



**METİLAMONYUM TABANLI PEROVSKİT
GÜNEŞ HÜCRELERİNİN SİMÜLASYONU**

Ali ÇATAL

**Yüksek Lisans Tezi
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Meltem GÖR BÖLEN**

2024

Her hakkı saklıdır.



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**METİLAMONYUM TABANLI PEROVSKİT GÜNEŞ HÜCRELERİNİN
SİMÜLASYONU**

Ali ÇATAL

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Meltem GÖR BÖLEN

Anabilim Dalı: Elektrik Elektronik Mühendisliği

Erzurum

2024

Her hakkı saklıdır

T.C.
ERZURUM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEZ ONAY FORMU

METİLAMONYUM TABANLI PEROVSKİT GÜNEŞ HÜCRELERİNİN
SİMÜLASYONU

Dr. Öğr. Üyesi Meltem GÖR BÖLEN danışmanlığında, Ali ÇATAL tarafından hazırlanan bu çalışma 23 / 12 / 2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **Oy birliği ile (3/3)** kabul edilmiştir.

Başkan	: Prof. Dr. Tevhit KARACALI	İmza	:
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Volkan KIZILOĞLU	İmza	:
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Meltem GÖR BÖLEN	İmza	:

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

Doç. Dr. Bünyamin ÖZGERİŞ
Enstitü Müdürü

*Bu tez çalışması tarafındannolu proje ile desteklenmiştir.

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki tüm bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

23 / 12 / 2024

İmzası

Ali ÇATAL

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

METİLAMONYUM TABANLI PEROVSKİT GÜNEŞ HÜCRELERİNİN SİMÜLASYONU

Ali ÇATAL

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Meltem GÖR BÖLEN

Bu çalışma ile güneş hücrelerinde son yıllarda sıklıkla isminden söz ettiren Perovskit malzeme kullanılmasıyla elde edilen beş katmanlı güneş hücre yapısı tasarlanmıştır. Perovskit malzemenin güneş hücrelerinde yaygın olarak kullanılmasının başlıca sebepleri yapısından kaynaklanan eşsiz yarı iletkenlik özelliği, uzun ömürlü olması, optik bant aralığının ayarlanabilmesi, değişen iklim şartlarındaki güç dönüşüm verimliliği, mevcut değerini koruyabilmesi, geleneksel güneş hücrelerine göre üretiminin daha hızlı olması ve daha düşük enerji gerektirmesi olarak sıralanabilir. Söz konusu avantajlar göz önüne alındığında yedi malzeme ile farklı kalınlıklar için toplam 28 farklı güneş hücre modeli SCAPS-1D yardımıyla tasarlanmıştır. Farklı kalınlık değerlerinin ve katman malzemelerinin akım yoğunluğu, açık devre voltajı, doldurma oranı ve verim üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

2024, 51 sayfa

Anahtar Kelimeler: Perovskit güneş hücresi, SCAPS-1D Simülasyonu.

ABSTRACT

MS. Thesis

SIMULATION OF METHYLAMMONIUM-BASED PEROVSKITE SOLAR CELLS

Ali ÇATAL

Erzurum Technical University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical Electronic Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Meltem GÖR BÖLEN

In this study, a five-layer solar cell structure obtained by using Perovskite material, which has made a name for itself in solar cells in recent years, has been designed. The main reasons for the widespread use of Perovskite material in solar cells can be listed as its unique semiconductivity due to its structure, durability, tunability of optical bandgap, power conversion efficiency in changing climatic conditions, ability to maintain its current value, faster production, and lower energy requirement compared to conventional solar cells. Considering these advantages, a total of 28 different solar cell models for different thicknesses with seven materials were designed with the help of SCAPS-1D. The effects of different thickness values and layer materials on current density, open circuit voltage, fill rate and efficiency were analyzed.

2024, 51 page

Keywords: Perovskite solar cell, SCAPS-1D Simulation.

TEŞEKKÜR

Bu alıőmanın yűrűtűlmesi esnasında bana katkılarını esirgemeyip beni yűnlendirerek alıőmalarıma destek olan deęerli danıőman hocam Sayın Dr. Őęr. Őyesi Meltem GŐR BŐLEN'e, beni bugűnlere getiren ve her zaman sabırla bana destek olup gűler yűzűnű ve sevgisini esirgemeyen biricik ailem'e teőekkűr ederim.

Ali ÇATAL

Aralık 2024



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	2
3. MATERYAL ve YÖNTEM	7
3.1. Güneş Hücresi.....	7
3.2. Güneş Hücresi Çalışma Prensibi.....	8
3.3. Perovskit Güneş Hücresi.....	8
3.4. Güneş Hücrelerini Oluşturan Katmanlar.....	9
3.4.1. Elektron iletim katmanı.....	9
3.4.1.1. Titanyumdioksit.....	10
3.4.1.2. Kalaydioksit.....	10
3.4.2. Boşluk iletim katmanı.....	11
3.4.2.1. Kristalin Silisyum.....	11
3.4.2.2. Spiro-Ometad.....	11
3.4.3. Aktif katman.....	12
3.4.3.1. Metilamonyum Kalay İyodür.....	12
3.4.4. Kontaklar.....	13
3.4.4.1. FTO.....	13
3.4.4.2. Au.....	14
3.5. Güneş Hücrelerinde Performans Parametreleri.....	14
3.5.1. Güç dönüşüm verimi.....	14
3.5.2. Açık devre gerilimi.....	15
3.5.3. Kısa devre akımı.....	15
3.5.4. Doldurma Faktörü.....	16
3.5.5. Dış kuantum verimi.....	16
3.6. Güneş Hücrelerinde Verimliliğe Etki Eden Parametreler.....	17
3.6.1. Soğurma katsayısı.....	17
3.6.2. Hücre sıcaklığı.....	18
3.6.3. Yüzey rekombinasyonu.....	18

3.7. Güneş Hücresi Kapasitans Simülasyon Programı.....	19
3.7.1. SCAPS-1D'de kullanılan matematiksel ifadeler	19
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	22
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	46
KAYNAKLAR	49



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
Au	Altın
Ag	Gümüş
Br	Brom
Cu	Bakır
CH ₃ NH ₃ PbI ₃	Metilamonyum Kurşun İyodür
CH ₃ NH ₃ SnI ₃	Metilamonyum Kalay İyodür
CIGS	İndiyum Galyum Selenit
FTO	Flor Katkılı Kalay Oksit
GaSe	Galyum Selenit
Ge	Germanyum
J _{sc}	Akım Yoğunluğu
I _{sc}	Kısa Devre Akımı
ITO	İndiyum Kalay Oksit
NiO	Nikel Oksit
SnO ₂	Kalaydioksit
TiO ₂	Titanyumdioksit
V _{oc}	Açık Devre Voltajı
ZnO	Çinko Oksit

Kısaltmalar

ETL	Elektron İletim Katmanı
HTL	Boşluk İletim Katmanı
FF	Doldurma Oranı
MA	CH ₃ NH ₃
PSC	Perovskit Güneş Hücresi
PCE	Güç Dönüşüm Verimi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Örnek Güneş Hücresi Modeli	7
Şekil 1.2. Güneş Hücresi Çalışma Prensibi	8
Şekil 1.3. Perovskit Güneş Hücresinin Kristal Formülü.....	9
Şekil 1.4. Güneş Hücresi Karakteristik Özelliği.....	14
Şekil 1.5. Güneş Hücresi Elektriksel Eşdeğer Devresi	15
Şekil 1.6. Soğurma Katsayılarının Değişimi	18
Şekil 1.7. SCAPS Programında Güneş Hücresi Tasarımı	20
Şekil 1.8. SCAPS Programında Gerekli Parametreler	21
Şekil 2.1. Güneş Hücresi Katmanları.....	22
Şekil 2.2. FTO-TiO ₂ -CH ₃ NH ₃ SnI ₃ -Spiro-OMETAD(350nm)-Au	23
Şekil 2.3. FTO-TiO ₂ -CH ₃ NH ₃ SnI ₃ -Spiro-OMETAD(300nm)-Au	24
Şekil 2.4. FTO-TiO ₂ -CH ₃ NH ₃ SnI ₃ -c-Si(250nm)-Au.....	25
Şekil 2.5. FTO-TiO ₂ -CH ₃ NH ₃ SnI ₃ -c-Si(200nm)-Au.....	25
Şekil 2.6. FTO-TiO ₂ (30nm)-CH ₃ NH ₃ SnI ₃ -Spiro-OMETAD(300nm)-Au	26
Şekil 2.7. FTO-TiO ₂ (30nm)-CH ₃ NH ₃ SnI ₃ -Spiro-OMETAD(350nm)-Au	27
Şekil 2.8. FTO-TiO ₂ (30nm)-CH ₃ NH ₃ SnI ₃ -c-Si(200nm)-Au	28
Şekil 2.9. FTO-TiO ₂ (30nm)-CH ₃ NH ₃ SnI ₃ -c-Si(250nm)-Au	28
Şekil 2.10. FTO-SnO ₂ (500nm)-CH ₃ NH ₃ SnI ₃ -c-Si(200nm)-Au	29
Şekil 2.11. FTO-SnO ₂ (500nm)-CH ₃ NH ₃ SnI ₃ -c-Si(250nm)-Au	30
Şekil 2.12. FTO-SnO ₂ (500nm)-CH ₃ NH ₃ SnI ₃ -Spiro-OMETAD(300nm)-Au	31
Şekil 2.13. FTO-SnO ₂ (500nm)-CH ₃ NH ₃ SnI ₃ -Spiro-OMETAD(350nm)-Au	31
Şekil 2.14. FTO-SnO ₂ (50nm)-CH ₃ NH ₃ SnI ₃ -c-Si(200nm)-Au	32
Şekil 2.15. FTO-SnO ₂ (50nm)-CH ₃ NH ₃ SnI ₃ -c-Si(250nm)-Au	33
Şekil 2.16. FTO-SnO ₂ (50nm)-CH ₃ NH ₃ SnI ₃ -Spiro-OMETAD(300nm)-Au	33
Şekil 2.17. FTO-SnO ₂ (50nm)-CH ₃ NH ₃ SnI ₃ -Spiro-OMETAD(350nm)-Au	34
Şekil 2.18. FTO(300nm)-TiO ₂ (100nm)-CH ₃ NH ₃ SnI ₃ -Spiro-OMETAD(350nm)-Au ...	35
Şekil 2.19. FTO(300nm)-TiO ₂ (100nm)-CH ₃ NH ₃ SnI ₃ -Spiro-OMETAD(300nm)-Au ...	35
Şekil 2.20. FTO(300nm)-TiO ₂ (100nm)-CH ₃ NH ₃ SnI ₃ -c-Si(250nm)-Au	36
Şekil 2.21. FTO(300nm)-TiO ₂ (100nm)-CH ₃ NH ₃ SnI ₃ -c-Si(200nm)-Au	37
Şekil 2.22. FTO(300nm)-TiO ₂ (30nm)-CH ₃ NH ₃ SnI ₃ -Spiro-OMETAD(300nm)-Au	38
Şekil 2.23. FTO(300nm)-TiO ₂ (30nm)-CH ₃ NH ₃ SnI ₃ -Spiro-OMETAD(350nm)-Au	38

Şekil 2.24. FTO(300nm)-TiO ₂ (30nm)-CH ₃ NH ₃ SnI ₃ -c-Si(200nm)-Au	39
Şekil 2.25. FTO(300nm)-TiO ₂ (30nm)-CH ₃ NH ₃ SnI ₃ -c-Si(250nm)-Au	40
Şekil 2.26. FTO(300nm)-SnO ₂ (50nm)-CH ₃ NH ₃ SnI ₃ -c-Si(200nm)-Au	41
Şekil 2.27. FTO(300nm)-SnO ₂ (50nm)-CH ₃ NH ₃ SnI ₃ -c-Si(250nm)-Au	41
Şekil 2.28. FTO(300nm)-SnO ₂ (30nm)-CH ₃ NH ₃ SnI ₃ -Spiro-OMETAD(300nm)-Au.....	42
Şekil 2.29. FTO(300nm)-SnO ₂ (30nm)-CH ₃ NH ₃ SnI ₃ -Spiro-OMETAD(350nm)-Au.....	43



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Güneş Hücre Modelinde Kullanılan Malzemeler	22
Çizelge 1.2. Tasarlanan Güneş Hücre Modellerinin Performans Parametreleri	45
Çizelge 2.1. Geçmiş Yıllarda Tasarlanan Güneş Hücresi Çalışmaları	47



1. GİRİŞ

Artan nüfus ve gelişen teknoloji enerji ihtiyacını artırmaktadır. Fosil yakıtların kullanıldığı enerji kaynakları “çevreye olumsuz etkiler ve tükenme riskinden” ötürü her geçen gün önemini yitirmektedir. Fosil yakıtlara alternatif enerji kaynağı olarak, yenilenebilir enerji kaynaklarının “temiz enerji elde edilebilmesi, çevreye zarar vermemesi ve tükenme riskinin olmaması” gibi avantajları dikkatleri üzerine çekmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan, güneşten enerji elde edilmesinde kullanılan güneş hücreleri, kurulum ve kullanım kolaylığının yanı sıra çevreyi kirletmemesi ve zararlı atık oluşturmaması gibi avantajları nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarının içerisinde oldukça önemli bir yere sahiptir. Bu sebepler bilim insanlarını güneş enerjisi sektöründe çok yönlü ve daha ucuz malzemeler üreterek daha verimli güneş hücreleri üretimine yönlendirmiştir. Güneş hücre verimliliğini, güneş ışığı soğurulma miktarı ve soğurulan ışığın elektrik enerjisine dönüştürülme oranı etkilemektedir. Son yıllarda sıklıkla güneş hücrelerinde kullanılan perovskit, ilk keşfedilen perovskit kristali olarak bilinen mineral kalsiyum titanyum oksit ile aynı kristal yapıya sahip bir malzemedir. Genel olarak perovskit bileşikleri ABX_3 kimyasal formülüne sahiptir. “A” ile “B” katyonları temsil etmekte ve “X” her ikisine de bağlanan bir anyonu ifade etmektedir. Bu bileşimsel esnekliği kullanarak, bilim insanları çok çeşitli fiziksel, optik ve elektriksel özelliklere sahip olacak şekilde perovskit kristalleri tasarlayabilmektedirler. İlaveten perovskit yapılar oluşturmak için çok sayıda farklı element bir araya getirilmektedir.

Perovskit malzemenin güneş hücrelerinde tercih edilme sebepleri arasında; yapısından kaynaklanan eşsiz yarı iletkenlik özelliği, uzun ömürlü olması, optik band aralığının ayarlanabilmesi, değişen iklim şartlarındaki güç dönüşüm verimliliği değerini koruyabilmesi, geleneksel güneş hücrelerine göre üretiminin daha hızlı olması ve daha düşük enerji gerektirmesi olarak sıralanabilir. Perovskit malzemeler, silisyum ile kıyaslandığında daha az malzeme ile aynı oranda güneş ışığını absorbe etme yeteneğine sahip olduğundan maliyeti de nispeten daha düşüktür.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Doğayı kirletmemesi ve enerjide dışa bağımlılığı yüksek ölçüde azaltmasından dolayı yenilenebilir enerji insanoğlunun hayatında önemli bir yere sahip olmuştur. Yenilenebilir enerjiden elektrik enerjisi elde etmek için birden fazla yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerden biri güneş enerjisinden elektrik enerjisinin üretildiği güneş hücreleridir. Bu bölümde “güneş hücrelerinin verimliliği” konusunu ele alan literatür bilgisi sunulmuştur.

Du et al. (2016) yapmış oldukları modelleme çalışmasında $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnI}_3$ tabanlı 1,3 eV'lik güneş hücresinin dar bant aralığına sahip kurşun halojenür perovskit ile kıyaslandığında geniş bir görünür emilim spektrumuna sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. İyi stabiliteye sahip kalay iyodür Perovskit Güneş Hücresi (PSC)'nin üretilmesindeki ilerlemeye katkı sağlamıştır. Güneş Hücresi Kapasitans Simülatörü (SCAPS-1D) ile tasarlanan güneş hücre modellerinde güneş hücresi performansının perovskit emilim tabakasının uyarma konsantrasyonunun ve Boşluk İletim Katmanı (HTL)'nin elektron afinitesinin ayarlanmasıyla bir dereceye kadar iyileştirilebildiğini ve perovskit emilim tabakasının kusur yoğunluğunun azaltılmasının ise hücre performansını önemli ölçüde iyileştirdiği görülmektedir. Perovskit emilim tabakasının uyarma konsantrasyonunun ($1,3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$), kusur yoğunluğunun ($1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) ve HTL (2,6 eV) elektron afinitesinin parametrelerini optimize ederek Akım Yoğunluğu (J_{SC}) = 31,59 mA/cm², Açık Devre Voltajı (V_{OC}) = 0,92 V, Doldurma Faktörü (FF) = %79,99 Güç Dönüşüm Verimliliği (PCE) = % 23,36 değerlerinde bulunmuştur (Du et al. 2016).

TiO_2 ve Spiro-OMETAD gibi elektron ve boşluk iletim malzemelerinin perovskitlerde ışığa duyarlı olduğu bilinmektedir. Bansal and Aryal (2016) tarafından metilamonyum kurşun halojenür tabanlı perovskit dayalı düzlemsel güneş hücresi için çeşitli alternatif Elektron İletim Katmanı (ETL) ve HTL'ler SCAPS - 1D ile araştırılmıştır. ETL katmanı olarak TiO_2 , CdS, ZnO ile HTL katmanı olarak Spiro-OMETAD içeren metilamonyum kurşun halojenür tabanlı güneş hücresi modelleri üzerinde çalışılmıştır. ETL ve HTL'nin simüle edilmiş değerleri hesaplanmış olup en iyi verimlilik değeri TiO_2 /Spiro-OMETAD modelinde 21,17 olarak hesaplanmıştır.

SCAPS-1D tarafından hesaplanan en iyi verimlilik değeri % 21,17 olarak $\text{TiO}_2/\text{Spiro-OMETAD}$ modelinde elde edilmiştir (Bansal and Aryal 2016).

Jahanting et al. (2019) her bir katman kalınlığını değiştirerek hücrenin genel kalınlığını optimize etmek amacıyla iki farklı model tasarlamışlardır. Bu modeller üzerinden elektrik potansiyelini, elektron-boşluk konsantrasyonlarını ve her bir kalınlıktaki elektron-boşluk çiftinin üretim hızını, V_{OC} , I_{SC} ve PCE değerlerini hesaplamışlardır. Tasarlanan modellerden verimlilik değerlerini % 20,7 ve % 26,1 olarak belirlemişlerdir (Jahanting et al. 2019).

Bu çalışmada Chakraborty et al. (2019) SCAPS-1D kullanılarak emici perovskit malzemelerin (Cs_2TiBr_6 , Cs_2TiI_6 , Cs_2TiF_6 ve Cs_2TiCl_6) kalınlıklarının değerleri optimize edilerek farklı sonuçlar elde edilmiştir. Materyallerin bant aralığı sırasıyla Cs_2TiBr_6 , Cs_2TiI_6 , Cs_2TiCl_6 ve Cs_2TiF_6 için 1,6 eV, 1,8 eV, 2,23 eV ve 1,9 eV'dir. Bahse konu çalışmadaki PSC modelinde 3,4 eV bant aralığına sahip inorganik HTL olarak p-tipi CuScN kullanılırken ETL olarak n-tipi CdS kullanılmıştır. Çalışmada perovskit aktif katmanın kalınlığının 1,5 μm 'nin üzerine çıkması durumunda V_{oc} ve J_{sc} değerlerinin kayda değer ölçüde değişmediği belirtilmiştir. Sebebi ise taşıyıcı difüzyon uzunluklarının artması olabileceği olarak açıklanmıştır. Ayrıca, aktif perovskit katmanının 2,0 μm 'nin üzerindeki kalınlıkta; J_{SC} , V_{OC} ve PCE değerlerinde önemli bir artışa yol açmadığı ve bunun nedenin gelen fotonların aktif katmanının derinliklerine emilmesi olabileceği belirtmişlerdir (Chakraborty et al. 2019).

Islam et al. (2019) tarafından sırasıyla iki taşıma katmanı (TiO_2 ve NiO) ile sandviçlenen emici bir katman görevi gören kurşun içermeyen kalay tabanlı perovskit malzemenin performansını belirlemek için varsayımsal araştırmaya dayalı bir modelleme gerçekleştirilmiştir. Cihazın mimarisi $\text{FTO}/\text{TiO}_2/\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnBr}_3/\text{NiO}$ 'dur. Burada FTO , TiO_2 , $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnBr}_3$ ve NiO sırasıyla üst kontak, ETL, aktif katman ve HTL görevi yapmaktadır. Çalışmada $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnBr}_3$ katmanı kalay ve halojenür moleküllerinin biriktirme özelliklerine dayalı olarak çeşitli iletkenlik biçimleri sergilemektedir. Kusur yoğunluğunun artmasıyla, V_{oc} 'un kademeli olarak azaldığı ve kusur yoğunluğunun 10^{16} cm^{-3} 'ün üzerine çıkması J_{SC} ve FF değerlerinde önemli bir değişikliğe sebep olmaktadır. Bu sebeple, FF değerinin düşmesinde J_{SC} 'nin azalmasının etkili olduğu belirtilmiştir. Çalışmada önerilen hücrenin FF değeri $0,01\Omega$ R_s 'lik artışla

2. KAYNAK ÖZETLERİ

yaklaşık % 3,6 oranında azalmasına rağmen genel verimlilik üzerindeki etkisinin gerçekten küçük olduğunu vurgulanmıştır. Optimizasyona dayalı olarak % 21,66'lık en yüksek verime $\text{TiO}_2/\text{i-CH}_3\text{NH}_3\text{SnBr}_3/\text{p-NiO}$ güneş hücresi için ulaşılmıştır ($V_{OC} = 0,80$ V, $J_{SC} = 31,88$ mA/cm² ve $FF = 84,89$). Bu da Pb tabanlı perovskit güneş hücresi ile karşılaştırıldığında oldukça ümit verici olduğu belirtilmiştir. Ayrıca bu çalışma düşük maliyetli, toksik olmayan $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnBr}_3$ tabanlı perovskit güneş hücresinin fotovoltaik endüstrisinde potansiyel bir aday olduğunu başarıyla göstermektedir (Islam et al. 2019).

