



**T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



Doktora Tezi

**FOTONİK KRİSTAL İÇEREN YARI GEÇİRGEN ORGANİK
GÜNEŞ HÜCRELERİNİN TASARIMI ve ÜRETİMİ**

Çağlar ÇETİNKAYA

Fizik Anabilim Dalı

Katıhal Fiziği Programı

**DANIŞMAN
Prof. Dr. Baki AKKUŞ**

**II. DANIŞMAN
Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK**

Ekim, 2021

İSTANBUL

Bu çalışma, 13.10.2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı, Katıhal Fiziği Programında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Prof. Dr. Baki AKKUŞ(Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi

Prof. Dr. Merih SERİN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Fen Edebiyat Fakültesi

Doç. Dr. Barış KINACI
İstanbul Üniversitesi
Fakülte

Prof. Dr. Serkan EMİK
İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Doç. Dr. Gökhan ALGÜN
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi

İntihal Programı Beyanı

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi’nin aboneli olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

Proje Destekleri

--

Tezden Üretilmiş Yayınların Künye Bilgileri

Çetinkaya, Ç. et al., 2021, Evaluation on output parameters of the inverted organic solar cells depending on transition-metal-oxide based hole-transporting materials, *Opt. Mater. (Amst)*. 120 (August), 111457.

Çetinkaya, Ç. et al., 2021, Design and fabrication of a semi-transparent solar cell considering the effect of the layer thickness of MoO₃/Ag/MoO₃ transparent top contact on optical and electrical properties, *Sci. Rep.* 11 (1), 1–17.

ÖNSÖZ

Doktora tez çalışması boyunca değerli katkı ve görüşleri ile çalışmanın yürütülmesini sağlayan tez danışmanım Prof. Dr. Baki AKKUŞ'a teşekkür ederim. Çalışmaya yapmış olduğu akademik ve bilimsel katkılar ile çalışılan güneş hücre yapılarının üretimi, karakterizasyonu ve analizinde eşsiz destekleri bulunan ikinci danışman hocam Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK'e teşekkür ederim.

Hem akademik hayatıma sağlamış olduğu bilimsel katkı ve imkanlar için, hem de sosyal hayatımda vermiş olduğu destek için değerli hocam Doç. Dr. Barış KINACI'ya teşekkür ederim. Çalışmadaki ve çalışmadan çıkan bilimsel yayınlardaki eşsiz emek ve katkıları için kıymetli hocam Doç. Dr. Feyza GÜZELÇİMEN'e teşekkür ederim.

Lisans hayatımdan beri birlikte çalışmaktan büyük zevk aldığım değerli dostum Erman ÇOKDUYGULULAR'a akademik kariyerim boyunca bana katmış olduğu hem bilimsel hem de sosyal tüm değerler için teşekkür ederim.

Çalışmanın deneysel aşamalarını yürüttüğüm Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'ne ve başta Doç. Dr. Yunus ÖZEN ve Öğr. Gör. Halil İbrahim EFKERE olmak üzere tüm çalışanlarına teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca sağladıkları tüm imkanlar ve hayatıma katmış oldukları tüm değerler için aileme teşekkür ederim.

Hayatıma girdiği andan itibaren tüm değerlerimi daha anlamlı kılan, bana dünyanın çok daha yaşanabilir bir yer olduğunu hissettiren ve özellikle doktora sürecim boyunca vermiş olduğu destek ve motivasyon ile yükümü hafifleten yol arkadaşım, Gülşah ÇAKAR'a teşekkür ederim.

Ekim 2021

Çağlar ÇETİNKAYA

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİL LİSTESİ	viii
TABLO LİSTESİ.....	xii
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	xiii
ÖZET	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
2. GENEL KISIMLAR.....	4
2.1. GÜNEŞ ENERJİSİ.....	4
2.1.1. Kara Cisim Işıması.....	4
2.1.2. Güneş Spektrumu	5
2.2. FOTOVOLTAİK TEKNOLOJİSİ	7
2.3. ORGANİK GÜNEŞ HÜCRELERİ.....	9
2.3.1. Organik Güneş Hücrelerinin Çalışma Prensipleri.....	10
2.3.1.1. Eksiton Üretimi.....	12
2.3.1.2. Eksiton Difüzyonu ve Ayrışımı.....	13
2.3.1.3. Yük Taşınması ve Toplanması	14
2.3.1.4. Yük Toplanması ve Elektrotlar	14
2.3.2. Organik Güneş Hücre Mimarisi	15
2.3.2.1. İki Katmanlı Organik Güneş Hücreleri.....	15
2.3.2.2. Bulk Heteroeklem Organik Güneş Hücreleri	16
2.3.2.3. Arayüzey Mühendisliği	16
2.3.3. Yarı-Geçirgen Organik Güneş Hücreleri	19
2.3.3.1. Dielektrik/Metal/Dielektrik Şeffaf Kontak Yapıları.....	20
2.3.3.2. Fotonik Kristaller	21
2.3.4. Güneş Hücresi Performans Parametreleri	23
2.3.4.1. Kısa Devre Akımı.....	23
2.3.4.2. Açık Devre Voltajı	24
2.3.4.3. Dolum Faktörü	25

2.3.4.4. Güç Dönüşüm Verimliliği.....	26
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	27
3.1. ORGANİK GÜNEŞ HÜCRE YAPILARI.....	27
3.1.1. Farklı Boşluk Transport Tabakalarına Sahip Yapılar	27
3.1.1.1. Aktif Bölge	27
3.1.1.2. Elektron Ve Boşluk Transport Tabakaları	29
3.1.2. Yarı-Geçirgen Organik Güneş Hücreleri	34
3.1.3. Bir Boyutlu Fotonik Kristal İçeren Yapılar	35
3.1.4. Optik Karakteristiklerin Hesaplanması.....	38
3.1.4.1. Transfer Matris Metodu	38
3.1.4.2. Ortalama Görünür Geçirgenlik.....	42
3.1.4.3. Renk Koordinatları.....	43
3.1.4.4. Renksel Geriverim İndeksi.....	45
3.1.4.5. Korelasyonlu Renk Sıcaklığı.....	49
3.1.5. Yapıların Üretimi	50
3.1.5.1. Püskürtme Tekniği.....	50
3.1.5.2. Spin Kaplama	51
3.2. ORGANİK GÜNEŞ HÜCRELERİNİN KARAKTERİZASYONU	52
3.2.1. Yapısal Karakterizasyon	52
3.2.1.1. Atomik Kuvvet Mikroskobu.....	52
3.2.2. Optik Karakterizasyon	52
3.2.2.1. Geçirgenlik	52
3.2.3. Elektriksel Karakterizasyon	53
3.2.3.1. Akım-Voltaj.....	53
4. BULGULAR.....	54
4.1. FARKLI BOŞLUK TRANSPORT TABAKALARINA SAHİP YAPILAR	54
4.1.1. Geçirgenlik Ölçüm Sonuçları.....	54
4.1.2. Atomik Kuvvet Mikroskobu Ölçüm Sonuçları	57
4.1.3. Akım-Voltaj Ölçüm Sonuçları	59
4.2. YARI-GEÇİRGEN ORGANİK GÜNEŞ HÜCRELERİ	62
4.2.1. Teorik Optik Modelleme Sonuçları	63
4.2.2. Geçirgenlik Ölçüm Sonuçları.....	78
4.2.3. Akım-Voltaj Ölçüm Sonuçları	79
4.3. BİR BOYUTLU FOTONİK KRİSTAL İÇEREN ORGANİK GÜNEŞ HÜCRELERİ	81

4.3.1. Teorik Optik Modelleme Sonuçları	81
4.3.2. Geçirgenlik Ölçüm Sonuçları.....	94
4.3.3. Akım-Voltaj Ölçüm Sonuçları	96
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	98
KAYNAKLAR.....	103
EKLER	114
EK 1. Transfer Matris Metodu ile Optik Karakteristiklerin, AVT, Kromatiklik, CRI, Δu , v , CCT Değerlerinin Hesaplanması	114
ÖZGEÇMİŞ	117



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: AM0, AM1.5G spektral irradyans, AM1.5G foton akısı ve 5800 K için kara cisim ışıma spektrumları [10].	6
Şekil 2.2: a) Hava kütlesi ve b) güneş ile dünya yüzeyi arası mesafeye kıyasla katı aç [10].	7
Şekil 2.3: Tek bir karbon atomunun taban durum elektronik konfigürasyonun orbital şekilleri ve hibritizasyon durumları [10].	11
Şekil 2.4: a) İki katmanlı ve b) BHJ OSC'lerin yapıları.	15
Şekil 2.5: a) Konvansiyonel ve b) ters çevrilmiş BHJ OSCs yapıları.	17
Şekil 2.6: 1D, 2D ve 3D-PC yapıları.	22
Şekil 2.7: AM1.5G spektral foton akısının dağılımı altında her fotonun birer serbest taşıyıcı yaratması durumunda J_{sc} 'nin E_g 'ye bağlılığı.	24
Şekil 2.8: Güneş hücresinin $J - V$ ve $P - V$ karakteristiği.	25
Şekil 3.1: BHJ P3HT:PCBM karışımının bant diyagramı.	28
Şekil 3.2: P3HT:PCBM karışımının soğurma katsayısının dalga boyuna bağlı değişimi [57].	29
Şekil 3.3: Farklı HTL'lere sahip P3HT:PCBM tabanlı BHJ IOSC yapısı [33].	30
Şekil 3.4: MoO ₃ , WO ₃ ve V ₂ O ₅ HTL yapılarına sahip P3HT:PCBM tabanlı IOSC'lerin bant diyagramı.	32
Şekil 3.5: a) MoO ₃ /Ag/MoO ₃ DMD şeffaf üst elektrot ve b) FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO ₃ /Ag/MoO ₃ ST-OSC yapıları [SR].	35
Şekil 3.6: a) (MgF ₂ /MoO ₃) ^N 1D-PC ve b) FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO ₃ /Ag/MoO ₃ /(MgF ₂ /MoO ₃) ^N ST-OSC yapıları.	36
Şekil 3.7: MgF ₂ ve MoO ₃ 'e ait a) n ve b) k_{ex} 'in dalga boyuna bağlı değişimleri [124,125].	37
Şekil 3.8: ϵ_1 ve ϵ_2 değerlerine sahip iki dielektrik tabakası tarafından kuşatılmış σ iletkenliğine sahip ince bir metal tabaka. Yapı kendini tekrarlayabilir ve tek metal tabaka için DMD veya 1D-PC yapısına indirgenebilir. Kırmızı ve mavi oklar sırasıyla arayüzeye gelen ve yansıyan elektromagnetik dalgayı tasvir etmektedir.	39

Şekil 3.9: İnsan gözünün fotonik algısı, AM1.5G foton akısı [33].	43
Şekil 3.10: a) CIE1931 kromatiklik diyagramı ve b) renk eşleştirme fonksiyonlarının spektral dağılımları [33].	44
Şekil 3.11: 15 TCS için renk kodları, renkler ve isimlendirmeler [133].	46
Şekil 3.12: Kara cismin korelasyonu renk sıcaklığı eğrisi.	49
Şekil 4.1: GFZ, GFZPM, GFZPV ve GFZPW yapılarının geçirgenlik spektrumları [57].	54
Şekil 4.2: 300-650 nm dalgaboyu aralığında GFZPM, GFZPV ve GFZPW'nin geçirgenlik spektrumları ve P3HT:PCBM polimerinin soğurma katsayısının dalgaboyuna bağlı değişimi [57].	56
Şekil 4.3: ZnO üzerine kaplanan P3HT:PCBM aktif bölgenin 3D konfigürasyonda AFM görüntüsü [57].	57
Şekil 4.4: P3HT:PCBM aktif bölge üzerine kaplanan a)V ₂ O ₅ , b)WO ₃ ve c)MoO ₃ TMO'lar üzerinden alınan 3D konfigürasyonda AFM görüntüleri [57].	58
Şekil 4.5: GFZPA IOSC yapısına ait 1 güneş altında $I - V$ ve $P - V$ karakteristikleri [57].	59
Şekil 4.6: a) GFZPVA, b) GFZPWA ve c) GFZPMA IOSC yapısına ait 1 güneş altında alınan $I - V$ ve $P - V$ karakteristikleri [57].	60
Şekil 4.7: GFZPVA, GFZPWA ve GFZPMA IOSC'lere ait hücre çıkış parametreleri [57].	61
Şekil 4.8: MoO ₃ /Ag/MoO ₃ (10 nm/ d_m /30 nm) DMD şeffaf üst kontağın hesaplanan geçirgenlik spektrumu. Yeşil taralı alan AVT'nin hesaplandığı aralığı göstermektedir [33].	64
Şekil 4.9: MoO ₃ /Ag/MoO ₃ (10 nm/ d_m /30 nm) DMD şeffaf üst kontağın d_m değişimine göre hesaplanan maksimum geçirgenliğin olduğu dalgaboyu ve AVT değerleri [33].	65
Şekil 4.10: MoO ₃ /Ag/MoO ₃ (10nm/ d_m /30nm) DMD şeffaf üst elektrot yapısının geçirgenlik spektrumunun ve AVT değerlerinin $V(\lambda)$, $S_{AM1.5G}(\lambda)$ ve $V(\lambda) \times S_{AM1.5G}(\lambda)$ değişimleri altında analizi. Turuncu taralı olan alan $V(\lambda) \times S_{AM1.5G}(\lambda)$ ifadesinin değişimiyle ilgilidir ve alan değeri Denklem (3.16)'nın payda kısmındaki integralin değeridir [33].	66
Şekil 4.11: FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO ₃ /Ag/MoO ₃ (--/40/130/10/ d_m /30 nm) ST-OSC yapısının a) soğurma, b) yansıma ve c) geçirgenlik spektrumları. a)'daki inset ST-OSC yapısının aktif bölgesini oluşturan P3HT:PCBM organik yarıiletken karışımın soğurma spektrumunu göstermektedir [33].	68

- Şekil 4.12:** FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃ (--/40/130/10/ d_m /30 nm) ST-OSC yapısının 350-570 nm aralığında a) soğurma spektrumu ve b) d_m 'ye göre AVT ve J_{ph} değişimi [33].....70
- Şekil 4.13:** FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃ (--/40/130/10/ d_m /30 nm) ST-OSC yapısının d_m değişimine göre geçirgenlik spektrumları ve AVT değerlerinin $V(\lambda)$, $S_{AM1.5G}(\lambda)$ ve $V(\lambda) \times S_{AM1.5G}(\lambda)$ değişimleri altında analizi. Turuncu taralı olan alan $V(\lambda) \times S_{AM1.5G}(\lambda)$ ifadesinin değişimiyle ilgilidir ve alan değeri Denklem (3.16)'nın payda kısmındaki integralin değeridir [33]. 71
- Şekil 4.14:** FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃ MoO₃ (--/40/130/10/ d_m /30 nm) ST-OSC yapısının ve MoO₃/Ag/MoO₃ (10/ d_m /30 nm) DMD şeffaf üst kontağın d_m ve d_{id} değişimine göre AVT değerlerinin karşılaştırılması olarak gösterimi [33].....72
- Şekil 4.15:** FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃ (--/40/130/10/6/ d_{od} nm) ST-OSC yapısının d_{od} değerlerine göre AVT ve J_{ph} değişimleri [33].....73
- Şekil 4.16:** FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃ (--/40/130/10/ d_m /10 nm) ST-OSC yapısının farklı d_m 'lere göre hesaplanmış a) renk koordinatlarının CIE 1931 renklilik diyagramındaki yerleri, b) renk koordinatlarının değişimi, c)FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃ geçirgenlik karakteristiğinin $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ ile kesişimi ve d) $T(\lambda)$ $\bar{x}(\lambda)$ ve $T(\lambda)$ $\bar{y}(\lambda)$ fonksiyonlarının değişimi [33]. 75
- Şekil 4.17:** a) MoO₃/Ag/MoO₃ (10/6/30 nm) şeffaf üst kontağın fotoğrafı ve yapısı, b) FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃ (--/40/130/10/6/30 nm) ST-OSC'in fotoğrafı ve yapısı, c) FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag (--/40/130/10/100 nm) opak-OSC'in fotoğrafı ve yapısı [33].....77
- Şekil 4.18:** FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃ (--/40/130/10/6/30 nm) ST-OSC'in hesaplanan ve deneysel geçirgenlik spektrumları [33]. 78
- Şekil 4.19:** a) FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag (--/40/130/10/100 nm) opak-OSC ve b) FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃ (--/40/130/10/6/30 nm) ST-OSC'in $J - V$ ve $P - V$ karakteristikleri [33]. 80
- Şekil 4.20:** N=2, 4, 6 ve 8 periyotlara sahip (MgF₂/MoO₃)^N 1D-PC sisteminin a) $\lambda_B=675$ nm, b) 700 nm ve c) 725 nm için yansıma spektrumları. 83
- Şekil 4.21:** FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃/(MgF₂/MoO₃)^N yapısında N=2, 4, 6, 8 periyotlar ve a) $\lambda_B=675$ nm, b) 700 nm, c) 725 nm için geçirgenlik spektrumları. 84
- Şekil 4.22:** a) FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃/(MgF₂/MoO₃)^N ST-OSC yapısına ait $\lambda_B=675$ nm'de N=2, 4, 6 ve 8 periyotlar için renk koordinatları ve b) 400-750 nm aralığında geçirgenlik spektrumları ile birlikte renk eşleştirme fonksiyonlarının dağılımı. 86
- Şekil 4.23:** a) FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃/(MgF₂/MoO₃)^N ST-OSC yapısına ait $\lambda_B=700$ nm'de N=2, 4, 6 ve 8 periyotlar için renk koordinatları ve

b) 400-750 nm aralığında geçirgenlik spektrumları ile birlikte renk eşleştirme fonksiyonlarının dağılımı.	88
Şekil 4.24: a) FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO ₃ /Ag/MoO ₃ /(MgF ₂ /MoO ₃) ^N ST-OSC yapısına ait $\lambda_B=725$ nm’de N=2, 4, 6 ve 8 periyotlar için renk koordinatları ve b) 400-750 nm aralığında geçirgenlik spektrumları ile birlikte renk eşleştirme fonksiyonlarının dağılımı.	89
Şekil 4.25: FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO ₃ /Ag/MoO ₃ /(MgF ₂ /MoO ₃) ⁴ ST-OSC yapısına ait $\lambda_B=725$ nm, 700 nm ve 675 nm için renk koordinatları.....	90
Şekil 4.26: FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO ₃ /Ag/MoO ₃ /(MgF ₂ /MoO ₃) ^N ST-OSC yapısı üzerine, 1D-PC’nin PBG’sinin periyot değerlerine göre farklı λ_B değerleri için elde edilen a) AVT, b) $\Delta_{u,v}$ ve c) CCT değişimleri.	91
Şekil 4.27: FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO ₃ /Ag/MoO ₃ /(MgF ₂ /MoO ₃) ^N yapısında N=2, 4, 6, 8 periyotlar ve a) $\lambda_B=675$ nm, b) 700 nm, c) 725 nm için CRI değerleri.	93
Şekil 4.28: $\lambda_B=700$ nm PBG’e sahip FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO ₃ /Ag/MoO ₃ /(MgF ₂ /MoO ₃) ⁴ ST-OSC’ye ve FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO ₃ /Ag/MoO ₃ ST-OSC’ye ait hesaplanan ve deneysel geçirgenlik spektrumları.	95
Şekil 4.29: $\lambda_B=700$ nm PBG’e sahip FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO ₃ /Ag/MoO ₃ /(MgF ₂ /MoO ₃) ⁴ ST-OSC’nin $J - V$ ve $P - V$ karakteristikleri.....	96

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1: MoO ₃ , WO ₃ ve V ₂ O ₅ HTL'lere sahip IOSC yapıları, kalınlıkları ve etiketleri.	33
Tablo 4.1: GFZPM, GFZPV ve GFZPW için geçirgenlik spektrumları kullanılarak hesaplanan J _{ph} değerleri.	56
Tablo 4.2: FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO ₃ /Ag/MoO ₃ (--/40/130/10/6/30 nm) ST-OSC'in AVT ve CIE 1931 renk koordinatları.....	79
Tablo 4.3: FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO ₃ /Ag (--/40/130/10/100 nm) opak-OSC ve b) FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO ₃ /Ag/MoO ₃ (--/40/130/10/6/30 nm) ST-OSC'in hücre çıkış parametreleri.	81
Tablo 4.4: (MgF ₂ /MoO ₃) ^N 1D-PC sisteminde λ _B =675 nm, 700 nm, 725 nm için d ₁ ve d ₂ kalınlıkları.	82
Tablo 4.5: λ _B =700 nm PBG'e sahip FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO ₃ /Ag/MoO ₃ /(MgF ₂ /MoO ₃) ⁴ ST-OSC'nin hesaplanan ve deneysel AVT ve CIE 1931 renk koordinatları.	95
Tablo 4.6: Optimal değerlerde üretilen opak, ST ve 1D-PC içeren OSC yapılarına ait hücre çıkış parametreleri.	97

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
A	: Soğurma
α	: Soğurma katsayısı (Absorption coefficient)
α_{al}	: Aktif bölgenin soğurma katsayısı
c	: Işığın boşluktaki yayılma hızı
d_1	: Fotonik kristalde ilk malzemenin kalınlığı
d_2	: Fotonik kristalde ikinci malzemenin kalınlığı
d_{al}	: Aktif bölge kalınlığı
d_{id}	: İç dielektrik kalınlığı
d_m	: Metal katman kalınlığı
d_{od}	: Dış dielektrik kalınlığı
$D_{\gamma,\Omega}$	: Birim enerji başına enerji durum yoğunluğu
$\Delta_{u,v}$	: Renk farkı
E_g	: Bant aralığı
E_γ	: Fotonların enerjisi
ϵ_i	: Ortamın dielektrik sabiti
ϵ_0	: Boşluğun permitivitesi
f_γ	: İşgal olasılığı
φ	: İş fonksiyonu
h	: Planck sabiti
$\hbar$	: İndirgenmiş Planck sabiti
J	: Metalik tabakanın yüzey akım yoğunluğu
j_E	: Enerji akı yoğunluğu
J_m	: Maksimum akım yoğunluğu
J_0	: Sızıntı akım yoğunluğu (Dark current density)
J_{ph}	: Foto-akım yoğunluğu
J_{sc}	: Kısa devre akım yoğunluğu (Short current density)
k_B	: Boltzmann sabiti
k_{ex}	: Sönüm katsayısı (Extinction coefficient)

$\vec{k}_i$	: Elektromagnetik dalganın dalga vektörü
λ	: Elektromagnetik dalganın dalgaboyu
λ_B	: Bragg dalgaboyu
λ_{max}^T	: Maksimum geçirgenliğe sahip dalgaboyu
M_i	: Geçiş matrisi
μ_0	: Boşluğun permeabilitesi
n	: Kırılma indisi
ν	: Elektromagnetik dalganın frekansı
P	: Güç
P_{in}	: Güneş hücresi yüzeyine düşen toplam foton gücü
P_m	: Maksimum güç
P_{out}	: Güneş hücresinden elde edilen toplam güç
P_s	: Güneş hücresi yüzeyine düşen ışıyım gücü
q	: Elektronun yükü
r	: Elektromagnetik dalganın yansıma katsayısı
R	: Yansıma
$S_{AM1.5G}$	: AM1.5G spektral foton akısının dağılımı
$S_{AM1.5G}^{D65}$	: CIE standart D65 aydınlatıcı spektrumu
σ	: İletkenlik
σ_{SB}	: Stefan-Boltzmann sabiti
σ_{rms}	: Karekök ortalama (root mean square)
t	: Elektromanyetik dalganın geçiş katsayısı
T	: Geçirgenlik
T_{max}	: Maksimum geçirgenlik
u	: CIE 1960 renklilik diyagramı renk koordinatı
$V(\lambda)$	: İnsan gözünün fotonik algısı (Photonic response of human eye)
V_m	: Maksimum voltaj
V_{oc}	: Açık devre voltajı (Open circuit voltage)
v	: CIE 1960 renklilik diyagramı renk koordinatı
ω	: Elektromagnetik dalganın açısal frekansı
x	: CIE 1931 renklilik diyagramı renk koordinatı
$\bar{x}(\lambda)$	: Renk eşleştirme fonksiyonu
y	: CIE 1931 renklilik diyagramı renk koordinatı

$\bar{y}(\lambda)$: Renk eşleştirme fonksiyonu
 $\bar{z}(\lambda)$: Renk eşleştirme fonksiyonu

Kısaltmalar	Açıklama
AFM	: Atomik kuvvet mikroskobu (Atomic force microscope)
AM	: Hava kütlesi (Air mass)
AM0	: Hava kütlesi 0 (Air mass 0)
AM1.5D	: Hava kütlesi 1.5 direk (Air mass 1.5 direct)
AM1.5G	: Hava kütlesi 1.5 küresel (Air mass 1.5 global)
ASTM	: Amerikan Test ve Materyal Topluluğu (American Society for Testing and Materials)
AVT	: Ortalama görünür geçirgenlik (Average visible transmittance)
BHJ	: Bulk-heteroeklem (Bulk-heterojunction)
BIPV	: Binaya entegre fotovoltaiik (building-integrated photovoltaic)
CCT	: Korelasyonlu renk sıcaklığı (Correlated color temperature)
CRI	: Renk geriverim indeksi (Color render index)
DBR	: Dağıtılmış Bragg yansıtıcıları (Distributed Bragg reflectors)
DC	: Doğru akım (Direct current)
DMD	: Dielektrik/Metal/Dielektrik (Dielectric/Metal/Dielectric)
ETL	: Elektron transport tabakası (Electron transporting layer)
FF	: Dolum faktörü (Fill factor)
FTO	: Florin kalay oksit (Flourine tin oxide)
HOMO	: En yüksek işgal edilmiş moleküler orbital (Highest occupied molecular orbital)
HTL	: Boşluk transport tabakası (Hole transporting layer)
IOSC	: Ters çevrilmiş organik güneş hücresi (Inverted organic solar cell)
IR	: Kızılötesi bölge (Infrared region)
ITO	: İndium kalay oksit (Indium tin oxide)
LUMO	: En düşük işgal edilmemiş moleküler orbital (Lowest unoccupied molecular orbital)
NIR	: Yakın kızılötesi (Near- infrared)
OLED	: Organik ışık yayan diyot (Organic light emitting diode)
OSC	: Organik güneş hücresi (Organic solar cell)
PBG	: Fotonik bant aralığı (Photonic band gap)
PC	: Fotonik kristal (Photonic crystal)

PCE	: Güç dönüşüm verimliliği (Power conversion efficiency)
RF	: Radyo frekansı
SC	: Güneş hücresi (Solar cell)
ST	: Yarı-geçirgen (Semi-transparent)
TCS	: Test renk örneği (Test color sample)
TMM	: Transfer matris yöntemi (Transfer matrix method)
TMO	: Geçiş metal-oksit (Transition metal-oxide)
UV	: Morötesi (Ultraviolet)
VR	: Görünür bölge (Visible region)



ÖZET

DOKTORA TEZİ

FOTONİK KRİSTAL İÇEREN YARI GEÇİRGEN ORGANİK GÜNEŞ HÜCRELERİNİN TASARIMI ve ÜRETİMİ

Çağlar ÇETİNKAYA

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Baki AKKUŞ

II. Danışman : Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

Bu tez çalışmasında, opak ve yarı-geçirgen (Semi transparent, ST) optik karakteristiğe sahip organik yarıiletken tabanlı bulk-heteroeklem (bulk-heterojunction, BHJ) ters çevrilmiş organik güneş hücreleri (Inverted organic solar cell, IOSC) incelenmiştir. IOSC'lerin aktif bölgesi donör olarak poly (3-hexylthiophene-2, 5-diyl) (P3HT) ve akseptör olarak poly (6, 6-phenyl C61-butyric acid methyl ester) (PCBM) organik yarıiletkenlerinin karışımından, elektron transport tabakası (Electron transporting layer, ETL) ve boşluk transport tabakası (Hole transporting layer, HTL) geçiş metal-oksit (Transition metal-oxide, TMO) malzeme sistemlerinden oluşturmaktadır. Teorik olarak tasarlanan, incelenen ve optimal değerleri belirlenen OSC yapılarının üretimi ve karakterizasyonu Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde yapılmıştır.

Tez kapsamında OSC'lerin incelenmesi metodolojik olarak üç kısma ayrılabilir. İlk olarak farklı HTL malzemesi kullanılarak en iyi hücre performansı veren IOSC yapısı belirlenmiştir. En iyi hücre performansına sahip IOSC'nin belirlenmesinde güç dönüşüm verimliliği (Power conversion efficiency, *PCE*) değerleri referans alınmıştır. Ardından uygun HTL malzemesine sahip yüksek performanslı opak-IOSC yapısı uygun bir dielektrik/metal/dielektrik (dielectric/metal/dielectric, DMD) tabanlı şeffaf üst kontak ile yarı-geçirgen ST-OSC yapısına dönüştürülmüştür. ST-OSC yapısının tasarımı ortalama görünür geçirgenlik (Average visible transmittance, AVT) değerleri üzerinden değerlendirilerek en yüksek AVT'ye sahip optimal

yapı parametreleri elde edilmiştir. Son olarak ST-OSC'lere bir boyutlu (One dimension, 1D) fotonik kristallerin (Photonic crystal, PC) entegrasyonu ile yapıların renk koordinatları Planckian locus'a doğru kaydırılmıştır.

P3HT:PCBM tabanlı IOSC'lerde ETL olarak ZnO ve HTL olarak MoO₃, V₂O₅ ve WO₃ TMO malzeme sistemleri kullanılmıştır. Her bir HTL tabakasının IOSC'nin optik, yapısal ve elektriksel özellikleri üzerine etkisi sırasıyla geçirgenlik, atomik kuvvet mikroskobu (Atomic force microscope, AFM) ve akım-voltaj ölçümleri yapılarak incelenmiştir. En iyi hücre performansı veren HTL malzemesi MoO₃ olarak belirlenmiştir ve yapının dolum faktörü (Fill factor, *FF*) %51.17, PCE değeri ise %2.11'dir.

Opak-IOSC yapısının opak üst kontağı uygun tasarım parametreleri belirlenen MoO₃/Ag/MoO₃ dielektrik/metal/dielektrik (dielectric/metal/dielectric, DMD) şeffaf üst elektrot ile modifiye edilmiş ve ST-OSC yapıları tasarlanmıştır. DMD ve ST-OSC yapılarının teorik soğurma, geçirgenlik ve yansıma karakteristikleri transfer matris yöntemi (Transfer matrix method, TMM) kullanılarak hesaplanmıştır. Tasarımlarda MoO₃/Ag/MoO₃ tabaka kalınlıkları değiştirilerek en yüksek AVT değerine sahip optimal yapı parametreleri belirlenmiş ve bu değerlerde ST-OSC yapısı üretilmiştir. Teorik olarak %38.52 ve deneysel olarak %37.42 AVT değeri elde edilmiştir.

Yüksek AVT değerine sahip ST-OSC yapısının renk koordinatlarının modifikasyonu (MgF₂/MoO₃)^N 1D-PC sisteminin entegrasyonu ile gerçekleştirilmiştir. N=4 periyot ve $\lambda_B=700$ nm için tasarlanan (MgF₂/MoO₃)^N 1D-PC ile ST-OSC'nin renk koordinatları Planckian locus ve D65 renk koordinatlarına kaydığı belirlenmiştir. Bu yapı için *x* ve *y* sırasıyla 0.3248 ve 0.3733, AVT değeri ise %18.63 olarak hesaplanmıştır.

1D-PC içeren ST-OSC tasarımlarında, renk sıcaklığı (Correlated color temperature, CCT) tayini için gerekli $\Delta_{u,v} < 0.0054$ şartı sadece $\lambda_B=725$ nm için N=4 ve 8 periyotlarda sağlandığı görülmüştür. $\lambda_B=725$ nm'de N=4 ve 8 periyot için $\Delta_{u,v}$ değerleri sırasıyla 0.0031 ve 0.0039, CCT değerleri ise sırasıyla 3483 K ve 3161 K'dir. Ayrıca ST-OSC'lerin renksel geriverim indeksi (Color render index, CRI) değerlerinin 1D-PC'in entegrasyonu ile ciddi derecede azaldığı gözlenmiştir.

(MgF₂/MoO₃)^N 1D-PC sistemi ile ST-OSC'nin hücre performansının olumlu etkilendiği belirlenmiştir. 1D-PC içeren ST-OSC'de J_{sc} 'nin, ST olana nazaran daha yüksek, opak olana nazaran ise daha az olduğu gözlenmiştir. Bragg dalga boyu (λ_B) 700 nm'de N=4 periyotta fotonik bant aralığına (Photonic band gap, PBG) sahip ST-OSC yapısının *FF* değeri %53.61 ve *PCE* değeri %1.90'dır.

Çalışma kapsamında yapılan detaylı hesaplamalar ve optimal değerlerde üretilen OSC'ler üzerine incelemeler sonucu, 1D-PC içeren bir ST-OSC tasarımı ile yapının optik özelliklerin modifiye edilebilmesinin ve renk koordinatlarının Planckian locus'a kaydırabilmesinin yanı sıra hücre çıkış parametrelerinin de iyileştirilebileceği belirlenmiştir.

Ekim 2021, 139 sayfa.

Anahtar kelimeler: Yarı-geçirgen Güneş Hücreleri, Organik Güneş Hücreleri, Şeffaf Kontak, Fotonik Kristal

SUMMARY

Ph.D. THESIS

DESIGN and PRODUCTION of SEMI-TRANSPARENT ORGANIC SOLAR CELLS INCLUDING PHOTONIC CRYSTAL

Çağlar ÇETİNKAYA

İstanbul University

Institute of Graduate Studies in Sciences

Department of Physics

Supervisor : Prof. Dr. Baki AKKUŞ

Co-Supervisor : Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

In this thesis, organic semiconductor-based bulk-heterojunction (BHJ) inverted organic solar cells (IOSC) with opaque and semi-transparent (ST) optical characteristics have been investigated. The active site of IOSCs is composed of a mixture of organic semiconductors poly (3-hexylthiophene-2, 5-diyl) (P3HT) as the donor and poly (6, 6-phenyl C61-butyric acid methyl ester) (PCBM) as the acceptor, the electron transport layer (ETL) and hole transporting layer (HTL) are composed of transition metal-oxide (TMO) material systems. The production and characterization of OSC structures, which are theoretically designed, examined and optimal values are determined, were carried out in Gazi University Photonics Application and Research Center.

Within the scope of the thesis, the examination of OSCs can be considered methodologically in three parts. First, the IOSC structure that gives the best cell performance has been determined by using different HTL materials. Power conversion efficiency (PCE) values are taken as a reference in determining the IOSC with the best cell performance. Then, the high-performance opaque-IOSC structure with the appropriate HTL material is transformed into an ST-OSC structure with a dielectric/metal/dielectric (DMD) based transparent top contact. Optimal structural parameters with high average apparent transmittance (AVT) of the ST-OSC structure,

which is designed considering AVT have been obtained. Finally, with the integration of one-dimensional (1D) photonic crystals (PC) into ST-OSCs, the color coordinates of the structures have been shifted towards the Planckian locus.

In P3HT:PCBM based IOSCs, ZnO is used as ETL and MoO₃, V₂O₅ and WO₃ TMO material systems are used as HTL. The effects of each HTL layer on the optical, structural, and electrical properties of the IOSC were investigated by using transmittance, atomic force microscope (AFM), and current-voltage measurements, respectively. The HTL material that gives the best cell performance has been determined as MoO₃, and the fill factor (*FF*) of the structure is 51.17% and the PCE value is 2.1%.

The opaque top contact of the opaque-IOSC structure has been modified with the MoO₃/Ag/MoO₃ DMD transparent top electrode for which the appropriate design parameters have been determined and ST-OSC structures have been designed. Theoretical absorption, transmittance and reflection characteristics of DMD and ST-OSC structures have been calculated using the transfer matrix method (TMM). By changing the MoO₃/Ag/MoO₃ layer thicknesses in the designs, the optimal structure parameters with the highest AVT value were determined and the ST-OSC structure was produced at these values. Theoretically 38.52% and experimentally 37.42% AVT values have been obtained.

The modification of the color coordinates of the ST-OSC structure with a high AVT value (MgF₂/MoO₃)^N has been carried out with the integration of the 1D-PC system. It was determined that the color coordinates of ST-OSC shifted to the Planckian locus and D65 color coordinates by using (MgF₂/MoO₃)^N 1D-PC designed with N=4 period and 700 nm Bragg wavelength (λ_B). For this structure, *x* ve *y* are determined as 0.3248 and 0.3733, respectively, and the AVT value is calculated as 18.63%.

In ST-OSC designs containing 1D-PC, it has been determined that the $\Delta_{u,v} < 0.0054$ requirement for CCT determination is valid only for $\lambda_B = 725$ nm at N=4 and 8 periods. At $\lambda_B = 725$ nm, $\Delta_{u,v}$ values for N=4 and 8 periods are 0.0031 and 0.0039, respectively, and CCT values are 3483 K and 3161 K, respectively. It has also been observed that the CRI values of ST-OSCs are significantly reduced with the integration of 1D-PC.

It has been determined that the cell performance of ST-OSC is positively affected by the (MgF₂/MoO₃)^N PC system. It was observed that J_{sc} in ST-OSC containing 1D-PC was higher than that of ST and less than that of opaque one. The *FF* value of the ST-OSC structure with a photonic band gap (PBG) in N=4 periods at λ_B 700 nm is 53.61% and *PCE* value is 1.90%.

Finally, as a result of detailed calculations and examinations on the OSCs produced at optimal values, it has been determined that the optical properties of the structure can be modified and the color coordinates can be shifted to the Planckian locus, as well as the cell output parameters can be improved with an ST-OSC design including 1D-PC.

October 2021, 139 pages.

Keywords: Semi-transparent Solar Cells, Organic Solar Cells, Transparent Contact, Photonic Crystal

1. GİRİŞ

21. yüzyılda çevre kirliliğinin artması, fosil yakıtların pervasızca tüketilmesi ve bunların sonucunda küresel ısınmanın ortaya çıkması insani gelişmenin önünde ve sürdürülebilir bir çevre edinmede önemli bir engel oluşturmaktadır. Bu yüzden yeşil enerji kaynaklarından yararlanılarak sürdürülebilir bir enerji döngüsüne ulaşmak insanoğlunun yegâne hedeflerinden biri haline gelmiş durumdadır. Ayrıca, ülkelerin ekonomik kalkınmalarında enerjiye bağımlılıkları artmaya devam etmekte ve ekonomik kıtlık olgusu daha belirgin hale gelmektedir. Aynı zamanda yüksek hızlı fosil yakıt tüketimi bir gün biteceği gerçeği göz önünde bulundurularak, eğer fosil enerjiye gerçek bir alternatif yok ise, küresel ekonominin sürdürülebilir kalkınması ciddi şekilde engellenecek ve hatta insanların sosyal yaşamı ciddi şekilde etkilenecektir. Ülkeler, kötüleşen çevre sorunlarını ve enerji krizini hafifletmek, çevreyi korumak ve kirliliği azaltmak için güneş enerjisi ve rüzgâr enerjisi gibi temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarına odaklanmalı ve fosil enerjisine alternatifler bulmaya çalışmalıdırlar [1–5].

Yeşil enerji kaynakları arasında en umut verici olarak kabul edilen güneş enerjisi, diğer tüm yenilenebilir enerji kaynakları arasında tükenmez, kirlilik içermeyen, kolay erişilebilir ve bol miktarda bulunan bir enerji türüdür. Yıllık 120 bin TW güce üretimine sahiptir ve bu değer dünyanın enerji tüketiminin yaklaşık 7-8 katına denk gelmektedir [6]. Modern dünyada artan enerji ihtiyacı talebi, ülkelerin sürdürülebilir ilerlemelerinin doğrudan enerji üretim oranlarına bağlı olduğunu ortaya koymaktadır. Dünyanın sürdürülebilir kalkınması için 2050 yılında enerji tüketiminin 30 TW olacağını birçok çalışmada öngörülmektedir [7]. Bu tüketim tahmini düşük maliyetli, bol ve temiz enerji kaynaklarına olan ihtiyacın ne denli önemli olduğunu göstermektedir. Özellikle fosil yakıt tabanlı enerji kaynaklarının tüketim sınırına ulaşmaları, artan fiyatları, yenilenebilir olmamaları ve çevresel zararlarından dolayı yenilebilir enerji kaynaklarına talebin hızla artması insanoğlu için bir ihtiyaç olmuş durumdadır [8]. Bu durumda yenilenebilir enerji, enerji talebinin üstesinden gelmek için bir çözüm olmuş durumdadır. Tüm veriler dikkate alındığında, en iyi alternatifin güneş pili (Solar Cell, SC) teknolojisi olduğu anlaşılmaktadır.

19. yüzyılın başlarında özellikle silikon tabanlı güneş hücreleri üzerine yapılan çalışmalar, silikon teknolojisinin gelişmesi ve yüksek verimli, maliyeti düşük ve seri üretime elverişli

hücrelerin üretilmesi potansiyelini desteklemekteydi. Bu potansiyel günümüzde 1. jenerasyon olarak bilinen çok kristalli ve tek kristal silikon güneş hücrelerinin piyasada en çok kullanılan güneş hücreleri olma özelliğini beraberinde getirdi. Özellikle çok kristalli silikon güneş hücrelerinin verimlerinin yüksek olmasına rağmen, düşük üretim maliyetlerinden dolayı tek kristal yapıdaki silikon güneş hücreleri piyasada en çok üretilen ve tercih edilen güneş hücreleridir.

Silikona alternatif olacak yeni nesil fotovoltaiik malzemeler üzerine yapılan araştırmalar üretim kolaylığı yüksek ve düşük maliyetli olan malzeme sistemlere olan ilgiyi arttırmıştır. Özellikle ince film teknolojisi ile daha ince ve daha az malzeme içeren ince film malzeme sistemlerinin gelişmesi a-Si, Cd-Te ve CIGS gibi 2. Jenerasyon güneş hücrelerinin akademik çalışmalarda ilgi odağı haline gelmesine yol açmıştır.

3. jenerasyon güneş hücreleri, III-V grubu alaşım yarıiletken, organik yarıiletken, boyaya duyarlı malzeme ve perovskit tabanlı malzemeleri içeren güneş hücreleri olarak ortaya çıkmaktadır. Bu malzeme sistemleri verim ve üretim maliyetleri açısından birbirlerine üstünlük sağlamaktadırlar ve uygulama alanlarına göre tercih edilme durumları değişiklik göstermektedir. Örneğin III-V grubu alaşım yarıiletken tabanlı malzeme sistemleri ile çeşitli bant aralığında malzemeler üretilabilir ve üst üste büyütülebilir. Böylece güneş spektrumunun büyük bir çoğunluğunu soğurabilecek güneş hücresi tasarlanabilir. Bu tip malzeme sistemlerini içeren güneş hücrelerinin verimleri %47 civarında olmasına rağmen, üretimleri oldukça maliyetlidir. Maliyetin önemli olmadığı uzay ve uydu teknolojilerinde kullanım potansiyelleri oldukça yüksektir. Diğer bir sistem olan boya duyarlı güneş hücreleri, 3. Jenerasyon güneş hücreleri arasında hem maliyet hem de verim açısından irdelendiğinde kullanılabilirliği en yüksek yapılar olarak düşünülebilir. Düşük maliyetli üretim şartlarına ve %11.9'a varan verimlere ulaşmalarına rağmen, boyaya duyarlı malzemenin elektromagnetik dalga ile etkileşimi sonucu malzeme içerisinden oluşan serbest taşıyıcıların rekombinasyon olasılıkları artar ve güneş hücresinin verimi oldukça düşer. Bu yüzden boyaya duyarlı güneş hücrelerinin ömürleri oldukça kısadır [9].

Tez kapsamında, teorik hesaplamalar ile tasarım parametreleri belirlenen, incelenen ve optimal değerlerde üretilen organik güneş hücreleri (Organic Solar Cell, OSC) üzerine çalışmalar yapılmıştır. Tez çalışması metodolojik olarak 3 çalışma hedefi ve çıktısıyla özetlenebilir. Bunlardan ilki, donör olarak poly (3-hexylthiophene-2, 5-diyl) (P3HT) ve akseptör olarak

poly (6, 6-phenyl C61-butyric acid methyl ester) (PCBM) organik yarıiletken karışımının oluşturduğu aktif bölgeye sahip ters çevrilmiş organik güneş hücrelerinde (Inverted organic solar cell, IOSC) boşluk transport tabakası (Hole transporting layer, HTL) olarak kullanılan MoO_3 , V_2O_5 ve WO_3 geçiş-metal oksit (Transition metal-oxide, TMO) malzeme sistemlerinin IOSC'lerin elektriksel ve optik özellikleri üzerine etkisini incelemektir. İkincisi, en iyi hücre performansı gösteren HTL malzemesine sahip IOSC yapısının opak üst kontağının uygun tasarım parametreleri belirlenen $\text{MoO}_3/\text{Ag}/\text{MoO}_3$ dielektrik/metal/dielektrik (dielectric/metal/dielectric, DMD) şeffaf üst elektrot ile modifiye edilerek yarı-geçirgen (Semi-transparent, ST) OSC yapılarının tasarlanmasıdır. Son olarak da optimal değerleri belirlenen ST-OSC'lerin 1D-Fotonik kristal (Photonic crystal, PC) sistemi ile optik karakteristiklerinin modifiye edilmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır.

2. GENEL KISIMLAR

2.1. GÜNEŞ ENERJİSİ

2.1.1. Kara Cisim Işıması

Kara cisim her dalgaboyundaki (λ) elektromagnetik dalgayı soğuran idealize edilmiş bir cisimdir. Bu durum kara cismin soğurma katsayısının (Absorption coefficient, $\alpha(\lambda)$) 1 olduğu anlamını taşımaktadır. Pratikte bir delik açılmış siyah bir kutu veya yeterince kalın ve yansımaya yapmayan bir cisim siyah cisim olarak davranabilir. Kirchoff'un enerjinin korunumunu baz alan termal radyasyon yasasına göre mükemmel bir soğurucu olan siyah bir cisim aynı zamanda mükemmel bir yayıcıdır. Kara cisim ışıması, ışığın kuantize doğasını açıklayan Planck yasası ile tanımlanır ve cismin yüzey sıcaklığı ile karakterize edilir. Işığı oluşturan kuantize parçacıklar olan fotonlar, Bose-Einstein istatistiğine uyarlar [10].

Fotonların enerjileri $E_\gamma = \hbar\omega$ 'dır ve burada ω elektromagnetik dalganın açısal frekansı, $\hbar$ indirgenmiş Planck sabitidir ($\hbar = h/2\pi$). Bir $d\Omega$ katı açı aralığında, birim hacim ve $d\hbar\omega$ birim enerji başına enerji durum yoğunluğu $D_{\gamma,\Omega}$, işgal olasılığı f_γ ve foton enerjisinin E_γ 'nin çarpımına eşittir [10]:

$$\frac{d\rho_{E_\gamma}(\hbar\omega)}{d\hbar\omega} = D_{\gamma,\Omega} f_{\gamma,\Omega} E_\gamma = \frac{(\hbar\omega)^2}{4\pi^3 \hbar^3 c^3} \frac{1}{e^{\frac{\hbar\omega}{k_B T}} - 1} \hbar\omega d\Omega \quad (2.1)$$

burada k_B Boltzmann sabiti, T sıcaklık, c ışığın boşluktaki hızı, $\hbar$ indirgenmiş Planck sabitidir. Denklem (2.1)'deki $\frac{d\rho_{E_\gamma}(\hbar\omega)}{d\hbar\omega}$ ile c 'nin çarpımı spektral ışıma olarak adlandırılan spektral enerji akı yoğunluğunu verir. Bu büyüklük birim frekans veya dalgaboyu aralığında birim katı açı ve birim alandan yayılan güç miktarını tanımlar [10]. Açısal frekans ve frekans (ν) arasındaki dönüşümler ($\omega = 2\pi\nu$) yapılarak Planck yasasına göre spektral ışıma aşağıdaki ifade ile verilir:

$$\frac{dj_E(\nu)}{d\nu d\Omega} = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1} \quad (2.2)$$

$$\frac{dj_E(\lambda)}{d\lambda d\Omega} = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1}$$

Denklem (2.2) seti sıcaklığa bağlı olan belirli bir frekans değerinde bir maksimuma sahiptir ve bu belirli frekans değerinden daha yüksek ve daha alçak frekans değeri için bir azalma gösterir. Düşük frekans değerleri için azalma ν^3 'den ve ν ile orantılı olan foton enerjisinden kaynaklanır. $\nu \rightarrow \infty$ durumunda spektral ışımanın sonsuz olması klasik olarak Rayleigh-Jeans yasasıyla bilinen ultraviyole felaketidir. Bu durum daha yüksek enerjilerdeki işgal olasılığının eksponansiyel azalmasıyla düzeltilebilir. Tüm foton enerjileri ve bir yarım küre üzerinden integrasyon alarak toplam yayılan enerji akı yoğunluğunu tanımlayan Stefan-Boltzmann yasasına erişilebilir:

$$j_E = \frac{\pi^2 k_B^4}{60 \hbar^3 c^2} T^4 = \sigma_{SB} T^4 \quad (2.3)$$

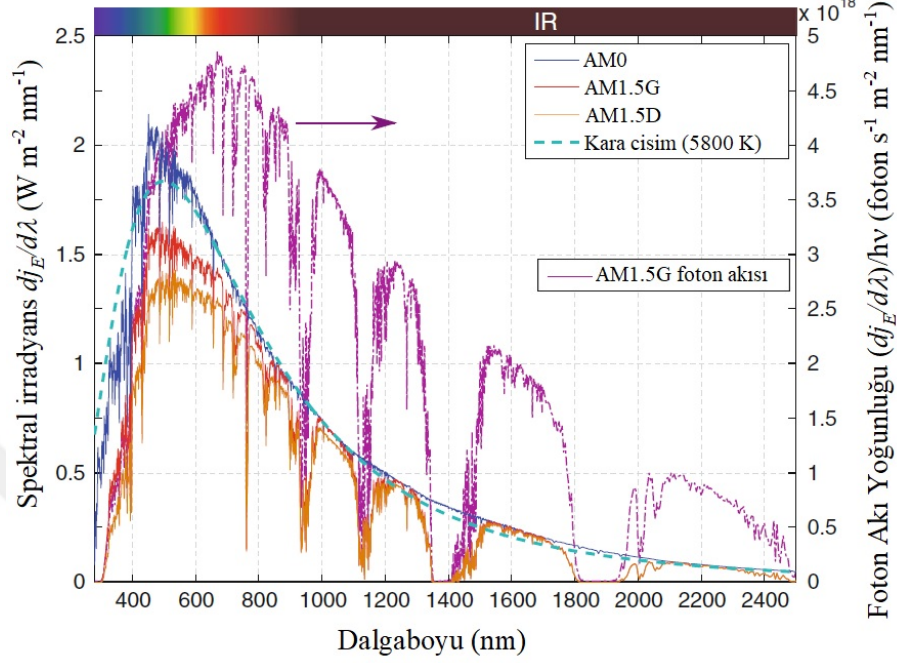
burada σ_{SB} Stefan-Boltzmann sabitidir ve Denklem (2.3)'teki tüm sabitleri içerisinde barındırır. Denklem (2.2) ve (2.3) kara cismin spektrumunun doğrudan sıcaklık ile ilişkisini verirler.

2.1.2. Güneş Spektrumu

Güneş enerjisi, güneşin çekirdeğinde gerçekleşen Hidrojenin nükleer füzyon reaksiyonu ile Helyuma dönüşmesi sonucu yayılan enerjidir ve termal radyasyon olarak yaklaşık olarak 8 dakikada dünya yüzeyine ulaşabilmektedir. Güneş enerjisini herhangi bir enerji türüne çevirme amacı güdülerek tasarlanan her aygıt bu enerjiyi en verimli şekilde dönüştürmelidir. Dolayısıyla, özellikle yarıiletken tabanlı aygıtlarda, yarıiletken bant aralığından (E_g) daha büyük enerjideki fotonların soğurulması söz konusu olduğu için güneşten gelen termal radyasyonun spektral dağılımı iyi bilinmelidir [11,12]. Güneş spektrumu 5800 K sıcaklığındaki bir kara cismin sahip olduğu spektral dağılıma sahiptir [10]. Bu dağılım Şekil 2.1'de verilmektedir.

Güneşten gelen ışıının spektral dağılımın %52'si kızılötesi bölgede (Infrared region, IR), %43'ü görünür bölgede (Visible region, VR) ve %5'i ise morötesi (ultraviolet, UV) bölgededir. Bu dağılımların yoğunluğu güneş ışınlarının atmosferdeki gazlar ile etkileşimine ve izledikleri yola oldukça bağlıdır. Dolayısıyla bu bağımlılık güneş spektrumunun atmosferde ve atmosfer dışında farklı olmasına sebep olur. Bu yüzden, güneş spektrumunu tanımlamak için güneş ışınlarının yayınlandığı andan yeryüzüne ulaşmaya kadarki izlediği yolu ve spektrumlardaki değişimleri bir standarta oturtan hava kütlesi (Air mass, AM) kavramı kullanılır. AM kavramı

“American Society for Testing and Materials (ASTM)” tarafından AM0, AM1.5G ve AM1.5D şekline tanımlanmıştır [10,13] (Şekil 2.1).



