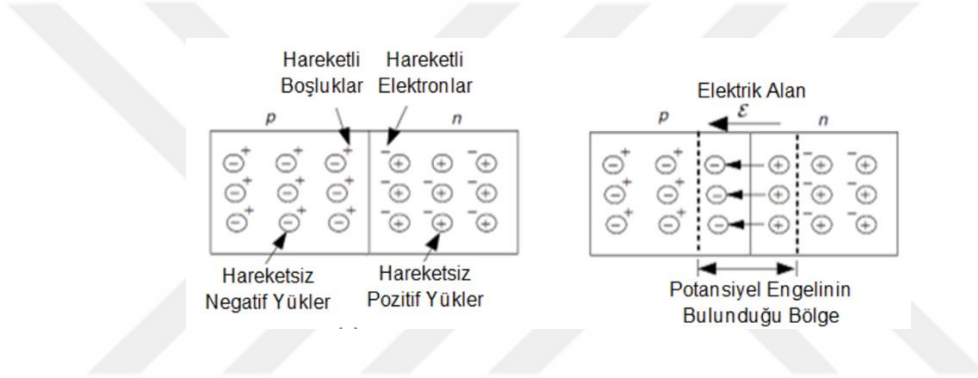
1.5.1. P-N Eklemi

N-tipi yarı iletkenler, saf silisyum gibi dört değerli valans elektronları olan atomlara, beş değerli valans elektronları olan arsenik, fosfor ve bizmut (Bi) gibi atomların katkılanmasıyla elde edilir. Silisyum ve fosfor atomlarının dört valans elektronları kendi aralarında kovalent bağ oluşturur. Fosforun açıkta bir valans elektronu kalır ve bu elektron iletkenliği artırır. N-tipi malzemede elektronlar, çoğunluk taşıyıcıları diye adlandırılır.

P-tipi yarı iletkenler saf silisyum gibi dört değerli valans elektronları olan atomlara, üç değerli valans elektronları olan alüminyum, Bor (B) ve galyum gibi atomların katkılanmasıyla elde edilir. Silisyum ve bor atomlarının üç valans elektronları kendi aralarında kovalent bağ oluşturur. Silisyumun bir valans elektronu bağ yapamaz burada bir boşluk oluşur. Bu yöntem sayesinde elde edilen malzeme P-tipi yarı iletken malzeme olarak

adlandırılır. Bu yapıda boşluklar pozitif yüklüdür. P-tipi malzemede boşluklar, çoğunluk taşıyıcıları diye adlandırılır.

P-N eklemi p ve n tipi iki yarı iletkenin fiziksel olarak bir araya gelmesiyle oluşmaktadır. Bu eklem yapısı fiziksel olarak bir araya gelmeden önce her iki bölgede de elektron ve boşluk sayıları birbirine eşittir yani elektriksel olarak nötr yapıdadır. Bu iki tip p ve n yarı iletkenleri bir araya geldiğinde n-tipi yarı iletkeninden p-tipi yarı iletkenine doğru elektron geçişi olur. Bu geçiş esnasında her bir elektron yerini bir boşluğa bırakır. Bu enerji geçişi devam eder ve iki yarı iletkenin eklem yerinde yüklerden arındırılmış bir bölge oluşur, buna deplasyon bölgesi adı verilir. Deplasyon bölgesinde kutuplanmış yükler nedeniyle bir elektrik alan meydana gelir (Şenel, 2022).



Şekil 5. P-tipi ve n-tipi yarı iletkenler (Şenay, 2021)

Güneş hücresinden elektriksel güç elde edilebilmesi, bu malzemede akım ve gerilim üretimi ile mümkündür. Bu süreç için iki temel aşama vardır.

P ve n bölgelerine gelen fotonlar, valans bandındaki elektronları iletkenlik bandına çıkararak elektron-boşluk çiftleri oluştururlar. Bu elektron-boşluk çifti, güneş hücresinin elektrik alanı tarafından birbirlerinden ayrılır. Sonuç olarak, harici bir yük üzerinden bir akım akar. Yüksek enerjili elektronlar, bu süreçte enerjisini harici yüke aktarırken, tekrar güneş hücresine dönerler (Şenay, 2021). Kısaca ve genel bir tanımla, p-n eklemine denge seviyesi sonucunda oluşan deplasyon bölgesine ışık verilmesiyle gerilim üretimi meydana gelir. Bu da fotovoltaiik etki olarak tanımlanabilir.

1.5.2. Yarı İletkenlerde Jenerasyon ve Rekombinasyon

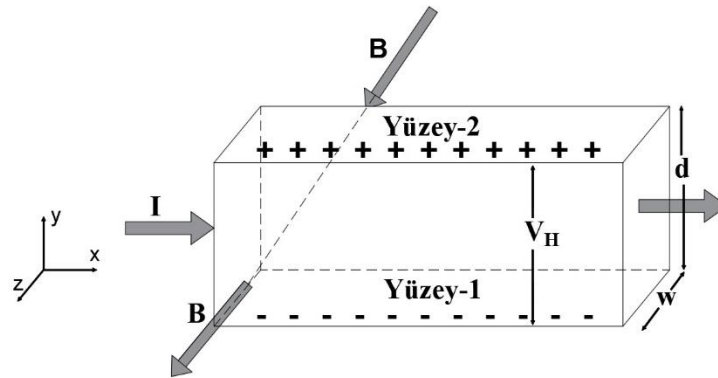
Sıcaklığın sıfır kelvin değerinin üzerinde olduğu sürece iletim bandında elektronlar, valans bandında boşluklar bulunur. İletkenlik bandındaki bir elektron kristal içerisinde

serbest bir şekilde hareket edebilir veya aynı zamanda kovalent bağ yapısında boş bir alana geçer. Bu hareket sonucu elektron enerjisi serbest bırakılır. Hem elektron hem de boşluğun kaybolduğu bu olay rekombinasyon olarak tanımlanır. Rekombinasyon olayının aksine eğer enerji yeterli ise elektron, kendini kovalent bağ yapısından ayırarak valans bandından iletim bandına geçer. Bu sayede kristal içerisinde serbest bir şekilde hareket edebilir ve böylece jenerasyon olarak adlandırılan elektron boşluk çifti oluşumu ile serbest bir boşluk oluşur (Colinge & Colinge, 2005).

Termodinamik denge durumunda jenerasyon ve rekombinasyon olayları birbirini dengeler. Bu denge durumu ısı ve optik gibi harici kaynaklar sayesinde taşıyıcı yoğunluğu artırılabilir. Bunun sonucunda denge bozulabilir (Colinge & Colinge, 2005).

1.6. Hall Etkisi

Hall etkisi, yarı iletkenlerin tipini (p-n), taşıyıcı yoğunluklarını ve yük taşıyıcılarının mobilitelerini bulmak için gereklidir. Bu etki 1879 yılında manyetik alan içerisinde akım taşıyan bir iletken üzerine etki eden kuvvetin kaynağının araştırılması sonucunda keşfedilmiştir (Aydoğan, 2015). Şekil 6’da hall etkisi geometrik şeması verilmiştir.



Şekil 6. Hall etkisi geometrik şeması

Denge şartları altında E elektrik alan şiddeti elektron yüklü q parçacıklar üzerine bir qE elektriksel kuvveti uygular. I akımı +x ve B manyetik alanı +z yönünde uygulanırsa, yükler üzerine etki eden kuvvet -y yönünde olacaktır. Bu kuvvet yük taşıyıcılarının elektron veya boşluk olmasına bağlı değildir. Yükler üzerindeki kuvvet yüzey-1 den dışarı doğrudur. Buna göre yarı iletken n-tipi ise çoğunluk yük taşıyıcıları elektronlar. Elektronların yüzey-1 üzerinde toplanmasıyla yüzey-1 negatif yüklenir. Bu durum sonrasında iki yüzey arasında

gerilim farkı oluşur. Eğer yarı iletken p-tipi ise yüzey-1 pozitif yüklenir. Her iki durumda da yüzeyler arası gerilimin işaretine göre yarı iletkenin tipi belirlenir (Aydoğan, 2015).

Manyetik ve elektriksel kuvvet değerlerini denklem 8 vermektedir. Denklemde verilen v_s yük taşıyıcılarının sürüklenme hızını ifade etmektedir.

$$qE = qv_s B \quad (8)$$

Denklem 9 yüzeyler arasındaki gerilim değeri olan Hall gerilimini vermektedir. Denklemde verilen w manyetik alanın uygulandığı doğrultudaki numunenin genişliğini ifade eder.

$$V_H = Ew \quad (9)$$

Denklem 10 ve 11 akım yoğunluğunun yük yoğunluğu ve akım ile ilişkisini vermektedir. Denklemlerde n yük taşıyıcı yoğunluğunu, e elektron yükünü ve d ise numunenin kalınlığını ifade etmektedir.

$$J = nev_s \quad (10)$$

$$J = \frac{I}{wd} \quad (11)$$

Denklem 12’de ilgili alanlar yerine eklendikten sonraki hall geriliminin ifadesi verilmiştir.

$$V_H = \frac{BJd}{ne} \quad (12)$$

Denklem 13’te R_H hall katsayısının denklemi ve Denklem 14’te hall katsayısı tanımlandıktan sonraki hall gerilim ifadesi verilmiştir.

$$R_H = \frac{1}{ne} \quad (13)$$

$$V_H = \frac{R_H}{w} BI \quad (14)$$

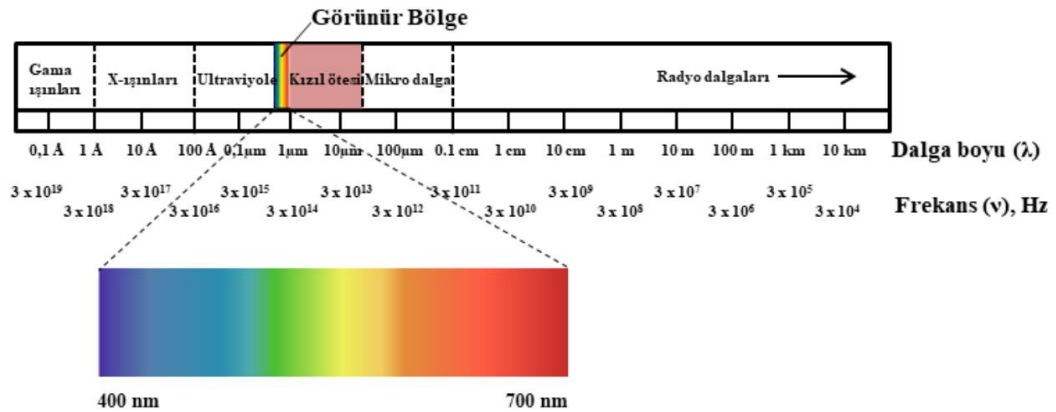
Bu denklemlere göre hall katsayısı ile hem yük taşıyıcı tipini hem de taşıyıcı yoğunluğunu bulabiliriz. Denklem 15 ve 16 ise sırasıyla n-tipi ve p-tipi yarı iletkenler için mobilitelerinin denklemlerini vermektedir. Denklemde σ elektriksel iletkenliği, μ_n elektron mobilitelerini ve μ_p ise boşluk mobilitelerini ifade etmektedir.

$$\mu_n = \sigma R_H \quad (15)$$

$$\mu_p = \sigma R_H \quad (16)$$

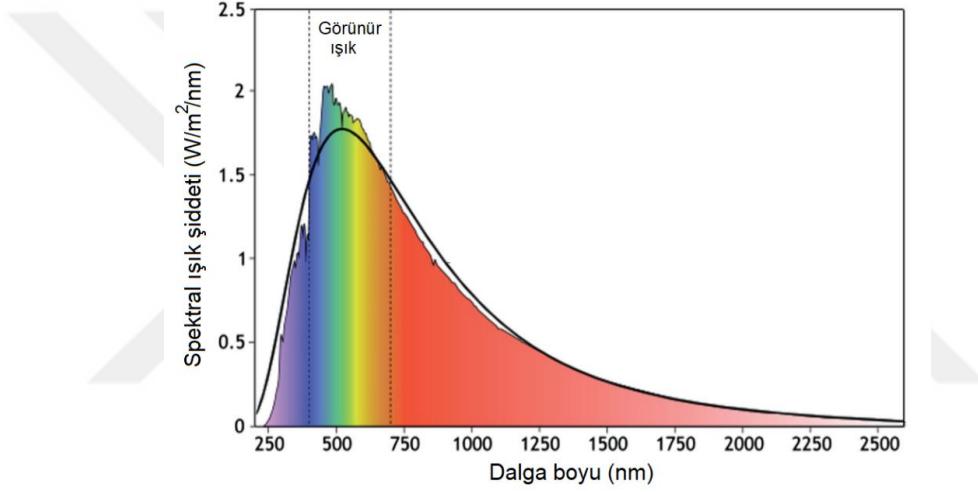
1.7. Elektromanyetik Spektrum ve Işınım

Bir elektromanyetik dalganın frekansı ve dalga boyu bu dalganın kaynağına bağlıdır. Enerji iletim hatlarında üretilen elektrik dalgalarının frekansı çok düşük değerlerde iken atom çekirdeğinden açığa çıkan gama ışınlarının frekansı çok yüksek değerlerdedir. Elektromanyetik dalgaların bu geniş frekans aralığı elektromanyetik spektrumu oluşturur. Güneş ışığı, dünya yüzeyine yayılan ve görünür spektrumu da içeren geniş spektrumlu elektromanyetik dalgalarından oluşan bir enerji biçimidir. Güneş ışığı ayrıca foton adı verilen belirli miktarda enerji taşıyan parçacıklardan oluşur. Elektromanyetik spektrumda 400 nm ile 700 nm arası dalga boyları görünür ışık bölgesidir. Güneş hücresi çalışması için elektromanyetik spektrumun en önemli kısmı bu görünür ışık bölgesidir. Piyasada bulunan tipik güneş hücrelerinin etkili çalışma aralığı olan 400 nm ile 700 nm aralığında yer almaktadır (Öztürk & Kaya, 2019; Mandong, 2019).



Şekil 7. Elektromanyetik spektrum (Arslanhan, 2024)

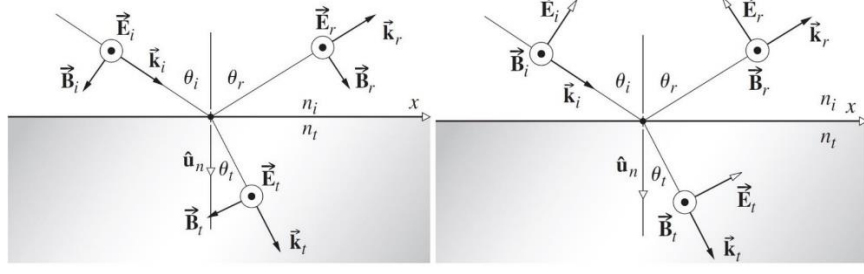
Yeryüzüne ulaşan ışık dalgalarının belirli bir güç yoğunluğu vardır ve bu yoğunluk, dalga boylarına bağlıdır. Belirli bir dalga boyundaki güç yoğunluğu, foton enerjisinin foton akısına çarpılmasıyla elde edilir. Belirli bir dalga boyundaki güç yoğunluğu, ışık kaynağını karakterize etmek için en yaygın kullanılan yöntem olan spektral ışınlam ile tanımlanır. Belirli bir dalga boyundaki güç yoğunluğunu bilmek, güneş hücreleri tasarlamak için gereklidir. 500 nm ile 550 nm aralığındaki dalga boyları, görünür spektrumda en yüksek güç yoğunluğuna sahiptir. Yüksek güç yoğunluklu ışığı verimli bir şekilde elektrığe dönüştürmek için 500 nm ile 550 nm aralığındaki bu dalga boylarında yansımaya önleyici katmanlar tasarlanmaktadır (Mandong, 2019).



Şekil 8. Spektral ışık şiddetinin dalga boyuna bağlı değişimi (URL-4, 2024)

1.8. Fresnel Denklemleri

Fresnel denklemleri, ışığın iki farklı optik ortam arasından geçişi esnasında yansımaya ve kırılma olaylarını matematiksel olarak modellenmesini sağlar. 19. yüzyılda geliştirilen bu denklemler, özellikle optik, fotonik ve elektromanyetik alanlarda, yüzeyden gelen ışığın polarizasyon durumuna bağlı olarak nasıl yansıdığını ve kırıldığını anlamak için kullanılır. Fresnel denklemleri, ışığın davranışını analiz ederek çeşitli optik tasarım uygulamalarına katkı sağlar (Born & Wolf, 1999).



Şekil 9. Yüzeye gelen s-polarizeli ve p-polarizeli ışık ile düzlem arasındaki ilişki (URL-5, 2024)

Fresnel denklemleri, gelen ışığın polarizasyon durumuna bağlı olarak s-polarizasyon ve p-polarizasyon olmak üzere iki farklı durumu inceler. Denklem 17, 18, 19 ve 20 Fresnel denklemlerini vermektedir. Denklemler sayesinde elde edilecek olan r_s s-polarizasyonu için yansıma katsayısını, r_p p-polarizasyonu için yansıma katsayısını, t_s s-polarizasyonu için geçirgenlik katsayısını ve t_p p-polarizasyonu için geçirgenlik katsayısını ifade eder. n_i ve n_t ortamların kırılma indislerini, θ_i ve θ_t ise gelen ve yansıyan ışığın açılarını ifade etmektedir.

$$r_s = \frac{n_i \cos \theta_i - n_t \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t} \quad (17)$$

$$r_p = \frac{n_t \cos \theta_t - n_i \cos \theta_i}{n_t \cos \theta_i + n_i \cos \theta_t} \quad (18)$$

$$t_s = \frac{2n_i \cos \theta_i}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t} \quad (19)$$

$$t_p = \frac{2n_i \cos \theta_i}{n_t \cos \theta_i + n_i \cos \theta_t} \quad (20)$$

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Deneyisel Çalışmalar

Bu bölümde, oluşturulan ince filmlerin hazırlanma aşamaları, biriktirme için kullanılan parametreler, kullanılan materyal ve teknikleri, biriktirme sonrası gerçekleştirilen elektriksel, optik ve yapısal analizlerde kullanılan materyaller ve teknikleri açıklanmıştır.

2.1.1. Numune Hazırlama Aşamaları

Sıçratma tekniği ile biriktirme yapılmadan önce silisyum ve cam alttaşlar ilk olarak etanol kullanılarak 5 dakika boyunca ultrasonik banyo ile temizlendi. Temizlenen bu alttaşlar hava ile kurutuldu. Daha sonra kurutulan bu alttaşlar saf su kullanılarak 5 dakika boyunca ultrasonik banyo ile tekrar temizlendi. Alttaşlar tekrar hava ile kurutulduktan sonra biriktirme işlemi için uygun hale getirildi.

Biriktirme işlemleri Nanovak NVTs-400 cihazı ile DC sıçratma uygulanarak gerçekleştirildi. Biriktirme mesafesi 20 cm, alttaş sıcaklığı oda sıcaklığında, Ar/O₂ gaz oranı %70 / %30 ve çalışma basıncı 50 mTorr olacak şekilde tüm biriktirme işlemleri esnasında sabit tutuldu. Biriktirme esnasında güç değeri 5 nm, 30 nm, 50 nm, 70 nm ve 100 nm kalınlıklarındaki filmler için 200 W, 10 nm kalınlıktaki film için 210 W ve son olarak 20 nm kalınlıktaki film için 205 W olarak elde edildi. Biriktirme işlemi 5nm, 10nm, 20nm, 50nm, 70 nm ve 100 nm kalınlıklarındaki filmler için sırasıyla 0.13 nm/s, 0.123 nm/s, 0.126 nm/s, 0.13 nm/s, 0.12 nm/s, 0.13 nm/s ve 0.114 nm/s hızlarında gerçekleştirildi.

Biriktirme işleminden sonra tavlama işlemi gerçekleştirildi. NiO ince filmler oda sıcaklığında, 135°C, 230°C ve 330°C’de 30 dakika süreyle tavlandı.

Tablo 1. İnce film biriktirme işlemi parametreleri

RF/DC	Güç (W)	Mesafe (cm)	Alttaş Sıcaklığı	Alttaş	Gaz Oranı (%)	Çalışma Basıncı (mTorr)	Biriktirme Hızı (nm/s)	Kalınlık (nm)
DC	200	20	Oda Sıcaklığı	Si, Cam	Ar/O ₂ : 70/30	50	0.130	5
DC	210	20	Oda Sıcaklığı	Si, Cam	Ar/ O ₂ : 70/30	50	0.123	10
DC	205	20	Oda Sıcaklığı	Si, Cam	Ar/ O ₂ : 70/30	50	0.126	20
DC	200	20	Oda Sıcaklığı	Si, Cam	Ar/ O ₂ : 70/30	50	0.130	30
DC	200	20	Oda Sıcaklığı	Si, Cam	Ar/ O ₂ : 70/30	50	0.120	50
DC	200	20	Oda Sıcaklığı	Si, Cam	Ar/ O ₂ : 70/30	50	0.130	70
DC	200	20	Oda Sıcaklığı	Si, Cam	Ar/ O ₂ : 70/30	50	0.114	100
DC	200	20	Oda Sıcaklığı	Si, Cam	Ar/ O ₂ : 60/40	50	0.09	70
DC	300	20	Oda Sıcaklığı	Si, Cam	Ar/ O ₂ : 70/30	50	0.2	70

Tavlamadan sonra, NiO ince filmlerin elektriksel, optik ve yapısal özellikleri incelendi. Optik özelliklerin belirlenmesi için ultraviyole-görünür (UV/VIS) spektrofotometre, yapısal özelliklerin belirlenmesi için x-ışın kırınımı cihazı (XRD) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve direnç, yüzey direnci ve iletkenlik gibi elektriksel özelliklerin belirlenmesi için dört noktalı prob (FPP) kullanıldı.

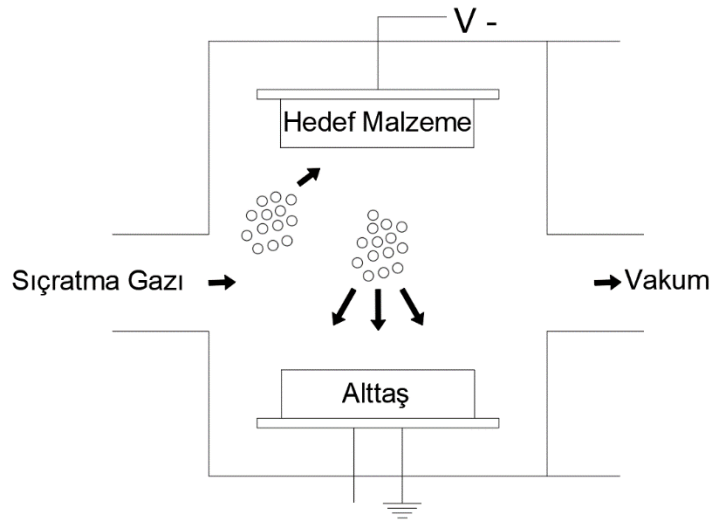
Tablo 2. Tavlama parametreleri

Kalınlık (nm)	Sıcaklık (°C)	Süre (Dakika)	Ortam
Değişken (5-100)	Değişken (Oda Sıcaklığı-330)	30	Hava

2.1.2. DC Sıçratma Tekniği

Sıçratma tekniği, fiziksel buhar biriktirme yöntemidir. Bu teknik farklı şekillerde uygulanabilir. Bunlar diyot ile sıçratma, manyetik alan ile sıçratma ve iyon demeti ile sıçratma ile sıçratma teknikleridir (Sönmezoğlu vd., 2021). Diyot ile sıçratma iki farklı şekilde uygulanabilir. Bunlar doğru akım ve radyo frekans (RF) sıçratma yöntemleridir. Bu tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda DC sıçratma tekniği kullanılmıştır. Sıçratma sistemi temel olarak aşağıdaki bileşenlerden oluşur (Wasa vd., 2012);

- Biriktirme işlemi için gerekli olan düşük basınç ortamını sağlayan vakum odası,
- Alttas üzerine biriktirilecek olan hedef malzeme,
- Hedef malzemenin biriktirileceği alttas,
- Hedef malzemedan iyonların ayrılmasını ve plazma oluşumunu sağlayan güç kaynağı,
- Vakum odasına gaz akışını sağlayan gaz enjektörleri,
- Vakum odasındaki basıncın kontrolünü gerçekleştiren vakum pompası



Şekil 10. DC sıçratma sisteminin şeması

Sıçratma ile yapılan biriktirmelerde oluşturulan filmin kalitesini güç, biriktirme hızı, biriktirme mesafesi, gaz oranı ve ortamın basınç değeri gibi parametreler etkilemektedir (Mattox, 2010).

Sıçratma ile biriktirme işlemi temel olarak şu şekilde gerçekleşir; Hedef malzeme yüzeyi, ısı enerjisi kullanmadan plazma veya iyon tabancası sayesinde hızlandırılan atomik boyuttaki yüksek enerjili gaz iyonlarıyla bombardıman edilir. Böylece; atomlar yüzeyden sıçratılmış olurlar ve sıçratılan bu atomlar buhar fazına geçerek istenilen alttaş üzerine birikirler. Sıçratılan malzemenin miktarını denklem 21 vermektedir (Wasa vd., 2012).

$$W = \frac{k_1 W_0}{pd} \quad (21)$$

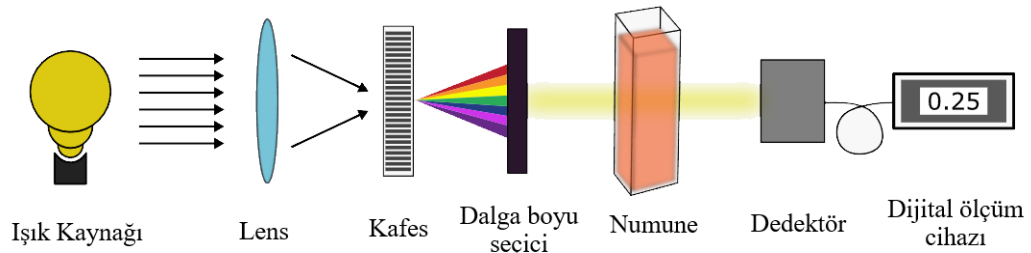
Bu denklemdeki k_1 sabiti, W_0 katot birim alanındaki sıçratılan malzemenin miktarını, p deşarj gaz basıncını ve d elektrotların aralığını ifade eder. Biriktirme oranı, sıçratılan malzemenin yoğunluğunun biriktirme zamanına oranıyla elde edilir. Denklem 22’de verilmiştir (Wasa vd., 2012).

$$R = \frac{W}{t} \quad (22)$$

Bu çalışmada DC sıçratma cihazı kullanılarak silisyum ve cam alttaşlar üzerine farklı kalınlık değerlerinde NiO ince filmler oluşturulmuştur.

2.1.3. UV-VIS Spektrofotometre

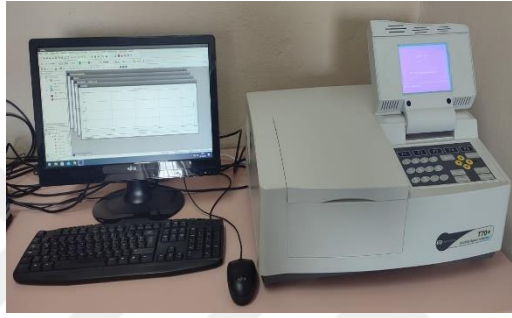
Ultraviyole-görünür bölge (UV-VIS) spektroskopisi, bir numunenin elektromanyetik spektrumun ultraviyole ve görünür bölgelerinde farklı dalga boylarında ışığın soğurma ve yansıma değerlerini ölçmek için kullanılan bir tekniktir (Kanmaz, 2021). Bu sistem ışık kaynağı, lens, kafes, dalga boyu seçici, numune kabı, dedektörler ve dijital ölçüm cihazlarından oluşmaktadır (URL-3, 2024).



Şekil 11. UV-VIS spektrofotometre yapısı (URL-3, 2024)

Çalışma yapılacak dalga boyu aralığına göre ışık kaynağı seçilmelidir. Tungsten halojen lambaları görünür bölgeden kızılötesi bölgeye kadar ışımaya yapabildiği için görünür bölge çalışmalarında kullanılmaktadır. Döteryum ve hidrojen lambaları ultraviyole soğurma çalışmalarında kullanılmaktadır. Ksenon ark lambaları ultraviyole ve görünür bölge çalışmalarında kullanılmaktadır (Kanmaz, 2021; URL-3, 2024).

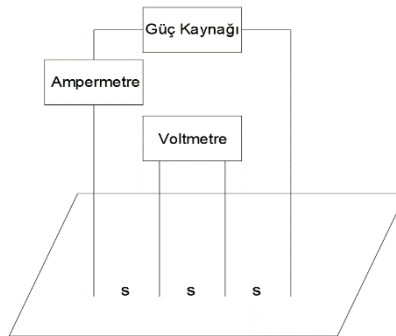
Bu çalışmada UV-VIS spektrofotometre cihazı kullanılarak silisyum alttaş üzerine biriktirilen NiO ince filmlerin farklı dalga boylarındaki yansıma değerleri ölçülmüştür. Elde edilen değerler tablo ve grafiklerle bulgular kısmında verilmiştir.