Al-Hattab et al. (2021) bir Galyum Selenit (GaSe) tampon katmanı ve bir İndiyum Kalay Oksit (ITO) yansımaya önleyici filminden oluşan yeni bir İndiyum Galyum Selenit (CIGS) tabanlı güneş hücre yapısı elde edilmiştir. Ayrıca yapı üzerinde arka yüzdeki yük taşıyıcı kayıplarını azaltmak için bir CIGS-P⁺ eklenmesi ile incelenen güneş hücresinin verimliliğinin arttığı gözlenmiştir. Çalışmada oluşturulan model farklı alıcı yoğunluklarına sahip iki soğurma katmanı olarak CIGS, bir tampon katmanı olarak GaSe ve yansımaya önleyici katman olarak ITO'dan oluşmaktadır. CIGS (Ga/Ga+In)'nin ayarlanabilir bant aralığı ile yüksek soğurma katsayısı gibi birçok avantajı bulunmaktadır. CIGS güneş hücrelerinin % 20'nin üzerinde bir dönüşüm verimliliğine sahip olduğu bilinmektedir. 1 µm kalınlıkla CIGS emici katman kullanıldığında % 17,26'lık bir PCE elde edilmiştir. Literatürdeki çalışmalarda % 12 ila 13 arasında verimliliğe sahip ultra ince CIGS güneş hücreleri oluşturmak için çeşitli teknikler kullanılmıştır. İlâveten güneş hücrelerinin verimliliğini % 13,5'e arttırmak için 0,385 µm kalınlığında ultra ince In, Ga, Se emici katmanları kullanılmıştır. Bu verimlilik değeri kalınlıkları 2,5 µm ila 4 µm arasında değişen emici katmanlara sahip geleneksel CIGS güneş hücrelerinin verimliliğinden daha düşüktür. CIGS malzemelerinin dezavantajı indiyum ve galyum bileşenlerinin maliyetinin yüksek olmasıdır. Sonuç olarak çalışmada, CIGS ince film güneş hücrelerinin kullanımı sınırlı kalmış ve kaybın telafisi için CIGS emici katmanının kalınlığının azaltılarak indiyum ve galyum kullanımının azaltılması düşünülmüştür. Çok küçük kalınlıklar kullanılması sonucunda % 33 değerinde verim elde edilmiştir (Al-Hattab et al. 2021).

Bir başka çalışmada, SCAPS-1D yardımıyla aktif katman olarak üç perovskit malzeme (MASnI_3 , MAPbI_3 ve FAMASnGeI_3) kullanarak yeni bir güneş hücresi simüle edilmiş ve % 30,77'lik PCE değeri bulunmuştur (Ahangarkola et al. 2022). Üçlü aktif katmanlı PSC'nin performansı tek (MASnI_3) ve çift (MAPbI_3 ve

2. KAYNAK ÖZETLERİ

FAMASnGeI₃) aktif katmanlı PSC ile karşılaştırılmış ve üçlü aktif katmanlı PSC'nin tek ve çift katmanlı yapılara göre daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, HTL olarak inorganik Cu₂O kullanıldığı durumda PCE'nin değeri % 31,04'e çıktığı gözlemlenmiştir. Ek olarak toplam aktif katman kalınlığı sabit tutulup emici katman (MASnI₃) kalınlığının artırılmasıyla % 31,44'lük PCE elde edilmiştir (Ahangarkola et al. 2022).

Belarbi et al. (2022) perovskit güneş hücresinin temel özelliklerini simüle etmişlerdir. Güneş hücresi (ITO/PEDOT: PSS/CH₃NH₃PbI₃/ZnO/SnO₂) SCAPS-1D yardımıyla tasarlanmıştır. Bu çalışmada, V_{OC}, J_{SC}, η ve FF gibi elektriksel parametrelerin perovskit soğurucu tabaka (CH₃NH₃PbI₃) ve elektron taşıyıcı tabaka (ZnO) gibi malzeme parametrelerindeki değişimle tepkilerini incelemek amaçlanmıştır. Optimize edilmiş performansı incelemek için kalınlık, seri direnç ve sıcaklık değiştirildi. SCAPS-1D yazılımı kullanılarak yapılan modelleme sonuçları güneş hücresinin en yüksek verimliliğine CH₃NH₃PbI₃ ve ZnO kalınlıklarının sırasıyla 0,6 μm ve 0,2 μm olduğu ve optimum sıcaklık değerinin 300 K olduğu durumda ulaşabileceğini göstermektedir. Önerilen yapı için % 20,2524'lük bir PCE, % 94,684'lük bir FF, 25,595 mA/cm²'lik J_{SC} ve 0,835 V'lük V_{OC} elde edilmiştir (Belarbi et al. 2022).

Bu çalışmalardan bir diğeri Ullah et al. (2024) PSC'de yüksek PCE elde etmek için ışığı yönetimi optimize edilerek ışıkla ilgili kayıpları en aza indiren nano yapıları ile bu yapıların temel özelliklerini incelemişlerdir. Metilamonyum Kurşun İyodür (CH₃NH₃PbI₃) tabanlı HTL içermeyen nano dokulu PSC'lerin cihaz modellemesi gerçekleştirilmiştir. ETL olarak güneş hücrelerinde en çok tercih edilen Çinko oksit (ZnO) kullanılmıştır. ETL, elektronların perovskit katmandan dış devreye hareketini kolaylaştırmada çok önemli bir rol oynayarak güneş hücresinin genel verimliliğine katkıda bulunmaktadır. Bundan dolayı ZnO ile aktif katmanın yüzeyindeki nano dokuyu ve yüksekliği optimize edilerek serbest HTL yapısındaki verim kaybı önlenmiş ve PCE değeri %14,87 olarak elde edilmiştir. Modelleme sonuçları HTL katmanı kullanılmamasının PCE değerinde %15'lere kadar azaldığını göstermektedir. Çalışmada, PSC'lerde nanoyapıların kullanılması, güneş hücrelerinin PCE değerini önemli ölçüde etkilediği belirtilmiştir (Ullah et al. 2024).

2. KAYNAK ÖZETLERİ

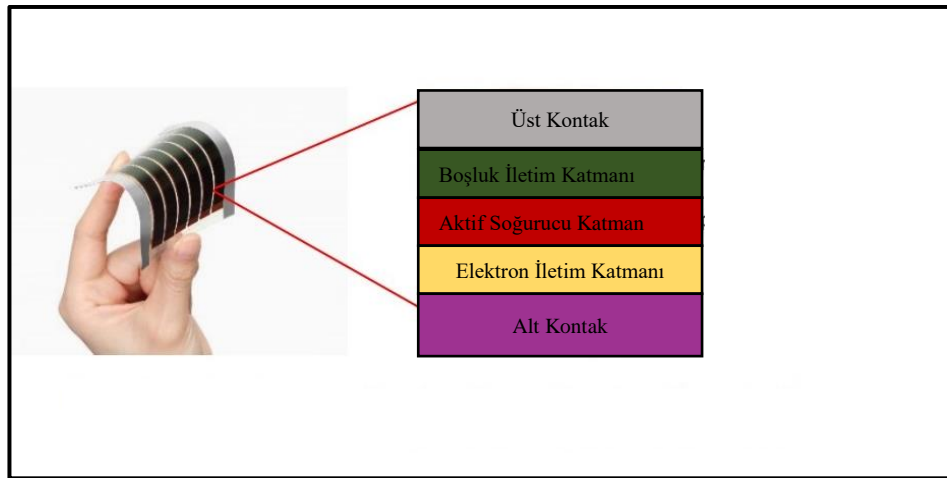
Çalışmada Gou et al. (2024) üçlü katyon ($\text{Cs}_x(\text{MA}_{0.17}\text{FA}_{0.83})_{1-x}\text{Pb}(\text{I}_{0.83}\text{Br}_{0.17})_3$) yapıya sahip verimli bir perovskit güneş hücresi önerilmiş ve SCAPS-1D kullanılarak teorik olarak optimize edilmişlerdir. Ayrıca kalınlık, katkılama yoğunluğu, kusur yoğunluğu ve bant aralığı gibi soğurucu katmanın parametreleri optimize edilmiş olup elektron afinitesi, kalınlığı ve katkılama yoğunluğu değiştirilerek ETL ve HTL optimize edilmiştir. Emici tabaka kalınlığı ve katkılama yoğunluğunun optimizasyonunun cihazın verimliliğinde önemli bir iyileştirme sağladığı, ETL ve HTL parametrelerinin her ikisinin de cihaz performansı üzerinde küçük bir etki gösterdiği gözlemlenmiştir (Gou et al. 2024).



3. MATERYAL ve YÖNTEM

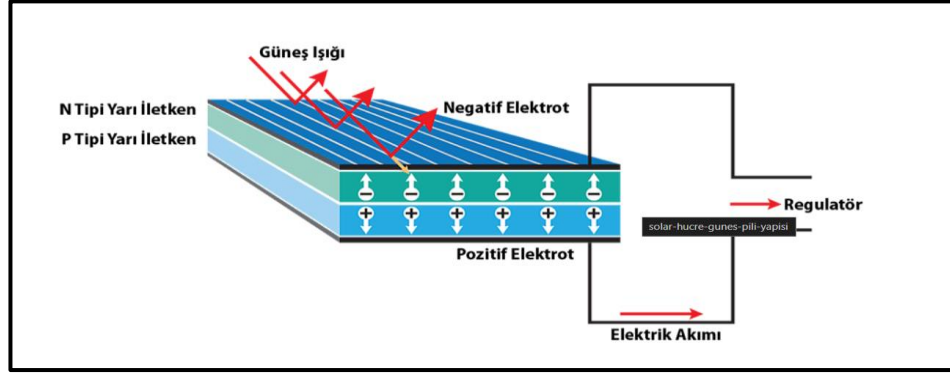
3.1. Güneş Hücresi

Güneş hücresi güneş ışınlarını doğrudan elektriğe dönüştürebilen elektronik sistemlere denir. Şekil 1.1'de görüldüğü üzere güneş hücresinde üst-alt kontak, soğurucu katman ve boşluk-elektron iletim katmanları bulunmaktadır. ETL, fotojenlenmiş elektronların perovskit katmanından çıkarılmasında önemli bir role sahip olmakla birlikte fotovoltaj kayıplarını önlemek için boşlukların rekombinasyonunu baskılayan ve yüksek cihaz performansını kolaylaştıran bir boşluk birleştirme katmanı görevi görmektedir (Wang et al. 2019). HTL, boşlukları perovskit filminden etkili bir şekilde çıkarmak ve normal PSC'ler de boşlukları metal elektroda taşımak için önemli bir rol oynamasının yanı sıra HTL'ler perovskit film ve metal elektrotun doğrudan temasını önlemek için bir bariyer görevi de görmekte ve normal PSC'lerde elektronların ve boşlukların potansiyel rekombinasyonunu azaltmaktadır. Özellikle, HTL perovskit tabakasının tane boyutlarını ve tane sınırının miktarını önemli ölçüde etkileyebilir ve bu da güç dönüşüm verimliliklerini ve PSC'lerin uzun vadeli kararlılığını güçlü bir şekilde etkiler (Huang et al. 2022). Soğurucu katman ise genellikle tüm ince film güneş hücrelerinin en temel yapısı olarak kabul edilen yarı iletken bir malzemedir. En yüksek sayıda fotonu soğuran ve buna karşılık olarak elektronları fotoakım oluşturmak için iletim bandına uyaran katman olarak bilinmektedir.



Şekil 1.1. Örnek Güneş Hücresi Modeli (Anonim 2024)

3.2. Güneş Hücresi Çalışma Prensibi



Şekil 1.2. Güneş Hücresi Çalışma Prensibi (Anonim 2024)

Şekil 1.2’de güneş hücresinin çalışma prensibi görülmektedir. Yarı iletken eklem güneş hücresi olarak çalışması için eklem bölgesinde, iki aşamalı fotovoltajik dönüşümün sağlanması gerekmektedir. İlk aşamada eklem bölgesine ışık düşürülerek elektron-boşluk çiftleri oluşturulur. İkinci aşamada ise oluşan elektron-boşluk çiftleri bölgedeki elektrik alan yardımıyla birbirinden ayrılır. Birbirinden ayrılan elektron-boşluk çiftleri güneş hücresinin uçlarında yararlı bir güç çıkışı oluşturmaktadır. Fotoelektrik olay prensibine dayanarak, güneş enerjisi pozitif-negatif (PN) eklemine geldiğinde fotonlarda bulunan elektron yükü PN maddeleri arasında 0,15-0,5 Volt civarında bir potansiyel fark yani gerilim oluşturur.

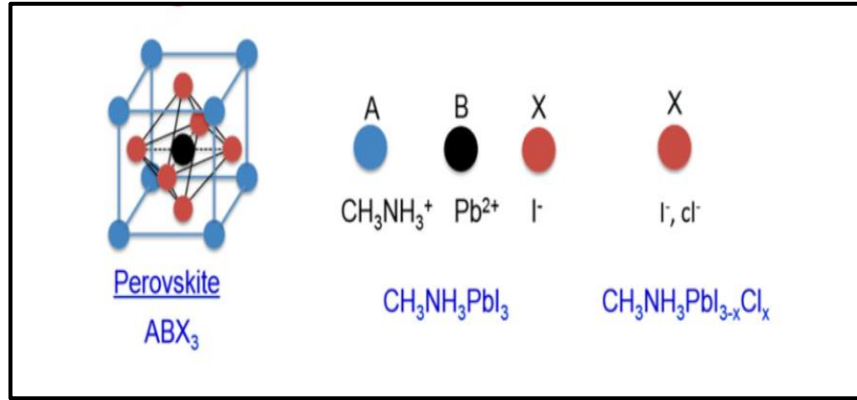
Güneş ışığının yapısında bulunan fotonlar güneş hücresinin yüzeyi tarafından soğurulduğunda; elektronların eklem pozitif tarafına, boşlukların ise eklem negatif tarafına doğru hareket etmesi sonucunda elektrik akımı oluşmaktadır. Güneş enerjisi üzerine düşen ışınım arttıkça, güneş hücresinin ürettiği elektrik akımı da artmaktadır.

3.3. Perovskit Güneş Hücresi

Perovskitler, ABX_3 formülü ile ifade edilmekte olup Şekil 1.3 ile gösterilmektedir. ABX_3 formülü incelendiğinde A yerine Metilamonyum (CH_3NH_3) B yerine Kurşun (Pb) ve X yerine Klor (Cl), Brom (Br) ya da İyot (I) kullanıldığı görülmektedir. Yapıda kullanılan malzemelere kimyasal açıdan bakılacak olunursa geniş bir organik katyon metilamonyum (CH_3NH_3), küçük katyon kurşun (Pb) ve halojen anyon olarak Klor (Cl), Brom (Br) ya da İyot (I) kullanıldığı görülmektedir. ABX_3 ’te A, B ve X’in herhangi birinde değişiklik yapılması bant aralığını değiştirir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Band aralığı, kurşun kalay oranını değiştirerek 1,55 eV ve 1,17 eV arasında ayarlanabilir (Purkayastha and Mallajyosula 2021).



Şekil 1.3. Perovskit Güneş Hücresinin Kristal Formülü (Yılmaz vd. 2019)

Literatürde en yaygın olarak kullanılan Silisyum tabanlı güneş hücrelerinin zor üretimi ve maliyetli olmasından dolayı organik güneş hücreleri üzerinde çalışmalar yapıldığı görülmektedir. Ancak organik güneş hücrelerinin piyasada bulunan Silisyum tabanlı güneş hücrelerine göre verim değerleri çok düşüktür. Aynı zamanda organik tabanlı güneş hücreleri silisyum tabanlı güneş hücreleri ile karşılaştırıldığında daha kararsız olduğu gözlenmektedir. Bu yüzden hali hazırda organik güneş hücresi ailesinden Perovskit güneş hücreleri üzerinde çalışmalar devam etmektedir.

Perovskit güneş hücreleri ilk üretimlerinden (2009) çok kısa bir zaman sonrasında (2015) verim değeri yaklaşık % 20'leri geçerek silisyum tabanlı hücreler ile karşılaştırılabilir duruma gelmiştir. Üretimi kolay, maliyeti düşük ve doğa dostu bir ürün olan perovskit güneş hücreleri kararsızlık problemlerinin aşılmasından sonra gelecekte ticari güneş hücresi olma potansiyeli yüksek bir malzemedir (Yılmaz vd 2019).

3.4. Güneş Hücresini Oluşturan Katmanlar

3.4.1. Elektron iletim katmanı (ETL)

Güneş hücrelerinde yüksek performans elde etmek ve enerji kaybını azaltmak için, iyi bir ışık geçirgenliğine, uyumlu bir enerji seviyesi eşleştirilmesine, yüksek

elektron hareketliliğine ve hetero eklem yapılar arasında iyi arayüz oluşturulmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Tasarlanan hücrenin üretim maliyetlerini düşürülmesinin yanı sıra dayanıklılık, kararlılık, ışık emilimi ve verimliliğin artırılması gibi özelliklerden dolayı ETL olarak tercih edilecek malzemenin yapısı çok önemlidir. Bu çalışmada, literatürde sıklıkla ETL olarak kullanılan malzemeler araştırılmış ve performansa etkisi incelenmiştir. Çalışmada tercih edilen ETL malzemeleri aşağıda yer almaktadır (Fatima et al. 2024).

3.4.1.1. Titanyumdioksit (TiO_2)

TiO_2 , görünmez ultraviyole ışığı soğurarak görünür ışığın içinden geçmesine izin vermesi nedeniyle güneş hücrelerinde ideal bir yarı iletken olarak kullanılmaktadır. Ayrıca çevre dostu olması da kullanımını yaygınlaştırmaktadır. Mükemmel optoelektronik özellikleri, cam alt tabakalarla iyi yapışması ve uzun vadeli kararlılığı nedeniyle TiO_2 , perovskit tabanlı güneş hücrelerinde yük iletim katmanı olarak yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Güneş hücreleri teknolojisinde ve uzay araçlarında da kullanılmaktadır (Leonard et al. 2022).

3.4.1.2. Kalaydioksit (SnO_2)

SnO_2 ham kalaydan türetilen birincil cevher olup sıcak havanın erimiş malzeme üzerinden akıtılmasıyla sentetik olarak üretilmektedir. Ortaya çıkan oksit tozu endüstriyel cilalarda, cam ve seramik kaplamalarda, çok çeşitli inşaat malzemelerinde, gaz sensörlerinde ve güneş hücresi uygulamalarında ETL katmanı olarak kullanılmaktadır. Diğer ETL'lere göre SnO_2 , daha düşük fotokatalitik aktivite, daha düşük sıcaklıkta işleme, daha geniş bant aralığı ve daha üstün ultraviyole görünür şeffaflığı nedeniyle yaygın kullanılan n-tipi metal oksittir (Mbilo et al. 2024). Yüksek elektron iletkenliği ve iyi enerji seviyesi eşleşmesi nedeniyle SnO_2 elektron iletim katmanı olarak sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak SnO_2 nanopartiküllerinin kümelenmesi ve bunların cam alt tabaka ile zayıf temas etmesine neden olur ve film yüzeyinde kusurlar oluşur (Zhang et al. 2023).

3.4.2. Boşluk iletim katmanı (HTL)

Anot ara yüzey katmanları olarak da adlandırılan boşluk iletim katmanları elektron akışını bloke ederken boşluk oluşumunu ve taşınmasını kolaylaştırır. Boşluk iletim malzemeleri, fotoaktif katman ile anot arasında biriktirilerek cihazın performansını artırır (Hatamvand et al. 2023). Bu çalışmada, literatür de sıklıkla HTL olarak kullanılan malzemeler araştırılmış ve performansa etkisi incelenmiştir. Çalışmada tercih edilen HTL malzemeleri aşağıda yer almaktadır.

3.4.2.1. Kristalin Silisyum (c-Si)

Silisyum 1,12 eV'lik bir enerji bant aralığına sahiptir. Bu değer tek bir ışık soğurucu kullanılarak güneşten elektriğe enerji dönüşümü için optimum değere yakındır. Bant aralığı dolaylı olduğundan (yani değerlik bandı maksimum değeri ile iletim bandı minimumuyla aynı konumda olmadığından) silisyum nispeten düşük bir soğurma katsayısına sahiptir. Ancak yüzey yansıma önleyici kaplamalar ve arka aynalar gibi uygun ışık yöntemi tasarımıyla daha verimli ışık emilimi elde edilir. Geleneksel levha tabanlı güneş hücrelerinde kullanılan c-Si, ince film güneş hücre teknolojilerinde, çok eklemler güneş hücrelerinde, uzay tabanlı güneş enerjisi için uzay araçlarında yaygın olarak kullanılır (Goetzberger et al. 1998).

Kristalin silisyum (c-Si), düşük maliyeti, % 26'ye kadar iyi verimliliği, uzun vadeli kararlılığı ve sağlam yapısından dolayı güneş hücre uygulamalarında yaygın kullanılan bir malzemedir. Ayrıca kristal silisyumdan üretilen güneş hücreleri uzun kullanım ömrüne sahip olmaktadır. Söz konusu güneş hücrelerinin ömrünün 25 yıldan daha fazla olduğu ve 25 yılın üzerindeki sürelerde orijinal güçlerinin %80'inden fazlasını kullanmaya devam ettiği ön görülmektedir (Wang et al. 2021).