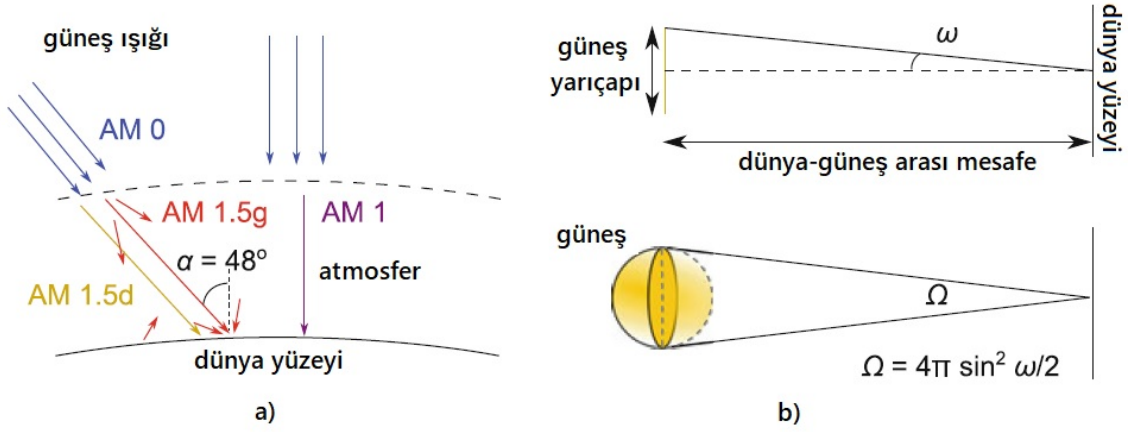
Şekil 2.1: AM0, AM1.5G spektral irradyans, AM1.5G foton akısı ve 5800 K için kara cisim ışıma spektrumları [10].

AM, güneş ışınlarının yeryüzüne kadar ulaşmaya kadar aldığı yolun, güneş ışınlarının atmosferde aldığı en kısa yola oranı olarak belirlenir:

$$AM = \frac{1}{\cos \theta} \quad (2.4)$$

burada θ gelme açısıdır [10]. Güneşten dünya yüzeyine ulaşan güneş ışınlarının radyasyon şiddetleri birim alana düşen güneş ışınımının gücü olarak da tanımlanabilir. Bu miktar $\cos \theta$ 'nın fonksiyonudur.

AM0 dünyanın atmosferi dışında ölçülür ve 1.352 W/m^2 enerji akı yoğunluğuna sahiptir. Bu enerji akı değerine güneş sabiti adı verilir [10]. Güneşten yeryüzüne ulaşan ışınlar atmosferde meydana gelen soğurulma sonucu zayıflar ve enerjilerinin %30'unu kaybederek ve belirli enerjilerinde soğurma çizgileri oluşturularak AM1.5 spektral dağılımını oluştururlar. Dünya yüzeyine 48° ile gelen ışınlar, hiçbir saçılmaya uğramayan ve yüzeye ulaşan AM1.5D (direct) (90 mW/cm^2) ve hem doğrudan hem de atmosferde saçılmalara uğradıktan sonra yüzeye ulaşan AM1.5G (global) (100 mW/cm^2) spektral dağılımlarıdır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2: a) Hava kütlesi ve b) güneş ile dünya yüzeyi arası mesafeye kıyasla katı açı [10].

AM1 spektral dağılımı (92.5 mW/cm^2) dünya yüzeyine dik olarak ($\theta = 0$) ulaşan güneş ışınlarıdır ve atmosferden yeryüzüne gelene kadar en az yolu kat eden ışınlardır. Bu dağılım, güneş ışınlarına dik olarak konumlandırılacak SC'lerin karakterizasyonunda ve performans değerlendirilmelerinde kullanılır.

2.2.FOTOVOLTAİK TEKNOLOJİSİ

Fotovoltaik teknolojisi, güneşten dünya üzerine ulaşan elektromanyetik radyasyonun taşıdığı enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren ve dünya çapında elektrik üretimine önemli ölçüde katkı sağlayabileceği anlayışına dayanan uygulamalı araştırma alanlarıdır. Rüzgâr enerjisinin yanı sıra, fotovoltaik enerji dönüşümlü teknolojiler yeryüzüne ulaşan güneş enerji akışının teorik potansiyelinden dolayı yenilebilir enerji kaynakları arasında en umut vaat edici durumdadır. Bu potansiyelin, 2010 yılındaki 12 milyar ton petrol eşdeğeri ($\approx 15 \text{ TW}$ ortalama güç) olan küresel yıllık enerji tüketiminden 6 bin kat daha büyük olduğu tahmin edilmektedir [10]. Ancak buna rağmen insanoğlunun günümüz enerji ihtiyacının %80'den fazlası fosil yakıtlardan sağlanmaktadır [14].

Fosil yakıt kaynaklı enerji çevrimlerini baz alan dönüşümlerde temel olarak iki sorun ortaya çıkar: Birincisi, fosil kaynaklar sınırlıdır ve dünya yüzeyindeki dağılımları çok dengesizdir. İkincisi, fosil yakıtların yanması sonucu doğada sera gazı etkisi görevi gören karbondioksit (CO_2) salınımı ortaya çıkar [10]. Sera gazı etkisi iklim değişikliğine neden olur ve atmosferin kızılötesi bölgedeki radyasyonunu yeryüzünün yüzeyinden tekrar kendisine geri yansıtılmasından kaynaklanır. Sera etkisi güneş, atmosfer ve dünya yüzeyi arasındaki

radyasyon dengesini kurar ve dünyadaki yaşamın gelişimi için gereklidir. Sera gazı olmadan $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ olan ortalama dünya yüzey sıcaklığı sera gazı ile $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de tutulur [15]. Böylece yeryüzünde küresel sıcaklık dağılımı ve sıcaklığa karşı çok hassas olan karakteristik flora ve faunası ile iklim bölgeleri oluştu. Bu dengenin sonucu olarak son yılda yeryüzü sıcaklığı oldukça sabitti. Sera etkisinin bu olumlu etkileri üzerine insanoğlunun CO_2 salınımını arttıran enerji kaynaklarını tüketmesi sonucu sera etkisinin artmasıyla yeryüzü sıcaklığı artmaya ve yeryüzündeki dağılımı bozulmaya başladı. Küresel ısınma olarak bilinen bu durum, okyanus sularının termal olarak genişlemesinden ve kıyıya ulaşan buzulların erimesinden dolayı deniz seviyesinin yükselmesine sebep olmaktadır. Ayrıca sıcaklığın artması bazı bölgelerde çölleşme ve su kıtlığı gibi problemleri de beraberinde getirmektedir.

Doğa durağan bir sistem olmayıp sürekli değişim, gelişim ve asimilasyon içinde olmasına rağmen, çevrenin hızlı bir şekilde değişmesiyle birçok canlı türünün hayatta kalması tehlikededir. Bu yüzden insanoğlu CO_2 salınımını arttıran fosil yakıt tabanlı enerji kaynaklarından vazgeçmeli ve yenilebilir enerji kaynaklarını daha verimli bir şekilde kullanmaya yönelmelidir.

İç fotoelektrik etki olarak tanımlanan fotovoltaiik etki tabanlı teknolojilerin kökeni, Alexandre-Edmond Becquerel'in fotovoltaiik etkiyi keşfettiği 1839 yılına dayanmaktadır ve bu etki prensip olarak güneş enerjisinin doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülmesidir [16]. Özellikle fotovoltaiik teknolojisine dayalı çalışan aygıtların gelişimi, 1905'de Albert Einstein'ın ışığın foton adı verilen kuantalardan oluştuğunu öne sürerek fotoelektrik olayı açıklayabilmesinin ardından 1900'lü yılların ilk yarısında olmuştur [17]. 1941 yılında Russel Ohl ilk silikon tabanlı ışığa duyarlı aygıtı geliştirdi ve $p-n$ eklemine keşfinden yaklaşık 6 yıl sonra 1954'de Bell Laboratuvarları'nda Chaplin, Fuller ve Pearson tarafından %6 verimliliğe sahip ilk silikon güneş hücresi üretildi [18]. 1900'lü yılların ikinci yarısında, silikon tabanlı fotovoltaiik teknolojileri üzerine yapılan çalışmalar hız kazanırken günümüzde Japon firması Kaneka tarafından silikon güneş hücresinde %25'in üzerinde verim elde edilmiştir.

Fotovoltaiik tabanlı aygıtların ilk geliştirildiği yıllarda, aygıtı üretmek için gerekli olan enerji ve maliyet aygıtın ömrü boyunca üreteceği enerji miktarını ve bu enerji miktarına denk gelen mali geri kazanımı karşılamıyordu. Ancak günümüzde, geri ödeme süresi fotovoltaiik aygıtların maruz kaldığı güneş ışığına bağlı olarak 3-5 yıla kadar düşmüş durumdadır. Bu önemli

kazanım, son on yılda güneş pillerinin verim oranları önemli ölçüde artması ve sektöre birçok yeni üretim yöntemi getirilmesi sonucu oluşmuştur [19]. Dolayısıyla yenilenebilir enerji kaynakları arasından fotovoltaik tabanlı teknolojilerin kullanım potansiyelleri günümüzde oldukça fazladır.

2.3.ORGANİK GÜNEŞ HÜCRELERİ

Hidrokarbon moleküller içeren organik yarıiletken tabanlı malzemelerin fotovoltaik özelliklerinin keşfedilmesi silikon tabanlı güneş hücreleri ile aynı tarihlere dayanmaktadır. 1954 yılında perylene-iodine kompleksinde yüksek iletkenliğin keşfedilmesi ile, 1970’lerde yarıiletken polimerler üzerine yapılan araştırmaların ardından çeşitli optoelektronik uygulamalar için organik malzemeler ilgi odağı haline gelmiştir [20–24]. Bu yıllarda yarıiletken polimer üzerine yapılan çalışmalar sonucu 2000 yılında Allan J. Heeger, Alan G. Mac Diarmid ve Hideki Shirakawa Nobel Kimya Ödülü’nü aldılar. Organik yarıiletkenlerin teknolojiye kullanılması ve kendilerine market oluşturmaları 1970’lerde organik ışık yayan diyotun (Organic light emitting diode, OLED) keşfi ile başladı ve organik malzemelerin 1980’lerde yüksek elektrolüminesans özelliklerinin keşfedilmesi ile hız kazandı [25,26]. Günümüzde OLED’ler verimli ve panel ekran uygulamalarında kullanılabilirliğinin yanı sıra geniş ve ayarlanabilir bir spektruma sahip ışıma karakteristiklerine sahiptirler [10]. Bu sayede geniş alan ışık kaynağı olarak kullanılabilme potansiyelleri oldukça yüksektir [27]. OLED’ler üzerinde yapılan çalışmalar, OLED’lerin tam ters prensibinde çalışan, elektromagnetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren OSC’ler üzerine olan ilgiyi de arttırmıştır. Hem OLED’lerin hem de OSC’lerin hafiflik, esneklik, düşük maliyette basit üretilebilme teknikleri ile üretilebilmeleri, geniş alan uygulamaları gibi özelliklerinden dolayı inorganik tabanlı optoelektronik aygıtlara güçlü alternatif olmuşlardır. OLED’lerin OSC’lere göre teknolojiye ve uygulamada daha erken yer bulabilmesinin sebebi, OSC’lerin ilk zamanlarda çok düşük verimlere sahip olmasından, yeni polimer malzemelerinin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmasından ve OLED’lerin yüksek elektrolüminesans özelliklerine sahip olmalarından kaynaklanmaktadır.

Organik yarıiletken bir malzemede ilk foto-akım 1959 yılında Kalman ve Pope tarafından gözlenmiştir [28]. Bu gözlemin ardından birçok organik yarıiletken tabanlı aygıt geliştirilmiştir. Bu aygıtların çoğu metal ve organik yarıiletken eklemden oluşmaktadır. Bu ilk yapılar %0.1’den daha düşük verime sahiptiler [29]. Tam anlamıyla organik malzemenin bir güneş

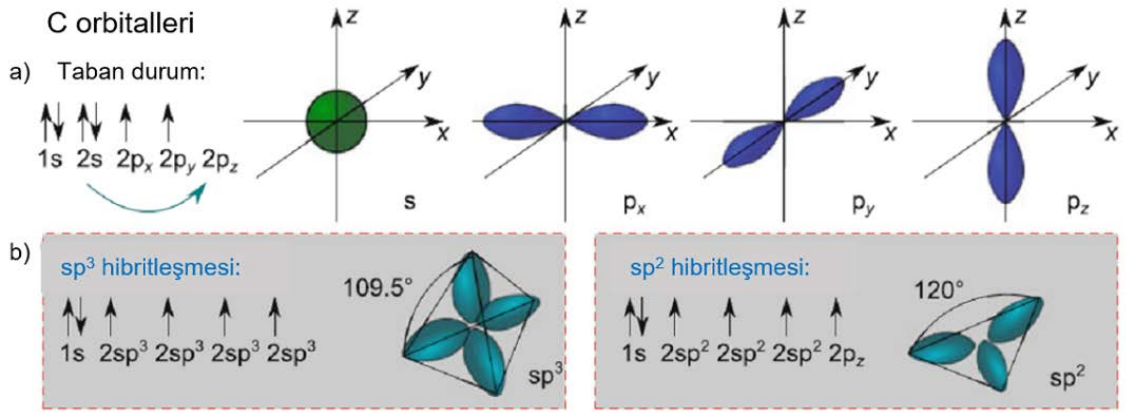
hücresi yapısına entegre edilmesi 1986 yılında Tang tarafından gerçekleştirildi ve %1 değerinde verim elde edildi [10]. Bu gelişimi takiben donör ve akseptörün karışım halde bulunduğu bulk-heteroeklem (bulk-heterojunction, BHJ) yapılar geliştirildi [30–32]. Tüm bu gelişmelerin devamında günümüzde farklı yapı mimarisinde ve farklı katmanlarla modifiye edilen yapılarda %18 verime ulaşılmış durumdadır [33,34].

SC'in aktif bölgesini oluşturan organik ve inorganik yarıiletken malzemeler karşılaştırıldığında, inorganik malzemeler özellikle geniş alan ve pratik uygulamalar için hem maliyet hem ağırlık hem de kolay olmayan üretim ve işlenebilme özellikleri açısından eski popülerliğini kaybetmiştir. Çünkü organik malzemelerin aktif bölgeyi oluşturduğu organik güneş hücreleri (Organic solar cell, OSC) basit, düşük maliyetli üretim ve fabrikasyon süreçleri, esneklik, hafiflik ve roll-to-roll basılabilirlik açısından çok kullanışlıdır ve uygulanabilir fotovoltaiik sistemler için umut vaat etmektedirler [35–39]. Geçmişte inorganik yarıiletken tabanlı güneş pillerinin güç dönüşüm verimliliği (Power conversion efficiency, *PCE*) değerleri OSC'lerden çok daha yüksek olmasına rağmen, OSC'lerin *PCE*'si bugün %3'ten %18'in üzerine çıkmış durumdadır [34,40]. Özellikle OSC'lerin üretim ve imalatındaki esneklik ve kolaylık nedeniyle günlük hayata entegre edilebilecekleri alanlar oldukça geniştir. Bu uygulama potansiyeli, daha düşük *PCE* değerlerine sahip olsa bile OSC tabanlı sistemlerin inorganik malzeme tabanlı sistemlere ciddi bir alternatif olduğunu göstermektedir. Bu yüksek potansiyele ek olarak, *PCE*'yi iyileştirmek için solvent katkı maddelerinin benimsenmesi, çeşitli aktif katmanların, termal veya solvent tavlama işlemlerinin kullanılması, üçlü strateji ve ters yapı hücrelerinin kullanılması gibi birçok çalışma yapılmıştır [41–46].

2.3.1. Organik Güneş Hücrelerinin Çalışma Prensipleri

Organik bir yarıiletken malzeme farklı özelliklerdeki organik moleküllerin bir araya gelmesiyle oluşan, bağ kuvvetleri zayıf amorf veya nano-kristalize olmuş yapılardır. Bu farklı özellikler tek bir molekülün soğurma, ışıma gibi optik özellikleri ve yük transportu, lokalizasyon, yüklerin ayrımı ve difüzyonu gibi elektriksel özelliklerdir. Yapı oluştuğunda bile her bir molekül özelliğini yitirmez ve katı organik malzeme her bir molekülün özelliğini taşımış olur. Optik özelliklere nazaran elektriksel özellikler, katı bir filmde moleküllerin düzenlenmesine oldukça bağlılık gösterir. Dolayısıyla organik bir katı malzeme amorf veya nano-kristalize olduğundan malzeme içinde taşıyıcıların lokalizasyonu oldukça fazla olacaktır. Bu lokalizasyon etkisi taşıyıcıların hareketliliğini ve difüzyonunu azaltan önemli bir fiziksel süreçtir.

Kristal bir yarıiletken malzemede, taşıyıcıların dalga fonksiyonlarının üst üste binmesi lokalize olmuş taşıyıcılar tarafından işgal edilebilecek enerji bantlarının oluşmasına yol açar. Organik yarıiletkenlerde ise, lokalize olmuş taşıyıcıların yer değiştirmesi organik yarıiletkeni oluşturan moleküllerin π -sistemi denilen bir alt biriminde çok daha küçük bir uzunluk ölçeğinde gerçekleşir. Çünkü, organik malzemeler ile ilgilendiğimiz için ana elementimiz, 2'si valans elektronu olan 6 tane elektrona sahip karbon (C) elementidir. C elementinin elektronik konfigürasyonu $1s^2 2s^2 2p^2$ 'dir. s orbitalleri 4 elektron tarafından tamamen doldurulur ve geri kalan 2 elektron ise 2. kabuğun 3'lü dejenere olan p orbitalinde bulunmaktadır (Şekil 2.3) [10,13].



Şekil 2.3: Tek bir karbon atomunun taban durum elektronik konfigürasyonunun orbital şekilleri ve hibritizasyon durumları [10].

Organik yarıiletken malzemeyi oluşturan atomların birbirleri ile yaptıkları bağ sonucunda asal gaz konfigürasyonunda olma eğilimindedirler. Bu yüzden sadece valans elektronlarının önemli rol oynadığı kimyasal bağ stabil olma özelliği gösterir. Dolayısıyla bir organik yarıiletkeni oluşturan moleküllerin atomları birbirlerine zayıf Van der Waals kuvvetleri ile bağlı olduğu konjuge p bağları ile bağlıdır. İnorganik yarıiletkenlere oranla organik yarıiletkenlerde atomların birbirlerine daha zayıf bir bağ kuvveti ile bağlı olmaları, organik yarıiletkenlerin esnek, bükülebilir, hafif ve daha kolay fabrikasyon süreçleri ile şekillenebilmelerini sağlayan düşük sublimasyon değerlerine sahip malzemeler olmalarını sağlamaktadır.

Organik yarıiletkenlerin bant yapısı inorganik yarıiletkenlerin bant yapısında olduğu gibi, valans bandı tamamen elektronlarla doludur ve iletkenlik bandında ise serbest elektronlar bulunur. Ancak organik yarıiletkenlerde iletkenlik ve valans bantları sırasıyla, en yüksek işgal edilmiş moleküler orbital (Highest occupied molecular orbital, HOMO) ve en düşük işgal

edilmemiş moleküler orbital (Lowest unoccupied molecular orbital, LUMO) seviyeleri ile ifade edilir. Bu seviyeler konjuge π -elektronlarının bağ ve anti-bağ arasındaki hibridizasyonu ile belirlenir [13,47,48]. Organik bir molekülde bir elektron iki kuantum seviyesi arasında yani HOMO seviyesinden LUMO seviyesine uyarıldığı zaman, organik molekülün kendisi daha yüksek bir enerji seviyesine uyarılmış olur.

Düzensiz konjuge polimer yapısı malzeme içerisinde potansiyel engelleri oluşturur. Dolayısıyla organik yarıiletkenlerde taşıyıcıların transportu bu potansiyel engellerini aşabilmek için termal uyarımla hoplama mekanizmasının gerçekleşmesi ile sağlanır [49]. Hoplama mekanizması ile sağlanan yük taşınım süreci, inorganik yarıiletkenlerle karşılaştırıldığında organik yarıiletkenlerin oldukça düşük bir mobiliteye sahip olmalarının sebebidir.

OSC'lerinin performansını ciddi bir şekilde etkileyen süreçler dört adımda sıralanabilir:

- Elektromagnetik radyasyonun OSC'nin aktif bölgesini oluşturan organik malzemeye etkileşimi sonucu yapıda oluşan eksiton üretimi,
- Üretilen eksitonların donör ve akseptör malzemelerinin oluşturduğu heteroeklemde hareketliliği ve difüzyonu,
- Eksitonların yapıya serbest elektron ve boşlukların sağlanması için heteroeklem bölgesinde oluşan iç elektrik alan tarafından parçalanması,
- Aktif bölgede oluşan serbest taşıyıcıların elektrotlara iletilmeleri ve toplanmaları.

2.3.1.1. Eksiton Üretimi

Elektromagnetik radyasyon ile organik yarıiletken malzemenin etkileşimi sonucu yapı içerisinde serbest hale gelmeye çalışan elektron ve boşluk arasında bir Coulomb etkileşimi oluşmaktadır. Bu etkileşim, organik yarıiletkenlerin düşük dielektrik sabitine sahip olmalarından ve taşıyıcıların dalga fonksiyonlarının lokalize olmasından dolayı oldukça güçlüdür. Dolayısıyla bu etkileşim elektron ve boşluğun yapı içerisinde serbest olmalarını engeller [50,51]. Bu yüzden elektron ve boşluk arasından oluşan güçlü etkileşim bağlanma enerjileri 1-1.4 eV arasında değişen eksiton adı verilen sanki-parçacıkların oluşmasına sebep olmaktadır. Bu durum organik yarıiletkenlerde transportun, serbest taşıyıcılar olarak eksitonlar ile yapıldığını belirtir. Oysa inorganik yarıiletkenlerde eksitonların bağlanma enerjileri

meV mertebelerindedir ve oda sıcaklığında bile eksitonların bağlı kalmaları mümkün değildir [51]. Bu yüzden, bir foton soğurulması sonucu, organik yarıiletkenlerde inorganik yarıiletkenlere nazaran yapıya serbest elektron ve boşluk sağlamak daha zordur.

2.3.1.2. Eksiton Difüzyonu ve Ayrışımı

Organik yarıiletken tabanlı güneş hücrelerinde, aktif bölgede elektromanyetik radyasyonun soğurulması sonucu oluşan eksitonları ayırarak foto-akımı oluşturacak serbest elektron ve boşluklar elde etmek güneş hücresinin performansını önemli derece etkileyen bir süreçtir. Eksitonların ayrımı ve difüzyonu inorganik yarıiletken tabanlı güneş hücrelerinde serbest taşıyıcıların yapıya sağlandığı sürece benzer olarak, donör ve akseptör olarak kullanılan iki farklı organik malzeme ile elde edilen heteroeklem ile sağlanabilir. OSC'nin heteroeklem tasarımında, organik yarıiletkenlerin bant aralıklarının yani HOMO ve LUMO seviyeleri farkının doğru bir şekilde seçilmiş olması güneş hücresinin verimini ciddi bir şekilde etkiler [52].

Elektromagnetik radyasyonun soğurulması sonucu oluşan eksitonların rekombine olmadan özellikle serbest taşıyıcıların heteroeklemde ilgili kısımlara ulaşmaları rekombinasyon ve yük transfer süreleri ile doğrudan ilişkilidir. Eksitonların ışımalı rekombinasyon süreleri 1 ns mertebelerindedir ve yük transfer süresi 45 fs zamanından daha kısa sürede gerçekleşir [53,54]. Bu durumda oluşan eksitonlar rekombine olmadan yük transferine katkıda bulunabilirler ve böylece organik malzemede foto-akım elde edilebilir.

Heteroeklemde eksiton oluşumu ve iç elektrik alan ile serbest elektron ve boşluğa ayrılma süreci, aynı zamanda eksitonların rekombine olmadan yapı içinde aldıkları yol ile, yani difüzyon uzunlukları ile doğrudan etkilenen bir süreçtir. Organik yarıiletkenlerde eksitonların difüzyon uzunlukları 10-20 nm mertebelerindedir [53,54]. Dolayısıyla heteroeklemde malzemelerin oluşturduğu faz ayrımı, difüzyon uzunluğundan kısa olması gerekir. Bu durum özellikle aktif bölgenin çok ince olması gerekliliğini doğurur. Dolayısıyla aktif bölgede soğurulacak radyasyon miktarını azalacak ve hücre performansı olumsuz etkilenecektir. OSC tasarımı için kullanılan organik malzeme içerisinde eksitonların bu yüzden difüzyon uzunlukları ve aktif bölge kalınlığı arasında iyi bir optimizasyon yapılması gerekir.

2.3.1.3. Yük Taşınması ve Toplanması

İnorganik yarıiletken tabanlı SC'lerde olduğu gibi serbest taşıyıcıların rekombine olmadan elektrotlara ulaşabilmelerini sağlayan iki akım mekanizması vardır: Sürüklenme ve difüzyon akımları [55]. SC yapısında farklı katmanların ve özellikle elektrotların oluşturduğu potansiyel değişimi bir elektrik alan meydana getirir. Bu elektrik alanın etkisinde kalan serbest taşıyıcılar kontaklara doğru süpürülür ve sürüklenme akım yoğunluğu oluşur. Yapı içerisinde potansiyel gradyentinin fazla olması elektrik alan değerini artırır ve dolayısıyla yüksek bir sürüklenme akım yoğunluğu elde edilir. Bu durum hücre performansını olumlu etkiler ve bu yüzden yüksek bir potansiyel gradyenti meydana getiren yüksek iş fonksiyonuna sahip anot ve düşük iş fonksiyonuna sahip katot malzemeleri elektrot olarak kullanılmaktadır.

Foto-üretim sonucu oluşan serbest taşıyıcılar üretildikleri bölgede çoğunluk olarak bulunurlar ve SC yapısında bir taşıyıcı düzensizliği meydana gelir. Oluştukları bölgede çoğunluk olan taşıyıcılar azınlık olarak bulundukları bölgeye difüze olurlar ve difüzyon akımı oluşur. Difüzyon akımı, eklemenin ileri besleme durumunda iç elektrik alanın sıfırlanması sonucu baskın hale gelebilir. Dolayısıyla herhangi bir dış besleme olmaksızın SC'de baskın akım mekanizması sürüklenme akımıdır.

2.3.1.4. Yük Toplanması ve Elektrotlar

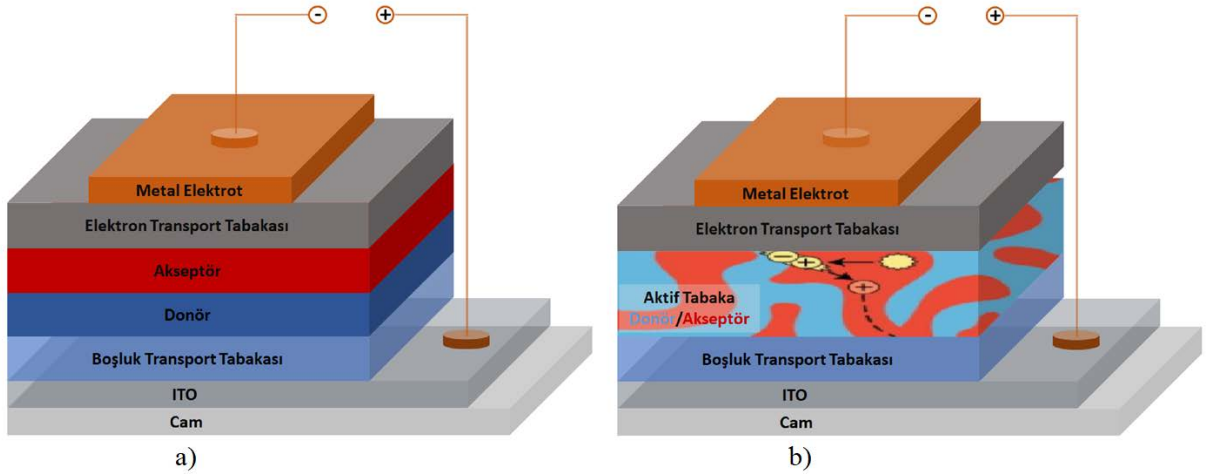
OSC'lerde oluşan serbest taşıyıcılar oluştukları aktif bölgeden elektrotlara ulaşma süreci güneş hücresinin verimini etkileyen bir süreçtir. Elektrotlarda yük toplanma verimliliğini iyileştirmek için, elektrot ve aktif tabaka arayüzeyinde oluşacak potansiyel bariyerinin oluşmaması hedeflenir. Pratikte bu potansiyel engelini sıfırlamak mümkün olmasa da engelin yüksekliğini olduğunca azaltmak, serbest taşıyıcıların arayüzeyden elektrotlara doğru ilerlemesini ve toplanmasını kolaylaştıracaktır. Bu durum sağlandığında aygıtın kontak karakteristiği ohmik davranış gösterir. Bunun için, anot materyalinin iş fonksiyonu aktif bölgedeki donör malzemesinin HOMO seviyesine, katot materyalinin iş fonksiyonu ise aktif bölgedeki akseptör malzemesinin LUMO seviyesine yakın olması gerekir [56].

Elektrot ve aktif bölge malzemelerinin iş fonksiyonlarının uyumlu olduğu güneş hücrelerinin tasarımı için farklı tip malzemeler elektrot olarak seçilmektedir. Organik yarıiletken tabanlı güneş hücrelerinde anot malzemesi olarak en yaygın olarak kullanılan iki malzeme, iş fonksiyonu 4.7 eV olan İndium Kalay Oksit (Indium Tin Oxide, ITO) ve iş fonksiyonu 5 eV olan Florin Kalay Oksit (Flourine Tin Oxide, FTO)'tir [33,57,58].

2.3.2. Organik Güneş Hücre Mimarisi

2.3.2.1. İki Katmanlı Organik Güneş Hücreleri

Organik yarıiletken kullanılarak geliştirilen ilk SC mimarisi iki katmanlı bir yapıda tasarlanmıştır [52]. Konvansiyonel iki katmanlı bir OSC yapısı Şekil 2.4 a’da verilmektedir. İki katmanlı OSC yapısı sırasıyla bir anot, bir boşluk toplama tabakası, donör ve akseptör malzemelerinin üst üste biriktirilmesi ile oluşturulan aktif tabaka, elektron toplama tabakası ve katottan oluşmaktadır. Donör ve akseptör malzemeleri, eksitonların ayrıldığı belirgin bir arınmış bölgenin olduğu bir arayüzey bölgesi oluşturmaktadırlar. İki tabakalı OSC’lerin çalışma prensibi, tipik bir güneş hücresinin çalışma prensipleriyle açıklanabilmektedir. Yapıdaki boşluk toplama tabakası ve elektron toplama tabakası temel prensipte sırasıyla boşlukların ve elektronların kontaklara erişimi için yapıda görev yapmaktadırlar. OSC içinde bir bant düzeni oluşturarak aktif bölgeyi oluşturan malzemelerin HOMO ve LUMO seviyeleri ile elektrotların iş fonksiyonları arasındaki uyumu sağlarlar [13]. Bu sayede serbest taşıyıcıların oluştukları bölgeden kontaklara iletilirken karşılaştıkları potansiyel engelleri azaltılmış olur. Bu tabakalar aynı zamanda elektron transport tabakası (Electron transporting layer, ETL) ve HTL olarak da adlandırılırlar.



Şekil 2.4: a) İki katmanlı ve b) BHJ OSC’lerin yapıları.

İki katmanlı OSC tasarımında, organik yarıiletkenlerde eksitonların difüzyon uzunluklarının kısa olmasından dolayı donör ve akseptör malzemelerinin kalınlıkları çok yüksek seçilemez. Eğer donör ve akseptör malzemeleri çok kalın ise, heteroeklemden çok uzakta üretilen eksitonlar heteroekleme ulaşip ayrılmadan önce rekombine olabilirler. Eğer aktif tabaka çok ince ise, OSC’de elektromanyetik radyasyonun önemli bir kısmı soğurulmaz ve verim oldukça

düşer. Bu yüzden, eksitonların heteroeklem ve civarında oluşarak iç elektrik alan ile ayrılmaları ve elektrotlara ulaşmaları iki tabakalı güneş hücrelerinde oldukça zordur. Bu da iki katmanlı güneş hücrelerinin en önemli dezavantajlarından biridir.

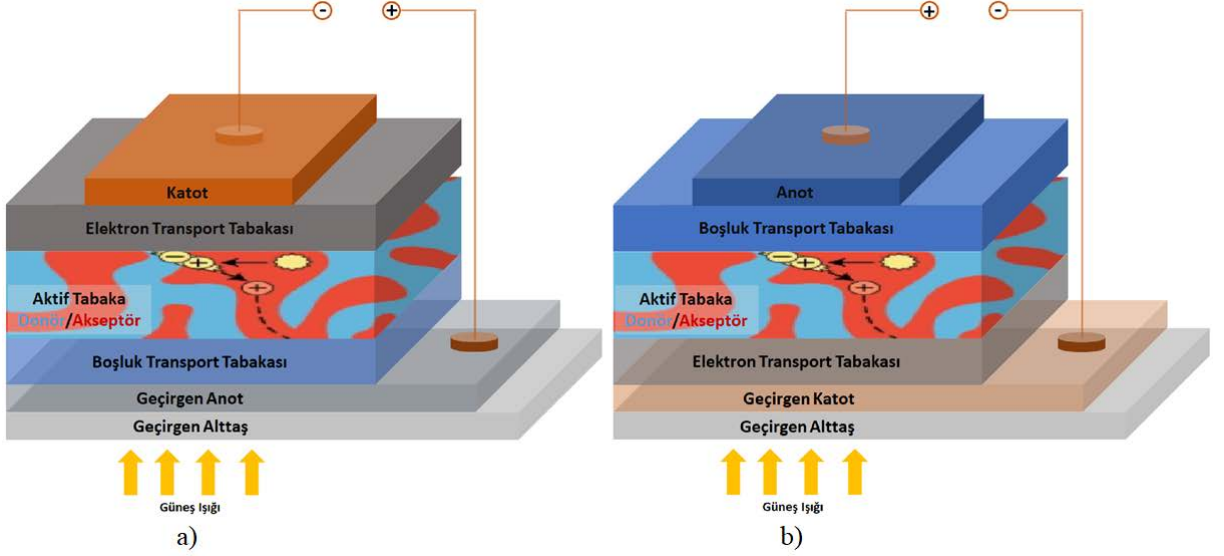
2.3.2.2. Bulk Heteroeklem Organik Güneş Hücreleri

İki katmanlı OSC'lerin tasarım problemlerinin üstesinden gelmek için, iki katmanlı güneş hücrelerindeki dezavantajları içinde barındırmayan yeni bir organik yarıiletken tabanlı güneş hücre yapısı olan BHJ OSC'ler geliştirilmiştir (Şekil 2.4 b). BHJ OSC'lerde aktif bölge, donör ve akseptör malzemelerinin bir çözelti içerisinde karıştırılmasıyla oluşmaktadır. Aktif bölgeyi oluşturan bu karışım, donör ve akseptör malzemelerinin özelliklerini koruduğu ancak nano ölçekte iç içe geçtiği bir sistemdir. Dolayısıyla aktif bölgede nano fazda birbirinden ayrılmış çok sayıda p-n eklemi varmış gibi düşünülebilir. BHJ OSC'lerde nano ölçekteki faz ayrımı 10-20 nm mertebelerindedir ve rekombinasyon olmadan, difüzyon uzunlukları 10-20 nm olan eksitonların eklem bölgesinde oluşan güçlü elektrik alan tarafından serbest elektron ve boşluklara dönüştürülerek elektrotlara doğru sürüklenmesi mümkündür [13]. İki katmanlı OSC'lerde görülen problemlerin üstesinden gelinen BHJ sistemi ile OSC'nin aktif katmanının kalınlığı üzerine getirilen sınırlamalar kalkmış ve elektromagnetik radyasyonun daha büyük bir miktarını soğurabilme yolu açılmıştır. Bu durum daha yüksek performansa sahip OSC'lerin üretilmesini sağlamıştır.

2.3.2.3. Arayüzey Mühendisliği

BHJ OSC'lerin geliştirilmesi ve iki katmanlı yapılara nazaran daha yüksek verimlere ulaşılması yeni nesil ve daha verimli BHJ OSC'ler üzerine yapılan yeni tasarımların geliştirilmesine önayak olmuştur. BHJ OSC'lerin en basit yapısı sandviç aygıt yapısı olarak adlandırılan yapıdır ve bu yapı, aktif bölgede konjuge polimer donör ile fullerene türevi akseptör malzemesi karışımını içermektedir. Aktif bölge ITO veya FTO gibi geçirgen metal-oksid tabakaları ile metal elektrot arasına yerleştirilmesiyle oluşmuştur [31]. Bu yapılar konvansiyonel ve ters çevrilmiş yapılar olmak üzere iki ana gruba ayrılabilir. Aygıt ömrü, fabrikasyon ve üretim süreçleri açısından, konvansiyonel BHJ OSC yapıları bazı problemler içerir. Boşlukların toplandığı şeffaf iletken ITO zamanla asidik polimerler tarafından deforme olur ve aşınır. Bu da zamanla güneş hücresinin performansında ciddi bozulmalara sebep olur [13]. Bu ihtiyaç doğrultusunda, ters çevrilmiş organik güneş hücresi yapıları geliştirilmiştir. Bu yapılarda yük toplama polaritesi konvansiyonel yapılara göre terstir.

Konvansiyonel organik güneş hücrelerinde, ITO anot malzemesi, düşük iş fonksiyonuna sahip bir metal de katot malzemesi olarak kullanılmasına rağmen, IOSC'lerde modifiye edilmiş ITO katot, büyük iş fonksiyonuna sahip metal ise anot malzemesi olarak kullanılmaktadır [13]. Konvansiyonel ve ters çevrilmiş organik güneş hücre yapıları Şekil 2.5'de verilmektedir.



Şekil 2.5: a) Konvansiyonel ve b) ters çevrilmiş BHJ OSCs yapıları.

Hem konvansiyonel hem de IOSC'de ETL ve HTL tabakaları aktif tabaka ve elektrotlar arasındaki elektriksel karakteristiği belirler ve elektrotların ohmik bir karakteristik göstermesi hedeflenir. Aktif bölge ve elektrotlar arasındaki arayüzey tabakaları, OSC'lerin performansını önemli derecede etkileyen elektriksel kontak için hayati bir öneme sahiptir [13,59–61].

Özellikle OSC'leri oluşturan malzemelerin farklı E_g ve iş fonksiyonlarına sahip olmaları yapı içerisinde potansiyel dağılımını ve gradyentini değiştirir. Eksitonların ayrılarak yapıya serbest halde taşıyıcıların sağlanması ve taşıyıcıların yapı içerisindeki transportu için kontaklara süpürülme sürecinde, taşıyıcıların karşılaştıkları potansiyel engelleri olabildiğince az olmalıdır. Çünkü 10-20 mV'luk bir potansiyel engeli bile yük birikimine sebep olabilecek kadar büyüktür. Bu engeli minimize etmek ve rekombinasyon kayıplarını azaltmak hücre verimliliğini önemli derecede artırır. Bu durum arayüzey mühendisliğinde en çok dikkate alınması gereken tasarım parametrelerinden biridir. Çünkü 10-20 mV'luk bir potansiyel engeli bile yük birikimine sebep olabilecek kadar büyüktür. Bu engeli minimize etmek ve rekombinasyon kayıplarını azaltmak hücre verimliliğini önemli derecede artırır. Bu yüzden, yüksek foto-akım değerlerine sahip, uzun ömürlü organik güneş hücrelerinin tasarımı için dünya çapında birçok araştırmacı ve

araştırma grubu yeni işlevlere sahip arayüzey malzemeleri ve onların uygulamalarını içeren çalışmalar yapmaktadırlar [13,59–61].

ETL ve HTL yapıları OSC'lerde yapı içerisindeki bant düzenini sağlamanın dışında, sadece tek tip taşıyıcının transportuna izin verilirken diğerinin transportunu engelleyerek, seçici transportu yapıda sağlamak için de kullanılmaktadırlar. Aynı zamanda bu tabakalar organik malzemeye metal iyonlarının difüze olmasını engellemek ve metal elektrot ile aktif tabaka arasında kimyasal reaksiyonu önlemek için ayırıcı tabaka olarak görev yapmaktadırlar. Optik olarak da OSC'ye gelen elektromagnetik dalgaların yapı içerisindeki dağılımını aktif tabakanın merkezi ve etrafında lokalize eden bir optik ayırıcı gibi görevleri de vardır. Bu fiziksel süreç OSC'lerde kısa devre akımını arttıran bir süreçtir.

IOSC'lerde yük toplama polaritesi konvansiyonel yapılara göre ters olduğu için, yüksek iş fonksiyonuna sahip olan ve havaya maruz kaldığında herhangi bir performans problemi yaratmayan Altın (Au), Gümüş (Ag) ve Bakır (Cu) gibi metaller üst kontak olarak kullanılabilir. Yüksek iş fonksiyonlu metallerin kullanılması, üst anot fabrikasyonunda düşük maliyetli biriktirme tekniklerinin kullanılmasına ve uzun ömürlü aygıtların üretilmesine olanak sağlar [10,13]. Ayrıca IOSC'lerde, ITO veya FTO üzerinde yer alan küçük iş fonksiyonuna sahip ETL'ler, ITO veya FTO arayüzeyini modifiye ederek aktif tabakadan toplanan ve ayrılan elektronların transportunu kolaylaştırır. ETL'ler tipik olarak Cs_2CO_3 , Ca, Al_2O_3 , ZnO, TiO_x gibi inorganik malzemelerden oluşurlar [62–70]. Aynı zamanda, gelen ışığın aktif bölgeye ulaşarak soğurulması ve yapıda serbest taşıyıcı elde edilmesi için bu tabakaların optik geçirgenliğinin yüksek olması ve dolayısıyla çok ince yapılmaları gerekir. Bu tabakaların küçük iş fonksiyonunda ve yüksek optik geçirgenlikte olmaları gerekliliğine ek olarak, seçilen malzemenin taşıyıcı mobiliteleri yüksek olmalıdır. Yüksek mobiliteler, elektronların elektrotlarda daha verimli toplanmasını sağlayarak hücre verimliliğini arttıran bir optimizasyon parametresi olarak öne çıkmaktadır.

Metal oksit ince film ETL'ler görünür ve yakın kızılötesi bölgede yüksek optik geçirgenlik, yüksek taşıyıcı mobilitesi ve çözeltilerde işlenebilirlik özelliklerinden dolayı organik güneş hücrelerinde en çok kullanılan ETL malzemeleridir. Özellikle n-tipi metal-oksit tabakaları olan ZnO ve TiO_x en yaygın olarak kullanılan elektron transport malzemeleridir [13,33,57].

2.3.3. Yarı-Geçirgen Organik Güneş Hücreleri

Organik yarıiletken malzemelerin optik bant aralığı kolaylıkla ayarlanabilmektedir ve α inorganik yarıiletken malzemelere nazaran çok daha büyüktür. Bu yüzden, OSC tabanlı fotovoltaik teknolojisinde organik aktif katmanların kalınlığı, yeterli foton hasadı için yaklaşık yüz nanometredir. Bu denli ince ve yüksek absorpsiyona sahip yapıların oluşturulabilmesi, yakın kızılötesi (Near- infrared, NIR) bölgede foton hasadına ve görünür ışık bölgesinde geçirgenliğe sahip olan ST-OSC yapılarının tasarlanabilme potansiyelini doğurmuştur. Bu sayede NIR bölgedeki ışığı soğurmak için gerekli ayarlama ve modifikasyon yapıldığında hem OSC'nin VR'de şeffaflığı sağlanabilir hem de güneş spektrumunun NIR bölgesi de soğurulabilir [40].

ST-OSC'lerin kullanımıyla ev ve araçlar için enerji üreten pencere ve perde uygulamaları ile tarım alanında gerekli güneş ışığını geçiren ve aynı zamanda güç üretebilen seralar tasarlanabilir. Sera uygulamaları için, klorofiller yalnızca ışık spektrumunun küçük bir aralığında işlev gördüğü için, ST-OSC'ler, bitki büyümesi için gerekli olan spektrum üzerinde oldukça şeffaf olacak şekilde ayarlanabilir [33,71,72]. Özellikle bina endüstrisinde, binaya entegre fotovoltaik (building-integrated photovoltaic, BIPV) teknolojisi binalara yenilenebilir enerjiyi güçlendirme konusunda giderek daha etkili tekniklerden biri haline gelmektedir [33,73,74].

Yarı saydam özelliği ST-OSC'lerin sadece bir jeneratör olarak çalışmasına izin vermez, aynı zamanda doğal ışığın ortama geçmesine izin vererek elektrik tüketimini azaltır [33,74]. Bu durum aynı zamanda, ST-OSC'lerin sosyal yaşam alanlarını içeren yapılarda pencere üzerine uygulamaları ile güneş ışığı alabilen akıllı ve sağlıklı ev teknolojilerinin temelini oluşturur.

IOSC'lerde kullanılan üst kontak malzemesi kalın ve VR'da oldukça yansıtıcı olan Ag, Au ve Al gibi metal elektrotlar ile yapılmaktadır [33,75]. Bu yüzden, aktif bölgeyi oluşturan polimer yapısının optik geçirgenlik ve yansıma özellikleri ne olursa olsun, OSC'nin geçirgenlik karakteristiği üst kontak ile belirlenir ve yapı tamamen opak olur. Dolayısıyla ST-OSC tasarımının en hayati aşamalarından biri iletkenliği yüksek ve optik olarak özellikle VR'de geçirgen olan bir üst kontak yapabilmektir.

ST-OSC yapısının pratik uygulamalar için hücre performansının iyileştirilmesinin yanında ortalama görünür geçirgenliğin (Average visible transmittance, AVT) en az %25 değerlerinde olması beklenmektedir [33,73,75–77]. Üst kontak malzemesinin AVT değerlerinin optimizasyonunda, ST-OSC'nin şeffaflığı iyileştirilirken AM1.5G altında soğurulması azalabilir. Bu durum da düşük foto-akım yoğunluğuna (photo-generated current density, J_{ph}) sebep olur ve hücre performansında düşüş gözlenir. Aynı zamanda aktif bölge kalınlığı arttırıldığında ise J_{ph} ve dolayısıyla PCE iyileştirilirken, ST-OSC'nin optik karakteristiği ile AVT değerleri ciddi bir şekilde bozulmaya uğrayabilir. Bu nedenle, fotovoltaiik performans ile cihazın görünür şeffaflığı arasında, cihazın optik karakteristiğini daha kritik hale getiren bir değiş tokuş vardır. Üst elektrotun iyi iletkenliği ve yüksek AVT'si, uygun malzeme seçilerek ve üst kalınlığın ayarlanmasıyla aynı anda optimize edilmelidir [33,40].

2.3.3.1. Dielektrik/Metal/Dielektrik Şeffaf Kontak Yapıları

ST-OSC tasarımında ST hedefi için, üst kontak olarak iki yansıma önleyici dielektrik arasına ince bir metal malzeme sandviç edilir ve DMD yapısı oluşturulur [33,78]. DMD tasarımları yüksek şeffaflık ve iletkenlik, düşük bulanıklık, mükemmel esneklik, kolay üretim ve farklı alt tabakalarla mükemmel uyumluluk sunarlar [33,79,88–91,80–87]. Bu yüzden DMD'lerin özellikle

ST optoelektronik aygıtlarda güçlü bir geleceğe sahip olduğu açıktır [33,71,73]. Geçirgen DMD elektrodu ilk olarak ultra ince metalik filmlerin fabrikasyonun yapılabilmesi ve ITO'nun iletkenliğini ve esnekliğini artırma düşüncesi ile tasarlanmıştır. Son zamanlarda ise ITO ve FTO'nun güneş pili uygulamalarındaki yerini almak üzere kullanılmaya başlanmıştır [33,73].

IOSC yapılarının ST olarak tasarlanmasında DMD elektrotları hayati bir yer edinmişlerdir. Çünkü IOSC'ler ITO veya FTO üzerine büyütülse bile opak olan üst kontakın geçirgen hale getirilmesi ve güneş hücresinin ST olabilmesi DMD yapılarının uygun tasarımı ile mümkün olmuştur. Ayrıca DMD yapıları basit fabrikasyon süreçleri ve fotonik kristaller gibi mikro veya nano boyutta şekillendirme gerektirmeyen basit tasarımlarından dolayı oldukça elverişlidirler [33,92–94]. Şeffaf elektrotların doğal olarak düşük yansıma özelliğine sahip olması nedeniyle, cihazın foton soğurması, cihazdan yeterli ışığın geçmesine izin verecek şekilde dikkatlice ayarlanmalıdır [33,95].

Literatürde DMD şeffaf elektrotlara dair ilk çalışma, termal buharlaştırılma yöntemi ile biriktirilmiş $WO_3/Ag/WO_3$ (WAW) (40nm/12nm/40nm) yapısı üzerinedir. Bu çalışmada

500 nm dalgaboyunda %90 geçirgenliğe sahip şeffaf bir üst kontak üretilebilmiştir [96]. İlk çalışmalar WAW yapıları üzerine olsa da, IOSC'lere entegre edilen DMD yapıları üzerine yapılan çalışmalar daha çok $\text{MO}_3/\text{Ag}/\text{MO}_3$ (MAM) yapıları üzerinde yoğunlaşmıştır [33,75,97]. Çünkü IOSC'lerde MoO_3 iyi bir HTL tabakası olduğu bilinmektedir [57,97–99]. Ayrıca MO_3 ve WO_3 oldukça benzer elektronik ve optik özelliklere sahipken, MAM'ın WAW'a göre açık avantajı, MO_3 'ün WO_3 'e nazaran önemli ölçüde daha düşük sıcaklıkta buharlaştırılabilmesidir. WAW sistemleri yüksek sıcaklıklara duyarlı cihazlarda kullanıldığında faydalı olabilir. Ayrıca TMO'ların DMD yapılarında, $\text{V}_2\text{O}_5/\text{Ag}/\text{V}_2\text{O}_5$ (VAV) gibi ve farklı kombinasyonlarda TMO içeren yapılar da kullanılmaktadır.

MAM, WAW ve VAV yapılarında ana metal olarak Ag'ye alternatif olarak Cu, Au ve Al kullanılabilir. Bu tür yapılar için potansiyel bir problem, dielektrik katmanların içindeki metalin gözenekli hale gelmesidir. Ag ve Cu durumunda bu ayrım en belirgin olanıdır ve bu etkiyi önlemek için çok ince bir Al veya Au tabakası kullanılabilir [100]. Ayrıca DMD yapılarında metal katmanı olarak en çok kullanılan metal Ag'dir. Çünkü metaller arasında Ag'nin iletkenliği yüksek, iş fonksiyonu OSC yapıları için uygun ve VR'de düşük soğurmaya sahiptir [13,97]. Ancak Ag'nin pahalı bir metal olmasından dolayı, Ag'ye optik ve elektriksel olarak yakın olan Cu gibi alternatif metallerin de kullanıldığı yapılar mevcuttur [97].

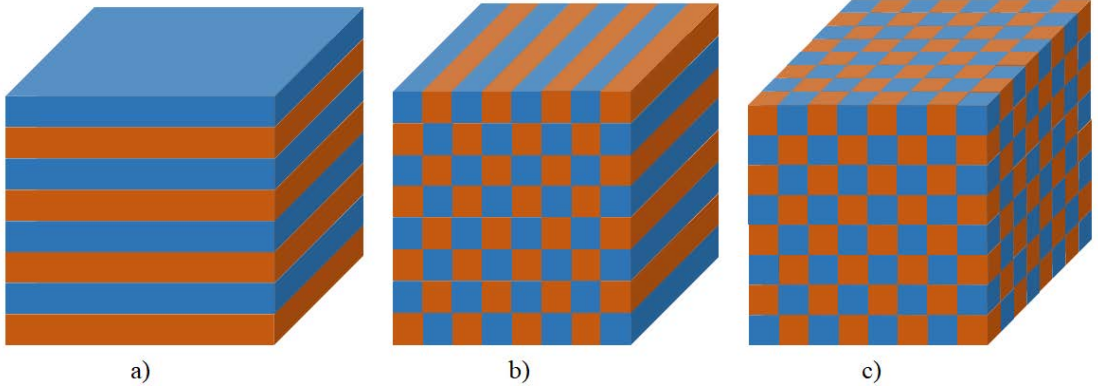
2.3.3.2. Fotonik Kristaller

Kavramsal olarak 1980'lerde ortaya atılan PC'ler farklı dielektrik sabitine sahip olan yapıların uzaysal olarak herhangi bir yönde veya yönlerde düzenlendiği yapılardır [101]. Bir PC içerisinde, elektromagnetik dalganın yayılımı dielektrik sabitinin periyodik olarak düzenlenmesi ile modifiye edilir. Elektromagnetik dalganın belirli bir yönde yayılımı sırasında Bragg saçılması meydana gelir. Bu yüzden PC'ler aynı zamanda dağıtılmış Bragg yansıtıcıları (Distributed Bragg reflectors, DBR) olarak da adlandırılırlar [102]. Bragg saçılması sonucu belirli bir frekans veya dalgaboyu aralığında elektromagnetik dalganın yayılımı PC tarafından yasaklanabilir [101]. Elektromagnetik dalganın geçişine izin verilmeyen bu aralık fotonik bant aralığı (Photonic band gap, PBG) olarak adlandırılır [101,103].

John ve Yablonovitch'in çığır açıcı araştırmalarını takiben PC'ler, günümüzde birçok teknolojik uygulamaya yol açan geniş bir temel ilgi uyandırmıştır [102–104]. Geleneksel olarak, PC'ler inorganik dielektrikler veya yarıiletkenlerin farklı fabrikasyon süreçleri ile üretilmişlerdir. Bu yapılar optik fiberler, LED'ler, sensörler, fotovoltaiik cihazlar, lazerler, ayırık ve entegre

optik bileşenler, aydınlatma ve kuantum hesaplama için fotonik alanında oldukça ilgi gören bir araştırma konusudur [102].