Şekil 12. UV-VIS spektrofotometre cihazı

2.1.4. Dört Noktalı Prob Ölçüm Sistemi

Dört noktalı prob (FPP), yarı iletken malzemelerin, metal filmlerin ve diğer ince filmlerin elektriksel özelliklerini analiz etmek için kullanılır. Dört noktalı probun yapısında birbirlerine eşit uzaklıklarda yerleştirilen ve ölçüm yapılacak malzeme yüzeyine temas eden dört nokta bulunmaktadır. Bu dört probun en dıştaki ikisi ile devreden akım geçilir, diğer iki prob ile gerilim değerindeki değişim ölçülür (Waremra & Betaubun, 2018).



Şekil 13. Dört noktalı prob (FPP) ölçüm şeması

Bu yöntem çalışma mekanizması olarak denklem 23 verilebilir. Bu denklemi kullanarak öz direnç değeri elde edilebilir. Bu denklemde R değeri gerilim değerinin akım değerine oranıyla elde edilen direnç değeridir. Ölçümü yapılacak malzemenin genişlik ve kalınlık değerlerini sırasıyla w ve t ifade eder. L ise problar arasındaki mesafeyi ifade eder. İletkenlik ise denklem 24’te verildiği gibi elde edilir.

$$\rho = \frac{R(wt)}{L} \quad (23)$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (24)$$

Bu çalışmada FPP cihazı kullanılarak silisyum alttaş üzerine biriktirilen NiO ince filmlerin öz direnç değerleri ölçülmüştür. Elde edilen değerler tablo ve grafiklerle bulgular kısmında verilmiştir.



Şekil 14. Dört noktalı prob (FPP) ölçüm cihazı

2.1.5. X-ışını Kırınımı (XRD) Ölçümü

X-ışını kırınımı yöntemi, x-ışınları tarafından oluşturulan kırınım deseni sayesinde malzemenin yapısı hakkında bilgi verir. X-ışınlarının madde ile etkileşimi sonucunda kristalin yönelimi, kristal yapı, mevcut fazlar kusurlar ve yüzey gerilmeleri hakkında bilgi edinilmesini sağlar (Aydoğan, 2015). Saçılan her X-ışını bize madde hakkında bilgi vermez. Bazı saçılmalar sırasında ışınlar birbirini yok eder ve buna yıkıcı girişim denir. Bazı ışınlar ise birbirlerini kuvvetlendirir ve buna da yapıcı girişim denir. Yapıcı girişimin

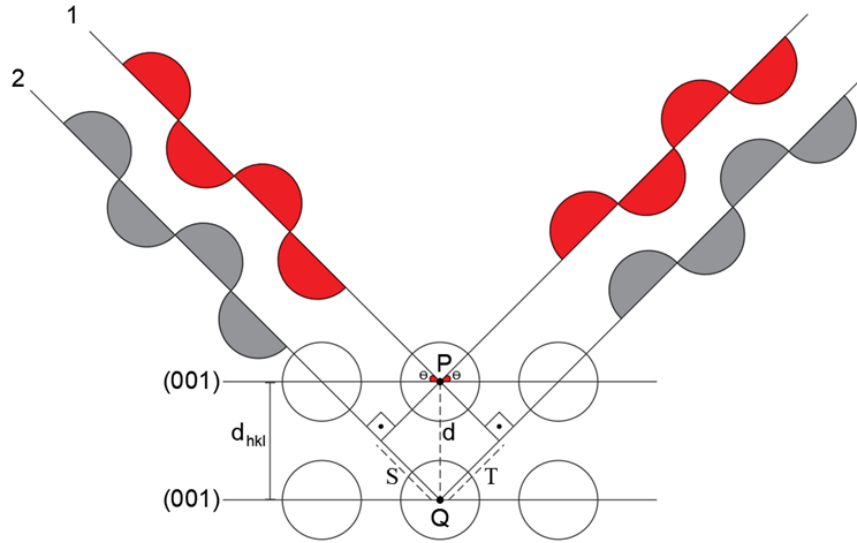
sağlanabilmesi için saçılan ışın, gelen ışınla aynı fazda olmalıdır. Yıkıcı girişim madde hakkında bilgi vermezken yapıcı girişim madde hakkında bilgi verir. Yapıcı girişim sadece Bragg denklemini sağlayan geliş açılarında meydana gelir (Dönük, 2019).

Şekil 15'te görüldüğü gibi 1. x-ışını P noktasından, 2. x-ışını ise Q noktasından saçılma yapmaktadır. İki ışının saçılmaları aynı fazdadır. Bu da yapıcı girişim olduğunu göstermektedir. 1. ışın ve 2. ışının aldığı yollar incelendiğinde 2.ışın 1.ışından daha fazla yol almaktadır. Bu fazlalık SQ ve QT arası mesafe kadardır. SQ ve QT nin toplamı n ve λ değerlerinin çarpımına eşittir. Buradaki n değeri bir tam sayıyı, λ değeri ise dalga boyunu ifade etmektedir. Gelen ışın ve saçılan ışının düzlemle arasındaki açı ise Θ ile gösterilmektedir. d ise atom düzlemleri arasındaki mesafedir. Geometrik olarak SQ uzunluğunu yazmak için denklem 25 kullanılır (Kanmaz, 2021).

$$\sin\theta = \frac{SQ}{d_{hkl}} \quad (25)$$

Bu denklemden Bragg denklemi elde edilir. Bu denklem X-ışını dalga boyunu, mesafeyi ve kırınan ışının açısını ilişkilendirir.

$$n\lambda = 2d_{hkl}\sin\theta \quad (26)$$



Şekil 15. Kristal düzlem üzerinde kırınım açısının hesaplanması

2.1.6. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Taramalı elektron mikroskobu, odaklanmış yüksek enerjili bir elektron demeti kullanarak numune yüzeyindeki sinyal değişimlerini inceler. Numune yüzeyi ile elektron demeti arasındaki etkileşimle ortaya çıkan sinyal değişimleri yüzeyin kimyasal bileşimi, yüzeyin haritası, kristal yapı ve malzemedeki yönelimler gibi bilgiler verir. Taramalı elektron mikroskobundan çıkan elektronların enerjisi genel olarak 200-300 eV değerinden 100 keV değerine kadar değişir ve yaklaşık olarak 5 μm ile 1 cm arasında değişen genişlikleri görüntülemek mümkündür. Taramalı elektron mikroskobunda elektron demeti kullanılması sebebiyle ışık mikroskoplarına kıyasla yaklaşık 10^5 kat kadar daha fazla büyütme ve 10^2 kat kadar daha fazla derinlik sağlar (Kanmaz, 2019; Aydoğan, 2015).

Taramalı elektron mikroskobunun sisteminde uygulanan yüksek gerilim sayesinde elektronlar hızlanarak yüksek kinetik enerji kazanırlar. Yüksek enerjili elektron demeti elektron tabancası tarafından üretilerek lenslere doğru hızlandırılır. Bu lensler yüklü parçacıkların manyetik alandaki hareketini esas alarak gelen elektron demetini numune üzerine odaklar. Elektronlar ile numune arasındaki etkileşimi, elektronların ivmelenme oranı belirler. Elektronlar numune ile etkileşime girdiğinde esnek ve esnek olmayan çarpışmalar meydana gelerek numune yüzeyinden elektronlar saçılır. Bu elektronlar çarpışmanın etkisiyle yavaşlar ve bu kaybedilen enerji farklı sinyaller şeklinde dağılır. Saçılma işleminde enerji kaybı yoksa düz doğrultuda pik oluşur, enerji kaybı varsa yüzey morfolojisi hakkında bilgi sahibi olacağımız görüntüler oluşur (Aydoğan, 2015).

2.2. Simülasyon Çalışmaları

Bu çalışma kapsamında simülasyonlar güneş hücresi kapasitans simülatörü (SCAPS) programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. SCAPS programı Gent Üniversitesi tarafından geliştirilmiştir (Burgelman vd., 2000). SCAPS programı ile gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda akım-gerilim (I-V), kapasitans-gerilim (C-V), kapasitans-frekans (C-f) ve kuantum verimliliği (QE) gibi grafikler elde edilebilir. SCAPS programı, güneş hücresi modelinin fiziğini analiz eder ve taşıyıcı rekombinasyon mekanizmalarını, elektrik alanının dağılımını ve taşıyıcı taşıma mekanizması gibi özelliklerini süreklilik ve Poisson denklemlerini çözümleyerek açıklar (Deepthi Jayan, 2022). Poisson denklemi, elektrostatik potansiyel ile yük yoğunluğu arasındaki bağıntıyı ifade eder. Poisson denkleminde elektrik alanı E, yarı iletken malzemenin dielektrik sabiti ϵ , elektron yükü q, akseptör ve donörün

yoğunluğu sırasıyla N_A^- ve N_D^+ , elektrik potansiyeli ψ , pozisyon x , boşluk ve elektron sırasıyla p ve n , termal boşluk ve elektron yoğunluğu sırasıyla p_t ve n_t sembolleri ile gösterilmektedir (Karmaker vd., 2024).

$$\frac{dE}{dx} = \frac{d^2\psi}{dx^2} = \frac{q}{\epsilon} [p(x) - n(x) + N_D^+(x) - N_A^-(x) + p_t(x) - n_t(x)] \quad (27)$$

Boşluk ve elektronlar için süreklilik denklemleri sırasıyla denklem 28 ve 29'da verilmiştir. Süreklilik denklemlerinde boşluk ve elektronların üretim oranları sırasıyla G_p ve G_n , boşluk ve elektron difüzyon katsayıları sırasıyla D_p ve D_n ve boşluk ve elektron mobilitesi sırasıyla μ_p ve μ_n sembolleri ile gösterilmektedir (Karmaker vd., 2024).

$$\frac{dp_n}{dt} = G_p - \frac{p_n - n_{no}}{\tau_p} + p_n \mu_p \frac{dE}{dx} + \mu_p E \frac{dp_n}{dx} + D_p \frac{d^2 p_n}{dx^2} \quad (28)$$

$$\frac{dn_p}{dt} = G_n - \frac{n_p - n_{po}}{\tau_n} + n_p \mu_n \frac{dE}{dx} + \mu_n E \frac{dn_p}{dx} + D_n \frac{d^2 n_p}{dx^2} \quad (29)$$

Boşluklar ve elektronlar için sürüklenme ve difüzyon denklemleri sırasıyla denklem 30 ve 31'de verilmiştir. Taşıyıcı hareketi, quasi-Fermi seviyesi açısından boşluklar ve elektronlar için verilen denklem ile tanımlanır. Bu denklemlerde boşluk ve elektron akım yoğunluğu sırasıyla J_p ve J_n , boşluk ve elektronların quasi-Fermi seviyeleri sırasıyla E_{Fp} ve E_{Fn} sembolleri ile gösterilmiştir (Karmaker vd., 2024).

$$J_p(x) = qp\mu_p E + qD_p \frac{dp}{dx} = p\mu_p \frac{dE_{Fp}}{dx} \quad (30)$$

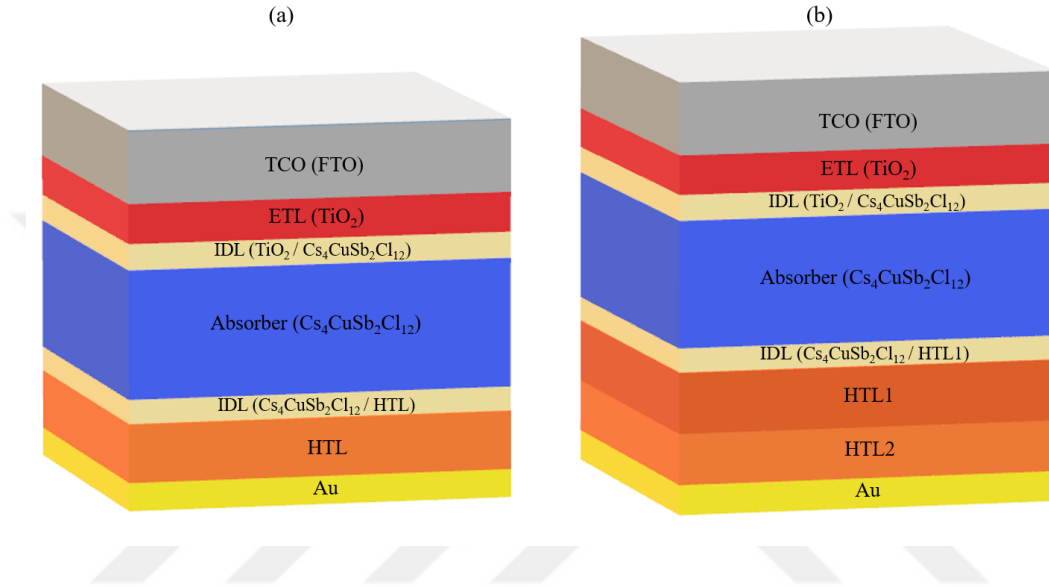
$$J_n(x) = qn\mu_n E + qD_n \frac{dn}{dx} = n\mu_n \frac{dE_{Fn}}{dx} \quad (31)$$

Simülasyon çalışmasında yüksek verim potansiyeline sahip perovskit güneş hücresi kullanılmıştır. Simülasyon çalışmalarında farklı malzemeler tek ve çift katmanlı HTL olarak kullanılmıştır. Optimizasyon aşamasında kullanılan güneş hücresinin yapısı şu şekildedir;

- Şeffaf iletken katman (TCO) olarak FTO,
- Elektron transfer katmanı (ETL) olarak titanyum dioksit (TiO₂),

- Soğurucu katman olarak $\text{Cs}_4\text{CuSb}_2\text{Cl}_{12}$,
- Boşluk taşıyıcı katman (HTL) olarak Spiro-OMeTAD veya NiO ,
- Kontak katman olarak altın (Au)

Kurşunsuz soğurucu katman örneklerinden biri olan $\text{Cs}_4\text{CuSb}_2\text{Cl}_{12}$ bu çalışma kapsamında kullanılmıştır.



Şekil 16. Güneş hücresi yapıları (a) FTO/ TiO_2 / $\text{Cs}_4\text{CuSb}_2\text{Cl}_{12}$ /HTL/Au, (b) FTO/ TiO_2 / $\text{Cs}_4\text{CuSb}_2\text{Cl}_{12}$ /HTL1/HTL2/Au

SCAPS programında bu yapıları oluşturmak için kullanılan parametreler Tablo 3, 4, 5 ve 6'da verilmiştir. E_g bant aralığı enerjisi, χ elektron ilgisi, ϵ_r bağıl geçirgenlik, N_C iletkenlik bandı etkin durum yoğunluğu, N_V değerlik bandı etkin durum yoğunluğu, μ_p elektron mobilitesi, μ_n boşluk mobilitesi, N_A akseptör yoğunluğu, N_D donör yoğunluğu ve son olarak N_t toplam kusur yoğunluğuna karşılık gelmektedir.

Tablo 3. Cs₄CuSb₂Cl₁₂ hücre yapısında kullanılan parametreler (Anik vd., 2022; Uzun, 2021; Abdur vd., 2024).

Parametreler	FTO	TiO ₂	Cs ₄ CuSb ₂ Cl ₁₂	NiO	Spiro-OMeTAD
Kalınlık (nm)	500	50	700	70	100
E _g (eV)	3.5	3.0	1.6	3.6	3.0
χ (eV)	4.0	4.0	3.74	1.8	2.45
ε _r	9.0	9.0	10.0	11.75	3.0
N _C (cm ⁻³)	2.2 x 10 ¹⁸	2.2 x 10 ¹⁸	4.5 x 10 ¹⁸	2.8 x 10 ¹⁹	2.8 x 10 ¹⁹
N _V (cm ⁻³)	1.8 x 10 ¹⁹	1.8 x 10 ¹⁹	1.6 x 10 ¹⁸	1 x 10 ¹⁹	1 x 10 ¹⁹
μ _n (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹)	20	20	2.5	8	2.1 x 10 ⁻⁴
μ _p (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹)	10	10	2.5	10.37	2.1 x 10 ⁻⁴
N _D (cm ⁻³)	1 x 10 ¹⁹	1 x 10 ¹⁴	1.0 x 10 ¹³	-	-
N _A (cm ⁻³)	-	-	1.0 x 10 ¹³	2.0 x 10 ¹⁸	2.0 x 10 ¹⁸
N _t (cm ⁻³)	1 x 10 ¹⁵	1 x 10 ¹⁵	1 x 10 ¹⁴	1 x 10 ¹⁴	1 x 10 ¹⁴

Hücre yapısı oluşturulurken şeffaf iletken katman ile soğurucu katman arasına ve soğurucu katman ile boşluk taşıyıcı katman arasına kusur katmanları eklenmiştir. Bu katmanları oluşturmak için SCAPS uygulamasında girilen değerler Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Kusur katmanında kullanılan parametreler (Karmaker vd., 2024)

Parametreler	TiO ₂ / Cs ₄ CuSb ₂ Cl ₁₂	Cs ₄ CuSb ₂ Cl ₁₂ / HTL
Kusur tipi	Neutral	Neutral
Yakalama kesit alanı elektron (cm ²)	1 x 10 ⁻¹⁹	1 x 10 ⁻¹⁸
Yakalama kesit alanı boşluk (cm ²)	1 x 10 ⁻¹⁸	1 x 10 ⁻¹⁹
Enerji dağıtımı	gauß	gauß
Kusur enerji düzeyi referansı E _t	Max E _v değeri üzerinde	Max E _v değeri üzerinde
Referansa göre enerji değeri (eV)	0.6	0.6
Toplam kusur yoğunluğu (cm ⁻²)	1 x 10 ¹³	1 x 10 ¹³

Oluşturulan bu hücre yapısında soğurucu katman olan Cs₄CuSb₂Cl₁₂ için kalınlık, kusur yoğunluğu (defect density), soğurma katsayısı (absorption coefficient) ve yakalama kesit alanı (capture cross section), Spiro-OMeTAD için kalınlık ve kusur yoğunluğu, NiO için kalınlık, kusur yoğunluğu ve mobilite optimizasyonları yapılmıştır. Bu optimizasyonlar, simülasyon sonucu elde edilen doldurma faktörü, verim, gerilim (V), açık devre gerilimi, akım yoğunluğu (J), kısa devre akım yoğunluğu ve kuantum verimliliği (QE) değerleri incelenerek gerçekleştirilmiştir. Bu optimizasyonlar sonrasında soğurucu katman olarak Cs₄CuSb₂Cl₁₂ yerine CH₃NH₃PbI₃ kullanılarak soğurucu katman için yapılan optimizasyonlar CH₃NH₃PbI₃ için de gerçekleştirilmiştir. CH₃NH₃PbI₃ soğurucu katman için simülasyonda kullanılan parametreler Tablo 5'te verilmiştir. Soğurucu katman haricindeki tüm parametreler sabit tutulmuştur.

Optimizasyonlarda kullanılan parametreler ve ilişkileri denklem 32 ile 37 arasındaki denklemlerle açıklanmıştır (Nelson, 2002). Denklem 32 taşıyıcı yaşam süresi (τ) vermektedir. Bu denklemlerde σ_{yka} yakalama kesit alanını, N_t kusur yoğunluğunu ve V_{th} taşıyıcıların termal hızını ifade eder.

$$\tau = \frac{1}{\sigma_{yka} N_t V_{th}} \quad (32)$$

Denklem 33 boşluk ve elektron için difüzyon uzunluğunu ($L_{n,p}$) vermektedir. Bu denklem taşıyıcıların yarı iletken malzemelerde ne kadar mesafeye yayılacakları ile ilgilidir. Bu denklemde k Boltzman sabitini, T sıcaklığı, μ_p boşluk mobilitesini, μ_n elektron mobilitesini ve q elektriksel yükü ifade eder.

$$L_{n,p} = \sqrt{\frac{kT \mu_{n,p} \tau}{q}} \quad (33)$$

Denklem 34'te kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}) verilmiştir. Bu denklemde G taşıyıcıların üretim oranını ifade etmektedir.

$$J_{sc} = qG(L_n + L_p) \quad (34)$$

Denklem 35'te taşıyıcıların üretim oranı (G) verilmiştir. Bu denklem sayesinde ışığın malzeme içerisinden geçerken gerçekleşen soğurma modellenenebilir. Bu denklemde α soğurma katsayısını, N_0 başlangıç foton yoğunluğunu ve x mesafeyi ifade etmektedir.

$$G = \alpha N_0 e^{-\alpha x} \quad (35)$$

Denklem 36'da kısa devre akımı (J_0) verilmiştir. Bu denklem difüzyon akışı ile ilgili bilgi verir. N_A akseptör yoğunluğunu, N_D donör yoğunluğunu, N_i içsel taşıyıcı yoğunluğunu, D_p boşluk difüzyon katsayısını, D_n elektron difüzyon katsayısını ifade etmektedir.

$$J_0 = qN_i^2 \left(\frac{D_n}{L_n N_A} + \frac{D_p}{L_p N_D} \right) \quad (36)$$

Denklem 5’te açık devre gerilimi, denklem 7’de verim değeri verilmiştir. Denklem 32 ve 33, kusur yoğunluğu ile taşıyıcı yaşam süresi arasındaki ilişkiyi gösterir ve difüzyon uzunluğunu etkiler. Taşıyıcıların difüzyon uzunluğu kusur yoğunluğunun artmasıyla azaldığından, güneş hücrelerinin kısa devre akım yoğunluğu denklem 34’e göre azalır. Dahası, difüzyon uzunluğunun azalması kısa devre akımını artırır ve bu da denklem 5’te görülebileceği gibi açık devre geriliminde azalmaya neden olur. Son olarak, denklem 7 güneş hücresi parametrelerine dönüşüm verimliliğini açıklar. Denklem 35 incelediğinde soğurma katsayısı, taşıyıcıların üretim oranını önemli ölçüde etkiler ve bu da denklem 34 incelendiğinde soğurma katsayısının kısa devre akım yoğunluğuna doğrudan etki ettiğini gösterir (Yasin vd., 2021; Ritu vd., 2023).



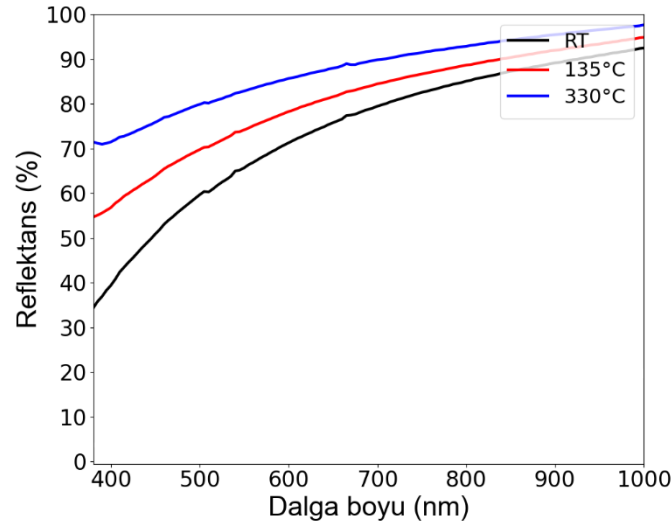
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Deneyisel Çalışmalar

Bu bölümde DC sıçratma tekniği kullanılarak 5 nm, 10 nm, 20 nm, 30 nm, 50 nm, 70 nm ve 100 nm kalınlıklarında cam ve silisyum altaşlara biriktirilen daha sonrasında oda sıcaklığı, 135°C, 230°C ve 330°C sıcaklık değerlerinde 30 dakika süreyle tavlanan NiO ince filmlerin UV/VIS Spektrofotometre, x-ışın kırınımı, taramalı elektron mikroskobu ve dört noktalı prob kullanılarak elde edilen optik, yapısal ve elektriksel ölçüm değerleri incelenmiştir.

3.1.1. NiO İnce Filmlerin Optik Ölçümleri

5 nm kalınlığında biriktirilen NiO ince filmin farklı tavlama sıcaklıklarındaki yansımaya grafikleri Şekil 17’de verilmiştir. Tavlama sıcaklığının artmasıyla ortalama yansımaya ve minimum yansımaya değerleri de artış göstermektedir.



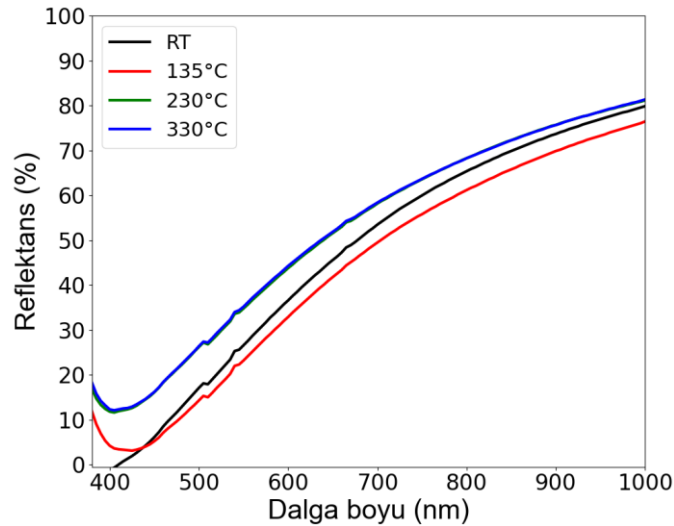
Şekil 17. 5 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki yansımaya grafikleri

Tablo 7’de 5 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki ortalama yansımaya değeri, minimum yansımaya değeri ve minimum yansımaya değerinin elde edildiği dalga boyu bilgileri yer almaktadır.

Tablo 7. 5 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki yansımaya değerleri

Tavlama Sıcaklıkları (°C)	Ort. Ref. (%) (380nm-1000nm)	Minimum Ref. (%) (380nm-1000nm)	Min. Ref. değeri (nm)
RT	74.07	34.3	380
135	80.58	54.7	380
330	87.58	71.00	390

10 nm kalınlığında biriktirilen NiO ince filmin farklı tavlama sıcaklıklarındaki yansımaya grafikleri Şekil 18’de verilmiştir. Tavlama sıcaklığının artmasıyla ortalama yansımaya ve minimum yansımaya değerleri de artış göstermektedir. Ortalama yansımaya ve minimum yansımaya değerleri 5 nm kalınlığındaki ince film ile kıyaslandığında düşüş göstermektedir.



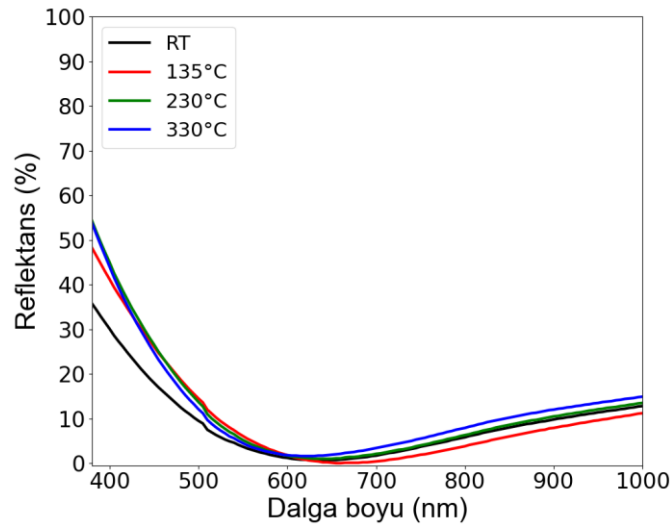
Şekil 18. 10 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki yansımaya grafikleri

Tablo 8’de 10 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki ortalama yansımaya değeri, minimum yansımaya değeri ve minimum yansımaya değerinin elde edildiği dalga boyu bilgileri yer almaktadır.

Tablo 8. 10 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki yansımaya değerleri

Tavlama Sıcaklıkları (°C)	Ort. Ref. (%) (380nm-1000nm)	Minimum Ref. (%) (380nm-1000nm)	Min. Ref. değeri (nm)
RT	45.95	0.0	390
135	43.18	3.1	425
230	51.64	11.6	405
330	51.85	12.1	405

20 nm kalınlığında biriktirilen NiO ince filmin farklı tavlama sıcaklıklarındaki yansımaya grafikleri Şekil 19’da verilmiştir. Tavlama sıcaklığının artmasıyla ortalama yansımaya ve minimum yansımaya değerleri de artış göstermektedir. Ortalama yansımaya ve minimum yansımaya değerleri 10 nm kalınlığındaki ince film ile kıyaslandığında düşüş göstermektedir.



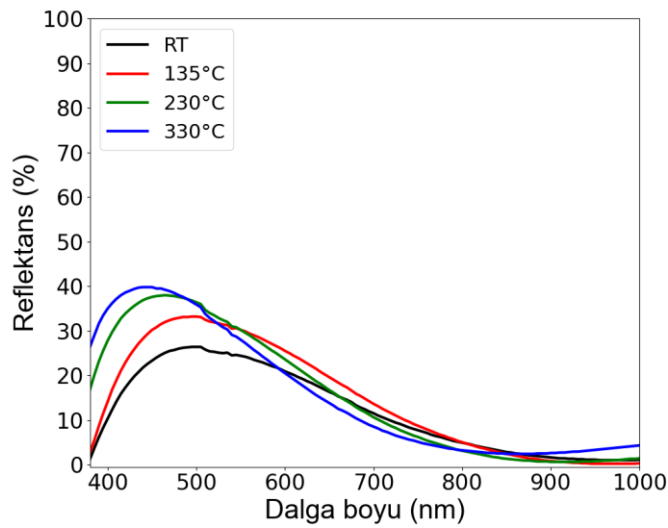
Şekil 19. 20 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki yansımaya grafikleri

Tablo 9’da 20 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki ortalama yansımaya değeri, minimum yansımaya değeri ve minimum yansımaya değerinin elde edildiği dalga boyu bilgileri yer almaktadır.

