

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METAL NANOPARÇACIKLARLA KATKILANMIŞ
İLETKEN POLİMERLERLE, ORGANİK GÜNEŞ HÜCRELERİNİN
GELİŞTİRİLMESİ

NESRİN TÖRE ŞEN
DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

GEBZE
2017

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METAL NANOPARÇACIKLARLA
KATKILANMIŞ İLETKEN
POLİMERLERLE, ORGANİK GÜNEŞ
HÜCRELERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

NESRİN TÖRE ŞEN
DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF. DR. SAVAŞ BERBER

GEBZE
2017

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

DEVELOPMENT OF
SOLAR CELLS WITH METAL
NANOPARTICLE DOPED CONDUCTING
POLYMERS

NESRİN TÖRE ŞEN

A THESIS SUBMITTED FOR THE
DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY
DEPARTMENT OF PHYSICS

THESIS SUPERVISOR
PROF. DR. SAVAŞ BERBER

GEBZE

2017



GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 31/05/2017 tarih ve 2017/29 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 23/06/2017 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Nesrin TÖRE ŞEN 'in tez çalışması Fizik Anabilim Dalında DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Savaş BERBER

ÜYE

: Prof. Dr. Faik MİKAİLZADE

ÜYE

: Prof. Dr. Kemal ÖZDOĞAN

ÜYE

: Prof. Dr. Ahmet ALTINDAL

ÜYE

: Yrd. Doç. Dr. Serkan BÜYÜKKÖSE

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

Doç. Dr. Arif Çağdaş AYDINOĞLU
Gebze Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

Bu çalışmada metal nano-parçacıkların yığın heteroeklem yapıdaki organik güneş hücrelerindeki etkileri sistematik deneysel çalışmalar ile incelenmiştir.

Öncelikle gümüş (Ag) nano parçacıkların organik fotovoltatik cihazın foto-aktif katmanına katkılanması ile hücre verimlilik değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu artışın, kullanılan nanoparçacık konsantrasyonuna göre değişimi ve nano parçacık içeren yapının absorbanı, yüzey özellikleri, empedans değeri ve çalışma ömrü ile ilgili veriler referans yapı ile karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. %1 oranında nano parçacık ihtiva eden hücrelerin verim artışının saçılma ve yerleşmiş yüzey plazmon rezonansı etkileri ile absorbası değeriindeki artıştan kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Daha sonra, gümüş (Ag) nano parçacıkların PCDTBT tabanlı güneş hücrelerinin fotoaktif katmanına katkılanması sayesinde hücre verim değerlerinin değişimi incelenmiştir. Foto-aktif tabakaya katkılanan gümüş nano parçacık (%0,7 oranında) yapısının hücre verimini arttırdığı gözlemlenmiştir. Nano parçacık içeren yapının absorbanı, yüzey özellikleri, empedans değeri gibi fiziksel nicelikleri incelenmiştir. Verim değeriindeki artışın saçılma ve yerleşmiş yüzey plazmon polariton etkileri sayesinde artan absorbanı değeriinden kaynaklandığı sonucuna ulaşılmıştır. Nano parçacıkların verimliliğe olan olumlu etkisi ikinci deney kapsamında üretilen tersine çevrilmiş yapıdaki güneş hücrelerinde de gözlemlenmiştir. Üçüncü deneysel çalışma kapsamında altın (Au) nano parçacıkların, hol iletken tabakaya katkılanması ile verim değeriinde artışa sebep olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçların IPCE dataları ile uyumlu sonuçlar ürettiği gözlemlenmiştir. Son olarak dördüncü deney kapsamında altın nanorod yapıların hol iletken tabakaya katkılanması ile hücre verimliliğinin arttığı gözlemlenmiş ve elde edilen sonuçların IPCE dataları ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

Sistematik olarak gerçekleştirilen bu dört deney çalışmasında farklı aktif polimer malzemeler kullanılmıştır. Metal nano parçacıklar ile katkılanmış güneş hücrelerinin performans verileri ve analiz çalışmaları, nano yapıların hücrelerin verimlilik ve dayanıklılık özelliklerini pozitif yönde etkilediğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Organik Güneş Hücreleri, Altın Nano-Parçacıklar, Gümüş Nano-Parçacıklar, Nano-Parçacıklar ile Katkılanmış Organik Güneş Hücreleri.

SUMMARY

In this study, the effects of metal nanoparticles on organic bulk heterojunction solar cells were investigated by systematic experimental studies.