Bir yarıiletkendeki kristal potansiyeli elektronların özelliklerini etkilediği gibi, PC gibi periyodik yapılar fotonların özelliklerini etkiler. PC'lerin fiziksel özellikleri ile sıradan yarıiletkenlerin fiziksel özelliklerini benzer kılan birçok fiziksel kavram ve yöntem vardır. Yarıiletken fiziğinde yer alan Brillouin bölgesi, dispersiyon bağıntısı ve Bloch dalga fonksiyonları gibi kavramlar PC'lerin optik özelliklerini incelemek için de kullanılabilir [101]. Yarıiletken fiziği ile PC fiziği arasındaki temel fark serbest taşıyıcılar ve fotonlar üzerine kurulan fiziksel kavramlardan meydana gelmektedir. Yarıiletken fiziğinde, elektron gibi Fermi-Dirac istatistiğine uyan parçacıkların periyodik örgü potansiyelinde Schrödinger denklemi ile yayılımı incelenir. PC'lerde ise foton gibi Maxwell-Boltzmann istatistiğine uyan parçacıkların, Maxwell denklemleri ile periyodik dielektrik sabitinin değişimi ile modüle edilmiş yapı içerisinde yayılımı incelenmektedir. PC'ler, periyodik dielektrik sabitinin değiştiği uzaysal yönelim sayısına 1-boyutlu (1D), 2-boyutlu (2D) ve 3-boyutlu (3D) olmak üzere sınıflandırılır (Şekil 2.6).



Şekil 2.6: 1D, 2D ve 3D-PC yapıları.

1D-PC'ler, dielektrik sabitinin periyodik olarak sadece tek bir doğrultuda değiştiği yapılardır ve tek bir doğrultuda üst üste büyütülen veya biriktirilen iki veya daha fazla dielektrik sabitine sahip yapılardan oluşmaktadırlar [101]. Bu yüzden 1D-PC'lerde sadece tek bir doğrultuda fotonların yayılımı için bir PBG vardır. 1D-PC'lerin yapıları ve fabrikasyonu basit, üretim maliyetleri az ve istenilen optik özelliklerde üretilebilmeleri daha olağandır [101,105].

PC'ler ile oluşturulan PBG'in SC'lere entegre edilmesi ile SC'in optik özellikleri önemli derecede değiştirilebilir. Bu değişimler fotovoltaiik performansın artırılması, ST özelliklerin iyileştirilmesi, seçici geçirgenliğin sağlanması veya renk modifikasyonu için yapılabilir. 2012 yılında WO_3/LiF yapısındaki 1D-PC'in ST-OSC yapısına entegre edilmesiyle, 400-600 nm aralığında oluşturulan PBG ile bu aralıktaki fotonların aktif bölgeye yansıtılmasıyla hücre veriminde %26'lık bir iyileştirme elde edilmiştir [40,106]. Bu gelişmeleri takip eden çalışmalar ile günümüze kadar, özellikle 1D-C'lerin ST-OSC'lere entegrasyonu ile hücre performansında iyileştirme gösteren yapılar tasarlanmış ve çalışılmıştır [40]. İlk çalışmalar hücre performansını arttırmaya yönelik olsa da son zamanlarda 1D-PC'lerin ST-OSC'lerin ST özelliklerini modifiye etmek üzerine de odaklanılmıştır [33,40,107].

2.3.4. Güneş Hücresi Performans Parametreleri

Güneş hücrelerinin performansını gösteren ve elektriksel özelliklerini doğrudan içeren, güneş hücrelerinin AM1.5G altında Akım-Voltaj ($I - V$) karakteristiklerinden elde edilen dört adet temel parametre vardır. Bunlar kısa devre akım yoğunluğu (Short current density, J_{sc}), açık devre voltajı (Open circuit voltage, V_{oc}), dolum faktörü (Fill factor, FF) ve güç dönüşüm verimliliği (Power conversion efficiency, PCE)'dir.

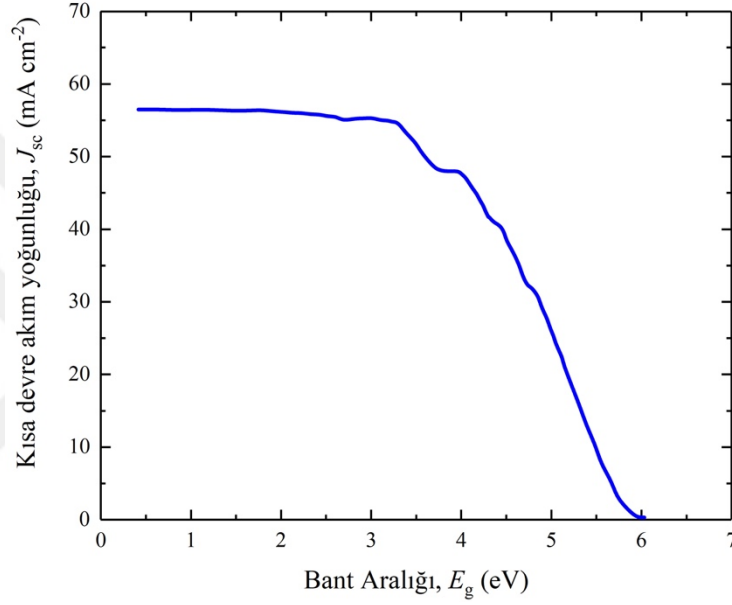
2.3.4.1. Kısa Devre Akımı

J_{sc} güneş hücresine uygulanan dış voltajın sıfır olması durumunda elde edilen akım yoğunluğudur ve bu durumda aktif bölgede üretilen ve elektrotlarda toplanabilen taşıyıcıların sayıları ile orantılıdır. İdeal olarak düşünülen bir güneş hücresinde, J_{sc} hücreden geçebilecek maksimum akım yoğunluğuna eşittir. Akım yoğunluğun maksimum olması, hücreye ulaşan her fotonun bir elektron ve boşluk çifti yaratması durumunda mümkün olabileceğinden J_{sc} aynı zamanda foto-akım olarak da adlandırılır. Ancak J_{sc} değeri, güneş hücresine ulaşan fotonların yüzeyden yansıma kayıpları, rekombinasyon mekanizmaları, kontak kayıpları ve ETL ve HTL'lerin kontak arayüzlerindeki kusurlar gibi etkenlerden dolayı azalır. SC'de fotonların soğurulması doğrudan aktif bölgenin E_g 'si ile ilişkili olduğundan, foto-akım yani J_{sc} E_g 'ye bağlı bir parametredir (Şekil 2.7). Aktif bölgenin nispeten küçük E_g değerlerinde olması, yüksek α , BHJ'lerde küçük faz ayrımı ve taşıyıcıların yüksek mobilite değerleri J_{sc} 'yi artırır [13].

Her fotonun birer serbest taşıyıcı yaratması durumunda J_{sc} 'nin E_g 'ye bağılılığı AM1.5G spektral foton akısının dağılımı ile aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$J_{sc} = q \int_{E_g}^{\infty} S_{AM1.5G}(E) dE \quad (2.5)$$

burada q elektronun yüküdür.



Şekil 2.7: AM1.5G spektral foton akısının dağılımı altında her fotonun birer serbest taşıyıcı yaratması durumunda J_{sc} 'nin E_g 'ye bağılılığı.

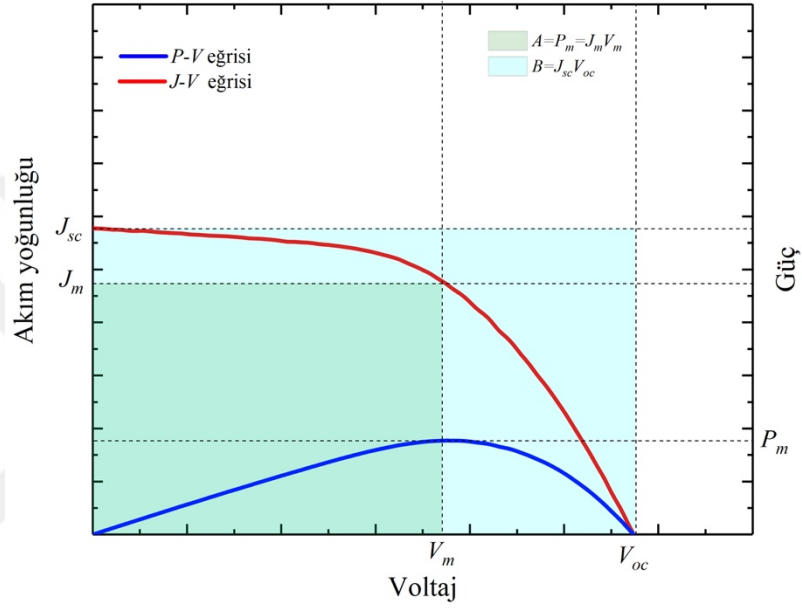
2.3.4.2. Açık Devre Voltajı

V_{oc} güneş hücresinde akım yoğunluğunun sıfır olduğu durumdaki voltaj değeridir. Bu durumda SC'de sürüklenme ve foto-akım yoğunlukları birbirine eşit olur ve hücreden akım geçmez. Temelde SC'in kontaklarının iş fonksiyonlarının farkına bağlıdır [13]. OSC'lerde elektrotlar ohmik bir kontak oluşturursa, V_{oc} BHJ'de donör ve akseptörlerin HOMO ve LUMO seviyeleri arasındaki farkla ilişkidir. V_{oc} , SC'in aktif bölgesini oluşturan malzemeye bağlı olan sızıntı akım yoğunluğuna (Dark current density, J_0) bağlı olarak aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir:

$$V_{oc} = \frac{k_B T}{q} \ln \left(1 + \frac{J_{sc}}{J_0} \right) \quad (2.6)$$

2.3.4.3. Dolum Faktörü

J_{sc} ve V_{oc} arasındaki ilişki birinin maksimum olması durumunda diğ erinin sıfır değ er almasıdır. Dolayısıyla Ş ekil 2.8’deki $J - V$ karakteristiğ inden görüldüğü üzere, J_{sc} ve V_{oc} ’den herhangi birinin sıfır olması SC’den elde edilen gücün sıfır olması anlamına gelir. Dolayısıyla SC’in performans göstergesi için, SC’in $J - V$ eğrisinin ideal olarak kare şekline ne kadar yakın olduğunun bir ölçüsü olan FF parametresi kullanılmaktadır.



Ş ekil 2.8: Güneş hücresinin $J - V$ ve $P - V$ karakteristiği.

FF SC’den elde edilebilecek en yüksek verim ile ilişkilidir ve aşağıdaki denklem ile verilir:

$$FF = \frac{J_m V_m}{J_{sc} V_{oc}} \quad (2.7)$$

burada J_m ve V_m sırasıyla SC’den maksimum güç çıkışında elde edilen maksimum akım yoğunluğu ve maksimum voltaj değ erleridir. Ş ekil 2.8’de A alanı SC’den elde edilen maksimum gücü vermektedir ve B alanına oranı FF değ erine eşittir.

FF , akım çıkışının cihazın iç alanına bağımlılığını temsil eder. Seri direnç ve ş önt direnci ile ölçülür. Düşük mobilite durumu taşıyıcıların bir heteroekleme ulaşmadan önce yeniden birleşmesine neden olduğundan dış beslemenin artırılması, düşük elektrik alan altında yeniden birleşebilecek olan taşıyıcıları ayrışacakları heteroekleme süpürecek ve bu da akım çıktısında bir artışa neden olacaktır.

2.3.4.4. Güç Dönüşüm Verimliliği

PCE bir SC'in verimliliğini ifade eder ve SC'den elde edilen gücün (P_{out}) hücre yüzeyine düşen toplam foton gücüne (P_{in}) oranıdır:

$$PCE = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{J_{sc} V_{oc}}{P_s} FF \quad (2.8)$$

burada P_s hücre yüzeyine düşen ışıyım gücüdür ve AM1.5G için 100 mW/cm^2 , AM0 için 136.7 mW/cm^2 'dir.

3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu bölümde tez kapsamında incelenen OSC yapıları detaylı olarak anlatılmış, OSC'lerin optik hesaplamalarında kullanılan yöntemler verilmiş, üretim ve karakterizasyon tekniklerinden bahsedilmiştir.

3.1.ORGANİK GÜNEŞ HÜCRE YAPILARI

Tez kapsamında tasarlanan, üretilen ve incelenen tüm OSC yapıları ters çevrilmiş mimaridedirler ve BHJ yapıda aktif bölgeye sahiptirler. İncelenen IOSC yapıları ilk olarak farklı HTL'lerin hücre performansına etkilerini incelemek için tasarlanan, farklı HTL'ye sahip olan opak yapılardan oluşmaktadır. En iyi hücre performansı gösteren HTL'ye sahip yapının, opak üst kontaklarının DMD şeffaf üst kontak ile modifiye edilmesiyle optimal değerlerde yapı parametrelerine sahip ST-OSC yapısı elde edilmiştir. Ardından ST olarak tasarlanan ve üretilebilen IOSC yapılarına 1D-PC entegrasyonu ile yapının optik özellikleri modifiye edilerek optimal değerlerde 1D-PC içeren ST-OSC yapıları üretilmiştir.

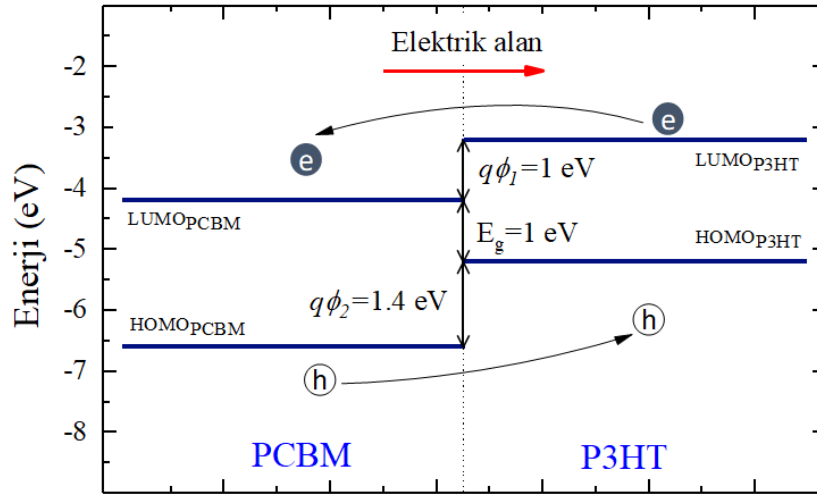
3.1.1. Farklı Boşluk Transport Tabakalarına Sahip Yapılar

3.1.1.1. Aktif Bölge

Tez kapsamında tasarlanan, üretilen ve incelenen tüm OSC yapılarının aktif katmanları donör olarak P3HT ve akseptör olarak PCBM organik yarıiletkenlerinin karışımından oluşmaktadır. OSC'ler ters çevrilmiş mimaride ve aktif katmanlar BHJ yapısındadır. Fotovoltaik etki gösteren organik malzemeler arasında P3HT:PCBM polimer karışımı OSC'lerde aktif bölge olarak en çok kullanılan ve en iyi optimize edilmiş aktif katmanların başında gelmektedir. P3HT:PCBM organik yarıiletken karışımının OSC'lerde ilk kullanılmaya başlanmasından beri termal tavlama ile taşıyıcı mobilitesinin iyileştirilmesi, P3HT'nin kristalleşmesi ve zincirlerinin daha iyi istiflenmesi gibi konularda performansı arttırmaya yönelik birçok çalışma yapılmıştır [108–112].

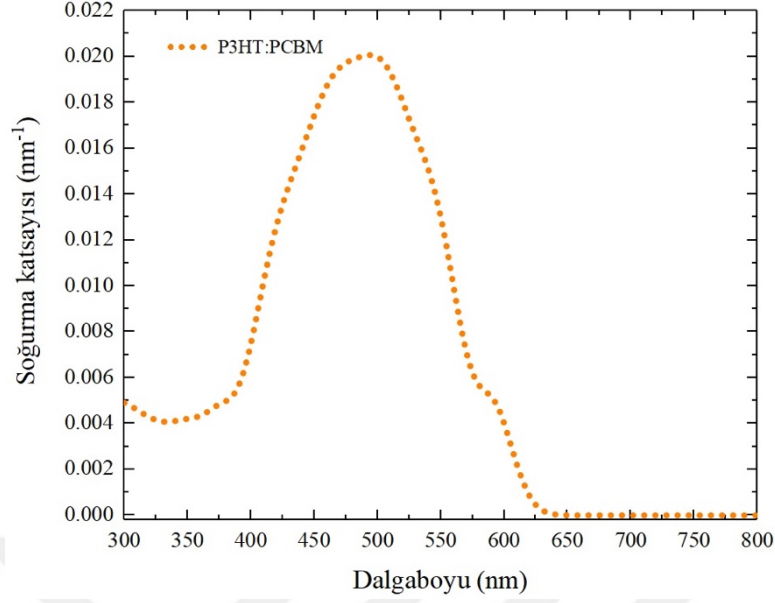
Şekil 3.1'de P3HT:PCBM karışımının bant diyagramı verilmektedir. $LUMO_{P3HT}$, $HOMO_{P3HT}$, $LUMO_{PCBM}$ ve $HOMO_{PCBM}$ değerleri sırasıyla -3.2 eV, -5.2 eV, -4.2 eV ve -6.6 eV'tur [113]. P3HT:PCBM karışım sisteminin 3.4 eV ile 2 eV aralığında enerjiye sahip fotonları soğurabilir. Bu enerji aralığı da 324 nm ile 620 nm aralığına denk gelmektedir ve AM1.5G spektrumunun

tamamını kapsamamaktadır. Dolayısıyla daha küçük bant aralığına sahip organik yarıiletkenler geliştirilerek veya P3HT:PCBM karışımı modifiye edilerek daha geniş bir aralıkta soğurma bandı elde edilmelidir. Ancak bu durum özellikle ST yapılar için bir avantaja dönüştürülebilir. 620 nm'den daha büyük dalgaboyuna sahip elektromagnetik dalga yapı içerisinde soğurulma olasılığı düşüktür. Böylece uygun bir şeffaf üst kontak yardımıyla yapının diğer tarafına geçirilebilir. Bu durum elektromagnetik spektrumunun kırmızı ve IR bölgedeki fotonların geçirildiği ST-OSC'in tasarlanmasına olanak verir. P3HT:PCBM karışım sisteminin α 'sının dalgaboyuna bağlı değişimi Şekil 3.2'de verilmektedir.



Şekil 3.1: BHJ P3HT:PCBM karışımının bant diyagramı.

P3HT'nin HOMO ve LUMO seviyelerinin PCBM'nin HOMO ve LUMO seviyelerinden yüksek olması, BHJ yapıdaki aktif bölgede P3HT fazı ile PCBM fazının arasında güçlü bir elektrik alan meydana getirir. Fotonların P3HT:PCBM karışımında soğurulmaları sonucu oluşan eksitonlar bu elektrik alan sayesinde ayrılırlar ve serbest elektronlar LUMO seviyeleri ve serbest boşluklar ise HOMO seviyeleri boyunca hareket ederek kontaklara süpürülürler. Eksitonların bu ayırım sürecinin etkili olabilmesi için donör malzemenin HOMO ve LUMO seviyeleri arasındaki fark, akseptör malzemenin HOMO ve LUMO seviyeleri arasındaki farktan 0.2-0.3 eV daha büyük olması gerekir [13]. Bu fark eğer çok küçükse yük ayrımı gerçekleşmez, eğer çok büyük ise fotonların soğurulma sürecinde ciddi bir kayıp yaşanır [13]. Ayrıca akseptör malzemenin LUMO'su ile donör malzemenin HOMO'su arasındaki fark V_{oc} değerini doğrudan etkilediğinden, P3HT:PCBM tabanlı OSC'lerde V_{oc} değeri 0.6 eV civarlarında gözlenmektedir [33,57,114].



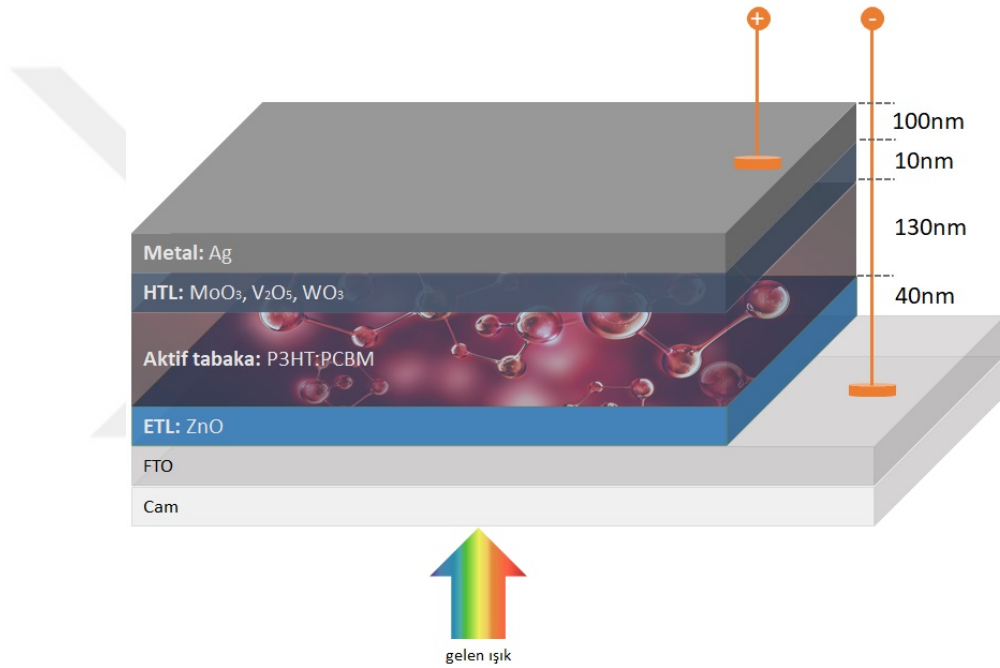
Şekil 3.2: P3HT:PCBM karışımının soğurma katsayısının dalgaboyuna bağlı değişimi [57].

3.1.1.2. Elektron Ve Boşluk Transport Tabakaları

Tez kapsamında aktif bölgesini P3HT:PCBM karışımını oluşturduğu IOSC yapılarında ETL ve HTL olarak TMO malzeme sistemleri kullanılmıştır. TMO'lar ilk kez 1996 yılında OLED'lerde yer almıştır ve günümüzde birçok ışık yayan veya soğuran aygıtlarda kullanılmaktadırlar [115,116]. TMO yapıları hemen hemen tüm kontak tipleri için verimli yük toplanmasını ve enjeksiyonunu sağladıkları için ETL ve HTL olarak sıklıkla kullanımının önü açılmıştır [115]. Çünkü TMO malzemelerinin iş fonksiyonları çok geniş bir aralığa yayılmıştır. Örneğin ZrO_2 'nin iş fonksiyonu 3.5 eV ve V_2O_5 'in iş fonksiyonu 7 eV'tur [117]. Bu geniş aralık TMO'ların tampon tabaka olarak kullanıldığı optoelektronik aygıtlarda çok farklı kontak malzemelerinin kullanılmasına olanak vermektedir [115]. Çünkü tampon tabaka ve kontak arayüzeyinde oluşacak enerji bariyerin kritik olarak elektrotun iş fonksiyonuna bağlıdır. Bu nedenle, elektrotun iş fonksiyonunu değiştirmek için tampon tabaka olarak çeşitli tiplerde ince film metal-oksitler kullanılabilir.

Yüksek iş fonksiyonuna sahip MoO_3 , WO_3 , NiO , CuO , RuO_2 , V_2O_5 , Fe_3O_4 ve Ag_2O gibi TMO'lar genellikle HTL veya anot olarak, ZnO , TiO_2 ve ZrO_2 gibi düşük iş fonksiyonlu TMO'lar ise ETL veya katot olarak kullanılırlar [33,57,115,116,118,119]. Bu TMO'lar arasından MoO_3 , WO_3 ve V_2O_5 nispeten daha düşük sıcaklıklarda buharlaştırılabilir ve bu yüzden vakum ortamında buharlaştırılmaları ve biriktirilmeleri daha uygundur [115].

Tez çalışmasının ilk kısmında, P3HT:PCBM tabanlı BHJ IOSC'lerde MoO_3 , WO_3 ve V_2O_5 HTL tabakalarının hücre performansı üzerine etkilerini incelemek üzerine odaklanılmıştır. Farklı HTL'lere sahip P3HT:PCBM tabanlı IOSC yapısı Şekil 3.3'de verilmektedir. IOSC yapılarında alt kontak olarak FTO kaplı cam kullanılmıştır. Tez kapsamında incelenen tüm IOSC yapılarında, ETL ve HTL olarak yer alan ZnO , MoO_3 , WO_3 , V_2O_5 TMO malzeme sistemleri püskürtme tekniği kullanılarak, P3HT:PCBM aktif tabakaları ise spin ile kaplama tekniği kullanılarak biriktirilmiştir. Yapıların üretim aşamaları ve parametreleri Bölüm 3.1.5'de verilmektedir.



Şekil 3.3: Farklı HTL'lere sahip P3HT:PCBM tabanlı BHJ IOSC yapısı [33].

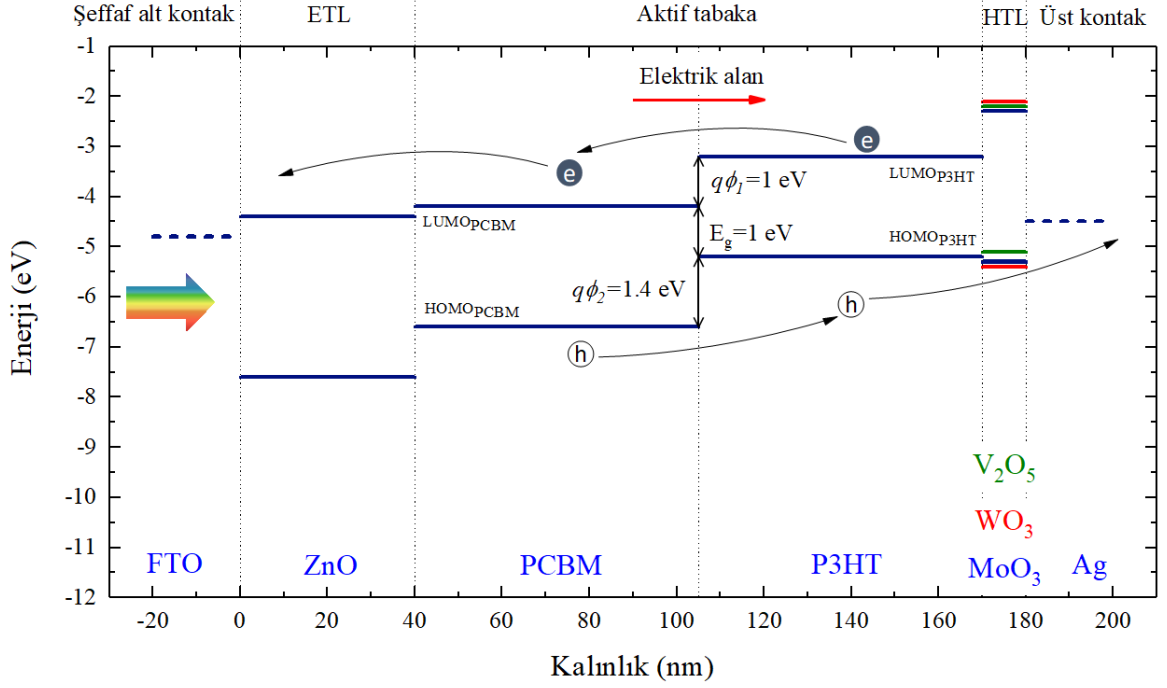
IOSC yapılarında alt elektrot olarak cam üzerine kaplanmış, optik geçirgenliği yüksek ve elektriksel olarak iletken olan, düşük iş fonksiyonuna sahip (yaklaşık 4.4 eV) FTO kullanılmıştır [33]. FTO özellikle görünür bölge için %90 civarında geçirgenliğe sahiptir ve bu değer fluorene katkılamaından bağımsızdır [33,120]. Bu sayede IOSC yapısına alt kısımdan giren AM1.5G spektral dağılımına sahip fotonların büyük bir bölümü aktif tabakaya ulaşır ve verimli bir foto-akım dönüşümü gerçekleşir [33]. Ayrıca FTO, ITO'ya göre daha ucuzdur ve FTO'nun iş fonksiyonunun temizleme prosedürüne bağlılığı ITO'ya nazaran oldukça azdır [33,120].

ETL olarak kullanılan ZnO bir n-tipi TMO'dur ve Fermi seviyesi (E_F) 4.4 eV civarındadır [13,121]. Bu durum ZnO'nun ETL olarak kullanılmasıyla PCBM akseptör malzemesinden ZnO'ya doğru hem verimli yük transferini hem de katotta serbest elektronların birikmesini sağlar. Ayrıca ZnO'nun geniş bir bant aralığına (3.2 eV) sahip olmasından dolayı, ETL olarak kullanılan ZnO katot tarafına serbest boşlukların ilerleyişini engelleyerek iyi bir boşluk engelleme görevi görür. Aktif bölgeden katota doğru serbest elektronların geçişine izin veren ve boşlukları engelleyen ZnO ETL, aynı zamanda yüksek bir elektron mobilitesine sahiptir ($0.066 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) ve bu durum yük toplama verimliliğini artırarak OSC'nin *PCE*'sini artırır [122]. Ayrıca ZnO'in geniş bant aralığına sahip olması, VR ve IR bölgede oldukça geçirgen olması aktif bölgeye fotonların erişimini sağlar. Ayrıca ZnO'nun 60 nm'den daha az kalınlıklarda IOSC'lerde yer alması, efektif bir optik ayırıcı olarak görev yapmasına olanak verir [123]. Bu yüzden tez kapsamında incelenen tüm IOSC'lerde ETL olarak kullanılan ZnO kalınlığı 40 nm'dir.

IOSC mimarisinde HTL ile bant uyumu için yüksek iş fonksiyonuna sahip metallerin kullanılması gereklidir. Bu durum, yüksek iş fonksiyonlu metallerin hava ile temas durumunda oksidasyonları oldukça az olduğu için tasarımda bir avantaj olarak öne çıkmaktadır. IOSC'lerde üst kontak olarak genellikle Ag, Cu, Al ve Au gibi yüksek iş fonksiyonuna sahip metaller kullanılmaktadır [13]. Bu metaller içinden, Ag diğer metallere nazaran en yüksek elektriksel iletkenliğe sahiptir. Ayrıca Ag görünür bölgede en az absorpsiyona az ve en yüksek yansımaya sahiptir [97]. Bu durum Ag opak üst kontağa sahip IOSC'lerde yapı içerisinde aktif bölgede soğurulmayan ve üst kontağa ulaşan fotonların yeniden yapı içerisinde gönderilerek foton soğurulma sürecini destekler. Böylece opak IOSC'lerde J_{sc} ve *PCE* değerlerinde bir artış meydana gelmektedir. Ag'nin iş fonksiyonu yaklaşık olarak 4.5 eV'tur ve bu değer diğer metallere nazaran Ag'nin oksidasyonunun oldukça az olduğunu gösterir. Ayrıca IOSC'lerde, Ag üst kontağı MoO_3 , WO_3 ve V_2O_5 HTL tabakalarına entegre edildiğinde bant düzenlenmesinde elektronların geçişine izin vermez ve boşluklar için de bir potansiyel engeli yaratmaz [13,65]. Dolayısıyla Ag üst kontağa sahip IOSC'lerde verimli boşluk toplanması sağlanabilir. Tüm bu sebeplerden dolayı tez kapsamında tasarlanan ve üretilen, HTL olarak MoO_3 , WO_3 ve V_2O_5 TMO'ların kullanıldığı IOSC'lerde üst kontak olarak Ag kullanılmıştır.

Tez kapsamında incelenen MoO_3 , WO_3 ve V_2O_5 HTL yapılarına sahip P3HT:PCBM tabanlı IOSC'lerin bant diyagramı Şekil 3.4'de verilmektedir. MoO_3 , WO_3 ve V_2O_5 'ün mobilite

değerleri n-tipi ZnO'ya göre çok daha az olduğu için bu yapılarda boşlukların difüzyon uzunlukları oldukça kısadır. Bu yüzden 40 nm olarak biriktirilen ZnO'a nazaran HTL tabakaları daha ince olarak 10 nm biriktirilmiştir. Ayrıca tüm yapılarda P3HT:PCBM aktif bölge kalınlığı (d_{at}) 130 nm olacak şekilde kaplanmıştır.



Şekil 3.4: MoO₃, WO₃ ve V₂O₅ HTL yapılarına sahip P3HT:PCBM tabanlı IOSC'lerin bant diyagramı.

Bant düzeni açısından, aktif bölge P3HT:PCBM organik karışımını oluşturan donör ve akseptör malzemelerinin HOMO ve LUMO seviyeleri, ETL olan ZnO ve HTL malzemeleri MoO₃, WO₃ ve V₂O₅'in bant yapılarıyla uyumludur. P3HT:PCBM aktif bölgesinde foton absorpsiyonu sonucu oluşan eksitonlar güçlü iç elektrik alan ile ayrılırlar ve serbest hale gelen elektronlar donör P3HT'den ZnO üzerinden geçerek FTO şeffaf alt kontağa, serbest boşluklar ise akseptör PCBM'den MoO₃, WO₃ veya V₂O₅ üzerinden üst kontak Ag'ye ulaşabilirler.

Şekil 3.4'den görüldüğü üzere MoO₃, WO₃ ve V₂O₅ ün iş fonksiyonları ve bant aralıkları birbirlerine çok yakındır [115]. Özellikle P3HT'nin LUMO seviyesi ile MoO₃, WO₃ ve V₂O₅'in iş fonksiyonları arasındaki fark SC'de serbest hale gelen elektronların Ag kontağına ulaşmasını engeller. Bu durum MoO₃, WO₃ ve V₂O₅'ün her birinin iyi bir elektron blokaj tabakası olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda P3HT HOMO seviyesi MoO₃, WO₃ ve V₂O₅'ün

valans bandı değerlerine çok yakın olması SC'de serbest hale gelen boşlukların Ag kontağına ulaşmasını sağlar.

Ayrıca tez kapsamında incelenen farklı HTL'lere sahip IOSC'lerde üst kontak olan Ag 100 nm kalınlığındadır. Bu kalınlıkta Ag UV bölgede, VR ve IR'de hiçbir fotonun geçişine izin vermez ve dolayısıyla optik karakteristiği opaktır [33]. Bu durum MoO_3 , WO_3 ve V_2O_5 'ün etkilerinin incelendiği IOSC yapılarının da geçirgenlik karakteristiklerini opak yapar.

Tez kapsamında, farklı HTL'lere sahip yapıların optik ve elektriksel özellikleri katman katman incelenerek irdelendiği için SC yapılarının sayısı artmaktadır. Bu yüzden farklı HTL'lere sahip OSC'ler için SC'in yapısı baz alınarak bir etiketleme yapılmıştır. Her bir etiket ve etiketlere karşılık gelen yapılar Tablo 3.1'de verilmektedir.

Tablo 3.1: MoO_3 , WO_3 ve V_2O_5 HTL'lere sahip IOSC yapıları, kalınlıkları ve etiketleri.

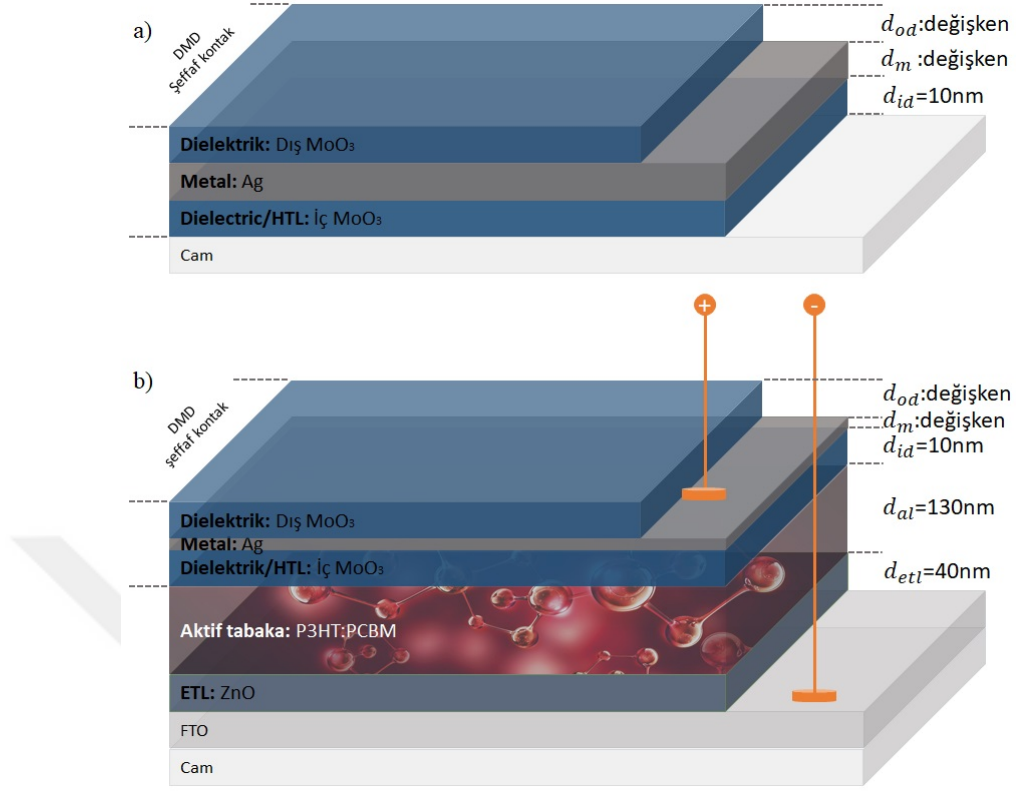
Yapı	Tabaka kalınlıkları	Etiket
Cam/FTO/ZnO	--/--/40nm	GFZ
Cam/FTO/ZnO/P3HT:PCBM	--/--/40nm/130nm	GFZP
Cam/FTO/ZnO/P3HT:PCBM/ V_2O_5	--/--/40nm/130nm/10nm	GFZPV
Cam/FTO/ZnO/P3HT:PCBM/ WO_3	--/--/40nm/130nm/10nm	GFZPW
Cam/FTO/ZnO/P3HT:PCBM/ MO_3	--/--/40nm/130nm/10nm	GFZPM
Cam/FTO/ZnO/P3HT:PCBM/Ag	--/--/40nm/130nm/100nm	GFZPA
Cam/FTO/ZnO/P3HT:PCBM/ V_2O_5 /Ag	--/--/40nm/130nm/10nm/100nm	GFZPVA
Cam/FTO/ZnO/P3HT:PCBM/ WO_3 /Ag	--/--/40nm/130nm/10nm/100nm	GFZPWA
Cam/FTO/ZnO/P3HT:PCBM/ MO_3 /Ag	--/--/40nm/130nm/10nm/100nm	GFZPMA

3.1.2. Yarı-Geçirgen Organik Güneş Hücreleri

Tablo 3.1’de verilen son dört IOSC yapısı 100 nm kalınlığında Ag üst elektroda sahiptir. Ag’nin özellikle görünür bölgede yansımanın çok yüksek ve geçirgenliğinin çok düşük olması bu yapıları opak yapmaktadır. Tez kapsamında incelenen ST-OSC’lerin tasarımı, yapıdaki opak üst Ag kontağının uygun tasarım parametrelerine sahip $\text{MoO}_3/\text{Ag}/\text{MoO}_3$ DMD şeffaf üst elektrot ile modifiye edilmesiyle yapılmıştır. $\text{MoO}_3/\text{Ag}/\text{MoO}_3$ katmanları püskürtme tekniği kullanılarak biriktirilmiştir. Uygun tasarım parametreleri sonraki bölümlerde detaylıca bahsedilen optik özellikler baz alınarak teorik olarak hesaplanmış ve yapılar optimal değerlerde üretilmiştir. Bu bölümde şeffaf üst kontak yapısı ve ST-OSC yapısı hakkında bilgi verilmiştir.

Tez kapsamında incelenen $\text{FTO}/\text{ZnO}/\text{P3HT}:\text{PCBM}/\text{MoO}_3/\text{Ag}/\text{MoO}_3$ ST-OSC yapısında şeffaf üst kontağı oluşturan malzemelerden, iç dielektrik (inner dielectric) MoO_3 ’ün kalınlığı (d_{id}), Ag metal katmanının kalınlığı (d_m) ve dış dielektrik (outer dielectric) MoO_3 ’ün kalınlığı (d_{od}) ST-OSC’nin optik karakteristiğini oldukça etkilemektedir. ST-OSC yapılarında kullanılan $\text{MoO}_3/\text{Ag}/\text{MoO}_3$ DMD şeffaf üst elektrot ve $\text{FTO}/\text{ZnO}/\text{P3HT}:\text{PCBM}/\text{MoO}_3/\text{Ag}/\text{MoO}_3$ ST-OSC yapıları sırasıyla Şekil 3.5 a ve b’de verilmektedir.

İç MoO_3 , aktif tabaka olan P3HT:PCBM’ye doğrudan entegre edildiğinden dolayı bu tabaka yapıda aynı zamanda HTL olarak görev yapmaktadır. Elektriksel kontak doğrudan metal tabakadan alındığından ve dış dielektrik metal tabaka üzerinde yer aldığından d_m ve d_{od} değerlerinin ST-OSC hücre çıkış parametrelerine etkileri sadece yapının optik spektrumlarını modifiye ettikleri için mümkündür. $\text{FTO}/\text{ZnO}/\text{P3HT}:\text{PCBM}/\text{MoO}_3/\text{Ag}/\text{MoO}_3$ ST-OSC yapısı ile opak GFZPMA yapısında aynı elektriksel süreçler meydana gelirken, optik olarak tamamen farklı süreçler meydana gelmektedir. ST-OSC yapısında Ag ve dış MoO_3 dışındaki tüm katmanların kalınlıkları GFZPMA IOSC yapısındaki kalınlıklar ile aynıdır.



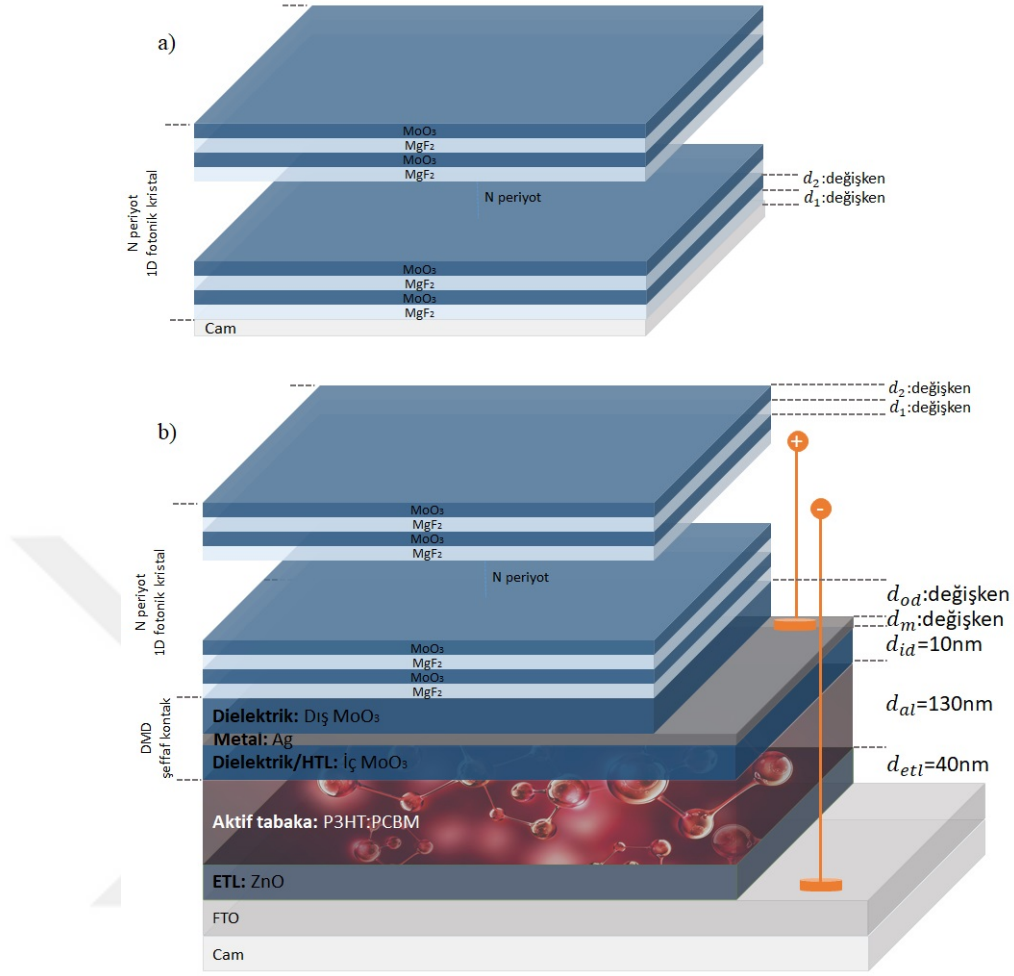
Şekil 3.5: a) MoO₃/Ag/MoO₃ DMD şeffaf üst elektrot ve b) FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃ ST-OSC yapıları [SR].

3.1.3. Bir Boyutlu Fotonik Kristal İçeren Yapılar

Tez kapsamında incelenen FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃ ST-OSC yapısının optik karakteristiği, MgF₂/MoO₃ 1D-PC sistemi ile oluşturulan PBG ile modifiye edilmiştir. N periyot MgF₂/MoO₃ yapısı (MgF₂/MoO₃)^N etiketiyle gösterilmektedir.

(MgF₂/MoO₃)^N 1D-PC'nin PBG'si, rezonans dalgaboyuna denk gelen ve merkez dalgaboyu olan Bragg dalgaboyuna (λ_B) göre belirlenir ve ST-OSC'de değiştirilmek istenen optik özelliğe göre ayarlanır. (MgF₂/MoO₃)^N ve FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃/(MgF₂/MoO₃)^N yapıları sırasıyla Şekil 3.6 a ve b'de verilmektedir.

1D-PC'i oluşturan (MgF₂/MoO₃)^N katmanları püskürtme tekniği kullanılarak biriktirilmiştir. Uygun tasarım parametreleri sonraki bölümlerde detaylıca bahsedilen optik özellikler baz alınarak teorik olarak hesaplanmış ve yapılar üretilmiştir. (MgF₂/MoO₃)^N yapısında ilk tabaka olan MgF₂'ün kalınlığı d_1 ve ikinci tabaka olan MoO₃'ün kalınlığı ise d_2 'dir. d_1 ve d_2 Denklem (3.15) kullanılarak, tasarlanmak istenen PBG'in karakteristiğine göre ayarlanır.

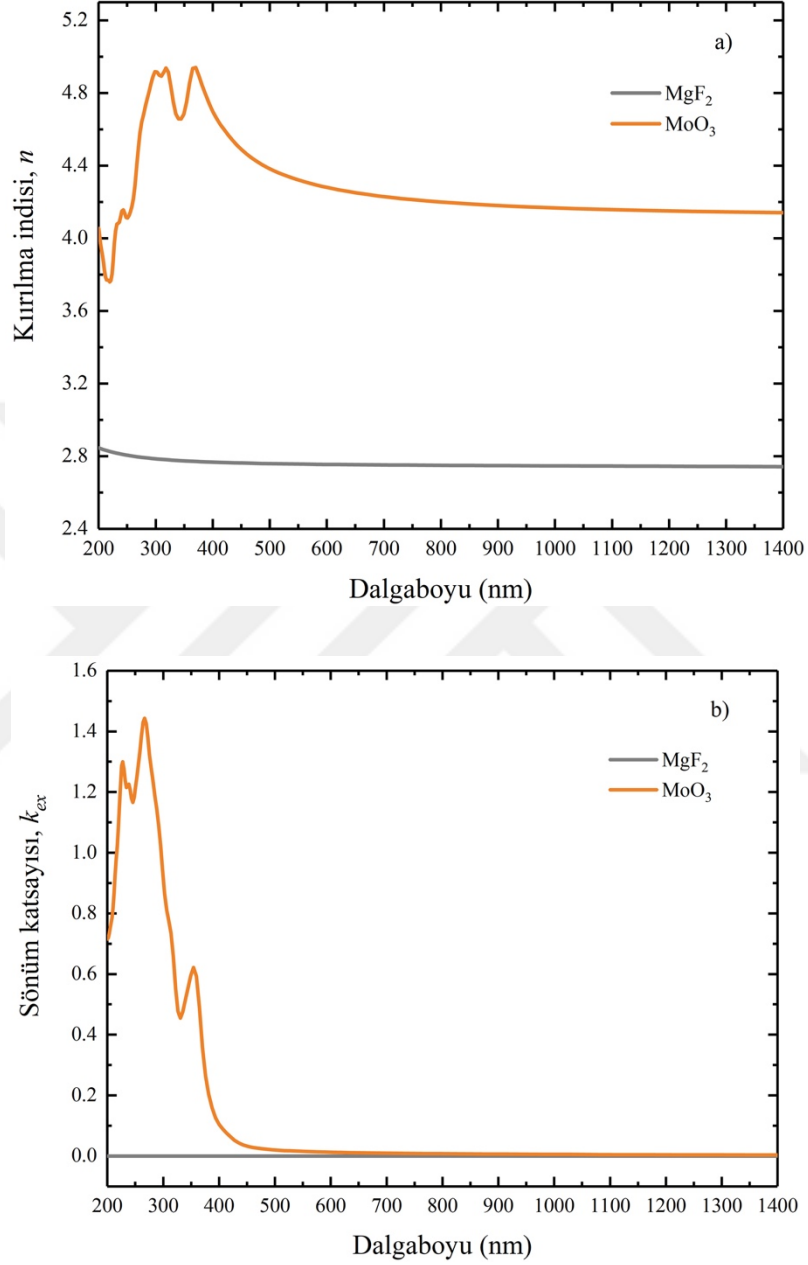


Şekil 3.6: a) $(\text{MgF}_2/\text{MoO}_3)^N$ 1D-PC ve b) $\text{FTO}/\text{ZnO}/\text{P3HT:PCBM}/\text{MoO}_3/\text{Ag}/\text{MoO}_3/(\text{MgF}_2/\text{MoO}_3)^N$ ST-OSC yapıları.

Çalışmada kullanılan $(\text{MgF}_2/\text{MoO}_3)^N$ 1D-PC'inin dielektrik sabiti ve dolayısıyla kırılma indisi sadece tek boyutta periyodik olarak değişmektedir. Yapı bu yönüyle aslında bir DBR yapısıdır ve $(\text{MgF}_2/\text{MoO}_3)^N$ 1D-PC'in oluşturduğu PBG'in genişliği ve yansıma şiddeti her bir katmanın kırılma indisi ile ilişkilidir. Ayrıca PBG'in oluşturulmak istendiği dalga boyu aralığında MgF_2 ve MoO_3 'ün soğurulmasının çok düşük ve mümkün ise olmaması istenir. MgF_2 ve MoO_3 'e ait kırılma indislerinin (n) ve sönüm katsayılarının (extinction coefficient, k_{ex}) dalga boyuna bağlı değişimleri sırasıyla Şekil 3.7 a ve b'de verilmektedir [124,125].

MgF_2 ve MoO_3 'ün n değerleri arasındaki fark, $(\text{MgF}_2/\text{MoO}_3)^N$ 1D-PC yapısında periyodik kırılma indisi dağılımını sağlamaktadır ve bu farkın yüksek olması daha az periyod sayıları ile PBG'de daha yüksek yansımanın elde edilebilmesine olanak verir. Bu durum daha az malzeme

kullanılarak istenilen optik özelliklerde daha hafif ve esnek yapıların tasarlanmasına olanak verir.



Şekil 3.7: MgF₂ ve MoO₃'e ait a) n ve b) k_{ex} 'in dalgaboyuna bağlı değişimleri [124,125].

Özellikle 600 nm'den yüksek dalgaboylarında hem MgF₂'ün hem de MoO₃'ün n değerlerinin dalgaboyuna bağlılığı azalmaktadır. Bu durum özellikle 600 nm'den büyük dalgaboylarında oluşturulacak PBG'in daha keskin hatlı olmasına ve PBG karakteristiğinin dalgaboyuna bağlılığının az olmasına sebep olur. Özellikle ST yapılarda geçirgenlik ve yansıma üzerinden optik tasarım yapıldığı için, ST yapılara entegre edilecek 1D-PC'lerde kullanılacak

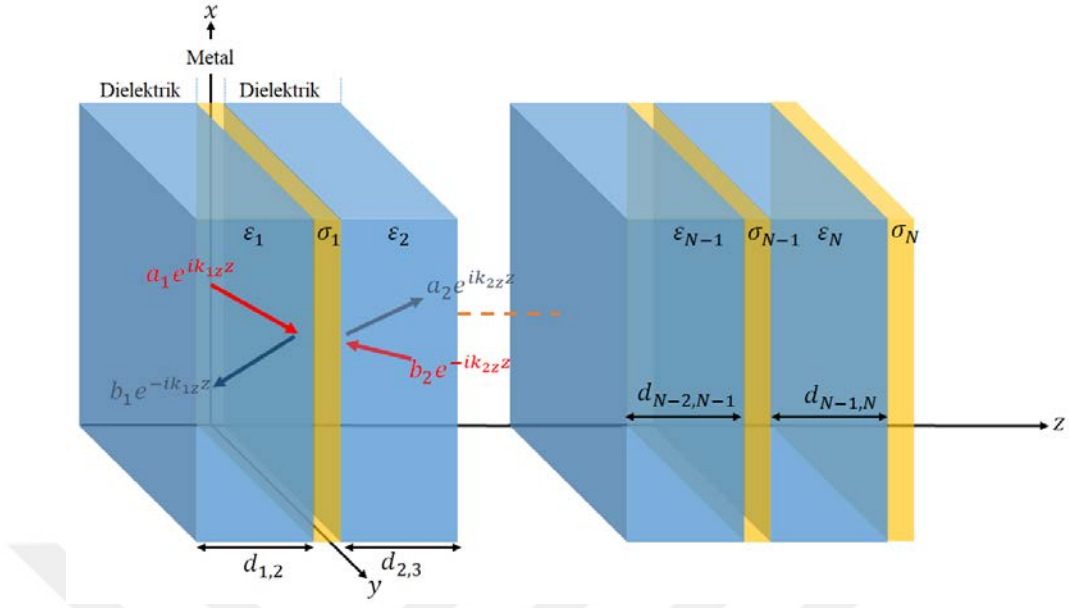
malzemelerin soğurmasının olabildiğince az olması hedeflenmektedir. MgF_2 'nin k_{ex} değeri tüm dalgaboyu değerleri için sıfıra çok yakındır ve bu durum MgF_2 'nin 1D-PC'lerde kullanılabilme uygunluğunu gösterir. MoO_3 'ün k_{ex} değeri ise 500 nm'den sonra sıfıra çok yaklaşmaktadır ve 500 nm'den daha büyük dalgaboylarını içeren PBG tasarımları için elverişlidir.