Tablo 9. 20 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki yansımaya değerleri

Tavlama Sıcaklıkları (°C)	Ort. Ref. (%) (380nm-1000nm)	Minimum Ref. (%) (380nm-1000nm)	Min. Ref. değeri (nm)
RT	8.72	0.7	625
135	9.88	0.0	655
230	11.35	1.0	630
330	11.83	1.6	615

30 nm kalınlığında biriktirilen NiO ince filmin farklı tavlama sıcaklıklarındaki yansımaya grafikleri Şekil 20’de verilmiştir. Tavlama sıcaklığının artmasıyla ortalama yansımaya ve minimum yansımaya değerleri de artış göstermektedir. Ortalama yansımaya ve minimum yansımaya değerleri 20 nm kalınlığındaki ince film ile kıyaslandığında artış göstermektedir.



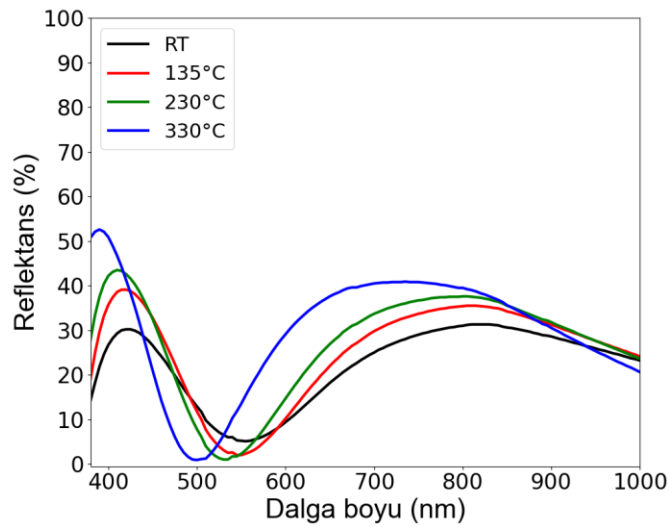
Şekil 20. 30 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki yansımaya grafikleri

Tablo 10’da 30 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki ortalama yansımaya değeri, minimum yansımaya değeri ve minimum yansımaya değerininde elde edildiğı dalga boyu bilgileri yer almaktadır.

Tablo 10. 30 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki yansımaya değeri

Tavlama Sıcaklıkları (°C)	Ort. Ref. (%) (380nm-1000nm)	Minimum Ref. (%) (380nm-1000nm)	Min. Ref. değeri (nm)
RT	12.04	1.0	955
135	14.57	0.2	945
230	15.43	0.6	900
330	15.78	2.4	850

50 nm kalınlığında biriktirilen NiO ince filmin farklı tavlama sıcaklıklarındaki yansımaya grafikleri Şekil 21’de verilmiştir. Tavlama sıcaklığının artmasıyla ortalama yansımaya ve minimum yansımaya değeri de artış göstermektedir. Ortalama yansımaya ve minimum yansımaya değeri 30 nm kalınlığındaki ince film ile kıyaslandığında artış göstermektedir.



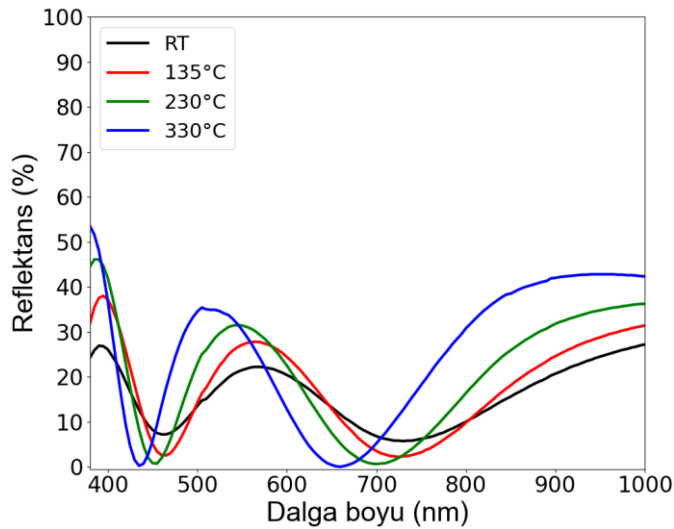
Şekil 21. 50 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki yansımaya grafikleri

Tablo 11’de 50 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki ortalama yansımaya değeri, minimum yansımaya değeri ve minimum yansımaya değerinin elde edildiği dalga boyu bilgileri yer almaktadır.

Tablo 11. 50 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki yansımaya değerleri

Tavlama Sıcaklıkları (°C)	Ort. Ref. (%) (380nm-1000nm)	Minimum Ref. (%) (380nm-1000nm)	Min. Ref. değeri (nm)
RT	22.33	5.1	555
135	25.28	2.0	545
230	27.05	1.0	530
330	29.85	0.9	500

70 nm kalınlığında biriktirilen NiO ince filmin farklı tavlama sıcaklıklarındaki yansımaya grafikleri Şekil 22’de verilmiştir. Tavlama sıcaklığının artmasıyla ortalama yansımaya ve minimum yansımaya değerleri de artış göstermektedir. Ortalama yansımaya ve minimum yansımaya değerleri 50 nm kalınlığındaki ince film ile kıyaslandığında düşüş göstermektedir.



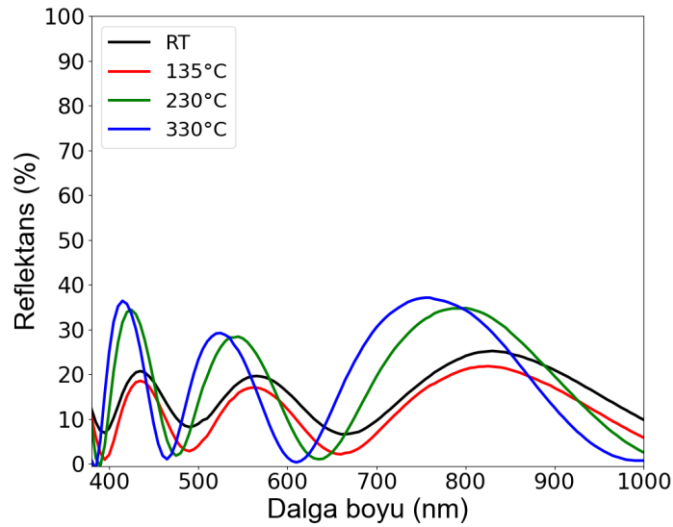
Şekil 22. 70 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki yansımaya grafikleri

Tablo 12’de 70 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki ortalama yansımaya değeri, minimum yansımaya değeri ve minimum yansımaya değerinin elde edildiği dalga boyu bilgileri yer almaktadır.

Tablo 12. 70 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki yansımaya değerleri

Tavlama Sıcaklıkları (°C)	Ort. Ref. (%) (380nm-1000nm)	Minimum Ref. (%) (380nm-1000nm)	Min. Ref. değeri (nm)
RT	15.90	5.7	730
135	17.78	2.2	725
230	20.67	0.6	700
330	25.36	0.0	660

100 nm kalınlığında biriktirilen NiO ince filmin farklı tavlama sıcaklıklarındaki yansımaya grafikleri Şekil 23’te verilmiştir. Tavlama sıcaklığının artmasıyla ortalama yansımaya ve minimum yansımaya değerleri de artış göstermektedir. Ortalama yansımaya ve minimum yansımaya değerleri 70 nm kalınlığındaki ince film ile kıyaslandığında düşüş göstermektedir.



Şekil 23. 100 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki yansımaya grafikleri

Tablo 13'te 100 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki ortalama yansımaya değeri, minimum yansımaya değeri ve minimum yansımaya değerinin elde edildiği dalga boyu bilgileri yer almaktadır.

Tablo 13. 100 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki yansımaya değerleri

Tavlama Sıcaklıkları (°C)	Ort. Ref. (%) (380nm-1000nm)	Minimum Ref. (%) (380nm-1000nm)	Min. Ref. değeri (nm)
RT	15.83	6.6	660
135	12.29	0.9	395
230	18.65	0.0	390
330	18.64	0.0	385

3.1.2. NiO İnce Filmlerin Elektriksel Ölçümleri

Tablo 14'te 5 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki özdirenç ve iletkenlik değerleri verilmiştir. Minimum özdirenç değeri 135°C sıcaklığında tavlanan ince filmde 0.070 Ωm olarak, maksimum özdirenç değeri 230°C sıcaklığında tavlanan ince filmde 0.276 Ωm olarak ölçülmüştür. Minimum ve maksimum iletkenlik değerleri ise sırasıyla 3.619 S/m ve 14.255 S/m olarak ölçülmüştür.

Tablo 14. 5 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki özdirenç ve iletkenlik değerleri

Tavlama Sıcaklıkları (°C)	Özdirenç (Ωm)	İletkenlik (S/m)
RT	0.125	7.974
135	0.070	14.255
230	0.276	3.619

Tablo 15'te 10 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki özdirenç ve iletkenlik değerleri verilmiştir.

Tablo 15. 10 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki öz direnç ve iletkenlik değerleri

Tavlama Sıcaklıkları (°C)	Özdirenç (Ωm)	İletkenlik (S/m)
RT	0.011	87.586

Tablo 16’de 20 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki öz direnç ve iletkenlik değerleri verilmiştir. Minimum öz direnç değeri oda sıcaklığında tavlanan ince filmde 0.039 Ωm olarak, maksimum öz direnç değeri 230°C sıcaklığında tavlanan ince filmde 0.829 Ωm olarak ölçülmüştür. Minimum ve maksimum iletkenlik değerleri ise sırasıyla 1.206 S/m ve 25.298 S/m olarak ölçülmüştür.

Tablo 16. 20 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki öz direnç ve iletkenlik değerleri

Tavlama Sıcaklıkları (°C)	Özdirenç (Ωm)	İletkenlik (S/m)
RT	0.039	25.298
135	0.448	2.231
230	0.829	1.206

Tablo 17’de 30 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki öz direnç ve iletkenlik değerleri verilmiştir. Minimum öz direnç değeri oda sıcaklığında tavlanan ince filmde 0.043 Ωm olarak, maksimum öz direnç değeri 230°C sıcaklığında tavlanan ince filmde 0.542 Ωm olarak ölçülmüştür. Minimum ve maksimum iletkenlik değerleri ise sırasıyla 1.844 S/m ve 23.110 S/m olarak ölçülmüştür.

Tablo 17. 30 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki öz direnç ve iletkenlik değerleri

Tavlama Sıcaklıkları (°C)	Özdirenç (Ωm)	İletkenlik (S/m)
RT	0.043	23.110
135	0.202	4.947
230	0.542	1.844

Tablo 18’de 50 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki öz direnç ve iletkenlik değerleri verilmiştir. Minimum öz direnç değeri oda sıcaklığında tavlanan ince filmde 0.145 Ωm olarak, maksimum öz direnç değeri 330°C sıcaklığında tavlanan ince filmde 2.375 Ωm olarak ölçülmüştür. Minimum ve maksimum iletkenlik değerleri ise sırasıyla 0.421 S/m ve 6.917 S/m olarak ölçülmüştür.

Tablo 18. 50 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki öz direnç ve iletkenlik değerleri

Tavlama Sıcaklıkları (°C)	Özdirenç (Ωm)	İletkenlik (S/m)
RT	0.145	6.917
135	0.633	1.580
230	0.545	1.836
330	2.375	0.421

Tablo 19’da 70 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki öz direnç ve iletkenlik değerleri verilmiştir. Minimum öz direnç değeri oda sıcaklığında tavlanan ince filmde 0.216 Ωm olarak, maksimum öz direnç değeri 330°C sıcaklığında tavlanan ince filmde 4.187 Ωm olarak ölçülmüştür. Minimum ve maksimum iletkenlik değerleri ise sırasıyla 0.239 S/m ve 4.640 S/m olarak ölçülmüştür.

Tablo 19. 70 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki öz direnç ve iletkenlik değerleri

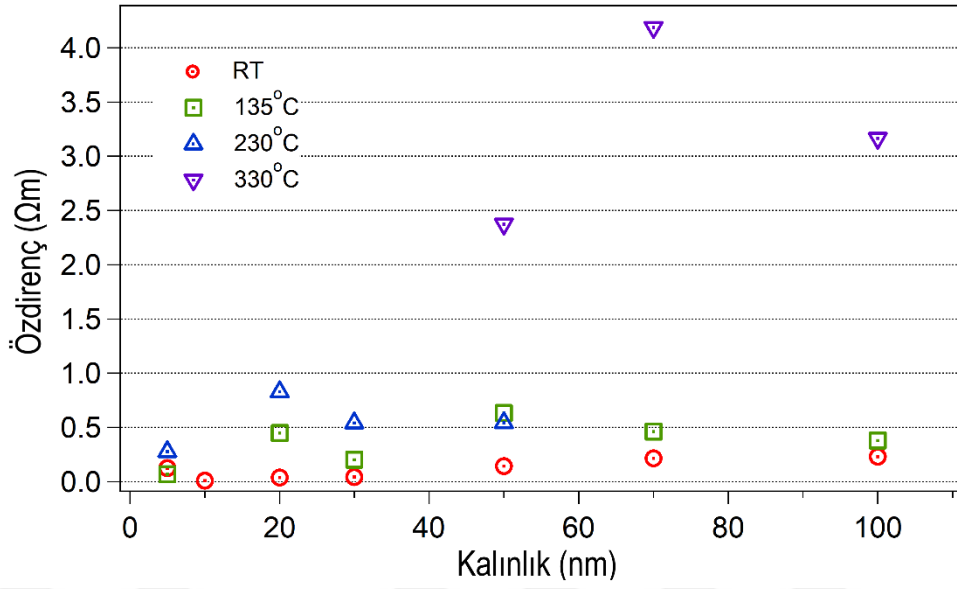
Tavlama Sıcaklıkları (°C)	Özdirenç (Ωm)	İletkenlik (S/m)
RT	0.216	4.640
135	0.462	2.165
330	4.187	0.239

Tablo 20’de 100 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki öz direnç ve iletkenlik değerleri verilmiştir. Minimum öz direnç değeri oda sıcaklığında tavlanan ince filmde 0.232 Ωm olarak, maksimum öz direnç değeri 330°C sıcaklığında tavlanan ince filmde 3.165 Ωm olarak ölçülmüştür. Minimum ve maksimum iletkenlik değerleri ise sırasıyla 0.316 S/m ve 4.323 S/m olarak ölçülmüştür.

Tablo 20. 100 nm kalınlığındaki NiO ince filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarındaki öz direnç ve iletkenlik değerleri

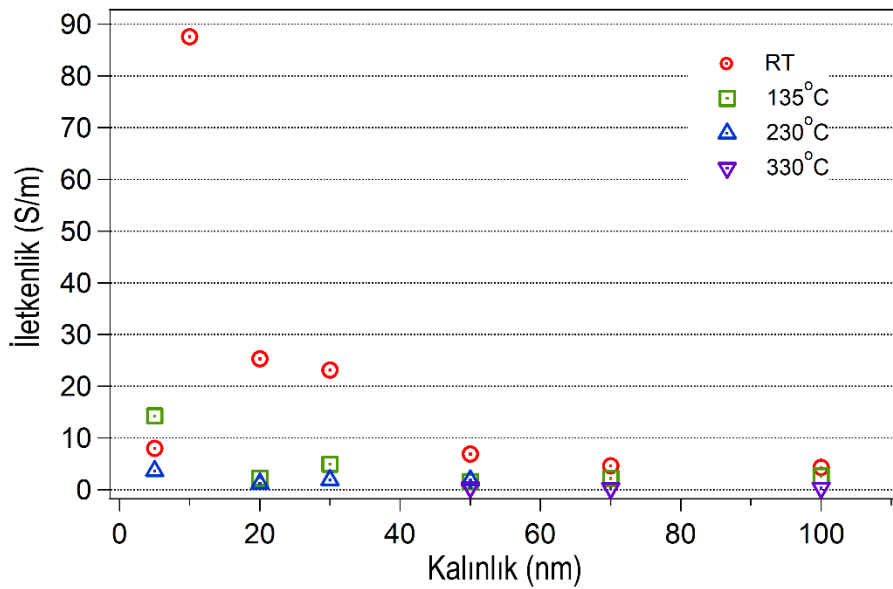
Tavlama Sıcaklıkları (°C)	Özdirenç (Ωm)	İletkenlik (S/m)
RT	0.232	4.323
135	0.380	2.633
330	3.165	0.316

Şekil 24’te NiO ince filmlerin kalınlığa bağlı öz direnç değerleri verilmiştir. Örnekler arasında minimum öz direnç değeri oda sıcaklığında tavlanan 10 nm kalınlıktaki ince filmde 0.011 Ωm olarak, maksimum öz direnç değeri 330°C sıcaklığında tavlanan 70 nm kalınlıktaki ince filmde 4.187 Ωm olarak ölçülmüştür. Bu çalışma sonucu elde edilen öz direnç sonuçları incelendiğinde tavlama sıcaklığındaki artışın öz direnç değerini artırdığı gözlemlenmiştir.



Şekil 24. NiO ince filmlerin kalınlığa bağlı öz direnç değerleri

Şekil 25'te NiO ince filmlerin kalınlığa bağlı iletkenlik değerleri verilmiştir. Örnekler arasında minimum iletkenlik değeri 330°C sıcaklığında tavlanan 70 nm kalınlıktaki ince filmde 0.239 S/m olarak, maksimum iletkenlik değeri oda sıcaklığında tavlanan 10 nm kalınlıktaki ince filmde 87.586 S/m olarak ölçülmüştür. Bu çalışma sonucu elde edilen iletkenlik sonuçları incelendiğinde tavlama sıcaklığındaki artışın iletkenlik değerini azalttığı gözlemlenmiştir.

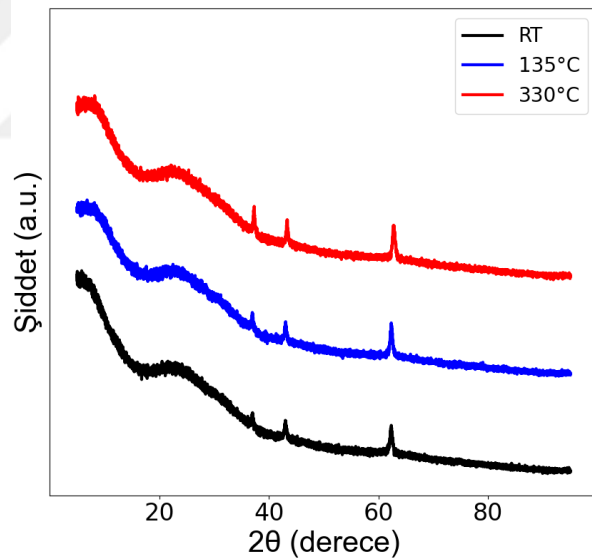


Şekil 25. NiO ince filmlerin kalınlığa bağlı iletkenlik değerleri

3.1.3. NiO İnce Filmlerin Yapısal Ölçümleri

Bu bölümde x-ışın kırınımı ve taramalı elektron mikroskobu kullanılarak yapısal özellikleri belirlenen NiO ince filmlerin özellikleri incelendi. X-ışın kırınımı analizi, cam alttaşı üzerine biriktirilen NiO ince filmler üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Şekil 26'da oda sıcaklığında, 135°C ve 330°C değerlerinde tavlanan NiO ince filmleri için elde edilen x-ışın kırınımı desenleri verilmiştir. 23°'deki geniş pik, cam kaynaklıdır. 37.2°, 43.2° ve 62.8°'deki pikler sırasıyla (111), (200) ve (220) düzlemlerine karşılık gelmektedir ve bu sonuçlar, JCPDS No. 451027 kartı ile uyumludur. Tavlama sıcaklığı arttıkça pik yoğunluklarında hafif bir artış gözlemlenmiş, ancak bu artış önemli düzeyde olmamıştır. Bu sonuçlar, literatürle iyi bir uyum göstermektedir; literatürde, 300°C'nin üzerindeki tavlama sıcaklıklarında NiO filmlerinde güçlü kristalleşme gerçekleşirken, 300°C'nin altındaki sıcaklıklarda daha az kristalleşme meydana geldiği belirtilmektedir (Yang vd., 2019; Gawali vd., 2018; Helan vd., 2016).

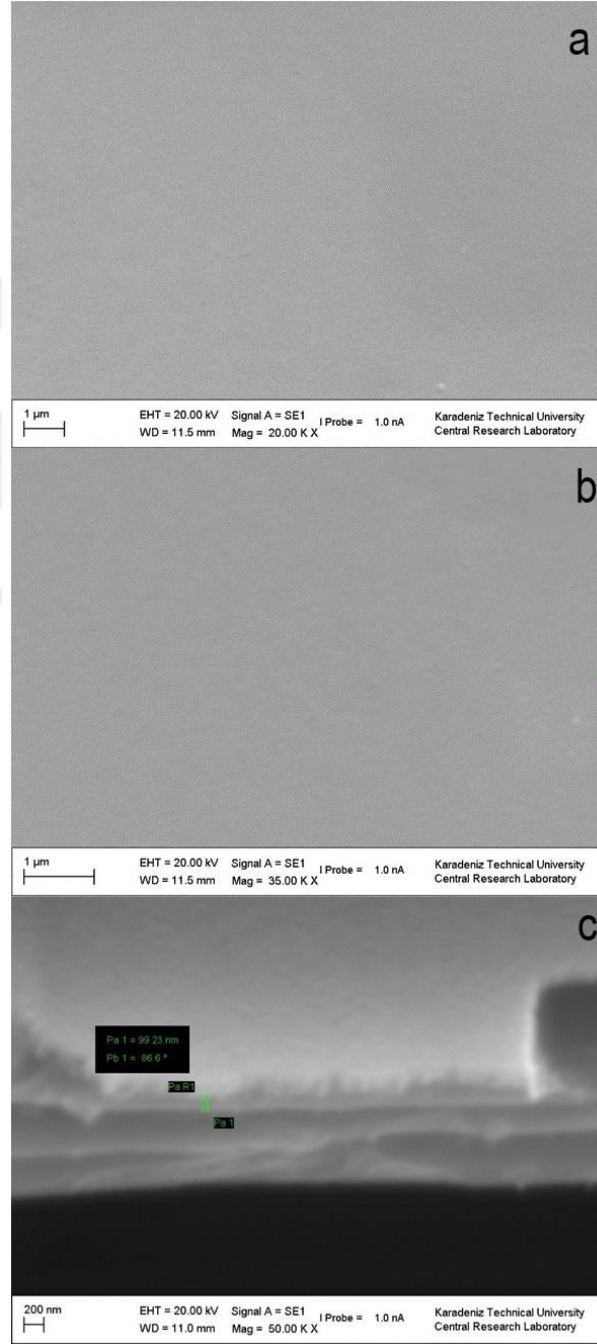


Şekil 26. Farklı sıcaklıklarda tavlanan NiO ince filmlerin XRD spektrumu

NiO ince filmlerinin güneş hücresi uygulamalarında boşluk taşıma katmanı olarak kullanılması göz önüne alındığında, 37.2° değerindeki kırınım pikinin, elektron sızıntısını önlemede ve boşlukların transfer edilmesinde önemli bir parametre olarak rapor edildiğini belirtmek gerekir (Yang vd., 2019).

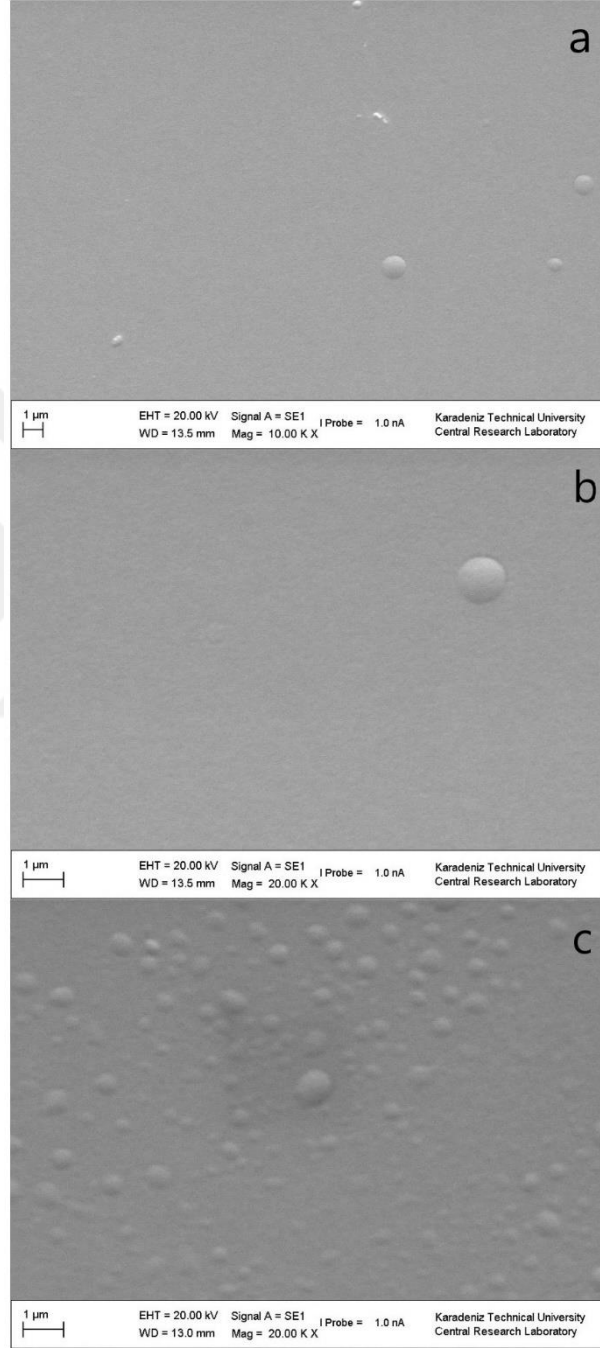
Taramalı elektron mikroskobu kullanılarak silisyum alttaşı üzerine biriktirilen NiO ince filmlerin yüzey morfolojisi analiz edilmiştir. Şekil 27'de farklı büyüklüklerdeki yüzey

koşulları verilmiştir. Film yüzeylerinin nispeten pürüzsüz, düzgün ve kompakt olduğu gözlemlenmiştir. Film kalınlığı 86.6° açıyla 96 nm olarak tahmin edilmiştir. İnce filmin 70 nm olarak biriktirildiği göz önünde bulundurulduğunda oluşan fark ölçümün yetersiz çözünürlüğünden kaynaklanmaktadır. Yine de, ince filmde hafif homojensizlikler ve kullanım hataları olmasına rağmen kabul edilebilir olarak değerlendirilebilir.



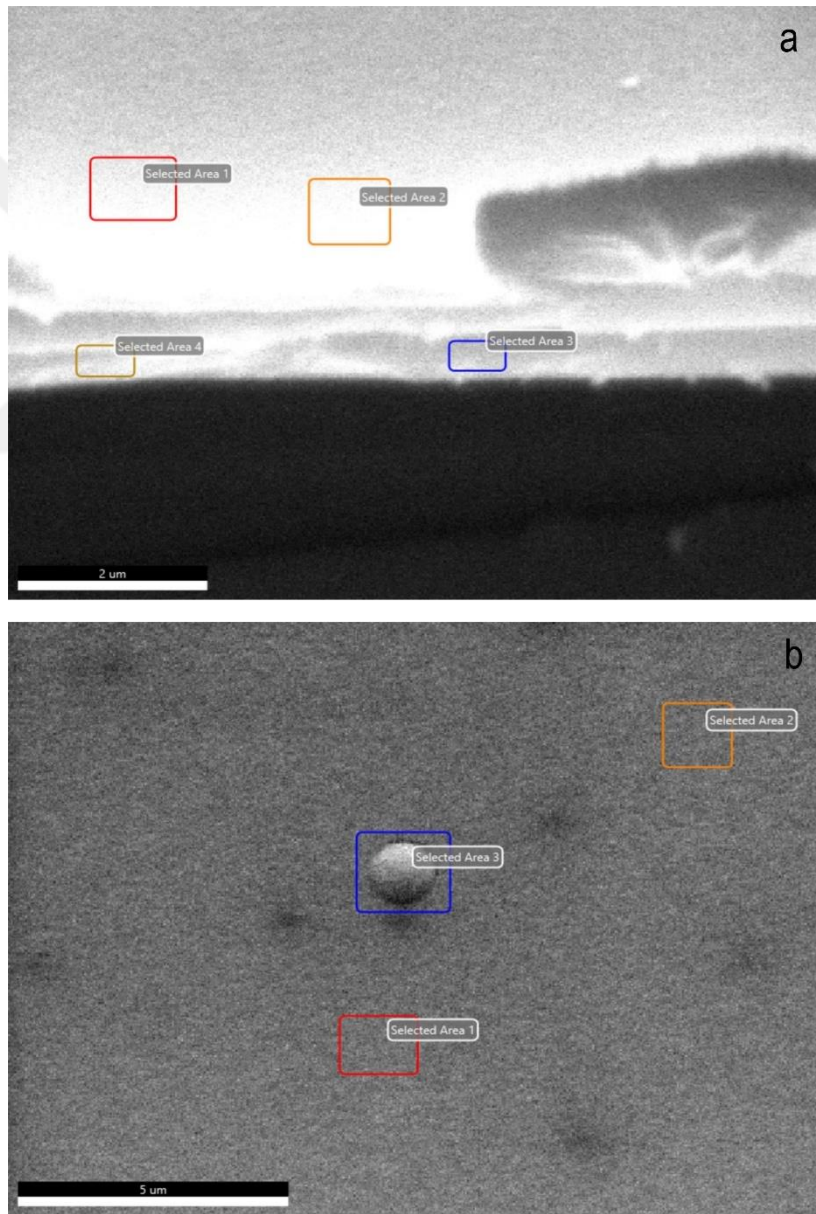
Şekil 27. Yüzey koşulları (a) 20k büyütülmüş, (b) 35k büyütülmüş, (c) 50k büyütülmüş

Şekil 28’de ince film yüzeyinin bazı alanlarındaki yuvarlak yapıli kusurlar verilmiştir. Şekil 28(c), (b)’ye kıyasla daha fazla yuvarlak şekilli yapı içermektedir. Bu yuvarlak şekilli yapılar, nanometreden 1 mikrometreye kadar değışen boyutlarda oluşmuştur.