3.4.2.2. Spiro-OMETAD

Spiro-OMETAD, ışığı emici ve elektron taşıyıcı tabakaların enerji seviyeleriyle uyumlu özelliğe sahiptir. İlâveten ayarlanabilir özellikteki geniş bir bant aralığına (yaklaşık 3 eV) ve perovskit katmanlarıyla iyi hizalanmanın temelini oluşturan nispeten

derin bir HOMO enerji seviyesine sahiptir. Spiro-OMETAD'ın erime sıcaklığı yüksektir ve bu da cihazın termal kararlılığı için güçlü bir destek sağlar. Bu özellikleri nedeniyle Spiro-OMETAD, sert ve esnek güneş hücrelerinin geniş alan üretimi için oldukça uygun bir malzemedir. Spiro-OMETAD, iyi elektronik özelliklerini korurken yüksek geçiş sıcaklığı, morfolojik kararlılık ve kolay işlenebilirlik sağlar. Sonuç olarak Spiro-OMETAD, yüksek performansı nedeniyle PSC'lerde kullanılan en yaygın boşluk iletim malzemesidir. Spiro-OMETAD, organik ışık yayan diyotlarda, perovskit güneş hücrelerinde ve polimer tabanlı organik güneş hücrelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Hatamvand et al. 2023).

3.4.3. Aktif (Soğurucu) katman

Güneş hücrelerinde bulunan aktif katman, üzerine düşen ışığı soğurup üstünde ve altında bulunan ETL ile HTL katmanları yardımıyla elektrik alan oluşturmaktır. Son dönemlerde güneş hücrelerinde sağlanan yüksek emilim katsayısı ($\sim 10^5 \text{ cm}^{-1}$), düşük eksiton bağlanma enerjisi ($\sim 20 \text{ mV}$) ve taşıyıcının nispeten uzun difüzyon süresi ($> 1 \mu\text{m}$) ile güç dönüşüm verimliliği değerinde dikkate değer artış gözlemlenmektedir. PSC'ler, silisyum güneş hücrelerinin aksine daha az maliyetli ve üretimi daha basit ıslak kimyasal işlemle yapılabilmektedir. Ayrıca aktif katmanlar çeşitli optoelektronik ve fotonik cihaz uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Mohammed et al. 2024).

3.4.3.1. Metilamonyum Kalay İyodür ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnI}_3$)

Metilamonyum, bir hidrojen atomu veya bir metil grubuyla değiştirilmiş renksiz bir gaz olup en basit derecede birincil amonyaktır. Doğada metanol, etanol, tetrahidrofuran veya su içinde bir çözelti olarak veya basınçlı metal kaplarda susuz gaz olarak bulunur (Mohammed et al. 2024).

Güneş spektrumundan gelen foton sayısının en yoğun olduğu yere karşılık gelen 1,39 eV bölgesinde, 100 nm - 1.000 nm aralığında yüksek taşıyıcı difüzyon uzunluklarına ve yüksek soğurma katsayısı vb. özelliklere sahip olmasının yanı sıra çözelti tabanlı üretilebilmeleri gibi avantajlarından dolayı bu çalışmada perovskit katman olarak metilamonyum tercih edilmiştir. Metilamonyum, fotovoltaik

uygulamaları, uzay uygulamaları, süper kapasitörlerle uyum ve fotovoltaik tahrikli kataliz dahil olmak üzere geniş bir yelpazedeki pratik uygulamalarda kullanılmaktadır (Sunny et al. 2021).

$\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnI}_3$ uygun bant aralığı, yüksek emilim katsayısı, yeryüzünde bol miktarda bulunması ve toksik olmaması nedeniyle PSC'lerde, kurşun tabanlı metilamonyum perovskit güneş hücrelerine göre alternatif perovskit emici malzemeler olarak kullanılmaktadır (Mohammed et al. 2024). Tüm bu avantajlarının yanında sıcaklık artışı olan durumlarda dahi tüm parametrelerin sabit kalması (kararlılık), maliyet etkinliği ve iyileştirilmiş performansı nedenleriyle çalışmamızda metilamonyum tabanlı perovskit malzeme tercih edilmiştir.

3.4.4. Kontaklar

Güneş hücresi sistemlerinde, elektrik akımının harici bir yük üzerinden devreyi tamamlaması için iki ek elektrik temas katmanına ihtiyaç vardır. Bunlar üst ve alt kontak olmak üzere ikiye ayrılır. Üst kontaklar, bir güneş hücresi tarafından üretilen akımı toplamak için gereklidir. Alt kontaklar ise, güneş hücresinin altındaki gölgelemeden oluşan kayıpları tamamen ortadan kaldırmak için yerleştirilir (Ogbomo et al. 2017). Piyasada üst kontak olarak ITO ve FTO, alt kontak olarak da Gümüş (Ag) ve Altın (Au) en yaygın kullanılan kontak çeşitlerindedir. Tez çalışmasında, şeffaf iletkenliği ve işlem maliyetinin düşüklüğünden dolayı üst kontak olarak FTO, iyi iletkenliğinden dolayı ise alt kontak olarak Au tercih edilmiştir.

3.4.4.1. FTO

FTO, iyi ışık geçirgenliğine, elektron yük hareketliliğine ve yüksek bant aralığına sahip bir malzemedir. FTO genellikle ITO'ya kıyasla daha pürüzlüdür. Ancak ITO levha direnci ısıtma ile artacağından ve nihai cihazda daha yüksek seri direnç oluşmasına yol açacağından tercih edilmez. FTO, görünür dalga boylarında daha fazla ışık geçirgenliğine ve daha fazla kararlılığa sahiptir. Güneş hücrelerinde ve uzay çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Latif vd 2021).

3.4.4.2. Altın (Au)

Au, Ag vb. malzemelerle kıyaslandığında kırılma katsayısının düşük olması ve yarı iletken malzemeler ile karşılaştırıldığında iletkenliğinin daha verimli olmasından dolayı kontak malzemesi olarak sıklıkla tercih edilmektedir (Ogbomo et al. 2017).

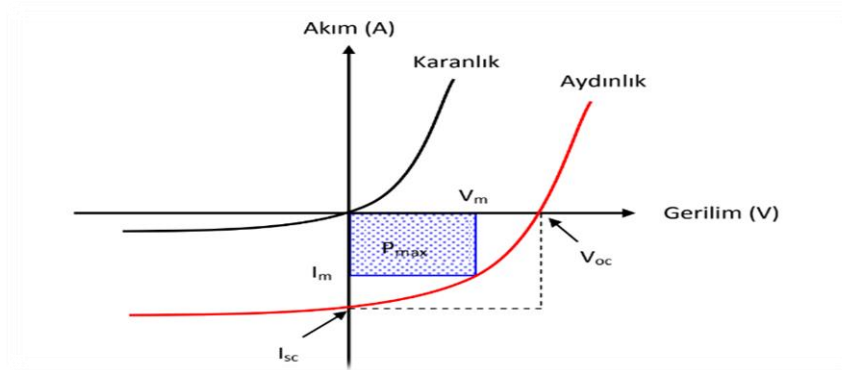
3.5. Güneş Hücrelerinde Performans Parametreleri

3.5.1. Güç dönüşüm verimi

$$\eta = P_{max} * P_{GI} \quad (3.1)$$

$$P_{max} = I_m * V_m \quad (3.2)$$

Burada P_{max} , hücreden elde edilebilecek maksimum güç, P_{GI} ise gelen ışığın gücüdür. Maksimum çıkış gücü P_{max} , ölçülen akım-gerilim (I-V) karakteristiğinden elde edilir. Aşağıda ifade edilen Şekil 1.4'de tipik bir güneş hücresinin karanlık ve aydınlık ortamdaki I-V karakteristikleri gösterilmiştir. Maksimum çıkış gücü, aydınlık ortamda ölçülen I-V karakteristiğinin IV. bölgesinde elde edilebilecek en büyük alan (taralı) olarak belirtilmiştir (Sajjad 2013).



Şekil 1.4. Güneş Hücresi Karakteristik Özelliği (Demirci 2023)

I_m ve V_m tarafından sınırlanan alanın kısa devre akımını I_{sc} ile açık devre gerilimi V_{oc} tarafından sınırlanan alana oranı da dolgu faktörü (FF) olarak tanımlanır.

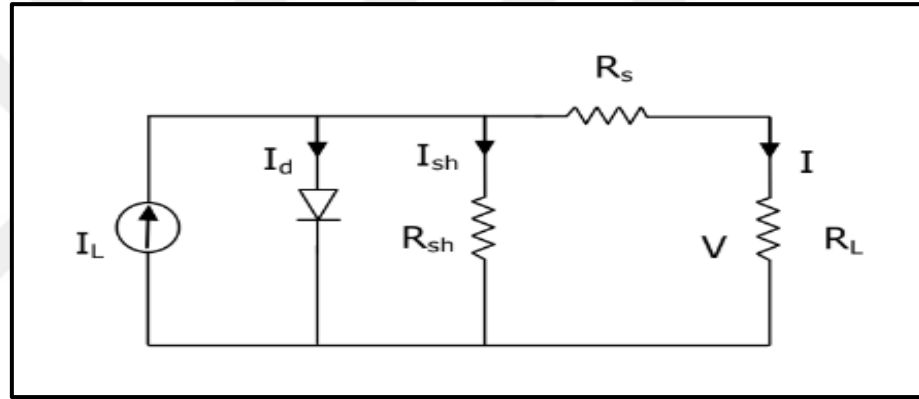
$$FF = (I_m * V_m) / (I_{sc} * V_{oc}) = P_{max} / (I_{sc} * V_{oc}) \quad (3.3)$$

Buna göre λ dalga boylu ışık için güç dönüşüm verimi $\eta(\lambda)$,

$$\eta(\lambda) = (I_{SC}(\lambda) * V_{OC}(\lambda) * FF(\lambda)) / P_{GI} \quad (3.4)$$

3.5.2. Açık devre gerilimi

Yarıiletken tabanlı aygıtların elektriksel davranışını, Şekil 1.5 yardımıyla elektriksel bir eşdeğer devre ile ifade etmek en çok kullanılan yöntemlerden biridir. Elektriksel eşdeğer devredeki yük akımı (I_L) ile gösterilen akım kaynağı aydınlatma sonucu güneş hücresi tarafından üretilen akımı temsil eder. I_L akımı, herhangi bir birleşme olmadan birim zamanda ayrılan elektron-boşluk çiftlerinin sayısına eşittir (Sajjad 2013).



Şekil 1.5. Güneş Hücresi Elektriksel Eşdeğer Devresi (Altılar 2023)

Şönt direnci (R_{sh}) yük taşıyıcılarının verici-alıcı ara yüzeyindeki yeniden birleşmelerini temsil etmektedir. Seri konumdaki R_s direnci verici-alıcı ara yüzeyinden uzaktaki birleşmeleri temsil etmektedir. R_s direnci aynı zamanda, iletim ortamındaki yük taşıyıcıların hareketliliğini de içerir. Yük direnci (R_L)'nin uçları arasında oluşan gerilimi güneş hücresi tarafından üretilen gerilimi temsil eder ve değeri R_L yük direncinin değerine bağlı olarak 0 ile V_{OC} arasında değişir (Sajjad 2013).

3.5.3. Kısa devre akımı

Kısa devre akımı I_{SC} kısa devre koşullarındaki ($R_L=0$ olması) $V=0$ alınarak bulunur. Elektriksel eşdeğer devrede R_L direncinin kısa devre yapılmasıyla;

$$I_{SC} = I_L - I_{SH} - I_d \quad (3.5)$$

ifade edilir.

Yukarıdaki denklem bir güneş hücresinden elde edilebilecek en büyük akımın ifadesidir. I_L ile gösterilen ışık akımı aydınlatma şiddeti ile doğrusal olarak artar (Sajjad 2013).

3.5.4. Doldurma faktörü (FF)

Doldurma (Alan) Faktörü, güneş panelinin verimliliğinin anahtarıdır. Panelin güneş ışığını elektriğe ne kadar iyi dönüştürdüğünü gösterir. FF, panelin malzeme kalitesi ile tasarımı hakkında bilgi vermektedir. FF, bir hücrenin mümkün olan maksimum güç çıkışını gerçek güç çıkışına bölünmesiyle hesaplanmaktadır (Sajjad 2013).

$$FF = P_{max} / (J_{sc} * V_{OC}) \quad (3.6)$$

formülü ile ifade edilir.

3.5.5. Dış kuantum verimi

Bir güneş hücresini karakterize etmekte kullanılan parametrelerden bir diğeri de dış kuantum verimidir (η_{DKV}). Dış kuantum verimi, güneş hücresi üzerine düşen fotonların ne kadarının fotoakıma dönüştüğünün bir göstergesidir (Sajjad 2013).

$$\eta_{DKV} = (\text{Dış devredeki elektronların sayısı}) / (\text{Gelen fotonların sayısı}) \quad (3.7)$$

Dış kuantum verimi, bir güneş hücrelerinde ışık enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi esnasında gerçekleşen beş olayın her birindeki verimlerin çarpımına eşittir (Sajjad 2013).

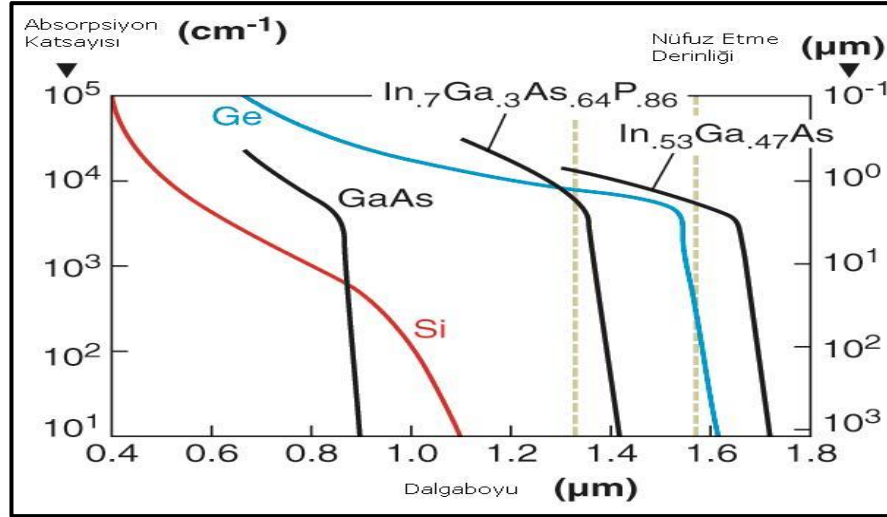
$$\eta_{DKV} = \eta_A * \eta_{ED} * \eta_{YT} * \eta_{YA} * \eta_{YTOP} \quad (3.8)$$

ifade edilir. Burada η_A absorpsiyon verimi, η_{ED} eksiton difüzyon verimi, η_{YT} yük transfer kuantum verimi, η_{YA} ayrışma verimi η_{YTOP} ise yük toplama verimidir (Sajjad 2013).

3.6. Güneş Hücrelerinde Verimliliğe Etki Eden Parametreler

3.6.1. Soğurma katsayısı

Soğurma derinliği fotonların yarı iletken malzemede ne kadar mesafe kat edebileceğinin ölçüsüdür. Soğurma katsayısı ve soğurma derinliği ters orantılıdır. Soğurma katsayısı küçük olan malzemelerde güneş hücresinin bütün fotonları soğurabilmesi için hücre kalınlığı büyük olmalıdır. Ancak hücre kalınlığı arttığında tuzak destekli (SR) rekombinasyonu artacağından karanlık akım değeri artmaktadır. Bu sebeple soğurma katsayısı ve hücre kalınlığı optimize edilmesi gereken parametrelerdir. Şekil 1.6'da güneş hücresinde kullanılan çeşitli yarı iletken malzemeler için soğurma katsayılarının dalga boyu ve enerji ile değişimi görülmektedir. Güneş hücreleri yarı iletken aygıtlar olduğundan, güneş hücreleri spektral olarak seçici soğuruculardır. Bu da prensipte bir fotovoltaiik kombi panelindeki soğurucuların soğurma faktörünün geleneksel bir güneş termal kollektöründeki siyah soğurucunun soğurma faktöründen daha düşük olduğu anlamına gelir. Bant aralığından daha küçük foton enerjileri için meydana gelen soğurma esas olarak serbest taşıyıcı soğurmadır ve serbest taşıyıcı soğurma katsayısı yerel taşıyıcı konsantrasyonuyla orantılıdır. Yüksek serbest taşıyıcı konsantrasyonlarına sahip bölgelerin sınırlı kalınlığı nedeniyle bu soğurma mekanizması nispeten zayıftır. Dolayısıyla optik sınırlama derecesi, bant aralığından daha küçük enerjiye sahip fotonlar için spektral soğurma faktörü üzerinde güçlü bir etkiye sahip olacaktır (Santbergen et al. 2008).



Şekil 1.6. Soğurma Katsayılarının Dalga Boyu ve Enerji ile Değişimi (Anonim 2003)

3.6.2. Hücre sıcaklığı

Sıcaklık arttıkça, içsel yarı iletkenin bant aralığı küçülür ve açık devre voltajı diyot faktöründe görülen PN bağlantı voltajı azalır. Bu nedenle güneş hücrelerinin negatif bir sıcaklık katsayısı (β) vardır. Ayrıca fotoakım verildiğinde daha düşük bir çıkış gücü elde edilir çünkü yük taşıyıcıları daha düşük bir potansiyelde serbest bırakılır. FF hesaplamasıyla tanıtılan kural kullanılarak, aynı kısa devre akımı verildiğinde daha küçük bir teorik maksimum güçle sonuçlanır. Sıcaklığın artmasıyla içsel yarı iletkenin bant aralığı yine daralır, bu da daha fazla enerjinin emildiği anlamına gelir çünkü ışığın daha büyük bir yüzdesi yük taşıyıcılarını değerlik bandından iletim bandına yükseltmek için yeterli enerjiye sahiptir (Dincer et al. 2010).

3.6.3. Yüzey rekombinasyonu

Yüzey rekombinasyonunun, nano yapıları ince film güneş hücrelerinin performansını belirlemede önemli bir rol oynadığı gözlenmiştir. Rekombinasyon etkisi dikkate alındığında daha yüksek optik emilim yüksek dönüşüm verimliliği anlamına gelmemektedir. Hem yüzey rekombinasyon hızı hem de yapının geometrik parametreleri ince film güneş hücrelerinin verimliliği üzerinde büyük etkiye sahiptir. Geçmişte yapılan çalışmalar nano yapıları ışık hapseden yalnızca optik emilimi iyileştirmekle kalmayıp aynı zamanda yüzey rekombinasyonunu da artıracaklarını

göstermektedir. Bu nedenle maksimum dönüşüm verimliliği, optik emilim ve yüzey rekombinasyonuna bağlıdır (Da et al. 2013).

3.7. Güneş Hücresi Kapasitans Simülasyon Programı (SCAPS-1D)

SCAPS, Belçika Gent Üniversitesi Elektronik ve Bilgi Sistemleri Bölümünde geliştirilen tek boyutlu bir güneş hücresi tasarım programıdır. SCAPS-1D programı tarafından gerçekleştirilen modelleme, çeşitli güneş hücrelerinin performansının değerlendirilmesinde ve iyileştirilmesinde önemli bir husustur. Söz konusu modelleme programı ile bir fotovoltaik hücredeki tabakalarla ilgili olarak; kalınlık, elektron ilgisi, enerji bant genişliği, optik soğurma, kusur yoğunluğu, arayüz kusur yoğunluğu, katkı konsantrasyonları (N_D ve N_A), yük taşıyıcı hareketliliği ve rekombinasyon vb. çeşitli parametrelerin etkisini inceleyerek optimize etmeyi sağlamaktadır. İlâveten modelleme ile fotovoltaik hücredeki tabakaların çeşitli parametrelerinin ve çalışma sıcaklığı gibi çeşitli değişkenlerin etkisinin akım-voltaj, kapasitans-voltaj gibi farklı karakterizasyonlarının analiz edilmesine imkân vermektedir (Ongül 2024).

3.7.1. SCAPS-1D'de kullanılan matematiksel ifadeler

SCAPS-1D, aşağıda ifade edilen Poisson denklemi, elektronlar ve boşluklar için süreklilik denklemi ve yük taşınım denklemi gibi temel yarı iletken denklemlerin çözümüne dayanmaktadır (Ongül 2024).

Poisson denklemi, hücre içerisindeki elektrik alan ve potansiyel dağılımı elde etmek için kullanılmaktadır.

$$\partial^2 \psi / \partial x^2 = - \partial E / \partial x = - q / \epsilon (p - n + N_D^+ - N_A^-) \quad (3.9)$$

ψ elektrostatik potansiyel, E elektrik alan, q elektron yükü, ϵ elektriksel geçirgenliği, n elektronların yoğunluğu, p boşlukların yoğunluğu, N_D iyonize donör konsantrasyonu ve N_A iyonize akseptör konsantrasyonu olarak ifade edilmektedir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Süreklilik denklemleri, taşıyıcıların (elektronlar ve boşlukların) konsantrasyonundaki değişim oranını ifade etmek için kullanılmaktadır.

$$\frac{\partial n}{\partial t} = 1/q * (\partial J_n / \partial x) + G - R \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = 1/q * (\partial J_p / \partial x) + G - R \quad (3.11)$$

J_n elektron akım yoğunluğu, J_p boşluk akım yoğunluğu, R net rekombinasyon oranı, G taşıyıcı yük üretim oranı olarak ifade edilmektedir. Elektron ve Boşluklar için akım yoğunluğu denklemleri, elektronların ve boşlukların hücre yapısında sürüklenme ve difüzyon akımı hakkında bilgi vermektedir.

$$J_n = qn * \mu_n * E + q * D_n * (\partial n / \partial x) \quad (3.12)$$

$$J_p = qp * \mu_p * E - q * D_p * (\partial p / \partial x) \quad (3.13)$$

μ_n elektronların mobilitesi, μ_p boşlukların mobilitesi, D_n elektron difüzyon katsayısı ve D_p boşluk difüzyon katsayısı olarak ifade edilmektedir.