3.1.4. Optik Karakteristiklerin Hesaplanması

Bu bölümde, tez kapsamında incelenen ST-OSC'lerin, DMD şeffaf üst kontakların ve 1D-PC'lerin tasarımında baz alınan optik özelliklerin önemine ve hesaplanmalarına değinilmiştir. Ayrıca hesaplamalarda kullanılan yöntemler ile hesap çıktılarının değerlendirilmesi üzerine bilgi verilmiştir.

3.1.4.1. Transfer Matris Metodu

Tez çalışmasında ST-OSC'lerin, DMD'lerin ve 1D-PC'lerin tasarımı, geçirgenlik ve yansıma spektrumları gibi optik spektrumların hesaplanması ve özellikle kalınlık parametrelerinin değerlendirilmesi ile yapıldı. Hesaplamalar optoelektronik aygıtların simülasyonlarında kullanılan oldukça efektif bir yöntem olan Transfer matris yöntemi (Transfer matrix method, TMM) ile gerçekleştirildi. TMM özellikle farklı dielektrik ortamların üst üste büyütüldüğü DMD ve 1D-PC gibi yapılarda elektromagnetik dalganın yapı içerisinde nasıl yayıldığını analiz eden ve teorik olarak yapının optik karakteristiğini belirlemeye yarayan güçlü bir yöntemdir [33,126–128]. DMD, 1D-PC veya OSC içerisindeki herhangi bir konumdaki elektrik alan ve manyetik alan bileşenlerinin başka bir konumda nasıl olacağı, oluşturulan transfer matrisi (transfer matrix) ve yayılım matrisi (propagation matrix) aracılığı ile belirlenebilir [33,126]. Elektromagnetik dalganın elektrik ve manyetik alan bileşenleri yapıyı oluşturan katmanların her bir arayüzünde transfer matris ile, yapı içerisinde yayılan alan bileşenleri ise yayılım matrisi ile birbirlerine bağlanırlar.



Şekil 3.8: ε_1 ve ε_2 değerlerine sahip iki dielektrik tabakası tarafından kuşatılmış σ iletkenliğine sahip ince bir metal tabaka. Yapı kendini tekrarlayabilir ve tek metal tabaka için DMD veya 1D-PC yapısına indirgenebilir. Kırmızı ve mavi oklar sırasıyla arayüzeye gelen ve yansıyan elektromagnetik dalgayı tasvir etmektedir.

Şekil 3.8’de iki dielektrik tarafından kuşatılan metal katmanının $z = 0$ düzlemlerine paralel dağılan bir iletkenliği (σ) vardır. Bu haliyle yapı bir DMD yapısıdır ve iletken tabakanın olmadığı durum ise 1D-PC yapısıdır. İletkenin dielektrikler ile oluşturduğu arayüzeyler boyunca elektromanyetik dalganın yayılımını incelemek gerekmektedir. Elektromanyetik dalganın y yönünde polarize olduğu ve z yönünde yayıldığı varsayımları ile s ve p polarizasyonları incelenebilir. p polarizasyonu için manyetik alan aşağıdaki formda yazılabilir [33]:

$$H_{1y} = \alpha_1 e^{i\vec{k}_1 \cdot \vec{r}} + \beta_1 e^{i\vec{k}_1 \cdot \vec{r}} = (\alpha_1 e^{ik_{1z}z} + \beta_1 e^{-ik_{1z}z}) e^{-ik_{1x}x}, \quad z < 0 \quad (3.1)$$

$$H_{2y} = \alpha_2 e^{i\vec{k}_2 \cdot \vec{r}} + \beta_2 e^{i\vec{k}_2 \cdot \vec{r}} = (\alpha_2 e^{ik_{2z}z} + \beta_2 e^{-ik_{2z}z}) e^{-ik_{2x}x}, \quad z > 0 \quad (3.2)$$

burada $\vec{k}_i = \sqrt{\varepsilon_i} \omega / c \hat{e}_z$ ($i = 1, 2$) elektromagnetik dalganın dalga vektörü, ε_i ($i = 1, 2$) ortamın dielektrik sabiti, α_i ile β_i ($i = 1, 2$) katsayılarıdır. Snell yasası gereği, arayüzeyde dalga vektörünün her iki ortamdaki x bileşenleri birbirlerine eşit olacaktır: $k_{1x} = k_{2x}$. Aynı zamanda elektrik alan ve manyetik alanın arayüzey için sınır koşullarını uygularsak [33,129]:

$$\hat{n}_s \times (\vec{E}_2 - \vec{E}_1)|_{z=0} = 0 \quad (3.3)$$

$$\hat{n}_s \times (\vec{H}_2 - \vec{H}_1)|_{z=0} = \vec{J} \quad (3.4)$$

denklemlerini elde ederiz. Burada $\hat{n}_s$ yüzeyin normal birim vektörü, $\vec{J}$ metalik tabakanın yüzey akım yoğunluğudur. Ayrıca $\vec{J}$ 'nin Ohm yasası ile elde edilmesi ve $z = 0$ şartının uygulanması ile aşağıdaki denklemler elde edilir:

$$\frac{k_{1z}}{\varepsilon_1}(a_1 - b_1) - \frac{k_{2z}}{\varepsilon_2}(a_2 - b_2) = 0 \quad (3.5)$$

$$(a_1 + b_1) - (a_2 + b_2) = J_x \quad (3.6)$$

$$J_x = \sigma E_x|_{z=0} = \frac{\sigma k_{2z}}{\varepsilon_0 \varepsilon_2 \omega}(a_2 - b_2) \quad (3.7)$$

burada ε_0 boşluğun permitivitesidir. Denklem (3.5), (3.6) ve (3.7) birleşimi ile, a_i ve b_i 'ler ($i = 1$) sırasıyla a_{i+1} ve b_{i+1} ile geçiş matrisi $M_{i \rightarrow i+1}$ tarafından ilişkilendirilebilir.

$$\begin{pmatrix} a_i \\ b_i \end{pmatrix} = M_{i \rightarrow i+1} \begin{pmatrix} a_{i+1} \\ b_{i+1} \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

$M_{i \rightarrow i+1}$ geçiş matrisi, tek metalik tabaka içeren tasarım için $i = 1$ seçildiğinde aşağıdaki gibi $M_{1 \rightarrow 2}$ şeklindedir:

$$M_{1 \rightarrow 2} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 + n_p + \xi_p & 1 - n_p - \xi_p \\ 1 - n_p + \xi_p & 1 + n_p - \xi_p \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

Burada $n_p = \frac{\varepsilon_1 k_{2z}}{\varepsilon_2 k_{1z}}$ ve $\xi_p = \frac{\sigma k_{2z}}{\varepsilon_0 \varepsilon_2 \omega}$, dır. p polarizasyonu için yukarıda manyetik alan ve ilgili sınır koşulları ile Ohm yasasının uygulanması ile yapılan tüm işlemler, s polarizasyonu için elektrik alan bileşenine uygulanabilir. Bu durumda yine Ohm yasası ve sınır şartlarını kullanarak s polarizasyonunun geçiş matrisi aşağıdaki gibi elde edilir:

$$M_{1 \rightarrow 2} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 + n_s + \xi_s & 1 - n_s + \xi_s \\ 1 - n_s - \xi_s & 1 + n_s - \xi_s \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

burada μ_0 boşluğun permeabilitesi olmak üzere n_s ve ξ_s parametreleri sırasıyla $\frac{k_{2z}}{k_{1z}}$ ve $\frac{\sigma\mu_0\omega}{k_{1z}}$ terimlerine eşittir. Denklemlerin türetilmesinde kullanılan n_p ve n_s terimleri doğrudan tabakaların kırılma indisi ile ilişkilidir ve kompleks terim içinde α 'yı da barındırır. Bu değerler elektromanyetik dalganın dalgaboyuna ve geliş açısında bağlıdır.

Elde edilen denklemlerde dikkat edildiğinde hem s hem de p polarizasyonları için elde edilen geçiş matrisleri diagonal olmayan bileşenlerdeki işaret farkı dışında aynıdır. Gerekli $j = (s, p)$ ve $\eta_p = 1$, $\eta_s = -1$ düzenlemeleri yaparak ortak bir geçiş matrisi aşağıdaki şekilde parametrize edilebilir:

$$M_{1 \rightarrow 2} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 + n_j + \xi_j & 1 - n_j - \eta_j \xi_j \\ 1 - n_j + \eta_j \xi_j & 1 + n_j - \xi_j \end{pmatrix} \quad (3.11)$$

Geçiş matrisi ile arayüzeylerde elektromanyetik dalganın geçiş (t) ve yansımaya katsayıları (r) arasındaki bağıntı ve DMD yapısının geçirgenlik (T) ve yansımaya (R) spektrumları aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$R = |r|^2 = \left| \frac{M_{2 \rightarrow 1}}{M_{1 \rightarrow 1}} \right|^2 \quad (3.12)$$

$$T = |t|^2 = \left| \frac{1}{M_{1 \rightarrow 1}} \right|^2 \quad (3.13)$$

Ayrıca, yapının geçirgenlik ve yansımaya spektrumlarının elde edilmesi aşağıdaki bağıntı gereği soğurma (A) spektrumunun da elde edilebilmesini sağlar.

$$A = 1 - (T + R) \quad (3.14)$$

Şekil 3.8'de verilen yapıda iletken olan tabakaların kalınlığı sıfır alındığında yapı farklı kırılma indislerine sahip periyodik olarak düzenlenmiş yapılardan oluşan DBR sistemleri ile aynı yapıya indirgenir. Bu durumda DBR'in oluşturduğu PBG'in rezonans dalgaboyuna denk gelen merkez dalgaboyu olan λ_B aşağıdaki şartı sağlamalıdır.

$$\frac{\lambda_B}{4} = n_i d_i \quad (3.15)$$

burada n_i her bir tabakaya ait kırılma indisinin reel kısmını ve d_i ise tabaka kalınlığını ifade eder.

TMM hesaplamaları Matlab programı kullanılarak ve Simulink ile sonsuz sayıda soğurucu veya yansıtıcı tabakanın eklenebildiği algoritmalar tasarlanarak yapılmıştır. Hesaplamaların yapıldığı program için tasarlanan arayüz EK 1 bölümünde verilmektedir.

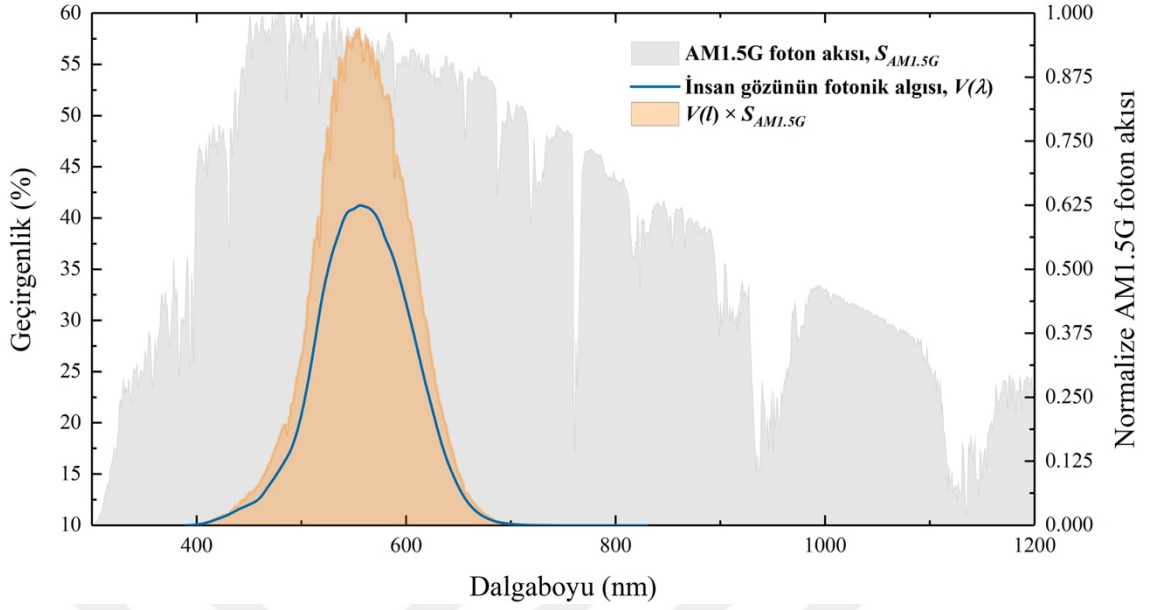
3.1.4.2. Ortalama Görünür Geçirgenlik

ST-OSC'in ve geçirgen DMD kontakların şeffaflık özellikleri, VR (370-780 nm) üzerinden, yapıların geçirgenlik karakteristikleri ($T(\lambda)$) ve insan gözünün fotonik algısı (Photonic response of human eye, $V(\lambda)$) hesaba katılarak belirlenir. $V(\lambda)$ Şekil 3.9'de verilmiştir. AVT değeri Denklem (3.16) kullanılarak hesaplanır [33,40,130]:

$$AVT = \frac{\int_{370\text{ nm}}^{780\text{ nm}} T(\lambda) V(\lambda) S_{AM1.5G}(\lambda) d\lambda}{\int_{370\text{ nm}}^{780\text{ nm}} V(\lambda) S_{AM1.5G}(\lambda) d\lambda} \quad (3.16)$$

burada $S_{AM1.5G}$ AM1.5G aydınlatma altında foton akısıdır. AVT için integral sınırları VR üzerinden belirlense de $V(\lambda) S_{AM1.5G}(\lambda)$ integrant fonksiyonları $V(\lambda)$ 'nın tanımlı olduğu yerlerde değer almaktadır. Dolayısıyla AVT için integral sınırları $V(\lambda)$ üzerinden de belirlenebilir.

ST-OSC'ler için AVT değerleri çalışma ortamına ciddi bir bağımlılık gösterir ve pencere uygulamaları için %25 AVT değeri kabul edilebilir bir eşik değeridir [33,40,77]. Ayrıca AVT hesabında deneysel bir sonuç elde edilecekse kullanılacak $T(\lambda)$ değeri deneysel olmalı ve ölçüm sırasında ışığın spotu etkin alan içinde olmalıdır. Spot alanı etkin alandan daha büyükse, gelen ışığın bir kısmı doğrudan dedektöre ulaşabilir ve deneysel olarak geçirgenlik ölçümünde bir hata oluşturabilir [33,40,130].



Şekil 3.9: İnsan gözünün fotonik algısı, AM1.5G foton akısı [33].

3.1.4.3. Renk Koordinatları

ST-OSC'lerin AVT kadar önemli bir diğer özelliği de CIE 1931 kromatiklik diyagramındaki renk koordinatlarıdır (x, y) . Diyagram, insan gözünün tepkisine göre tasarlanmıştır ve genellikle aydınlatıcıların renk özelliklerini belirlemek için kullanılır (Şekil 3.10 a) [33].

CIE 1931 diyagramı aynı zamanda tristimulus sistem olarak da bilinir ve ST-OSC'ler için ilk kez 2012 yılında, AM1.5G ışık aydınlatma koşulları altında aydınlatıldığında renk özelliklerinin değerlendirilmesi için kullanılmıştır [33,40,72]. Tristimulus sisteminde X , Y ve Z değerleri VR altında aşağıdaki denklemler ile hesaplanabilir:

$$X = \int_{370 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} S_{AM1.5G}^{D65}(\lambda) T(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad (3.17)$$

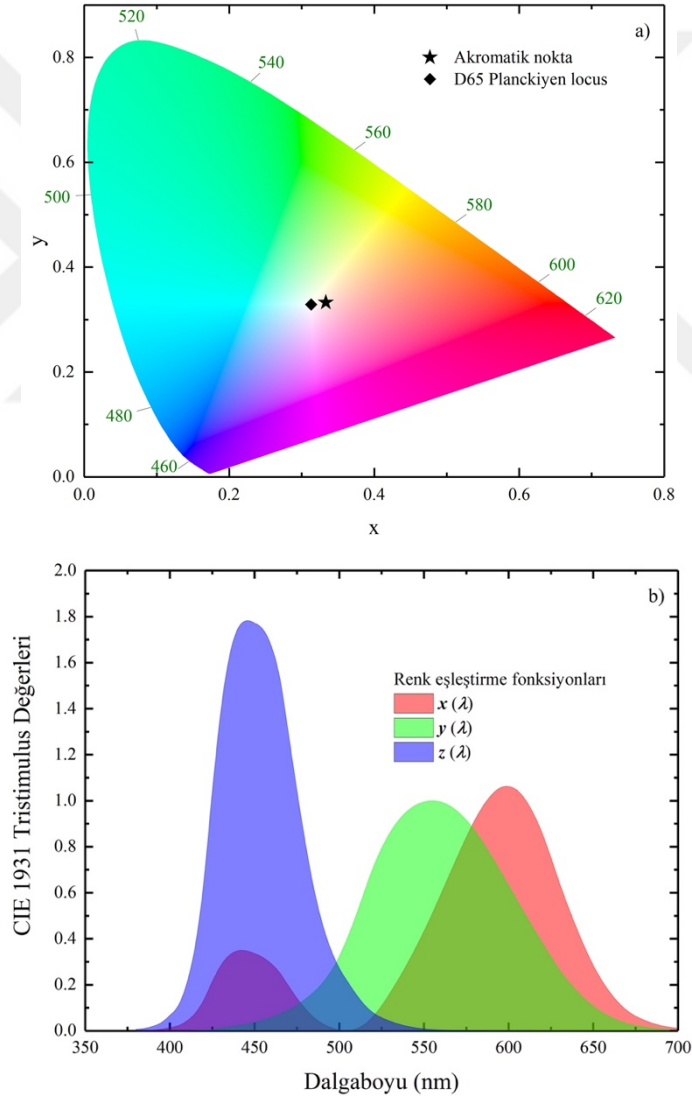
$$Y = \int_{370 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} S_{AM1.5G}^{D65}(\lambda) T(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad (3.18)$$

$$Z = \int_{370 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} S_{AM1.5G}^{D65}(\lambda) T(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \quad (3.19)$$

denklemlerde $S_{AM1.5G}^{D65}$ CIE standart D65 aydınlatıcı spektrumunu ve $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ terimleri ise CIE protokolü tarafından tanımlanmış renk eşleştirme fonksiyonlarını (Color matching function) ifade eder (Şekil 3.10 b). X, Y ve Z toplamı bire eşittir ve renk koordinatları iki boyutlu koordinatlara aşağıdaki şekilde basitleştirilebilir [33,131]:

$$x = \frac{X}{(X + Y + Z)} \quad (3.20)$$

$$y = \frac{Y}{(X + Y + Z)} \quad (3.21)$$



Şekil 3.10: a) CIE1931 kromatiklik diyagramı ve b) renk eşleştirme fonksiyonlarının spektral dağılımları [33].

Renk koordinatları incelenirken standart aydınlatıcı olarak kullanılan kaynaklardan AM1.5G'nin koordinatları $x=0.32020$ ve $y=0.33240$, D65'in renk koordinatları ise $x=0.3128$ ve $y=0.3290$ 'dır. Pencere uygulamaları için nötr renge sahip ST-OSC'lerin tasarımında genellikle renk koordinatlarının akromatik noktaya (achromatic point) ($x=0.3333$ ve $y=0.3333$) ya da AM1.5G veya D65'in koordinatlarına yakın hedeflenir [33,40]. Ayrıca renk koordinatları, yapı tasarımının modifikasyonu ile değişen geçirgenlik spektrumları ile kontrol edilebilir. Böylece istenilen renkte ST-OSC yapılarak rengi değiştirilebilen pencere uygulamalarına erişilebilir.

Renk koordinatlarının hesaplamaları Matlab programı kullanılarak yapılmıştır. Hesaplamaların yapıldığı programın tasarlanan arayüzü EK 1 bölümünde verilmektedir.

3.1.4.4. Renksel Geriverim İndeksi

Renksel geriverim indeksi (Color render index, CRI), herhangi bir nesnenin ideal veya doğal bir ışık kaynağı ile aydınlatılması durumunda, renginin aslına ne kadar uygun olduğunu veren bir ölçüttür [132]. Dolayısıyla CRI, aydınlatılmış cisimlerin renklerinin aslına uygun olup olmadığını veren bir ölçü sistemi oluşturmaktadır ve 0-100 aralığında değer almaktadır. CRI'nin 100 olma durumu, standartlaştırılmış gün ışığı kaynakları veya akkor lamba gövdelerinde görülebilir. 90 ve üstü CRI değerleri mükemmel olarak kabul edilirken, 80'in altındaki CRI değerleri genellikle zayıf olarak kabul edilir [133]. Düşük basınçlı Sodyum lambası gibi bazı ışık kaynaklarının CRI'sı negatif değerler alabilir.

CRI değerleri doğrudan test lambasının ve referans aydınlatıcının spektral dağılımları kullanılarak hesaplanır [132]. Hesaplama test renk örnekleri (test color sample, TCS)'nin spektral dağılımları baz alarak yapılır ve her bir test örneği için bir CRI değeri hesaplanabilir. Test lambasının CRI'si her bir TCS için hesaplanan CRI değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanabilir [132]. Ortalama alınarak belirlenen test kaynağının CRI değerleri 8 TCS ile birlikte 7 tane ek TCS baz alınarak belirlenebilir [133]. İlk 8 TCS'nin ortalaması ile genel CRI (CRI_{gen}) ve 15 TCS'nin ortalaması ile genişletilmiş CRI (extended CRI, CRI_{ext}) değerleri hesaplanabilir. 15 TCS'nin kodları, isimlendirilmeleri ve renkleri Şekil 3.11'de verilmektedir.

ST-OSC'lerin CRI metriğinde değerlendirilmesi için, test lamalarında yansıma spektrumundan elde edilen tristimulus değerler yerine ST-OSC'nin geçirgenlik spektrumundan elde edilen tristimulus değerleri kullanılır. Böylece, ST olan bir yapı için CRI değerlendirilmesi yapılabilir.

TCS01 7.5R6/4 Açık grimsi kırmızı	TCS02 5Y6/4 Koyu grimsi sarı	TCS03 5GY6/8 Güçlü sarı yeşil	TCS04 2.5G6/6 Orta sarımsı yeşil	TCS05 10BG6/4 Açık mavimsi yeşil
TCS06 5PB6/8 Açık mavi	TCS07 2.5PB6/8 Açık menekşe	TCS08 10P6/8 Açık kırmızimsı mor	TCS09 4.5R4/13 Güçlü kırmızı	TCS10 5Y8/10 Güçlü sarı
TCS11 4.5G5/8 Güçlü yeşil	TCS12 3PB3/11 Güçlü mavi	TCS13 5YR8/4 Açık sarımsı pembe	TCS14 5GY4/4 Orta zeytin yeşili	(TCS15) 1YR6/4 Asya derisi

Şekil 3.11: 15 TCS için renk kodları, renkleri ve isimlendirmeler [133].

Renk farkının ($\Delta_{u,v}$) hesaplanması için CIE 1964 standartlarında uniform renk uzayındaki kolorimetrik değerler kullanılır [132]:

$$W^* = 25Y^{\frac{1}{3}} - 17$$

$$U^* = 13(u - u_n) \quad (3.22)$$

$$V^* = 13(v - v_n)$$

burada u ve v CIE 1960 renklilik diyagramındaki renk koordinatlarıdır. u_n ve v_n aydınlatıcının CIE 1960 renk koordinatlarıdır. u ve v değerleri X, Y ve Z tristimulus değerlerinden veya CIE 1960 renk koordinatlarından aşağıdaki denklemler aracılığı ile hesaplanabilirler:

$$u = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} = \frac{4x}{-2x + 12y + 3} \quad (3.23)$$

$$v = \frac{6Y}{X + 15Y + 3Z} = \frac{6y}{-2x + 12y + 3} \quad (3.24)$$

Test edilecek kaynağın veya ST-OSC'nin renk koordinatları, referans aydınlatıcının renk koordinatları ile eşleşmez (Test kaynağının bileşenleri i ve referans aydınlatıcının bileşenleri

k indisi ile etiketlenmektedir.). Bu farklılık renk uyarlama işlemi ile düzeltilir. Renk uyarlama işlemi aşağıdaki denklem setleri yapılır [132]:

$$u'_k = u_r$$

$$v'_k = v_r$$

$$u'_{k,i} = \frac{10.872 + 0.404c_r \frac{c_{k,i}}{c_k} - 4d_r \frac{d_{k,i}}{d_k}}{16.518 + 1.481c_r \frac{c_{k,i}}{c_k} - d_r \frac{d_{k,i}}{d_k}} \quad (3.25)$$

$$v'_{k,i} = \frac{5.520}{16.518 + 1.481c_r \frac{c_{k,i}}{c_k} - d_r \frac{d_{k,i}}{d_k}}$$

burada u'_k ve v'_k renk uyarlama işleminden sonraki test kaynağının, u_r ve v_r referans aydınlatıcının, $u'_{k,i}$ ve $v'_{k,i}$ renk uyarlama işleminden sonraki test renklerinin renk CIE 1960 renk koordinatlarıdır. c_k ve d_k renklilik diyagramından elde edilen katsayılarıdır ve aşağıdaki denklemler ile hesaplanırlar [132]:

$$c = \frac{4 - u - 10v}{v} \quad (3.26)$$

$$d = \frac{1.708v + 0.404 - 1.481u}{v}$$

c ve d katsayıları, hem test kaynağının hem de referans aydınlatıcının renk koordinatlarına göre indislenebilir. Ayrıca her bir test rengi için ve aydınlatıcı kaynak ile test kaynağının tristimulus değerleri belirlenerek CIE 1964 standartlarındaki W , U ve V değerleri hesaplanır. İndislemeler ile denklemlerin modifiye edilmesi sonucu CIE 1964 standartları için renklilik değerleri aşağıdaki denklem setleri ile sunulabilir [132]:

$$W_{r,i}^* = 25Y_{r,i}^{1/3} - 17$$

$$U_{r,i}^* = 13W_{r,i}^*(u_{r,i} - u_r)$$

$$V_{r,i}^* = 13W_{r,i}^*(v_{r,i} - v_r)$$

(3.27)

$$W_{k,i}^* = 25Y_{k,i}^{1/3} - 17$$

$$U_{k,i}^* = 13W_{k,i}^*(u_{k,i} - u_k)$$

$$V_{k,i}^* = 13W_{k,i}^*(v_{k,i} - v_k)$$

CIE 1964 uniform renk uzayına göre her bir test renginin aydınlatıcı kaynak ve test kaynağına göre renk farkları aşağıdaki gibi hesaplanır [132]:

$$\Delta_{u,v} = \sqrt{(U_{r,i}^* - U_{k,i}^*)^2 + (V_{r,i}^* - V_{k,i}^*)^2 + (W_{r,i}^* - W_{k,i}^*)^2} \quad (3.28)$$

Test renklerinin tamamı için renksel geriverim indeksleri ise, test renklerine özel olarak renk farkları ile hesaplanabilir [132]:

$$CRI_i = 100 - 4.6\Delta_{u,v} \quad (3.29)$$

Her bir test renginin renksel geriverim indeksi, genel bir renk geri verim indeksinin eldesinde kullanılabilir [132]:

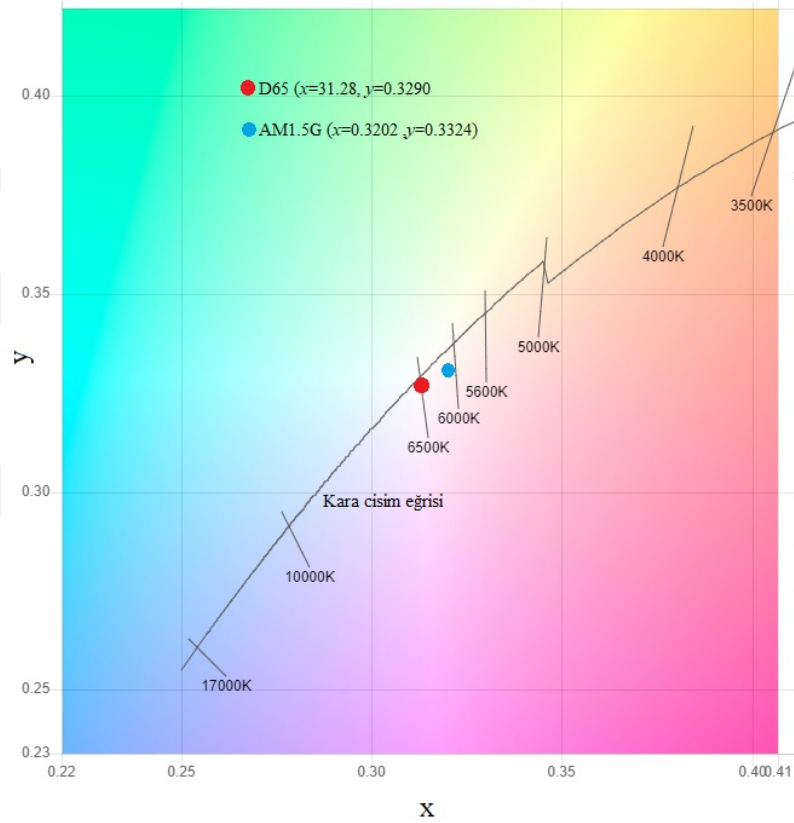
$$CRI_g = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_i \quad (3.30)$$

i indislemesi ilgilenen test renklerinin sayısına (N) kadar farklı değer alır. $N=8$ olması durumunda CRI_{gen} , $N=15$ olması durumunda ise CRI_{ext} hesaplanır.

CRI hesaplamaları Matlab programı kullanılarak yapılmıştır. Hesaplamaların yapıldığı programın tasarlanan arayüzü EK 1 bölümünde verilmektedir.

3.1.4.5. Korelasyonlu Renk Sıcaklığı

Korelasyonlu renk sıcaklığı (Correlated color temperature, CCT) Şekil 3.12’de verilen kara cisim eğrisi boyunca belirli bir noktayı tanımlayan mutlak, tek boyutlu bir ölçü sistemidir. Özellikle beyaz ışık kaynaklarını tanımlamakta kullanılan önemli bir ölçüttür. CCT ayrıca, ST karakteristiğe sahip optoelektronik aygıtların çeşitli teknolojik uygulamalarda ışık yayıcılarına benzerliklerini gösteren bir sistem olarak da karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 3.12: Kara cismin korelasyonu renk sıcaklığı eğrisi.

Doğal gün ışığı da dahil olmak üzere çoğu ışık kaynağı, tam olarak kara cisim eğrisi üzerinde olan ışık rengi sergilemez. Çünkü atmosferik absorpsiyondan veya yapay ışık kaynaklarının üretim değişkenliğinden dolayı kara cisim eğrisinden küçük sapmalar meydana gelmektedir. Renk sıcaklığının korelasyonlu olarak tanımlanması bu sapmaların ortaya çıkardığı istatistiksel bir süreci tanımlamaktadır. Bu durum kara cisim eğrisi üzerinde CCT belirleme gerekliliği yerine kara cisme en yakın CCT'nin hesaplanması gerekliliğini doğurmuştur. Sapma veya yakınlık ölçütü CIE1960 renk koordinatlarında $\Delta_{u,v} < 0.054$ olması şartı ile belirlenir [132]. $\Delta_{u,v} > 0.054$ durumunda, yani sapmaların yüksek olduğu durumda matematiksel olarak, bir renk sıcaklığı değeriyle ilişkilendirme işlemi hala mümkündür. Ancak sapma o kadar büyükse ışık

kaynağı artık "beyaz" olarak kabul edilmez. Bu yüzden CCT'nin yanında $\Delta_{u,v}$ değerlerini vermek her zaman daha kullanışlı ve efektif bir yöntemdir.

CIE1931 renk koordinatları kullanılarak CCT değeri McCamy yaklaşıklığı ile aşağıdaki gibi hesaplanabilir [134]:

$$CCT = -449 m(x, y)^3 + 3525 m(x, y)^2 + 6823.3 m(x, y) + 5520.33 \quad (3.31)$$

burada $m(x, y) = \left(\frac{x-0.3320}{y-0.1858} \right)$ 'dir. CCT değeri arttıkça kara cisim eğrinden aşağı ve sola, yani mavi bölgeye doğru kayma meydana gelmektedir (Şekil 3.12).

CCT hesaplamaları Matlab programı kullanılarak yapılmıştır. Hesaplamaların yapıldığı program için tasarlanan arayüz EK 1 bölümünde verilmektedir.

3.1.5. Yapıların Üretimi

3.1.5.1. Püskürtme Tekniği

Püskürtme tekniği ince film teknolojisinde son zamanlarda sıklıkla kullanılan, plazma tekniği ile vakum ortamında film biriktirme yöntemidir. Püskürtme işleminde kaplama yapılacak olan hedef malzemenin yüzeyine yakın bir bölgede iyonlar ve yüksüz parçacıklı yüksek enerjili parçacıklarla plazma oluşturulur. Bu iyonlar ve yüksüz parçacıklar ile hedef malzeme bombardıman edilerek hedef malzemedan atom veya moleküller koparılır ve vakum ortamında alttaş üzerine biriktirilir. Buharlaştırma tekniğine nazaran, püskürtme işleminde kaplama sıcaklığının daha düşük olması, farklı buharlaşma sıcaklıklarına ve farklı oranlara sahip bileşiklerin aynı anda biriktirilebilmesine olanak sağlar.

Püskürtme yöntemi ile yüksek kaplama homojenliğinin ve istenilen oranda bileşiklerin kontrollü biriktirilebilmesinin sağlanması, püskürtme tekniğinin ince film kaplama işlemlerinde diğer sistemlere göre daha çok tercih edilmesinin önünü açmıştır. Püskürtme sistemi radyo frekansı (RF) ve doğru akım (DC) modlarında çalışabilmektedir. Dielektrik ve oksit tabanlı malzemelerin biriktirilmesinde RF modda, iletken malzemelerin biriktirilmesinde ise DC modda püskürtme işlemi yapılmaktadır.

Püskürtme tekniğinde vakum odası içerisinde birden çok fazla hedefin bulunduğu ve her bir hedefin kaynağının birbirinden bağımsız olduğu eş-püskürtme sistemleri mevcuttur. Eş-püskürtme sistemleri farklı oranlarda elementlerden oluşan bileşik sistemlerin, kontrollü

katkılamının yapıldığı malzemelerin ve fotonik kristaller gibi periyodik yapıların kontrollü üretilmesini sağlar. Özellikle farklı türden malzemelerin aynı vakum ve biriktirme koşullarında büyütülebilmesini sağlayan sistemlerdir.

Tez kapsamında incelenen tüm OSC'lerde yer alan ETL ve HTL'leri oluşturan ZnO, MoO₃, V₂O₅, WO₃ gibi TMO'ların, Ag kontak malzemelerinin, MoO₃/Ag/MoO₃ DMD yapılarının ve MgF₂/MoO₃ 1D-PC yapılarının biriktirilmesi Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan Nanovak NVTs-500 eş-püskütme sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Sistem içerisinde aynı zamanda buharlaştırma tekniği ile ince film biriktirilmesine imkan sağlayan buharlaştırma potalarını da barındırmaktadır. Sistem dairesel düzende yerleştirilen 2 inç çapında 1 tane DC ve 2 tane RF kaynak hedefe sahiptir. Tüm hedeflerin odağı, döndürülebilen ve 600 °C'ye kadar ısıtılabilen altta tutucudur. Vakum odası 10⁻⁸ Torr temel basınç değerine ulaşabilmektedir.

3.1.5.2. *Spin Kaplama*

Spin kaplama işlemi, belirli bir altta üzerine kaplanacak malzemenin çözelti veya akışkan formunda olması durumunda, altta üzerine damlatılıp döndürülerek merkezci kuvvetin etkisi altında malzemenin yüzeye yayılarak kaplanması işlemidir. Özellikle polimer tabanlı malzemelerin, mikro boyuttaki aygıtların fabrikasyonunda sıklıkla kullanılan fotodirençlerin ince film halinde kaplanmasında sıklıkla kullanılır.

Tez kapsamında incelenen tüm OSC'lerin aktif bölgelerini oluşturan P3HT:PCBM karışımının kaplanması Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan SUSS MicroTec marka Delta-6RC model spin kaplama sistemi kullanılarak yapıldı. P3HT:PCBM polimer çözeltisi, hazır temin edilen P3HT ve PCBM polimerlerinden kütleye eşit olarak karıştırılması ile ve konsantrasyonu 20 mg/mL olacak şekilde diklorobenzen (dichlorobenzene) çözücüsü eklenerek hazırlandı. Polimer karışımın 80 °C sıcaklıkta 14 saat manyetik karıştırıcı ile homojen bir şekilde karışması sağlandı. Tüm OSC'ler için P3HT:PCBM aktif tabakanın kalınlığı d_{al} 130 nm olacak şekilde ayarlandı.

3.2. ORGANİK GÜNEŞ HÜCRELERİNİN KARAKTERİZASYONU

Bu bölümde, tez kapsamında üretilen OSC yapılarının yapısal, optik ve elektriksel özelliklerinin deneysel olarak belirlendiği karakterizasyon yöntemleri hakkında bilgi verilmektedir.

3.2.1. Yapısal Karakterizasyon

3.2.1.1. Atomik Kuvvet Mikroskobu

Atomik kuvvet mikroskobu (Atomic force microscope, AFM), malzeme yüzeyindeki atomlar ile atomik incelikte tarayıcı bir iğne arasındaki etkileşimi baz alarak çalışan, yüzeyin topografik görüntüsünü elde edebildiğimiz bir mikroskop türüdür. Elde edilen topografik görüntünün tarama aralığı 1-100 μm , çözünürlüğü ise angström mertebelerindedir.

AFM, cantilever olarak adlandırılan serbest uç kısmında atomik kalınlıkta bir tarama iğnesi bulunan bir aparattan, piezoelektrik tarayıcıdan, laser ve fotodiyot gibi aygıtlardan oluşmaktadır. Cantilever ucundaki iğne malzeme yüzeyini taraması esnasında, cantilever ucundaki iğne ve yüzey atomları arasında etkileşim iğnenin sapmasına sebep olur. Sapma miktarı ve tarama düzeni işlenerek yüzeyin topografik ve morfolojik görüntüsü, pürüzlülüğü, tanecik miktarı ve boyutu kaydedilebilir.

Tez kapsamında incelenen farklı HTL tabakalarına sahip OSC'lerde, HTL/üst kontak ve aktif bölge/HTL arayüzeylerinin incelenmesinde Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan Nano-Magnetics marka AFM sistemi kullanılmıştır.

3.2.2. Optik Karakterizasyon

3.2.2.1. Geçirgenlik

Tez kapsamında incelenen OSC'lerin ve OSC'leri oluşturan katmanların geçirgenlik spektrumları, Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunana Perkin Elmer Lambda 2S marka UV-Vis spektrometresinin geçirgenlik modu ve konfigürasyonu ile alınmıştır. UV-Vis spektrometresi Döteryum ve halojen lambadan oluşan iki farklı ışık kaynağı, dedektör ve monokramatörden oluşmaktadır. Sistem incelenecek numunenin farklı konfigürasyon ve modlarda 200-1100 nm aralığında yansıma, geçirgenlik ve soğurma spektrumlarını verebilmektedir.

3.2.3. Elektriksel Karakterizasyon

3.2.3.1. Akım-Voltaj

Tez kapsamında üretilen OSC'lerin akım-voltaj ($I - V$) ölçümleri Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan Keithley 4200-SCS sistemi ile yapıldı. $I - V$ sisteminin bulunduğu ölçüm istasyonunda AM0 ve AM1.5 spektral dağılımlarını verebilen Newport Oriel Sol3A güneş simülatörü yer almaktadır. Bu sayede sitemde SC'lerin karanlık ve aydınlık altında $I - V$ ölçümleri alınabilmektedir. Sistem, 1 güneş altında AM0 spektral dağılımı 136.7 mW/cm^2 ve AM1.5 spektral dağılımı 100 mW/cm^2 güç yoğunluğunda olacak şekilde kalibre edilmiştir. Aydınlık ve karanlık altında alınan $I - V$ ölçümleri ile güneş hücresi performans parametreleri belirlenmektedir.

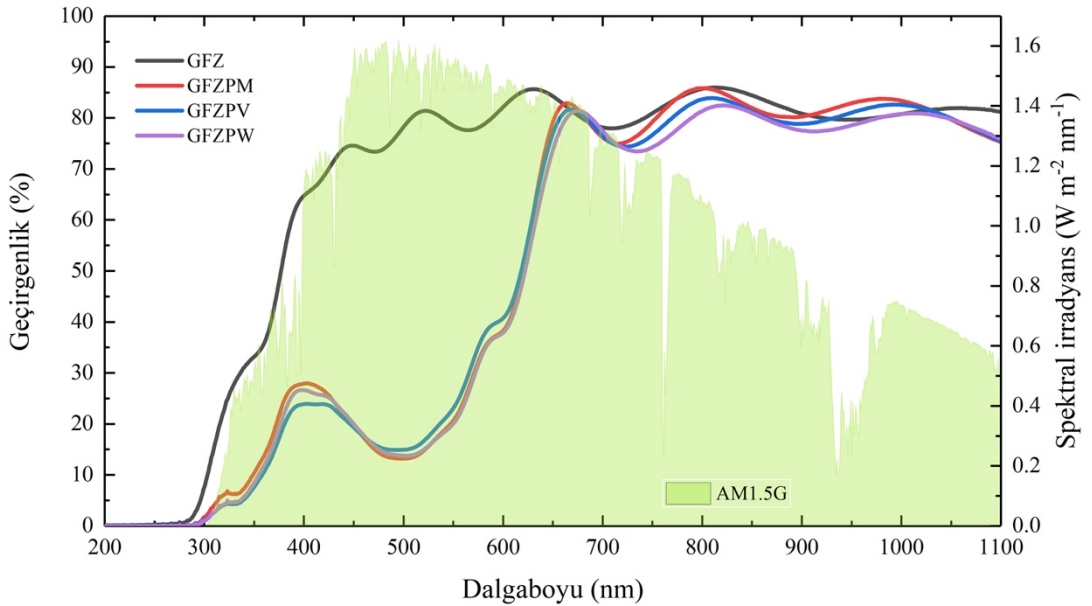
4. BULGULAR

4.1. FARKLI BOŞLUK TRANSPORT TABAKALARINA SAHİP YAPILAR

4.1.1. Geçirgenlik Ölçüm Sonuçları

Tez kapsamında farklı HTL'lerin, OSC'lerin elektrik ve optik özellikleri üzerine etkisini incelemek için Tablo 3.1'de verilen IOSC yapıları üretilmiştir. Optik ölçümler için üretilen OSC'lerde (GFZ, GFZPM, GFZPW, GFZPV), OSC'lerin opak olmasına sebep olan 100 nm kalınlığındaki Ag üst kontak yapıları bulunmamaktadır.

Şekil 4.1'de P3HT:PCBM aktif tabaka ve HTL olmayan GFZ yapısı ile farklı HTL malzemelerine sahip olan GFZPM, GFZPV ve GFZPW yapılarının 200-1100 nm aralığında alınan geçirgenlik ölçümleri verilmiştir.



Şekil 4.1: GFZ, GFZPM, GFZPV ve GFZPW yapılarının geçirgenlik spektrumları [57].

GFZ yapısının geçirgenlik spektrumu 300 nm'den büyük dalga boyları değerlerinde %80 civarlarındadır. Ayrıca GFZ'nin geçirgenliği AM1.5G spektral irradyans dağılımının tamamını kapsamaktadır ve düşük dalga boyları rejiminde aynı trende sahiptirler. Bu durum geçirgen alt kontak olan FTO ve ETL malzemesi olan ZnO'nun kullanılmasıyla OSC'ye giren fotonların büyük bir bölümünün P3HT:PCBM aktif bölgeye ulaştığını göstermektedir.

Geçirgenlik spektrumlarında görülen GFZ ile GFZPM, GFZPV ve GFZPW yapıları arasındaki 300-650 nm aralığındaki fark P3HT:PCBM aktif bölgeden kaynaklanmaktadır. Çünkü P3HT:PCBM'nin bu bölgede soğurması yüksektir (Şekil 4.2). MoO₃, V₂O₅ ve WO₃ gibi TMO'ların VR ve IR'de bilinen yüksek geçirgenliklerinden dolayı GFZPM, GFZPV ve GFZPW'nin geçirgenlik spektrumları daha çok P3HT:PCBM aktif bölge tarafından belirlenmektedir [33,57].

GFZPM, GFZPV ve GFZPW'nin geçirgenlik spektrumlarında bazı dalgaboyu bölgelerindeki meydana gelen değişiklik, MoO₃, V₂O₅ ve WO₃'ün optik karakteristiklerinden ve P3HT:PCBM aktif bölgeden HTL tabakasına soğurulmadan geçen fotonların iç yansımalarından kaynaklanmaktadır. Özellikle HTL tabasından yapı içerisine yansıyan elektromagnetik dalganın tekrar aktif bölgede soğurulması OSC'lerin hücre performansını olumlu etkilemektedir. Dolayısıyla bu etkinin incelenmesi, yapıların optik spektrumlarından yapıda üretilcek J_{ph} 'ın hesaplanması ile yapılabilir [33,57].

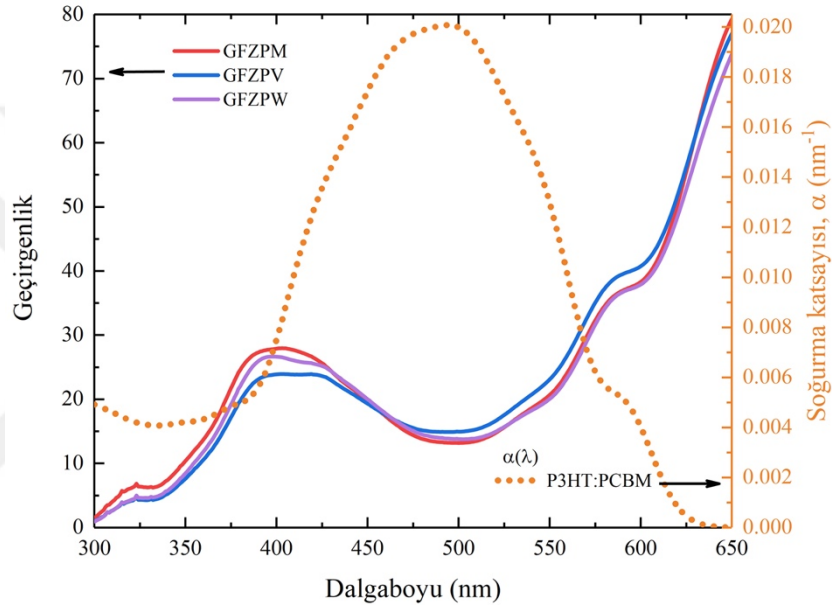
J_{ph} 'nin hesaplanması, deneysel olarak elde edilen optik özelliklerden yola çıkarak, özellikle OSC'nin hücre çıkış parametrelerinden biri olan J_{sc} için bir değerlendirme yapılmasını sağlar. Ayrıca bu hesap yapı içerisinde her bir fotonun bir elektron ve boşluk çifti yaratarak akıma katkıda bulunduğunu varsayar ve deneysel olarak elde edilen optik özelliklerin elektriksel özelliklerle uyumlu olup olmadığını göstermek için yaygın olarak kullanılan etkili bir yöntemdir [33,57]:

$$J_{ph} = \int AM1.5G(\lambda)T(\lambda) (1 - e^{-\alpha_{al}(\lambda)d_{al}})d\lambda \quad (4.1)$$

burada $\alpha_{al}(\lambda)$ PcHT:PCBM aktif bölgenin soğurma katsayısıdır. Farklı GFZPM, GFZPV ve GFZPW'nin geçirgenlik spektrumları kullanılarak Denklem (4.1) ile her bir yapıda oluşacak J_{ph} değeri hesaplanmıştır (Tablo 4.1). Yapılarda oluşan J_{ph} 'ın relatif incelemesi için, farklı dalgaboyları aralığında AM1.5G'nin karakteristiği ve $\alpha_{al}(\lambda)$ 'nın dalgaboyuna bağlı değişimi hesaba katılmalıdır. Çünkü GFZPM, GFZPV ve GFZPW yapılarında ETL ve HTL olarak yer alan metal-oksik alaşımların özellikle VR'de geçirgenlikleri yüksek ve soğurmaları neredeyse yoktur [33,57]. Dolayısıyla yapıların soğurma karakteristikleri aktif bölgenin α 'sının değişimi ile belirlenir. Bu yüzden aktif bölgeyi oluşturan P3HT:PCBM'nin α 'sının değişimini (Şekil 4.2) dikkate almak önemlidir.

Tablo 4.1: GFZPM, GFZPV ve GFZPW için geçirgenlik spektrumları kullanılarak hesaplanan J_{ph} değerleri.

OSC yapısı	GFZPV	GFZPW	GFZPM
$J_{ph}(\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2})$	74.46	71.69	73.04



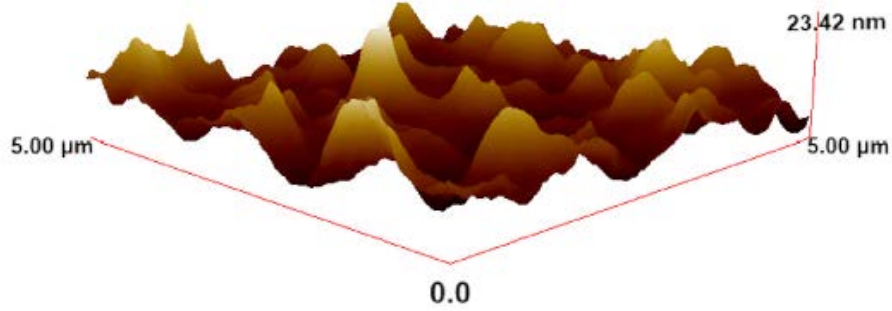
Şekil 4.2: 300-650 nm dalgaboyu aralığında GFZPM, GFZPV ve GFZPW'nin geçirgenlik spektrumları ve P3HT:PCBM polimerinin soğurma katsayısının dalgaboyuna bağlı değişimi [57].

Şekil 4.2'de görüldüğü üzere, 300-450 nm aralığında GFZPM'nin geçirgenliği yüksektir. Ancak bu bölgede P3HT:PCBM'nin soğurması ve AM1.5G spektral irradyans değeri az olduğundan en yüksek J_{ph} bu yapıya ait değildir. AM1.5G spektral irradyansın 450-600 nm aralığında ve P3HT:PCBM'nin soğurması 450-500 nm aralığında yüksek olmasından dolayı bu bölgelerde güneş hücrelerinin geçirgenlik spektrumlarını incelemek önemlidir. Bu bölgelerde GFZPV'nin geçirgenliği diğer yapılara göre daha yüksektir ve dolayısıyla en yüksek J_{ph} değeri bu yapıya aittir.

4.1.2. Atomik Kuvvet Mikroskobu Ölçüm Sonuçları

Tez çalışmasında MoO_3 , V_2O_5 ve WO_3 HTL malzemelerinin P3HT:PCBM tabanlı OSC'lerin performans parametreleri üzerine etkilerini değerlendirmek için aktif bölge/HTL ve HTL/üst kontak arayüzelerindeki pürüzlülüklerin ve kusurların incelenmesi gerekir. Bu amaç doğrultusunda, kullanılan her bir tabakanın yüzey morfolojisini tek tek incelemek yerine, literatürde de daha efektif bir yöntem olarak, katman katman olarak büyütülen yapıların üzerinden AFM ölçümlerini gerçekleştirdik [57,135,136]. Bu sayede P3HT:PCBM/HTL ve HTL/Ag arayüzey özelliklerini altta kalan tüm katmanların da etkisinin yüzey morfolojisini nasıl etkilediği saptanabilir [57].

ZnO üzerine kaplanan P3HT:PCBM aktif bölgenin yüzey morfolojisi GFZP kodlu yapı üzerinden, farklı HTL'lere sahip yapıların morfolojileri ise GFZPM, GFZPV ve GFZPW üzerinden belirlenmiştir. Şekil 4.3'de GFZP yapısına ait 3D konfigürasyondaki AFM görüntüsü verilmektedir.