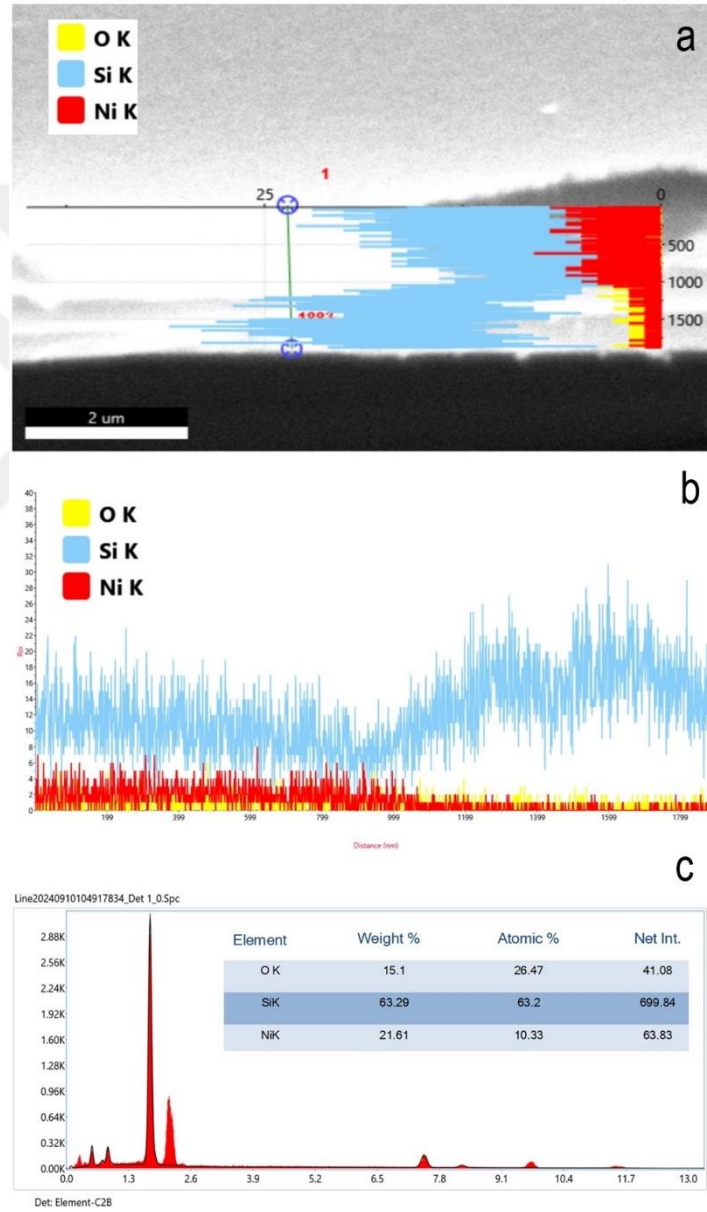
Şekil 28. İnce film yüzeyinin farklı alanlarındaki yuvarlak yapılar (a) 10k büyütölmüş, (b) 20k büyütölmüş, (c) 20k büyütölmüş daha yoğun yuvarlak şekilli yapılar

Film morfolojisi ve kompozisyonunu araştırmak için, çizgi taraması ve alan haritalama ile enerji dağılımlı x-ışını spektroskopisi (EDS) analizi de gerçekleştirilmiştir. Çizgi taraması, yüzey boyunca alt tabakaya kadar gerçekleştirildi. Alan haritalaması için, ikisi yüzeydeki alan, diğer ikisi ise alttaş kesit alanı olmak üzere dört farklı alan tarandı. Yüzeydeki üç farklı alandan biri 1 mikron boyutunda olmak üzere yuvarlak şekilli yapı içermektedir. Şekil 29(a) alan-1 ve alan-2 için yüzeydeki, alan-3 ve alan-4 için alttaş parçası üzerinde taranmış alanlardır. Şekil 29(b) alan-1 ve alan-2 için alttaşdaki taranmış alanlardır, alan-3 yuvarlak şekilli yapıları içeren taranmış alandır.



Şekil 29. Farklı alanlar için alan haritalama (a) Yüzey taraması, (b) Alttaş taraması

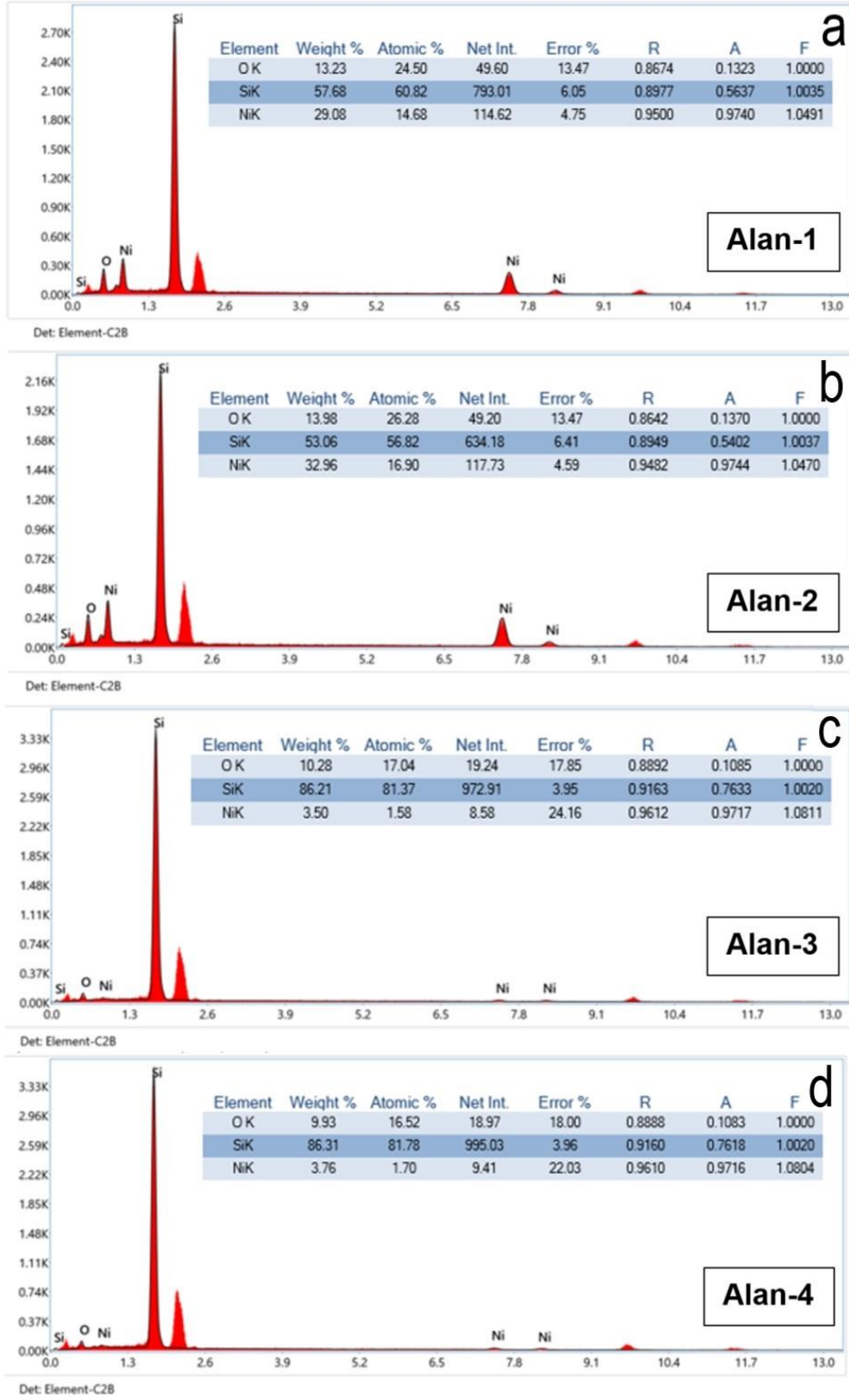
Şekil 30'da yüzeyden alttaşa kadar kesit alanı verilmiştir. Taramalı elektron mikroskobu ve çizgi taraması Şekil 30(a) O, Si ve Ni oran grafiği ile doğrulanabilir. Şekil 30(b) O, Si ve Ni oranlarının net bir grafiğini Şekil 30(c) ise özet halinde bu değerleri içermektedir. Si yüzdesi, yüzey/alttaş ara yüzünden sonra artış göstererek alttaşa daha yüksek oranlara ulaşmaktadır. Ni ve O oranları ise tarama başlangıcında yüksek olup, yüzey/alttaş ara yüzünden sonra belirgin şekilde azalmaktadır.



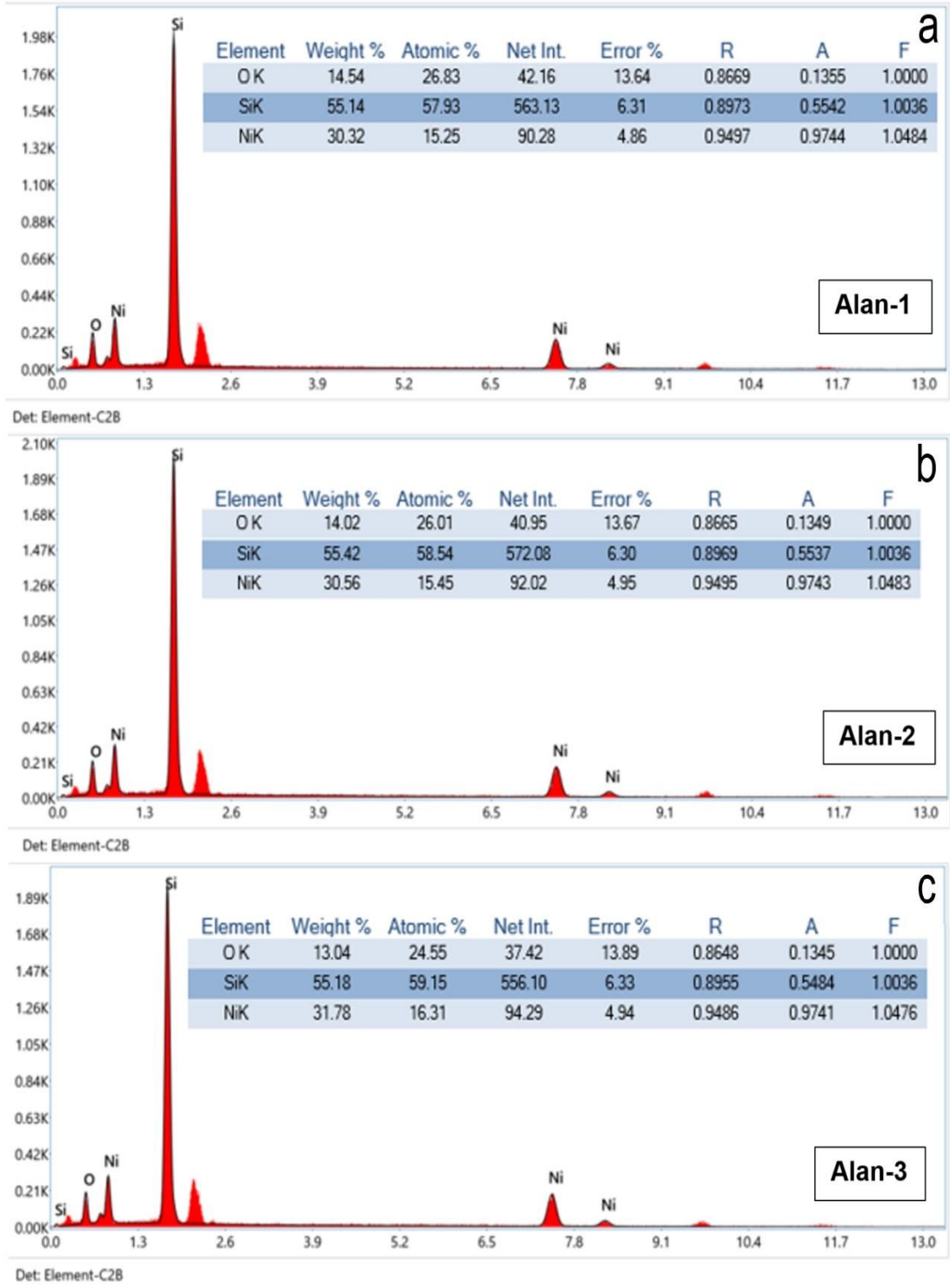
Şekil 30. Yüzeyden alttaşa kadar kesit alanı (a)-(b) O, Si ve Ni oranı, (c) O, Si ve Ni değerleri

Şekil 31’de dört farklı alan için EDS analizleri verilmiştir. Şekil 31(a)-(b) incelendiğinde Ni ve O oranları sırasıyla %40 ve %14 seviyesindedir. Bu oran yüzeyde NiO filmi olduğunu doğrulamaktadır. Şekil 31(c)-(d) incelendiğinde Ni ve O oranları sırasıyla %3 ve %10 seviyelerine düşerken, Si oranı alt tabakaya ulaşılması nedeniyle %86 değerine çıkmaktadır. Bu çalışmada tüm EDS analizlerinde Si'nin pik yapması, Si alttaş kaynaklıdır. Bunun nedeni, NiO filminin kalınlığına kıyasla elektronların daha yüksek penetrasyon derinliğine sahip olmasıdır (Grilli vd., 2016; Visweswaran vd., 2020).

Yüzeyin bazı kısımlarındaki yuvarlak şekilli yapıları araştırmak için, ikisi yuvarlak şekilli yapıların yakınlarından ve biri bulunduğu alan olmak üzere 3 farklı alan için EDS analizi gerçekleştirilmiştir. NiO filminin tüm yüzeyi eşit şekilde kapladığı ve yuvarlak şekilli yapıda önemli bir oran değişikliği olmadığı doğrulanmıştır. Şekil 32, Si, Ni ve O oranlarını göstermektedir. Bu oranların tüm alanlar için benzer olduğu görülmektedir.



Şekil 31. Farklı alanlar için EDS analizleri (a) Alan-1 analizi, (b) Alan-2 analizi, (c) Alan-3 analizi, (d) Alan-4 analizi



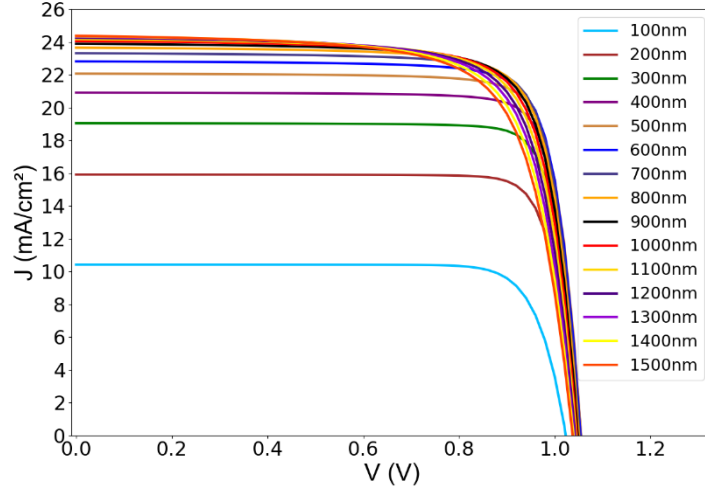
Şekil 32. Yuvarlak şekilli yapıların etkisi için EDS analizleri (a)-(b) Yuvarlak şekilli yapıların yakınındaki alanlar, (c) Yuvarlak şekilli yapıların oluştuğu alan

3.2. Simülasyon Çalışmaları

Bu bölümde SCAPS programı kullanılarak tasarlanan güneş hücresinin simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında soğurucu katmanlar için kalınlık, kusur yoğunluğu, soğurma katsayısı ve yakalama kesit alanı, Spiro-OMeTAD için kalınlık ve kusur yoğunluğu, NiO için kalınlık, kusur yoğunluğu ve mobilite parametreleri için farklı değerler verilerek güneş hücresinin karakteristik ve optik değişimleri incelenmiştir. Bu simülasyon sonucunda elde edilen doldurma faktörü, verim, gerilim, açık devre gerilimi, akım yoğunluğu, kısa devre akım yoğunluğu ve kuantum verimliliği değerleri grafikler ve tablolar kullanılarak görselleştirilmiştir. Daha sonrasında soğurucu katman için $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ kullanılarak $\text{Cs}_4\text{CuSb}_2\text{Cl}_{12}$ ile olan farkları incelenmiştir. Soğurucu katman karşılaştırmasının ardından $\text{FTO}/\text{TiO}_2/\text{Cs}_4\text{CuSb}_2\text{Cl}_{12}/\text{NiO}/\text{Au}$ hücre yapısında NiO yerine CuSbS_2 , Cu_2O , CuSCN , MoO_3 , CuI , CuO , CNTS, ZnTe ve P_3HT kullanılarak güneş hücresinin karakteristik özellikleri incelenmiştir. Ardından $\text{CuSbS}_2/\text{NiO}$, CNTS/NiO ve $\text{CuSbS}_2/\text{Spiro-OMeTAD}$, $\text{CNTS}/\text{Spiro-OMeTAD}$ malzemeleri çift boşluk taşıyıcı katman olarak kullanılarak güneş hücresinin karakteristik özellikleri incelenmiştir.

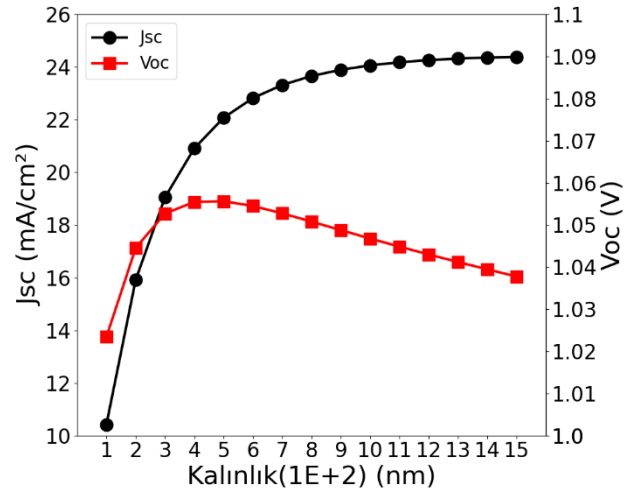
3.2.1. $\text{Cs}_4\text{CuSb}_2\text{Cl}_{12}$ Kalınlık Optimizasyonu

Soğurucu katman, ışığın emildiği ve elektron boşluk çiftlerinin oluşturulduğu yerdir. Daha kalın bir soğurucu katman daha fazla fotonun emilmesine yol açar, ancak aynı zamanda rekombinasyonu ve malzemenin direncini artırır (Srivastava vd., 2024; Kumar vd., 2023). Bu nedenle, soğurucu katmanın kalınlığı çok önemlidir ve soğurucu özelliklerine göre optimize edilmesi gerekir. Bu çalışmada kalınlık optimizasyonu için soğurucu katman kalınlığı 100 nm değerinden 1500 nm değerine kadar kalınlık her adımda 100 nm artırılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyon sonuçları akım yoğunluğu-verim, kısa devre akım yoğunluğu-açık devre gerilimi, doldurma faktörü-verim ve kuantum verimliliği-dalga boyu grafikleriyle gösterilmiştir.



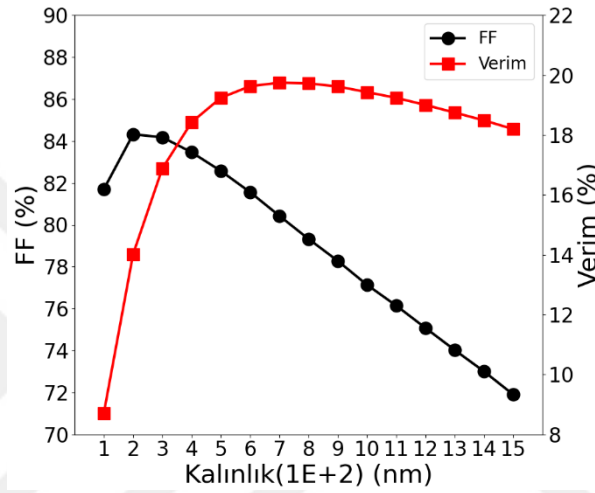
Şekil 33. $\text{Cs}_4\text{CuSb}_2\text{Cl}_{12}$ soğurucu katman kalınlığına bağlı J-V grafiği

Şekil 34'te $J_{\text{SC}}-V_{\text{OC}}$ grafiği verilmiştir. Kalınlığın artmasıyla kısa devre akım yoğunluğu değeri de artmaktadır. Kalınlık 100 nm değerinden 700 nm değerine artırıldığında kısa devre akım yoğunluğu 10.42 mA/cm^2 değerinden 23.32 mA/cm^2 değerine yükselmiştir, kalınlık 1500 nm değerine artırıldığında ise kısa devre akım yoğunluğu 24.39 mA/cm^2 değerine yükselmiştir. Açık devre gerilimi ise kalınlığın 100 nm değerinden 500 nm değerine artırılmasıyla 1.02 V değerinden 1.06 V değerine yükselmiştir. Kalınlığın daha da artırılmasıyla açık devre gerilimi 600 nm ile 1000 nm arasında 1.05 V değerine, 1100 nm ile 1500 nm arasında ise 1.04 V değerine düşmüştür.



Şekil 34. $\text{Cs}_4\text{CuSb}_2\text{Cl}_{12}$ soğurucu katman kalınlığına bağlı $J_{\text{SC}}-V_{\text{OC}}$ grafiği

Şekil 35'te FF-Verim grafiği verilmiştir. Kalınlık 100 nm değerinden 200 nm değerine artırıldığında doldurma faktörü %81.70 değerinden %84.32 değerine yükselmiştir sonrasında 200 nm değerinden 1500 nm değerine kadar doldurma faktörü doğrusal olarak azalarak %84.32 değerinden %71.90 değerine düşmüştür. Kalınlık 700 nm değerine artırıldığında verim değeri tepe noktası olan %19.75 değerine ulaşmıştır sonrasında 1500 nm değerine kadar artırılarak simülasyon devam ettirildiğinde verim değeri %18.20 değerine düşmüştür. Bu veriler sonucunda en ideal kalınlık değeri 700 nm olarak belirlenmiştir.



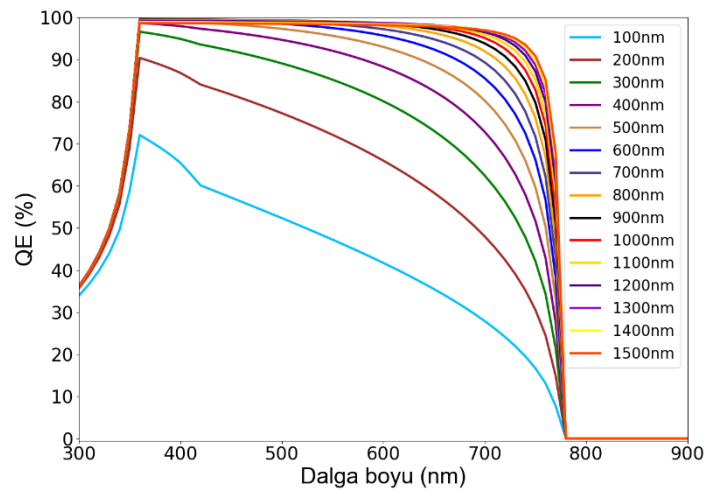
Şekil 35. $\text{Cs}_4\text{CuSb}_2\text{Cl}_{12}$ soğurucu katman kalınlığına bağlı FF-Verim grafiği

Tablo 21'de bu simülasyon sonucunda elde edilen soğurucu katman kalınlığına bağlı güneş hücresi karakteristik değerleri verilmiştir.

Tablo 21. $\text{Cs}_4\text{CuSb}_2\text{Cl}_{12}$ soğurucu katman kalınlığına bağlı güneş hücresi karakteristik değerleri

Kalınlık (nm)	J_{SC} (mA/cm ²)	V_{OC} (V)	FF (%)	Verim (%)	J_{MPP} (mA/cm ²)	V_{MPP} (V)
100	10.42	1.02	81.70	8.71	9.9	0.88
200	15.92	1.04	84.32	14.02	15.24	0.92
300	19.05	1.05	84.18	16.88	18.35	0.92
400	20.92	1.06	83.46	18.43	20.03	0.92
500	22.08	1.06	82.57	19.24	20.92	0.92
600	22.83	1.05	81.56	19.63	21.34	0.92
700	23.32	1.05	80.43	19.75	21.47	0.92
800	23.66	1.05	79.33	19.73	21.92	0.90
900	23.90	1.05	78.28	19.62	21.80	0.90
1000	24.07	1.05	77.13	19.43	21.59	0.90
1100	24.19	1.04	76.14	19.24	21.87	0.88
1200	24.27	1.04	75.08	19.00	21.60	0.88
1300	24.33	1.04	74.02	18.75	21.80	0.86
1400	24.37	1.04	73.00	18.49	21.50	0.86
1500	24.39	1.04	71.90	18.20	21.66	0.84

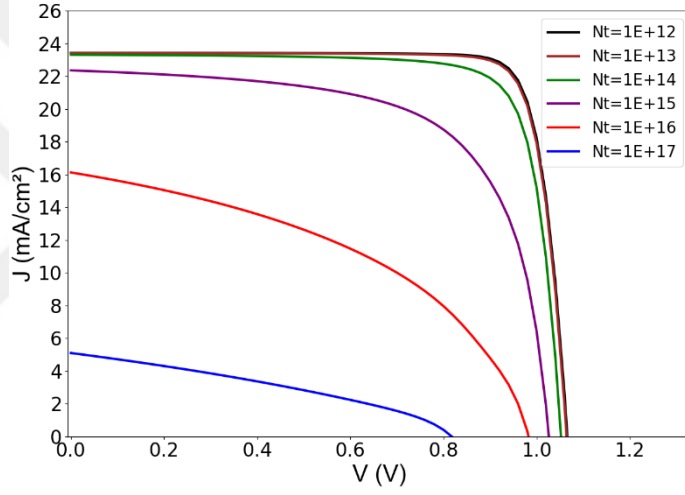
Şekil 36’da QE-Dalga boyu grafiği verilmiştir. Soğurucu katman kalınlığının artırılmasıyla kuantum verimliliğinde de artış meydana gelmiştir ve bu sonuç kısa devre akım yoğunluğunun yükseldiğini göstermektedir.



Şekil 36. $\text{Cs}_4\text{CuSb}_2\text{Cl}_{12}$ soğurucu katman kalınlığına bağlı QE-Dalga boyu grafiği

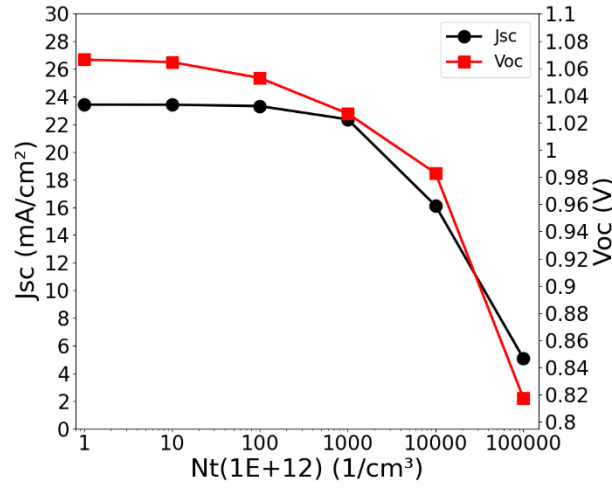
3.2.2. $\text{Cs}_4\text{CuSb}_2\text{Cl}_{12}$ Kusur Yoğunluğu (Defect Density) Optimizasyonu

Bir güneş hücresinin katmanlarındaki kusur yoğunlukları, tuzak sayısını yansıtır ve karşılık gelen katmanın olduğu malzemelerin kalitesini gösterir. Yüksek kusur yoğunluğu değeri düşük taşıyıcı yaşam süresi, düşük difüzyon uzunluğu ve yüksek miktarda rekombinasyona yol açar (Ritu vd., 2023; Yasin vd., 2021). Soğurucu katman kusur yoğunluğu $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ değerinden $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ değerine kadar kusur yoğunluğu her adımda 10 kat artırılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyon sonuçları akım yoğunluğu-verim, kısa devre akım yoğunluğu-açık devre gerilimi, doldurma faktörü-verim ve kuantum verimliliği-dalga boyu grafikleriyle gösterilmiştir.