Firstly, it has been observed that cell efficiency values are enhanced by the incorporation of silver (Ag) nanoparticles into the photo-active layer of the organic photovoltaic device. This increase was analyzed comparatively according to the concentration of the nanoparticle used and the absorbance, surface properties, impedance value, and service life of the nanoparticle-containing structure compared with the given reference structure. It has been estimated that the increase in efficiency of cells containing 1% nanoparticles is due to the scattering and localized surface plasmon resonance effects and the increase in absorbance value. Subsequently, cell efficiency changes were investigated by incorporating silver (Ag) nanoparticles into the photoactive layer of PCDTBT-based solar cells. It was observed that the silver nanoparticle doped (0.7%) structure of the photoactivity layer was increases cell efficiency. The physical quantities such as the absorbance of the nano-particle-containing structure, the surface properties, and the impedance value were investigated. The result of the increase in efficiency is due to increased absorbance due to scattering and localized surface plasmon polariton effects. The positive effect of nanoparticles on efficiency was also observed in the inverted solar cells produced in the second experiment. In the third experimental study, it was observed that gold (Au) nanoparticles increased the efficiency value by doping into the hol conducting layer. It has been observed that the results obtained are consistent with the IPCE data. Finally, in the fourth experiment, it was observed that the cell efficiency increased with the doping of the gold nanorod structures into the hol conducting layer, and the results were observed to be consistent with the IPCE data.

In these four systematic experiments, different active polymer materials were used. Performance data and analysis studies of metal nanoparticle-doped solar cells have shown that nanostructures affect the efficiency and durability properties of cells positively.

Key Words: Organic Solar Cells, Gold Nanoparticles, Silver Nanoparticles, Solar Cells Doped With Metal Nanoparticles.

TEŞEKKÜR

Başta, doktora eğitimimde ve akademik hayatımda desteğini ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen ve engin bilgi ve tecrübesi ile yolumu aydınlatarak bu çalışmanın oluşmasını sağlayan; akademik ve profesyonel yaşantımın başından beri sonsuz güven ve desteği ile yanımda durmuş olan çok sevgili değerli hocam Dr. Elif ALTÜRK PARLAK'a

Sağlamış olduğu teknik imkanlar dolayısıyla tüm TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi kurumuna ve TÜBİTAK Fotonik ve Elektronik Sensörler Laboratuvarı ekibine,

Tez çalışmam kapsamında bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşarak destek olan saygıdeğer hocam ve danışmanım Prof. Dr. Savaş BERBER'e,

Ve tüm hayatım boyunca sevgi, güven ve ilgilerini benden esirgemeyen sevgili annem Şadiye TÖRE'ye, babam Recep TÖRE'ye, ablam Neslihan YILMAZ'a ve ağabeylerim Osman TÖRE ve Gökhan TÖRE'ye,

Son olarak hayatıma girdiği günden beri desteğini ve güvenini her daim hissettiren sevgili eşim Gürkan ŞEN'e en gönülden teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiv
TABLolar DİZİNİ	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği	1
2. GÜNEŞ HÜCRELERİ	3
2.1. Güneş Hücrelerinin Gelişimi ve Çeşitleri	3
2.2. Organik Güneş Hücrelerinin Sınıflandırılması	9
2.2.1. Tek Katmanlı Organik Güneş Pilleri	9
2.2.2. Çift Katmanlı Organik Güneş Pilleri	10
2.2.3. Yığın Heteroeklem Yapıdaki Organik Güneş Pilleri	12
2.2.4. Hibrit Yapılı ve Tersine Çevrilmiş Geometrideki Güneş Pilleri	14
2.3. Organik Güneş Hücrelerinin Çok Katmanlı Yapısı	15
2.3.1. Film Kaplama Teknikleri	15
2.3.2. Organik Güneş Hücreleri Üretim Süreci	19
2.4. Organik Güneş Hücrelerinin Çalışma İlkesi	23
2.5. Organik Güneş Hücrelerinin Karakterizasyon Teknikleri	31
2.5.1. Akım Gerilim Karakterizasyonu	31
2.5.2. Solar Spektrum ve Solar Simülatör	31
2.5.3. UV-Vis spektroskopisi	35
2.5.4. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) Ölçümleri	37
3. METAL NANO PARÇACIKLAR	39
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLAR	46
4.1. Foto-Aktif Tabakadaki Gümüş Nano Parçacıkların Güneş Hücrelerindeki Etkileri	46
4.1.1 PPE-PPV tabanlı güneş hücreleri ile gerçekleştirilen çalışmalar (Deney-1)	46

4.1.2 PCDTBT tabanlı güneş hücreleri ile gerçekleştirilen çalışmalar (Deney-2)	55
4.2. Hol İletken Tabakadaki Altın Nano Parçacıkların Güneş Hücrelerindeki Etkisi	62
4.2.1 P3HT tabanlı güneş hücreleri ile gerçekleştirilen çalışmalar (Deney-3)	62
4.2.2 PCBTDPDP tabanlı güneş hücreleri ile gerçekleştirilen çalışmalar (Deney-4)	66
4.3 Organik Güneş Hücresi Modülü Teorik Güç Hesaplaması	71
5. SONUÇ VE YORUM	75
KAYNAKLAR	78
ÖZGEÇMİŞ	87
EKLER	88