Şekil 1.7. SCAPS-1D Programında Güneş Hücresi Tasarımı

3. MATERYAL ve YÖNTEM

LAYER 1		layer 1
thickness (μm)	Katman Kalınlığı	2.000
The layer is pure A: y = 0, uniform		uniform pure A (y=0)
Semiconductor Property P of the pure material		pure A (y = 0)
bandgap (eV)	Band Genişliği	1.200
electron affinity (eV)		4.500
dielectric permittivity (relative)		10.000
CB effective density of states ($1/\text{cm}^3$)		1.000E+19
VB effective density of states ($1/\text{cm}^3$)		1.000E+19
electron thermal velocity (cm/s)		1.000E+7
hole thermal velocity (cm/s)		1.000E+7
electron mobility (cm^2/Vs)		5.000E+1
hole mobility (cm^2/Vs)		5.000E+1
<input type="checkbox"/> Allow Tunneling	effective mass of electrons	1.000E+0
	effective mass of holes	1.000E+0
no ND grading (uniform)		
shallow uniform donor density ND ($1/\text{cm}^3$)		1.000E+15
no NA grading (uniform)		
shallow uniform acceptor density NA ($1/\text{cm}^3$)		1.000E+15

Şekil 1.8. SCAPS-1D Programında Gerekli Parametreler

Yukarıdaki Şekil 1.7’de verilen SCAPS-1D ile tasarlanan güneş hücresi genel modelindeki fotovoltaiik parametreleri, SCAPS-1D yazılımı yardımıyla aydınlatma altındaki ($\text{AM } 1,5\text{G } 100 \text{ mW}/\text{cm}^2$) akım-gerilim karakteristiklerinden elde edilmiştir.

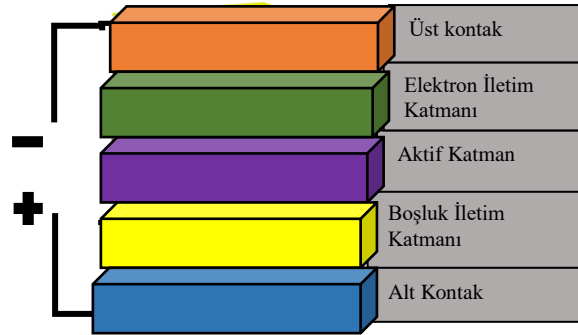
Şekil 1.7’nin sol tarafındaki kırmızı balon içerisinde kalan alanda alt kontak-ETL-Perovskit-HTL-Üst kontak modelleri oluşturulup, daha sonra Şekil 1.8 ile gösterilen ekranda oluşturulan her bir katman için (Alt-üst kontak, boşluk iletim katmanı, elektron iletim katmanı ve aktif Katman) katman kalınlığı, bant genişliği, dielektrik geçirgenlik, valans-iletim bandı yoğunluk derecesi, elektron ilgisi, elektron-boşluk hareketliliği gibi değerler tanımlanmıştır. Son olarak ise açık devre voltajı, kısa devre akımı, FF ve verim değerleri elde edilmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

SCAPS-1D Programı

Alex Niemegeers, Marc Burgelman, Koen Decock, Stefaan Degraeve ve Johan Verschraegen gibi birkaç araştırmacı SCAPS-1D'nin geliştirilmesine katkı sağlamışlardır. Başlangıçta program CuInSe_2 ve CdTe ailesinin hücre yapıları için geliştirilmiş ancak son gelişmeler programı kristal güneş hücrelerine (Si ve GaAs ailesi) ve amorf hücrelere (a-Si) de uygulanabilir hale getirmiştir (Gezgin et al. 2021).

Çalışmamızda SCAPS-1D yardımıyla Çizelge 1.1'deki malzemeler yardımıyla 28 çeşit hücre modeli test edilerek üst kontak– ETL – aktif katman (Perovskit Malzeme-Metilamonyum) - HTL ve alt kontak olacak şekilde güneş hücresi modellemesi ile 28 farklı sonuç elde edilmiştir. Bu güneş hücresi modellerinden, ETL olarak TiO_2 ve SnO_2 , üst kontak olarak optik geçirgenlik oranı yüksek olan FTO, HTL olarak Spiro-OMETAD ve c-Si, alt kontak olarak ise Au kullanılmıştır. Hücre modellerinde sadece alt kontak kalınlığı her hücre modeli için sabit tutulmuş, diğer katmanlarda kullanılan malzemelerin kalınlık değerleri artırılıp-azaltılmasına karşılık gelen sonuçları belirlenmiştir.



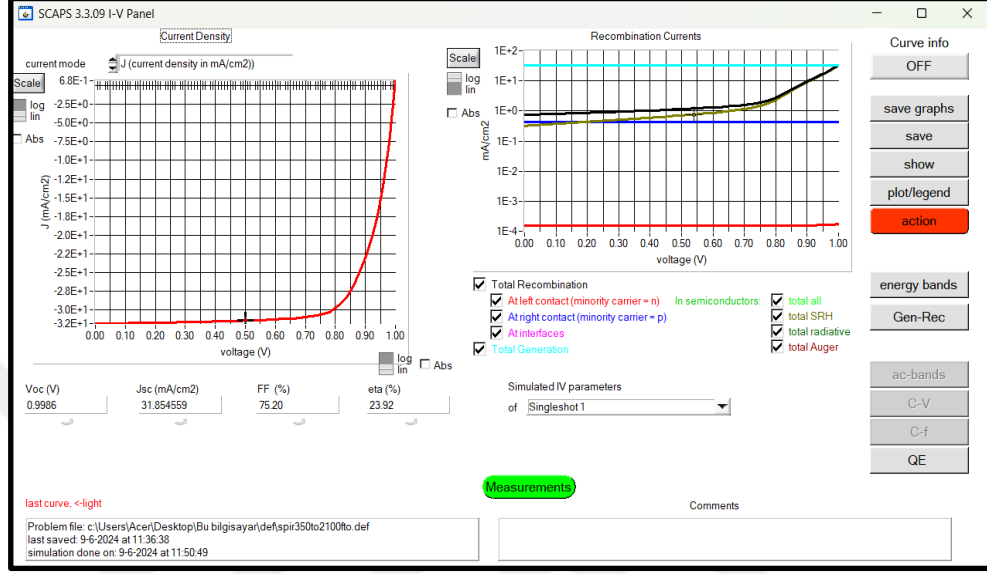
Şekil 2.1. Güneş Hücresi Katmanları

Çizelge 1.1. Güneş Hücre Modelinde Kullanılan Malzemeler

<u>ÜST KONTAK</u>	<u>ETL</u>	<u>AKTİF KATMAN</u>	<u>HTL</u>	<u>ALT KONTAK</u>
FTO	SnO_2 TiO_2	$\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnI}_3$	Spiro-OMETAD c-Si	Au

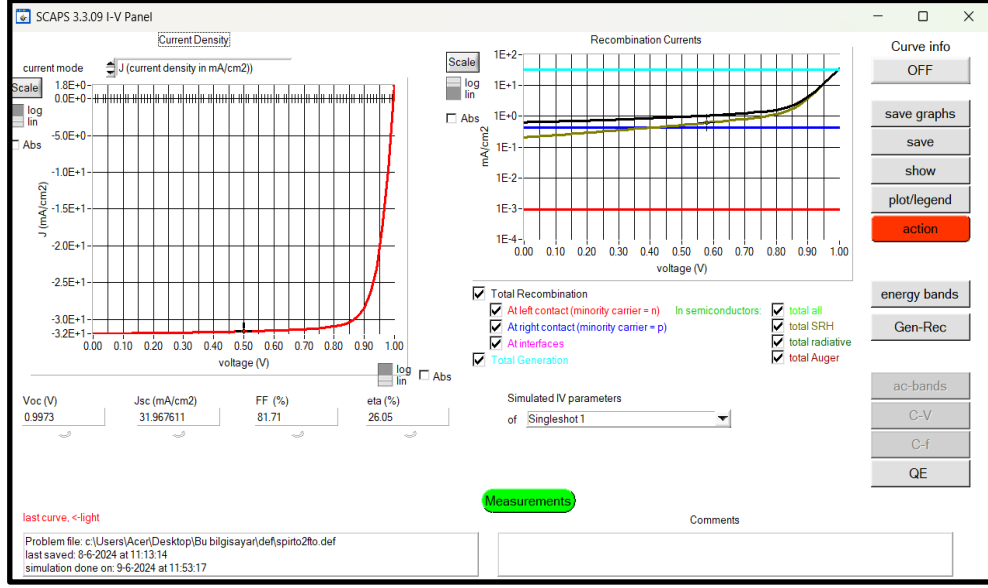
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Perovskit malzeme ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnI}_3$) kalınlık değeri ile FTO kalınlık değeri 500 nm, ETL için 100 nm kalınlığında TiO_2 , HTL olarak 350 nm kalınlığında Spiro-OMETAD ve alt kontak için 500 nm kalınlıkta Au kullanılarak güneş hücre modeli oluşturulmuş ve Şekil 2.2’de modelleme sonucunda gözlemlenen $V_{oc}=0,9986$ V, $J_{sc}=31,8545$ mA/cm², FF= 75,20 ve verim % 23,92 değerleri kaydedilmiştir.



Şekil 2.2. FTO-TiO₂-CH₃NH₃SnI₃-Spiro-OMETAD (350 nm)-Au’ın Grafiği

4.2. Perovskit malzeme ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnI}_3$) kalınlık değeri ile FTO kalınlık değeri 500 nm, ETL için 100 nm kalınlığında TiO_2 , HTL olarak 300 nm kalınlığında Spiro-OMETAD ve alt kontak için 500 nm kalınlıkta Au kullanılarak güneş hücre modeli oluşturulmuş ve Şekil 2.3’de modelleme sonucunda gözlemlenen $V_{oc}=0,9973$ V, $J_{sc}=31,9676$ mA/cm², FF= 81,71 ve verim % 26,05 değerleri kaydedilmiştir.

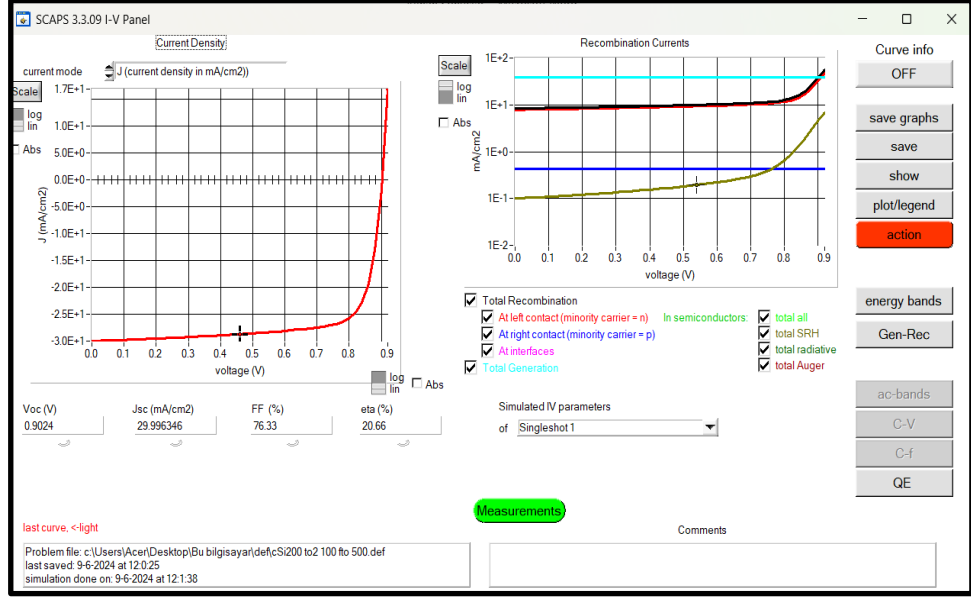


Şekil 2.3. FTO-TiO₂-CH₃NH₃SnI₃-Spiro-OMETAD (300 nm)-Au'ın Grafığı

Şekil 2.2 ve Şekil 2.3'de sonuçları verilen güneş hücresi modelleri aynı yapıya sahiptir. Ancak Şekil 2.2'de sonuçları verilen modelde HTL katman kalınlığı Şekil 2.3'deki HTL katman kalınlığından 50 nm daha fazladır. HTL katman kalınlığındaki 50 nm artışın etkisi ile, ~% 3 verimde azalma, ~% 5 FF'de azalma, ~0,11 mA/cm² Jsc'de azalma ve ~0,0013 V Voc'de artış gözlemlenmiştir.

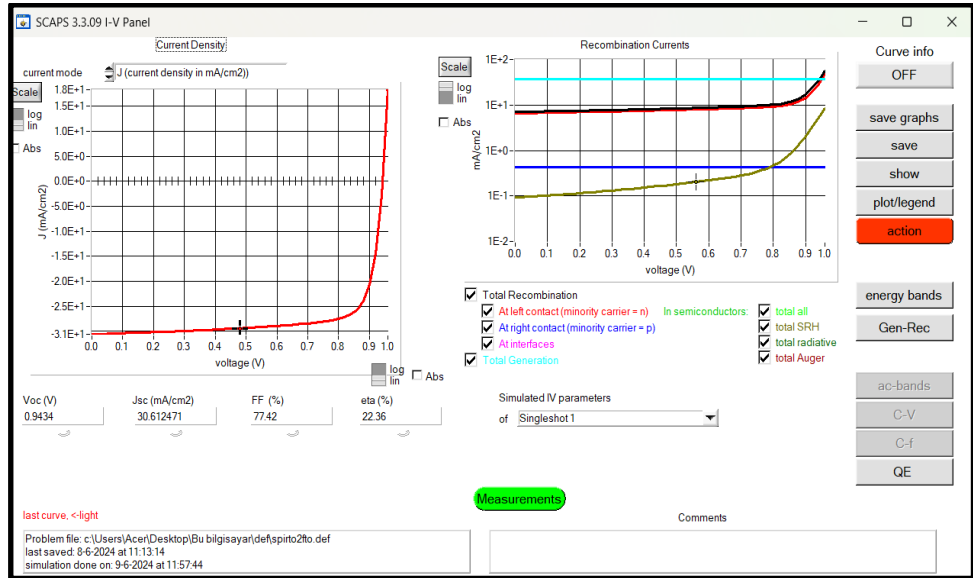
4.3. Perovskit malzeme (CH₃NH₃SnI₃) kalınlık değeri ile FTO kalınlık değerini 500 nm, ETL için 100 nm kalınlığında TiO₂, HTL olarak 250 nm kalınlığında c-Si, alt kontak için 500 nm kalınlıkta Au kullanılarak güneş hücre modeli oluşturulmuş ve Şekil 2.4'de modelleme sonucunda gözlemlenen Voc=0,9024 V, Jsc=29,9963 mA/cm², FF=76,33 ve verim % 26,66 değerleri kaydedilmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



Şekil 2.4. FTO-TiO₂-CH₃NH₃SnI₃-c-Si (250 nm)-Au'nun Grafiği

4.4. Perovskit malzeme (CH₃NH₃SnI₃) kalınlık değeri ile FTO kalınlık değerini 500 nm, ETL için 100 nm kalınlığında TiO₂, HTL olarak 200 nm kalınlığında c-Si alt kontak için 500 nm kalınlıkta Au kullanılarak güneş hücre modeli oluşturulmuş ve Şekil 2.5'de modelleme sonucunda gözlemlenen Voc=0,9434 V, Jsc=30,6124 mA/cm², FF=77,42 ve verim % 22,36 değerleri kaydedilmiştir.



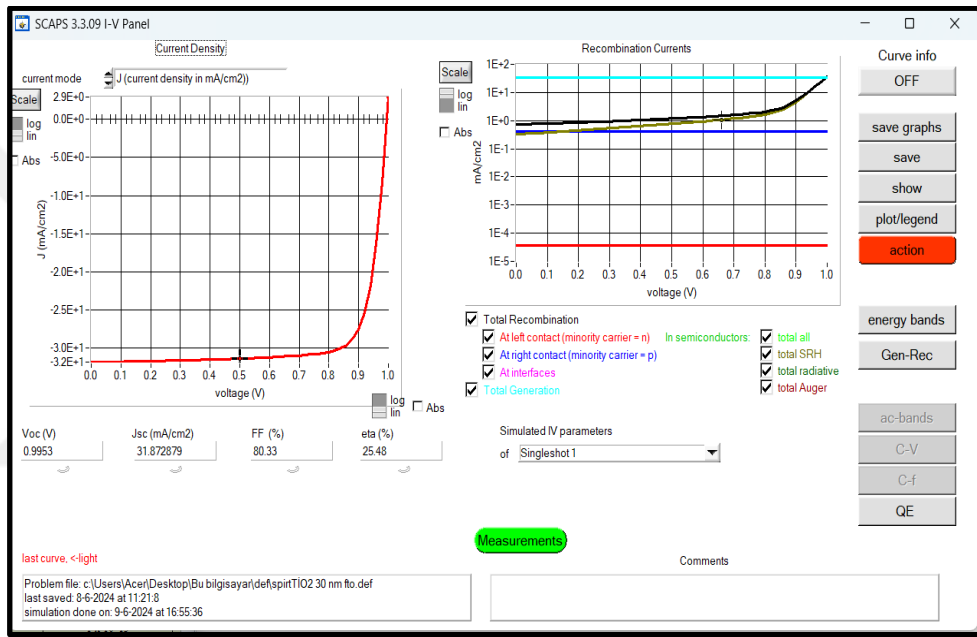
Şekil 2.5. FTO-TiO₂-CH₃NH₃SnI₃-c-Si (200 nm)-Au'nun Grafiği

Şekil 2.4 ve Şekil 2.5'de sonuçları verilen güneş hücresi modelleri aynı yapıya sahiptir. Ancak Şekil 2.4'de sonuçları verilen modelde HTL katman kalınlığı Şekil

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

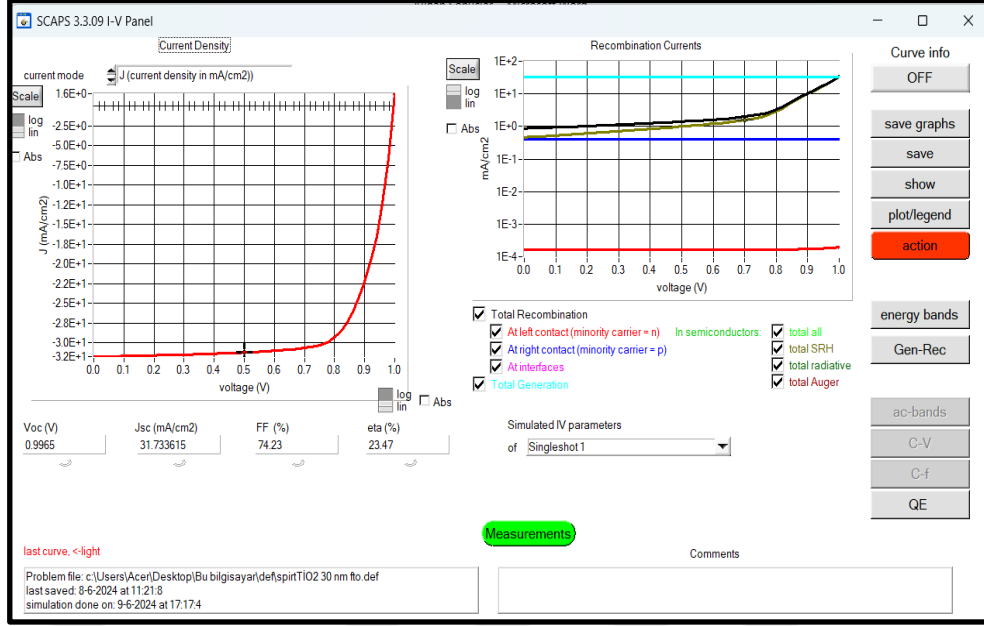
2.5'deki HTL katman kalınlığından 50 nm daha fazladır. HTL katman kalınlığındaki 50 nm artışın etkisi ile, ~% 2 verimde azalma, ~% 1,5 FF'de azalma, ~0,7 mA/cm² Jsc'de azalma ve ~0,04 V Voc'de azalma gözlemlenmiştir.

4.5. Perovskit malzeme (CH₃NH₃SnI₃) kalınlık değeri ile FTO kalınlık değerini 500 nm, ETL için 30 nm kalınlığında TiO₂, HTL olarak 300 nm kalınlığında Spiro-OMETAD ve alt kontak için 500 nm kalınlıkta Au kullanılarak güneş hücre modeli oluşturulmuş ve Şekil 2.6'de modelleme sonucunda gözlemlenen Voc=0,9953 V, Jsc=31,8728 mA/cm², FF= 80,33 ve verim % 25,48 değerleri kaydedilmiştir.



Şekil 2.6. FTO-TiO₂(30 nm)-CH₃NH₃SnI₃-Spiro-OMETAD(300 nm)-Au'nun Grafiği

4.6. Perovskit malzeme (CH₃NH₃SnI₃) kalınlık değeri ile FTO kalınlık değerini 500 nm, ETL için 30 nm kalınlığında TiO₂, HTL olarak 350 nm kalınlığında Spiro-OMETAD ve alt kontak için 500 nm kalınlıkta Au kullanılarak güneş hücre modeli oluşturulmuş ve Şekil 2.7'da modelleme sonucunda gözlemlenen Voc=0,9965 V, Jsc=31,7336 mA/cm², FF= 74,23 ve verim % 23,47 değerleri kaydedilmiştir.