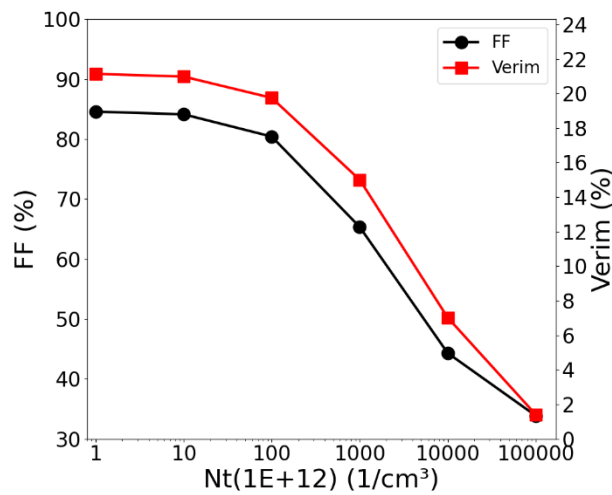
Şekil 37. $\text{Cs}_4\text{CuSb}_2\text{Cl}_{12}$ soğurucu katman kusur yoğunluğuna bağlı J-V grafiği

Şekil 38’de J_{sc} - V_{oc} grafiği verilmiştir. Kusur yoğunluğunun $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ değerinden $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ değerine kadar her adımda 10 kat artırılmasıyla kısa devre akım yoğunluğu ve açık devre gerilimi değerleri azalmaktadır. Kusur yoğunluğu $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ değerinde iken 23.43 mA/cm^2 olan kısa devre akım yoğunluğu, kusur yoğunluğu $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ değerine artırıldığında 23.32 mA/cm^2 değerine düşmektedir. Kusur yoğunluğunun $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ve $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ değerleri için kısa devre akım yoğunluğu sırasıyla 22.37 mA/cm^2 , 16.13 mA/cm^2 ve 5.09 mA/cm^2 değerlerini vermektedir. Kusur yoğunluğu 1×10^{12} değerinde iken 1.07 V olan açık devre gerilimi, kusur yoğunluğu 1×10^{14} değerine artırıldığında 1.05 V değerine düşmektedir. Kusur yoğunluğunun $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ve $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ değerleri için açık devre gerilimi sırasıyla 1.03 V , 0.98 V ve 0.82 V değerlerini vermektedir.



Şekil 38. $\text{Cs}_4\text{CuSb}_2\text{Cl}_{12}$ soğurucu katman kusur yoğunluğuna bağlı $J_{\text{SC}}\text{-}V_{\text{OC}}$ grafiği

Şekil 39’da FF-Verim grafiği verilmiştir. Kusur yoğunluğunun $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ değerinden $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ değerine kadar her adımda 10 kat artırılmasıyla verim ve doldurma faktörü değerleri azalmaktadır. Kusur yoğunluğu $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ değerinde iken %84.60 olan doldurma faktörü, kusur yoğunluğu $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ değerine artırıldığında %80.43 değerine düşmektedir. Kusur yoğunluğunun $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ve $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ değerleri için doldurma faktörü sırasıyla %65.36, %44.31 ve %33.87 değerlerini vermektedir. Kusur yoğunluğu 1×10^{12} değerinde iken %21.14 olan verim, kusur yoğunluğu $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ değerine artırıldığında %19.75 değerine düşmektedir. Kusur yoğunluğunun $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ve $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ değerleri için verim sırasıyla %15.00, %7.02 ve %1.41 değerlerini vermektedir.



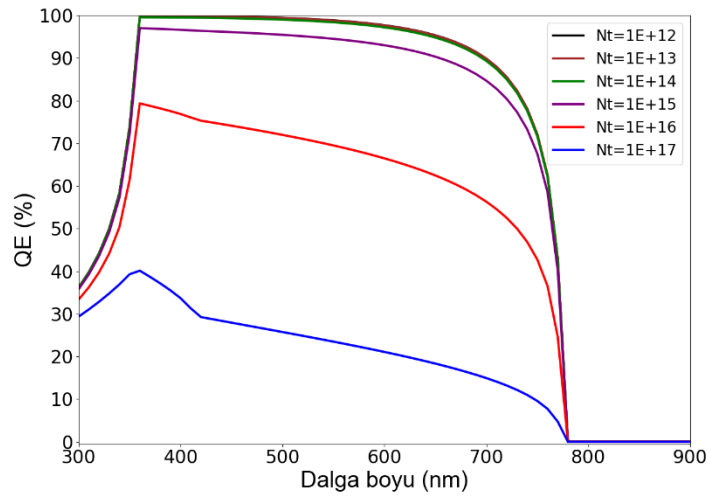
Şekil 39. $\text{Cs}_4\text{CuSb}_2\text{Cl}_{12}$ soğurucu katman kusur yoğunluğuna bağlı FF-Verim grafiği

Tablo 22’de bu simülasyon sonucunda elde edilen soğurucu katman kusur yoğunluğuna bağlı güneş hücresi karakteristik değerleri verilmiştir.

Tablo 22. $\text{Cs}_4\text{CuSb}_2\text{Cl}_{12}$ soğurucu katman kusur yoğunluğuna bağlı güneş hücresi karakteristik değerleri

$N_t \text{ (cm}^{-3}\text{)}$	$J_{SC} \text{ (mA/cm}^2\text{)}$	$V_{OC} \text{ (V)}$	FF (%)	Verim (%)	$J_{MPP} \text{ (mA/cm}^2\text{)}$	$V_{MPP} \text{ (V)}$
1×10^{12}	23.43	1.07	84.60	21.14	22.49	0.94
1×10^{13}	23.42	1.06	84.17	20.98	22.32	0.94
1×10^{14}	23.32	1.05	80.43	19.75	21.47	0.92
1×10^{15}	22.37	1.03	65.36	15.00	18.30	0.82
1×10^{16}	16.13	0.98	44.31	7.02	10.33	0.68
1×10^{17}	5.09	0.82	33.87	1.41	2.82	0.50

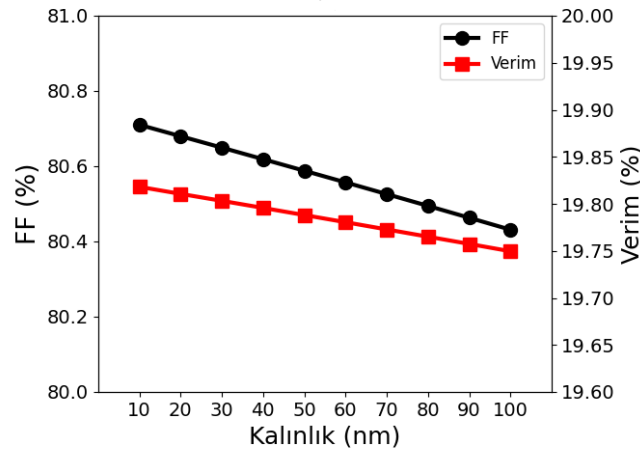
Şekil 40’da QE-Dalga boyu grafiği verilmiştir. Soğurucu katman kusur yoğunluğu değerinin $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ değerinden daha yüksek değerlere artırılmasıyla kuantum verimliliğinde düşüş meydana gelmiştir ve bu sonuç kısa devre akım yoğunluğunun azaldığını göstermektedir. Soğurucu katmanın kusur yoğunluğu, teorik ve pratik uygulamalar göz önünde bulundurarak $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ olarak seçilmiştir.



Şekil 40. $\text{Cs}_4\text{CuSb}_2\text{Cl}_{12}$ soğurucu katman kusur yoğunluğuna bağlı QE-Dalga boyu grafiği

3.2.3. Spiro-OMeTAD Kalınlık Optimizasyonu

Spiro-OMeTAD, perovskit güneş hücreleri araştırmalarında iyi bilinen ve yaygın olarak kullanılan bir boşluk taşıyıcı katman olduğu için bu simülasyonda referans olarak kullanılmıştır. Boşluk taşıyıcı katman (Spiro-OMeTAD) kalınlık değeri 10 nm değerinden 100 nm değerine kadar kalınlık her adımda 10 nm artırılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyon sonucunda kısa devre akım yoğunluğu ve açık devre gerilimi değerleri sırasıyla 23.32 mA/cm^2 ve 1.05 V değerlerinde sabit kalmıştır. Doldurma faktörü ve verim değerleri ise kalınlığın artmasıyla azalmıştır. Doldurma faktörü %80.71 değerinden %80.43 değerine, verim ise %19.81 değerinden 19.75 değerine düşmüştür.



Şekil 41. Spiro-OMeTAD boşluk taşıyıcı katman kalınlığına bağlı FF-Verim grafiği

Tablo 23'te bu simülasyon sonucunda elde edilen boşluk taşıyıcı katman (Spiro-OMeTAD) kalınlığına bağlı güneş hücresi karakteristik değerleri verilmiştir. Spiro-OMeTAD yüzeyindeki pratik güneş hücresi uygulama zorlukları göz önüne bulundurularak kalınlık değeri 100 nm olarak ayarlanmıştır.

Tablo 23. Spiro-OMeTAD boşluk taşıyıcı katman kalınlığına bağlı güneş hücresi karakteristik değerleri

Kalınlık (nm)	J _{SC} (mA/cm ²)	V _{OC} (V)	FF (%)	Verim (%)	J _{MPP} (mA/cm ²)	V _{MPP} (V)
10	23.32	1.05	80.71	19.81	21.54	0.92
20	23.32	1.05	80.68	19.81	21.53	0.92
30	23.32	1.05	80.65	19.80	21.53	0.92
40	23.32	1.05	80.62	19.80	21.52	0.92
50	23.32	1.05	80.59	19.79	21.51	0.92
60	23.32	1.05	80.56	19.78	21.50	0.92
70	23.32	1.05	80.53	19.77	21.50	0.92
80	23.32	1.05	80.49	19.77	21.48	0.92
90	23.32	1.05	80.46	19.76	21.48	0.92
100	23.32	1.05	80.43	19.75	21.47	0.92

3.2.4. Spiro-OMeTAD Kusur Yoğunluğu Optimizasyonu

Boşluk taşıyıcı katman (Spiro-OMeTAD) kusur yoğunluğu değeri $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ değerinden $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ değerine kadar kusur yoğunluğu her adımda 10 kat artırılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonlar sonucunda açık devre gerilimi 1.05 V değerinde, kısa devre akım yoğunluğu 23.32 mA/cm^2 değerinde, doldurma faktörü %80.43 değerinde, verim %19.75 değerinde, maksimum güç noktasındaki gerilim 0.92 V değerinde ve maksimum güç noktasındaki akım yoğunluğu 21.47 mA/cm^2 değerlerinde sabit kalmıştır. Boşluk taşıyıcı katman (Spiro-OMeTAD) kusur yoğunluğu değeri $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ değerinden $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ değerine kadar kusur yoğunluğunun her adımda 10 kat artırılmasıyla gerçekleştirilen simülasyonlarda güneş hücresinin karakteristik ve optik değerlerinde herhangi bir değişim gözlemlenmemiştir.

3.2.5. NiO Kalınlık Optimizasyonu

NiO ince filmler sıçratma tekniği ile oluşturulabilir ve Spiro-OMeTAD ile karşılaştırıldığında kompakt yapı ve daha iyi kararlılık ile pratik uygulamalarda daha ince filmler oluşturulabilir. Bu bölümde boşluk taşıyıcı katman olarak NiO kullanılmıştır. Boşluk taşıyıcı katman (NiO) kalınlık değeri 10 nm değerinden 100 nm değerine kadar kalınlık her adımda 10 nm artırılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonlar sonucunda

açık devre gerilimi 1.05 V değerinde, kısa devre akım yoğunluğu 23.32 mA/cm² değerinde, doldurma faktörü %80.78 değerinde, verim %19.84 değerinde, maksimum güç noktasındaki gerilim 0.92 V değerinde ve maksimum güç noktasındaki akım yoğunluğu 21.56 mA/cm² değerlerinde sabit kalmıştır. Boşluk taşıyıcı katman (NiO) kalınlık değeri 10 nm değerinden 100 nm değerine kadar kalınlığın her adımda 10 nm artırılmasıyla gerçekleştirilen simülasyonlarda güneş hücresinin karakteristik ve optik değerlerinde herhangi bir değişim gözlemlenmemiştir. Spiro- OMeTAD yerine NiO kullanılmasıyla verim %19.75 değerinden %19.84 değerine yükselmiştir. Güneş hücrelerinde benzer sonuçlar elde edilse de, NiO'nun daha iyi uyumluluk sağlaması ve ince filmlerle dahi üstün kararlılık sunması, onu önemli bir alternatif haline getirmektedir.

3.2.6. NiO Kusur Yoğunluğu (Defect Density) Optimizasyonu

Boşluk taşıyıcı katman (NiO) kusur yoğunluğu değeri 1 x 10¹² cm⁻³ değerinden 1 x 10¹⁷ cm⁻³ değerine kadar kusur yoğunluğu her adımda 10 kat artırılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonlar sonucunda açık devre gerilimi 1.05 V değerinde, kısa devre akım yoğunluğu 23.32 mA/cm² değerinde, doldurma faktörü %80.78 değerinde, verim %19.84 değerinde, maksimum güç noktasındaki gerilim 0.92 V değerinde ve maksimum güç noktasındaki akım yoğunluğu 21.56 mA/cm² değerlerinde sabit kalmıştır. Boşluk taşıyıcı katman (NiO) kusur yoğunluğu değeri 1 x 10¹² cm⁻³ değerinden 1 x 10¹⁷ cm⁻³ değerine kadar kusur yoğunluğunun her adımda 10 kat artırılmasıyla gerçekleştirilen simülasyonlarda güneş hücresinin karakteristik ve optik değerlerinde herhangi bir değişim gözlemlenmemiştir.

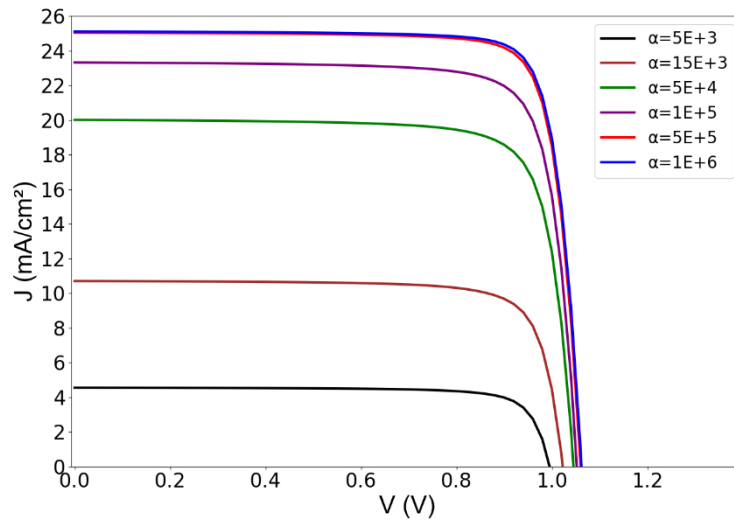
3.2.7. NiO Mobilite Optimizasyonu

Boşluk taşıyıcı katman (NiO) elektron mobilite değeri ilk beş simülasyonda 8 cm²V⁻¹s⁻¹ değerinde sabit tutularak boşluk mobilite değeri sırasıyla 10.37 cm²V⁻¹s⁻¹, 81.10 cm²V⁻¹s⁻¹, 43.47 cm²V⁻¹s⁻¹, 1.65 cm²V⁻¹s⁻¹ ve 14.96 cm²V⁻¹s⁻¹ olarak ayarlanmıştır (Abdur vd., 2024). Altıncı simülasyon için elektron ve boşluk mobilite değerleri sırasıyla 12 cm²V⁻¹s⁻¹ ve 25 cm²V⁻¹s⁻¹ olarak ayarlanmıştır (Rahman vs., 2019). Yedinci simülasyon için elektron ve boşluk mobilite değerleri sırasıyla 130 cm²V⁻¹s⁻¹ ve 56.7 cm²V⁻¹s⁻¹ olarak ayarlanmıştır (Hussain, 2024). Son simülasyonda ise elektron ve boşluk mobilite değerleri sırasıyla 12 cm²V⁻¹s⁻¹ ve 2.8 cm²V⁻¹s⁻¹ olarak ayarlanmıştır (Abdelkadir vd., 2022). Bu simülasyonlar sonucunda açık devre gerilimi 1.05 V değerinde, kısa devre akım yoğunluğu 23.32 mA/cm²

değerinde, doldurma faktörü %80.78 değerinde, verim %19.84 değerinde, maksimum güç noktasındaki gerilim 0.92 V değerinde ve maksimum güç noktasındaki akım yoğunluğu 21.56 mA/cm^2 değerlerinde sabit kalmıştır. Boşluk taşıyıcı katman (NiO) elektron ve boşluk mobilite değerlerinin değiştirilmesiyle gerçekleştirilen simülasyonlarda güneş hücresinin karakteristik ve optik değerlerinde herhangi bir değişim gözlemlenmemiştir. Bu hareketlilik aralığının güneş hücresi yapısındaki taşıyıcı taşıma karakteristiği üzerindeki etkisizliğinden kaynaklanabilir.

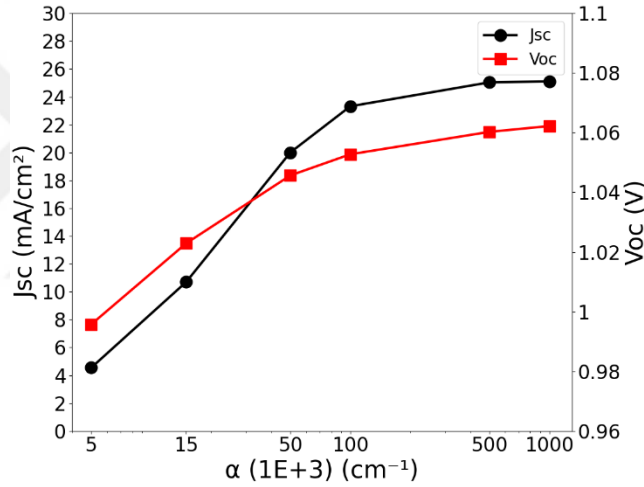
3.2.8. $\text{Cs}_4\text{CuSb}_2\text{Cl}_{12}$ Soğurma Katsayısı (Absorption Coefficient) Optimizasyonu

Soğurucu katmanın soğurma katsayısı, güneş hücresi performansını büyük ölçüde etkileyebilecek bir diğer parametredir. Bu katsayı, belirli bir dalga boyunda ışığın malzemeye ne kadar derinlikte nüfuz edebileceğini ve tamamen emilmeden önce ne kadar mesafe kat edebileceğini belirler. Soğurucu katman soğurma katsayısı değerleri $5 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}$, $1.5 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$, $5 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$, $1 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$, $5 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ ve $1 \times 10^6 \text{ cm}^{-1}$ olacak şekilde simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyon sonuçları akım yoğunluğu-verim, kısa devre akım yoğunluğu-açık devre gerilimi, doldurma faktörü-verim ve kuantum verimliliği-dalga boyu grafikleriyle gösterilmiştir.



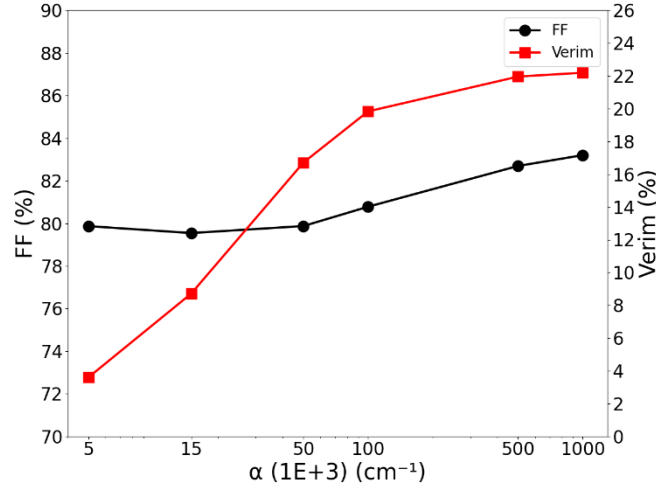
Şekil 42. $\text{Cs}_4\text{CuSb}_2\text{Cl}_{12}$ soğurucu katman soğurma katsayısına bağlı J-V grafiği

Şekil 43’de J_{SC} - V_{OC} grafiği verilmiştir. Soğurma katsayısının değerinin artırılmasıyla birlikte kısa devre akım yoğunluğu ve açık devre gerilimi değerleri de artış göstermektedir. Soğurma katsayısı $5 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}$ değerinde iken 4.55 mA/cm^2 olan kısa devre akım yoğunluğu, soğurma katsayısı $5 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ değerine artırıldığında 20.01 mA/cm^2 değerine yükselmiştir. Soğurma katsayısı $1 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$, $5 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ ve $1 \times 10^6 \text{ cm}^{-1}$ değerleri için kısa devre akım yoğunluğu sırasıyla 23.32 mA/cm^2 , 25.04 mA/cm^2 ve 25.11 mA/cm^2 değerlerini vermektedir. Soğurma katsayısı $5 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}$ değerinde iken 1.0 V olan açık devre gerilimi, soğurma katsayısı $5 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ değerine artırıldığında 1.05 V değerine yükselmiştir. Soğurma katsayısı $1 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ değerinde 1.05 V olarak sabit kalmıştır, sonrasında bu değerin $5 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ ve $1 \times 10^6 \text{ cm}^{-1}$ olarak artırılmasıyla açık devre gerilimi 1.06 V değerine yükselmiştir.



Şekil 43. $\text{Cs}_4\text{CuSb}_2\text{Cl}_{12}$ soğurucu katman soğurma katsayısına bağlı J_{SC} - V_{OC} grafiği

Şekil 44’te FF-Verim grafiği verilmiştir. Soğurma katsayısı $5 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}$ değerinden $1.5 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ değerine artırıldığında %79.87 değerindeki doldurma faktörü %79.55 değerine düşmüştür. Soğurma katsayısı $1.5 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ değerinden $1 \times 10^6 \text{ cm}^{-1}$ değerine artırılarak devam eden simülasyonlarda doldurma faktörü %83.20 değerine ulaşarak artış göstermiştir. Soğurma katsayısı değerinin artırılmasıyla birlikte verim değeri de artış göstermektedir. Soğurma katsayısı $5 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}$ değerinde iken %3.62 olan verim, soğurma katsayısı $5 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ değerine artırıldığında %16.71 değerine yükselmiştir. Soğurma katsayısı $1 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$, $5 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ ve $1 \times 10^6 \text{ cm}^{-1}$ değerleri için verim sırasıyla %19.84, %21.96 ve %22.20 değerlerini alarak artışını sürdürmüştür.



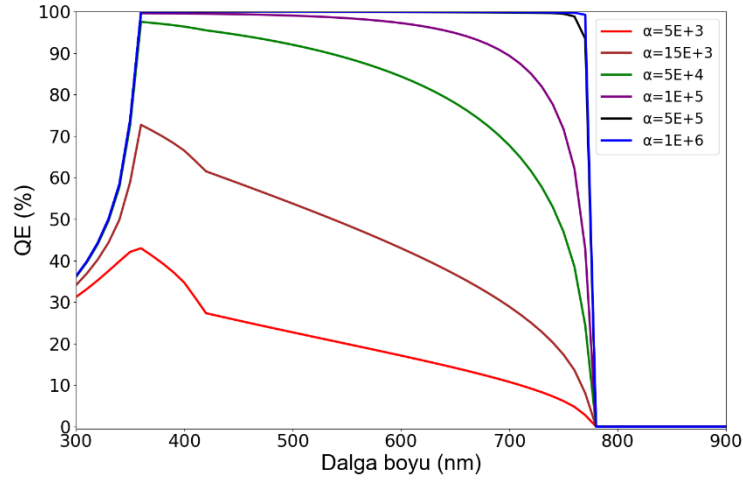
Şekil 44. Cs₄CuSb₂Cl₁₂ soğurucu katman soğurma katsayısına bağlı FF-Verim grafiği

Tablo 24'te bu simülasyon sonucunda elde edilen soğurucu katman soğurma katsayısına bağlı güneş hücresi karakteristik değerleri verilmiştir.

Tablo 24. Cs₄CuSb₂Cl₁₂ soğurucu katman soğurma katsayısına bağlı güneş hücresi karakteristik değerleri

Alpha (cm ⁻¹)	J _{SC} (mA/cm ²)	V _{OC} (V)	FF (%)	Verim (%)	J _{MPP} (mA/cm ²)	V _{MPP} (V)
5 x 10 ³	4.55	1.00	79.87	3.62	4.11	0.88
1.5 x 10 ⁴	10.71	1.02	79.55	8.71	9.68	0.90
5 x 10 ⁴	20.01	1.05	79.87	16.71	18.57	0.90
1 x 10 ⁵	23.32	1.05	80.78	19.84	21.56	0.92
5 x 10 ⁵	25.04	1.06	82.70	21.96	23.87	0.92
1 x 10 ⁶	25.11	1.06	83.20	22.20	23.61	0.94

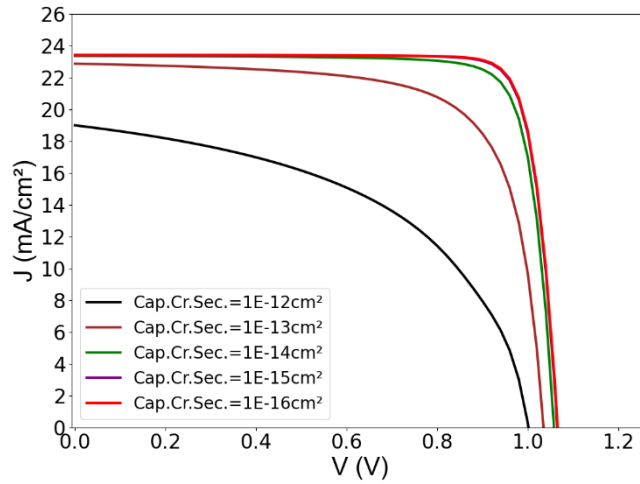
Şekil 45'te QE-Dalga boyu grafiği verilmiştir. Soğurucu katman soğurma katsayısının artırılmasıyla kuantum verimliliğinde de artış meydana gelmiştir. Soğurma katsayısı 5x10⁴ cm⁻¹ değerinden az olduğunda 550 nm dalga boyundaki kuantum verimliliği %90'ın altına düşmektedir. Bu durum akım üretimini önemli ölçüde etkiler. Yüksek soğurma katsayısı, malzemenin içindeki ışığın yüksek kullanımına yol açtığı için soğurma katsayısının artırılmasıyla güneş hücresindeki değerler de artış göstermiştir.



Şekil 45. $\text{Cs}_4\text{CuSb}_2\text{Cl}_{12}$ soğurucu katman soğurma katsayısına bağı QE-Dalgı boyu grafiğı

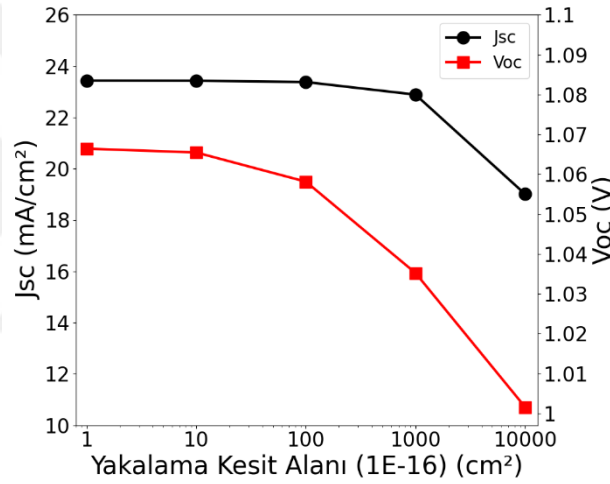
3.2.9. $\text{Cs}_4\text{CuSb}_2\text{Cl}_{12}$ Yakalama Kesit Alanı (Capture Cross Section) Optimizasyonu

Bu bölümde yakalama kesit alanının güneş hücresi performansına olan etkisi de araştırılmıştır. Yakalama kesit alanının yüksek olması yüksek rekombinasyona ve dolayısıyla taşıyıcı yaşam süresinin azalmasına neden olmaktadır. Soğurucu katman yakalama kesit alanı değeri $1 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ değerinden $1 \times 10^{-12} \text{ cm}^2$ değerine kadar yakalama kesit alanı değeri her adımda 10 kat artırılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyon sonuçları akım yoğunluğu-verim, kısa devre akım yoğunluğu-açık devre gerilimi, doldurma faktörü-verim ve kuantum verimliliğı-dalgı boyu grafikleriyle gösterilmiştir.