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u> <u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklamalar</u>
A	: Akseptör
A	: Alan
a	: Parçacık polarize edilebilirliği (İng. polarizability)
AFM	: Atomik Kuvvet Mikroskopu (İng. Atomic Force Microscope)
Ag	: Gümüş
AgNP	: Gümüş nanoparçacık
AM	: Hava Kütlesi (İng. Air Mass)
AnE-Pvstat	: Antrasen içeren PPE PPV polimeri (İng. anthcene-containing
:PCBM	poly (p-phenylene-ethynylene)-alt-poly(p-phenylene-vinylene) (PPE-PPV) polymer)
Au	: Altın
AuNP	: Altın nanoparçacık
AuNR	: Altın nanorod
C	: Karbon
CdTe	: Kadmiyum Tellür (İng. Cadmium Telluride)
CIGS	: Bakır İndiyum Galyum Selenyum (İng. Copper Indium Galium Selenium)
cm	: Santimetre
CO ₂	: Karbondioksit
Cs ₂ CO ₃	: Sezyum Klorür
CuPc	: Bakır Fitalosiyanın (İng. Copper Phthalocyanine)
D	: Donör
E _i	: İçsel potansiyel enerji
G	: Yük üretim oranı
hole	: Boşluk (hol)
HOMO	: En Yüksek Doldurulmuş Moleküler Yörünge (İng. Highest Occupied Molacular Orbital)
IPCE	: Gelen fotonun yük taşıyıcısına dönüşüm verimi (İng. Incident Photon to Charge Carrier Efficiency)

ISOS	: Uluslararası OPV stabilite zirvesi (İng. International Summit on OPV Stability)
ITO	: İndiyum Kalay Oksit (İng. Indium Tin Oxide)
İng	: İngilizcesi
J	: Akım Yoğunluğu
J_0	: Doyum Akımı
J_{dark}	: Karanlık Akımı
J_{sc}	: Kısa Devre Akımı Yoğunluğu
k_B	: Boltzmann Sabiti
l	: Elektrotlar arası uzaklık
LED	: Işık Yayan Diyot (İng. Light Emmiting Diode)
LSPR	: Yerleşik yüzey plazmon rezonansı (İng. Localized Surface Plasmn Resonance)
LUMO	: En Düşük Doldurulmamış Moleküler Yörünge (İng. Lowest Unoccupied Molacular Orbital)
mA	: Miliamper
MDMO-PPV	: Metoksi Di Metil Oktiloksi Pli Fenilen Vinilen(İng. Poly[2-methoxy-5-(3',7'-dimethyloctyloxy)-1,4-phenylenevinylene])
ms	: Milisaniye
MW	: Megawatt
nm	: Nanometre
NP	: Nanoparçacık
NR	: Nanorod
P3HT	: Poli 3 Hegzil Tiyofen (İng. Poly 3 HexylThiophene)
PbS	: Kurşun Sülfür
PCBM	: Fenil Bütirik Asit Metil Ester (İng. Phenyl-C61-butyric acid methyl ester)
PCBTDP	: Poly[N-90-heptadecanyl-2,7carbazole-alt-3,6-bis(thiophen-5-yl)-2,5-dioctyl-2,5-dihydropyrrolo[3,4]pyrrole-1,4-dione] Malzemesi için kullanılan sinonim
PCDTBT	: Poly[N-9'-heptadecanyl-2,7-carbazole-alt-5,5-(4',7'-di-2-thienyl-2',1',3'-benzothiadiazole)], Poly[[9-(1-octylnonyl)-9H-