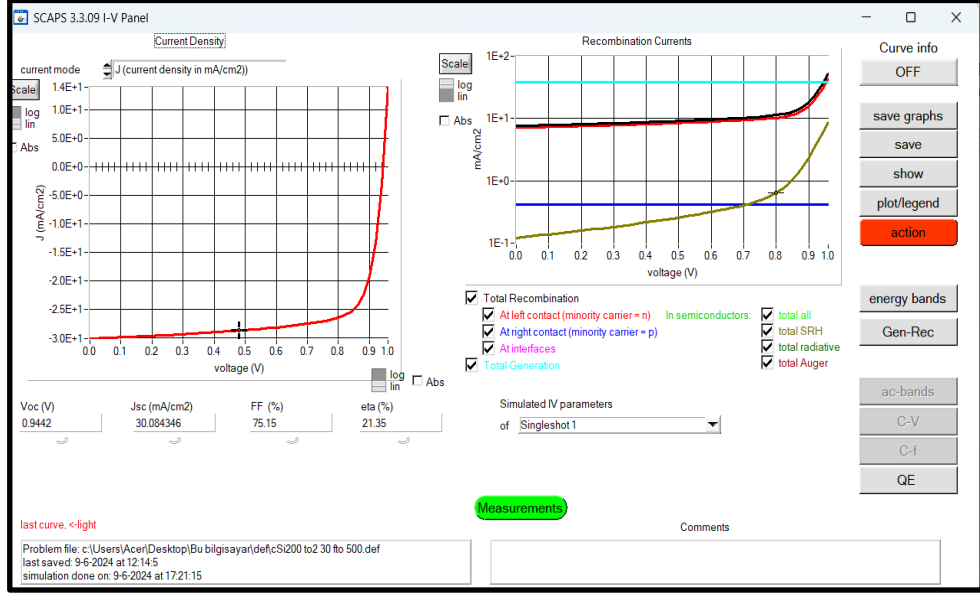


Şekil 2.7. FTO-TiO₂(30 nm)-CH₃NH₃SnI₃-Spiro-OMETAD(350 nm)-Au'ın Grafiği

Şekil 2.6 ve Şekil 2.7'de sonuçları verilen güneş hücresi modelleri aynı yapıya sahiptir. Ancak Şekil 2.6'de sonuçları verilen modelde ETL ve HTL katman kalınlığı Şekil 2.7'deki ETL katman kalınlığından 20 nm, HTL katman kalınlığından ise 50 nm daha azdır. ETL katmanındaki 20 nm ve HTL katman kalınlığındaki 50 nm artışın etkisi ile, ~% 2 verimde azalma, ~% 6 FF'de azalma, ~0,7 mA/cm² Jsc'de azalma ve ~0,01 V Voc'de artma gözlemlenmiştir.

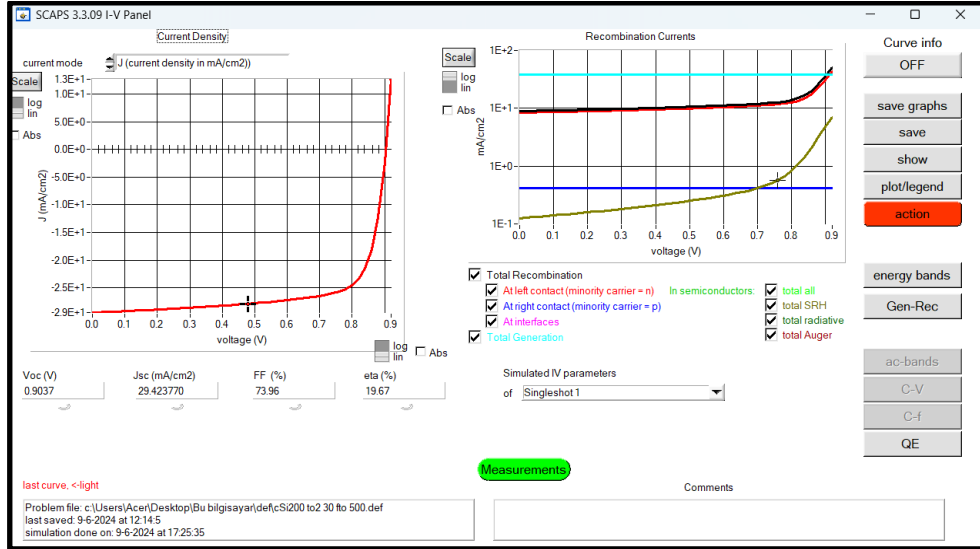
4.7. Perovskit malzeme (CH₃NH₃SnI₃) kalınlık değeri ile FTO kalınlık değerini 500 nm, ETL için 30 nm kalınlığında TiO₂, HTL olarak 200 nm kalınlığında c-Si ve alt kontak için 500 nm kalınlıkta Au kullanılarak güneş hücre modeli oluşturulmuş ve Şekil 2.8'de modelleme sonucunda gözlemlenen Voc=0,9442 V, Jsc=30,08436 mA/cm², FF=75,15 ve verim % 21,35 değerleri kaydedilmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



Şekil 2.8. FTO-TiO₂(30 nm)-CH₃NH₃SnI₃-c-Si(200 nm)-Au'nun Grafiği

4.8. Perovskit malzeme (CH₃NH₃SnI₃) kalınlık değeri ile FTO kalınlık değerini 500 nm, ETL için 30 nm kalınlığında TiO₂, HTL olarak 250 nm kalınlığında c-Si ve alt kontak için 500 nm kalınlıkta Au kullanılarak güneş hücre modeli oluşturulmuş ve Şekil 2.9'de modelleme sonucunda gözlemlenen Voc=0,9037 V, Jsc=29,4237 mA/cm², FF=73,96 ve verim % 19,67 değerleri kaydedilmiştir.



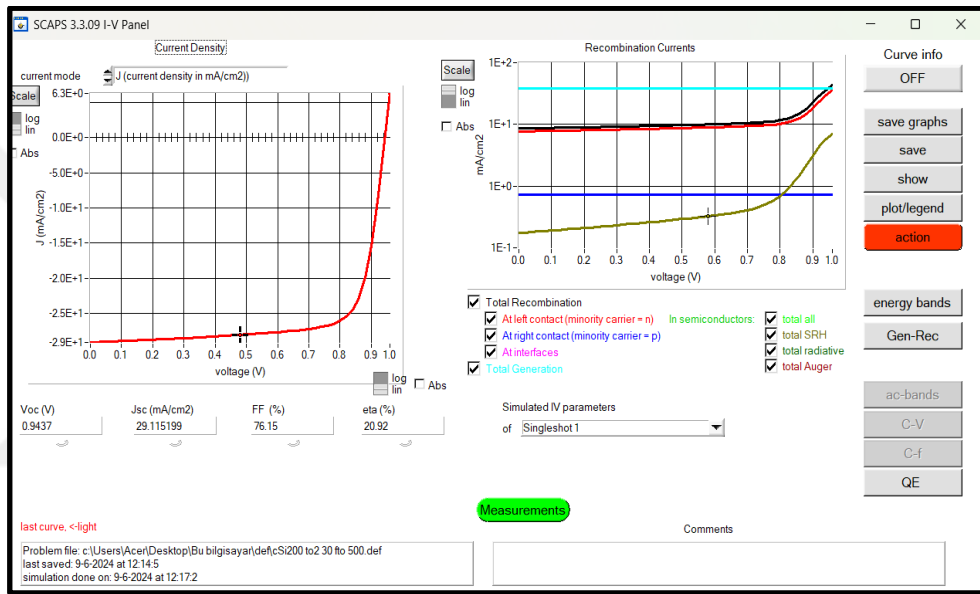
Şekil 2.9. FTO-TiO₂(30 nm)-CH₃NH₃SnI₃-cSi(250 nm)-Au'nun Grafiği

Şekil 2.8 ve Şekil 2.9'de sonuçları verilen güneş hücresi modelleri aynı yapıya sahiptir. Ancak Şekil 2.8'de sonuçları verilen modelde HTL katman kalınlığı Şekil

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

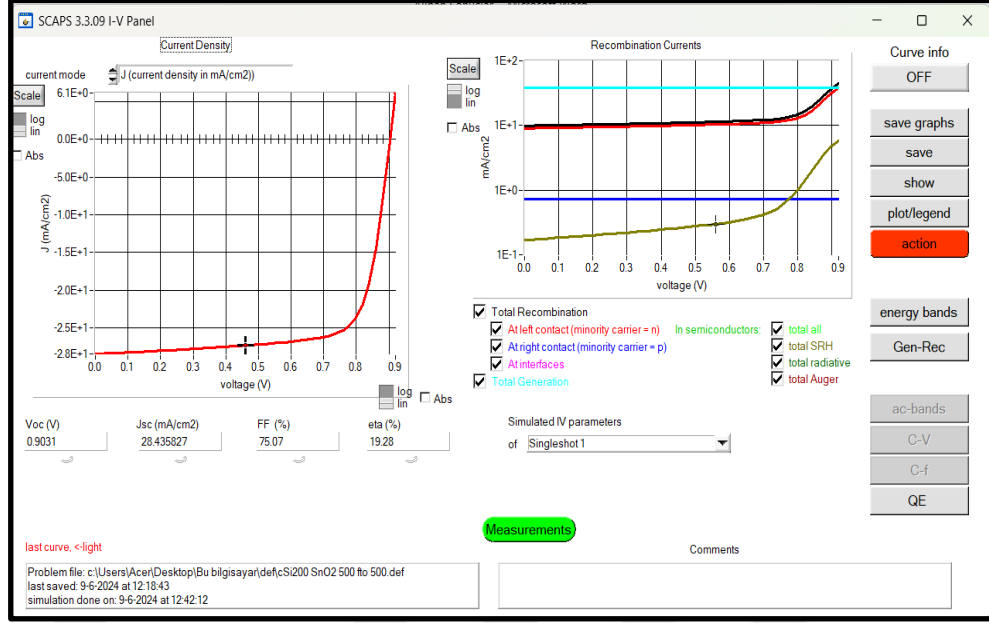
2.9'deki HTL katman kalınlığından 50 nm daha azdır. HTL katman kalınlığındaki 50 nm artışın etkisi ile, ~% 2 verimde azalma, ~% 2 FF'de azalma, ~0,7 mA/cm² Jsc'de azalma ve ~0,04 V Voc'de azalma gözlemlenmiştir.

4.9. Perovskit malzeme (CH₃NH₃SnI₃) kalınlık değeri ile FTO kalınlık değerini 500 nm, ETL için 500 nm kalınlığında SnO₂, HTL olarak 200 nm kalınlığında c-Si ve alt kontak için 500 nm kalınlıkta Au kullanılarak güneş hücre modeli oluşturulmuş ve Şekil 2.10'da modelleme sonucunda gözlemlenen Voc=0,9437 V, Jsc=29,1151 mA/cm², FF= 76,15 ve verim % 20,92 değerleri kaydedilmiştir.



Şekil 2.10. FTO-SnO₂(500 nm)-CH₃NH₃SnI₃-cSi(200 nm)-Au'nun Grafiği

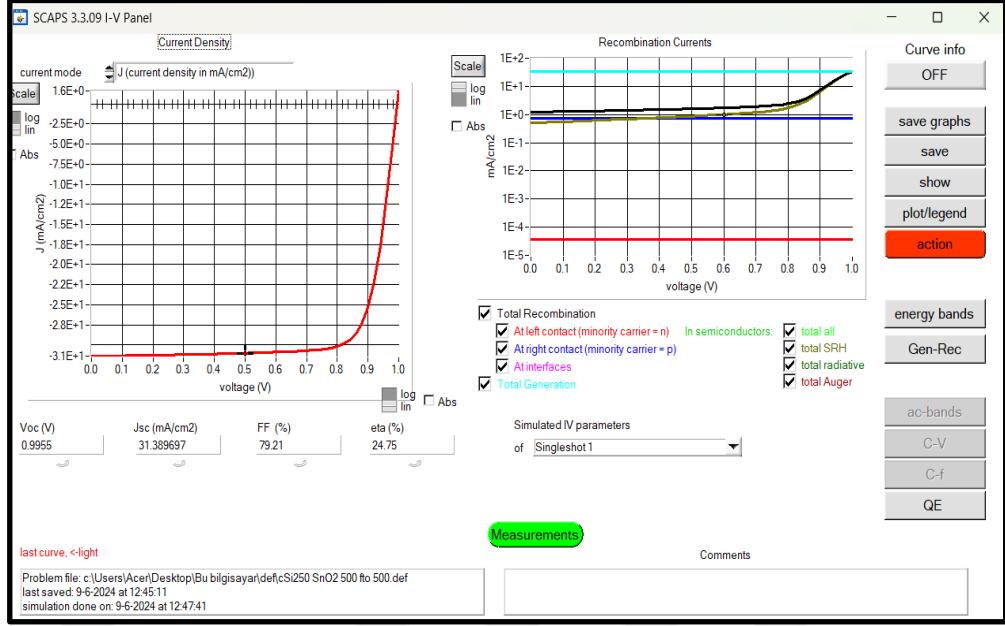
4.10. Perovskit malzeme (CH₃NH₃SnI₃) kalınlık değeri ile FTO kalınlık değerini 500 nm, ETL için 500 nm kalınlığında SnO₂, HTL olarak 250 nm kalınlığında c-Si ve alt kontak için 500 nm kalınlıkta Au kullanılarak güneş hücre modeli oluşturulmuş ve Şekil 2.11'da modelleme sonucunda gözlemlenen Voc=0,9031 V, Jsc=28,4358 mA/cm², FF= 75,07 ve verim % 19,28 değerleri kaydedilmiştir.



Şekil 2.11. FTO-SnO₂(500 nm)-CH₃NH₃SnI₃-cSi(250 nm)-Au'ın Grafiği

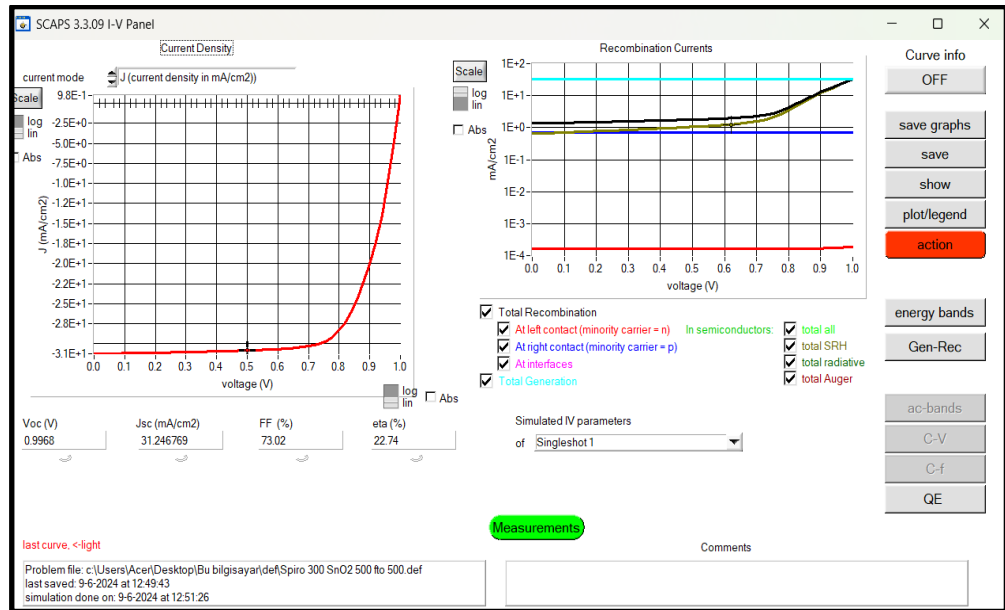
Şekil 2.10 ve Şekil 2.11'da sonuçları verilen güneş hücresi modelleri aynı yapıya sahiptir. Ancak Şekil 2.10'da sonuçları verilen modelde HTL katman kalınlığı Şekil 2.11'deki HTL katman kalınlığından 50 nm daha azdır. HTL katman kalınlığındaki 50 nm artışın etkisi ile, ~% 1,7 verimde azalma, ~% 1 FF'de azalma, ~0,62 mA/cm² Jsc'de azalma ve ~0,04 V Voc'de azalma gözlemlenmiştir.

4.11. Perovskit malzeme (CH₃NH₃SnI₃) kalınlık değeri ile FTO kalınlık değerini 500 nm, ETL için 500 nm kalınlığında SnO₂, HTL olarak 300 nm kalınlığında Spiro-OMETAD ve alt kontak için 500 nm kalınlıkta Au kullanılarak güneş hücre modeli oluşturulmuş ve Şekil 2.12'de modelleme sonucunda gözlemlenen Voc=0,9955 V, Jsc=31,3896 mA/cm², FF= 79,21 ve verim % 24,75 değerleri kaydedilmiştir.



Şekil 2.12. FTO-SnO₂(500 nm)-CH₃NH₃SnI₃-SpiroOMETAD(300 nm)-Au'nun Grafiği

4.12. Perovskit malzeme (CH₃NH₃SnI₃) kalınlık değeri ile FTO kalınlık değerini 500 nm, ETL için 500 nm kalınlığında SnO₂, HTL olarak 350 nm kalınlığında SpiroOMETAD ve alt kontak için 500 nm kalınlıkta Au kullanılarak güneş hücre modeli oluşturulmuş ve Şekil 2.13'de modelleme sonucunda gözlemlenen Voc=0,9955 V, Jsc=31,3896 mA/cm², FF= 73,02 ve verim % 24,75 değerleri kaydedilmiştir.

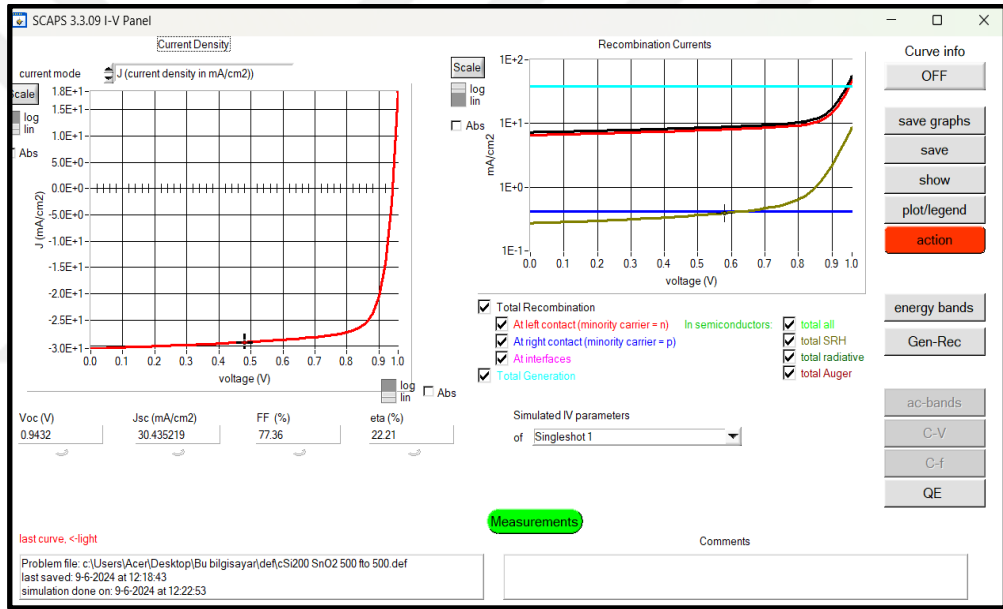


Şekil 2.13. FTO-SnO₂(500 nm)-CH₃NH₃SnI₃-SpiroOMETAD(350 nm)-Au'nun Grafiği

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

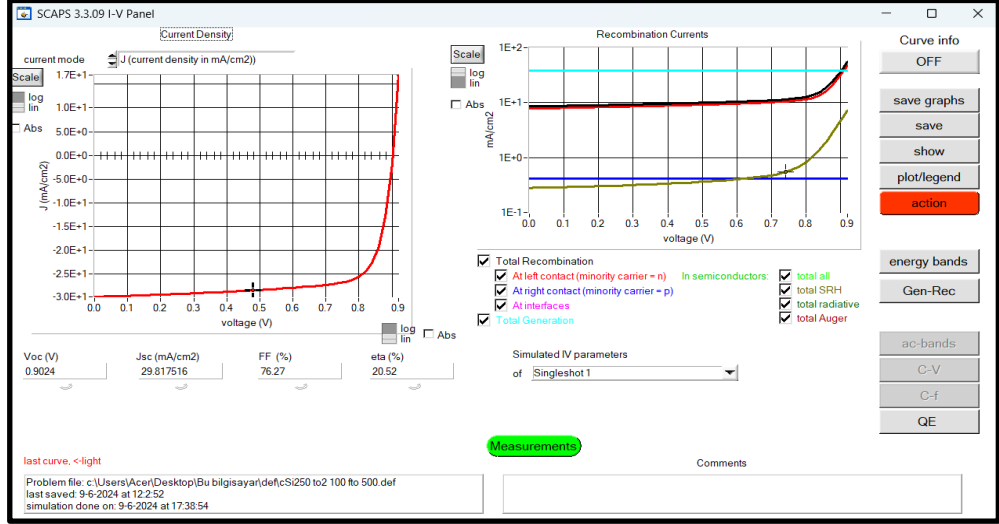
Şekil 2.12 ve Şekil 2.13’de sonuçları verilen güneş hücresi modelleri aynı yapıya sahiptir. Ancak Şekil 2.12’de sonuçları verilen modelde HTL katman kalınlığı Şekil 2.13’deki HTL katman kalınlığından 50 nm daha azdır. HTL katman kalınlığındaki 50 nm artışın etkisi ile, ~% 2 verimde azalma, ~% 6 FF’de azalma, ~0,14 mA/cm² Jsc’de azalma ve ~0,013 V Voc’de artma gözlemlenmiştir.