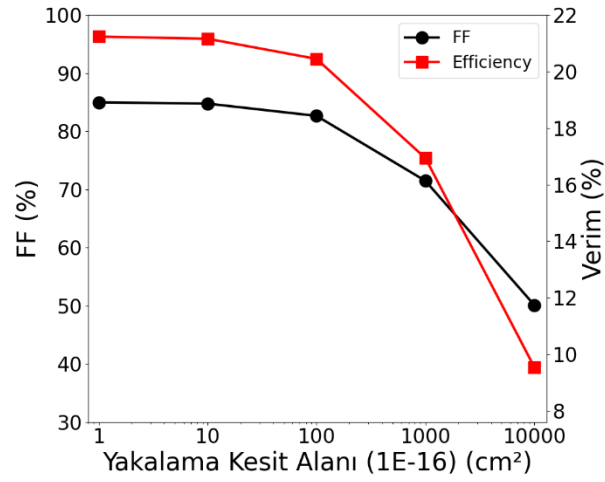
Şekil 46. $\text{Cs}_4\text{CuSb}_2\text{Cl}_{12}$ soğurucu katman yakalama kesit alanına bağı J-V grafiğı

Şekil 47’de J_{SC} - V_{OC} grafiği verilmiştir. Yakalama kesit alanının $1 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ değerinden $1 \times 10^{-12} \text{ cm}^2$ değerine kadar her adımda 10 kat artırılmasıyla kısa devre akım yoğunluğu değeri azalmaktadır. Yakalama kesit alanı $1 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ değerinde iken 23.44 mA/cm^2 olan kısa devre akım yoğunluğu, yakalama kesit alanı $1 \times 10^{-14} \text{ cm}^2$ değerine artırıldığında 23.38 mA/cm^2 değerine düşmektedir. Yakalama kesit alanı $1 \times 10^{-13} \text{ cm}^2$ ve $1 \times 10^{-12} \text{ cm}^2$ değerleri için kısa devre akım yoğunluğu sırasıyla 22.89 mA/cm^2 ve 19.00 mA/cm^2 değerlerini vermektedir. Yakalama kesit alanının $1 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ ve $1 \times 10^{-15} \text{ cm}^2$ değerlerinde 1.07 V değerine eşit olan açık devre gerilimi, yakalama kesit alanının $1 \times 10^{-14} \text{ cm}^2$, $1 \times 10^{-13} \text{ cm}^2$ ve $1 \times 10^{-12} \text{ cm}^2$ değerlerine artırılması sonucunda sırasıyla 1.06 V , 1.03 V ve 1.00 V değerlerine düşmüştür.



Şekil 47. $\text{Cs}_4\text{CuSb}_2\text{Cl}_{12}$ soğurucu katman yakalama kesit alanına bağlı J_{SC} - V_{OC} grafiği

Şekil 48’de FF-Verim grafiği verilmiştir. Yakalama kesit alanının $1 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ değerinden $1 \times 10^{-12} \text{ cm}^2$ değerine kadar her adımda 10 kat artırılmasıyla verim ve doldurma faktörü değerleri azalmaktadır. Yakalama kesit alanı $1 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ değerinde iken %84.98 olan doldurma faktörü, yakalama kesit alanı $1 \times 10^{-14} \text{ cm}^2$ değerine artırıldığında %82.65 değerine düşmektedir. Yakalama kesit alanı $1 \times 10^{-13} \text{ cm}^2$ ve $1 \times 10^{-12} \text{ cm}^2$ değerleri için doldurma faktörü sırasıyla %71.48 ve %50.12 değerlerini vermektedir. Yakalama kesit alanı $1 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ değerinde iken %21.24 olan verim, yakalama kesit alanı $1 \times 10^{-14} \text{ cm}^2$ değerine artırıldığında %20.45 değerine düşmektedir. Yakalama kesit alanı $1 \times 10^{-13} \text{ cm}^2$ ve $1 \times 10^{-12} \text{ cm}^2$ değerleri için verim sırasıyla %19.93 ve %9.54 değerlerini vermektedir.



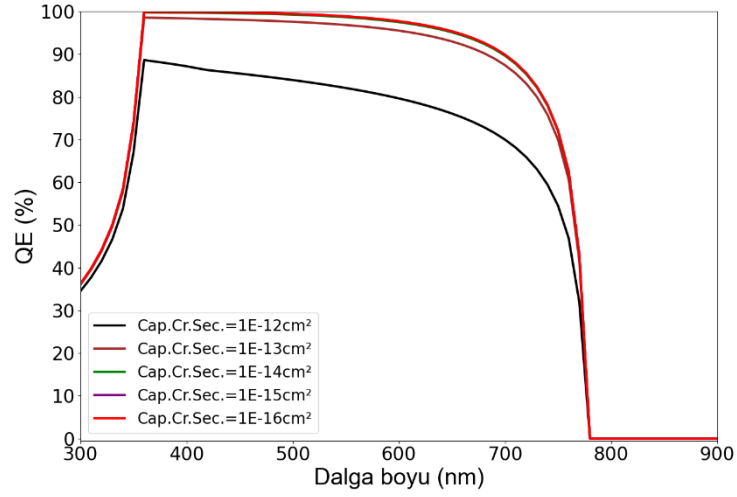
Şekil 48. $\text{Cs}_4\text{CuSb}_2\text{Cl}_{12}$ soğurucu katman yakalama kesit alanına bağlı FF-Verim grafiği

Tablo 25'te bu simülasyon sonucunda elde edilen soğurucu katman yakalama kesit alanına bağlı güneş hücresi karakteristik değerlerini vermektedir.

Tablo 25. $\text{Cs}_4\text{CuSb}_2\text{Cl}_{12}$ soğurucu katman yakalama kesit alanına bağlı güneş hücresi karakteristik değerleri

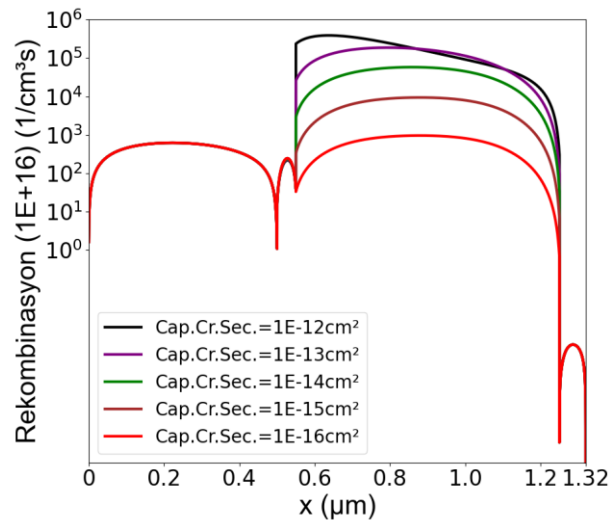
Yakalama Kesit Alanı (cm²)	J_{SC} (mA/cm²)	V_{OC} (V)	FF (%)	Verim (%)	J_{MPP} (mA/cm²)	V_{MPP} (V)
1×10^{-12}	19.00	1.00	50.12	9.54	12.25	0.72
1×10^{-13}	22.89	1.03	71.48	16.93	19.69	0.86
1×10^{-14}	23.38	1.06	82.65	20.45	22.23	0.92
1×10^{-15}	23.43	1.07	84.76	21.16	22.51	0.94
1×10^{-16}	23.44	1.07	84.98	21.24	22.59	0.94

Şekil 49'da QE-Dalga boyu grafiği verilmiştir. Yakalama kesit alanının $1 \times 10^{-12} \text{ cm}^2$ değerinde 550 nm dalga boyundaki kuantum verimliliği %80 değerlerine kadar düşmektedir. Bu durum akım üretimini önemli ölçüde etkiler.



Şekil 49. $\text{Cs}_4\text{CuSb}_2\text{Cl}_{12}$ soğurucu katman yakalama kesit alanına bağlı QE-Dalga boyu grafiği

Şekil 50’de elektronların yakalama kesit alanının rekombinasyon üzerindeki etkisi verilmiştir. Yakalama kesit alanının artırılması rekombinasyon değeri de artış gösterdi. Rekombinasyon değerindeki bu artış dolayısıyla taşıyıcı yaşam süresinin azalmasına neden olmaktadır.

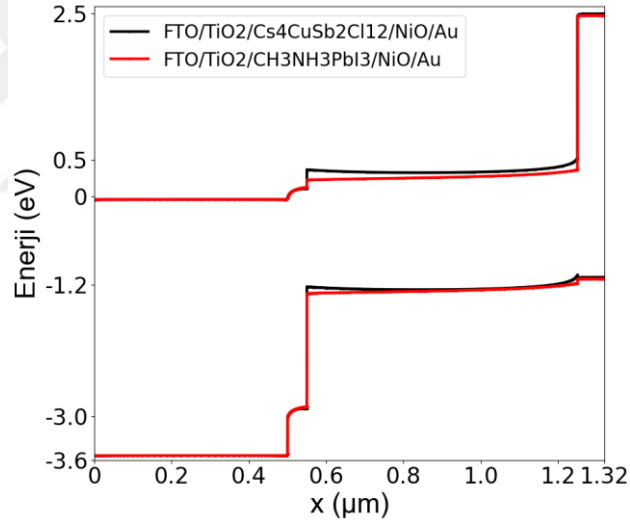


Şekil 50. $\text{Cs}_4\text{CuSb}_2\text{Cl}_{12}$ soğurucu katman yakalama kesit alanına bağlı QE-Dalga boyu grafiği

3.2.10. $\text{Cs}_4\text{CuSb}_2\text{Cl}_{12}$ - $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ Karşılaştırması

Bu bölümde soğurucu katman olarak $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ kullanılarak kalınlık, kusur yoğunluğu, soğurma katsayısı ve yakalama kesit alanı optimizasyon simülasyonları $\text{Cs}_4\text{CuSb}_2\text{Cl}_{12}$ soğurucu katmanı için gerçekleştirilen değerler sabit tutularak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu sonuçlar ele alınarak güneş hücresindeki karakteristik değerlerin karşılaştırması yapılmıştır.

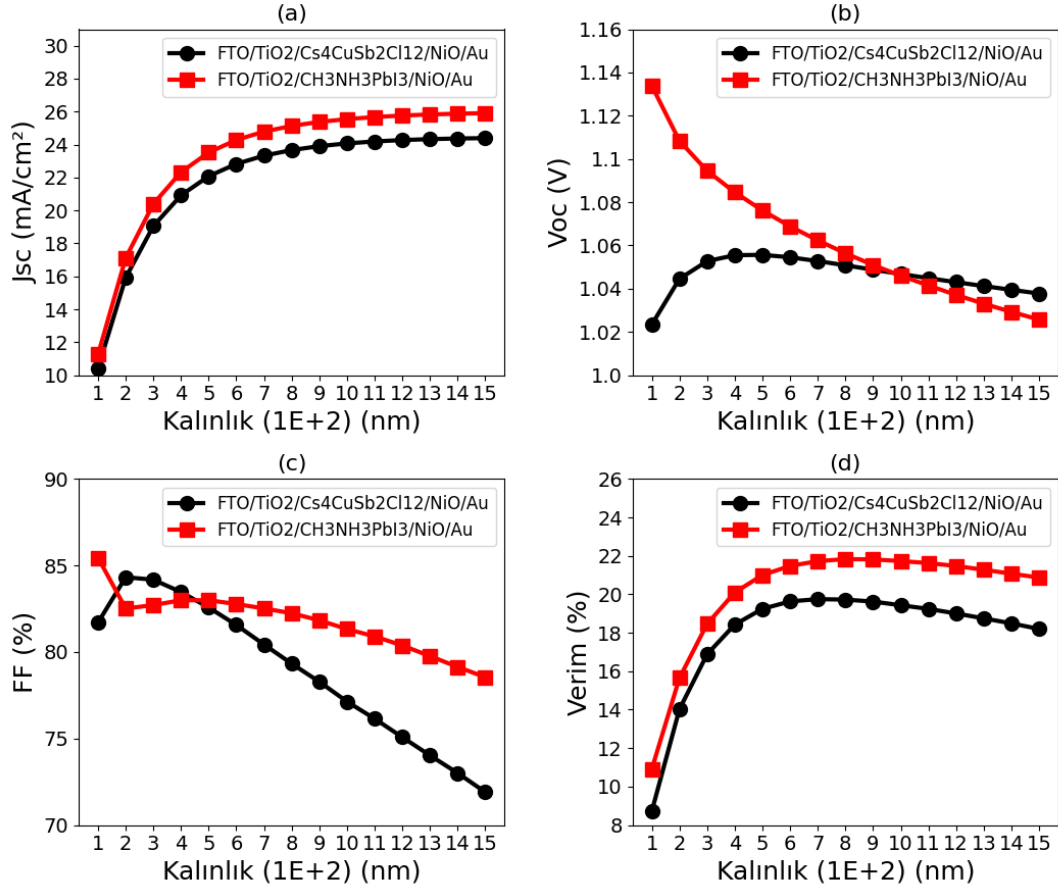
$\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$, $\text{Cs}_4\text{CuSb}_2\text{Cl}_{12}$ malzemesinden daha dar bir enerji bant aralığına sahiptir. Bu sebeple daha fazla fotonun soğrulmasıyla daha yüksek taşıyıcı yoğunluğunu ve daha yüksek akım yoğunluğu elde edilebilir ancak soğurucu katman ile boşluk taşıyıcı katman arasındaki sivri uçlar taşıyıcı taşıma verimliliğini etkileyebilir. $\text{Cs}_4\text{CuSb}_2\text{Cl}_{12}$ ve $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ soğurucu katmanlarıyla oluşturulan perovskit güneş hücrelerinin enerji bant aralığı karşılaştırması Şekil 51’de verilmiştir.



Şekil 51. Soğurucu katmanların enerji bant diyagramı karşılaştırması

Kalınlık 100 nm değerinden 800 nm değerine artırıldığında kısa devre akım yoğunluğu 11.26 mA/cm^2 değerinden 25.13 mA/cm^2 değerine yükselmiştir, kalınlık 1500 nm değerine artırıldığında ise kısa devre akım yoğunluğu 25.91 mA/cm^2 değerine yükselmiştir. Açık devre gerilimi ise doğrusal bir şekilde düşüş göstererek 1.13 V değerinden 1.02 V değerine gelmiştir. Kalınlık 100 nm değerinden 200 nm değerine artırıldığında doldurma faktörü %85.45 değerinden %82.71 değerine düşmüştür. Sonrasında 200 nm değerinden 1500 nm değerine kadar %82.71 değerinden %78.54 değerine gerilemiştir. Kalınlık 800 nm değerine

artırıldığında verim değeri tepe noktası olan %21.83 değerine ulaşmıştır sonrasında 1500 nm değerine kadar artırılarak simülasyon devam ettirildiğinde verim değeri %20.87 değerine düşmüştür.



Şekil 52. $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ soğurucu kalınlık değerlerine bağlı (a) J_{sc} , (b) V_{oc} , (c) FF ve (d) verim grafikleri

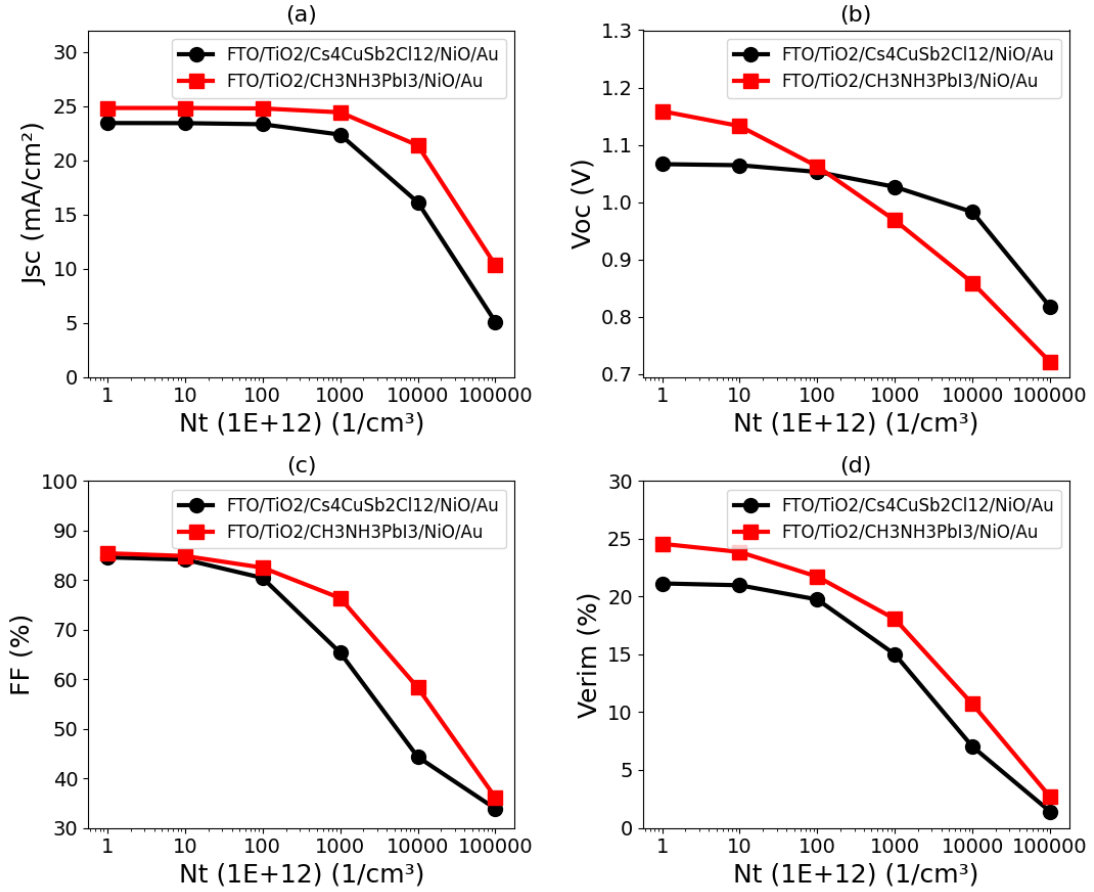
Tablo 26'da $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ soğurucu katman kalınlık değerlerine bağlı güneş hücresi karakteristik değerleri verilmiştir. Bu sonuçlara göre, en iyi verimlilikler Cs₄CuSb₂Cl₁₂ için 700 nm ve $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ için 800 nm kalınlıklarında elde edilmiştir.

Tablo 26. $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ soğurucu katman kalınlık değerlerine bağlı güneş hücresi karakteristik değerleri

Kalınlık (nm)	J_{SC} (mA/cm ²)	V_{OC} (V)	FF (%)	Verim (%)
100	11.26	1.13	85.45	10.91
200	17.11	1.11	82.71	15.65
300	20.39	1.09	82.51	18.46
400	22.33	1.08	82.99	20.09
500	23.52	1.08	82.99	21.00
600	24.28	1.07	82.77	21.48
700	24.78	1.06	82.52	21.73
800	25.13	1.06	82.24	21.83
900	25.37	1.05	81.83	21.82
1000	25.54	1.05	81.33	21.73
1100	25.67	1.04	80.90	21.63
1200	25.76	1.04	80.38	21.47
1300	25.82	1.03	79.76	21.28
1400	25.87	1.03	79.14	21.04
1500	25.91	1.02	78.54	20.87

Kusur yoğunluğunun $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ değerinden $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ değerine kadar her adımda 10 kat artırılmasıyla kısa devre akım yoğunluğu, açık devre gerilimi, verim ve doldurma faktörü değerleri azalmaktadır. Kusur yoğunluğu $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ değerinde iken 24.82 mA/cm^2 olan kısa devre akım yoğunluğu, kusur yoğunluğu $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ değerine artırıldığında 24.42 mA/cm^2 değerine düşmektedir. Kusur yoğunluğunun $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ve $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ değerleri için kısa devre akım yoğunluğu sırasıyla 21.37 mA/cm^2 ve 10.33 mA/cm^2 değerlerini vermektedir. Kusur yoğunluğu $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ değerinde iken 1.16 V olan açık devre gerilimi, kusur yoğunluğu $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ değerine artırıldığında 1.06 V değerine düşmektedir. Kusur yoğunluğunun 1×10^{15} , $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ve $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ değerleri için açık devre gerilimi sırasıyla 0.97 V , 0.86 V ve 0.72 V değerlerini vermektedir. Kusur yoğunluğu $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ değerinde iken %85.41 olan doldurma faktörü, kusur yoğunluğu $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ değerine artırıldığında %76.37 değerine düşmektedir. Kusur yoğunluğunun $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ve $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ değerleri için doldurma faktörü sırasıyla %58.30 ve %36.13 değerlerini vermektedir. Kusur yoğunluğu $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ değerinde iken %24.57 olan verim, kusur yoğunluğu 1×10^{15}

cm^{-3} değerine artırıldığında %18.06 değerine düşmektedir. Kusur yoğunluğunun 1×10^{16} cm^{-3} ve 1×10^{17} cm^{-3} değerleri için verim sırasıyla %10.71 ve %2.69 değerlerini vermektedir.



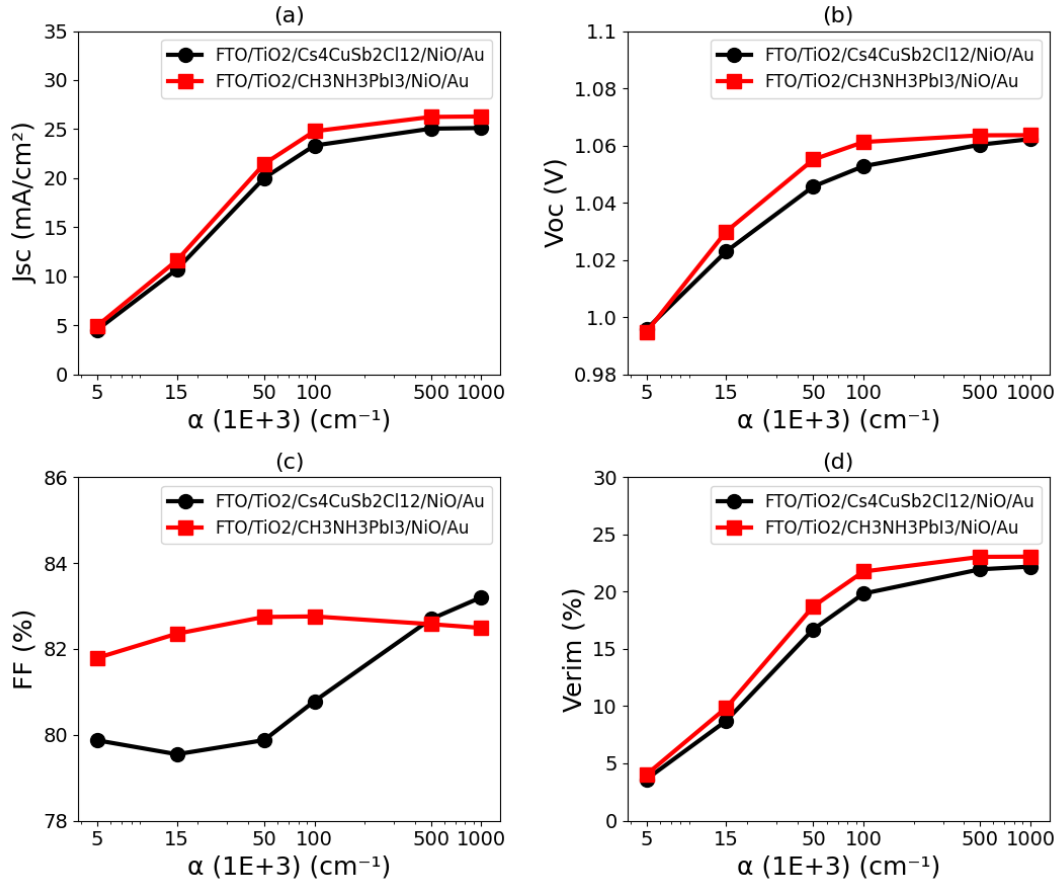
Şekil 53. CH₃NH₃PbI₃ soğurucu katman kusur yoğunluğu değerlerine bağlı (a) J_{sc} , (b) V_{oc} , (c) FF ve (d) verim grafikleri

Tablo 27’de CH₃NH₃PbI₃ soğurucu katman kusur yoğunluğu değerlerine bağlı güneş hücresi karakteristik değerleri verilmiştir. Her iki soğurucu katmandaki kusur yoğunluklarının artırılmasıyla tüm parametreler azalmaktadır. Soğurucunun türünden bağımsız olarak güneş hücrelerinin performansındaki düşüş, kusur yoğunluğu 1×10^{14} cm^{-3} değerinden daha yüksek olduğunda daha belirgindir.

Tablo 27. $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ soğurucu katman kusur yoğunluğu değerlerine bağlı güneş hücresi karakteristik değerleri

$N_t (\text{cm}^{-3})$	$J_{SC} (\text{mA/cm}^2)$	$V_{OC} (\text{V})$	FF (%)	Verim (%)
1×10^{12}	24.82	1.16	85.41	24.57
1×10^{13}	24.82	1.13	84.86	23.86
1×10^{14}	24.78	1.06	82.52	21.73
1×10^{15}	24.42	0.97	76.37	18.06
1×10^{16}	21.37	0.86	58.30	10.71
1×10^{17}	10.33	0.72	36.13	2.69

Soğurma katsayısı $5 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}$ değerinde iken 4.96 mA/cm^2 olan kısa deve akım yoğunluğu, soğurma katsayısı $5 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ değerine artırıldığında 21.45 mA/cm^2 değerine yükselmiştir. Soğurma katsayısı $1 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$, $5 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ ve $1 \times 10^6 \text{ cm}^{-1}$ değerleri için kısa deve akım yoğunluğu sırasıyla 24.78 mA/cm^2 , 26.24 mA/cm^2 ve 26.29 mA/cm^2 değerlerini vermektedir. Soğurma katsayısı $5 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}$ değerinde iken 0.99 V olan açık devre gerilimi, soğurma katsayısı $5 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ değerine artırıldığında 1.06 V değerine yükselmiştir ve sonrasında da sabit kalmıştır. Soğurma katsayısı değerinin artırılmasıyla doldurma faktörü değeri %81.79 değerinden %82.49 değerine yükselmiştir. En yüksek doldurma faktörü değeri $1 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ soğurma katsayısı değerinde %82.76 olarak elde edilmiştir. Soğurma katsayısı değerinin artırılmasıyla birlikte verim değeri de artış göstermektedir. Soğurma katsayısı $5 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}$ değerinde iken %4.02 olan verim, soğurma katsayısı $5 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ değerine artırıldığında %18.72 değerine yükselmiştir. Soğurma katsayısı $1 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$, $5 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ ve $1 \times 10^6 \text{ cm}^{-1}$ değerleri için verim sırasıyla %21.77, %23.05 ve %23.06 değerlerini alarak artışını sürdürmüştür.



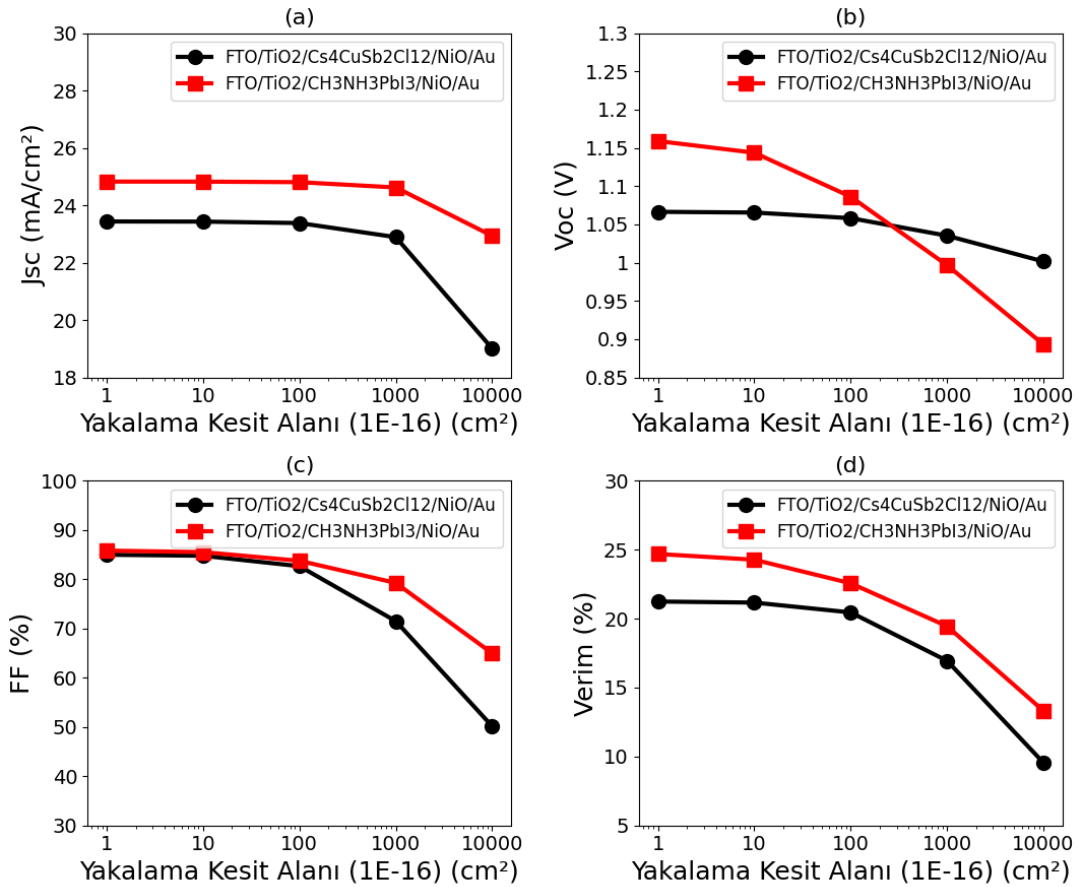
Şekil 54. CH₃NH₃PbI₃ soğurucu katman soğurma katsayısına bağlı (a) J_{sc} , (b) V_{oc} , (c) FF ve (d) verim grafikleri

Tablo 28’de CH₃NH₃PbI₃ soğurucu katman soğurma katsayısı değerlerine bağlı güneş hücresi karakteristik değerleri verilmiştir. Taşıyıcıların üretim hızı, soğurma katsayısının artmasıyla artar. Soğurma katsayısı arttıkça güneş hücresi performansı artar. Tüm güneş hücresi parametreleri, soğurma katsayısının artmasıyla hemen hemen aynı davranışı gösterir.