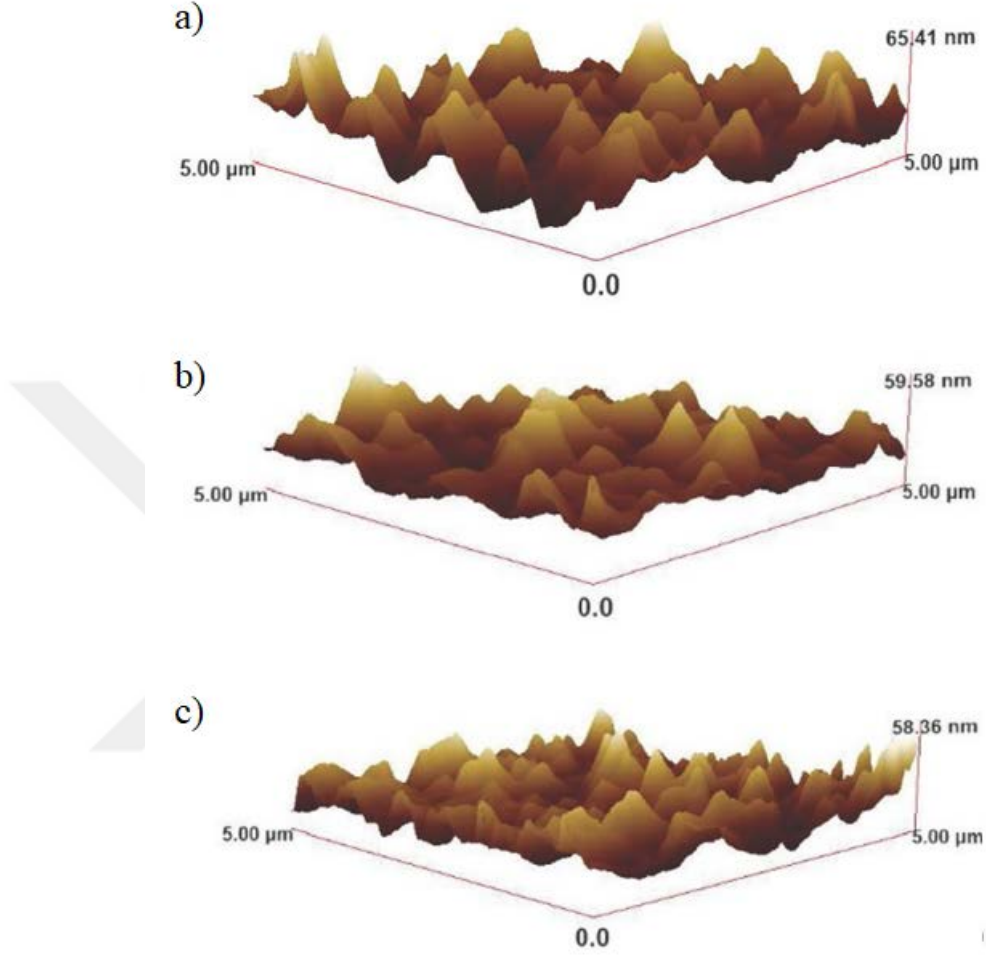


Şekil 4.3: ZnO üzerine kaplanan P3HT:PCBM aktif bölgenin 3D konfigürasyonda AFM görüntüsü [57].

ZnO üzerine kaplanan P3HT:PCBM aktif bölgenin yüzey morfolojisinden karekök ortalama (root mean square, σ_{rms}) değeri 3.13 nm olarak ölçülmüştür. Bu düşük σ_{rms} değeri, spin kaplama yöntemi ile kaplanan P3HT:PCBM polimer karışımının viskozitesinin fazla olmasından ve akışkan doğasından dolayı oldukça pürüzsüz ve düz bir yüzey elde edildiğini göstermektedir.

P3HT:PCBM aktif bölge üzerine kaplanan V_2O_5 , WO_3 ve MoO_3 TMO'lar üzerinden alınan 3D konfigürasyonda AFM görüntüleri sırasıyla Şekil 4.4 a, b ve c'de verilmektedir. P3HT:PCBM'nin yüzey pürüzlülüğüne oranla V_2O_5 , WO_3 ve MoO_3 HTL malzemelerinin püskürtme yöntemi ile kaplanması yüzey pürüzlülüğü ciddi bir şekilde arttırmıştır. GFZV,

GFZW ve GFZM üzerinden alınan yani V_2O_5 , WO_3 ve MoO_3 'e ait yüzey morfolojilerinin σ_{rms} değerleri sırasıyla 9.98 nm, 7.72 nm ve 7.11 nm'dir.

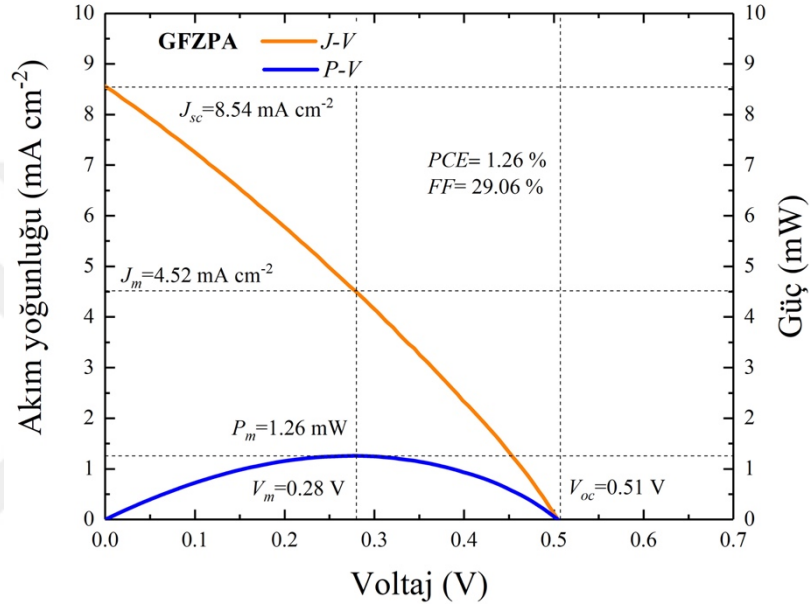


Şekil 4.4: P3HT:PCBM aktif bölge üzerine kaplanan a) V_2O_5 , b) WO_3 ve c) MoO_3 TMO'lar üzerinden alınan 3D konfigürasyonda AFM görüntüleri [57].

P3HT:PCBM aktif tabakası üzerine püskürtme tekniği ile biriktirilen TMO'nun yüzey morfolojisini doğrudan etkilediği ve σ_{rms} değerlerini önemli ölçüde arttırdığı bilinmektedir [137]. Püskürtme tekniğinde, bileşik hedeften (yüksek saflıkta) enerjik atomlar polimer yüzeyine ulaştığında atomların polimerin mikro yapısına nüfuz etmesi ve enerjilerini P3HT:PCBM aktif katmanına aktarması oldukça olasıdır. Bu süreç yüzey kusurlarının oluşma sebebidir [57,135,137]. Ayrıca püskürtme sisteminde vakum koşulları kaplanan yüzey morfolojisini önemli ölçüde değiştirebilirler [135,137]. Tez çalışmasında tüm TMO'lar aynı vakum ve biriktirme şartlarında biriktirildiğinden birbirleri arasında değerlendirilebilirler.

4.1.3. Akım-Voltaj Ölçüm Sonuçları

Tez çalışmasının bir kısmı V_2O_5 , WO_3 ve MoO_3 HTL tabaklarının P3HT:PCBM tabanlı IOSC'lerin performansları üzerine etkisinin incelenmesi üzerinedir. Bu amaç doğrultusunda üretilen yapılar GFZPVA, GFZPWA ve GFZPMA'dır. Bu incelemeye girmeden önce ilk olarak HTL tabakası olmayan bir IOSC yapısı olan GFZPA üretilmiştir. Şekil 4.5'de GFZPA IOSC yapısına ait 1 güneş altında alınan $I - V$ ve $P - V$ karakteristikleri verilmektedir.

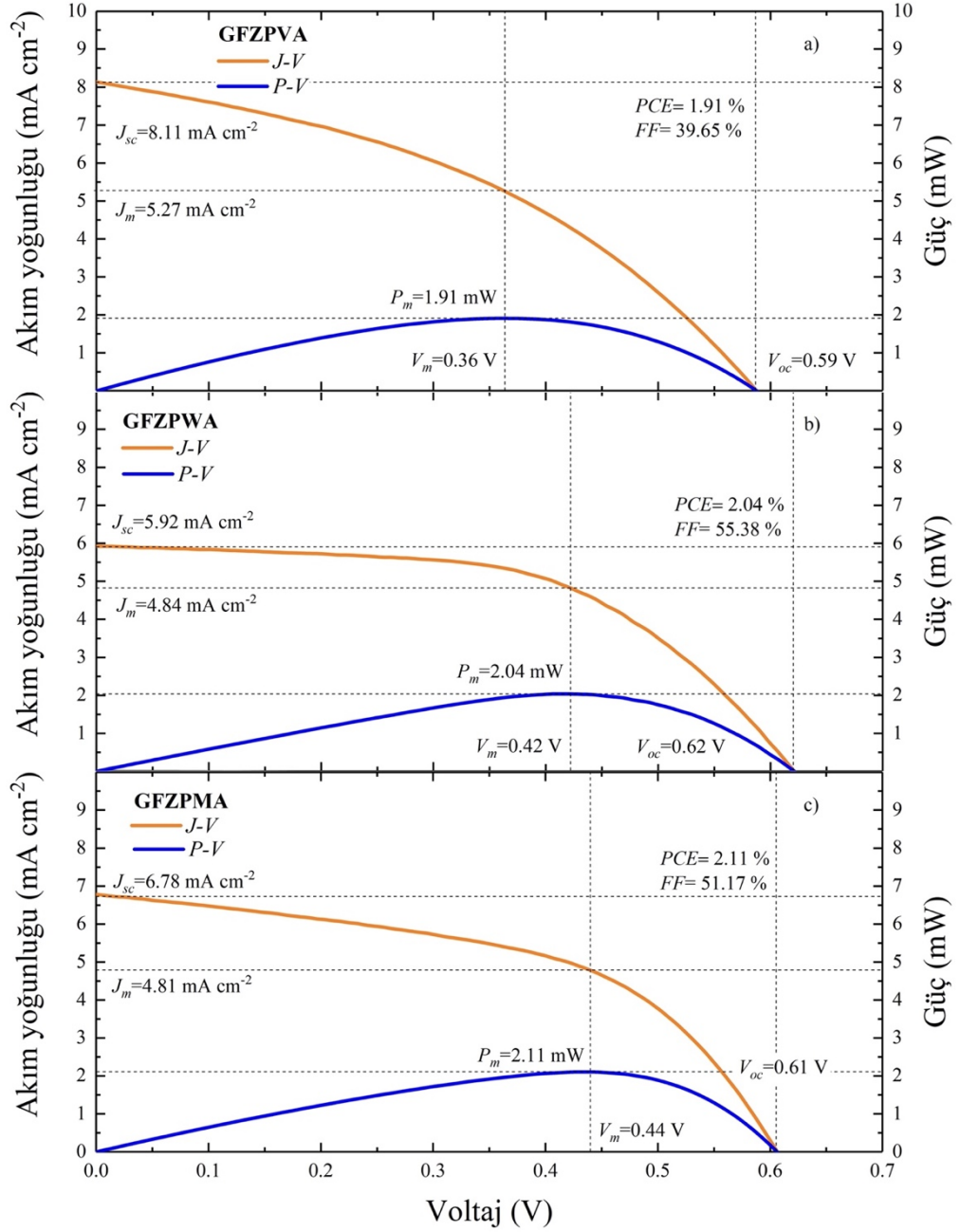


Şekil 4.5: GFZPA IOSC yapısına ait 1 güneş altında $I - V$ ve $P - V$ karakteristikleri [57].

GFZPA yapısına ait J_m , V_m ve P_m değerleri sırasıyla 4.52 mA/cm², 0.28 V ve 1.26 mW'tır. Yapının J_{sc} ve V_{oc} değerleri ise sırasıyla 8.54 mA/cm² ve 0.51 V'tur. Bu hücre çıkış parametreleri ile hesaplanan PCE değeri %1.26 ve FF %29.06'dır. GFZPA IOSC yapısına ait 1 güneş altında $I - V$ karakteristiğine bakıldığında, eğrinin kare şekilden uzak olduğu görülmekte ve bu durum FF değerini oldukça düşürmektedir. Bu durum HTL barındırmayan GFZPA IOSC yapısının kalitesiz bir SC olduğunu göstermektedir.

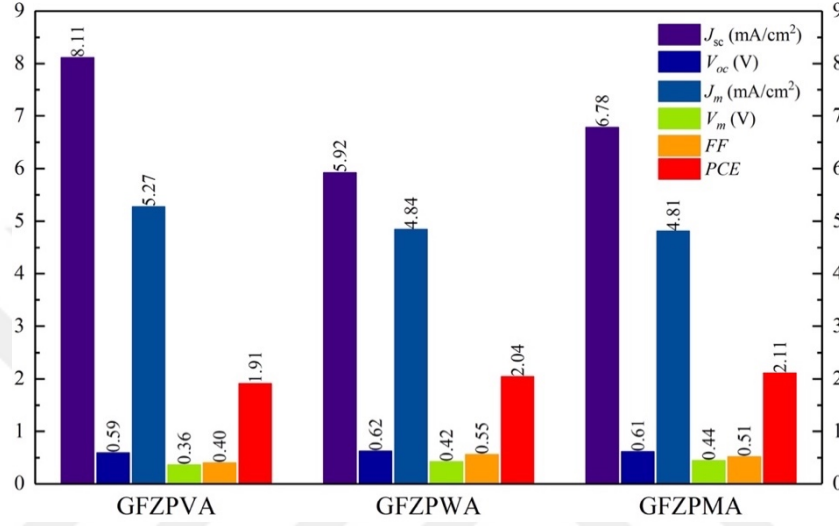
GFZPVA, GFZPWA ve GFZPMA IOSC yapısına ait 1 güneş altında alınan $I - V$ ve $P - V$ karakteristikleri sırasıyla Şekil 4.6 a, b ve c'de verilmektedir. GFZPA IOSC yapısı ile karşılaştırıldığında, HTL içeren tüm yapıların PCE ve FF değerlerinde bir artış meydana gelmiştir. Şekil 3.4'de verilen MoO_3 , WO_3 ve V_2O_5 HTL yapılarına sahip P3HT:PCBM aktif bölgeye sahip IOSC'lerin bant diyagramına bakıldığında, HTL olmaması durumunda yapı içerisinde P3HT'nin LUMO seviyesinden alt kontak FTO'ya ilerlemesi istenilen serbest halde

olan elektronların üst kontak Ag'ye hareket etmesi mümkündür. Bu durum hücre performansını olumsuz şekilde etkilemektedir. Dolayısıyla IOSC yapısında, aktif bölge P3HT:PCBM ile üst kontak arasına elektronun hareketini engelleyecek ve boşluk transportuna katkı sağlayacak bir HTL olması gerekmektedir.



Şekil 4.6: a) GFZPVA, b) GFZPWA ve c) GFZPMA IOSC yapısına ait 1 güneş altında alınan $I - V$ ve $P - V$ karakteristikleri [57].

Şekil 4.7’de GFZPVA, GFZPWA ve GFZPMA IOSC’lere ait hücre çıkış parametreleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Ayrıca Denklem (4.1)’den hesaplanan ve Tablo 4.1’de verilen J_{ph} değerleri deneysel olarak elde edilen J_{sc} değerleri ile karşılaştırıldığında, deneysel olarak elde edilen elektriksel parametreler ile yine deneysel olarak elde edilen ancak optik özelliklerden hesaplanan parametrelerin bir uyum sağladığı olduğu görülmektedir.



Şekil 4.7: GFZPVA, GFZPWA ve GFZPMA IOSC’lere ait hücre çıkış parametreleri [57].

IOSC’lerde HTL olarak kullanılan TMO’lar arasında MoO_3 , nispeten iyi boşluk mobilite değerine ve şeffaflığı sahiptir [57,138]. Bu nedenle en yüksek SC performansını veren yapı GFZPMA’dır. IOSC’lerin hücre çıkış parametreleri, GFZPMA yapısının HTL/TMO ile incelenen diğer cihazlardan daha iyi bir PCE’ye sahip olduğunu göstermektedir. AFM sonuçlarından elde edilen HTL/Ag arayüzey morfolojisini σ_{rms} ’leri ve elektriksel ölçümlerle elde edilen sonuçların uyum içinde olması, MoO_3 HTL’li IOSC yapısının optimal cihaz performans parametrelerine sahip olduğunu göstermektedir. En düşük σ_{rms} değerine sahip olan ve P3HT:PCBM aktif tabaka üzerine kaplanan MoO_3 ’ün Ag üst kontak ile oluşturduğu arayüzeyde pürüzlülüğün az olması arayüzey kusurlarını azaltmış ve hücre performansını diğer yapılara nazaran daha iyi olmasını sağlamıştır.

Literatürde P3HT:PCBM tabanlı farklı biriktirme sistemleri kullanılarak üretilen IOSC’ler üzerine yapılan çalışmalar ile tez kapsamında incelenen GFZPVA, GFZPWA ve GFZPMA IOSC’ler için elde edilen sonuçlar karşılaştırılmalı olarak aşağıda verilmiştir:

- MoO₃'ün HTL olarak kullanıldığı P3HT:PCBM tabanlı IOSC'lerde J_{sc} değerleri 3.30-11.34 mA/cm² aralığında değişmektedir [57,113,139–142]. J_{sc} değeri GFZPMA için 6.78 mA/cm² ve *PCE* %2.11'dir.
- WO₃'ün HTL olarak kullanıldığı P3HT:PCBM tabanlı IOSC'lerde J_{sc} değerleri 5.40-7.20 mA/cm² aralığında, *PCE* değerleri ise %1.90-2.58 aralığında değişmektedir [57,143,144]. J_{sc} değeri GFZPWA için 5.92 mA/cm² ve *PCE* %2.04'dir.
- V₂O₅'in HTL olarak kullanıldığı P3HT:PCBM tabanlı IOSC'lerde J_{sc} değerleri 9.54-10.80 mA/cm² aralığında, *PCE* değerleri ise %2.58-3.56 aralığında değişmektedir [57,135,145,146]. J_{sc} değeri GFZPVA için 8.11 mA/cm² ve *PCE* %1.91'dir.

IOSC'ler için biriktirme tekniği, biriktirme koşulları, tabaka kalınlıkları vb. gibi hücre performansını etkileyen parametrelere bağlı olarak, incelenen yapılar için elde edilen sonuçların literatürde incelenen yapılar üzerine elde edilen sonuçlarla farklı olması beklenen bir durumdur. Tez kapsamında yapılan incelemelerin bir kısmının amacı, aynı biriktirme tekniği ve aynı biriktirme koşulları altında üretilen HTL'lerin hücre performansı üzerindeki etkisini incelemek olduğundan, GFZPMA, GFZPWA ve GFZPVA'nın performans parametrelerinin birbirleri aralarında göreceli olarak karşılaştırılması daha etkili bir değerlendirme sağlamaktadır.

4.2. YARI-GEÇİRGEN ORGANİK GÜNEŞ HÜCRELERİ

HTL olarak V₂O₅, WO₃ ve MoO₃ tabaklarının P3HT:PCBM tabanlı IOSC'ler üzerine etkileri incelendiğinde, hem morfolojik hem de hücre performansı açısından en iyi yapının MoO₃'ün HTL olarak kullanıldığı GFZPMA yapısı olduğu belirlenmiştir. Tez çalışmasında tasarlanan ve üretilen ST-OSC'leri, en iyi hücre performansına sahip olan GFZPMA yapısını baz alarak tasarlanmıştır. Ancak GFZPMA yapısı 100 nm kalınlığında Ag üst kontağa sahiptir. Ag'nin özellikle görünür bölgede yansımanın çok yüksek ve geçirgenliğinin çok düşük olması OSC yapısını opak yapmaktadır. ST-OSC tasarımı, yapıdaki opak üst Ag kontağının uygun tasarım parametrelerine sahip MoO₃/Ag/MoO₃ DMD şeffaf üst elektrot ile modifiye edilmesiyle yapılmıştır.

4.2.1. Teorik Optik Modelleme Sonuçları

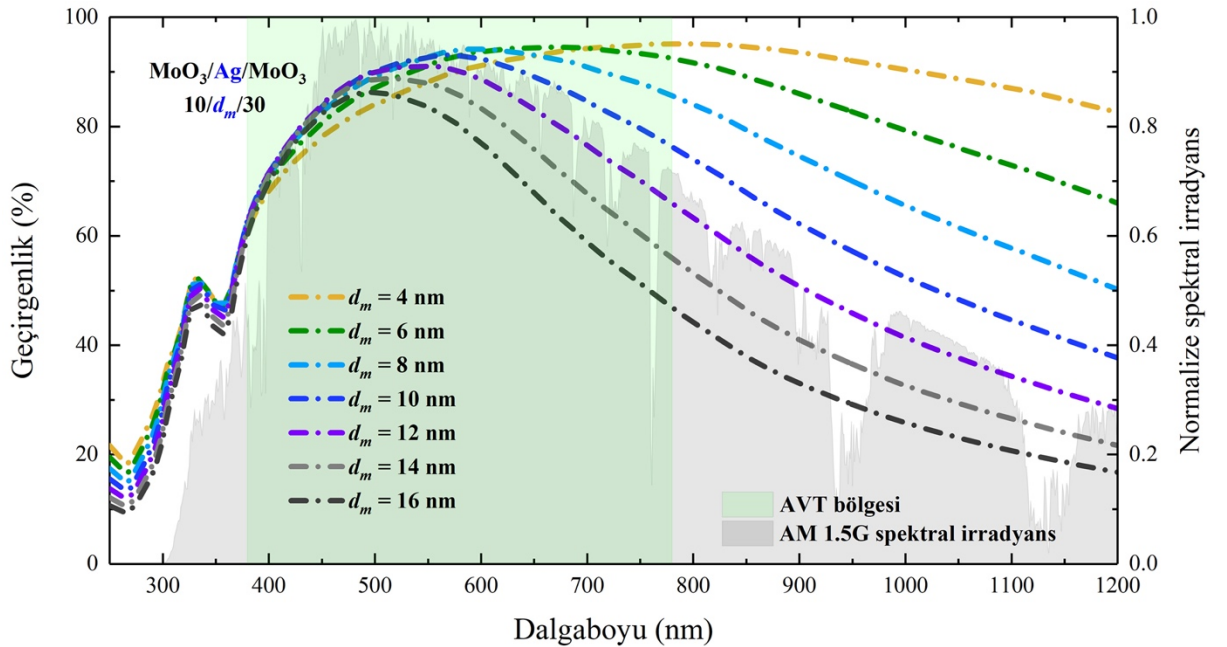
GFZPMA'nın opak üst kontak olan Ag'nin ve HTL olarak yer alan MoO₃'ün, MoO₃/Ag/MoO₃ DMD şeffaf üst kontak ile modifiye edilmesiyle tasarlanan FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃ ST-OSC yapısında şeffaf üst kontağı oluşturan malzemelerin kalınlıkları d_{id} , d_m ve d_{od} OSC'nin optik karakteristiğini oldukça etkilemektedir. Özellikle DMD yapısındaki metal katman olan Ag'nin optik karakteristiğinden dolayı, d_m değeri DMD şeffaf üst kontağın ve ST-OSC'in optik özelliklerini belirleyen oldukça önemli bir parametredir. Ayrıca iç MoO₃, aktif tabaka olan P3HT:PCBM'ye doğrudan entegre edildiğinden dolayı bu tabaka yapıda aynı zamanda HTL olarak görev yapmaktadır ve d_{id} değeri ST-OSC'nin V_{oc} , J_{sc} , V_m , J_m , P_m , PCE ve FF gibi hücre çıkış parametrelerini etkileyebilmektedir. d_{id} 'nin yani HTL'nin kalınlığının yüksek olması ST-OSC'nin elektriksel karakteristiği üzerinde oldukça kötü sonuçlar doğurabilir. Çünkü aktif bölgede oluşan foton soğurulması sonucu serbest taşıyıcılar iç elektrik alan ile kontaklara süpürülürken, oluştukları bölge ile kontaklar arası mesafe difüzyon uzunluklarından büyük ise yeniden birleşim ile serbest taşıyıcılar yok olabilirler. Bu yüzden akıma katkıda bulunamazlar ve hücre çıkış parametreleri olumsuz etkilenebilir. Elektriksel kontak doğrudan metal tabakadan alındığından d_m ve d_{od} değerlerinin ST-OSC hücre çıkış parametrelerine etkileri sadece ST-OSC'nin optik karakteristiksini modifiye etmektedir.

Tez kapsamında, IOSC yapıları üzerinde belirtilen sebeplerden dolayı, ilk olarak MoO₃/Ag/MoO₃ DMD şeffaf kontağın ve FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃ ST-OSC yapısının tasarımında d_m değerinin optik özelliklere etkisi incelendi. IOSC'ye şeffaf üst kontak olarak entegre edilen DMD'lerin tasarımı, geçirgenlik ve yansıma spektrumları gibi optik spektrumların hesaplanması ve özellikle kalınlık parametrelerinin değerlendirilmesi ile yapıldı. Hesaplamalar optoelektronik aygıtların simülasyonlarında kullanılan oldukça efektif bir yöntem olan TMM ile gerçekleştirildi.

Hesaplamalarda ilk olarak, DMD yapısında iç dielektrik ve aynı zamana IOSC'de HTL olarak görev yapan MoO₃ için d_{id} =10 nm, dış dielektrik olan MoO₃ için d_{id} =30 nm olarak ayarlandı. Çünkü literatürde HTL olarak kullanılan MoO₃'ün kalınlığı 1-10 nm aralığında değişmektedir ve MoO₃/Ag/MoO₃ yapısı için en yüksek AVT değerinin d_{id} =30 nm için gözlemlendiği rapor edilmiştir [33,147–151]. Bu yüzden hesaplamaların başlangıcında bu değerler referans olarak

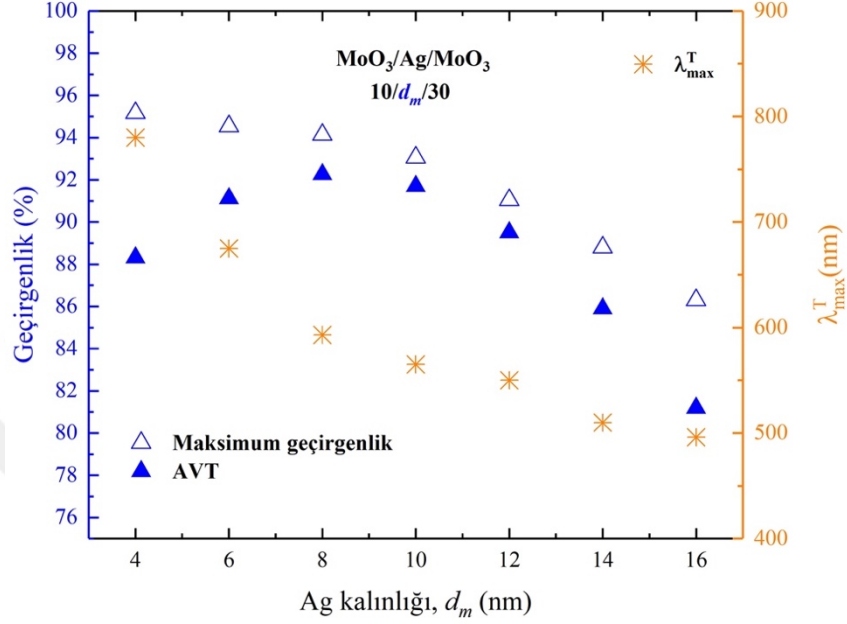
alınmıştır. Ancak hesaplamalarla optimal d_m belirlendikten sonra d_{od} 'nin de AVT üzerine etkisi incelenmiştir.

Hesaplamalarda d_m değerleri 2 nm aralıklarla 4 nm ile 16 nm aralığında değiştirildi ve Ag katmanının MoO₃/Ag/ MoO₃ DMD yapısının geçirgenlik spektrumuna etkisi belirlendi (Şekil 4.8). Şekil 4.8'de görüldüğü üzere, MoO₃/Ag/MoO₃ (10/ d_m /30 nm) DMD yapısı için, tüm 4-16 nm aralığındaki d_m değerleri için geçirgenlik yüksek ve AM1.5G spektral irradyans ile aynı trende sahiptir. Bu durum, MoO₃/Ag/MoO₃ DMD yapısının elverişli bir şeffaf üst elektrot olduğunu göstermektedir. Ag'nin AM1.5G'nin sorumlu olduğu tüm dalgalarda yansımalarının yüksek olmasından dolayı, d_m değerinin artması ile özellikle yapının maksimum geçirgenliğinde ve tüm geçirgenlik karakteristiğinde bir azalma meydana gelmektedir. Geçirgenlik değerlerindeki bu azalma özellikle VR'nin uzun dalga boyu ve NIR'in tamamında ciddi bir şekilde kendini göstermektedir. Bu durum, MoO₃/Ag/MoO₃ DMD yapısının şeffaf üst elektrot olarak ST-OSC'lere entegre edildiğinde, yapı içinde VR'nun uzun dalga boyu ve NIR'in tamamındaki elektromagnetik dalgaların yeniden aktif bölgeye yansımaları sonucu soğurulmayan elektromagnetik dalgaların yeniden soğurulma olasılıklarını arttıracak ve J_{ph} ile PCE'de bir iyileşme meydana getirecektir.



Şekil 4.8: MoO₃/Ag/MoO₃ (10 nm/ d_m /30 nm) DMD şeffaf üst kontak için hesaplanan geçirgenlik spektrumu. Yeşil taralı alan AVT'nin hesaplandığı aralığı göstermektedir [33].

Dikkat çekici bir diğer sonuç, d_m 'nin 4 nm'den 16 nm'ye artması ile MoO₃/Ag/MoO₃ DMD geçirgenlik spektrumunun maksimum geçirgenliğe sahip olduğu dalgaboyu değeri (λ_{max}^T) sırasıyla 780 nm'den 496 nm'ye azalmıştır (Şekil 4.9).



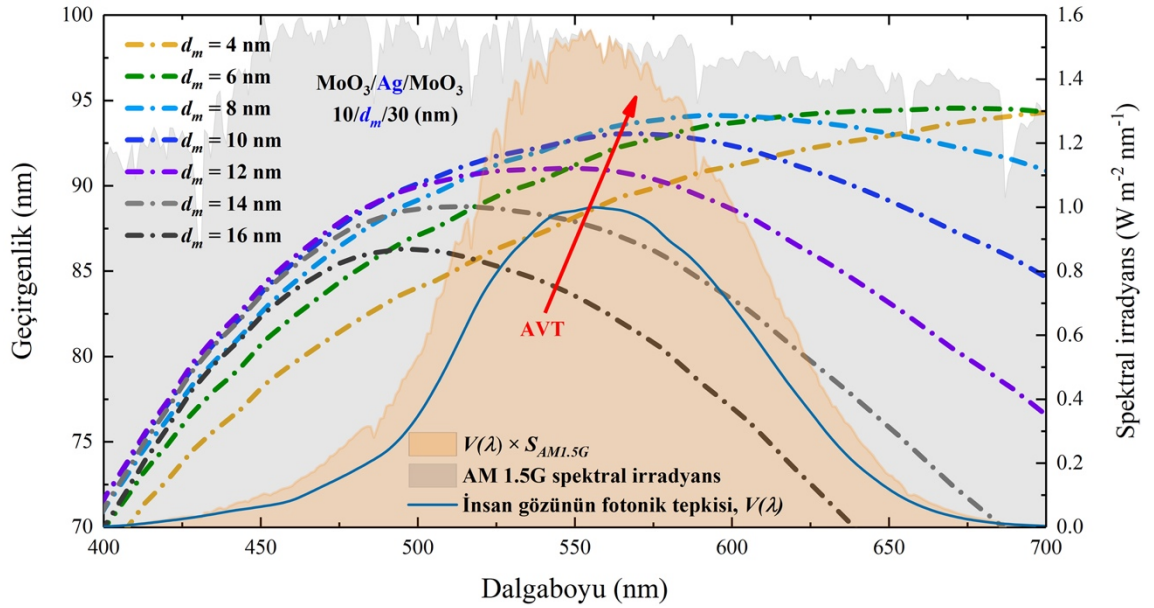
Şekil 4.9: MoO₃/Ag/MoO₃ (10nm/ d_m /30nm) DMD şeffaf üst kontağın d_m değişimine göre hesaplanan maksimum geçirgenliğin olduğu dalgaboyu ve AVT değerleri [33].

MoO₃/Ag/MoO₃ DMD şeffaf üst kontağın optik karakteristiği d_m 'ye bu denli bağlı olmasının yanı sıra, ST-OSC'lerde ve pencere uygulamalarında kullanımın hangi yapı parametreleri ile elverişli olduğunu belirleyebilmek için d_m 'nin AVT değerleri üzerine etkisinin de incelenmesi yapılmalıdır. ST-OSC'lerin saydamlık özellikleri AVT değerleri ile değerlendirilir ve insan gözünün fotonik tepkisi de hesaba katılarak VR'de geçirgenlik karakteristiği ile belirlenir.

DMD üst kontağa sahip ST-OSC'nin geçirgenlik karakteristiği, DMD yapısının optik karakteristiği ile büyük ölçüde sınırlanır. Bu yüzden ST-OSC'nin AVT değerleri, DMD üst kontak yapısının AVT değerleri ile ilişkili olacaktır. MoO₃/Ag/MoO₃ DMD şeffaf üst kontağın hesaplanan geçirgenlik spektrumlarına göre elde edilen AVT değerleri Şekil 4.9'da verilmektedir. En ince Ag katmanı için, yani $d_m=4$ nm olduğu durumda MoO₃/Ag/MoO₃ DMD şeffaf üst konak %95.17 maksimum geçirgenliğe sahiptir ve bu durum Ag'nin bilinen yansıma ve geçirgenlik karakteristiğinden dolayı beklenen bir durumdur. Ancak AVT değerleri d_m 'nin 4 nm'den 8 nm'ye değişmesiyle sırasıyla %88.32'den %92.26 maksimum AVT değerine artmaktadır. $d_m>8$ nm için AVT azalmaktadır ve $d_m=16$ nm'de %81.19'a kadar hızlı bir

şekilde düşmektedir. Maksimum AVT değeri %92.26'dır ve $d_m=8$ nm olduğu DMD yapısında elde edilmektedir. Ancak $\text{MoO}_3/\text{Ag}/\text{MoO}_3$ DMD yapısında maksimum geçirgenlik (T_{max}) $d_m=4$ nm için gözlenmiştir ve bu değer için AVT %88.32'dir. Bu durumda, pencere uygulamaları için AVT baz alındığında, $\text{MoO}_3/\text{Ag}/\text{MoO}_3$ DMD şeffaf üst kontağın Ag'nın kalınlık değeri $d_m=8$ nm olduğu durumda ST-OSC'lerde kullanılacak optimal bir yapı olduğu görülmektedir.

En yüksek AVT'nin elde edildiği yapı için T_{max} değerinin elde edilmemesi, AVT ölçütünün Denklem (3.16)'da görüldüğü üzere $V(\lambda)$ ve $S_{AM1.5G}(\lambda)$ 'ye doğrudan bağlı olmasından kaynaklanmaktadır. Optik olarak geçirgenliği yüksek olan bir optimal yapının AVT'sinin yüksek olması her zaman beklenmemelidir ve insan gözünün farklı dalgalıboyları için seçiciliğinin ve responsunun da pencere uygulamaları için algılamada önemli olduğu dikkate alınmalıdır. Şekil 4.10 incelendiğinde $\text{MoO}_3/\text{Ag}/\text{MoO}_3$ DMD yapısında geçirgenlik ve AVT ilişkisindeki uyumsuzluk anlaşılabilmektedir.



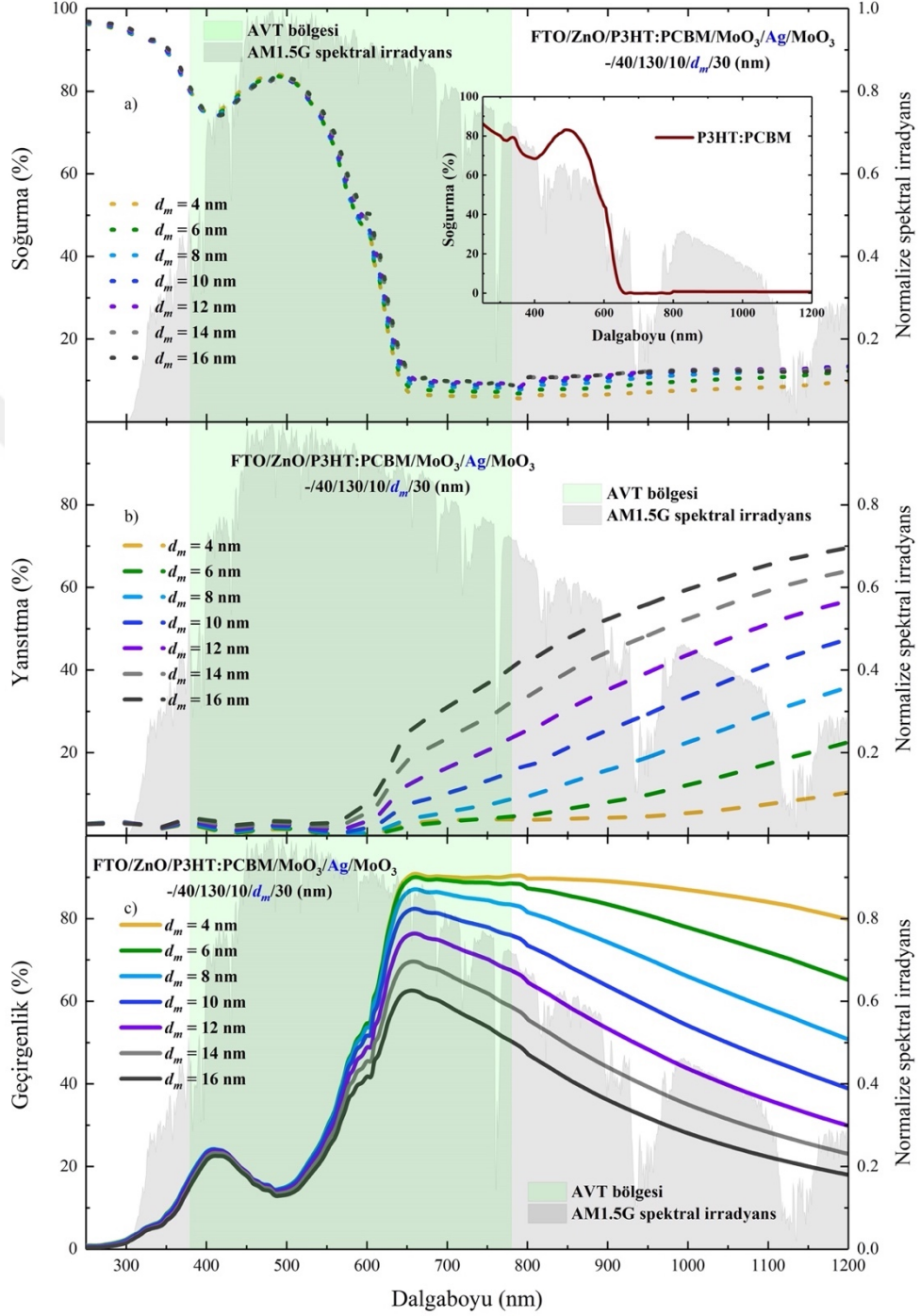
Şekil 4.10: $\text{MoO}_3/\text{Ag}/\text{MoO}_3$ ($10\text{nm}/d_m/30\text{nm}$) DMD şeffaf üst elektrot yapısının geçirgenlik spektrumunun ve AVT değerlerinin $V(\lambda)$, $S_{AM1.5G}(\lambda)$ ve $V(\lambda) \times S_{AM1.5G}(\lambda)$ değişimleri altında analizi. Turuncu taralı olan alan $V(\lambda) \times S_{AM1.5G}(\lambda)$ ifadesinin değişimiyle ilgilidir ve alan değeri Denklem (3.16)'nın payda kısmındaki integralin değeridir [33].

İnsan gözünün duyarlı olduğu dalgalıboyu aralığı 400-700 nm aralığındadır ve Denklem (3.16)'nın hem pay hem de paydası $V(\lambda) \times S_{AM1.5G}(\lambda)$ çarpımını içermektedir. Bu yüzden, integral sınırları elektromagnetik spektrumun VR üzerinden olsa da integrantlar

400-700 nm aralığında değere haizdirler (Şekil 4.10). Dolayısıyla farklı d_m 'ler için hesaplanan geçirgenlik spektrumlarının bu aralıkta, $V(\lambda) \times S_{AM1.5G}(\lambda)$ çarpımının kapsadığı kısmı bize AVT'ler hakkında bilgi verecektir. Bu yüzden geçirgenlikler AM1.5G boyunca ne kadar değişiklik gösterirse gösterecek yapıların $V(\lambda) \times S_{AM1.5G}(\lambda)$ çarpımının kesiştiği bölgelerdeki değerleri AVT'lerdeki değişimleri belirler. Şekil 4.10'da görüldüğü üzere, $V(\lambda) \times S_{AM1.5G}(\lambda)$ ifadesini temsil eden turuncu taralı alan içerisinde en yüksek geçirgenlik değeri $d_m=8$ nm olan yapıya aittir ve bu yapının AVT'si en yüksek değerdedir. Bu inceleme baz alındığında, MoO₃/Ag/MoO₃ DMD yapısında maksimum geçirgenliğin $d_m=4$ nm için gözlenirken en yüksek AVT değerinin nasıl $d_m=8$ nm için elde edildiği anlaşılmaktadır. Şekil 4.10'daki kırmızı ok yönelimi AVT'nin artışı işaret etmektedir. Tüm bu açıklamalar gereği, bir yapının geçirgenlik karakteristiği doğrudan AVT'si hakkında bilgi vermez; Şekil 4.10'da olduğu gibi bir analiz daha doğru AVT değerlendirmesini sunar.

$d_m=8$ nm ile üretilen MoO₃/Ag/MoO₃ DMD şeffaf üst kontağın en yüksek AVT değerinde olması, bu optimal değerde kontağın ST optoelektronik aygıtlarda kullanımını elverişli kılmaktadır. Ancak, bu DMD yapısıyla üretilen optoelektronik aygıtın optik karakteristiği, yalnızca MoO₃/Ag/MoO₃ için yapılan detaylı inceleme baz alınarak tasarlanamaz. Çünkü, MoO₃/Ag/MoO₃ için yapılan TMM hesaplamalarında elektromagnetik dalganın yüzeye farklı geliş açılarıyla inceleme yapılabilse de yüzeye dik bir şekilde gelen elektromagnetik dalgalar ile modelleme yapılmaktadır. Ancak MoO₃/Ag/MoO₃ DMD şeffaf kontağın ST optoelektronik aygıtlarda yer alması, elektromagnetik dalganın OSC içerisinde geçerek DMD yapısına gelene kadar farklı bölgelerde yansıması, kırılması veya soğurulması sonucu farklı yollar izleyebilmesiyle yeniden değerlendirilmelidir. Dolayısıyla DMD'ye ulaşan elektromagnetik dalganın bileşenlerinin hangi açıda ve hangi durumda DMD'nin iç dielektrik yüzeyine ulaştıkları da hesaba katılmalıdır. Bunun için optoelektronik aygıtın tüm yapısı için TMM hesaplamaları yapılmalı ve optimal yapı parametreleri belirlenmelidir. Bu amaç doğrultusunda, çalışma kapsamında, MoO₃/Ag/MoO₃ (10/ d_m / d_{od} nm) DMD üst şeffaf kontağın teorik olarak optik karakteristiğinin incelenmesinin ardından, Opak FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag (-/40/130/10/100 nm) IOSC yapısında oldukça kalın olan Ag üst kontağın yerine entegre edilmesiyle elde edilen ST-OSC yapısının d_m ve d_{od} değerlerine göre optik karakteristiğini belirlendi. d_{id} , d_m ve d_{od} değerlerinin seçimi için DMD yapısı tek başına incelenirken izlenilen yöntem ile aynı şekilde, ilk olarak TMM ile $d_{id}=10$ nm ve $d_{od}=30$ nm'ye set edilerek d_m değişimine göre FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃ (-/40/130/10/ d_m /30 nm) ST-

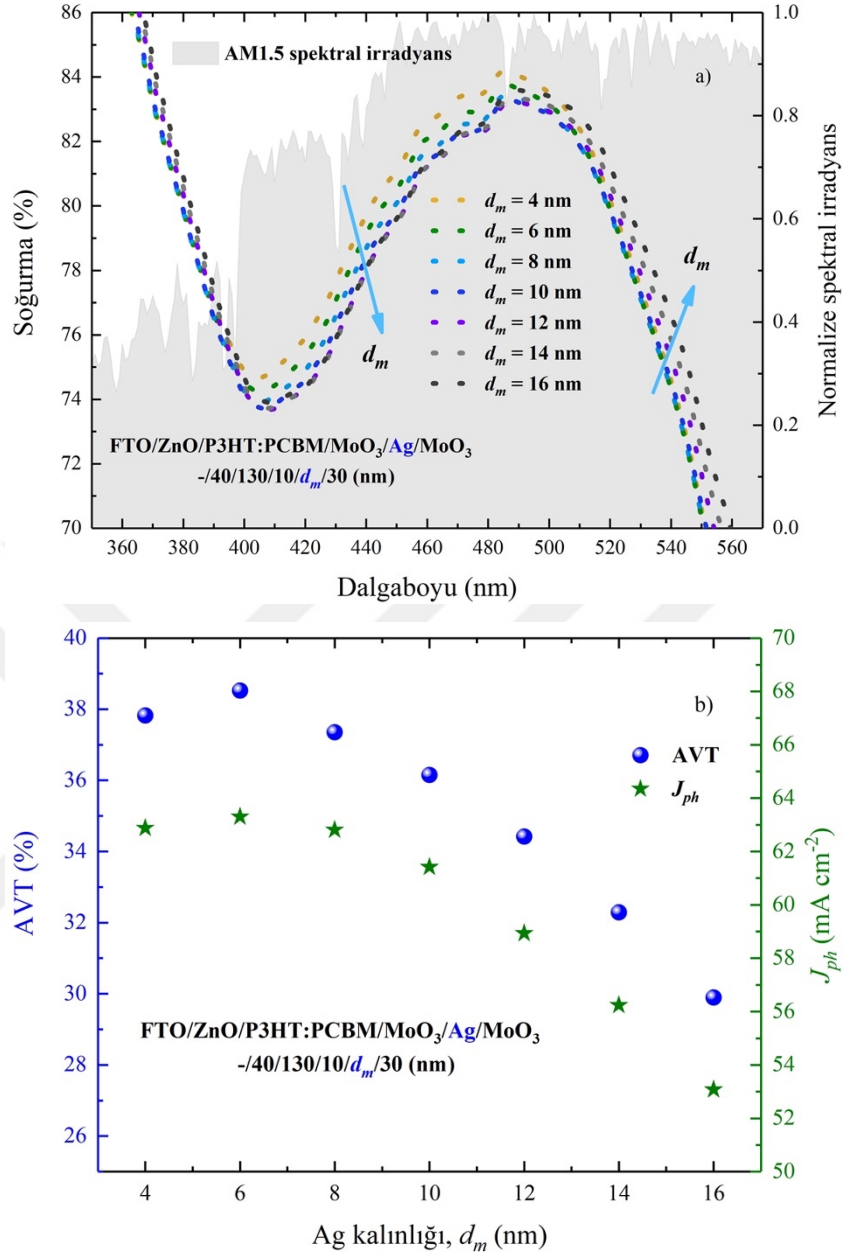
OSC'nin optik karakteristikleri hesaplandı. Hesaplanan soğurma, yansıtma ve geçirgenlik spektrumları sırası ile Şekil 4.11 a, b ve c'de verilmektedir.



Şekil 4.11: FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃ (--/40/130/10/ d_m /30 nm) ST-OSC yapısının a) soğurma, b) yansıtma ve c) geçirgenlik spektrumları. a)'daki inset ST-OSC yapısının aktif bölgesini oluşturan P3HT:PCBM organik yarıiletken karışımın soğurma spektrumunu göstermektedir [33].

FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃ ST-OSC yapısının soğurma spektrumunun karakteristiği tüm dalgalıyları için aktif bölgeyi oluşturan P3HT:PCBM polimer karışımının soğurma karakteristiğiyle aynıdır (Şekil 4.11 a). Çünkü elektromagnetik dalğanın aktif bölgede soğurulması ve iç elektrik alan ile süpürülebilmesi için, ST-OSC'in tasarımında soğurulmanın sadece aktif bölgede olması ve ETL, HTL ve DMD üst kontağında herhangi bir soğurulma olmaması hedeflenmektedir [33].

Üst şeffaf kontağın metal kısmını oluşturan Ag'nin d_m değeri 4 nm den 16 nm'ye artmasıyla, FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃ ST-OSC yapısının soğurma ve yansıtmasında 560 nm'den sonra VR'in uzun dalgalıboyu rejiminde ve NIR bölgede bir artış meydana gelmektedir. Bu artış oranı soğurma için özellikle d_m 'nin 4-10 nm aralığında etkiliyken, $d_m=10$ nm'den sonra etkinliğini kaybetmektedir. Bu durum, d_m 'nin artmasıyla Ag'nin yapı içinde daha yansıtıcı bir tabaka olarak etkinliğini göstermesi ile ST-OSC'nin yansıma spektrumunu modifiye etmektedir (Şekil 4.11 b). d_m 'nin artması P3HT:PCBM aktif bölgede soğurulmayan fotonların yeniden yapı içerisine gönderilmesini sağlar ve J_{ph} değerini arttırabilir. Ancak J_{ph} için daha efektif bir yorum yapmak için AM1.5G spektral irradiansın da göz önünde bulundurulması gerekir. 560 nm'den sonra VR'in uzun dalgalıboyu rejiminde ve NIR bölgede AM1.5G spektral irradiansı azalma trendindedir. Zira, FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃ ST-OSC soğurmasının 560 nm'den küçük ve AM1.5G spektral irradyansın yüksek olduğu dalgalıboyı için değişimini incelersek, d_m 'nin artmasıyla soğurmada bir iyileşme meydana geldiği görülmektedir (Şekil 4.7 a). Bu yüzden d_m 'nin J_{ph} üzerinde etkisini daha efektif olarak inceleyebilmek amacıyla, J_{ph} değerleri Denklem (4.1) kullanılarak hesaplanmalıdır. FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃ (–/40/130/10/ d_m /30 nm) ST-OSC yapısının 350-570 nm aralığında soğurma spektrumu ve d_m 'ye göre AVT ve J_{ph} değişimi sırasıyla Şekil 4.12 a ve b'de verilmektedir.

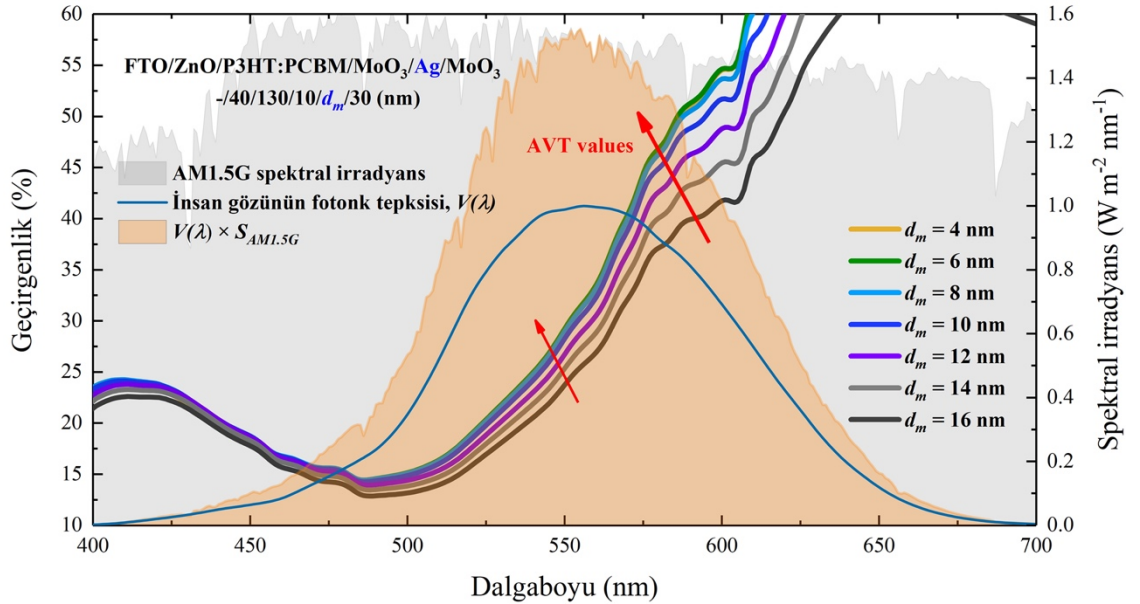


Şekil 4.12: FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃ (-/40/130/10/ d_m /30 nm) ST-OSC yapısının 350-570 nm aralığında a) soğurma spektrumu ve b) d_m 'ye göre AVT ve J_{ph} değişimi [33].

FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃ ST-OSC için en yüksek J_{ph} değeri 63.3 mA/cm² olarak $d_m=6$ nm için hesaplanmıştır. d_m 'nin artması, Şekil 4.12 a'da verilen ve AM1.5G spektral irradyansın yüksek olduğu bölgede meydana gelen absorpsiyondaki azalma ile uyumlu olarak J_{ph} 'da bir azalma meydana getirmektedir. J_{ph} 'nin yanı sıra, FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃ ST-OSC için asıl önemli olan AVT değerleri hesaplanmıştır ve Şekil 4.12 b'de verilmektedir. d_m 'nin değişimiyle J_{ph} 'de olduğu gibi en yüksek AVT değeri $d_m=6$ nm için elde edilmiştir ve değeri %38.52'dir. d_m 'nin 16 nm'ye

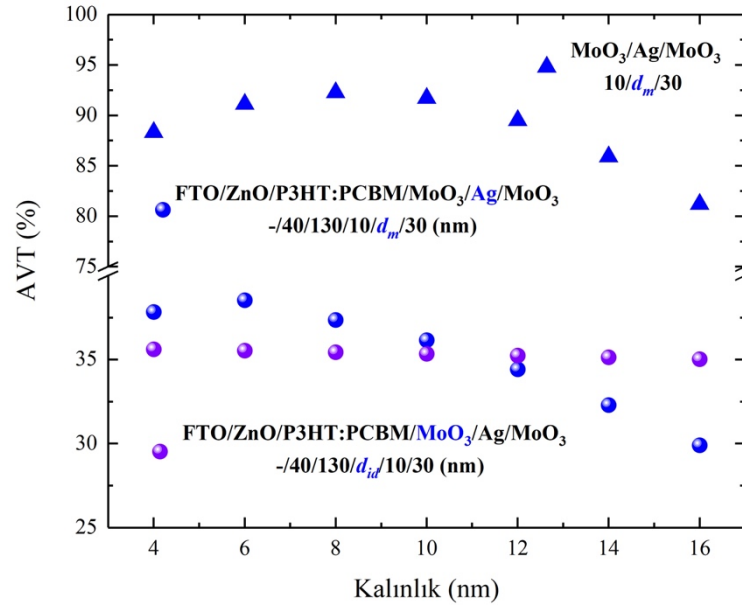
ulaşması ile, %29.89'a kadar düşen AVT değeri bile pencere uygulamaları için kabul edilen alt sınır olan %25'den büyüktür. Bu durum, P3HT:PCBM tabanlı ST-OSC'ler için, uygun optimal değerlerde tasarlanmış $\text{MoO}_3/\text{Ag}/\text{MoO}_3$ DMD şeffaf üst kontağın elverişli bir kontak olduğunu göstermektedir.

d_m 'nin artması, 500 nm'den küçük dalgaboyu bölgesi için geçirgenlik spektrumlarında ciddi bir değişim meydana getirmemiştir. Çünkü bu bölgede, FTO/ZnO/P3HT:PCBM/ $\text{MoO}_3/\text{Ag}/\text{MoO}_3$ ST-OSC'in aktif bölgesini oluşturan P3HT:PCBM polimer karışımının soğurması oldukça baskındır ve tüm yapının optik karakteristiği bu tabaka tarafından belirlenmektedir. Ancak, özellikle 500 nm'den büyük dalga boyları için, d_m 'deki artış geçirgenlik spektrumunda Ag'nin yansıtıcı karakteristiğinden dolayı, Şekil 4.11 c'de görüldüğü gibi özellikle VR'nin uzun dalgaboyu bölgesinde ve NIR'da ciddi bir azalma meydana getirmektedir. Bu değişimler AVT değerlerine doğrudan yansımamaktadır: Şekil 4.12 b'de görüldüğü üzere, $d_m=4\text{nm}$ için elde edilen AVT değeri %37.82 iken, $d_m=6\text{ nm}$ için AVT değeri %38.52'dir. Bu durum Şekil 4.13 ve Denklem (3.16)'daki integral argümanları incelendiğinde anlaşılabilir.



Şekil 4.13: FTO/ZnO/P3HT:PCBM/ $\text{MoO}_3/\text{Ag}/\text{MoO}_3$ (--/40/130/10/ d_m /30 nm) ST-OSC yapısının d_m değişimine göre geçirgenlik spektrumları ve AVT değerlerinin $V(\lambda)$, $S_{AM1.5G}(\lambda)$ ve $V(\lambda) \times S_{AM1.5G}(\lambda)$ değişimleri altında analizi. Turuncu taralı olan alan $V(\lambda) \times S_{AM1.5G}(\lambda)$ ifadesinin değişimiyle ilgilidir ve alan değeri Denklem (3.16)'nın payda kısmındaki integralin değeridir [33].

Şekil 4.13'den görülmektedir ki, geçirgenlikler AM1.5G boyunca ne kadar değişiklik gösterirse gösterebilir yapıların $V(\lambda) \times S_{AM1.5G}(\lambda)$ çarpımının kesiştiği bölgelerdeki değerleri AVT'lerdeki değişimleri belirlemektedir. $V(\lambda) \times S_{AM1.5G}(\lambda)$ ifadesini temsil eden turuncu taralı alan içerisinde en yüksek geçirgenlik değeri $d_m=6$ nm olan yapıya aittir ve bu yapının AVT'si en yüksek değerdedir. Şekil 4.13'deki kırmızı ok yönelimi AVT'nin artışı işaret etmektedir. Bu durumda, FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃ (--/40/130/10/ d_m /30 nm) ST-OSC yapısı $d_m=6$ nm için tasarlandığında hem J_{ph} hem AVT açısından en uygun yapı olduğu görülmektedir. Ancak, MoO₃/Ag/MoO₃ (10/ d_m /30 nm) DMD üst şeffaf kontağın en yüksek AVT değeri $d_m=8$ nm için elde edilmişti. FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃ ve MoO₃/Ag/MoO₃ için elde edilen AVT değerleri karşılaştırmalı olarak Şekil 4.14'de verilmektedir. Sadece DMD yapısının incelenmesi ve DMD'nin OSC'ye entegre edilmesi ile AVT'de oluşan bu tutarsızlık, elektromagnetik dalganın DMD yapısına gelene kadar farklı bölgelerde yansıması, kırılması veya soğurulması sonucu farklı yollar izleyebilmesiyle açıklanabilir. Bu durumda, OSC'de yansıyan, soğurulan ve nihayetinde DMD'ye ulaşan elektromagnetik dalganın bileşenlerinin hangi açıda ve hangi durumda yüzeye ulaştıklarını da hesaba katmak efektif bir yoldur.

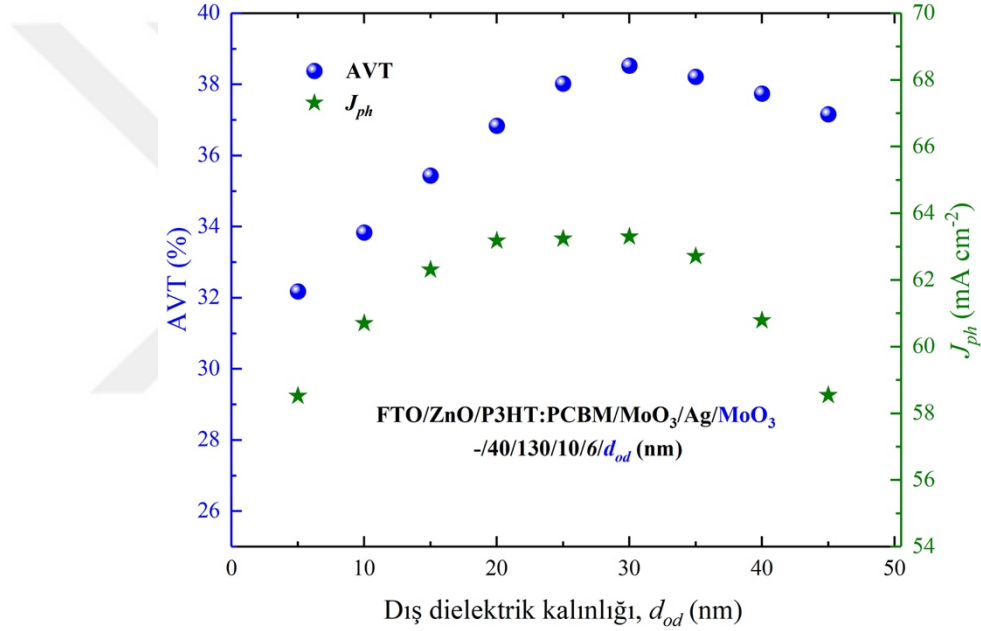


Şekil 4.14: FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃ (--/40/130/10/ d_m /30 nm) ST-OSC yapısının ve MoO₃/Ag/MoO₃ (10/ d_m /30 nm) DMD şeffaf üst kontağın d_m ve d_{id} değişimine göre AVT değerlerinin karşılaştırılması olarak gösterimi [33].

FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃ (--/40/130/10/ d_m /30 nm) yapısı için maksimum AVT değerinin elde edildiği $d_m=6$ nm olduğu durumdan, $d_m=16$ nm olduğu duruma sadece

10 nm'lik bir artışla bile, AVT değerlerinde %22.3'lük bir azalma meydana gelmektedir. Bu durum Ag'nin yapı içerisinde, ST-OSC'nin optik karakteristiğini önemli derecede etkilediğini göstermektedir. Ayrıca Şekil 4.14'den görüldüğü üzere d_{id} 'nin 4-16 nm aralığında değişmesi ST-OSC yapısının AVT'sini neredeyse hiç değiştirmemiştir.

Daha detaylı bir inceleme için, çalışma kapsamında Ag için optimal değer $d_m=6$ nm olduğu durumda, dış dielektrik olan MoO_3 'ün d_{od} değerinin ST-OSC'nin AVT ve J_{ph} değerleri üzerine analiz edildi. $\text{FTO}/\text{ZnO}/\text{P3HT}:\text{PCBM}/\text{MoO}_3/\text{Ag}/\text{MoO}_3$ ($--/40/130/10/6/d_{od}$ nm) ST-OSC yapısının d_{od} ile AVT ve J_{ph} 'daki değişimleri Şekil 4.15'de verilmektedir.



Şekil 4.15: $\text{FTO}/\text{ZnO}/\text{P3HT}:\text{PCBM}/\text{MoO}_3/\text{Ag}/\text{MoO}_3$ ($--/40/130/10/6/d_{od}$ nm) ST-OSC yapısının d_{od} değerlerine göre AVT ve J_{ph} değişimleri [33].

$\text{FTO}/\text{ZnO}/\text{P3HT}:\text{PCBM}/\text{MoO}_3/\text{Ag}/\text{MoO}_3$ ($--/40/130/10/6/d_{od}$ nm) ST-OSC yapısı için d_{od} 'nin 5 nm'den 30 nm'ye artması AVT değerlerinde bir saturasyon meydana getirmiş gibi görünse de, 30 nm'den 45 nm'ye gidildikçe AVT değerlerinde az da olsa bir azalma meydana gelmektedir. En yüksek AVT değeri $d_{od}=30$ nm için elde edilmiştir ve %38.52'dir. d_{od} 'ye bağlı olarak, AVT'de meydana gelen bu değişim karakteristiği, $d_{od} \leq 30$ nm için tasarlanan ST-OSC yapısı için oldukça yüksek bir AVT değerine ulaşılabilirliğini gösterir. Ancak, J_{ph} 'ın d_{od} ile değişimine bakıldığında, 20 nm kalınlığa kadar artan bir J_{ph} elde edilse de, 20 nm'den sonra saturasyon eğilimi gösterir. Maksimum $J_{ph}=63.30 \text{ mA/cm}^2$ 'dir ve $d_{od}=30$ nm için

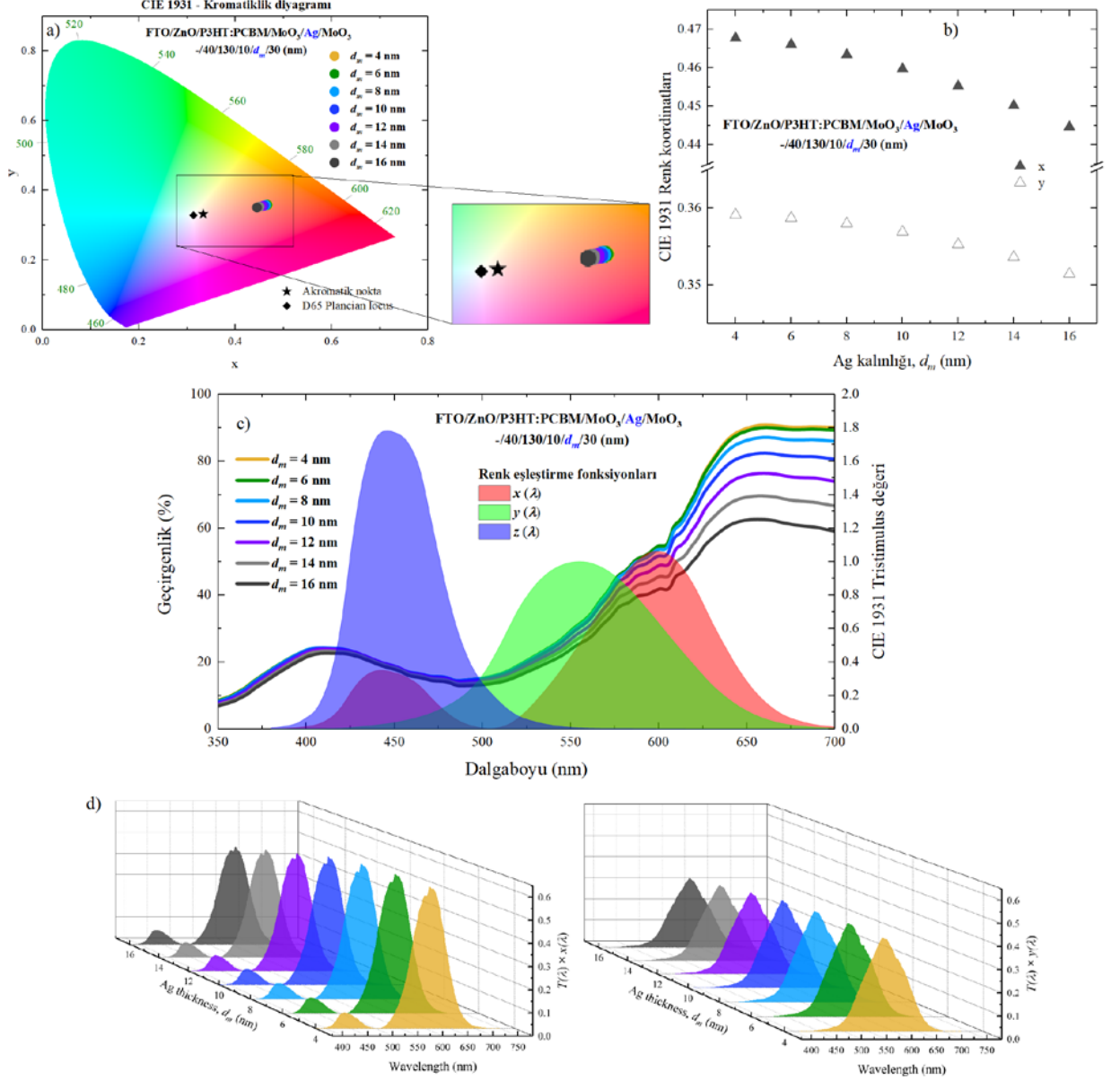
elde edilmiştir. $d_{od} > 30\text{nm}$ için tasarlanan ST-OSC’lerde AVT hala yüksek olsa bile, J_{ph} ’de ciddi bir azalma meydana gelmektedir.

FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃ (--/40/130/10/ d_m/d_{od} nm) ST-OSC yapısı için en yüksek AVT ve J_{ph} değerleri baz alındığında, optimal değerlere sahip yapı $d_m=6$ nm ve $d_{od}=30$ nm olduğu durumda elde edilmiştir. Bu yüzden çalışma kapsamında, FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃ (--/40/130/10/ d_m/d_{od} nm) ST-OSC yapısı $d_m=6$ nm ve $d_{od}=30$ nm değerlerinde üretilmiştir.

Ayrıca, dış dielektrik olan MoO₃’ün d_{od} parametresi, ST-OSC’nin AVT’sini Ag kadar etkilemediği görülmektedir. Bu yüzden, çalışma kapsamında, optik karakteristikte baskın tabaka olan Ag’nin FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃ (--/40/130/10/ d_m/d_{od} nm) ST-OSC yapısının CIE 1931 renk (chromaticity) koordinatları üzerine etkisi incelendi. ST-OSC’lerin AVT kadar önemli bir diğer karakteristiği ise CIE 1931 renklilik diyagramındaki renk koordinatları (x, y) yani rengidir. CIE 1931 renklilik diyagramı insan gözünün tepkisi baz alınarak tasarlanmıştır ve genellikle aydınlatıcıların renk özelliklerini belirlemede kullanılır [40].

FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃ (--/40/130/10/ $d_m/30$ nm) ST-OSC yapısının d_m değişimlerine göre AM1.5G aydınlatma altında CIE 1931 renklilik diyagramında ST-OSC’nin renk koordinatlarının yerleri ve değişimleri sırasıyla Şekil 4.16 a ve b’de verilmektedir. CIE 1931 renklilik diyagramında görülmektedir ki, d_m ’nin 4 nm’den 16 nm’ye artması, FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃ (--/40/130/10/ $d_m/30$ nm) ST-OSC yapısının renk koordinatlarını D65 Planckian locus’a doğru kaydırmakta ve x için %5 azalarak 0.468’den 0.445’e, y için de %2 azalarak 0.359’dan 0.351’e doğru kaymaktadır. Ag’nin FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃ (--/40/130/10/ $d_m/30$ nm) ST-OSC yapısının renk koordinatlarında, özellikle x ’de yaptığı bu değişim Şekil 4.16 c ve d’den anlaşılabilmektedir. Şekil 4.11 c’de verilen, FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃ (--/40/130/10/ $d_m/30$ nm) ST-OSC yapısının geçirgenlik karakteristiğinin özellikle $\bar{x}(\lambda)$ ile kesiştiği bölgede, $\bar{y}(\lambda)$ ile kesiştiği bölgeye nazaran geçirgenliğinde d_m ’nin artmasıyla daha fazla azalma olması CIE 1931 renk koordinatı x ’de daha fazla bir değişim meydana getirmektedir. Çünkü, geçirgenlikteki bu değişimin etkisi Denklem (3.17) ve (3.18)’in integrantlarında yer alan $T(\lambda) \bar{x}(\lambda)$ ve $T(\lambda) \bar{y}(\lambda)$ ifadelerini doğrudan modifiye etmektedir. $T(\lambda) \bar{x}(\lambda)$ ve $T(\lambda) \bar{y}(\lambda)$

çarpınlarının altında kalan alanların d_m ile değişimi doğrudan sırasıyla x ve y renk koordinatlarının değişimlerini verir (Şekil 4.16).



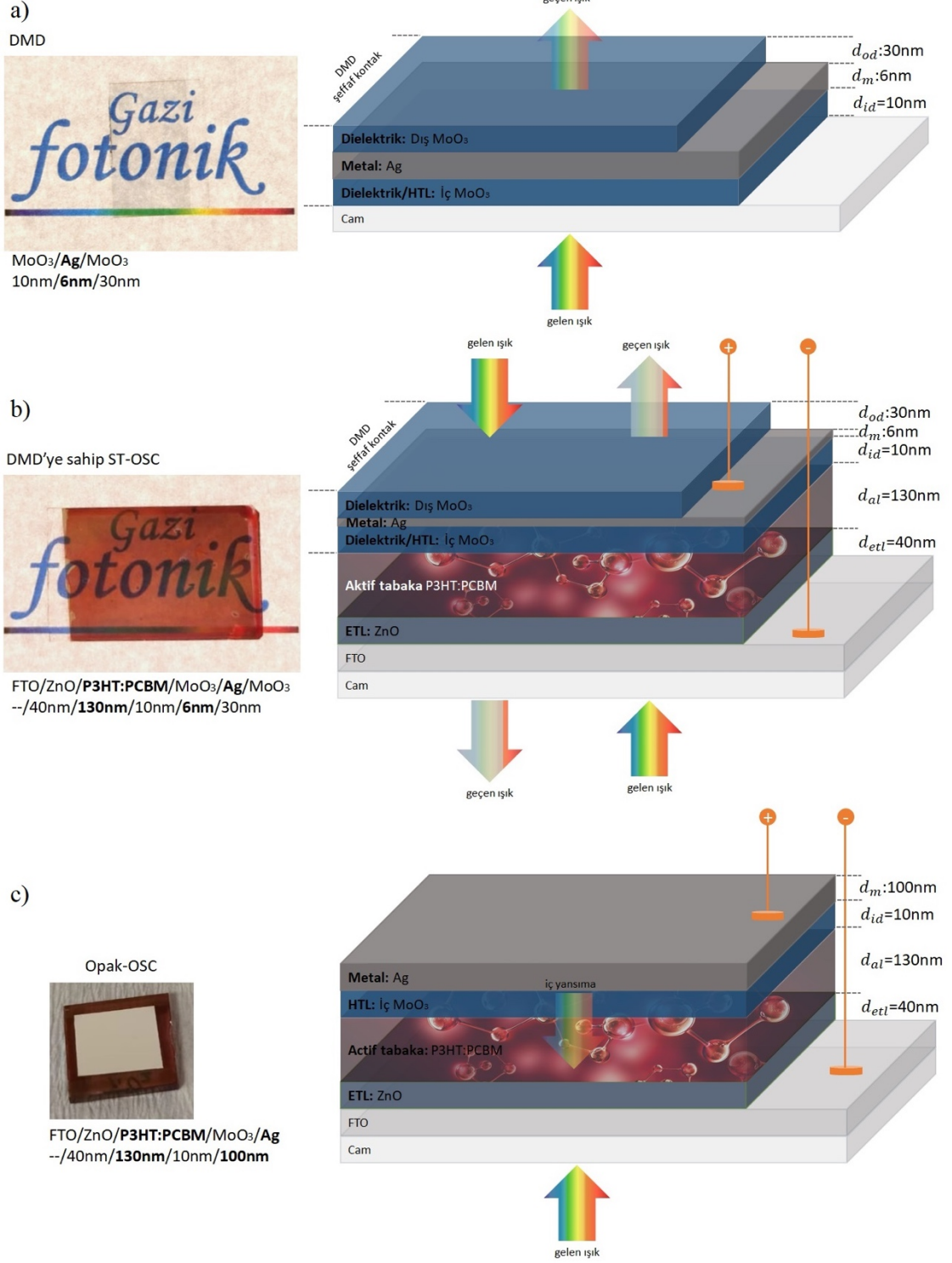
Şekil 4.16: FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃ (–/40/130/10/ d_m /10 nm) ST-OSC yapısının farklı d_m ’lere göre hesaplanmış a) renk koordinatlarının CIE 1931 renklilik diyagramındaki yerleri, b) renk koordinatlarının değişimi, c) FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃ geçirgenlik karakteristiğinin $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ ile kesişimi ve d) $T(\lambda) \bar{x}(\lambda)$ ve $T(\lambda) \bar{y}(\lambda)$ fonksiyonlarının değişimi [33].

d_m ’nin artması ile D65 Planckian locus renk koordinatları değerlerine yakın bir renge sahip ST-OSC’nin elde edilebileceğini gösterse de AVT değerleri $d_m=16$ nm’den sonra %25’in altına doğru azalmaktadır. Bu yüzden, P3HT:PCBM aktif bölgenin oluşturduğu OSC’lerde

MoO₃/Ag/MoO₃ şeffaf üst kontak ile tasarlanan ST yapının renk koordinatlarının D65 Planckian locus'a ulaşamayacağı açıktır. Ancak, d_m ile sağlanan renk değişiminin modifikasyonu farklı renkte pencere uygulamaları için kullanışlı bir argümandır.

FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃ (--/40/130/10/ d_m / d_{od} nm) ST-OSC yapısı için en yüksek AVT ve J_{ph} değerleri baz alındığında, optimal değerlere sahip yapının d_m =6 nm ve d_{od} =30 nm değerleri için elde edilmiştir. Ayrıca bu yapının CIE 1931 renk koordinatları x ve y sırasıyla 0.4661 ve 0.3587'dir. Bu değerlerde üretilen MoO₃/Ag/MoO₃ (10/6/30 nm) şeffaf üst kontağın, FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃ (--/40/130/10/6/30 nm) ST-OSC'in ve FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag (--/40/130/10/100 nm) opak-OSC yapıları ve fotoğrafları sırasıyla Şekil 4.17 a, b ve c'de verilmektedir.

Şekil 4.17 a'dan görüldüğü üzere, MoO₃/Ag/MoO₃ (10/6/30 nm) üst kontağı oldukça geçirgen ve renk seçiciliği de bir o kadar da azdır, VR'deki tüm renkleri değiştirmeden geçirmektedir. FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃ (--/40/130/10/6/30 nm) ST-OSC'nin Şekil 4.17 b'de verilen fotoğrafı incelendiğinde geçirgenliğinin tüm VR için yüksek ancak renk seçiciliğinin VR'un kırmızı bölgesinde düşük olduğu görülmektedir. Bu seçicilik, bu yapı için TMM ile yapılan geçirgenlik hesaplamalarına göre şaşırtıcı değildir. Çünkü FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃ (--/40/130/10/6/30 nm) ST-OSC'in hesaplanan ve deneysel geçirgenlik spektrumunda, özellikle 550 nm'den daha yüksek dalga boyları için geçirgenliğin çok yüksek olması ST-OSC'nin rengini kırmızı olarak tayin etmektedir. Ayrıca, Şekil 4.17 c'den d_m =100 nm ile üretilen opak-OSC yapısının fotoğrafından yapının tamamen yansıtıcı ve geçirgen olmadığı görülmektedir. Özellikle VR için cam tarafından giren elektromagnetik dalgalar Ag tabakası tarafından tekrar yapı içerisine yansıtılmaktadır ve yapı opak karakteristiğe sahip olmaktadır.

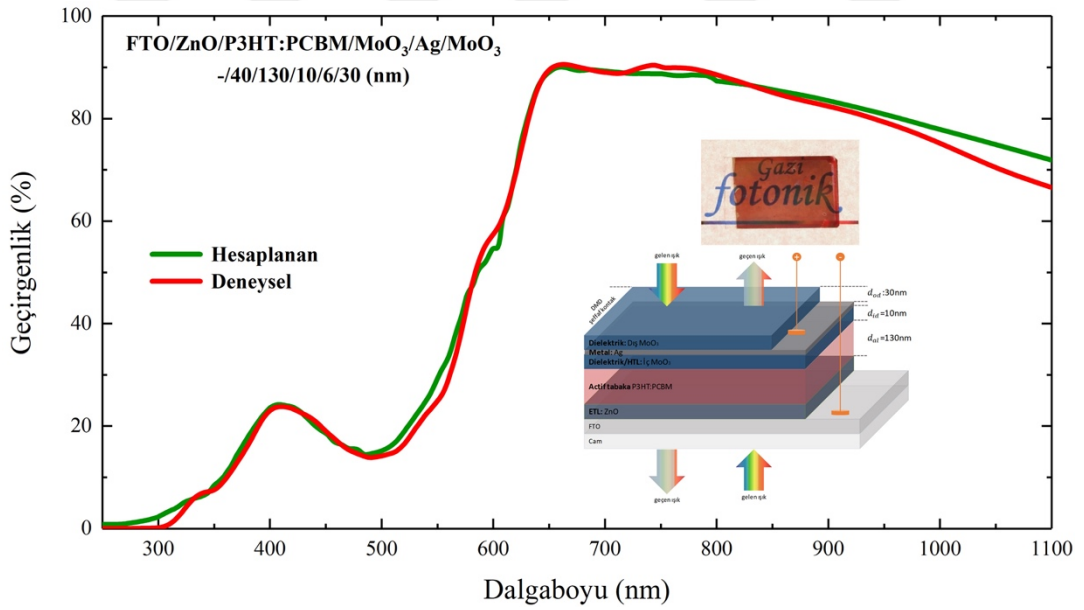


Şekil 4.17: a) MoO₃/Ag/MoO₃ (10/6/30 nm) şeffaf üst kontağın fotoğrafı ve yapısı, b) FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃ (--/40/130/10/6/30 nm) ST-OSC'in fotoğrafı ve yapısı, c) FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag (--/40/130/10/100 nm) opak-OSC'in fotoğrafı ve yapısı [33].

4.2.2. Geçirgenlik Ölçüm Sonuçları

Tez kapsamında optik özellikler baz alınarak TMM hesaplamaları ile optimal değerleri belirlenen, en yüksek AVT ve J_{ph} değerine sahip FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃ (--/40/130/10/6/30 nm) ST-OSC yapısı üretilmiştir. Ayrıca bu yapının CIE 1931 renk koordinatları x ve y sırasıyla 0.4661 ve 0.3587'dir. Aynı zamanda nicel bir karşılaştırma için, opak-OSC yapısı FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag (--/40/130/10/00 nm) ST olan ile aynı büyütme ve biriktirme şartlarında üretilmiştir. İnceleme ST ve opak yapılar üzerinden karşılaştırılmalı olarak yapılmıştır.

Şekil 4.18'de FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃ (--/40/130/10/6/30 nm) ST-OSC'ye ait hesaplanan ve deneysel geçirgenlik spektrumları verilmiştir. Hesaplanan geçirgenlik spektrumundan AVT değeri %38.52 ve deneysel geçirgenlik spektrumundan AVT değeri %37.42 olduğu belirlenmiştir. Ayrıca CIE 1931 renk koordinatları hesaplanan geçirgenlik spektrumundan ve deneysel geçirgenlik spektrumundan elde edilen değerleri Tablo 4.2'de verilmektedir.



Şekil 4.18: FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃ (--/40/130/10/6/30 nm) ST-OSC'in hesaplanan ve deneysel geçirgenlik spektrumları [33].

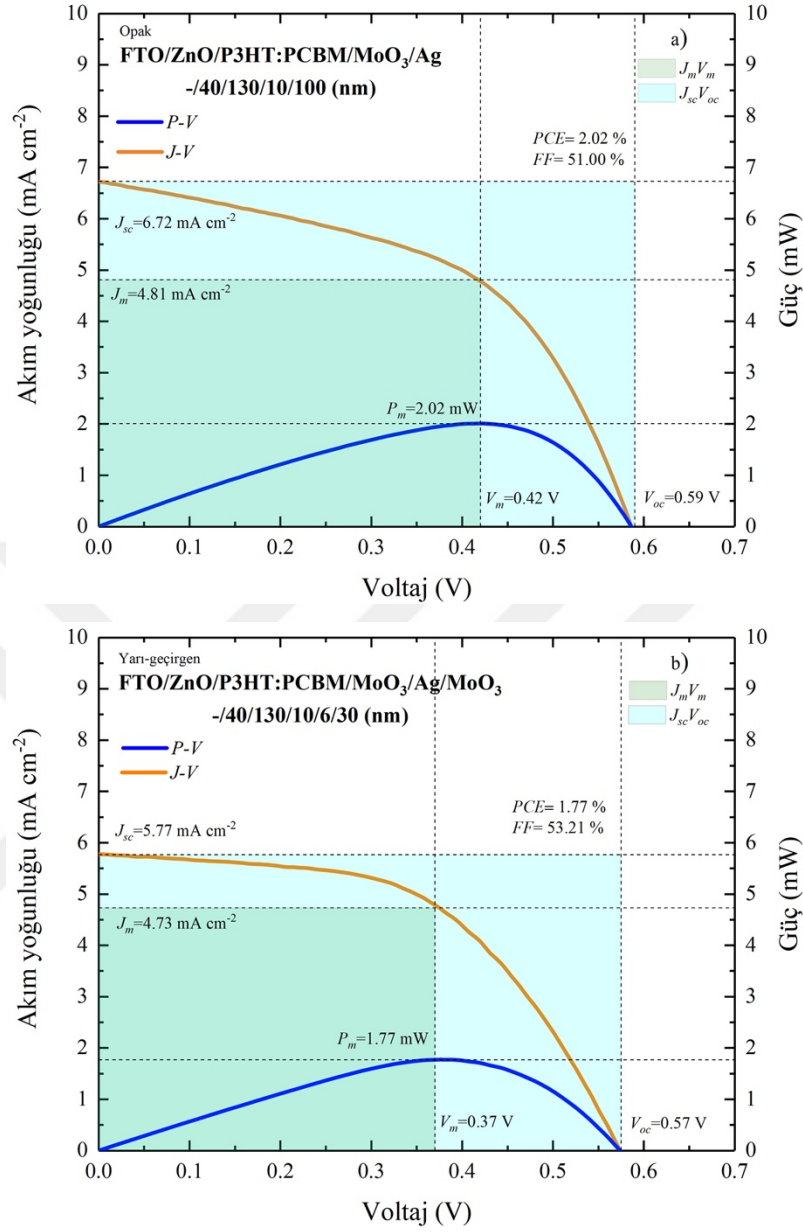
Tablo 4.2: FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃ (--/40/130/10/6/30 nm) ST-OSC'in AVT ve CIE 1931 renk koordinatları.

		CIE 1931 renk koordinatları	
	AVT (%)	x	y
Hesaplanan	38.52	0.4661	0.3587
Deneysel	37.42	0.4613	0.3500

Şekil 4.18'de verilen ST-OSC yapısına ait hesaplanan ve deneysel geçirgenlik karakteristikleri arasında bazı bölgelerde az da olsa farklılıklar gözlenmektedir. Bu durum özellikle püskürtme sisteminde kalınlık kalibrasyonundan, ST-OSC'yi oluşturan tabakaların istenilen kalınlıkların elde edilememesinden kaynaklanmış olabilir. Ayrıca P3HTPCBM aktif bölgenin kimyasal yapısı ortam şartlarına oldukça duyarlıdır. Bu durum da istenilen kalınlıkta ve homojenitede aktif bölgenin kaplanamamasına sebep olabilir. Dolayısıyla deneysel ve hesaplanan geçirgenlik karakteristiklerinde fark görülmektedir. Ancak bu farkın, Tablo 4.2'de verilen AVT ve CIE 1931 renk koordinatları değerleri incelendiğinde çok da fazla olmadığını göstermektedir. Hesap ile deney arasındaki uyumluluk tez kapsamında yapılan TMM hesaplarının oldukça iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir.

4.2.3. Akım-Voltaj Ölçüm Sonuçları

$d_m=100$ nm ile üretilen opak-OSC yapısının ve $d_m=6$ nm ve $d_{od}=30$ nm için üretilen ST-OSC yapısının $J - V$ ölçümleri Şekil 4.19 a ve b'de sırasıyla ve hücre çıkış parametreleri Tablo 4.3'de verilmiştir. Her iki yapı için de FF değerleri %50 üzerindedir. Opak ve ST yapılarda HTL olarak görev yapan MoO₃ ve $d_{id}=10$ nm aynıdır ve V_{oc} , J_m ve V_m değerlerinde ciddi bir değişiklik yoktur. Ancak, opak yapıda J_{sc} ST olana nazaran daha yüksektir. Bu durum, opak-OSC yapıda cam tarafından giren ve P3HT:PCBM aktif tabakada soğurulmayan fotonların opak üst kontak Ag'den tekrar yapı içerisine yansımaları sonucu yeniden soğurulma sürecinin meydana gelmesiyle açıklanabilir. ST-OSC yapısında DMD şeffaf üst kontak sayesinde yansımanın düşük ve geçirgenliğin yüksek olması yeniden soğurulma sürecini desteklemez ve J_{sc} 'de bir azalma meydana gelir.



Şekil 4.19: a) FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag (-/40/130/10/100 nm) opak-OSC ve b) FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃ (-/40/130/10/6/30 nm) ST-OSC'in $J - V$ ve $P - V$ karakteristikleri [33].

ST-OSC'de opak-OSC'ye göre daha düşük PCE değeri gözlenmesi elektromagnetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren bir aygıt için dezavantajdır. Ancak PCE 'de %2.02'den %1.77'ye olan azalma, ST yapı ile pencere uygulamaları için veya farklı renkte OSC elde edildiği düşünüldüğünde oldukça göz ardı edilebilirdir. Hem foton soğurma prensibi ile çalışan hem de soğurduğu bölgedeki fotonların geçişine de izin verecek bir yapı için optimal değerlerin belirlenmesi elektronik ve optoelektronik uygulamalar için oldukça hayati bir önem arz etmektedir.

Tablo 4.3: FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag (--/40/130/10/100 nm) opak-OSC ve b) FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃ (--/40/130/10/6/30 nm) ST-OSC'in hücre çıkış parametreleri.

	J_{sc}	J_m	V_{oc}	V_m	P_m	FF	PCE
	(mA cm ⁻²)	(mA cm ⁻²)	(V)	(V)	(mW)	(%)	(%)
ST-OSC	5.77	4.73	0.57	0.37	1.77	53.21	1.77
Opak-OSC	6.72	4.81	0.59	0.42	2.02	51.00	2.02

4.3.BİR BOYUTLU FOTONİK KRİSTAL İÇEREN ORGANİK GÜNEŞ HÜCRELERİ

Tez kapsamında incelenen FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃ (-/40/130/10/ d_m/d_{od} nm) ST-OSC yapısı için en yüksek AVT ve J_{ph} değerleri baz alındığında, optimal değerlere sahip yapı $d_m=6$ nm ve $d_{od}=30$ nm değerleri için elde edilmiştir. Ancak bu yapının CIE 1931 renk koordinatları x ve y sırasıyla 0.4661 ve 0.3587'dir. Opak karakteristikteki OSC yapısına DMD entegrasyonu ile deneysel olarak %37.42'lik yüksek bir AVT değerine sahip ST-OSC elde edilse de bu yapının renk koordinatları Planckian locus'a oldukça uzaktır. d_m 'nin değişimi renk koordinatlarını Planckian locus'a çok az kaydırmakla birlikte AVT'yi oldukça düşürmektedir. ST-OSC yapısının AVT değerlerinde ciddi bir bozulma meydana getirmeden renk koordinatlarını Planckian locus'a kaydırabilmek için 1D-PC ile oluşturulan PBG kullanılmıştır. FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃ ST-OSC yapısının optik karakteristiği, MgF₂/MoO₃ 1D-PC sistemi ile oluşturulan PBG'ile modifiye edilmiştir. N periyot MgF₂/MoO₃ yapısı (MgF₂/MoO₃)^N etiketiyle gösterilmektedir.

4.3.1. Teorik Optik Modelleme Sonuçları

FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃ ST-OSC yapısının Şekil 4.18'de verilen hesaplanan deneysel geçirgenlik spektrumları incelendiğinde, 600 nm'den sonra geçirgenliğinin artması ve bu bölgede kırmızı rengin sorumlu olduğu $\bar{x}(\lambda)$ renk eşleştirme fonksiyonun baskın olması ST-OSC rengini kırmızı yapmaktadır. Bu yüzden teorik hesaplamalarda ilk motivasyon $\bar{x}(\lambda)$ renk eşleştirme fonksiyonunun etkinliğini azaltacak bir PBG karakteristiği oluşturmaktır. (MgF₂/MoO₃)^N 1D-PC sistemi kullanılarak tasarlanan PBG'ler $\lambda_B=675$ nm, 700 nm, 725 nm

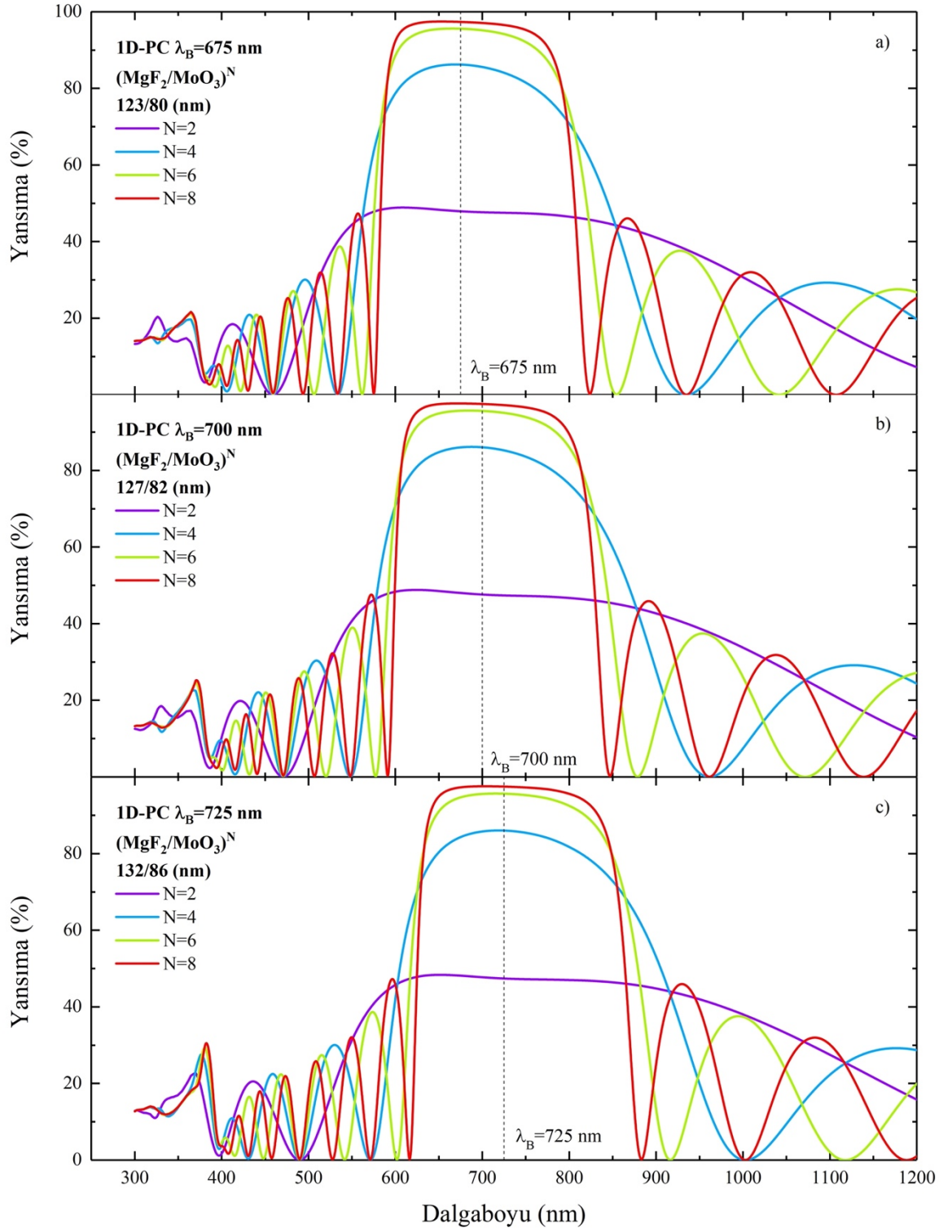
merkez dalgaboylarında ve $N=2, 4, 6$ ve 8 periyot için oluşturulmuştur. Teorik hesaplamalar sonucu elde edilen farklı periyotlara sahip $(\text{MgF}_2/\text{MoO}_3)^N$ sisteminin $\lambda_B=675$ nm, 700 nm, 725 nm için yansıma spektrumları sırasıyla Şekil 4.20 a, b ve c’de verilmektedir. Ayrıca her bir λ_B için Denklem (3.15) kullanılarak hesaplanan d_1 ve d_2 kalınlıkları Tablo 4.4’de verilmektedir.

Tablo 4.4: $(\text{MgF}_2/\text{MoO}_3)^N$ 1D-PC sisteminde $\lambda_B=675$ nm, 700 nm, 725 nm için d_1 ve d_2 kalınlıkları.

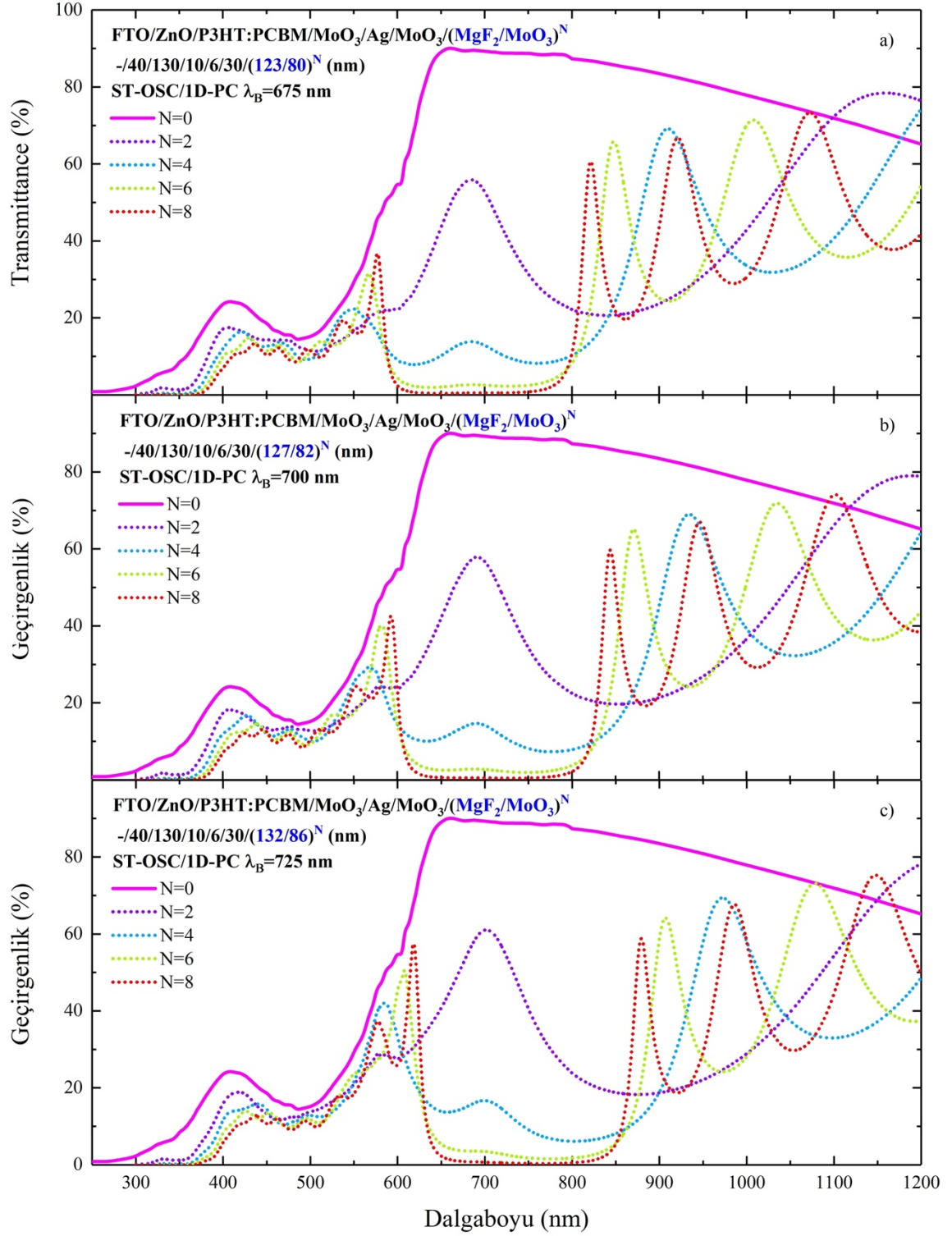
λ_B (nm)	675	700	725
d_1 (nm)	123	127	132
d_2 (nm)	80	82	86

MgF_2 ve MoO_3 ’ün kırılma indisleri farklarının fazla olması $(\text{MgF}_2/\text{MoO}_3)^N$ 1D-PC sisteminde $N=8$ periyot için bile yansıma şiddetinin %100’e yaklaşmasını sağlamaktadır. Dolayısıyla daha az periyot sayısı ile daha yüksek yansıma şiddetinin elde edilmesi daha az malzeme sarfiyatını ve ST-OSC’nin daha ince, hafif ve esnek olmasını sağlamaktadır.

$(\text{MgF}_2/\text{MoO}_3)^N$ 1D-PC ile oluşturulan PBG’lerin genişlikleri oldukça fazladır. Bu durum, dikkatli bir λ_B seçilmediğinde ST-OSC’lerin geçirgenliğinde ciddi bir bozulmaya yol açabilir. Hatta λ_B VR ortalarında seçildiğinde yapı tamamen opak olacaktır. Dolayısıyla amaç ST-OSC’nin geçirgenliğini modifiye ederken $\bar{x}(\lambda)$ renk eşleştirme fonksiyonun baskınlığını azaltmak olduğunda, PBG’in sadece düşük dalgaboyu kuyruğu kullanılabilir. Farklı parametrelerle tasarlanan ve incelenen $(\text{MgF}_2/\text{MoO}_3)^N$ 1D-PC’ye ait PBG’lerin ST-OSC’in optik karakteristiğine etkisini incelemek için FTO/ZnO/P3HT:PCBM/ $\text{MoO}_3/\text{Ag}/\text{MoO}_3/(\text{MgF}_2/\text{MoO}_3)^N$ yapısının geçirgenlik spektrumları hesaplanmıştır (Şekil 4.21 a, b ve c). $(\text{MgF}_2/\text{MoO}_3)^N$ 1D-PC’nin ST-OSC’ye eklenmesi sadece PBG’in olduğu dalgaboyu aralığında ST yapının geçirgenliğini azaltmıştır. $N=2$ periyoda sahip $(\text{MgF}_2/\text{MoO}_3)^N$ 1D-PC’nin PBG’i oldukça geniş olduğu için VR kısmında geçirgenliği azaltmaktadır. Özellikle $N=4, 6$ ve 8 periyot için istenildiği gibi sadece 600 nm ve civarlarında ciddi bir modifikasyon söz konusudur.



Şekil 4.20: $N=2, 4, 6$ ve 8 periyotlara sahip $(\text{MgF}_2/\text{MoO}_3)^N$ 1D-PC sisteminin a) $\lambda_B=675\text{nm}$, b) 700 nm ve c) 725 nm için yansımaları.

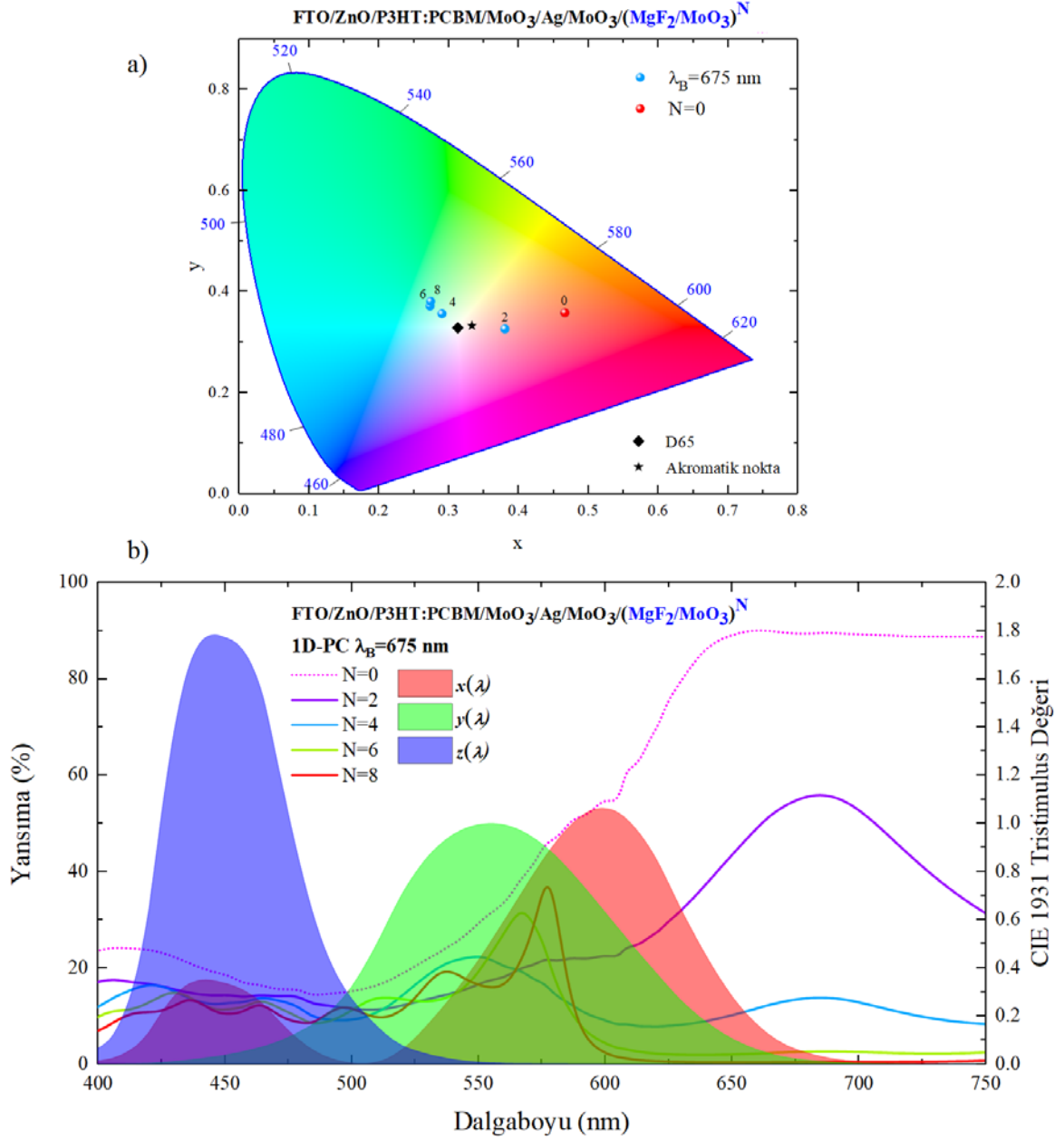


Şekil 4.21: FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃/(MgF₂/MoO₃)^N yapısında N=2, 4, 6, 8 periyotlar ve a) $\lambda_B=675$ nm, b) 700 nm, c) 725 nm için geçirgenlik spektrumları.

Tüm FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃/(MgF₂/MoO₃)^N yapıları için elektromagnetik dalganın PBG içinde geçişine izin verilmez. PBG'in oluşturduğu yansıma spektrumu 600 nm'den büyük ve IR bölgeye denk gelmektedir. Alt taraftan SC yapısına giren elektromagnetik dalgaların, aktif bölgede soğurulmadan PBG'e ulaşan ve PBG'in sorumlu olduğu dalgaboyundakiler aktif bölgeye yansıtılacaktır. Bu durum ST-OSC'de J_{ph} 'ı arttıracaktır ve hücre performansını iyileştirecektir.

FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃/(MgF₂/MoO₃)^N ST-OSC yapısında $\lambda_B=675$ nm'de N=2, 4, 6 ve 8 periyotlar için koordinatları Şekil 4.22 a'da ve daha detaylı bir inceleme için 400-750 nm aralığında geçirgenlik spektrumları ile birlikte renk eşleştirme fonksiyonlarının dağılımı Şekil 4.22 b'de verilmektedir.