4.13. Perovskit malzeme (CH₃NH₃SnI₃) kalınlık değeri ile FTO kalınlık değerini 500 nm, ETL için 50 nm kalınlığında SnO₂, HTL olarak 200 nm kalınlığında c-Si ve alt kontak için 500 nm kalınlıkta Au kullanılarak güneş hücre modeli oluşturulmuş ve Şekil 2.14’de modelleme sonucunda gözlemlenen Voc=0,9432 V, Jsc=30,4352 mA/cm², FF=77,36 ve verim % 22,21 değerleri kaydedilmiştir.



Şekil 2.14. FTO-SnO₂(50 nm)-CH₃NH₃SnI₃-cSi(200 nm)-Au’ın Grafiği

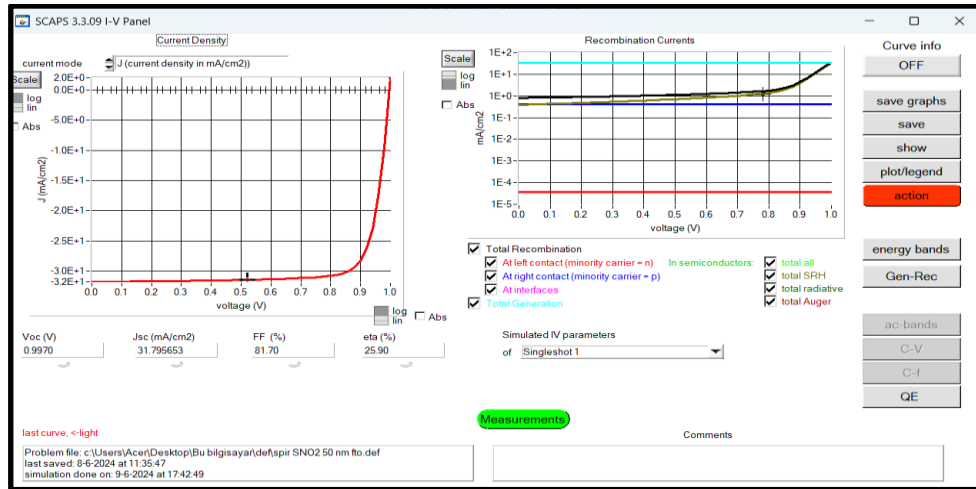
4.14. Perovskit malzeme (CH₃NH₃SnI₃) kalınlık değeri ile FTO kalınlık değerini 500 nm, ETL için 50 nm kalınlığında SnO₂, HTL olarak 250 nm kalınlığında c-Si ve alt kontak için 500 nm kalınlıkta Au kullanılarak güneş hücre modeli oluşturulmuş ve Şekil 2.15’de modelleme sonucunda gözlemlenen Voc=0,9024 V, Jsc=29,8175 mA/cm², FF=76,27 ve verim % 20,52 değerleri kaydedilmiştir.



Şekil 2.15. FTO-SnO₂(50 nm)-CH₃NH₃SnI₃-CSi(250 nm)-Au'ın Grafiği

Şekil 2.14 ve Şekil 2.15'de sonuçları verilen güneş hücresi modelleri aynı yapıya sahiptir. Ancak Şekil 2.14'de sonuçları verilen modelde HTL katman kalınlığı Şekil 2.15'deki HTL katman kalınlığından 50 nm daha azdır. HTL katman kalınlığındaki 50 nm artışın etkisi ile ~% 2 verimde azalma, ~% 1 FF'de azalma, ~0,08 mA/cm² Jsc'de azalma ve ~0,04 V Voc'de azalma gözlemlenmiştir.

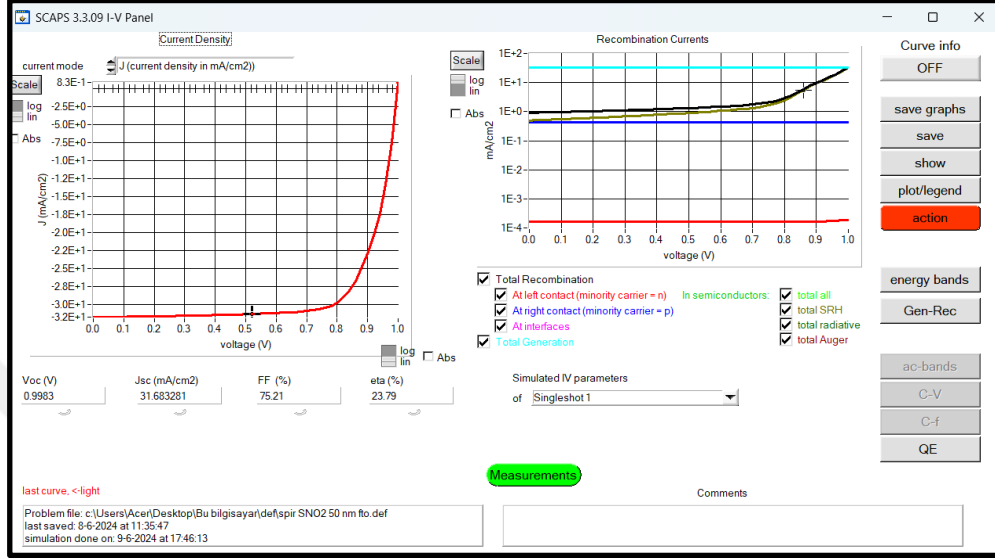
4.15. Perovskit malzeme (CH₃NH₃SnI₃) kalınlık değeri ile FTO kalınlık değerini 500 nm, ETL için 50 nm kalınlığında SnO₂, HTL olarak 300 nm kalınlığında Spiro-OMETAD ve alt kontak için 500 nm kalınlıkta Au kullanılarak güneş hücre modeli oluşturulmuş ve Şekil 2.16'de modelleme sonucunda gözlemlenen Voc=0,9970 V, Jsc=31,7956 mA/cm², FF= 81,70 ve verim % 25,90 değerleri kaydedilmiştir



Şekil 2.16. FTO-SnO₂(50 nm)-CH₃NH₃SnI₃-SpiroOMETAD(300 nm)-Au'ın Grafiği

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.16. Perovskit malzeme ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnI}_3$) kalınlık değeri ile FTO kalınlık değerini 500 nm, ETL için 50 nm kalınlığında SnO_2 , HTL olarak 350 nm kalınlığında Spiro-OMETAD ve alt kontak için 500 nm kalınlıkta Au kullanılarak güneş hücre modeli oluşturulmuş ve Şekil 2.17’de modelleme sonucunda gözlemlenen $V_{oc}=0,9983$ V, $J_{sc}=31,6832$ mA/cm², FF= 75,21 ve verim % 23,79 değerleri kaydedilmiştir.

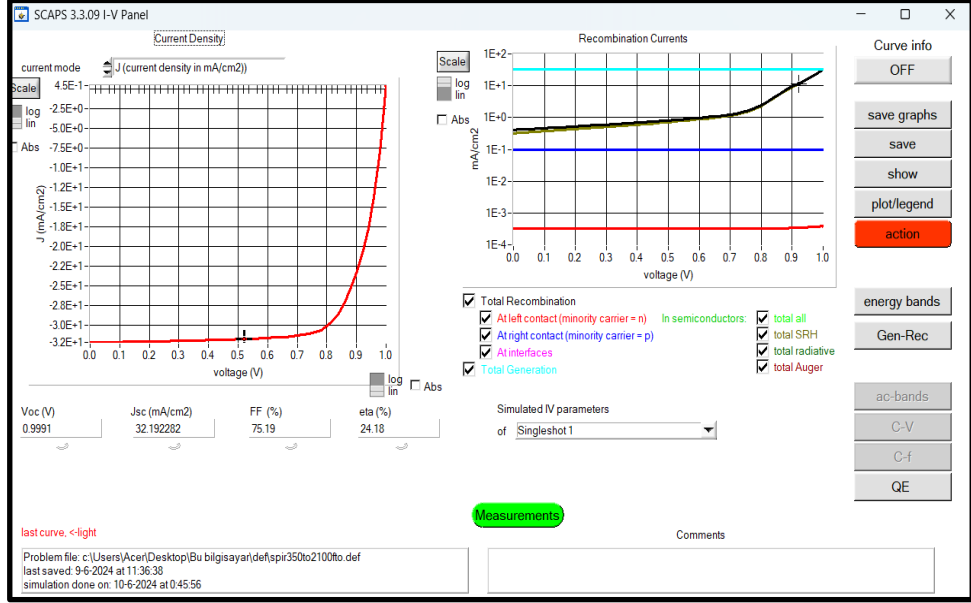


Şekil 2.17. FTO- SnO_2 (50 nm)- $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnI}_3$ -SpiroOMETAD(350 nm)-Au’ın Grafiği

Şekil 2.16 ve Şekil 2.17’de sonuçları verilen güneş hücresi modelleri aynı yapıya sahiptir. Ancak Şekil 2.16’de sonuçları verilen modelde HTL katman kalınlığı Şekil 2.17’deki HTL katman kalınlığından 50 nm daha azdır. HTL katman kalınlığındaki 50 nm artışın etkisi ile, ~% 2 verimde azalma, ~% 6 FF’de azalma, ~0,14 mA/cm² J_{sc} ’de azalma ve ~0,013 V V_{oc} ’de artma gözlemlenmiştir.

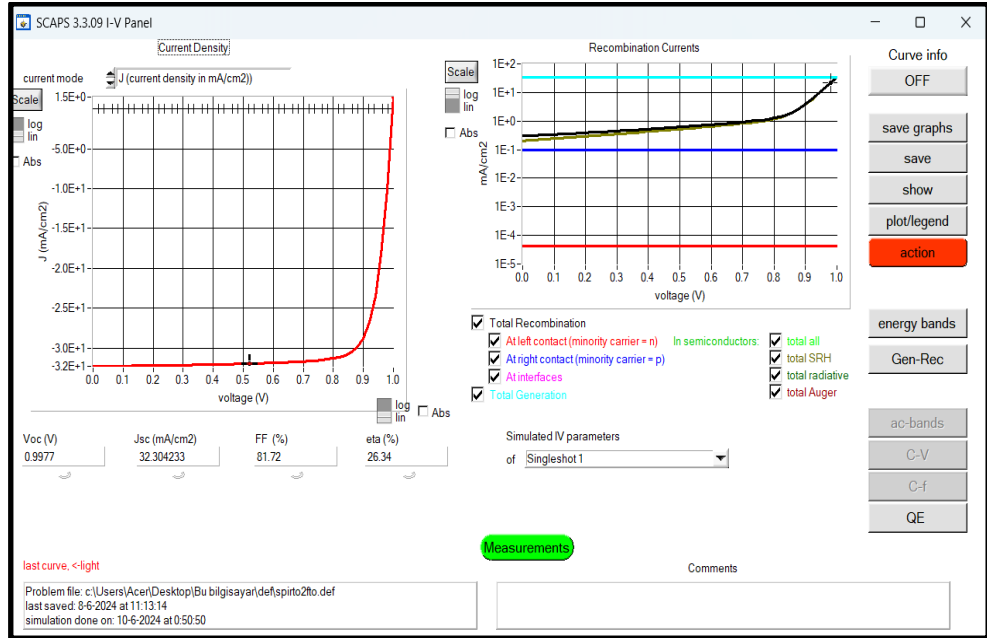
4.17. Perovskit malzeme ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnI}_3$) kalınlık değeri 500 nm ile FTO kalınlık değerini 300 nm, ETL için 100 nm kalınlığında TiO_2 , HTL olarak 350 nm kalınlığında Spiro-OMETAD ve alt kontak için 500 nm kalınlıkta Au kullanılarak güneş hücre modeli oluşturulmuş ve Şekil 2.18’de modelleme sonucunda gözlemlenen $V_{oc}=0,9991$ V, $J_{sc}=32,1922$ mA/cm², FF= 75,19 ve verim % 24,18 değerleri kaydedilmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



Şekil 2.18. FTO(300 nm)-TiO₂(100 nm)-CH₃NH₃SnI₃-SpiroOMETAD(350 nm)-Au'ın Grafiği

4.18. Perovskit malzeme (CH₃NH₃SnI₃) kalınlık değeri 500 nm ile FTO kalınlık değerini 300 nm, ETL için 100 nm kalınlığında TiO₂, HTL olarak 300 nm kalınlığında Spiro-OMETAD ve alt kontak için 500 nm kalınlıkta Au kullanılarak güneş hücre modeli oluşturulmuş ve Şekil 2.19'de modelleme sonucunda gözlemlenen Voc=0,9977 V, Jsc=32,3042 mA/cm², FF= 81,72 ve verim % 26,34 değerleri kaydedilmiştir.

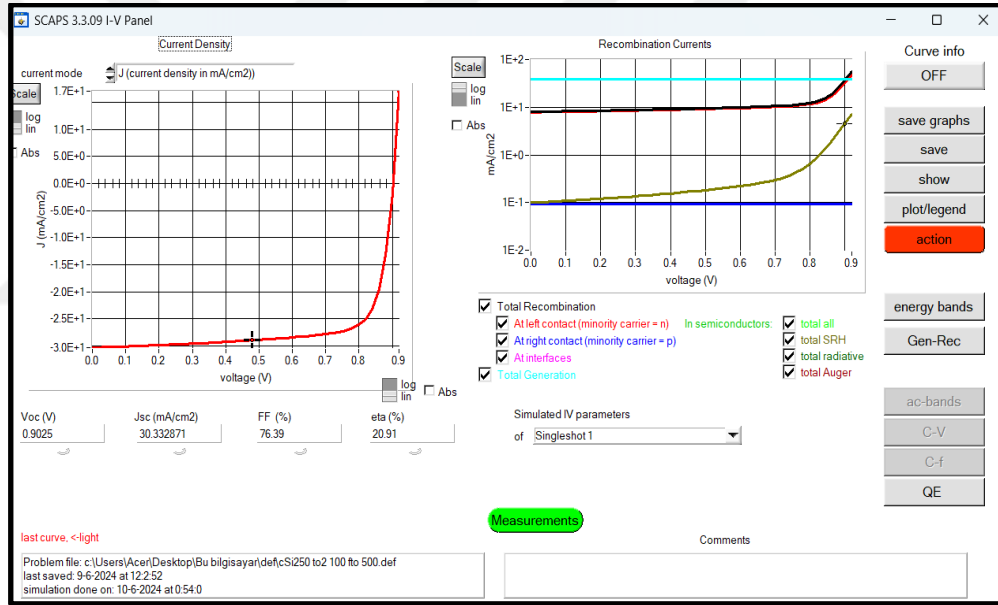


Şekil 2.19. FTO(300 nm)-TiO₂(100 nm)-CH₃NH₃SnI₃-SpiroOMETAD(300 nm)-Au'ın Grafiği

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

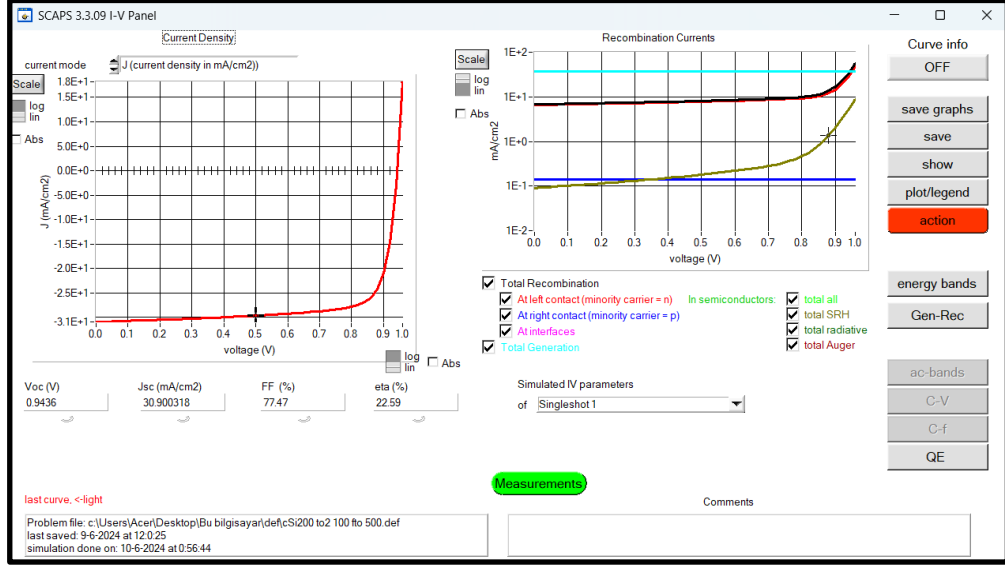
Şekil 2.18 ve Şekil 2.19’de sonuçları verilen güneş hücresi modelleri aynı yapıya sahiptir. Ancak Şekil 2.18’de sonuçları verilen modelde HTL katman kalınlığı Şekil 2.19’deki HTL katman kalınlığından 50 nm daha fazladır. HTL katman kalınlığındaki 50 nm artışın etkisi ile, ~% 2 verimde azalış, ~% 5 FF’de azalma, ~0,11 mA/cm² Jsc’de azalma ve ~0,002 V Voc’de artış gözlemlenmiştir.

4.19. Perovskit malzeme (CH₃NH₃SnI₃) kalınlık değeri 500 nm ile FTO kalınlık değerini 300 nm, ETL için 100 nm kalınlığında TiO₂, HTL olarak 250 nm kalınlığında c-Si ve alt kontak için 500 nm kalınlıkta Au kullanılarak güneş hücre modeli oluşturulmuş ve Şekil 2.20’de modelleme sonucunda gözlemlenen Voc=0,9025 V, Jsc=30,3328 mA/cm², FF= 76,39 ve verim % 20,91 değerleri kaydedilmiştir.



Şekil 2.20. FTO(300 nm)-TiO₂(100 nm)-CH₃NH₃SnI₃-cSi(250 nm)-Au’ın Grafiği

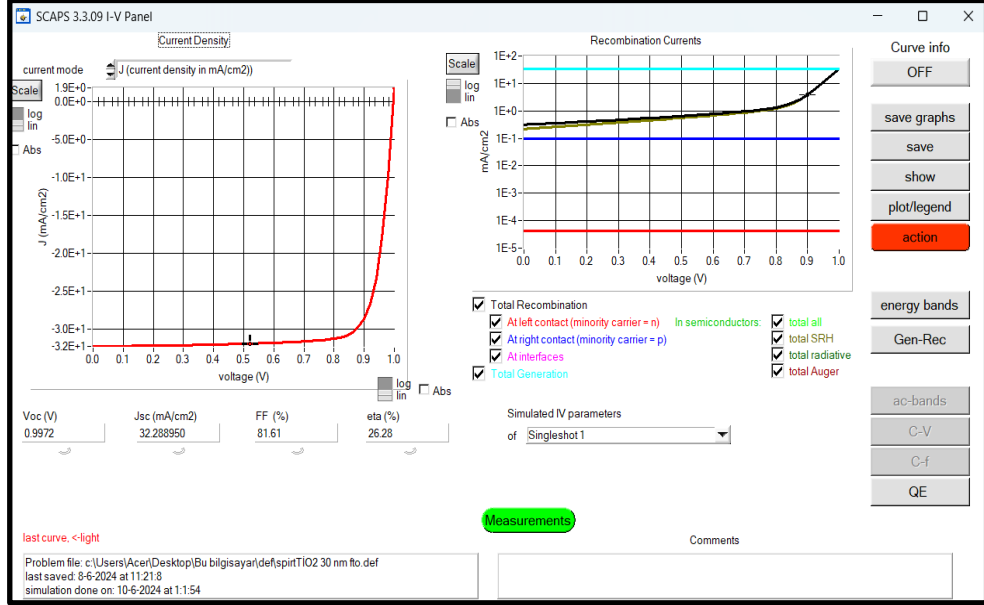
4.20. Perovskit malzeme (CH₃NH₃SnI₃) kalınlık değeri 500 nm ile FTO kalınlık değerini 300 nm, ETL için 100 nm kalınlığında TiO₂, HTL olarak 200 nm kalınlığında c-Si ve alt kontak için 500 nm kalınlıkta Au kullanılarak güneş hücre modeli oluşturulmuş ve Şekil 2.21’de modelleme sonucunda gözlemlenen Voc=0,9025 V, Jsc=30,3328 mA/cm², FF= 77,47 ve verim % 20,91 değerleri kaydedilmiştir.



Şekil 2.21. FTO(300 nm)-TiO₂(100 nm)-CH₃NH₃SnI₃-cSi(200 nm)-Au'ın Grafiği

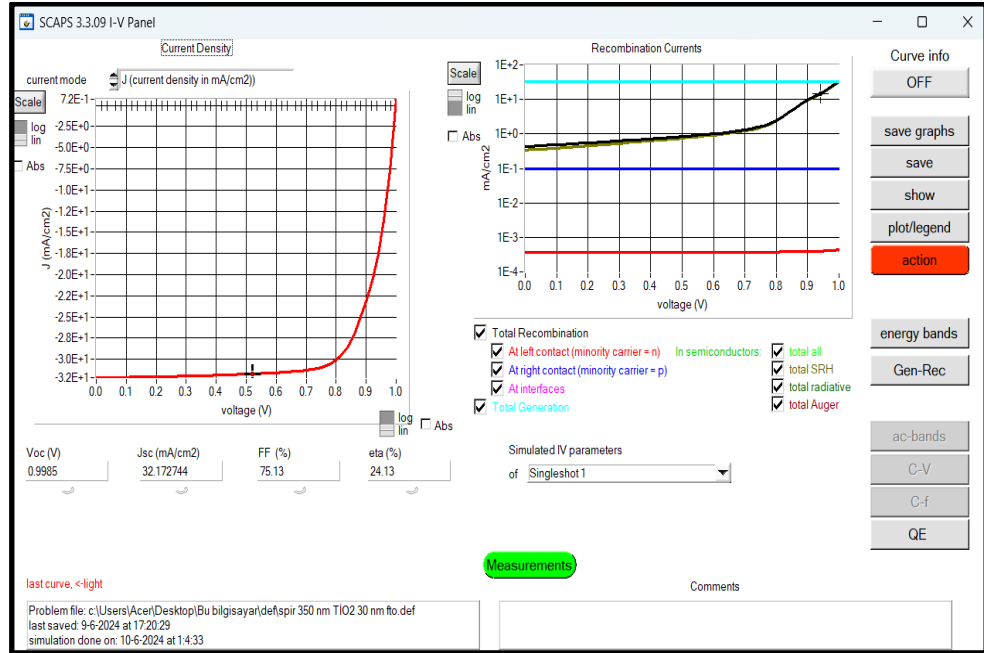
Şekil 2.20 ve Şekil 2.21'de sonuçları verilen güneş hücresi modelleri aynı yapıya sahiptir. Ancak Şekil 2.20'da sonuçları verilen modelde HTL katman kalınlığı Şekil 2.21'deki HTL katman kalınlığından 50 nm daha fazladır. HTL katman kalınlığındaki 50 nm azalışın etkisi ile, ~% 1,6 verimde artış, ~% 1 FF'de artış, ~0,07 mA/cm² Jsc'de artış ve ~0,04 V Voc'de artış gözlemlenmiştir.