Tablo 28. CH₃NH₃PbI₃ soğurucu katman soğurma katsayısına bağlı güneş hücresi karakteristik değerleri

Alpha (cm ⁻¹)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	FF (%)	Verim (%)
5×10^3	4.96	0.99	81.79	4.02
1.5×10^4	11.61	1.03	82.36	9.85
5×10^4	21.45	1.06	82.75	18.72
1×10^5	24.78	1.06	82.76	21.77
5×10^5	26.24	1.06	82.58	23.05
1×10^6	26.29	1.06	82.49	23.06

Yakalama kesit alanı $1 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ değerinde iken 24.82 mA/cm^2 olan kısa devre akım yoğunluğu, yakalama kesit alanı $1 \times 10^{-14} \text{ cm}^2$ değerine artırıldığında 24.80 mA/cm^2 değerine düşmektedir. Yakalama kesit alanı $1 \times 10^{-13} \text{ cm}^2$ ve $1 \times 10^{-12} \text{ cm}^2$ değerleri için kısa devre akım yoğunluğu sırasıyla 24.62 mA/cm^2 ve 22.93 mA/cm^2 değerlerini vermektedir. Yakalama kesit alanının artmasıyla açık devre gerilimi 1.16 V değerinden 0.89 V değerine kadar düşüş göstermiştir. Yakalama kesit alanı $1 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ değerinde iken %85.82 olan doldurma faktörü, yakalama kesit alanı $1 \times 10^{-14} \text{ cm}^2$ değerine artırıldığında %83.75 değerine düşmektedir. Yakalama kesit alanı $1 \times 10^{-13} \text{ cm}^2$ ve $1 \times 10^{-12} \text{ cm}^2$ değerleri için doldurma faktörü sırasıyla %79.25 ve %64.95 değerlerini vermektedir. Yakalama kesit alanı $1 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ değerinde iken %24.69 olan verim, yakalama kesit alanı $1 \times 10^{-14} \text{ cm}^2$ değerine artırıldığında %22.56 değerine düşmektedir. Yakalama kesit alanı $1 \times 10^{-13} \text{ cm}^2$ ve $1 \times 10^{-12} \text{ cm}^2$ değerleri için verim sırasıyla %19.45 ve %13.31 değerlerini vermektedir.



Şekil 55. CH₃NH₃PbI₃ soğurucu katman yakalama kesit alanı değerlerine bağlı (a) J_{sc} , (b) V_{oc} , (c) FF ve (d) verim grafikleri

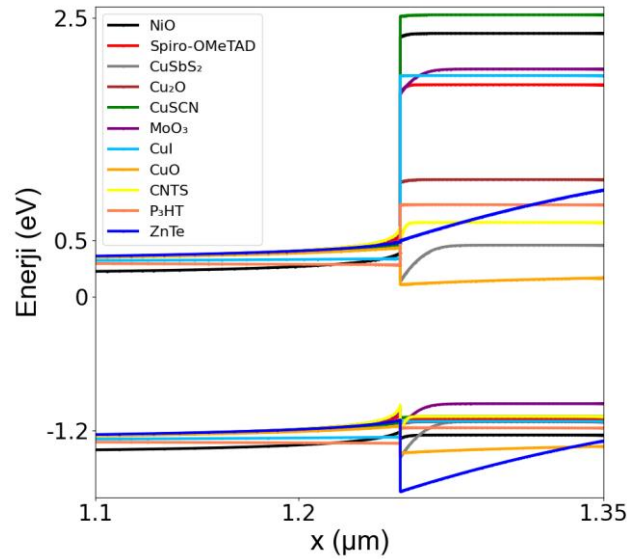
Tablo 29’da $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ soğurucu katman yakalama kesit alanı değerlerine bağlı güneş hücresi karakteristik değerleri verilmiştir.

Tablo 29. $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ soğurucu katman yakalama kesit alanı değerlerine bağlı güneş hücresi karakteristik değerleri

Yakalama Kesit Alanı (cm^2)	J_{SC} (mA/cm^2)	V_{OC} (V)	FF (%)	Verim (%)
1×10^{-12}	22.93	0.89	64.95	13.31
1×10^{-13}	24.62	1.00	79.25	19.45
1×10^{-14}	24.80	1.09	83.75	22.56
1×10^{-15}	24.82	1.14	85.51	24.27
1×10^{-16}	24.82	1.16	85.82	24.69

3.2.11. Boşluk Taşıyıcı Katman Karşılaştırması

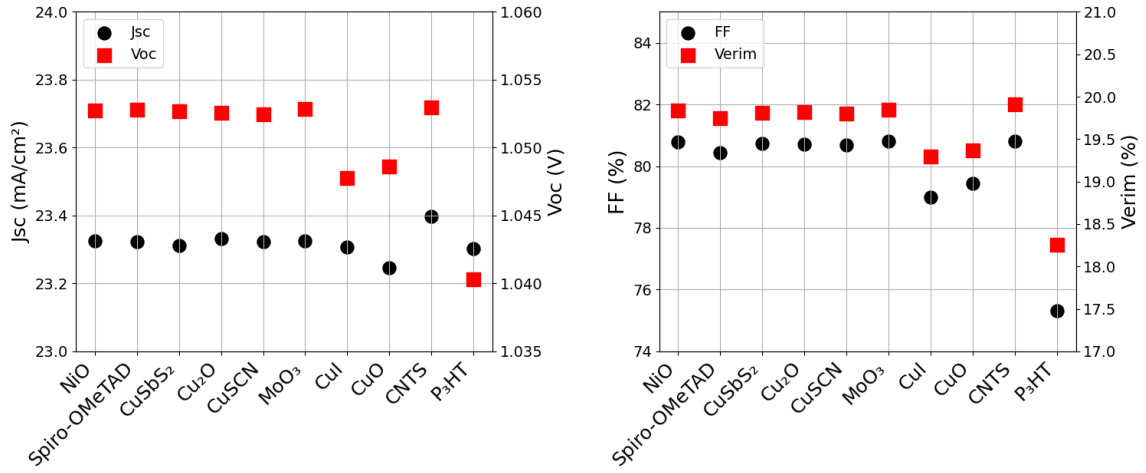
Bu bölümde $\text{FTO}/\text{TiO}_2/\text{Cs}_4\text{CuSb}_2\text{Cl}_{12}/\text{NiO}/\text{Au}$ hücre yapısında NiO yerine CuSbS_2 , Cu_2O , CuSCN , MoO_3 , CuI , CuO , CNTS , ZnTe ve P_3HT kullanılarak güneş hücresinin karakteristik özellikleri incelenmiştir. Şekil 56’da farklı boşluk taşıyıcı katmanlar kullanılarak oluşturulan güneş hücrelerinin enerji bant diyagramı verilmiştir.



Şekil 56. Farklı boşluk taşıyıcı katmanlar kullanılarak oluşturulan güneş hücrelerinin enerji bant diyagramı

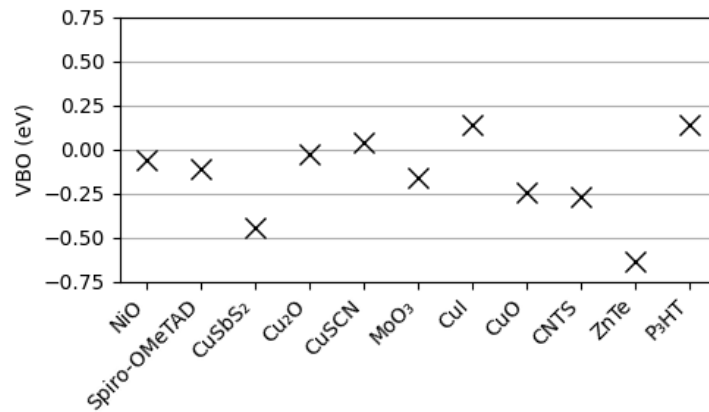
Verim değerleri CuSbS_2 için %19.81, Cu_2O için %19.82, CuSCN için %19.80, MoO_3 için %19.85, CuI için %19.29, CuO için %19.36, CNTS için %19.91, ZnTe için %0.02 ve

P₃HT için %18.26 olarak elde edilmiştir. NiO kullanılan güneş hücresi ile kıyaslandığında MoO₃ ve CNTS kullanılarak oluşturulan güneş hücrelerinde daha yüksek verim değerleri elde edilmiştir. Şekil 57’de J_{SC}-V_{OC} ve FF-verim grafikleri verilmiştir.



Şekil 57. Farklı boşluk taşıyıcı katmanlar kullanılarak oluşturulan güneş hücrelerinin J_{SC}-V_{OC} ve FF-Verim grafikleri

Boşluk taşıyıcı katman olarak ZnTe kullanılan güneş hücresinin verim değerinin %0.02 değerine düşmesi Şekil 58 ile açıklanabilir. Valans bant kenar farkı değerinin düşük olması durumunda boşluk hareketini sınırlandıran ve akım akışını engelleyen bir enerji bariyeri oluşabilir. Bu bariyer, boşlukların hareketini oldukça kısıtlayarak diğer katmana geçmesini engeller. Bu durum kısa devre akımını ve doldurma faktörünü dolayısıyla verim değerini oldukça azaltır.



Şekil 58. Farklı boşluk taşıyıcı katmanlar kullanılarak oluşturulan güneş hücrelerinin valans bant kenar farkı grafiği

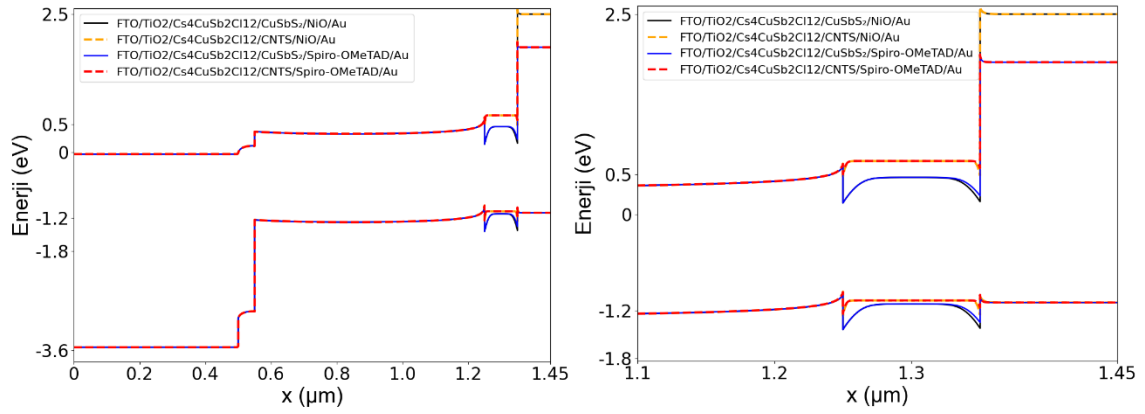
Tablo 30’da boşluk taşıyıcı katman olarak NiO, Spiro-OMeTAD, CuSbS₂, Cu₂O, CuSCN, MoO₃, CuI, CuO, CNTS, ZnTe ve P₃HT malzemelerinin kullanıldığı güneş hücresinin karakteristik değerleri verilmiştir.

Tablo 30. Farklı boşluk taşıyıcı katmanlar kullanılarak oluşturulan güneş hücrelerinin karakteristik değerleri

HTL	J _{SC} (mA/cm ²)	V _{OC} (V)	FF (%)	Verim (%)
NiO	23.32	1.05	80.78	19.84
Spiro-OMeTAD	23.32	1.05	80.43	19.75
CuSbS ₂	23.31	1.05	80.73	19.81
Cu ₂ O	23.33	1.05	80.71	19.82
CuSCN	23.32	1.05	80.67	19.80
MoO ₃	23.32	1.05	80.82	19.85
CuI	23.31	1.05	78.99	19.29
CuO	23.25	1.05	79.44	19.36
CNTS	23.40	1.05	80.80	19.91
ZnTe	0.05	1.08	30.49	0.02
P ₃ HT	23.30	1.04	75.31	18.26

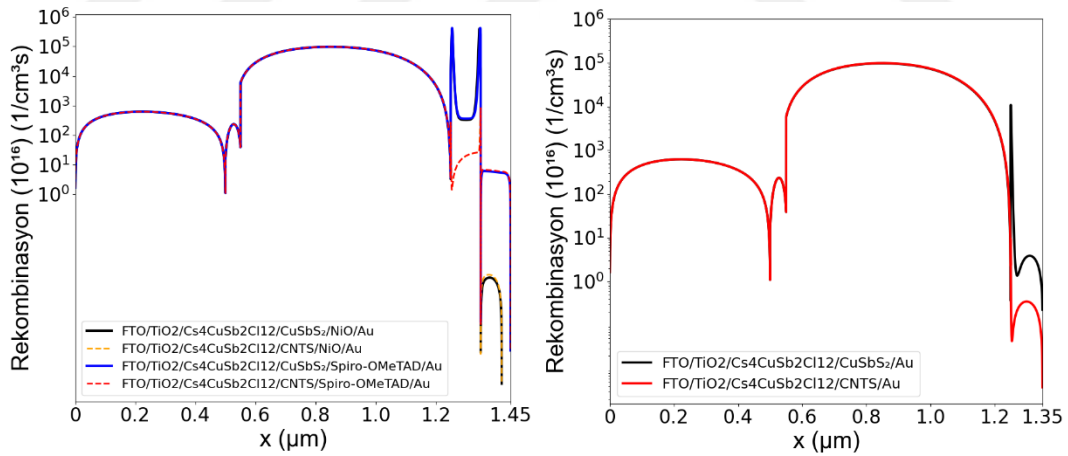
3.2.12. Çift Boşluk Taşıyıcı Katmanlı Güneş Hücresi Tasarımı

Bu bölümde tek boşluk taşıyıcı katmanların özellikleri incelendikten sonra valans bant kenar farkları göz önünde bulundurularak CuSbS₂/NiO, CNTS/NiO ve CuSbS₂/Spiro-OMeTAD, CNTS/Spiro-OMeTAD malzemeleri çift boşluk taşıyıcı katman olarak kullanılmıştır. Oluşturulan FTO/TiO₂/Cs₄CuSb₂Cl₁₂/HTL1/HTL2/Au hücre yapılarının güneş hücresi karakteristik özellikleri incelenmiştir. Şekil 59’da çift boşluk taşıyıcı katmanlar kullanılarak oluşturulan güneş hücrelerinin enerji bant diyagramı verilmiştir. Çift boşluk taşıyıcı katman yapısı, soğurucu katman ile NiO katmanı arasındaki arayüzde ek bir ara tabaka oluşturarak boşluk taşınımını iyileştirir ve akım yoğunluğunu artırır.



Şekil 59. Çift boşluk taşıyıcı katmanlar kullanılarak oluşturulan güneş hücrelerinin enerji bant diyagramı

Şekil 60'da çift ve tek boşluk taşıyıcı katmanlar kullanılan güneş hücrelerinin rekombinasyon dağılımı verilmiştir. Arayüzlerdeki rekombinasyon farkları nihai verimliliğin tek sebebi olmasa da $\text{CuSbS}_2/\text{NiO}$ arayüzü ve bu katmandaki rekombinasyonun CNTS/NiO arayüzü ve katmanındaki rekombinasyondan daha fazla olduğu görülmektedir, bu durum verimin düşük olmasına neden olmaktadır.



Şekil 60. Çift ve tek boşluk taşıyıcı katmanlar kullanılarak oluşturulan güneş hücrelerinin rekombinasyon dağılımı

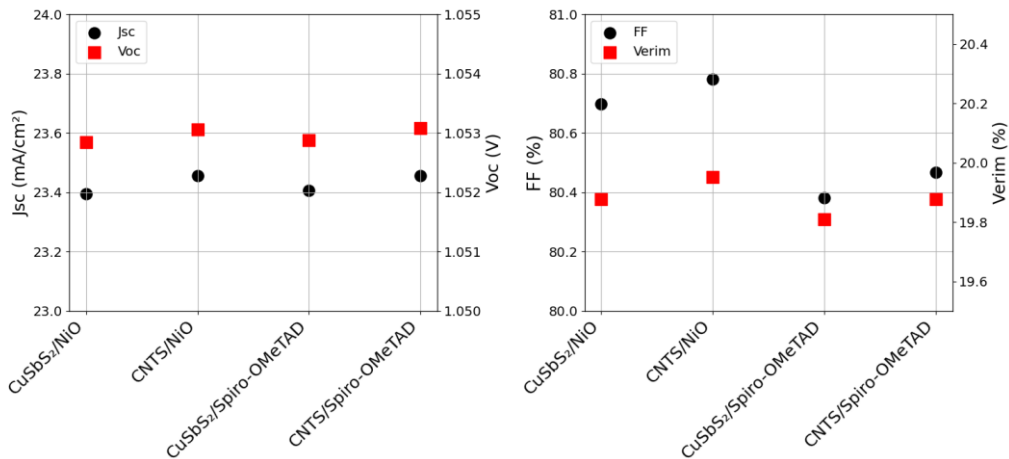
Tablo 31'de tek ve çift boşluk taşıyıcı katmanlar kullanılarak oluşturulan güneş hücrelerinin karakteristik değerleri verilmiştir. NiO ve Spiro-OMeTAD tek boşluk taşıyıcı katman olarak kullanıldığında kısa devre akım yoğunlukları iki malzeme için de 23.32 mA/cm^2 değerinde ve verim sırasıyla %19.84 ve %19.75 değerlerindedir. $\text{CuSbS}_2/\text{NiO}$ çift boşluk taşıyıcı katmanlı hücre yapısında kısa devre akım yoğunluğu 23.40 mA/cm^2 ve verim

%19.88 olarak, CNTS/NiO çift boşluk taşıyıcı katmanlı hücre yapısında kısa devre akım yoğunluğu 23.46 mA/cm^2 ve verim %19.95 olarak elde edilmiştir. $\text{CuSbS}_2/\text{Spiro-OMeTAD}$ çift boşluk taşıyıcı katmanlı hücre yapısında kısa devre akım yoğunluğu 23.41 mA/cm^2 ve verim %19.81 olarak, CNTS/Spiro-OMeTAD çift boşluk taşıyıcı katmanlı hücre yapısında kısa devre akım yoğunluğu 23.46 mA/cm^2 ve verim %19.88 olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar incelendiğinde çift boşluk taşıyıcı katmanlar kullanılarak oluşturulan güneş hücrelerinde kısa devre akım yoğunluğunun ve dolayısıyla verim değerinin yükseldiği görülmektedir.

Tablo 31. Tek ve çift boşluk taşıyıcı katmanlar kullanılarak oluşturulan güneş hücrelerinin karakteristik değerleri

HTL	$J_{SC} \text{ (mA/cm}^2\text{)}$	$V_{OC} \text{ (V)}$	FF (%)	Verim (%)
NiO	23.32	1.05	80.78	19.84
Spiro-OMeTAD	23.32	1.05	80.43	19.75
$\text{CuSbS}_2/\text{NiO}$	23.40	1.05	80.70	19.88
CNTS/NiO	23.46	1.05	80.78	19.95
$\text{CuSbS}_2/\text{Spiro-OMeTAD}$	23.41	1.05	80.38	19.81
CNTS/Spiro-OMeTAD	23.46	1.05	80.47	19.88

Şekil 61’de çift boşluk taşıyıcı katmanlar kullanılarak oluşturulan güneş hücrelerinin J_{SC} - V_{OC} ve FF-verim grafikleri verilmiştir.

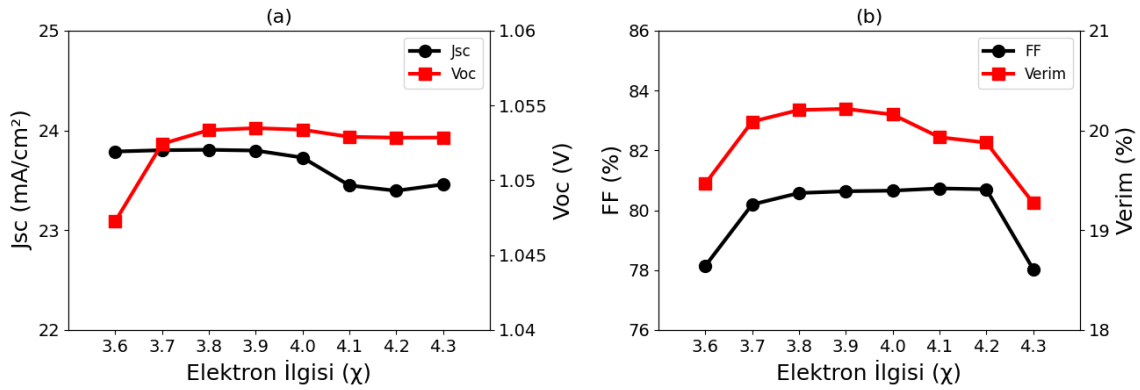


Şekil 61. Çift boşluk taşıyıcı katmanlar kullanılarak oluşturulan güneş hücrelerinin J_{SC} - V_{OC} ve FF-Verim grafikleri

Çift boşluk taşıyıcı katman kullanılarak oluşturulan güneş hücreleri karşılaştırıldığında en yüksek verim değeri FTO/TiO₂/Cs₄CuSb₂Cl₁₂/CNTS/NiO/Au yapısındaki güneş hücresinde %19.95 olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde artış gösteren verim değeri daha düşük valans bant kenar farkı ve rekombinasyonun, daha yüksek kısa devre akım yoğunluğuna ve doldurma faktörüne sebep olmasından kaynaklanmaktadır.

3.2.13. Çift Boşluk Taşıyıcı Katmanlı Güneş Hücrelerinin Elektron İlgisine Bağlı Değişimleri

Bu bölümde CuSbS₂/NiO ve CNTS/NiO çift boşluk taşıyıcı katman kullanılarak oluşturulan güneş hücrelerinin elektron ilgisine bağlı kısa devre akım yoğunluğu, açık devre gerilimi, doldurma faktörü ve verim değerleri incelenmiştir. FTO/TiO₂/Cs₄CuSb₂Cl₁₂/CuSbS₂/NiO/Au hücre yapısında elektron ilgisi CuSbS₂ için 3.6 değerinden 4.3 değerine kadar her aşamada 0.1 artırılmasıyla simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyon sonucunda elde edilen J_{SC}-V_{OC} ve FF-verim grafikleri Şekil 62’de verilmiştir.



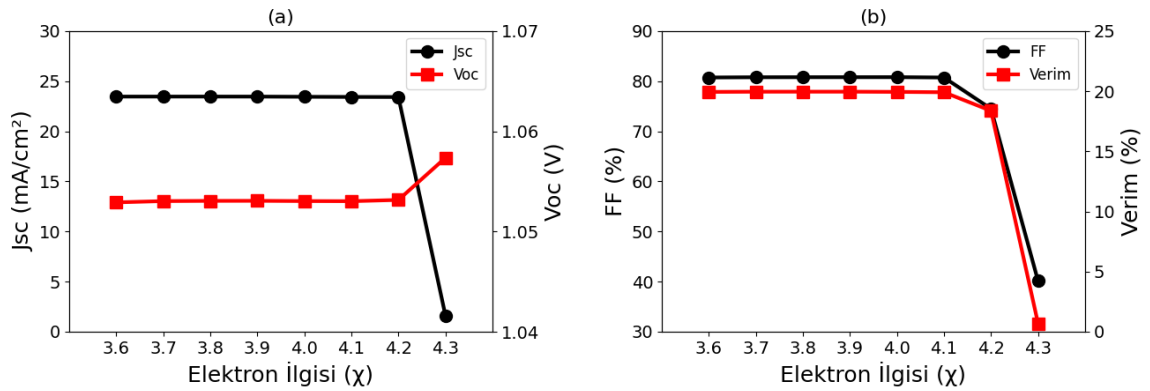
Şekil 62. Elektron ilgisine bağlı CuSbS₂/NiO çift boşluk taşıyıcı katmanlı güneş hücresinin (a) J_{SC}-V_{OC} ve (b) FF-Verim grafikleri

CuSbS₂ elektron ilgisi değerinin 3.6’dan 3.7’ye artırılmasıyla verim %19.47 değerinden %20.09 değerine yükselmiştir. Elektron ilgisinin 4.1 değerine artırılmasına kadar verim %20.20, %20.22 ve %20.16 değerlerini almıştır. Sonrasında elektron ilgisinin değeri 4.1 için verim %19.93, 4.2 için verim % 19.88 ve 4.3 için verim %19.27 değerlerini alarak azalmaya devam etmiştir. Tablo 32’de elektron ilgisine bağlı CuSbS₂/NiO çift boşluk taşıyıcı katmanlı güneş hücresinin karakteristik değerleri verilmiştir.

Tablo 32. Elektron ilgisine bağı CuSbS₂/NiO çift boşluk taşıyıcı katmanlı güneş hücresinin karakteristik değerleri

Elektron İlgisi (χ)	J_{SC} (mA/cm ²)	V_{OC} (V)	FF (%)	Verim (%)
3.6	23.79	1.05	78.14	19.47
3.7	23.80	1.05	80.19	20.09
3.8	23.81	1.05	80.57	20.20
3.9	23.80	1.05	80.63	20.22
4.0	23.73	1.05	80.65	20.16
4.1	23.45	1.05	80.73	19.93
4.2	23.40	1.05	80.70	19.88
4.3	23.46	1.05	78.03	19.27

FTO/TiO₂/Cs₄CuSb₂Cl₁₂/CNTS/NiO/Au hücre yapısında elektron ilgisi CNTS için 3.6 değerinden 4.3 değerine kadar her aşamada 0.1 artırılmasıyla simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyon sonucunda elde edilen J_{SC} - V_{OC} ve FF-verim grafikleri Şekil 63’de verilmiştir.



Şekil 63. Elektron ilgisine bağı CNTS/NiO çift boşluk taşıyıcı katmanlı güneş hücresinin (a) J_{SC} - V_{OC} ve (b) FF-Verim grafikleri

CNTS elektron ilgisi değerinin 3.6’dan 3.7’ye artırılmasıyla verim %19.93 değerinden %19.95 değerine yükselmiştir. Elektron ilgisinin 4.2 değerine artırılmasına kadar verim %19.94, %19.91 ve %18.36 değerlerini almıştır. Sonrasında elektron ilgisinin 4.3’e artırılmasıyla verim %0.66 değerini almıştır. Tablo 33’te elektron ilgisine bağı CNTS/NiO çift boşluk taşıyıcı katmanlı güneş hücresinin karakteristik değerleri verilmiştir.

Tablo 33. Elektron ilgisine bağı CNTS/NiO çift boşluk taşıyıcı katmanlı güneş hücresinin karakteristik değerleri

Elektron İlgisi (χ)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	FF (%)	Verim (%)
3.6	23.46	1.05	80.72	19.93
3.7	23.46	1.05	80.77	19.95
3.8	23.46	1.05	80.78	19.95
3.9	23.45	1.05	80.78	19.95
4.0	23.44	1.05	80.79	19.94
4.1	23.42	1.05	80.71	19.91
4.2	23.41	1.05	74.48	18.36
4.3	1.62	1.06	40.13	0.66

Çift boşluk taşıyıcı katman kullanılarak oluşturulan güneş hücrelerinin elektron ilgisine bağlı verim değerleri incelendiğinde en yüksek verim değeri FTO/TiO₂/Cs₄CuSb₂Cl₁₂/CuSbS₂/NiO/Au hücre yapısında CuSbS₂ için elektron ilgisi değeri 3.9 değerindeyken %20.22 olarak elde edilmiştir.

4. SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında biri uygulama diğeri simülasyon olmak üzere iki çalışma gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada nikel oksit (NiO) ince filmler cam ve silisyum (Si) alttaşlar üzerine doğru akım (DC) sıçratma tekniği kullanılarak biriktirilmiştir. Farklı kalınlıklarda biriktirilen NiO ince filmler oda sıcaklığından 330°C değerine kadar farklı sıcaklıklarda 30 dakika süreyle tavlannmıştır. Tavlama sonrasında ince filmlerin elektriksel ölçümleri dört nokta prob ve hall etkisi ölçümü, optik ölçümleri ultraviyole-görünür spektrofotometre ve yapısal ölçümleri x-ışın kırınımı ve taramalı elektron mikroskobu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Simülasyon çalışmalarında ise hücre yapısı oluşturularak FTO/TiO₂/Cs₄CuSb₂Cl₁₂/NiO/Au, FTO/TiO₂/Cs₄CuSb₂Cl₁₂/Spiro-OMeTAD/Au ve FTO/TiO₂/CH₃NH₃PbI₃/NiO/Au yapıları kullanılarak optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon çalışmaları güneş hücresi kapasitans simülatörü (SCAPS) programında gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon çalışması kapsamında soğurucu katman ve boşluk taşıyıcı katman optimizasyonları kalınlık, kusur yoğunluğu, mobilite, soğurma katsayısı ve yakalama kesit alanı parametreleri değiştirilerek güneş hücresinin karakteristik özellikleri üzerinden performans analizi yapılmıştır.