Hedeflendiği gibi (MgF₂/MoO₃)^N 1D-PC sistemi ST-OSC'ye eklendiğinde tasarlanan PBG ile yapının CIE 1931 x renk koordinatında bir azalma meydana getirilmiştir. $\lambda_B=675$ nm için FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃/(MgF₂/MoO₃)^N yapısında periyot sayısının 6'ya kadar artmasıyla x renk koordinatındaki meydana gelen azalma yapının rengini Planckian Locus'a doğru kaydırmaktadır. N=6 ve 8 için renk koordinatları Planckian locus'tan uzaklaşmıştır ve değerleri neredeyse aynıdır. Çünkü Şekil 4.22 b'den görüldüğü üzere, N=6 ve 8 için PBG'in 600 nm civarında meydana getirdiği geçirgenlikteki azalma trendi neredeyse aynıdır. Periyot sayısının daha fazla artması N=8 için oluşan PBG'in karakteristiğini değiştirmez ve renk koordinatlarında değişim meydana gelmez. Dolayısıyla tek bir renk koordinatlarında yığılma meydana gelir. PBG'in $\lambda_B=675$ olarak tasarlandığı ve N=4 periyoda sahip yapı için renk koordinatları Planckian locus ve D65 renk koordinatlarına oldukça yakındır ve değerleri $x = 0.2899$ ve $y = 0.3568$ 'dir. Çünkü Şekil 4.22 b incelendiğinde, N=4 periyotlu yapının 400-700 nm aralığında geçirgenlik değerleri neredeyse aynıdır. Bu durum her bir renk eşleştirme fonksiyonunun aynı baskınlıkta yapının rengini etkileyeceğini gösterir. Dolayısıyla N=4 için yapı rengi Planckian locus'a kaymıştır. Ayrıca N=4 periyot için tasarlanan PBG $\lambda_B=675$ nm durumunda N=6 ve 8 periyotlara nazaran VR'de yapının geçirgenliğini ciddi derecede azaltmamaktadır.

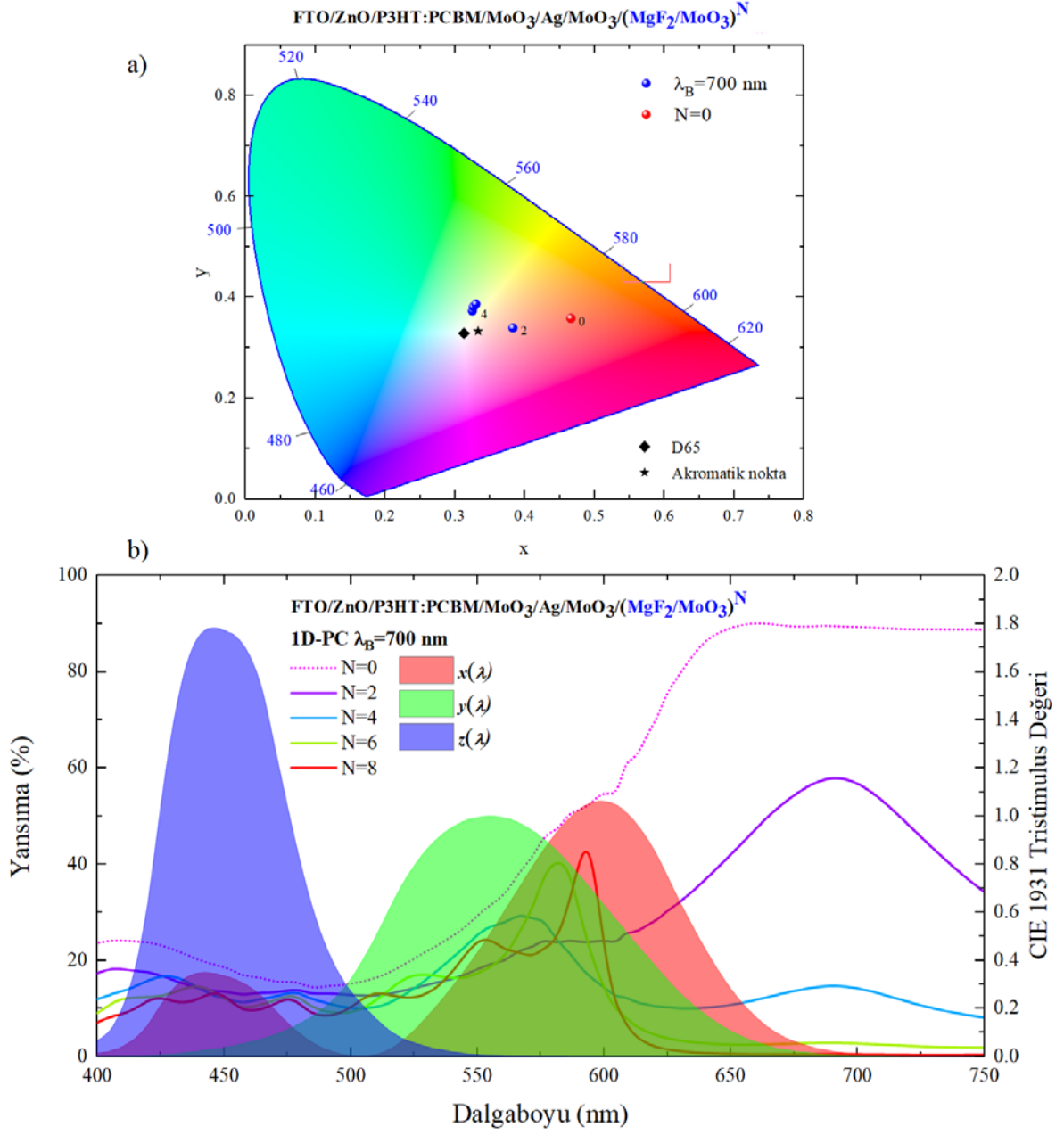


Şekil 4.22: a) FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃/(MgF₂/MoO₃)^N ST-OSC yapısına ait $\lambda_B = 675$ nm’de N=2, 4, 6 ve 8 periyotlar için renk koordinatları ve b) 400-750 nm aralığında geçirgenlik spektrumları ile birlikte renk eşleştirme fonksiyonlarının dağılımı.

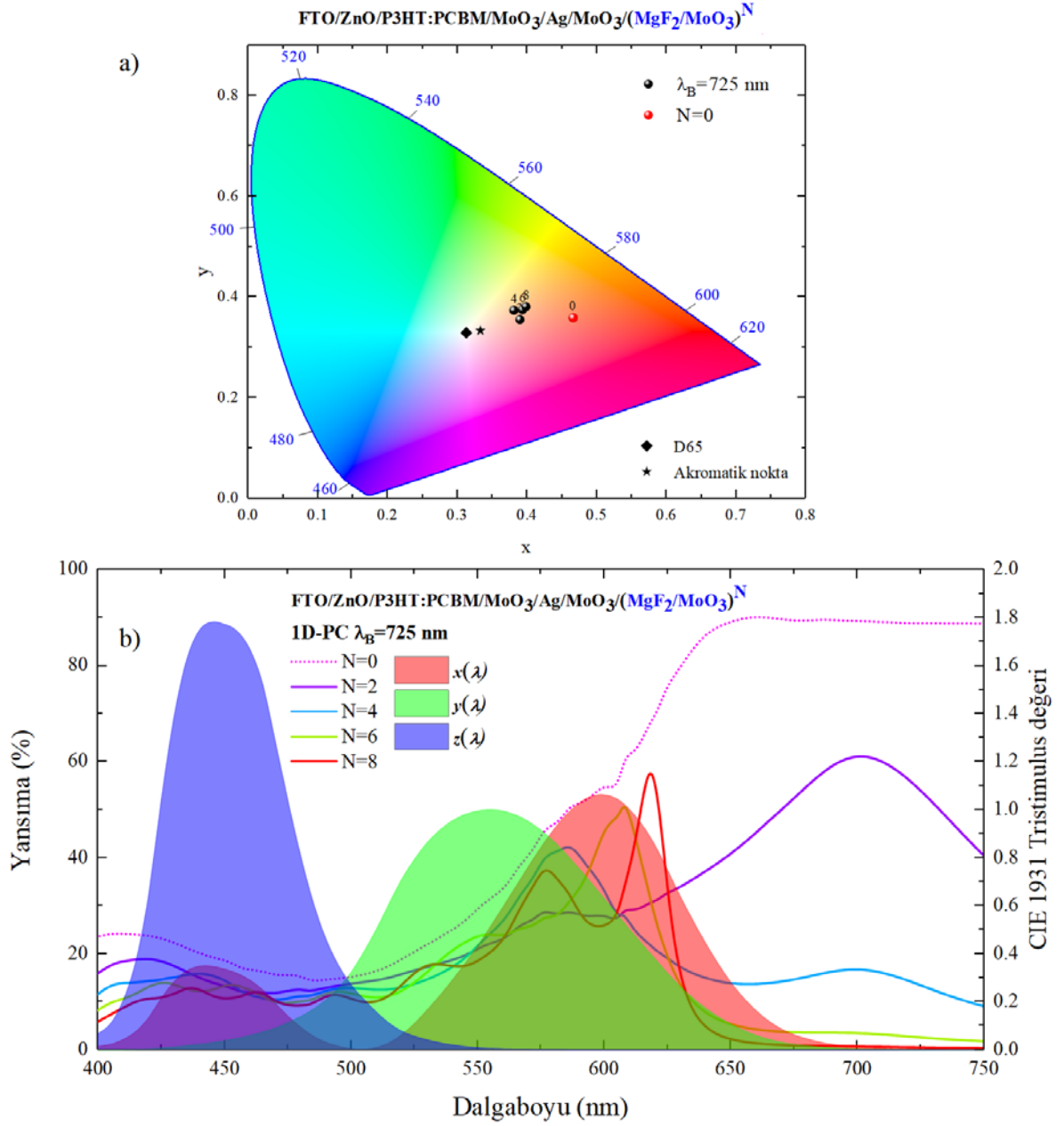
FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃/(MgF₂/MoO₃)^N ST-OSC yapısında $\lambda_B = 700$ nm’de N=2, 4, 6, ve 8 periyotlar için koordinatları Şekil 4.23 a’da ve daha detaylı bir inceleme için 400-750 nm aralığında geçirgenlik spektrumları ile birlikte renk eşleştirme fonksiyonlarının dağılımı Şekil 4.23 b’de verilmektedir. $\lambda_B = 700$ nm için FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃/(MgF₂/MoO₃)^N yapısında periyot sayısının 4’e kadar artmasıyla x renk koordinatındaki meydana gelen azalma yapının rengini Planckian Locus’a

doğru kaydırmaktadır. Periyodun artması renk koordinatlarını Planckian locus'tan az da olsa uzaklaştırmaktadır. $N=4$, 6 ve 8 için renk koordinatları neredeyse aynıdır. Çünkü Şekil 4.23 b'den görüldüğü üzere, $N=6$ ve 8 için PBG'in 600 nm civarında meydana getirdiği geçirgenlikteki azalma trendi neredeyse aynıdır. Periyot sayısının daha fazla artması $N=8$ için oluşan PBG'in karakteristiğini değiştirmez ve renk koordinatlarında değişim meydana gelmez. Dolayısıyla tek bir renk koordinatlarında yığılma meydana gelir. Ayrıca $N=4$ için tasarlanan PBG ST-OSC'nin geçirgenliğini PBG'in tasarlandığı dalgaboyu bölgesinde azaltmakla birlikte $\bar{x}(\lambda)$ renk eşleştirme fonksiyonunun uzun dalgaboyu kısmını etkilemektedir. Dolayısıyla $\lambda_B=675$ nm için tasarlanana nazaran $\lambda_B=700$ nm için tasarlanan PBG, ST-OSC yapısında daha kontrollü bir modifikasyon yapmaktadır. Ayrıca $\lambda_B=700$ nm için tasarlanan PBG ST-OSC'nin rengini en fazla Planckian locus'a kaydırabilmektedir. PBG'in $\lambda_B=700$ nm olarak tasarlandığı ve $N=4$ periyoda sahip yapı için renk koordinatları Planckian locus ve D65 renk koordinatlarına oldukça yakındır ve değerleri $x = 0.3247$ ve $y = 0.3737$ 'dir. Çünkü Şekil 4.23 b incelendiğinde, $N=4$ periyoda sahip olan yapının 400-700 nm aralığında geçirgenlik değerleri neredeyse aynıdır. Bu durum her bir renk eşleştirme fonksiyonunun aynı baskınlıkta yapının rengini etkileyeceğini gösterir. Dolayısıyla $N=4$ periyot için yapı rengi Planckian locus'a kaymıştır. Ayrıca $N=4$ periyot için tasarlanan PBG $\lambda_B=700$ nm olması durumunda $\lambda_B=675$ nm olana nazaran daha yüksek y koordinatı değerine sahiptir. Çünkü Şekil 4.23 b incelendiğinde PBG merkezinin yüksek dalgaboyunda olması renk eşleştirme fonksiyonlarından $\bar{y}(\lambda)$ 'nin bulunduğu dalgaboylarını çok fazla etkilemez ve $\bar{y}(\lambda)$ 'nin baskınlığı artarak y koordinatının değerini artırır.

FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃/(MgF₂/MoO₃)^N ST-OSC yapısında $\lambda_B=725$ nm'de $N=2$, 4, 6, ve 8 periyotlar için koordinatları Şekil 4.24 a'da ve daha detaylı bir inceleme için 400-750 nm aralığında geçirgenlik spektrumları ile birlikte renk eşleştirme fonksiyonlarının dağılımı Şekil 4.24 b'de verilmektedir. $\lambda_B=725$ nm için FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃/(MgF₂/MoO₃)^N yapısında periyot sayısının 8'e kadar artmasıyla x renk koordinatındaki azalma meydana getirirse de Planckian Locus'tan hala çok uzaktır. $N=4$, 6 ve 8 için renk koordinatları neredeyse aynıdır. Çünkü Şekil 4.23 b'den görüldüğü üzere, $N=4$, 6 ve 8 için PBG'in 600 nm civarında meydana getirdiği geçirgenlikteki azalma trendi aynıdır ve renk eşleştirme fonksiyonlarının baskın olduğu bölgede değildir. Dolayısıyla $\lambda_B=725$ nm'de ayarlanan PBG yapının rengini Planckian locus'a kaydırmamaktadır.



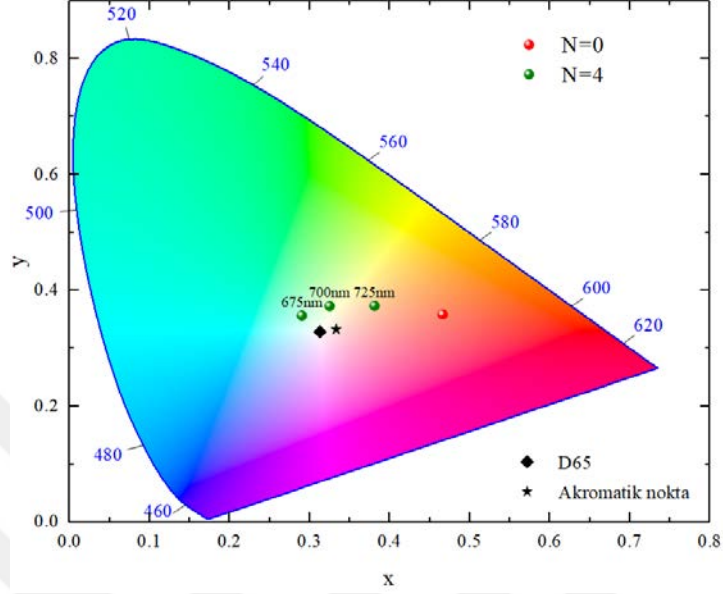
Şekil 4.23: a) FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃/(MgF₂/MoO₃)^N ST-OSC yapısına ait $\lambda_B = 700$ nm'de N=2, 4, 6 ve 8 periyotlar için renk koordinatları ve b) 400-750 nm aralığında geçirgenlik spektrumları ile birlikte renk eşleştirme fonksiyonlarının dağılımı.



Şekil 4.24: a) FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃/(MgF₂/MoO₃)^N ST-OSC yapısına ait $\lambda_B = 725$ nm’de N=2, 4, 6 ve 8 periyotlar için renk koordinatları ve b) 400-750 nm aralığında geçirgenlik spektrumları ile birlikte renk eşleştirme fonksiyonlarının dağılımı.

FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃/(MgF₂/MoO₃)^N ST-OSC yapısı üzerine, 1D-PC’in PBG’nin periyot ve λ_B değerleri ayarlanarak yapılan hesaplamalar sonucu renk koordinatlarının Planckian locus’a kaydırma hedefine $\lambda_B = 700$ nm’de N=4 periyot ve $\lambda_B = 625$ nm’de N=4 periyot olduğu durumda ulaşılmıştır. (MgF₂/MoO₃)^N 1D-PC sistemi için optimal periyodun N=4 olduğu görülmektedir. Şekil 4.25’de farklı λ_B ’ler için N=4 periyot için elde

edilen renk koordinatları CIE 1931 renklilik diyagramında verilmektedir. Ancak ST yapılar için renk koordinatlarının yanı sıra AVT değerleri de baz alınmalıdır.

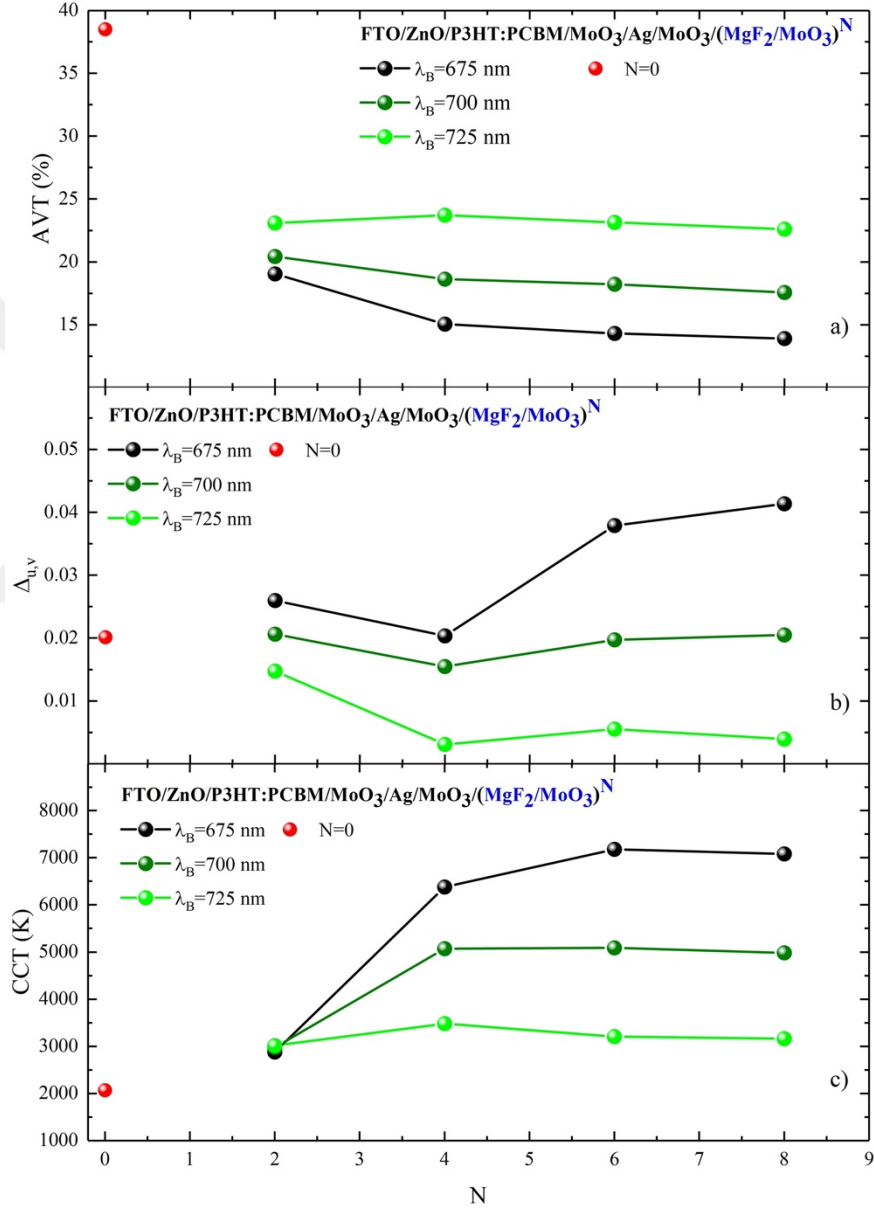


Şekil 4.25: FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃/(MgF₂/MoO₃)⁴ ST-OSC yapısına ait $\lambda_B=725$ nm, 700 nm ve 675 nm için renk koordinatları.

FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃/(MgF₂/MoO₃)^N ST-OSC yapısında, 1D-PC'in PBG'sinin periyot değerlerine göre farklı λ_B değerleri için elde edilen AVT, $\Delta_{u,v}$ ve CCT değişimleri sırasıyla Şekil 4.26 a, b ve c'de verilmektedir. ST-OSC'nin AVT değeri 1D-PC entegrasyonu sonucu %38.52'den %20'li değerlere düşmüştür. Özellikle her λ_B için en yüksek AVT değeri beklendiği gibi N=2 periyot olan yapılarda görülmektedir. Çünkü N=2 periyot olan yapıların PBG'leri daha az yansıtıcılığa sahiptir ve yapının geçirgenliğini diğer periyotlara nazaran daha az azaltmaktadır.

Periyot sayısının AVT üzerine etkisine bakıldığında, $\lambda_B=725$ nm için ciddi bir değişim olmadığı görülmektedir. Fakat $\lambda_B=700$ nm ve 675 nm için N=4 periyotta AVT'de bir düşüş meydana gelmiştir. Çünkü $\lambda_B=725$ nm olarak tasarlanan PBG'in yansıma bandının düşük dalgaboyu bölgesi VR'in yüksek dalgaboyu sınırına denk gelen geçirgenlik spektrumunu ciddi bir şekilde modifiye etmemiştir (Şekil 4.20 c ve Şekil 4.24 b). PBG'in daha küçük dalgaboyu bölgesi daha düşük dalgaboylarına kayması durumunda, yani $\lambda_B=700$ nm ve $\lambda_B=675$ nm olarak tasarlanan PBG'ler için ST-OSC yapısının optik karakteristiği etkilenmeye başlar. Bu durum periyot sayısının N=2'den 4'e çıkması durumunda AVT değerlerinin azalmasına sebep olur.

Ayrıca λ_B 'nin daha düşük dalgaboyuna kayması, ST-OSC yapısının geçirgenliğinin ciddi bir şekilde azalmasına sebep olduğu için AVT değerleri ciddi bir şekilde azalmaktadır. Tüm yapılar için AVT değeri pencere uygulamaları için eşik değer olarak kabul edilen %25'den küçüktür. Bu dezavantajın yanında çok az bir periyot sayısı ile yapı renginin Planckian locus'a kayması ciddi bir kazanımdır.



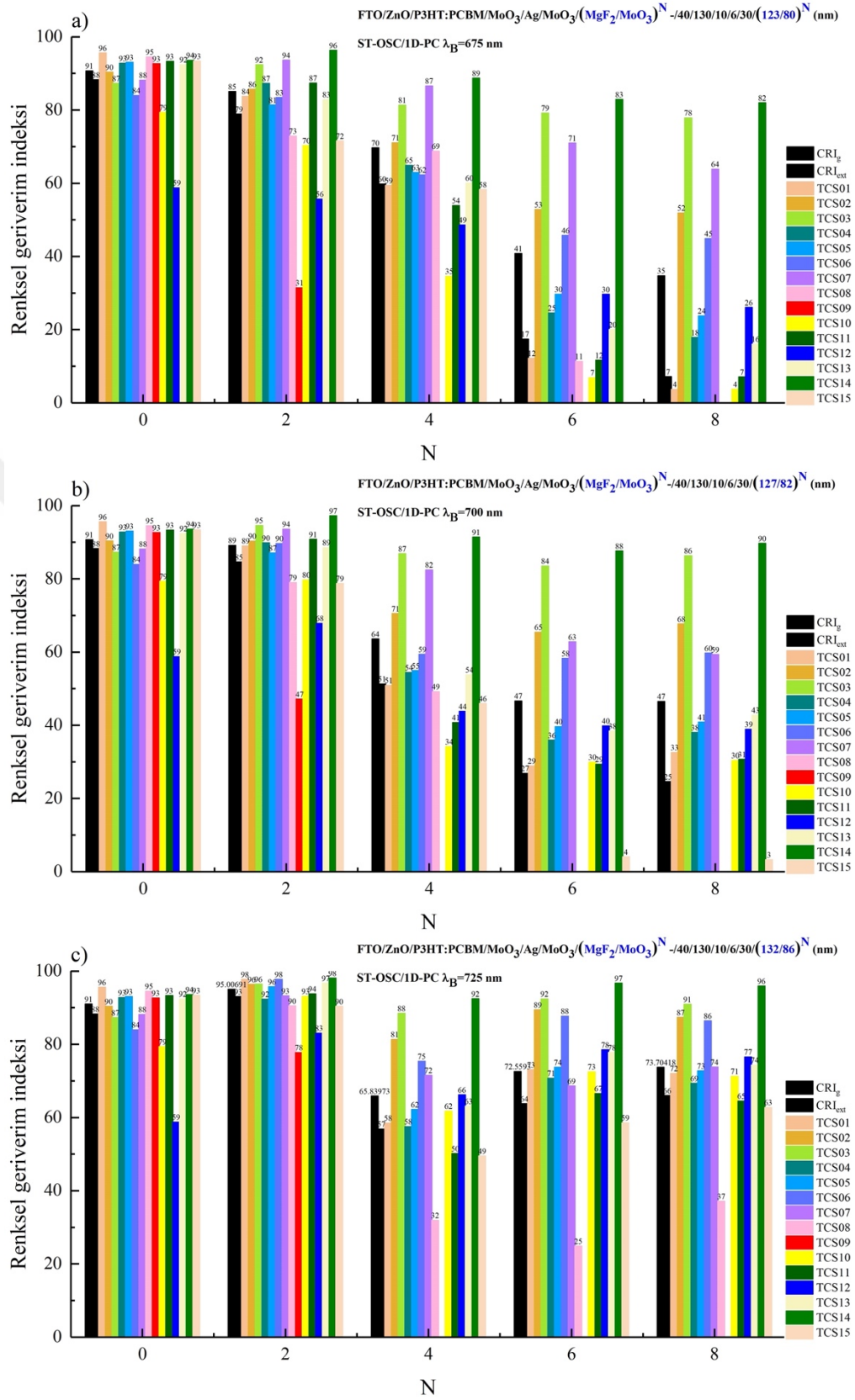
Şekil 4.26: FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃/(MgF₂/MoO₃)^N ST-OSC yapısı üzerine, 1D-PC'nin PBG'sinin periyot değerlerine göre farklı λ_B değerleri için elde edilen a) AVT, b) $\Delta_{u,v}$ ve c) CCT değişimleri.

ST-OSC'lerin 1D-PC entegrasyonu ile değişen renk koordinatları baz alındığında, $\lambda_B = 675$ nm ve 700 nm için N=4 periyodunun optimal periyot sayısı olmasının yanı sıra, N=4 periyodunun

AVT değerleri cinsinden hangi optimal λ_B değerine sahip olduğu da incelenmelidir. N=4 periyot için $\lambda_B=675$ nm durumunda AVT değeri %15.05 iken $\lambda_B=700$ nm iken AVT değeri %18.63'tür. Dolayısıyla FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃/(MgF₂/MoO₃)^N ST-OSC yapısı N=4 periyoduna ve $\lambda_B=700$ nm değerine sahip PBG ile tasarlandığında hem renk koordinatları hem de AVT baz alındığında optimal değerlerde bir yapı olmaktadır. Ayrıca N=4 periyot ve $\lambda_B=700$ nm için renk koordinatları x ve y sırasıyla 0.3248 ve 0.3733'tür.

ST-OSC'lerin özellikle pencere veya aydınlatma görevi görececek ekipmanlara entegrasyonunda önemli bir parametre olan $\Delta_{u,v}$ ve CCT incelenmesi gerekir. Tasarlanan tüm yapılar için $\Delta_{u,v}$ 'nin ve CCT'nin N ile değişimi sırasıyla Şekil 4.26 b ve c'de verilmektedir. Özellikle CCT tayini için $\Delta_{u,v} < 0.0054$ olması gerekmektedir ve bu şart sadece $\lambda_B=725$ nm için N=4 ve 8 periyot için sağlanmaktadır. $\lambda_B=725$ nm'de N=4 ve 8 periyot için $\Delta_{u,v}$ değerleri sırasıyla 0.0031 ve 0.0039, CCT değerleri ise sırasıyla 3483 K ve 3161 K'dir. Bu yapılar için CCT tayini yapılabilir ancak yapıların renk koordinatları daha önce irdelendiği üzere Planckian locus'dan oldukça uzaktadırlar. Planckian locus baz olarak alınmadığı durumlarda ilgili parametrelerdeki yapılar için, üzerlerine gelen ışığı geçiren CCT değerleri belirli birer ışık kaynağı gibi davranabilirler.

Şekil 4.27 a, b ve c'de sırasıyla farklı periyotlar için $\lambda_B=675$ nm, 700 nm ve 725 nm'de elde edilen CRI değerleri verilmektedir. ST-OSC yapısında CRI_{gen} ve CRI_{ext} değerleri sırasıyla 91 ve 88'dir. Bu durum 1D-PC içermeyen ve %37.42 AVT değerinde üretilen ST-OSC'nin renksel geriverim indeksinin oldukça iyi olduğunu göstermektedir. TCS12 kodlu güçlü mavi renginin CRI değeri 59'dur. Bu durum, ST-OSC yapısının *güçlü mavi* renk geriveriminin oldukça düşük olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.27: $\text{FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO}_3/\text{Ag/MoO}_3/(\text{MgF}_2/\text{MoO}_3)^N$ yapısında $N=2, 4, 6, 8$ periyotlar ve a) $\lambda_B=675$ nm, b) 700 nm, c) 725 nm için CRI değerleri.

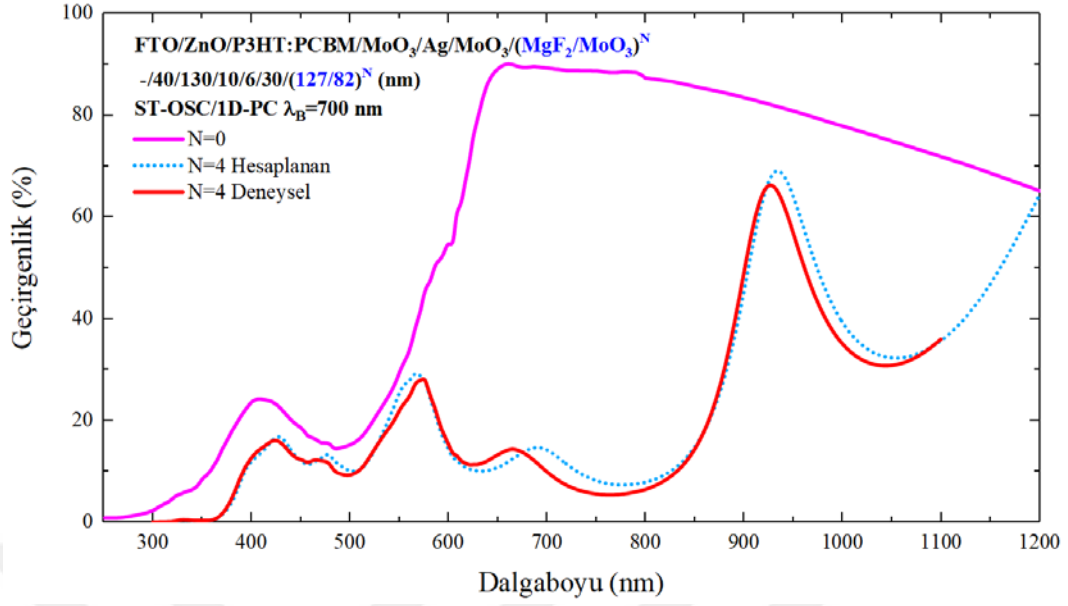
1D-PC'nin ST-OSC'ye eklenmesi ile CRI değerleri beklenildiği gibi ciddi derecede azalmaktadır. Çünkü 1D-PC'nin oluşturduğu PBG ST-OSC'nin VR'deki tüm dalgaboylarındaki geçirgenliği azaltmaktadır. Dolayısıyla bu durum çeşitli renklere ait CRI değerlerini azaltmaktadır. Özellikle, periyodun artması 1D-PC'nin PBG yansıma şiddetini arttırdığında ST-OSC'nin geçirgenliği azaldığı için, tüm λ_B değerlerinde periyodun artmasıyla CRI değerleri azalmaktadır.

Belirgin bir azalma olarak, TCS09 kodlu *güçlü kırmızı* rengi $N=4, 6$ ve 8 periyot değerlerinde negatif CRI değeri almıştır. Bu durum, PBG'in küçük dalgaboyu bölgesi ile ST-OSC'nin kırmızı renk eşleştirme fonksiyonunun bölgesine dek gelen geçirgenlik değerini azaltması ile açıklanabilir. Dolayısıyla 1D-PC entegrasyonu sonucu ST-OSC yapısının özellikle kırmızı renk geriverimi yok olmaktadır. Bu durum 1D-PC ile ST-OSC yapısının renginin Planckian locus'a kayması durumunda CRI değerlerinde kaçınılmaz bir azalma olduğunu göstermektedir. Bu yüzden, ST-OSC yapılarında optik optimizasyon olarak, rengin istenilen renk koordinatlarına kaydırılması yapının CRI'sını ciddi bir derecede etkilediği gerçeğini göz önüne almak gerekecektir. Tez çalışmasında özellikle renk koordinatlarının Planckian locus'a kaydırılması amaçlandığı için CRI değerleri sadece bir inceleme olarak sunulmuş, en iyi CRI değerlerini elde etmek hedeflenmemiştir.

4.3.2. Geçirgenlik Ölçüm Sonuçları

Tez kapsamında ST-OSC yapılarının renk koordinatlarını Planckian locus'a kaydırma hedefi ile, değerlerin $\lambda_B=700$ nm ve $N=4$ periyot olduğu belirlenmiştir. FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃/(MgF₂/MoO₃)^N yapısında $\lambda_B=700$ nm ve $N=4$ periyot için AVT değeri %18.63, CIE 1931 renk koordinatları x ve y sırasıyla 0.3248 ve 0.3733'tür. Aynı zamanda nicel bir karşılaştırma için, opak-OSC, ST-OSC ve 1D-PC içeren ST-OSC yapıları aynı büyütme ve biriktirme şartlarında üretilmiştir. İnceleme ST-OSC ve 1D-PC içeren ST-OSC yapıları üzerinden karşılaştırılmalı olarak yapılmıştır.

Şekil 4.28'de $\lambda_B=700$ nm PBG'e sahip FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃/(MgF₂/MoO₃)⁴ ST-OSC'ye ve FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃ ST-OSC'ye ait hesaplanan ve deneysel geçirgenlik spektrumları verilmiştir. Hesaplanan geçirgenlik spektrumundan AVT değerleri ve CIE 1931 renk koordinatları Tablo 4.5'de verilmektedir.



Şekil 4.28: $\lambda_B=700$ nm PBG'e sahip FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃/(MgF₂/MoO₃)⁴ ST-OSC'ye ve FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃ ST-OSC'ye ait hesaplanan ve deneysel geçirgenlik spektrumları.

Tablo 4.5: $\lambda_B=700$ nm PBG'e sahip FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃/(MgF₂/MoO₃)⁴ ST-OSC'nin hesaplanan ve deneysel AVT ve CIE 1931 renk koordinatları.

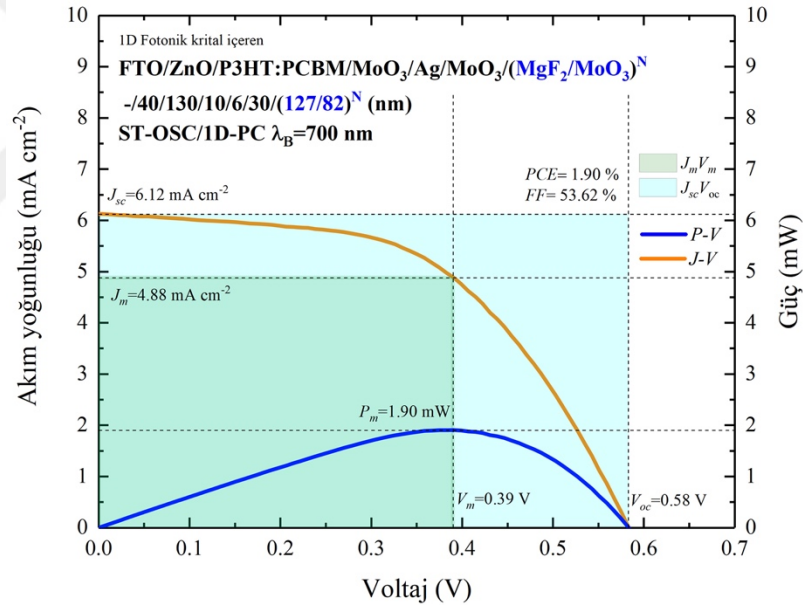
CIE 1931 renk koordinatları			
	AVT (%)	CIE 1931 renk koordinatları	
		x	y
Hesaplanan	18.63	0.3248	0.3733
Deneysel	17.98	0.3328	0.3672

Şekil 4.28'de verilen 1D-PC içeren ST-OSC yapısına ait hesaplanan ve deneysel geçirgenlik karakteristiklerinde bazı bölgelerde az da olsa farklılıklar gözlenmektedir. Bu durum püskürtme sisteminde 1D-PC'yi oluşturan tabakaların kalınlık kalibrasyonundan ve ST-OSC'yi oluşturan tabakaların istenilen kalınlıkların elde edilememesinden kaynaklanmış olabilir. Özellikle (MgF₂/MoO₃)⁴ yapısında hedeflenen PBG karakteristiğinin d_1 ve d_2 'ye oldukça bağlı olması, bu tabakaların kalınlıklarında hedeflenen değerlerden ufak bir sapma meydana gelmesi ile optik karakteristiği oldukça değiştirmektedir. Ayrıca P3HT:PCBM aktif bölgenin kimyasal yapısı ortam şartlarına oldukça duyarlıdır. Bu durum da istenilen kalınlıkta ve homojenitede aktif

bölgenin kaplanamamasına sebep olabilir. Dolayısıyla deneysel ve hesaplanan geçirgenlik karakteristiklerinde fark görülmektedir. Ancak bu farkın, Tablo 4.5’de verilen AVT ve CIE 1931 renk koordinatları değerleri incelendiğinde çok da fazla olmadığını göstermektedir. Hesap ile deney arasındaki uyumluluk tez kapsamında yapılan TMM hesaplarının oldukça iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir.

4.3.3. Akım-Voltaj Ölçüm Sonuçları

Tez kapsamında üretilen, $\lambda_B=700$ nm PBG’e sahip FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃/(MgF₂/MoO₃)⁴ ST-OSC yapısının $J - V$ ve $P - V$ karakteristikleri Şekil 4.29’de verilmiştir. Ayrıca tez kapsamında TMM hesaplamaları ile optik parametreleri belirlenen ve optimal değerlerde üretilen opak, ST ve 1D-PC içeren OSC yapılarına ait hücre çıkış parametreleri Tablo 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4.29: $\lambda_B=700$ nm PBG’e sahip FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃/(MgF₂/MoO₃)⁴ ST-OSC’nin $J - V$ ve $P - V$ karakteristikleri.

Tablo 4.6: Optimal değerlerde üretilen opak, ST ve 1D-PC içeren OSC yapılarına ait hücre çıkış parametreleri.

	J_{sc}	J_m	V_{oc}	V_m	P_m	FF	PCE
	(mA cm ⁻²)	(mA cm ⁻²)	(V)	(V)	(mW)	(%)	(%)
ST-OSC	5.77	4.73	0.57	0.37	1.77	53.21	1.77
ST-OSC/1D-PC	6.12	4.88	0.58	0.39	1.90	53.61	1.90
Opak-OSC	6.72	4.81	0.59	0.42	2.02	51.00	2.02

$\lambda_B=700$ nm PBG'e sahip FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag/MoO₃/(MgF₂/MoO₃)⁴ ST-OSC yapısının FF değerleri %53.61'dir. Opak, ST ve 1D-PC içeren OSC yapılarında HTL olarak görev yapan MoO₃ ve $d_{id}=10$ nm aynıdır. Yapıların bant düzeni ve kontak yapıları birbirleri ile aynıdır. Bu durum V_{oc} , J_m ve V_m değerlerinde ciddi bir değişiklik meydana getirmez. Ancak, 1D-PC içeren ST-OSC yapısında J_{sc} ST olana nazaran daha yüksektir, opak olana nazaran ise daha azdır. OSC yapısında cam tarafından giren ve P3HT:PCBM aktif tabakada soğurulmayan, (MgF₂/MoO₃)⁴ 1D-PC'nin PBG içerisinde kalan enerjideki fotonların tekrar yapı içerisine yansması sonucu yeniden soğurulma süreci meydana gelir. Soğurmanın artması J_{sc} 'de bir artış meydana getirmektedir. ST-OSC yapısında DMD şeffaf üst kontak sayesinde yansımanın düşük ve geçirgenliğin yüksek olması yeniden soğurulma sürecini desteklemez. Dolayısıyla en düşük J_{sc} ve PCE ST-OSC yapısında gözlenmiştir. Opak yapıda kalın Ag AM1.5G spektral dağılımının sorumlu olduğu enerjideki fotonların tamamı ve (MgF₂/MoO₃)⁴ 1D-PC sahip olduğu PBG aralığındaki fotonlar tekrar yapı içerisine yansıtılır. Dolayısıyla ve 1D-PC içeren ST-OSC yapısında sadece PBG bölgesindeki fotonların yeniden soğurulması söz konusudur. Bu yüzden 1D-PC içeren ST-OSC yapısında elde edilen J_{sc} ve PCE değerleri opak-OSC yapısında gözlenen değerlerden daha düşüktür. Tüm bu çıkarımların ışığında, (MgF₂/MoO₃)^N 1D-PC sisteminin $\lambda_B=700$ nm PBG'e ve N=4 periyoda sahip olacak şekilde tasarlandığında, ST-OSC'ye entegrasyonu optik özelliklerin modifiye edilebilmesinin ve renk koordinatlarının Planckian locus'a kaydırabilmesinin yanı sıra hücre çıkış parametrelerini de iyileştirdiği görülmektedir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Tez çalışması teorik olarak tasarlanan, incelenen ve optimal değerlerde üretilen OSC yapılarının geliştirilmesi açısından metodolojik olarak 3 kısma ayrılabilir. Tez kapsamının ilk aşamasında, P3HT:PCBM tabanlı IOSC’lerde HTL olarak kullanılan MoO_3 , V_2O_5 ve WO_3 TMO malzeme sistemlerinin IOSC’lerin elektriksel ve optik özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir. İkinci aşamada en iyi hücre performansı gösteren HTL malzemesine sahip IOSC yapısının opak üst kontağı uygun tasarım parametreleri belirlenen $\text{MoO}_3/\text{Ag}/\text{MoO}_3$ DMD şeffaf üst elektrot ile modifiye edilmiş ve ST-OSC yapıları tasarlanmıştır. Optimal değerlerde üretilen ST-OSC’lerin optik karakteristiklerinin modifikasyonu tezin üçüncü aşamasında 1D-PC sistemi kullanılarak yapılmıştır. P3HT:PCBM tabanlı ST-OSC yapılarının optik özellikleri $(\text{MgF}_2/\text{MoO}_3)^N$ 1D-PC sistemi ile modifiye edilerek, renk koordinatı Planckian locus’a oldukça yakın, yüksek performanslı ST-OSC yapıları elde edilmiştir.

Tez çalışmasında ilk aşamasında tasarlanan ve üretilen tüm BHJ P3HT:PCBM tabanlı IOSC’lerde geçirgen ve iletken alttaş olarak FTO’nun ve ETL olarak ZnO ’nun kullanılmasıyla, geçirgenlik ölçümleri ile AM1.5G spektral irradyansın %80’den fazlasının P3HT:PCBM aktif bölgeye ulaşabildiği belirlenmiştir. Ayrıca incelenen tüm IOSC’lerin optik spektrumlarının karakteristiği P3HT:PCBM aktif bölge tarafından modifiye edildiği, HTL ve ETL malzemelerinin optik karakteristiğe ciddi bir etki yapmadığı gözlenmiştir. Deneysel olarak elde edilen optik özelliklerden yola çıkarak, özellikle OSC’nin hücre çıkış parametrelerinden biri olan J_{sc} için bir değerlendirme yapılmıştır. Teorik olarak en yüksek J_{ph} ve deneysel olarak en yüksek J_{sc} değerleri V_2O_5 ’in HTL olarak kullanıldığı IOSC’de elde edilmiştir.

MoO_3 , V_2O_5 ve WO_3 HTL malzemelerinin P3HT:PCBM tabanlı OSC’lerin performans parametreleri üzerine etkilerini değerlendirmek için aktif bölge/HTL ve HTL/üst kontak arayüzey morfolojileri AFM ölçümleri ile incelenmiştir. AFM ölçümleri, literatürde daha efektif bir yöntem olarak kullanılan, katman katman olarak büyütülen yapıların üzerinden alınarak yapılmıştır. Bu sayede P3HT:PCBM/HTL ve HTL/Ag arayüzey özelliklerini altta kalan tüm katmanların da etkisinin yüzey morfolojisini nasıl etkilediği saptanabilmiştir. P3HT:PCBM aktif tabakası üzerine püskürtme tekniği ile biriktirilen V_2O_5 , WO_3 ve MoO_3 HTL malzemelerinin yüzey pürüzlülüğünü ciddi bir şekilde arttırdıkları belirlenmiştir. Püskürtme tekniğinde, hedef malzemeden enerjik atomlar polimer yüzeyine ulaştığında atomların

polimerin mikro yapısına nüfuz etmekte ve enerjilerini P3HT:PCBM aktif katmanına aktararak yüzey kusurları oluşturmaktadır. ZnO üzerine spin kaplama yöntemi ile kaplanan P3HT:PCBM aktif bölgenin σ_{rms} değeri 3.13 nm'dir. P3HT:PCBM aktif bölge üzerine püskürtme yöntemi ile biriktirilen V_2O_5 , WO_3 ve MoO_3 'e ait yüzey morfolojilerinin σ_{rms} değerleri sırasıyla 9.98 nm, 7.72 nm ve 7.11 nm'dir.

V_2O_5 , WO_3 ve MoO_3 HTL tabaklarının P3HT:PCBM tabanlı IOSC'lerin SC performansları üzerine etkileri incelenmiştir. HTL barındırmayan IOSC yapısında oldukça düşük hücre çıkış parametreleri gözlenmiştir ve bu yapının PCE değeri %1.26 ve FF %29.06'dır. HTL olmaması durumunda yapı içerisinde P3HT'nin LUMO seviyesinden alt kontak FTO'ya ilerlemesi istenilen serbest halde olan elektronların üst kontak Ag'ye hareket ederek hücre performansını olumsuz şekilde etkilemektedir. V_2O_5 , WO_3 ve MoO_3 HTL tabaklarının P3HT:PCBM tabanlı IOSC'lerde yer almasıyla, PCE ve FF değerlerinde artış gözlenmiştir. IOSC yapısında, aktif bölge P3HT:PCBM ile üst kontak arasına elektronun hareketini engelleyecek ve boşluk transportuna katkı sağlayacak bir HTL olması gerekliliği görülmüştür. HTL olarak MoO_3 'ün kullanıldığı IOSC'lerde en yüksek SC performansı elde edilmiştir. Bu yapıda J_{sc} değeri 6.78 mA/cm² ve PCE değeri %2.11'dir. MoO_3 'ün nispeten iyi boşluk mobilitesine sahip olması J_{sc} değerini arttırmaktadır. Ayrıca P3HT:PCBM aktif tabaka üzerine kaplanan MoO_3 'ün en düşük σ_{rms} değerine sahip olması ve Ag üst kontak ile oluşturduğu arayüzeyde pürüzlülüğün az olması arayüzey kusurlarını azalttığı ve hücre performansını diğer yapılara nazaran daha iyi olmasını sağladığı belirlenmiştir.

P3HT:PCBM tabanlı IOSC'lerde HTL olarak V_2O_5 , WO_3 ve MoO_3 tabaklarının kullanılmasıyla yapılan incelemelerde, hem morfolojik hem de hücre performansı açısından en iyi yapının MoO_3 'ün HTL olarak kullanıldığı IOSC yapısı olduğu belirlenmiştir ve tez çalışmasında tasarlanan ve üretilen ST-OSC'ler bu yapı baz alınarak tasarlanmıştır.

Tez çalışmasının ikinci aşamasında, ST-OSC tasarımı, yapıdaki opak üst Ag kontağının uygun tasarım parametrelerine sahip $MoO_3/Ag/MoO_3$ DMD şeffaf üst elektrot ile modifiye edilmesiyle yapılmıştır. Hesaplamalar d_m değerinin $MoO_3/Ag/MoO_3$ DMD şeffaf üst kontağın ve ST-OSC'in optik özelliklerini belirleyen oldukça önemli bir parametre olduğunu göstermiştir.

Hesaplamalar $\text{MoO}_3/\text{Ag}/\text{MoO}_3$ DMD yapısının, tüm 4-16 nm aralığındaki d_m değerleri için geçirgenliğinin yüksek ve AM1.5G spektral irradyans ile aynı trende sahip olduğunu göstermiştir. Bu özellikler, $\text{MoO}_3/\text{Ag}/\text{MoO}_3$ DMD yapısının elverişli bir şeffaf üst elektrot olduğunu ispatıdır. d_m değerinin artması ile özellikle yapının maksimum geçirgenliğinde ve tüm geçirgenlik karakteristiğinde bir azalma ve λ_{max}^T değerlerinde daha küçük dalgaboyuna kayma olduğu belirlenmiştir. AVT değerleri d_m 'nin 4 nm'den 8 nm'ye değişmesiyle sırasıyla %88.32'den %92.26 maksimum AVT değerine artmaktadır. $d_m > 8$ nm için AVT azalmaktadır ve $d_m = 16$ nm'de %81.19'a kadar hızlı bir şekilde düşmektedir. Maksimum AVT değeri %92.26'dır ve $d_m = 8$ nm olduğu DMD yapısında elde edilmektedir.

$\text{MoO}_3/\text{Ag}/\text{MoO}_3$ DMD yapısının opak-OSC yapısında üst elektrot Ag'nin yerine entegre edilmesiyle tasarlanan ST-OSC'nin optik karakteristiklerinin hesaplanmasında, d_m 'nin artması ST-OSC'nin soğurma ve yansıtmasında 560 nm'den sonra VR'in uzun dalgaboyu rejiminde ve NIR bölgede bir artış meydana getirdiği görülmüştür. Artış oranı soğurma için özellikle d_m 'nin 4-10 nm aralığında etkiliyken, $d_m = 10$ nm'den sonra etkinliğini kaybetmektedir. d_m 'nin artması P3HT:PCBM aktif bölgede soğurulmayan fotonların yeniden yapı içerisine gönderilmesini sağlamış ve J_{ph} değerini arttırmıştır. ST-OSC için en yüksek J_{ph} değeri 63.3 mA/cm^2 olarak $d_m = 6$ nm ve $d_{od} = 30$ için hesaplanmıştır. J_{ph} 'de olduğu gibi en yüksek AVT değeri yine $d_m = 6$ nm ve $d_{od} = 30$ için elde edilmiştir ve değeri %38.52'dir. d_m 'nin 16 nm'ye ulaşması ile %29.89'a kadar düşen AVT değeri bile pencere uygulamaları için kabul edilen alt sınır olan %25'den büyüktür. Bu durum, P3HT:PCBM tabanlı ST-OSC'ler için, uygun optimal değerlerde tasarlanmış $\text{MoO}_3/\text{Ag}/\text{MoO}_3$ DMD şeffaf üst kontakın elverişli bir kontak olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla ST-OSC yapısı için en yüksek AVT ve J_{ph} değerleri baz alındığında, optimal değerlere sahip yapı $d_m = 6$ nm ve $d_{od} = 30$ nm olduğu durumda elde edilmiştir. Hesaplanan geçirgenlik spektrumundan AVT değeri %38.52 ve deneysel geçirgenlik spektrumundan AVT değeri %37.42 olduğu belirlenmiştir.

Ayrıca optik hesaplamalarda, d_m 'nin artması ST-OSC'nin renk koordinatlarını D65 Planckian locus'a doğru kaydıracağı belirlenmiştir. Renkte koordinatlarından x , %5 azalarak 0.468'den 0.445'e, y 'de %2 azalarak 0.359'dan 0.351'e kaymıştır. Ancak AVT değerleri $d_m = 16$ nm'den sonra %25'in altına doğru azaldığından, P3HT:PCBM aktif bölgenin oluşturduğu OSC'lerde $\text{MoO}_3/\text{Ag}/\text{MoO}_3$ şeffaf üst kontak ile tasarlanan ST yapının renk koordinatlarının D65 Planckian locus'a ulaşamayacağı belirlenmiştir. Ayrıca d_m ile sağlanan renk değişiminin

modifikasyonu farklı renkte pencere uygulamaları için kullanışlı bir argüman olduğunun ispatıdır.