4.21. Perovskit malzeme (CH₃NH₃SnI₃) kalınlık değeri 500 nm ile FTO kalınlık değerini 300 nm, ETL için 30 nm kalınlığında TiO₂, HTL olarak 300 nm kalınlığında Spiro-OMETAD ve alt kontak için 500 nm kalınlıkta Au kullanılarak güneş hücre modeli oluşturulmuş ve Şekil 2.22'de modelleme sonucunda gözlemlenen Voc=0,9972 V, Jsc=32,2889 mA/cm², FF= 81,61 ve verim % 26,28 değerleri kaydedilmiştir.



Şekil 2.22. FTO(300 nm)-TiO₂(30 nm)-CH₃NH₃SnI₃-SpiroOMETAD(300 nm)-Au'ın Grafiği

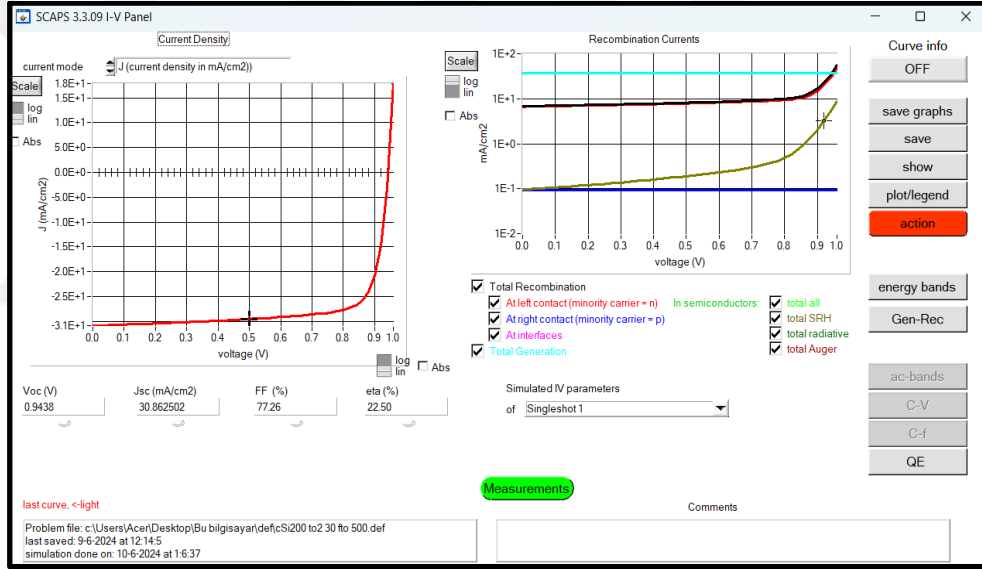
4.22. Perovskit malzeme (CH₃NH₃SnI₃) kalınlık değeri 500 nm ile FTO kalınlık değerini 300 nm, ETL için 30 nm kalınlığında TiO₂, HTL olarak 350 nm kalınlığında Spiro-OMETAD ve alt kontak için 500 nm kalınlıkta Au kullanılarak güneş hücre modeli oluşturulmuş ve Şekil 2.23'de modelleme sonucunda gözlemlenen Voc=0,9985 V, Jsc=32,1727 mA/cm², FF= 75,13 ve verim % 24,13 değerleri kaydedilmiştir.



Şekil 2.23. FTO(300 nm)-TiO₂(30 nm)-CH₃NH₃SnI₃-SpiroOMETAD(350 nm)-Au'ın Grafiği

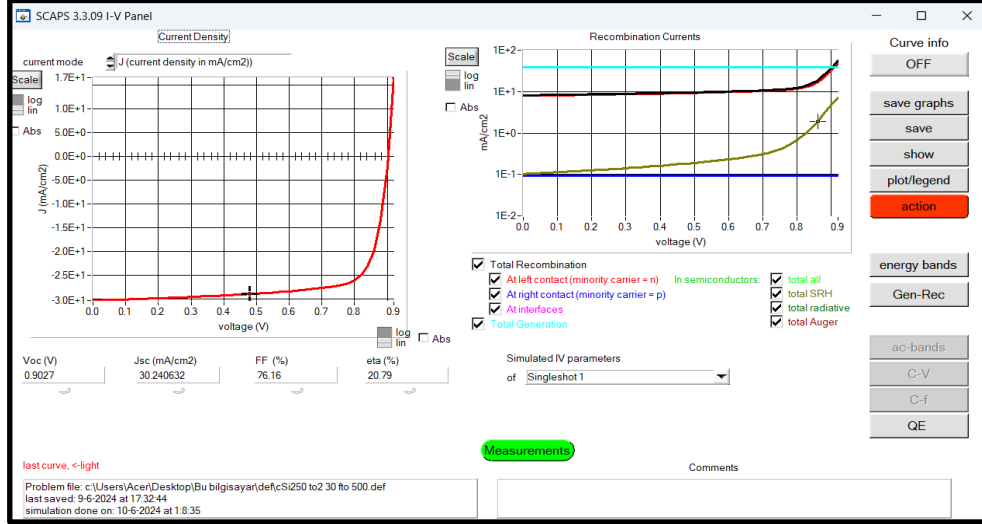
Şekil 2.22 ve Şekil 2.23’de sonuçları verilen güneş hücresi modelleri aynı yapıya sahiptir. Ancak Şekil 2.22’de sonuçları verilen modelde HTL katman kalınlığı Şekil 2.23’deki HTL katman kalınlığından 50 nm daha azdır. HTL katman kalınlığındaki 50 nm artışın etkisi ile, ~% 2 verimde azalma, ~% 6 FF’de azalma, ~0,11 mA/cm² Jsc’de artış ve ~0,01 V Voc’de artış gözlemlenmiştir.

4.23. Perovskit malzeme (CH₃NH₃SnI₃) kalınlık değeri 500 nm ile FTO kalınlık değerini 300 nm, ETL için 30 nm kalınlığında TiO₂, HTL olarak 200 nm kalınlığında c-Si ve alt kontak için 500 nm kalınlıkta Au kullanılarak güneş hücre modeli oluşturulmuş ve Şekil 2.24’de modelleme sonucunda gözlemlenen Voc=0,9438 V, Jsc=30,8625 mA/cm², FF= 77,26 ve verim % 22,50 değerleri kaydedilmiştir.



Şekil 2.24. FTO(300 nm)-TiO₂(30 nm)-CH₃NH₃SnI₃-cSi(200 nm)-Au’ın Grafiği

4.24. Perovskit malzeme (CH₃NH₃SnI₃) kalınlık değeri 500 nm ile FTO kalınlık değerini 300 nm, ETL için 30 nm kalınlığında TiO₂, HTL olarak 250 nm kalınlığında c-Si ve alt kontak için 500 nm kalınlıkta Au kullanılarak güneş hücre modeli oluşturulmuş ve Şekil 2.25’de modelleme sonucunda gözlemlenen Voc=0,9027 V, Jsc=30,2406 mA/cm², FF= 76,16 ve verim % 20,79 değerleri kaydedilmiştir.

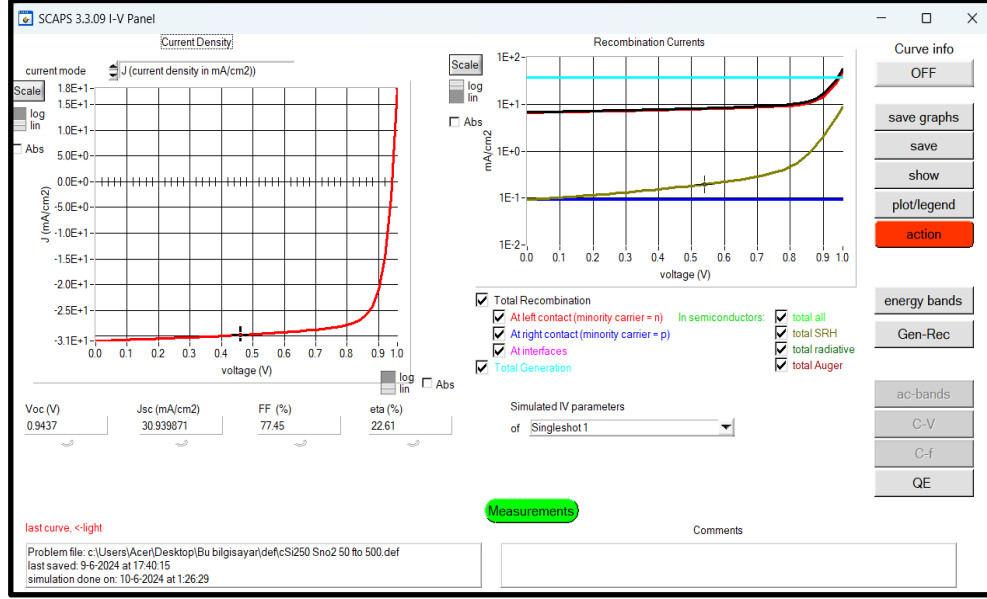


Şekil 2.25. FTO(300 nm)-TiO₂(30 nm)-CH₃NH₃SnI₃-CSi(250 nm)-Au'ın Grafiği

Şekil 2.24 ve Şekil 2.25'de sonuçları verilen güneş hücresi modelleri aynı yapıya sahiptir. Ancak Şekil 2.24'de sonuçları verilen modelde HTL katman kalınlığı Şekil 2.25'deki HTL katman kalınlığından 50 nm daha azdır. HTL katman kalınlığındaki 50 nm artışın etkisi ile, ~% 2 verimde azalma, ~% 1 FF'de azalma, ~0,64 mA/cm² Jsc'de azalış ve ~0,04 V Voc'de azalış gözlemlenmiştir.

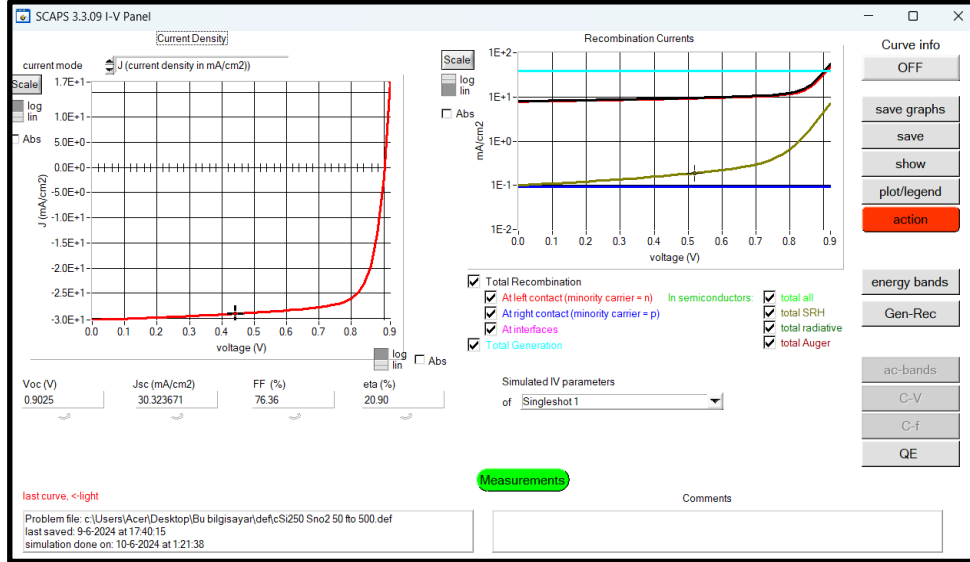
4.25. Perovskit malzeme (CH₃NH₃SnI₃) kalınlık değeri 500 nm ile FTO kalınlık değerini 300 nm, ETL için 50 nm kalınlığında SnO₂, HTL olarak 200 nm kalınlığında c-Si ve alt kontak için 500 nm kalınlıkta Au kullanılarak güneş hücre modeli oluşturulmuş ve Şekil 2.26'da modelleme sonucunda gözlemlenen Voc=0,9437 V, Jsc=30,9398 mA/cm², FF= 77,45 ve verim % 22,61 değerleri kaydedilmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



Şekil 2.26. FTO(300 nm)-SnO₂(50 nm)-CH₃NH₃SnI₃-cSi(200 nm)-Au'ın Grafiği

4.26. Perovskit malzeme (CH₃NH₃SnI₃) kalınlık değeri 500 nm ile FTO kalınlık değerini 300 nm, ETL için 50 nm kalınlığında SnO₂, HTL olarak 250 nm kalınlığında c-Si ve alt kontak için 500 nm kalınlıkta Au kullanılarak güneş hücresi modeli oluşturulmuş ve Şekil 2.27'de modelleme sonucunda gözlemlenen Voc=0,9025 V, Jsc=30,3236 mA/cm², FF= 76,36 ve verim % 20,90 değerleri kaydedilmiştir.



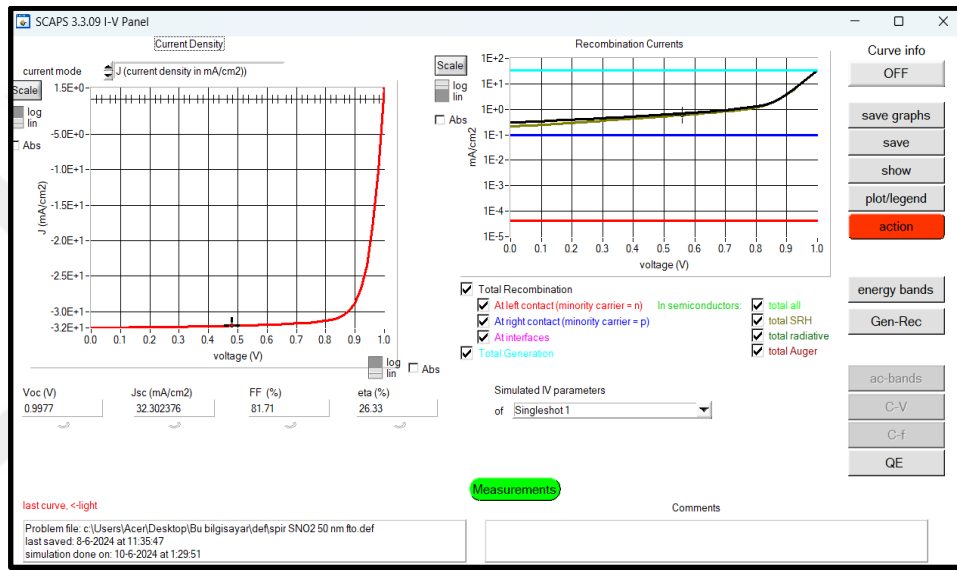
Şekil 2.27. FTO(300 nm)-SnO₂(50 nm)-CH₃NH₃SnI₃-cSi(250 nm)-Au'ın Grafiği

Şekil 2.26 ve Şekil 2.27'de sonuçları verilen güneş hücresi modelleri aynı yapıya sahiptir. Ancak Şekil 2.26'de sonuçları verilen modelde HTL katman kalınlığı Şekil

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

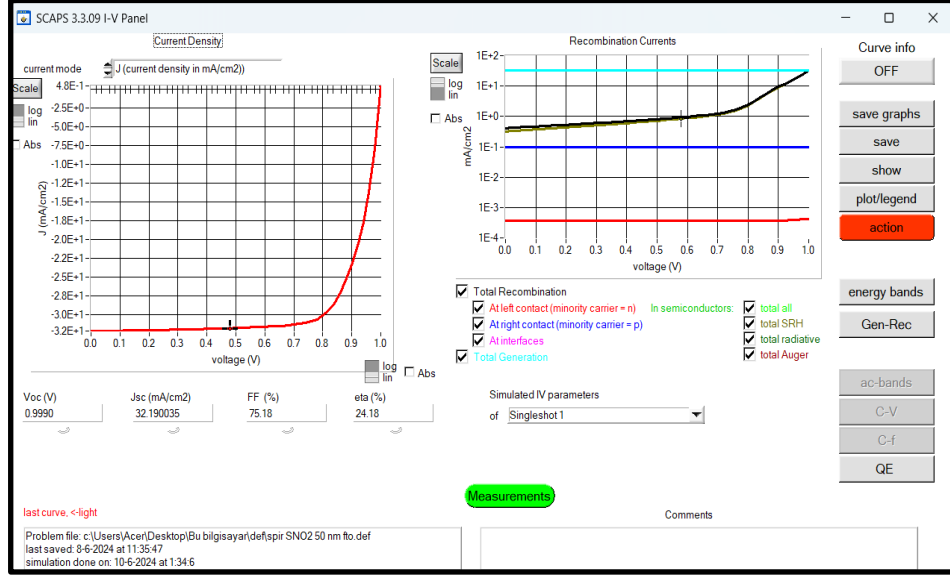
2.27'deki HTL katman kalınlığından 50 nm daha azdır. HTL katman kalınlığındaki 50 nm artışın etkisi ile, ~% 2 verimde azalma, ~% 1 FF'de azalma, ~0,61 mA/cm² Jsc'de azalış ve ~0,04 V Voc'de azalış gözlemlenmiştir.

4.27. Perovskit malzeme (CH₃NH₃SnI₃) kalınlık değeri 500 nm ile FTO kalınlık değerini 300 nm, ETL için 50 nm kalınlığında SnO₂, HTL olarak 300 nm kalınlığında Spiro-OMETAD ve alt kontak için 500 nm kalınlıkta Au kullanılarak güneş hücre modeli oluşturulmuş ve Şekil 2.28'de modelleme sonucunda gözlemlenen Voc=0,9977 V, Jsc=32,3023 mA/cm², FF= 81,71 ve verim % 26,33 değerleri kaydedilmiştir.



Şekil 2.28. FTO(300 nm)-SnO₂(50 nm)-CH₃NH₃SnI₃-SpiroOMETAD(300 nm)-Au'ın Grafiği

4.28. Perovskit malzeme (CH₃NH₃SnI₃) kalınlık değeri 500 nm ile FTO kalınlık değerini 300 nm, ETL için 50 nm kalınlığında SnO₂, HTL olarak 350 nm kalınlığında Spiro-OMETAD ve alt kontak için 500 nm kalınlıkta Au kullanılarak güneş hücre modeli oluşturulmuş ve Şekil 2.29'da modelleme sonucunda gözlemlenen Voc=0,9990 V, Jsc=32,1900 mA/cm², FF= 75,18 ve verim % 24,18 değerleri kaydedilmiştir.



Şekil 2.29. FTO(300 nm)-SnO₂(50 nm)-CH₃NH₃SnI₃-SpiroOMETAD(350nm)-Au'ın Grafiği

Şekil 2.28 ve Şekil 2.29'de sonuçları verilen güneş hücresi modelleri aynı yapıya sahiptir. Ancak Şekil 2.28'de sonuçları verilen modelde HTL katman kalınlığı Şekil 2.29'deki HTL katman kalınlığından 50 nm daha azdır. HTL katman kalınlığındaki 50 nm artışın etkisi ile, ~% 2,13 verimde azalma, ~% 6 FF'de azalma, ~0,11 mA/cm² Jsc'de azalış ve ~0,0013 V Voc'de azalış gözlemlenmiştir.

Genel olarak katman kalınlıklarındaki değişiminin sonuçlar üzerindeki etkileri;

- FTO(500nm) - TiO₂(100nm) - MASnI₃(500nm) - Spiro - OMETAD(350nm) - Au(500nm) yapısında HTL katman kalınlığının azaltılmasıyla FF, Jsc ve Verim değerlerinde artış, Voc değerinde azalış gerçekleşmiştir. ETL katman kalınlığının azaltılmasıyla FF, Jsc, Verim ve Voc değerlerinde azalış gerçekleşmiştir. Ön kontak katman kalınlığının azaltılmasıyla FF, Jsc, Verim ve Voc değerlerinde artış gerçekleşmiştir.

- FTO(500nm) - TiO₂(100nm) - MASnI₃(500nm) - c-Si(250nm) - Au(500nm) yapısında HTL katman kalınlığının azaltılmasıyla FF, Jsc, Verim ve Voc değerlerinde artış gerçekleşmiştir. ETL katman kalınlığının azaltılmasıyla FF, Jsc ve Verim değerlerinde azalma, Voc değerinde artış gerçekleşmiştir. Ön kontak katman kalınlığının azaltılmasıyla FF, Jsc, Verim ve Voc değerlerinde artış gerçekleşmiştir.