Deneysel çalışmalar kapsamında gerçekleştirilen elektriksel ölçümlerde örnekler arasında minimum öz direnç değeri oda sıcaklığında tavlanan 10 nm kalınlıktaki ince filmde 0.011 Ωm olarak, maksimum öz direnç değeri 330°C sıcaklığında tavlanan 70 nm kalınlıktaki ince filmde 4.187 Ωm olarak ölçülmüştür. Bu çalışma sonucu elde edilen öz direnç sonuçları incelendiğinde tavlama sıcaklığındaki artışın öz direnç değerini artırdığı gözlemlenmiştir. Öz direcin tam tersi olarak hesaplanan iletkenlik için örnekler arasındaki minimum iletkenlik değeri ise 330°C sıcaklığında tavlanan 70 nm kalınlıktaki ince filmde 0.239 S/m olarak, maksimum iletkenlik değeri oda sıcaklığında tavlanan 10 nm kalınlıktaki ince filmde 87.586 S/m olarak ölçülmüştür. Bu çalışma sonucu elde edilen iletkenlik sonuçları incelendiğinde tavlama sıcaklığındaki artışın iletkenlik değerini azalttığı gözlemlenmiştir.

Deneysel çalışmalar kapsamında gerçekleştirilen optik ölçümlerde silisyum (Si) alttaş üzerine biriktirilen NiO ince filmler kullanılmıştır. Tüm örnekler incelendiğinde tavlama sıcaklığının artmasıyla ortalama yansıma ve minimum yansıma değerleri de artış göstermektedir. Minimum yüzey reflektans değeri 135°C değerinde 30 dakika süreyle tavlanan 50 nm kalınlığındaki örnekten %2 (550 nm) olarak elde edilmiştir. Minimum

ortalama yüzey reflektans değeri ise oda sıcaklığında 30 dakika süreyle tavlanan 20 nm kalınlığındaki örnekten %8.72 (380-1000 nm) olarak elde edilmiştir.

Simülasyon çalışmalarında ilk olarak $\text{Cs}_4\text{CuSb}_2\text{Cl}_{12}$ soğurucu katman kalınlık optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Kalınlık değeri 100 nm değerinden 1500 nm değerine kadar her simülasyonda 10 kat artırılarak güneş hücresinin değerleri incelenmiştir. $\text{Cs}_4\text{CuSb}_2\text{Cl}_{12}$ soğurucu katman kalınlık optimizasyonunda optimum kalınlık değeri olarak verimin pik noktaya ulaştığı 700 nm seçilmiştir. Bu noktada verim %19.75 değerindedir. Sonrasında $\text{Cs}_4\text{CuSb}_2\text{Cl}_{12}$ soğurucu katman kusur yoğunluğu optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Kusur yoğunluğunun artışına bağlı olarak verim değerinde düşüş meydana gelmiştir. Soğurucu katmanın kusur yoğunluğu, teorik ve pratik uygulamalar göz önünde bulundurarak $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ olarak seçilmiştir.

Spiro-OMeTAD boşluk taşıyıcı katman kalınlık değeri 10 nm değerinden 100 nm değerine kadar kalınlık her adımda 10 nm artırılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Kalınlıktaki artışın tersine verim değerinde düşüş meydana gelmiştir. Spiro-OMeTAD yüzeyindeki pratik güneş hücresi uygulama zorlukları göz önüne bulundurularak kalınlık değeri 100 nm olarak ayarlanmıştır. Bu kalınlıktaki verim %19.75 değerindedir. Devamında Spiro-OMeTAD için yapılan kusur yoğunluğu optimizasyonunda ise herhangi bir değişim gözlemlenmemiştir.

Boşluk taşıyıcı katman olarak kullanılan Spiro-OMeTAD yerine NiO kullanılarak kalınlık optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Spiro-OMeTAD yerine NiO kullanılmasıyla verim %19.75 değerinden %19.84 değerine yükselmiştir. Buna karşılık NiO boşluk taşıyıcı katman kalınlık değeri 10 nm değerinden 100 nm değerine kadar kalınlık her adımda 10 nm artırılarak gerçekleştirilen simülasyonlarda bir fark gözlemlenmemiştir. Devamında NiO için yapılan kusur yoğunluğu ve mobilite optimizasyonlarında da bir fark görülmemiştir. Biriktirme ile elde edilen ve pratik sonuçlar göz önünde bulundurularak NiO kalınlık değeri 70 nm olarak belirlenmiştir.

Daha sonrasında $\text{Cs}_4\text{CuSb}_2\text{Cl}_{12}$ soğurucu katman için soğurma katsayısı ve yakalama kesit alanı değerlerine bağlı optimizasyonlar gerçekleştirilmiştir. Soğurma katsayısı değerleri $5 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}$, $1.5 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$, $5 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$, $1 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$, $5 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ ve $1 \times 10^6 \text{ cm}^{-1}$ olacak şekilde simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Elde edilen değerlerde soğurma katsayısı artışına bağlı olarak verim değerinde artış meydana gelmiştir. Soğurma katsayısı 5×10^4 değerinden az olduğunda 550 nm dalga boyundaki kuantum verimliliği %90'ın altına düşmüştür ve bu durum akım üretimini önemli ölçüde etkilemektedir. Soğurma katsayısı 1

$\times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ olarak belirlenerek yakalama kesit alanı optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Soğurucu katman yakalama kesit alanı değeri $1 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ değerinden $1 \times 10^{-12} \text{ cm}^2$ değerine kadar bu değer her adımda 10 kat artırılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Yakalama kesit alanının artışıyla verimde düşüş meydana gelmiştir.

Bu simülasyonlar sonrasında optimum değerler üzerinden $\text{Cs}_4\text{CuSb}_2\text{Cl}_{12}$ ve $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ soğurucu katmanlar arasında karşılaştırma gerçekleştirilmiştir. $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ soğurucu katmanı için de kalınlık, kusur yoğunluğu, soğurma katsayısı ve yakalama kesit alanı değerleri üzerinden optimizasyon yapılmıştır. $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ kalınlık optimizasyonunda optimum kalınlık, verimin %21.83 değeri ile maksimum olduğu 800 nm olarak belirlenmiştir. Kusur yoğunluğu optimizasyonunda ise her iki soğurucu katman için de kusur yoğunluklarının artırılmasıyla tüm parametreler azalmaktadır. Soğurucunun türünden bağımsız olarak güneş hücrelerinin performansındaki düşüş, kusur yoğunluğu $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ değerinden daha yüksek olduğunda daha belirgin olduğu görülmektedir. $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ soğurma katsayısı optimizasyonunda, soğurma katsayısının artırılmasıyla verim değeri de artmaktadır. Soğurma katsayısı arttıkça güneş hücresi performansı artar. Tüm güneş hücresi parametreleri, soğurma katsayısının artmasıyla hemen hemen aynı davranışı gösterir. $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ yakalama kesit alanı $1 \times 10^{-14} \text{ cm}^2$ değerinde daha yüksek bir değer aldığında kısa devre akım yoğunluğu hariç diğer parametrelerde ciddi bir düşüş gözlemlenmiştir.

Soğurucu katman karşılaştırmasının ardından $\text{FTO}/\text{TiO}_2/\text{Cs}_4\text{CuSb}_2\text{Cl}_{12}/\text{NiO}/\text{Au}$ hücre yapısında NiO yerine CuSbS_2 , Cu_2O , CuSCN , MoO_3 , CuI , CuO , CNTS, ZnTe ve P_3HT kullanılarak güneş hücresinin karakteristik özellikleri incelenmiştir. NiO kullanılan güneş hücresi ile kıyaslandığında MoO_3 ve CNTS kullanılarak oluşturulan güneş hücrelerinde sırasıyla %19.85 ve %19.91 olmak üzere daha yüksek verim değerleri elde edilmiştir. Boşluk taşıyıcı katman olarak ZnTe kullanılan güneş hücresinin verim değerinde bariyer oluşumunun etkisiyle %0.02 değerine kadar düşüş gözlemlenmiştir. Tek boşluk taşıyıcı katmanların değerleri incelendikten sonra valans bant kenar farkları göz önünde bulundurularak $\text{CuSbS}_2/\text{NiO}$, CNTS/NiO ve $\text{CuSbS}_2/\text{Spiro-OMeTAD}$, CNTS/Spiro-OMeTAD malzemeleri çift boşluk taşıyıcı katman olarak kullanılmıştır. Oluşturulan $\text{FTO}/\text{TiO}_2/\text{Cs}_4\text{CuSb}_2\text{Cl}_{12}/\text{HTL1}/\text{HTL2}/\text{Au}$ hücre yapılarının verim değerleri karşılaştırıldığında en yüksek verim değeri CNTS/NiO çift boşluk taşıyıcı katmanlı güneş hücresinde %19.95 olarak elde edilmiştir. Sonrasında $\text{CuSbS}_2/\text{NiO}$ ve CNTS/NiO çift boşluk taşıyıcı katman elektron ilgisine bağlı verim değerleri incelenmiştir. Çift boşluk taşıyıcı katman kullanılarak oluşturulan güneş hücrelerinin elektron ilgisine bağlı verim değerleri

incelendiğinde en yüksek verim değeri FTO/TiO₂/Cs₄CuSb₂Cl₁₂/CuSbS₂/NiO/Au hücre yapısında CuSbS₂ için elektron ilgisi değeri 3.9 değerindeyken %20.22 olarak elde edilmiştir.



5. ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında NiO ince filmler DC sıçratma tekniğı ile oluşturulmuştur. Kaliteli ve istenilen kalınlıkta filmler oluşturulabilmesi için güç ve gaz oranları başta olmak üzere sıçratma parametrelerine dikkat edilmesi gerekmektedir. Alttaş üzerine biriktirilen ince filmlerin yüzey reflektansını düşürmek için çok katmanlı yapılar oluşturulabilir. SEM görüntülerinde elde edilen yuvarlak şekilli kusurlar için çalışma yapılabilir. Daha yüksek tavlama sıcaklıklarının ve farklı tavlama sürelerinin NiO ince filmler üzerindeki etkisi araştırılabilir.



6. KAYNAKLAR

- Abdelkadir, A. A., Oublal, E., Sahal, M. & Gibaud, A., (2022). Numerical simulation and optimization of n-Al-ZnO/n-CdS/p-CZTSe/p-NiO (HTL)/Mo solar cell system using SCAPS-1D. *Results in Optics*, 8, 100257.
- Abdur, R., Choudhury, S., Bashar, M. S., Hossain, M. R., Quddus, M. S., Akhtar, U. S., & Jamal, M. S. (2024). Enhancing perovskite solar cell performance: Investigating the impact of post-annealing on the optoelectrical and structural properties of RF-sputtered NiO films via SCAPS-1D device modeling. *Solar Energy*, 271, 112443.
- Abena, A. N., Ngoupo, A. T., Abega, F. A., & Ndjaka, J. M. B. (2022). Numerical investigation of solar cells based on hybrid organic cation perovskite with inorganic HTL via SCAPS-1D. *Chinese Journal of Physics*, 76, 94-109.
- Ahmed, A. A., Devarajan, M., & Afzal, N. (2017). Fabrication and characterization of high performance MSM UV photodetector based on NiO film. *Sensors and Actuators A: Physical*, 262, 78-86.
- Ahmed, A. A., Hashim, M. R., & Rashid, M. (2019). Control of the structural, electrical and optical properties of spin coated NiO films by varying precursor molarity. *Thin Solid Films*, 690, 137554.
- Ahmmed, S., Aktar, A., Hossain, J., & Ismail, A. B. M. (2020). Enhancing the open circuit voltage of the SnS based heterojunction solar cell using NiO HTL. *Solar Energy*, 207, 693-702.
- Ai, L., Fang, G., Yuan, L., Liu, N., Wang, M., Li, C., Zhang, Q., Li, J., & Zhao, X. (2008). Influence of substrate temperature on electrical and optical properties of p-type semitransparent conductive nickel oxide thin films deposited by radio frequency sputtering, *Applied Surface Science*, 254(8), 2401-2405.
- Akman, E., Akın, S., Karanfil, G., & Sönmezoğlu, S. (2013). Organik Güneş Pilleri. *Trakya University Journal of Engineering Sciences*, 14(1), 1-30.
- Alasağ S.G. (2014). *Plazmonik Davranış Gösteren Metal-Dielektrik Nano-Kompozit Filmlerin Atomik Kaplama Metodu ile Üretilmesi ve Karakterizasyonu*. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Altuncu, S. (2012). *Döndürerek Kaplama Yöntemiyle Farklı Tavlama Sıcaklıklarında Üretilen ZnO Yarıiletken Filmlerinin Bazı Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi*. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir.
- Anik, M. H. K., Mahmud, S., Islam, M. A., Talukder, H., Biswas, S. K., & Islam, S. (2022). Comparative performance analysis and material exploration of ECO-friendly highly efficient perovskite solar cells. *Semiconductor Science and Technology*, 37(11), 115004.

- Arslanhan, M. (2024). *Saf ve Nano-Katkılı TiO₂ Filmlerin Üretimi ve Karakterizasyonu*. Bursa Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Doktora Tezi, Bursa.
- Ashtiha, P. P., Joshi, M., Verma, D., Jadhav, S., Choudhury, A. R., & Jana, D. (2021). Layered Cs₄CuSb₂Cl₁₂ nanocrystals for sunlight-driven photocatalytic degradation of pollutants. *ACS Applied Nano Materials*, 4(2), 1305-1313.
- Aydın, E. (2016). *Bakır İndiyum Sülfür İnce Film Güneş Pillerinin Bükülebilir ve Cam Alt Taşlar Üzerine Sprey Piroliz Yöntemi ile Üretimi*. TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara.
- Aydoğan, Ş. (2015). *Katıhal Elektroniği*. Nobel Akademik Yayıncılık.
- Aytuğ, C. (2020). *Fiziksel Buhar Biriktirme Yöntemi ve Doktor Blade Kaplama Tekniği ile Üretilen CuInSe₂ İnce Filmlerin Özelliklerinin Araştırılması*. Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Denizli.
- Born, M., & Wolf, E. (1999). *Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Burgelman, M., Nollet, P., & Degrave, S. (2000). Modelling Polycrystalline Semiconductor Solar Cells, *Thin Solid Films*, 361, 527–532.
- Cai, T., Shi, W., Hwang, S., Kobbekaduwa, K., Nagaoka, Y., Yang, H., ... & Chen, O. (2020). Lead-free Cs₄CuSb₂Cl₁₂ layered double perovskite nanocrystals. *Journal of the American Chemical Society*, 142(27), 11927-11936.
- Canımıkbey, B., & Mucur, S. P. (2019). *Organik Elektronik: Aygıt Fiziği ve Uygulamaları*. İstanbul: Atlas Akademik Basım Yayın Dağıtım.
- Colinge, J. P., & Colinge, C. A. (2005). *Physics of semiconductor devices*. Springer Science & Business Media.
- Dai, S., Bai, X., Wang, X., & Yan, X. (2017). Fabrication and super capacitive performance of nanoporous nickel oxide film, *ChemistrySelect*, 2(1), 246–251.
- Dastan, D., Jafari, A., Marszalek, T., Mohammed, M. K., Tao, L., Shi, Z., ... & Ansari, L. (2023). Influence of heat treatment on H₂S gas sensing features of NiO thin films deposited via thermal evaporation technique. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 154, 107232.
- Deepthi Jayan, K. (2022). Bandgap Tuning and Input Parameter Optimization for Lead-Free All-Inorganic Single, Double, and Ternary Perovskite-Based Solar Cells. *Solar RRL*, 6(4), 2100971.
- Demiroğlu, D. (2019). *Organik Yarıiletken Tabanlı Fotovoltaik Aygıtlar için Şekilli İnce Film Altlıkların Kullanımı ve Etkilerinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Dönük, Ç. (2012). *CoNiCu İnce Film Alaşımlarının XRD ve XRF ile İncelenmesi*, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş.
- Durna, L. (2019). *ALD Yöntemi ile Düşük Sıcaklıkta Büyütülen ZnO Esaslı TFT'lerin Üretimi ve Karakterizasyonu*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Gawali, S. R., Patil, V. L., Deonikar, V. G., Patil, S. S., Patil, D. R., Patil, P. S., & Pant, J. (2018). Ce doped NiO nanoparticles as selective NO₂ gas sensor. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 114, 28-35.
- Görmez, S. (2021). *Silisyum Tabanlı Güneş Pili Hücrelerinin Üretim Teknolojileri ve Bazı Ticari Silisyum Güneş Pillerinin Elektriksel Karakteristiklerinin Tayini*. Giresun Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Giresun.
- Gratzel, M. (2005). Solar Energy Conversion by dye-sensitized Photovoltaic Cells. *Inorganic Chemistry*, 44(20), 6841-6851.
- Green, M. A. (2002). Photovoltaic principles. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 14(1-2), 11-17.
- Green, M.A, Dunlop E.D., Gerald S., Yoshita M., Kopidakis N., Bothe K. & Hao X. (2023). Solar Cell Efficiency Tables (Version 61), *Progress in Photovoltaics*, 31(1), 3-16.
- Grilli, M. L., Aydoğan, S., & Yılmaz, M. (2016). A study on non-stoichiometric p-NiOx/n-Si heterojunction diode fabricated by RF sputtering: Determination of diode parameters. *Superlattices and Microstructures*, 100, 924-933.
- Güngör, N. (2013). *Plazma ile Etkilendirilmiş Atomik Katman Büyütme Yöntemi ile Büyütülen AlN İnce Filmlerin Optik Özellikleri*. Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Hassan, A. J. (2014). Study of optical and electrical properties of nickel oxide (NiO) thin films deposited by using a spray pyrolysis technique. *Journal Of Modern Physics*, 5(18), 2184-2191.
- He, Y., Xu, L., Yang, C., Guo, X., & Li, S. (2021). Design and numerical investigation of a lead-free inorganic layered double perovskite Cs₄CuSb₂Cl₁₂ nanocrystal solar cell by SCAPS-1D. *Nanomaterials*, 11(9), 2321.
- Helan, V., Prince, J. J., Al-Dhabi, N. A., Arasu, M. V., Ayeshamariam, A., Madhumitha, G., ... & Jayachandran, M. (2016). Neem leaves mediated preparation of NiO nanoparticles and its magnetization, coercivity and antibacterial analysis. *Results in physics*, 6, 712-718.
- Hsu, C. C., Su, H. W., Hou, C. H., Shyue, J. J., & Tsai, F. Y. (2015). Atomic layer deposition of NiO hole-transporting layers for polymer solar cells. *Nanotechnology*, 26(38), 385201.

- Hussain, M. S. (2024). Performance Enhancement of SnSe Thin Film Solar Cell Structure with ZnSe Buffer Layer Using SCAPS 1D. *Available at SSRN*, 4781578.
- İşen, E., & Koçhan, Ö. (2020). Fotovoltaik Panelin Tek Diyotlu Modellenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi*, 2(1), 1-10.
- Jlassi, M., Sta, I., Hajji, M., & Ezzaouia, H. (2017). NiO thin films synthesized by sol-gel: Potentiality for the realization of antireflection layer for silicon based solar cell applications. *Surfaces and Interfaces*, 6, 218-222.
- Kanmaz, İ. (2021). *Kristal Silisyum Güneş Hücreleri Uygulamaları için Hafniyum Dioksit(HfO₂) Tabanlı Yansıma Önleyici ve Pasivasyon Etkili Katmanların Geliştirilmesi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.
- Karakız, M. (2014). *Silisyum ve Germanyum Nanoçubukların Elektron Demeti Biriktirme Sistemi ile Büyütülmesi ve Karakterizasyonu*. Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Gebze.
- Karakuş, E., & Koç, M. M. (2023). Temel İnce Film Üretim Tekniklerine Bir Bakış. *Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 9(1), 213-236.
- Karmaker, H., Siddique, A., Das, B. K., & Islam, M. N. (2024). Modeling and performance investigation of novel inorganic Cs₄CuSb₂Cl₁₂ nanocrystal perovskite solar cell using SCAPS-1D. *Results in Engineering*, 22, 102106.
- Khan, A. H. H., Khan, A. A., & Farid, A. (2024). Enhancing the efficiency of non toxic perovskite solar cell through Cs₄CuSb₂Cl₁₂ as interface layer using SCAPS-1D. *Physica Scripta*, 99(7), 075505.
- Kök, S. A. (2020). *Döndürerek Kaplama Yöntemi ile Hazırlanan ZnO:Al İnce Filmlerin Üretilmesi ve Karakterizasyonu*. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Eskişehir.
- Kumar, M., Ansari, J. R., Srivastava, A. K., & Sharma, A. (2023). Influence of deposition and annealing temperature on resistivity and nanoindentation characteristics of reactive magnetic sputtered NiO films. *Iran. J. Chem. Chem. Eng. Research Article*, 42(10), 3249-3256.
- Kumar, A., Punetha, D., & Chakrabarti, S. (2023). Performance optimization of phenylethylammonium-formamidinium tin iodide perovskite solar cell by contrasting various ETL and HTL materials. *Journal of Nanoparticle Research*, 25(3), 52.
- Lunge, O. R., Ravidas, B. K., Bhattarai, S., Pandey, R., Madan, J., Roy, M. K., ... & Samajdar, D. P. (2024). DFT and SCAPS-1D based optimization study of double perovskite Cs₂AuBiCl₆ solar cells utilizing different charge transport layers. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 195, 112260.
- Mallahasan, H. (2022). *Perovskit Güneş Hücreleri Verimliliğine Etki Eden Faktörlerin Sayısal Modellemesi ve Karşılaştırılması*. Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir.

- Mandong, A. M. (2019). *Design and simulation of single, double, and multi-layer antireflection coating for crystalline silicon solar cell*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Mattox, D. M. (2010). *Handbook Of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing*. Second Edition.
- Meng, X., Gao, X., & Du, Y. (2020). Influence of O₂/Ar flow ratio on the structure, optical and electrical properties of DC reactively magnetron-sputtered face-centered cubic NiO films at room temperature. *Physica B: Condensed Matter*, 579, 411877.
- Muscarella, L. A., & Hutter, E. M. (2022). Halide double-perovskite semiconductors beyond photovoltaics. *ACS Energy Letters*, 7(6), 2128-2135.
- Nelson, J., 2002. *The Physics of Solar Cells*. Imperial College Press.
- Özden, M. (2019). *Sılar ve Dönel Kaplama Metotları Kullanılarak Büyütülen Çinko Oksit (Zno) İnce Filmlerde Uyarılmış Emisyonun İncelenmesi*. Erzurum Teknik Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Erzurum.
- Öztürk, H. H., & Kaya, D. (2019). *Güneş Enerjisinden Elektrik Üretimi: Fotovoltaik Teknoloji*. İzmit: Umuttepe Yayınları.
- Qi, C. & Ming, Z. (2012). Photovoltaic module simulink model for a stand-alone PV system. *2012 International Conference on Applied Physics and Industrial Engineering*, s. 94-100.
- Rahman, M. S., Miah, S., Marma, M. S. W., & Sabrina, T. (2019, February). Simulation based investigation of inverted planar perovskite solar cell with all metal oxide inorganic transport layers. In *2019 International Conference on Electrical, Computer and Communication Engineering (ECCE)*, 1-6, IEEE.
- Reddy, A. M., Reddy, A. S., & Reddy, P. S. (2013). Annealing effect on the physical properties of dc reactive magnetron sputtered nickel oxide thin films. *Physics Procedia*, 49, 9-14.
- Reddy, A.M., Reddy, A. S., Lee, K. S., & Reddy, P. S. (2011). Growth and characterization of NiO thin films prepared by dc reactive magnetron sputtering. *Solid State Sciences*, 13(2), 314-320.
- Ritu, G., Kumar, R., & Chand, F. (2023). Performance enhancement in MA0. 7FA0. 3PbI3 based perovskite solar cell by gradient doping. *Optik*, 274, 170558.
- Sertel, T. (2020). *III-V Grubu Uzay Kalifiye Güneş Hücrelerinin Geliştirilmesi*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara.
- Sönmezoğlu, S., Koç M., & Akın S. (2012). İnce Film Üretim Teknikleri. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 28(5), 391-397.

- Siddique, A., Islam, M. N., Karmaker, H., Iqbal, A. A., Khan, A. A. M., Islam, M. A., & Das, B. K. (2024). Numerical modelling and performance investigation of inorganic Copper-Tin-Sulfide (CTS) based perovskite solar cell with SCAPS-1D. *Results in Optics*, 16, 100713.
- Singhal, N., Chakraborty, R., Ghosh, P., & Nag, A. (2018). Low-bandgap Cs₄CuSb₂Cl₁₂ layered double perovskite: Synthesis, reversible thermal changes, and magnetic interaction. *Chemistry–An Asian Journal*, 13(16), 2085-2092.
- Srivastava, S., Srivastava, R., Punetha, D., Sharma, A. K., & Prajapati, Y. K. (2024). Enhancing the efficiency of lead-free Cs₂AgBiBr₆ based double perovskite solar cells with optimizing ETLs and HTLs using SCAPS-1D. *Chemical Physics Letters*, 854, 141557.
- Sze, S. M., Li, Y., & Ng, K. K. (2021). *Physics of Semiconductor Devices*. John Wiley & Sons.
- Şahsuvar, N. S. (2019). *Sprey Piroliz Yöntemiyle Cu(In,Ga)(S,Se)₂ İnce Film Foto Elektrokimyasal Güneş Hücrelerinin Geliştirilmesi*. TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Şenay, G. (2011). *Çok Eklemlili Güneş Pillerinde Detaylı Denge Modeli ile Verim Optimizasyonu*. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Şenel, M. (2022). *Nb Katkılı TiO₂ İnce Filmlerin Üretilmesi ve Boya Duyarlı Güneş Hücrelerine Uygulanması*. Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Doktora Tezi, Eskişehir.
- Tang, C. W. (1986). Two-Layer Organic Photovoltaic Cell. *Applied Physics Letters*, 48(2), 183-185.
- Tosun, T. (2019). *Katodik Ark FBB Tekniği ile Seramik Karo Dekorasyonu için TiN Kaplamaların Üretilmesi ve Karakterizasyonu*. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir.
- URL-1. (2024, Ağustos 4). Petrol Krizi: https://tr.wikipedia.org/wiki/1973_Petrol_Krizi adresinden alınmıştır.
- URL-2. (2024, Ağustos 4). Thin Film Solar Cell: https://www.daviddarling.info/encyclopedia/T/AE_thin_film_cell.html adresinden alınmıştır.
- URL-3. (2024, Ağustos 5). UV-Vis Spectroscopy: Principle, Instrumentation, and Applications: <https://psiberg.com/uv-vis-spectroscopy/> adresinden alınmıştır.
- URL-4. (2024, Ağustos 30). Spektral ışık şiddetinin dalga boyu ile ilişkisi: <https://sarkac.org/2021/04/gokyuzunun-renkleri-farkli-dalga-boylarinda-astronomi> adresinden alınmıştır.

- URL-5. (2024, Ağustos 30). Derivation of Fresnel Equations https://sites.ualberta.ca/~khchow/phys362_related/lec14_no3.pdf
- Uzum, A. (2021). Device simulations of electron-transfer-layer-free perovskite solar cells focused on absorber/hole transfer-layer interface. *Semiconductor Science and Technology*, 36(7), 075026.
- Visweswaran, S., Venkatachalapathy, R., Haris, M., & Murugesan, R. (2020). Structural, morphological, optical and magnetic properties of sprayed NiO thin films by perfume atomizer. *Applied Physics A*, 126(7), 524.
- Waremra, R. S., & Betaubun, P. (2018). *Analysis of electrical properties using the four point probe method. In E3S Web of conferences*. EDP Sciences.
- Wasa, K., Kanno I., & Kotera H. (2012). *Handbook of Sputter Deposition Technology. Fundamentals and Applications for Functional Thin Films, Nano-Materials and MEMS*. Second Edition.
- Yang, P., Wang, J., Zhao, X., Wang, J., Hu, Z., Huang, Q., & Yang, L. (2019). Magnetron-sputtered nickel oxide films as hole transport layer for planar heterojunction perovskite solar cells. *Applied Physics A*, 125, 1-6.
- Yasin, S., Al Zoubi, T., & Moustafa, M. (2021). Design and simulation of high efficiency lead-free heterostructure perovskite solar cell using SCAPS-1D. *Optik*, 229, 166258.
- Zaimler, H. (2019). *Güneş Pili Uygulamaları için Epitaksiyel GaAs İnce Filmlerin Kaldırılması ve Esnek Tabanlara Nakli*. Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir.

ÖZGEÇMİŞ

İlker Fatih GÜNGÖR, İlköğrenimini Kars Atatürk İlköğretim Okulunda tamamladı. Lise eğitimini 2016 yılında Kars Hüsnü M. Özyeğin Anadolu Lisesinde tamamladı. 2016-2017 öğretim yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı. 2018-2019 öğretim yılında Atatürk Üniversitesi Açık Öğretim Fakültesi İş Sağlığı ve Güvenliği ön lisans eğitimine başladı. 2020 yılında bu bölümlerden mezun oldu. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim dalında tezli yüksek lisans programına başladı. 2022 yılından itibaren çalışmakta olduğu Halk Bankası Genel Müdürlüğü'nde BT Uzmanı olarak görev yapmaktadır.