P3HT:PCBM tabanlı IOSC'lerin opak karakteristiğinin ST karakteristiğe modifiye edilmesi V_{oc} , J_m ve V_m değerlerinde ciddi bir değişiklik meydana getirmemiştir. Ancak ST-OSC tasarımının, aktif bölgede soğurulmamış fotonların arka kontakta yapı içerisine yansımaları ve tekrar soğurulma olasılığını azaltması J_{sc} değerini olumsuz etkilediği saptanmıştır ve PCE değerleri %2.02'den %1.77'ye olan azalmıştır. PCE 'de meydana gelen azalma SC için bir dezavantajdır. PCE 'deki azalma miktarı, yapı ile pencere uygulamaları için veya farklı renkte OSC elde edildiği düşünüldüğünde oldukça göz ardı edilebilir. Tez kapsamında, ST aygıtlar ve şeffaf kontaklar için optimal değerlerin belirlenmiş olması elektronik ve optoelektronik aygıt tasarımları için oldukça hayati bir önem taşımaktadır.

$MoO_3/Ag/MoO_3$ DMD şeffaf üst kontakın opak-OSC'ye entegrasyonu ile %37.42'lik yüksek bir AVT değerine sahip ST-OSC elde edilmesine rağmen, ST-OSC'nin renk koordinatları Planckian locus'a oldukça uzaktır. Tez çalışmasının üçüncü aşamasında, ST-OSC'ye $(MgF_2/MoO_3)^N$ 1D-PC sisteminin entegrasyonu ile AVT değerlerinde ciddi bir bozulma meydana getirmeden renk koordinatlarını Planckian locus'a kaydırılabilmektedir. 1D-PC'lerin PBG'leri $\lambda_B=675$ nm, 700 nm ve 725 nm merkez dalgalı boylarında ve N=2, 4, 6 ve 8 periyotlarda tasarlanmıştır.

N=4 periyot ve $\lambda_B=700$ nm için tasarlanan $(MgF_2/MoO_3)^N$ 1D-PC içeren ST-OSC'nin renk koordinatları Planckian locus ve D65 renk koordinatlarına kaydırılmıştır, x ve y sırasıyla 0.3248 ve 0.3733'tür. Ayrıca bu yapı için AVT değeri %18.63 olarak elde edilmiştir. 1D-PC içeren ST-OSC tasarımlarında, CCT tayini için gerekli $\Delta_{u,v} < 0.0054$ şartı sadece $\lambda_B=725$ nm için N=4 ve 8 periyotlarda sağlandığı hesaplanmıştır. $\lambda_B=725$ nm'de N=4 ve 8 periyot için $\Delta_{u,v}$ değerleri sırasıyla 0.0031 ve 0.0039, CCT değerleri ise sırasıyla 3483 K ve 3161 K'dir. Bu yapılar için CCT tayini yapılabilir ancak yapıların renk koordinatları Planckian locus'dan oldukça uzaktır. Planckian locus baz olarak alınmadığı durumlarda ilgili parametrelerdeki yapıların, üzerlerine gelen ışığı geçiren ve CCT değeri atanabilen birer ışık kaynağı gibi davranabileceği görülmüştür.

ST-OSC yapısında CRI_{gen} ve CRI_{ext} değerleri sırasıyla 91 ve 88'dir. Bu durum 1D-PC içermeyen ve %37.42 AVT değerinde üretilen ST-OSC'nin renksel geriveriminin

oldukça iyi olduğunu göstermektedir. TCS12 kodlu güçlü mavi renginin CRI değeri 59'dur. Bu durum, ST-OSC yapısının *güçlü mavi* renk geriveriminin oldukça düşük olarak verdiğini göstermektedir. 1D-PC'nin oluşturduğu PBG ST-OSC'nin VR'deki tüm dalgaboylarındaki geçirgenliği azalttığı belirlenmiştir ve dolayısıyla 1D-PC'in ST-OSC'ye eklenmesi ile CRI değerleri ciddi derecede azalmaktadır. Ayrıca N=4, 6 ve 8 periyot değerlerinde TCS09 kodlu *güçlü kırmızı* rengi negatif CRI değerine sahiptir. Bu sonuç 1D-PC entegrasyonu sonucu ST-OSC yapısının özellikle kırmızı renk geriveriminin olmadığını göstermektedir. Uygun tasarım parametreleri ile 1D-PC içeren ST-OSC yapısının renginin Planckian locus'a kaydırılması CRI değerlerinde kaçınılmaz bir azalma meydana getirmektedir. Tez çalışmasında CRI değerleri sadece bir inceleme olarak sunulmuş, en iyi CRI değerlerini elde etmek değil özellikle renk koordinatlarının Planckian locus'a kaydırılması hedeflenmiştir.

$(\text{MgF}_2/\text{MoO}_3)^N$ 1D-PC sistemi ile ST-OSC'nin hücre performansında bir iyileşme meydana geldiği gözlenmiştir. 1D-PC içeren ST-OSC'de J_{sc} 'nin, ST olana nazaran daha yüksek, opak olana nazaran ise daha az olduğu belirlenmiştir. $\lambda_B=700$ nm'de N=4 periyotta PBG'e sahip ST-OSC yapısının FF değeri %53.61 ve PCE değeri %1.90'dır. Opak yapıda kalın Ag AM1.5G spektral dağılımının sorumlu olduğu enerjideki fotonların tamamı ve $(\text{MgF}_2/\text{MoO}_3)^4$ 1D-PC sahip olduğu PBG aralığındaki fotonlar tekrar yapı içerisine yansıtılır. Dolayısıyla ve 1D-PC içeren ST-OSC yapısında sadece PBG bölgesindeki fotonların yeniden soğurulması söz konusudur. Bu yüzden 1D-PC içeren ST-OSC yapısında elde edilen J_{sc} ve PCE değerleri opak-OSC yapısında gözlenen değerlerden daha düşüktür. 1D-PC'nin ST-OSC'ye entegrasyonu, optik özelliklerin modifiye edilebilmesinin ve renk koordinatlarının Planckian locus'a kaydırabilmesinin yanı sıra hücre çıkış parametrelerini de iyileştirdiği görülmektedir.

Tez çalışmasında P3HT:PCBM tabanlı OSC'ler için elde edilen çıktılar ve metodolojik olarak izlenen efektif yöntem sayesinde AVT'si yüksek, rengi Planckian locus'a oldukça yakın performanslı OSC'lerin elde edilebilmesi ile çalışmanın devamı olarak esnek, bükülebilir ve giyilebilir teknolojiye entegre edilebilecek SC sistemlerinin tasarlanabileceği düşünülmektedir. Ayrıca ST-OSC tasarımı için incelenen şeffaf üst kontak tasarımları akıllı gözlük, şeffaf dokunmatik ekran ve şeffaf ışık yayan veya soğuran optoelektronik aygıtlar gibi yenilikçi teknolojik alanlarda kullanılabilecek potansiyeli taşımaktadır.

KAYNAKLAR

- [1]. Tseng, F. M., Chu, Y. W., and Peng, Y. N., 2009, Using patent data to analyze the development of the next generation of solar cells, *PICMET '09 - 2009 Portl. Int. Conf. Manag. Eng. Technol.* IEEE. p. 3064–3072.
- [2]. Chen, J. K. C., Pham, V. K., Lin, F. C., and Chen, Y. R., 2013, Studying the patent of technology development on Dye Sensitized Solar Cell, *2013 Proc. PICMET 2013 Technol. Manag. IT-Driven Serv.* PICMET. , 985–996.
- [3]. Kuzma-Filipek, I. J., Duerinckx, F., Van Kerschaver, E., Van Nieuwenhuysen, K., Beaucarne, G., and Poortmans, J., 2008, Chirped porous silicon reflectors for thin-film epitaxial silicon solar cells, *J. Appl. Phys.* 104 (7), 073529.
- [4]. Mutitu, J. G., Shouyuan Shi, Barnett, A., and Prather, D. W., 2010, Angular Selective Light Filter Based on Photonic Crystals for Photovoltaic Applications, *IEEE Photonics J.* 2 (3), 490–499.
- [5]. Islam, M. S., Hoq, M., Abu Sayid Haque, M., Akand, M. A. R., Hasan, M. R., and Basher, M. K., 2014, Challenges and Prospects of Cost-Effective Si-based Solar Cells Fabrication in Bangladesh, *2014 Int. Conf. Electr. Eng. Inf. Commun. Technol.* IEEE. p. 1–6.
- [6]. Tai, Q. and Yan, F., 2017, Emerging Semitransparent Solar Cells: Materials and Device Design, *Adv. Mater.* 29 (34), 1700192.
- [7]. Meissner, D., 2020, *Solar Power Implications of our Climate Crisis*.
- [8]. Kim, J. Y. et al., 2007, Efficient tandem polymer solar cells fabricated by all-solution processing, *American Association for the Advancement of Science*. 317 (5835), 222–225.
- [9]. Salimi, A., 2019, *Analysis of Boron Doped Hydrogenated Amorphous Silicon Carbide Thin Film for Silicon Heterojunction Solar Cells*, Orta Doğu Teknik Üniversitesi.
- [10]. Tress, W., 2014, *Organic Solar Cells*, London, England, Springer International Publishing, ISBN: 978-3-319-10096-8.
- [11]. Mohammed, S. S., 2011, Modeling and Simulation of photovoltaic Module using MATLAB/SIMULINK, *Int. J. Chem. Environ. Eng. Model.*
- [12]. Luque, A. and Hegedus, S., 2011, *Handbook of photovoltaic science and engineering*, West Sussex, John Wiley & Sons, ISBN: 0470976128.
- [13]. Machrafi, H., 2013, *Organic Solar Cells*, Choy WCH, editor. Springer. London, Springer London, ISBN: 978-1-4471-4822-7.
- [14]. IEA - International Energy Agency, 2021, *Renewables 2020 Report*.
- [15]. Würfel, P. and Würfel, U., 2016, *Physics of solar cells: from basic principles to advanced concepts*, Weinheim, John Wiley & Sons, ISBN: 352741312X.

- [16]. Williams, R., 1960, Becquerel photovoltaic effect in binary compounds, *J. Chem. Phys.* American Institute of Physics. 32 (5), 1505–1514.
- [17]. Einstein, A., 1905, Über einem die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt, *Ann. Phys.* 4.
- [18]. Ohl, R. S., 1946, *Light-sensitive electric device*, Google Patents.
- [19]. Obydenkova, S. V and Pearce, J. M., 2016, Technical viability of mobile solar photovoltaic systems for indigenous nomadic communities in northern latitudes, *Renew. Energy*. Elsevier. 89 , 253–267.
- [20]. Akamatu, H., Inokuchi, H., and Matsunaga, Y., 1954, Electrical Conductivity of the Perylene-Bromine Complex, *Nature*. 173 , 168–169.
- [21]. Pochettino, A., 1906, *Rendiconti Accademia dei Lincei*.
- [22]. Koenigsberger, J. and Schilling, K., 1910, Über Elektrizitätsleitung in festen Elementen und Verbindungen. I. Minima des Widerstandes, Prüfung auf Elektronenleitung, Anwendung der Dissoziationsformeln, *Ann. Phys.* Wiley Online Library. 337 (6), 179–230.
- [23]. Volmer, M., 1913, Die verschiedenen lichtelektrischen Erscheinungen am Anthracen, ihre Beziehungen zueinander, zur Fluoreszenz und Dianthracenbildung, *Ann. Phys.* Wiley Online Library. 345 (4), 775–796.
- [24]. Chiang, C. K. et al., 1977, Electrical conductivity in doped polyacetylene, *Phys. Rev. Lett.* APS. 39 (17), 1098.
- [25]. Tang, C. W. and Vanslyke, S. A., 1987, Organic electroluminescent diodes, *Appl. Phys. Lett.* 51 (12), 913–915.
- [26]. Burroughes, J. H. et al., 1990, Light-emitting diodes based on conjugated polymers, *Nature*. 347 (6293), 539–541.
- [27]. Reineke, S. et al., 2009, White organic light-emitting diodes with fluorescent tube efficiency, *Nature*. Nature Publishing Group. 459 (7244), 234–238.
- [28]. Kallmann, H. and Pope, M., 1959, Photovoltaic Effect in Organic Crystals, *J. Chem. Phys.* 30 (2), 585–586.
- [29]. Chamberlain, G. A., 1983, Organic solar cells: A review, *Sol. cells*. Elsevier. 8 (1), 47–83.
- [30]. Hiramoto, M., Fujiwara, H., and Yokoyama, M., 1991, Three-layered organic solar cell with a photoactive interlayer of codeposited pigments, *Appl. Phys. Lett.* AIP. 58 (10), 1062–1064.
- [31]. Yu, G., Gao, J., Hummelen, J. C., Wudl, F., and Heeger, a. J., 1995, Polymer Photovoltaic Cells : Enhanced Efficiencies via a Network of Internal Donor-Acceptor Heterojunctions,

Science (80-.). 270 , 1789–1791.

- [32]. Spanggaard, H. and Krebs, F. C., 2004, A brief history of the development of organic and polymeric photovoltaics, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. Elsevier. 83 (2–3), 125–146.
- [33]. Çetinkaya, Ç. et al., 2021, Design and fabrication of a semi-transparent solar cell considering the effect of the layer thickness of MoO₃/Ag/MoO₃ transparent top contact on optical and electrical properties, *Sci. Rep.* 11 (1), 1–17.
- [34]. Liu, Q. et al., 2020, 18% Efficiency organic solar cells, *Sci. Bull.* Science China Press. 65 (4), 272–275.
- [35]. Hau, S. K., Yip, H. L., and Jen, A. K. Y., 2010, A review on the development of the inverted polymer solar cell architecture, *Polym. Rev.* 50 (4), 474–510.
- [36]. Yang, X. et al., 2013, High-Efficiency Polymer Solar Cells Achieved by Doping Plasmonic Metallic Nanoparticles into Dual Charge Selecting Interfacial Layers to Enhance Light Trapping, *Adv. Energy Mater.* 3 (5), 666–673.
- [37]. Alem, S. et al., 2011, Effect of mixed solvents on PCDTBT:PC70BM based solar cells, *Org. Electron.* Elsevier B.V. 12 (11), 1788–1793.
- [38]. Brabec, C. J., Sariciftci, N. S., and Hummelen, J. C., 2001, Plastic solar cells, *Adv. Funct. Mater.* 11 (1), 15–26.
- [39]. Choi, H. et al., 2013, Acid-functionalized fullerenes used as interfacial layer materials in inverted polymer solar cells, *Org. Electron.* Elsevier B.V. 14 (11), 3138–3145.
- [40]. Hu, Z. et al., 2020, A critical review on semitransparent organic solar cells, *Nano Energy*. Elsevier Ltd. 78 (September), 105376.
- [41]. Hu, Z. et al., 2018, Ternary Nonfullerene Polymer Solar Cells with a Power Conversion Efficiency of 11.6% by Inheriting the Advantages of Binary Cells, *ACS Energy Lett.* 3 (3), 555–561.
- [42]. Ma, X. et al., 2020, Highly efficient quaternary organic photovoltaics by optimizing photogenerated exciton distribution and active layer morphology, *Nano Energy*. Elsevier Ltd. 70 , 104496.
- [43]. Gao, W. et al., 2020, Thick-Film Organic Solar Cells Achieving over 11% Efficiency and Nearly 70% Fill Factor at Thickness over 400 nm, *Adv. Funct. Mater.* 30 (10), 1908336.
- [44]. Cheng, P. et al., 2016, Alloy Acceptor: Superior Alternative to PCBM toward Efficient and Stable Organic Solar Cells, *Adv. Mater.* 28 (36), 8021–8028.
- [45]. An, Q. et al., 2018, High-efficiency and air stable fullerene-free ternary organic solar cells, *Nano Energy*. Elsevier. 45 , 177–183.
- [46]. Zhang, M. et al., 2016, Highly efficient ternary polymer solar cells by optimizing photon harvesting and charge carrier transport, *Nano Energy*. Elsevier. 22 , 241–254.

- [47]. Bredas, J. L., Calbert, J. P., da Silva Filho, D. A., and Cornil, J., 2002, Organic semiconductors: A theoretical characterization of the basic parameters governing charge transport, *Proc. Natl. Acad. Sci.* 99 (9), 5804–5809.
- [48]. Kyymissis, I., 2009, *The physics of organic semiconductors BT - Organic Field Effect Transistors: Theory, Fabrication and Characterization*, Boston, MA, Springer US, ISBN: 978-0-387-92134-1.
- [49]. Hu, D., Yu, J., Padmanaban, G., Ramakrishnan, S., and Barbara, P. F., 2002, Spatial Confinement of Exciton Transfer and the Role of Conformational Order in Organic Nanoparticles, *Nano Lett.* 2 (10), 1121–1124.
- [50]. Gregg, B. A. and Hanna, M. C., 2003, Comparing organic to inorganic photovoltaic cells: Theory, experiment, and simulation, *J. Appl. Phys.* 93 (6), 3605–3614.
- [51]. Mayer, A. C., Scully, S. R., Hardin, B. E., Rowell, M. W., and McGehee, M. D., 2007, Polymer-based solar cells, *Mater. Today*. Elsevier Ltd. 10 (11), 28–33.
- [52]. Tang, C. W., 1986, Two-layer organic photovoltaic cell, *Appl. Phys. Lett.* AIP. 48 (2), 183–185.
- [53]. Kietzke, T., 2007, Recent advances in organic solar cells, *Adv. Optoelectron.* 2007, 1-15.
- [54]. Günes, S., Neugebauer, H., and Sariciftci, N. S., 2007, Conjugated Polymer-Based Organic Solar Cells, *Chem. Rev.* 107 (4), 1324–1338.
- [55]. Koster, L. J. A., Smits, E. C. P., Mihailitchi, V. D., and Blom, P. W. M., 2005, Device model for the operation of polymer/fullerene bulk heterojunction solar cells, *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.* APS. 72 (8), 85205.
- [56]. Brabec, C. J. et al., 2001, Origin of the Open Circuit Voltage of Plastic Solar Cells, *Adv. Funct. Mater.* 11 (5), 374–380.
- [57]. Çetinkaya, Ç. et al., 2021, Evaluation on output parameters of the inverted organic solar cells depending on transition-metal-oxide based hole-transporting materials, *Opt. Mater. (Amst)*. 120 (August), 111457.
- [58]. Parker, I. D., 1994, Carrier tunneling and device characteristics in polymer light-emitting diodes, *J. Appl. Phys.* 75 (3), 1656–1666.
- [59]. Chen, L. M., Xu, Z., Hong, Z., and Yang, Y., 2010, Interface investigation and engineering—achieving high performance polymer photovoltaic devices, *J. Mater. Chem.* Royal Society of Chemistry. 20 (13), 2575–2598.
- [60]. Ma, H., Yip, H., Huang, F., and Jen, A. K., 2010, Interface engineering for organic electronics, *Adv. Funct. Mater.* Wiley Online Library. 20 (9), 1371–1388.
- [61]. Po, R., Carbonera, C., Bernardi, A., and Camaioni, N., 2011, The role of buffer layers in polymer solar cells, *Energy Environ. Sci.* Royal Society of Chemistry. 4 (2), 285–310.

- [62]. Li, G., Chu, C. W., Shrotriya, V., Huang, J., and Yang, Y., 2006, Efficient inverted polymer solar cells, *Appl. Phys. Lett.* 88 (25), 1–4.
- [63]. Liao, H. H., Chen, L. M., Xu, Z., Li, G., and Yang, Y., 2008, Highly efficient inverted polymer solar cell by low temperature annealing of Cs_2CO_3 interlayer, *Appl. Phys. Lett.* 92 (17), 173303.
- [64]. Zhao, D. W., Liu, P., Sun, X. W., Tan, S. T., Ke, L., and Kyaw, A. K. K., 2009, An inverted organic solar cell with an ultrathin Ca electron-transporting layer and MoO_3 hole-transporting layer, *Appl. Phys. Lett.* 95 (15), 153304.
- [65]. Zhou, Y., Cheun, H., Potscavage Jr, W. J., Fuentes-Hernandez, C., Kim, S. J., and Kippelen, B., 2010, Inverted organic solar cells with ITO electrodes modified with an ultrathin Al_2O_3 buffer layer deposited by atomic layer deposition, *J. Mater. Chem.* Royal Society of Chemistry. 20 (29), 6189–6194.
- [66]. White, M. S., Olson, D. C., Shaheen, S. E., Kopidakis, N., and Ginley, D. S., 2006, Inverted bulk-heterojunction organic photovoltaic device using a solution-derived ZnO underlayer, *Appl. Phys. Lett.* 89 (14), 143517.
- [67]. Sun, Y., Seo, J. H., Takacs, C. J., Seifert, J., and Heeger, A. J., 2011, Inverted polymer solar cells integrated with a low-temperature-annealed sol-gel-derived ZnO film as an electron transport layer, *Adv. Mater.* 23 (14), 1679–1683.
- [68]. Yang, T. et al., 2010, Solution-Processed Zinc Oxide Thin Film as a Buffer Layer for Polymer Solar Cells with an Inverted Device Structure, *J. Phys. Chem. C.* American Chemical Society. 114 (14), 6849–6853.
- [69]. Waldauf, C. et al., 2006, Highly efficient inverted organic photovoltaics using solution based titanium oxide as electron selective contact, *Appl. Phys. Lett.* 89 (23), 1–4.
- [70]. Steim, R., Choulis, S. A., Schilinsky, P., and Brabec, C. J., 2008, Interface modification for highly efficient organic photovoltaics, *Appl. Phys. Lett.* 92 (9), 2006–2009.
- [71]. Chen, C. C. et al., 2012, Visibly transparent polymer solar cells produced by solution processing, *ACS Nano*. ACS Publications. 6 (8), 7185–7190.
- [72]. Ameri, T. et al., 2010, Fabrication, Optical Modeling, and Color Characterization of Semitransparent Bulk-Heterojunction Organic Solar Cells in an Inverted Structure, *Adv. Funct. Mater.* 20 (10), 1592–1598.
- [73]. Yu, W. et al., 2014, Highly efficient and high transmittance semitransparent polymer solar cells with one-dimensional photonic crystals as distributed Bragg reflectors, *Org. Electron.* Elsevier B.V. 15 (2), 470–477.
- [74]. Yu, W., Shen, L., Meng, F., Long, Y., Ruan, S., and Chen, W., 2012, Effects of the optical microcavity on the performance of ITO-free polymer solar cells with $\text{WO}_3/\text{Ag}/\text{WO}_3$ transparent electrode, *Sol. energy Mater. Sol. cells.* Elsevier. 100 , 226–230.
- [75]. Upama, M. B. et al., 2017, High performance semitransparent organic solar cells with 5%

- PCE using non-patterned MoO₃/Ag/MoO₃ anode, *Curr. Appl. Phys.* 17 (2), 298–305.
- [76]. Chen, K. S., Salinas, J. F., Yip, H. L., Huo, L., Hou, J., and Jen, A. K. Y., 2012, Semi-transparent polymer solar cells with 6% PCE, 25% average visible transmittance and a color rendering index close to 100 for power generating window applications, *Energy Environ. Sci.* 5 (11), 9551.
- [77]. Drolet, N., 2012, Organic photovoltaic: efficiency and lifetime challenges for commercial viability, *2012 MRS Spring Meet. Exhib. San Fr. CA, Moscone West Conv. Center, Marriott Marquis*.
- [78]. Ji, C., Liu, D., Zhang, C., and Jay Guo, L., 2020, Ultrathin-metal-film-based transparent electrodes with relative transmittance surpassing 100%, *Nat. Commun.* Springer US. 11 (1), 3367.
- [79]. Zhang, C. et al., 2014, An Ultrathin, Smooth, and Low-Loss Al-Doped Ag Film and Its Application as a Transparent Electrode in Organic Photovoltaics, *Adv. Mater.* 26 (32), 5696–5701.
- [80]. Zhao, D., Zhang, C., Kim, H., and Guo, L. J., 2015, High-Performance Ta₂O₅/Al-Doped Ag Electrode for Resonant Light Harvesting in Efficient Organic Solar Cells, *Adv. Energy Mater.* 5 (17), 1500768.
- [81]. Maniyara, R. A., Mkhitarian, V. K., Chen, T. L., Ghosh, D. S., and Pruneri, V., 2016, An antireflection transparent conductor with ultralow optical loss (<2 %) and electrical resistance (<6 Ω sq⁻¹), *Nat. Commun.* 7 (1), 13771.
- [82]. Dalapati, G. K. et al., 2018, Transparent heat regulating (THR) materials and coatings for energy saving window applications: Impact of materials design, micro-structural, and interface quality on the THR performance, *Prog. Mater. Sci.* Elsevier Ltd. 95 , 42–131.
- [83]. Zhang, C. et al., 2017, High-Performance Doped Silver Films: Overcoming Fundamental Material Limits for Nanophotonic Applications, *Adv. Mater.* 29 (19), 1605177.
- [84]. Wang, Z. et al., 2019, Metal-Enhanced Adsorption of High-Density Polyelectrolyte Nucleation-Inducing Seed Layer for Highly Conductive Transparent Ultrathin Metal Films, *Front. Mater.* 6 (February), 1–9.
- [85]. Cao, W., Li, J., Chen, H., and Xue, J., 2014, Transparent electrodes for organic optoelectronic devices: a review, *J. Photonics Energy.* 4 (1), 040990.
- [86]. Zilberberg, K. and Riedl, T., 2016, Metal-nanostructures – a modern and powerful platform to create transparent electrodes for thin-film photovoltaics, *J. Mater. Chem. A.* Royal Society of Chemistry. 4 (38), 14481–14508.
- [87]. Kim, S. and Lee, J. L., 2012, Design of dielectric/metal/dielectric transparent electrodes for flexible electronics, *J. Photonics Energy.* International Society for Optics and Photonics. 2 (1), 21215.
- [88]. Ham, J., Kim, S., Jung, G. H., Dong, W. J., and Lee, J. L., 2013, Design of broadband

- transparent electrodes for flexible organic solar cells, *J. Mater. Chem. A*. 1 (9), 3076.
- [89]. Bauch, M. and Dimopoulos, T., 2016, Design of ultrathin metal-based transparent electrodes including the impact of interface roughness, *Mater. Des.* Elsevier Ltd. 104 , 37–42.
- [90]. Kinner, L., Bauch, M., Wibowo, R. A., Ligorio, G., List-Kratochvil, E. J. W., and Dimopoulos, T., 2019, Polymer interlayers on flexible PET substrates enabling ultra-high performance, ITO-free dielectric/metal/dielectric transparent electrode, *Mater. Des.* The Authors. 168 , 107663.
- [91]. Guillén, C. and Herrero, J., 2011, TCO/metal/TCO structures for energy and flexible electronics, *Thin Solid Films*. Elsevier B.V. 520 (1), 1–17.
- [92]. Betancur, R., Romero-Gomez, P., Martinez-Otero, A., Elias, X., Maymó, M., and Martorell, J., 2013, Transparent polymer solar cells employing a layered light-trapping architecture, *Nat. Photonics*. 7 (12), 995–1000.
- [93]. Yu, W. et al., 2015, Highly Efficient Semitransparent Polymer Solar Cells with Color Rendering Index Approaching 100 Using One-Dimensional Photonic Crystal, *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 7 (18), 9920–9928.
- [94]. Lipomi, D. J., Tee, B. C., Vosgueritchian, M., and Bao, Z., 2011, Stretchable organic solar cells, *Adv. Mater.* Wiley Online Library. 23 (15), 1771–1775.
- [95]. Yang, T. et al., 2012, Inverted polymer solar cells with 8.4% efficiency by conjugated polyelectrolyte, *Energy Environ. Sci.* Royal Society of Chemistry. 5 (8), 8208–8214.
- [96]. Ryu, S. Y. et al., 2008, Transparent organic light-emitting diodes consisting of a metal oxide multilayer cathode, *Appl. Phys. Lett.* American Institute of Physics. 92 (2), 15.
- [97]. Cattin, L., Louarn, G., Morsli, M., and Bernède, J. C., 2021, Semi-Transparent Organic Photovoltaic Cells with Dielectric/Metal/Dielectric Top Electrode: Influence of the Metal on Their Performances, *Nanomaterials*. 11 (2), 393.
- [98]. Gong, Y., Dong, Y., Zhao, B., Yu, R., Hu, S., and Tan, Z., 2020, Diverse applications of MoO₃ for high performance organic photovoltaics: Fundamentals, processes and optimization strategies, *J. Mater. Chem. A*. Royal Society of Chemistry. 8 (3), 978–1009.
- [99]. Cattin, L. et al., 2009, MoO₃ surface passivation of the transparent anode in organic solar cells using ultrathin films, *J. Appl. Phys.* American Institute of Physics. 105 (3), 34507.
- [100]. Costals, E. R., 2017, *Dielectric Metal Dielectric Antireflection Plasmonic Layers*, Universitat Politècnica de Catalunya.
- [101]. Liu, W., Ma, H., and Walsh, A., 2019, Advance in photonic crystal solar cells, *Renew. Sustain. Energy Rev.* Elsevier Ltd. 116 (September), 109436.
- [102]. Lova, P., Manfredi, G., and Comoretto, D., 2018, Advances in Functional Solution Processed Planar 1D Photonic Crystals, *Adv. Opt. Mater.* 6 (24), 1800730.

- [103]. Yablonovitch, E., Gmitter, T. J., and Leung, K. M., 1991, Photonic band structure: The face-centered-cubic case employing nonspherical atoms, *Phys. Rev. Lett.* APS. 67 (17), 2295.
- [104]. John, S., 1987, Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices, *Phys. Rev. Lett.* APS. 58 (23), 2486.
- [105]. Zhen-hua, W. U., Si-min, L. I., Wen-tao, Z., and Feng-yan, G. A. O., 2016, Back reflector of solar cells consisting of one-dimensional photonic crystal and double-layered two-dimensional photonic crystal, *Acta Photonica Sin.* 45 (2), 223003.
- [106]. Yu, W. et al., 2012, Semitransparent polymer solar cells with one-dimensional (WO₃/LiF) N photonic crystals, *Appl. Phys. Lett.* American Institute of Physics. 101 (15), 153307.
- [107]. Zhang, J. et al., 2019, Highly efficient semitransparent organic solar cells with color rendering index approaching 100, *Adv. Mater.* Wiley Online Library. 31 (10), 1807159.
- [108]. Allard, N. et al., 2010, Germafluorenes: new heterocycles for plastic electronics, *Macromolecules.* ACS Publications. 43 (5), 2328–2333.
- [109]. Zhou, E. et al., 2010, Diketopyrrolopyrrole-based semiconducting polymer for photovoltaic device with photocurrent response wavelengths up to 1.1 μm , *Macromolecules.* ACS Publications. 43 (2), 821–826.
- [110]. Kanimozhi, C., Balraju, P., Sharma, G. D., and Patil, S., 2010, Synthesis of diketopyrrolopyrrole containing copolymers: a study of their optical and photovoltaic properties, *J. Phys. Chem. B.* ACS Publications. 114 (9), 3095–3103.
- [111]. Hou, J. et al., 2008, Bandgap and molecular energy level control of conjugated polymer photovoltaic materials based on benzo [1, 2-b: 4, 5-b'] dithiophene, *Macromolecules.* ACS Publications. 41 (16), 6012–6018.
- [112]. Pan, H. et al., 2006, Synthesis and Thin-Film Transistor Performance of Poly (4, 8-didodecylbenzo [1, 2-b: 4, 5-b'] dithiophene), *Chem. Mater.* ACS Publications. 18 (14), 3237–3241.
- [113]. Ullah, I., Shah, S. K., Wali, S., Hayat, K., Khattak, S. A., and Khan, A., 2017, Enhanced efficiency of organic solar cells by using ZnO as an electron-transport layer, *Mater. Res. Express.* IOP Publishing. 4 (12), 125505.
- [114]. Scharber, M. C. et al., 2006, Design rules for donors in bulk-heterojunction solar cells-Towards 10 % energy-conversion efficiency, *Adv. Mater.* 18 (6), 789–794.
- [115]. Greiner, M. T. and Lu, Z. H., 2013, Thin-film metal oxides in organic semiconductor devices: their electronic structures, work functions and interfaces, *NPG Asia Mater.* Nature Publishing Group. 5 (7), e55–e55.
- [116]. Tokito, S., Noda, K., and Taga, Y., 1996, Metal oxides as a hole-injecting layer for an organic electroluminescent device, *J. Phys. D. Appl. Phys.* IOP Publishing. 29 (11), 2750.

- [117]. Greiner, M. T., Chai, L., Helander, M. G., Tang, W., and Lu, Z., 2012, Transition metal oxide work functions: the influence of cation oxidation state and oxygen vacancies, *Adv. Funct. Mater.* Wiley Online Library. 22 (21), 4557–4568.
- [118]. Wang, F., Qiao, X., Xiong, T., and Ma, D., 2008, The role of molybdenum oxide as anode interfacial modification in the improvement of efficiency and stability in organic light-emitting diodes, *Org. Electron.* Elsevier. 9 (6), 985–993.
- [119]. Meyer, J. et al., 2008, Transparent inverted organic light-emitting diodes with a tungsten oxide buffer layer, *Adv. Mater.* Wiley Online Library. 20 (20), 3839–3843.
- [120]. Andersson, A., Johansson, N., Bröms, P., Yu, N., Lupo, D., and Salaneck, W. R., 1998, Fluorine Tin Oxide as an Alternative to Indium Tin Oxide in Polymer LEDs, *Adv. Mater.* Wiley Online Library. 10 (11), 859–863.
- [121]. Yip, H., Hau, S. K., Baek, N. S., Ma, H., and Jen, A. K., 2008, Polymer solar cells that use self-assembled-monolayer-modified ZnO/metals as cathodes, *Adv. Mater.* Wiley Online Library. 20 (12), 2376–2382.
- [122]. Roest, A. L., Kelly, J. J., Vanmaekelbergh, D., and Meulenkaamp, E. A., 2002, Staircase in the Electron Mobility of a ZnO Quantum Dot Assembly due to Shell Filling, *Phys. Rev. Lett.* APS. 89 (3), 036801.
- [123]. Gilot, J., Barbu, I., Wienk, M. M., and Janssen, R. A. J., 2007, The use of ZnO as optical spacer in polymer solar cells: theoretical and experimental study, *Appl. Phys. Lett.* American Institute of Physics. 91 (11), 113520.
- [124]. Dodge, M. J., 1984, Refractive properties of magnesium fluoride, *Appl. Opt.* Optical Society of America. 23 (12), 1980–1985.
- [125]. Lajaunie, L., Boucher, F., Dessapt, R., and Moreau, P., 2013, Strong anisotropic influence of local-field effects on the dielectric response of α -MoO₃, *Phys. Rev. B.* APS. 88 (11), 115141.
- [126]. Zhan, T., Shi, X., Dai, Y., Liu, X., and Zi, J., 2013, Transfer matrix method for optics in graphene layers, *J. Phys. Condens. Matter.* 25 (21), 215301.
- [127]. Yan, H. et al., 2012, Tunable infrared plasmonic devices using graphene/insulator stacks, *Nat. Nanotechnol.* Nature Publishing Group. 7 (5), 330–334.
- [128]. Bonaccorso, F., Sun, Z., Hasan, T., and Ferrari, A. C., 2010, Graphene photonics and optoelectronics, *Nat. Photonics.* Nature Publishing Group. 4 (9), 611–622.
- [129]. Yeh, P., 1988, Optical waves in layered media, Wiley New York.
- [130]. Yang, C., Liu, D., Bates, M., Barr, M. C., and Lunt, R. R., 2019, How to Accurately Report Transparent Solar Cells, *Joule.* Elsevier Inc. 3 (8), 1803–1809.
- [131]. Shin, D. and Choi, S. H., 2018, Recent Studies of Semitransparent Solar Cells, *Coatings.* 8 (10), 329.

- [132]. Ohta, N. and Robertson, A. R., 2005, *Colorimetry: Fundamentals and Applications*, West Sussex, John Wiley & Sons, ISBN: 9780470094723.
- [133]. Li, Z., Ma, T., Yang, H., Lu, L., and Wang, R., 2021, Transparent and Colored Solar Photovoltaics for Building Integration, *Sol. RRL*. 5 (3), 1–21.
- [134]. Kelly, K. L., 1963, Lines of Constant Correlated Color Temperature Based on MacAdam's (u,v) Uniform Chromaticity Transformation of the CIE Diagram, *J. Opt. Soc. Am.* Optical Society of America. 53 (8), 999.
- [135]. Huang, J. S., Chou, C. Y., Liu, M. Y., Tsai, K. H., Lin, W. H., and Lin, C. F., 2009, Solution-processed vanadium oxide as an anode interlayer for inverted polymer solar cells hybridized with ZnO nanorods, *Org. Electron.* Elsevier. 10 (6), 1060–1065.
- [136]. Lampande, R., Kim, G. W., Boizot, J., Kim, Y. J., Pode, R., and Kwon, J. H., 2013, A highly efficient transition metal oxide layer for hole extraction and transport in inverted polymer bulk heterojunction solar cells, *J. Mater. Chem. A*. 1 (23), 6895.
- [137]. Jouane, Y. et al., 2011, Room temperature ZnO growth by rf magnetron sputtering on top of photoactive P3HT:PCBM for organic solar cells, *J. Mater. Chem.* 21 (6), 1953–1958.
- [138]. Qin, P., He, Q., Ouyang, D., Fang, G., Choy, W. C. H., and Li, G., 2017, Transition metal oxides as hole-transporting materials in organic semiconductor and hybrid perovskite based solar cells, *Sci. China Chem.* 60 (4), 472–489.
- [139]. Kyaw, A. K. K., Sun, X. W., Jiang, C. Y., Lo, G. Q., Zhao, D. W., and Kwong, D. L., 2008, An inverted organic solar cell employing a sol-gel derived ZnO electron selective layer and thermal evaporated MoO₃ hole selective layer, *Appl. Phys. Lett.* 93 (22), 221107.
- [140]. Tao, C. et al., 2008, Performance improvement of inverted polymer solar cells with different top electrodes by introducing a MoO₃ buffer layer, *Appl. Phys. Lett.* 93 (19), 2006–2009.
- [141]. Cheun, H. et al., 2011, Roles of thermally-induced vertical phase segregation and crystallization on the photovoltaic performance of bulk heterojunction inverted polymer solar cells, *Energy Environ. Sci.* 4 (9), 3456.
- [142]. Wang, J. C. et al., 2010, Highly efficient flexible inverted organic solar cells using atomic layer deposited ZnO as electron selective layer, *J. Mater. Chem.* 20 (5), 862–866.
- [143]. Tao, C. et al., 2009, Role of tungsten oxide in inverted polymer solar cells, *Appl. Phys. Lett.* 94 (4), 043311.
- [144]. Tao, C., Xie, G., Meng, F., Ruan, S., and Chen, W., 2011, Tailoring Spatial Distribution of the Optical Field Intensity in Semitransparent Inverted Organic Solar Cells, *J. Phys. Chem. C*. 115 (25), 12611–12615.
- [145]. Zilberberg, K. et al., 2011, Inverted Organic Solar Cells with Sol-Gel Processed High Work-Function Vanadium Oxide Hole-Extraction Layers, *Adv. Funct. Mater.* 21 (24),

4776–4783.

- [146]. Terán-Escobar, G., Pampel, J., Caicedo, J. M., and Lira-Cantú, M., 2013, Low-temperature, solution-processed, layered V_2O_5 hydrate as the hole-transport layer for stable organic solar cells, *Energy Environ. Sci.* 6 (10), 3088.
- [147]. Li, F. et al., 2014, Semitransparent inverted polymer solar cells employing a sol-gel-derived TiO_2 electron-selective layer on FTO and $MoO_3/Ag/MoO_3$ transparent electrode, *Nanoscale Res. Lett.* 9 (1), 579.
- [148]. Wang, Z. et al., 2014, Improvement of transparent silver thin film anodes for organic solar cells with a decreased percolation threshold of silver, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* Elsevier. 127 , 193–200.
- [149]. Wang, Z. et al., 2015, Flexible ITO-Free Organic Solar Cells Based on MoO_3/Ag Anodes, *IEEE Photonics J.* 7 (1), 1–9.
- [150]. Kim, H., Lee, K. T., Zhao, C., Guo, L. J., and Kanicki, J., 2015, Top illuminated organic photodetectors with dielectric/metal/dielectric transparent anode, *Org. Electron.* Elsevier B.V. 20 , 103–111.
- [151]. Chang, L. et al., 2020, Optimising Non-Patterned $MoO_3/Ag/MoO_3$ Anode for High-Performance Semi-Transparent Organic Solar Cells towards Window Applications, *Nanomaterials.* 10 (9), 1759.

EKLER

EK 1. Transfer Matris Metodu ile Optik Karakteristiklerin, AVT, Kromatiklik, CRI, $\Delta_{u,v}$, CCT Değerlerinin Hesaplanması

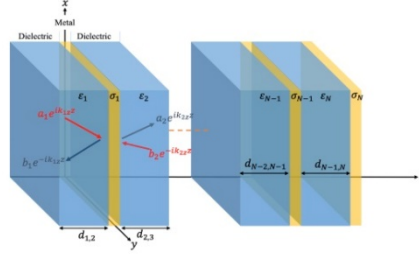
Tez kapsamında tasarlanan OSC, DMD ve 1D-PC yapılarının TMM ile optik karakteristikleri, AVT, Kromatiklik CRI, $\Delta_{u,v}$ ve CCT değerleri Matlab programı kullanılarak hesaplanmıştır. Programın tasarlanan Matlab Guide arayüzü ve Simulink görüntüsü Şekil EK 1.1’de verilmektedir.

Tasarlanan Simulink algoritmaları yalıtkan, yarıiletken ve metal tek tabakaya veya sonsuz tabakaya sahip soğurucu, yansıtıcı ve geçirgen yapılar için tasarlanmış olup dinamik değişkenli fonksiyonların algoritmaları birleştirilerek oluşturulmuştur.

Transfer Matrix Methods (TMM) - Optical Design

Çağlar Çetinkaya at caglarcetinkaya@istanbul.edu.tr*

Erman Çokduygulular at erman.cokduygulular@iuc.edu.tr*

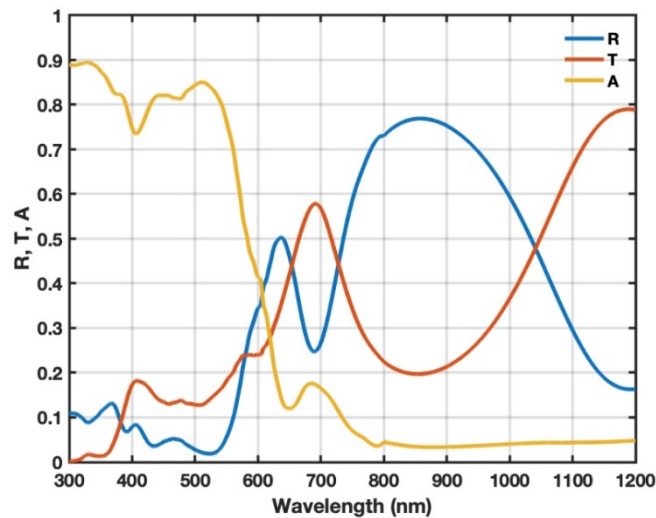


```

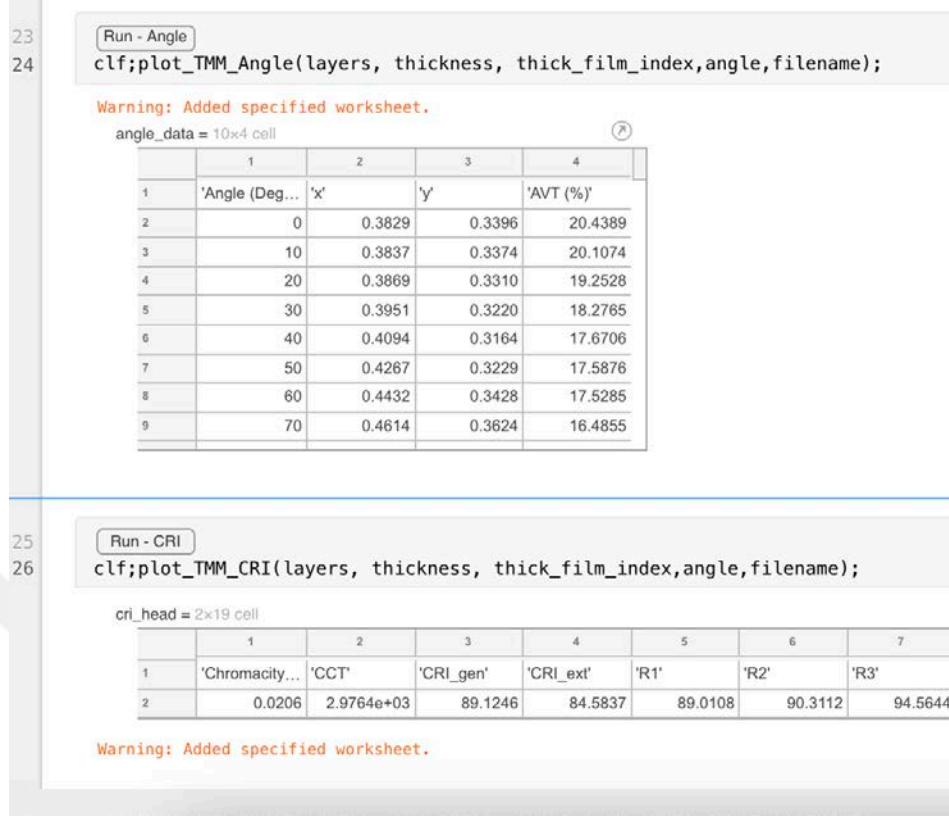
1 clear;clc;
2 angle = 0 ; % Geliş açısı (Derece)
3 thick_film_index = None ;
4
5 layers(1) = { Vac }; thickness(1) = 1 ;%nm
6 layers(2) = { ZnO }; thickness(2) = 40 ;
7 layers(3) = { P3HT:PCBM }; thickness(3) = 130 ;
8 layers(4) = { MoO3 }; thickness(4) = 10 ;
9 layers(5) = { Ag }; thickness(5) = 6 ;
10 layers(6) = { MoO3 }; thickness(6) = 30 ;
11 layers(7) = { MgF2 }; thickness(7) = 127 ; %1
12 layers(8) = { MoO3 }; thickness(8) = 82 ; %1
13 layers(9) = { MgF2 }; thickness(9) = 127 ; %2
14 layers(10) = { MoO3 }; thickness(10) = 82 ; %2
15 layers(11) = { Vac }; thickness(11) = 1 ;
16
17
18 Run - Full Run
19 % Örnek: filename = 'data.xls'
20 % Jph: Active layer & Active Layer Thickness (d_al)
21 filename = "ST-OSC_P3HT-PCBM_DBR-set700-2T-127-82.xls";
22 clf;plot_TMM(layers, thickness, thick_film_index,angle,filename);

```

Average Visible Transmittance = 20.44 %
 Jph = 0.3208 mA/cm²
 Color Coordinates
 x = 0.3829
 y = 0.3396
 Warning: Imaginary parts of complex X and/or Y arguments ignored



Warning: Added specified worksheet.



Şekil EK 1.1: Transfer Matris Metodu ile Optik Karakteristiklerin, AVT, Kromatiklik, CRI, $\Delta_{u,v}$, CCT değerlerinin hesaplandığı Matlab Simulink arayüzü.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Çağlar ÇETİNKAYA
Doğum Yeri	
Doğum Tarihi	
Uyruğu	☒ T.C. ☐ Diğer:
Telefon	
E-Posta Adresi	
Web Adresi	avesis.istanbul.edu.tr/caglarcetinkaya

Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Fakülte	Fen Fakültesi
Bölümü	Fizik Bölümü
Mezuniyet Yılı	14.06.2013

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	Fizik Anabilim Dalı
Programı	Katı Hal Fiziği Programı

Doktora	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	Fizik Anabilim Dalı
Programı	Katı Hal Fiziği Programı

Makale ve Bildiriler	
Makaleler	
Çetinkaya, Ç. et al., 2021, Evaluation on output parameters of the inverted organic solar cells depending on transition-metal-oxide based hole-transporting materials, <i>Opt. Mater. (Amst)</i> . 120 (August), 111457.	
Çetinkaya, Ç. et al., 2021, Design and fabrication of a semi-transparent solar cell considering the effect of the layer thickness of MoO ₃ /Ag/MoO ₃ transparent top contact on optical and electrical properties, <i>Sci. Rep.</i> 11 (1), 1–17.	
Bairam, C. et al., 2021, Structural, morphological, optical and electrical properties of the Ti doped-ZnO (TZO) thin film prepared by RF sputter technique, <i>Phys. B Condens. Matter</i> . 616 (May), 413126.	

Kınacı, B. et al., 2021, Effect of Annealing on the Surface Morphology and Current–Voltage Characterization of a CZO Structure Prepared by RF Magnetron Sputtering, *Semiconductors*. 55 (1), 28–36.

Çetinkaya, Ç., Çokduygulular, E., Özen, Y., Candan, İ., Kınacı, B. ve Özçelik, S., 2021, Determination of surface morphology and electrical properties of MoO₃ layer deposited on GaAs substrate with RF magnetron sputtering, *J. Mater. Sci. Mater. Electron*.

Çokduygulular, E., Çetinkaya, Ç., Yalçın, Y. ve Kınacı, B., 2020, A comprehensive study on Cu-doped ZnO (CZO) interlayered MOS structure, *J. Mater. Sci. Mater. Electron*. Springer US. 31 (16), 13646–13656.

Kınacı, B., Çetinkaya, Ç., Çokduygulular, E., Efker, H. İ., Sönmez, N. A., and Özçelik, S., 2020, Negative capacitance phenomena in Au/SrTiO₃/p-Si heterojunction structure, *J. Mater. Sci. Mater. Electron*. 31 (11), 8718–8726.

Dönmez, Ö. et al., 2020, Electronic transport in n-type modulation-doped AlGaAs/GaAsBi quantum well structures: influence of Bi and thermal annealing on electron effective mass and electron mobility, *Semicond. Sci. Technol*. 35 (2), 025009.

Güzelçimen, F. et al., 2020, The effect of thickness on surface structure of rf sputtered TiO₂ thin films by XPS, SEM/EDS, AFM and SAM, *Vacuum*. 182 (September), 109766.

Muhammetgulyyev, A. et al., 2019, V-groove etched 1-eV-GaInNAs nipi solar cell, *Appl. Phys. A*. Springer Berlin Heidelberg. 125 (1), 27.

Çetinkaya, Ç. et al., 2018, Optical properties of n- and p-type modulation doped GaAsBi/AlGaAs quantum well structures, *J. Alloys Compd*. Elsevier B.V. 739 , 987–996.

Çetinkaya, Ç., Mutlu, S., Dönmez, Ö. ve Erol, A., 2017, Characterization of emitted light from travelling Gunn domains in Al_{0.08}Ga_{0.92}As alloy based Gunn devices, *Superlattices Microstruct*. Elsevier Ltd. 111 , 744–753.

Bildiriler

Çetinkaya, Ç., Çokduygulular, E., Dönmez, Ö. , Erol, A. , Nutku, F. ve Yıldırım, S., 2018, Electrical properties of modulation doped Bi-containing highly mismatched quantum well structures, *Turkish Physical Society 34th International Physics Congress*, Muğla, Türkiye.

Rajhi A. et al., 2018, Electronic transport in n-type modulation doped GaInAs/GaAs and GaInNAs/GaAs quantum well structures, *Türk Fizik Derneği 34. Uluslararası Fizik Kongresi*, Muğla, Türkiye

Çetinkaya, Ç., Çokduygulular, E., Nutku, F. , Dönmez, Ö. , Erol, A. , 2018, Effect of Bi alloying on the optical properties of modulation doped GaAsBi/AlGaAs

quantum well structures, *Türk Fizik Derneği 34. Uluslararası Fizik Kongresi*, Muğla, Türkiye.

Çetinkaya, Ç. et al., 2017, Optical and electrical properties of n- and p-type modulation doped, *International Conference on Condensed Matter and Material Sciences*, Adana, Türkiye.

Çetinkaya, Ç. et al., 2017, Photoluminescence study of GaAs/AlGaAs and GaAsBi/AlGaAs modulation doped quantum well structures, *Türk Fizik Derneği 33. Uluslararası Fizik Kongresi*, Muğla, Türkiye.

Çetinkaya, Ç. et al., 2017, Optical characterization of n- and p-type modulation doped GaAsBi/AlGaAs quantum well structures, *8. International Workshop on Bismuth-Containing Semiconductors Philipps-Universität Marburg*, Marburg, Almanya.

Çetinkaya, Ç., Mutlu, S., Dönmez, Ö., Erol, A., 2016, Light emission from $\text{Al}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{As}$ Gunn device, *Nanophotonics and Micro/Nano Optics International Conference*, Paris, Fransa.

Mutlu, S., Çokduygulular, E., Çetinkaya, Ç., Nutku, F., Dönmez, Ö., Erol, A., 2016, Electronic transport properties of p-type GaInNAs/GaAs quantum well structures, *Türk Fizik Derneği 32. Uluslararası Fizik Kongresi*, Muğla, Türkiye.

Çetinkaya, Ç., Mutlu, S., Dönmez, Ö., Erol, A., 2016, Stimulated light emission from Gunn domains in Fabry Pérot $\text{Al}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{As}$ Gunn Device, *Türk Fizik Derneği 32. Uluslararası Fizik Kongresi*, Muğla, Türkiye.

Çetinkaya, Ç., Mutlu, S., Dönmez, Ö., Erol, A., 2015, Investigation of light emission based on Gunn effect in n-type GaAs, *9th International Physics Conference of the Balkan Physical Union*, İstanbul, Türkiye.

Çetinkaya, Ç., Dönmez, Ö., Erol, A., Arıkan, Ç., Puustinen, J., Mircea, G., 2013, Electronic Transport in n- and p-type modulation doped $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}_y\text{As}_{1-y}/\text{GaAs}$ quantum well structures, *30th International Physics Congress by Turkish Physical Society*, Muğla, Türkiye.