- FTO(500nm) - SnO₂(500nm) - MASnI₃(500nm) - Spiro-OMETAD(350nm) - Au(500nm) yapısında HTL katman kalınlığının azalmasıyla FF, Jsc ve Verim değerlerinde artış, Voc değerinde azalış gerçekleşmiştir. ETL katman kalınlığının azaltılmasıyla FF, Jsc, Verim ve Voc değerlerinde artış gerçekleşmiştir. FTO(500nm)-SnO₂(50nm)-MASnI₃(500nm)-Spiro-OMETAD(350nm)-Au(500nm) yapısındaki 3n kontak katman kalınlığının azaltılmasıyla FF, Jsc, Verim ve Voc değerlerinde artış gerçekleşmiştir.

- FTO(500nm) - SnO₂(500nm) - MASnI₃(500nm) - c-Si(250nm) - Au(500nm) yapısında HTL katman kalınlığının azalmasıyla FF, Jsc, Verim ve Voc değerlerinde artış gerçekleşmiştir. ETL katman kalınlığının azaltılmasıyla FF, Jsc, Verim değerlerinde artış, Voc değerlerinde azalış gerçekleşmiştir. FTO(500nm)-SnO₂(50nm)-MASnI₃(500nm)-Spiro-OMETAD(350nm)-Au(500nm) yapısında 3n kontak katman kalınlığının azaltılmasıyla FF, Jsc, Verim ve Voc değerlerinde artış gerçekleşmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Çizelge 1.2. Tasarlanan Güneş Hücresi Modellerinin Performans Sonuçları

SCAPS-1D Simülasyon Sonuçları					
	GÜNEŞ HÜCRESİ MODELİ	Voc	Jsc	FF	Verim (%)
1	FTO(500 nm)+TiO ₂ (100 nm)+MA(500 nm)+Spiro-Ometad (350 nm)	0,9986	31,8545	75,2	23,92
2	FTO(500 nm)+TiO ₂ (100 nm)+MA(500 nm)+Spiro-Ometad (300 nm)	0,9973	31,9676	81,71	26,05
3	FTO(500 nm)+TiO ₂ (100 nm)+MA(500 nm)+C-Si (250 nm)	0,9024	29,9963	76,33	20,66
4	FTO(500 nm)+TiO ₂ (100 nm)+MA(500 nm)+C-Si (200 nm)	0,9434	30,6124	77,42	22,36
5	FTO(500 nm)+TiO ₂ (30 nm)+MA(500 nm)+Spiro-Ometad (300 nm)	0,9953	31,8728	80,33	25,48
6	FTO(500 nm)+TiO ₂ (30 nm)+MA(500 nm)+Spiro-Ometad (350 nm)	0,9965	31,7336	74,23	23,47
7	FTO(500 nm)+TiO ₂ (30 nm)+MA(500 nm)+C-Si (200 nm)	0,9442	30,0843	75,15	21,35
8	FTO(500 nm)+TiO ₂ (30 nm)+MA(500 nm)+C-Si (250 nm)	0,9037	29,4237	73,96	19,67
9	FTO(500 nm)+SnO ₂ (500 nm)+MA(500 nm)+C-Si (200 nm)	0,9437	29,1151	76,15	20,92
10	FTO(500 nm)+SnO ₂ (500 nm)+MA(500 nm)+C-Si (250 nm)	0,9031	28,4358	75,07	19,28
11	FTO(500 nm)+SnO ₂ (500 nm)+MA(500 nm)+Spiro-Ometad (300 nm)	0,9955	31,3896	79,21	24,75
12	FTO(500 nm)+SnO ₂ (500 nm)+MA(500 nm)+Spiro-Ometad (350 nm)	0,9968	31,2467	73,02	22,74
13	FTO(500 nm)+SnO ₂ (50 nm)+MA(500 nm)+C-Si (200 nm)	0,9432	30,4352	77,36	22,21
14	FTO(500 nm)+SnO ₂ (50 nm)+MA(500 nm)+C-Si (250 nm)	0,9024	29,8175	76,27	20,52
15	FTO(500 nm)+SnO ₂ (50 nm)+MA(500 nm)+Spiro-Ometad (300 nm)	0,997	31,7956	81,7	25,9
16	FTO(500 nm)+SnO ₂ (50 nm)+MA(500 nm)+Spiro-Ometad (350 nm)	0,9983	31,6832	75,21	23,79
17	FTO(300 nm)+TiO ₂ (100 nm)+MA(500 nm)+Spiro-Ometad (350 nm)	0,9991	32,1922	75,19	24,18
18	FTO(300 nm)+TiO ₂ (100 nm)+MA(500 nm)+Spiro-Ometad (300 nm)	0,9977	32,3042	81,72	26,34
19	FTO(300 nm)+TiO ₂ (100 nm)+MA(500 nm)+C-Si (250 nm)	0,9025	30,3328	76,39	20,91
20	FTO(300 nm)+TiO ₂ (100 nm)+MA(500 nm)+C-Si (200 nm)	0,9436	30,9003	77,47	22,59
21	FTO(300 nm)+TiO ₂ (30 nm)+MA(500 nm)+Spiro-Ometad (300 nm)	0,9972	32,2889	81,61	26,28
22	FTO(300 nm)+TiO ₂ (30 nm)+MA(500 nm)+Spiro-Ometad (350 nm)	0,9985	32,1727	75,13	24,13
23	FTO(300 nm)+TiO ₂ (30 nm)+MA(500 nm)+C-Si (200 nm)	0,9438	30,8625	77,26	22,5
24	FTO(300 nm)+TiO ₂ (30 nm)+MA(500 nm)+C-Si (250 nm)	0,9027	30,2406	76,16	20,79
25	FTO(300 nm)+SnO ₂ (50 nm)+MA(500 nm)+C-Si (200 nm)	0,9437	30,9398	77,45	22,61
26	FTO(300 nm)+SnO ₂ (50 nm)+MA(500 nm)+C-Si (250 nm)	0,9025	30,3236	76,36	20,9
27	FTO(300 nm)+SnO ₂ (50 nm)+MA(500 nm)+Spiro-Ometad (300 nm)	0,9977	32,3023	81,71	26,33
28	FTO(300 nm)+SnO ₂ (50 nm)+MA(500 nm)+Spiro-Ometad (350 nm)	0,999	32,19	75,18	24,18

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Güneş hücrelerinin, güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürmedeki verimi günümüzde ~% 26 seviyelerine ulaşmıştır. Bu seviyelerdeki güneş hücrelerinin verimliliğini etkileyen parametre sayısı oldukça fazladır (Saral 2023). Bu parametreler güneş hücre yapısından kaynaklı olmayan dış ve hücre yapısından kaynaklı olan iç etkenler şeklinde ikiye ayrılır. Dış etkenler konum, kablolama kayıpları, uyumsuzluk kayıpları, arazi kullanımı, gölgelendirme etkenleri, sıcaklık, ışınım ve yük olarak sıralanabilir. İç etkenler ise, güneş hücresini oluşturan katmanlarda kullanılan malzemeler ve katman kalınlıklarıdır. Geçmiş yıllarda yapılmış perovskit güneş hücresi modelleme çalışmaları incelendiğinde, yaklaşık güneş hücrelerinin cm^2 başına 28-35 mA kısa devre akımı, 0,7 V'un üzerinde açık devre gerilimi, % 70 ile 82 aralığında FF değeri ve yaklaşık % 19-26 aralığında verim değerlerinin olduğu yapıların gelecek vaat ettiği görülmektedir (Jahantigh et al. 2019; Wng et al. 2020; Sunny et al. 2021; Bhavsar et al. 2021; Belarbi et al. 2022; Al-Hattab 2021; Hatamvand et al. 2023; Ullah et al. 2024; Fatima et al. 2024).

Söz konusu tez çalışmasında modellemesi yapılan güneş hücresi yapılarındaki katmanlar ve kalınlıkları, literatür de bulunan güneş hücresi performans parametrelerinin araştırılmasıyla seçilmiştir. Buradan yola çıkılarak çalışmada kullanılan güneş hücre yapısındaki katmanlar ve kalınlıkları aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- ETL katmanı için TiO_2 ve SnO_2 malzemeleri seçilmiştir. TiO_2 için 100 nm ve 30 nm, SnO_2 için 50 nm ve 500 nm kalınlık değerleri olmak üzere 4 farklı N tipi malzeme kullanılmıştır.
- HTL katmanı için Spiro-OMETAD malzemesi için 300 nm ve 350 nm, c-Si malzemesi için 200 nm ve 250 nm kalınlık değerlerinde olmak üzere 4 farklı P tipi malzeme kullanılmıştır.
- Üst kontak için FTO malzemesi, 300 nm ve 500 nm olmak üzere 2 farklı kalınlıkta kullanılmıştır.
- Alt kontak için Au malzemesi, 500 nm kalınlıkta kullanılmıştır.
- Aktif katman olarak kullanılacak Perovskit malzeme 500 nm kalınlığında $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnI}_3$ kullanılmıştır.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Yukarıda verilen malzemeler ve kalınlıklar kullanılarak SCAPS-1D ile güneş hücresi modellemeleri yapılmıştır ve sonuçlar Çizelge 1.2’de sunulmuştur. Dört performans parametresi açısından incelenen modellerden en iyi sonuçlar FTO(300nm)-TiO₂(100nm)-MASnI₃(500nm)-Spiro-OMETAD(300nm)-Au(500nm) ve FTO(300nm)-SnO₂(50nm)-MASnI₃(500nm)-Spiro-OMETAD(300nm)-Au(500nm) yapıdaki modellerde elde edilmiştir. Bu modellerden FTO(300nm)-TiO₂(100nm)-MASnI₃(500nm)-Spiro-OMETAD(300nm)-Au(500nm) katmanlarından oluşan modelde $J_{sc}= 32,3042 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc}= 0,9977 \text{ V}$, $FF= \% 81,72$ ve $\% 26,34$ verim değerleri elde edilmiştir. Ayrıca diğer en iyi sonuçların bulunduğu FTO(300nm)-SnO₂(50nm)-MASnI₃(500nm)-Spiro-OMETAD(300nm)-Au(500nm) katmanlarından oluşan güneş hücresi modelinde de $J_{sc}= 32,30 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc}= 0,9977 \text{ V}$, $FF= \% 81,71$ ve $\% 26,33$ verim değerleri elde edilmiştir.

Çizelge 2.1. Geçmiş Yıllarda Tasarlanan Güneş Hücresi Çalışmaları

YAPI	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF	PCE	KAYNAK
ITO/TiO ₂ /MAPbI ₃ /Spiro-OMETAD	1,05	24,39	82,24	21,37	Bhavsar et al. (2021)
ITO/SnO ₂ /MAPbI ₃ /Cu ₂ O	1,10	24,49	83,18	22,48	Bhavsar et al. (2021)
ITO/ZnO/MAPbI ₃ /Cu ₂ O	1,11	24,49	84,85	23,21	Bhavsar et al. (2021)
FTO/Ni/MASnI ₃ /TiO ₂	0,98	31,93	84,34	26,33	Sunny et al. (2021)
ITO/PEDOT:PSS/CH ₃ NH ₃ PbI ₃ /ZnO	0,85	25,59	94,68	20,25	Belarbi et al. (2022)
ITO/SnO ₂ /MAPbI ₃ /Spiro-OMETAD/Au	1,17	25,1	83,88	25,52	Hatamvand et al. (2023)
FTO/TiO ₂ /MAPbI ₃ /Spiro-OMETAD/Au	1,01	19,1	73	24,5	Hatamvand et al. (2023)
FTO-TiO ₂ -MASnI ₃ -Spiro-OMETAD-Au	0,99	32,30	81,72	26,34	Bu çalışma
FTO-SnO ₂ -MASnI ₃ -Spiro-OMETAD-Au	0,997	32,30	81,71	26,33	Bu çalışma

Çalışmamızda elde edilen performans parametrelerine en yakın sonuçları Şekil 2.1'deki Sunny et al. (2021) yaptıkları FTO/Ni/MASnI₃/TiO₂ yapılı güneş hücresi vermektedir. Sunny et al. (2021) yaptıkları modelde bizim çalışmamızdan farklı olarak HTL katmanı Ni tercih etmişlerdir. Bu çalışmada ise Spiro-OMETAD ile c-Si kullanıldı ve % 26,34 ile %26,33 değerleri elde edildi. Literatürdeki güneş hücresi modelleri incelendiğinde bu çalışmaya en yakın model olan Sunny et al. (2021) yapmış oldukları FTO/Ni/MASnI₃(1000nm)/TiO₂(500nm) yapıya sahip güneş hücresi modeli ile bu çalışmada gerçekleştirilen FTO(300nm)-TiO₂(100nm)-MASnI₃(500nm)-Spiro-OMETAD(300nm)-Au(500nm) yapılı güneş hücresi modeli karşılaştırıldığında FF değerinde yaklaşık % 3 azalış, verim değerinde 0,01 artış, Jsc değerinde 0,4 mA/cm² artış ve Voc değerinde 0,01 arttığı şeklinde sonuçlar elde edilmiştir.

Tez çalışmasında NIP (Düzlemsel) yapılı FTO/TiO₂-SnO₂/MASnI₃/Spiro-OMETAD-c-Si güneş hücre yapıları için katman kalınlıkları değiştirilerek çeşitli güneş hücresi modelleri oluşturulmuştur. Oluşturulan farklı kalınlıklardaki modellerin performansa etkileri incelenip, FTO/TiO₂/MASnI₃/Spiro-OMETAD/Au modeli önerilmektedir. Yapılan araştırmalar sonucunda, FTO(300nm)-TiO₂(100nm)-MASnI₃(500nm)-Spiro-OMETAD(300nm)-Au(500nm) ve FTO(300nm)-SnO₂(50nm)-MASnI₃(500nm)-Spiro-OMETAD(300nm)-Au(500nm) güneş hücre yapılarının ümit verici yapılar olduğu bulunmuştur.

KAYNAKLAR

- Abedini-Ahangarkola, H., Soleimani-Amiri, S., & Rudi, S. G. 2022. Modeling and numerical simulation of high efficiency perovskite solar cell with three active layers. *Solar Energy*, 236, 724-732.
- Al-Hattab, M., Khenfouch, M., Bajjou, O., Chrafi, Y., & Rahmani, K. 2021. Numerical simulation of a new heterostructure CIGS/GaSe solar cell system using SCAPS-1D software. *solar energy*, 227, 13-22.
- Bansal, S., & Aryal, P. 2016, June. Evaluation of new materials for electron and hole transport layers in perovskite-based solar cells through SCAPS-1D simulations. In 2016 IEEE 43rd photovoltaic specialists conference (PVSC) (pp. 0747-0750). IEEE.
- Belarbi, M., Zeggai, O., & Louhibi-Fasla, S. 2022. Numerical study of methylammonium lead iodide perovskite solar cells using SCAPS-1D simulation program. *Materials Today: Proceedings*, 51, 2115-2119.
- Bhavsar, K., & Lapsiwala, P. B. 2021. Numerical simulation of perovskite solar cell with different material as electron transport layer using SCAPS-1D software. *Semicond. Phys. Quantum Electron. Optoelectron*, 24(3), 341-347.
- Chakraborty, K., Choudhury, M. G., & Paul, S. 2019. Numerical study of Cs₂TiX₆ (X= Br⁻, I⁻, F⁻ and Cl⁻) based perovskite solar cell using SCAPS-1D device simulation. *Solar Energy*, 194, 886-892.
- Da, Y., & Xuan, Y. 2013. Role of surface recombination in affecting the efficiency of nanostructured thin-film solar cells. *Optics Express*, 21(106), A1065-A1077.
- Du, H. J., Wang, W. C., & Zhu, J. Z. 2016. Device simulation of lead-free CH₃NH₃SnI₃ perovskite solar cells with high efficiency. *Chinese Physics B*, 25(10), 108802.
- Fatima, Q., Haidry, A. A., Zhang, H., El Jery, A., & Aldrery, M. 2024. A critical review on advancement and challenges in using TiO₂ as electron transport layer for perovskite solar cell. *Materials Today Sustainability*, 100857.
- Furkan, D., & Mehmet Emin, M. 2010. Critical factors that affecting efficiency of solar cells. *smart grid and renewable energy*, 2010.
- Gezgin, S. Y., Gündoğdu, Y., Kılıç, H. Ş., & Houimi, A. 2021. IV Characteristics Calculation Using SCAPS-1D Program.
- Goetzberger, A., Knobloch, J., & Voss, B. 1998. Crystalline silicon solar cells (Vol. 1, pp. 114-118). Chichester: Wiley.

Gou, T., Li, Y., Lv, Z., Zhao, M., Dai, J., & Cao, F. 2024. SimulaTiOn and optimizaTiOn of triple caTiOn Perovskite solar cell using SCAPS-1D. *Micro and Nanostructures*, 189, 207819.

https://www.opli.net/opli_magazine/solar_energy/2024/canon-develops-high-performance-materials-for-perovskite-solar-cells-to-improve-substantial-durability-and-mass-production-stability-june-news/

<https://www.antalyaenerji.com/gunes-fotovoltaik-pili-nedir-ve-nasil-calisir/>

<https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/3117752>

<https://web.itu.edu.tr/~kaymak/images/pv.html>

<https://muhendis.web.tr/gunes-pili-calisma-prensibi-ve-verim-hesabi/>

<https://www.emrealtilar.com/gunes-enerjisi/>

Hatamvand, M., Vivo, P., Liu, M., Tayyab, M., Dastan, D., Cai, X., ... & Huang, W. 2023. The role of different dopants of Spiro-OMETAD hole transport material on the stability of perovskite solar cells: A mini review. *Vacuum*, 214, 112076.

Huang, D., Xiang, H., Ran, R., Wang, W., Zhou, W., & Shao, Z. 2022. Recent advances in nanostructured inorganic hole-transporting materials for perovskite solar cells. *Nanomaterials*, 12(15), 2592.

Jahantigh, F., & Bagher Ghorashi, S. M. 2019. Optical simulaTiOn and investigaTiOn of the effect of hysteresis on the perovskite solar cells. *Nano*, 14(10), 1950127.

Latif, H., Liu, J., Mo, D., Wang, R., Zeng, J., Zhai, P. F., & Sattar, A. 2021. Effect of target morphology on morphological, optical and electrical properties of FTO thin film deposited by pulsed laser deposiTiOn for MAPbBr₃ perovskite solar cell. *Surfaces and Interfaces*, 24, 101117.

Léonard, E., & Jeux, V. 2022. Illuminating metal oxides containing luminescent probes for personalized medicine. In *Metal Oxides for Optoelectronics and Optics-Based Medical Applications* (pp. 339-395). Elsevier.

Mbilo, M., Lee, Haris, M., Mwabora, J. M., Musembi, R. J., Lee, H. K., ... & Shin, W. S. 2024. Highly efficient and stable organic solar cells with SnO₂ electron transport layer enabled by UV-curing acrylate oligomers. *Journal of Energy Chemistry*, 92, 124-131.

Mohan, M., Shetti, N. P., & Aminabhavi, T. M. 2023. Perovskites: A new generation electrode materials for storage applications. *Journal of Power Sources*, 574, 233166.

Mohammed, M. K. (2024). Optimizing non-toxic (CH₃NH₃)₃Bi₂I₉ perovskite solar cells by SCAPS-1D. *Physica Scripta*, 99(12), 125980.

- Ogbomo, O. O., Amalu, E. H., Ekere, N. N., & Olagbegi, P. O. 2017. A review of photovoltaic module technologies for increased performance in tropical climate. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 1225-1238.
- Ongül, F. 2024. SCAPS-1D Yazılımını Kullanarak Tersine Çevrilmiş Düzlemsel Perovskit Güneş Hücresinin Simülasyonu. *İleri Teknolojilerde Çalışmalar Dergisi*, 2(1), 64-73.
- Sunny, A., Rahman, S., Khatun, M., & Ahmed, S. R. A. 2021. Numerical study of high performance HTL-free CH₃NH₃SnI₃-based perovskite solar cell by SCAPS-1D. *AIP Advances*, 11(6).
- Purkayastha, A., & Mallajosyula, A. T. 2021. Optical modelling of tandem solar cells using hybrid organic-inorganic tin perovskite bottom sub-cell. *Solar Energy*, 218, 251-261.
- Ramanujam, J., & Singh, U. P. 2017. Copper indium gallium selenide based solar cells– a review. *Energy & Environmental Science*, 10(6), 1306-1319.
- Samiul Islam, M., Sobayel, K., Al-Kahtani, A., Islam, M. A., Muhammad, G., Amin, N., ... & Akhtaruzzaman, M. 2021. Defect study and modelling of SnX₃-based perovskite solar cells with SCAPS-1D. *Nanomaterials*, 11(5), 1218.
- Ullah, I., Ullah, M. I., Ma, W., & Yuan, J. 2024. Nanotextured highly efficient optical and light trapping strategies using efficient boşluk transport-free structure for perovskite solar cells. *Optics CommunicatiOns*, 556, 130276.
- Wang, L., Shahiduzzaman, M., Muslih, E. Y., Nakano, M., Karakawa, M., Takahashi, K., ... & Taima, T. 2021. Double-layer CsI intercalaTiOn into an MAPbI₃ framework for efficient and stable perovskite solar cells. *Nano Energy*, 86, 106135.
- Wang, K., Olthof, S., Subhani, W. S., Jiang, X., Cao, Y., Duan, L., ... & Liu, S. F. 2020. Novel inorganic electron transport layers for planar perovskite solar cells: Progress and prospective. *Nano Energy*, 68, 104289.
- Yılmaz, G., & Özkök, Ç. 2019. Perovskit Güneş Hücreleri ve Kararsızlık Problemleri. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9(Ek (Suppl.) 1), 297-304.
- Zhang, S., Jia, X., Geng, Q., He, Z., Hu, Y., Gao, Y., ... & Wu, Y. 2023. Solvent engineering of SnO₂ electron transport layer for high-performance perovskite solar cells. *Surfaces and Interfaces*, 41, 103226.