	carbazole-2,7-diyl]-2,5-thiophenediyl-2,1,3-benzothiadiazole-4,7-diyl-2,5-thiophenediyl] Malzemesi için kullanılan sinonim
PCE	: Güç Dönüşüm Verimliliği (İng. Power Conversion Efficiency)
PEDOT : PSS	: Polie Etilen Di Oksi Tiyofen : Poli Stiren Sülfonat (İng. Poly Eethylene Dioxythiophene: Poly Styrene Sulfonate)
PPE-PPV	: Poli Fenilen Etilen -Poli Fenilen Vinilen (İng. Poly-Phenylene Vinylene Poly-Phenylene Ethylene)
PPV	: Poli Fenilen Vinilen (İng. Poly Phenylene Vinylene)
PV	: Fotovoltaik (İng. Photovoltaic)
q	: Yük
Q _{sc}	: Saçılma verimi (İng. Scattering Efficiency)
R2R	: Rulodan Rulo (İng. Roll to Roll)
R _{ct}	: Yük Transfer Direnci (İng. Charge Transfer Resistance)
R _s	: Seri Direnç
s	: Saniye
SMU	: Kaynak Ölçüm Ünitesi (İng. Source Measure Unit)
STM	: Taramalı Tünelleme Mikroskobu (İng. Scanning Tunneling Microscope)
T	: Sıcaklık
TEM	: Geçirimli Elektron Mikroskobu (İng. Transmission Electron Microscope)
TiO ₂	: Titanyum Dioksit
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
TW	: Terrawatt
UME	: Ulusal Metroloji Enstitüsü
UV	: Ultraviole
uv-vis	: Ultraviyole-Görünür
V	: Volt
V	: Parçacık hacmi
V _{app}	: Uygulanan gerilim
vb.	: Ve benzeri
V _{bi}	: Yerleşik Potansiyel (İng. Built in potential)
V _{oc}	: Açık Devre Gerilimi (Oper Circuit Voltage)

ZnO	: Çinko Oksit
Zim	: Sanal (Ing. Imaginary) Empedans
Zre	: Gerçek (Ing. Real) Empedans
Å	: Angström
α	: Absorbsiyon sabiti
ϵ_m	: Ortam dielektrik fonksiyonu
ϵ_p	: Parçacık dielektrik fonksiyonu
η	: Verim
μ	: yük mobilitesi
ν_{cs}	: Üretilen eksitonların serbest yüklere ayrışma olasılığı
π	: pi
π^*	: pi
τ	: Yük taşıyıcılarının ömrü
τ_n	: Efektif ömür süresi
Φ_{foton}	: Birim alan başına düşen foton sayısı
ω	: Açısal hız
\$	: Amerikan Doları
°C	: Santigrat Derece
μm	: Mikrometre

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>	
2.1 :	Solarmer tarafından üretilen ticari kıvrılabilen OPV	6
2.2 :	Güneş hücresi sınıflarında maksimum verim değerleri	8
2.3 :	Tek katmanlı organik güneş hücresi yapısı	9
2.4 :	P tipi Schottky cihaz yapısı	10
2.5 :	Çift katmanlı organik güneş hücresi yapısı	11
2.6 :	Çift katmanlı yapıda yük geçişleri	12
2.7 :	Yığın heteroeklem güneş hücresi yapısı	12
2.8 :	Yığın heteroeklem yapıda yük geçişleri	13
2.9 :	Döndürerek kaplamanın şematik gösterimi	16
2.10 :	Eldivenli Kutu Sistemi	16
2.11 :	Döndürerek Kaplama (Spin Coating) Cihazı	17
2.12 :	Vakum buharlaştırma sistemi temsili görünümü	18
2.13 :	Termal Buharlaştırma Sistemi Görüntüsü	19
2.14 :	Organik güneş hücresi üretim süreçleri	19
2.15 :	PEDOT (altta) ve PSS (üstte) in kimyasal yapıları	20
2.16 :	Isıtıcı yüzey üzerinde çözücü buharlaştırma işlemi	21
2.17 :	Deneylerde elde edilen organik güneş hücresi numune örnekleri	21
2.18 :	Solar simülatör altında test edilen örnek görünümü	22
2.19 :	Cihazın çalışma aşamaları, ışığın absorbe oluşundan yüklerin toplanmasına kadar	23
2.20 :	a) Organik fotovoltatik cihazların ideal J-V eğrileri, b) Organik fotovoltatik cihazların eşdeğer elektrik devreleri	24
2.21 :	Logaritmik skalada çizilmiş olan J-V eğrisi ve farklı bölgelerin eşdeğer devredeki karşılıkları	27
2.22 :	Solar spektrum grafiği	33
2.23 :	(a) Işın radyasyonunun atmosferdeki katmanlardan saçılma miktarı ve (b) zenith açısı tanımı	33
2.24 :	Solar simülatör (Güneş benzeştiricisi)	34
2.25 :	Solar Simülatör	34
2.26 :	UV VİS cihazının çalışma ilkesi	35

2.27 :	AFM sistemi temsili çalışma prensibi	37
2.28 :	Kantilever çalışması temsili şematik gösterimi	38
3.1 :	Yerleşik Yüzel Plazmon Rezonansı Etkisi	41
3.2 :	Yerleşik Yüzey Plazmon Rezonansı (LSPR) etkisi	41
3.3 :	Saçılma etkisinin şematik gösterimi	42
3.4 :	Yüzey Plazmon Polariton Etkileri şematik gösterimi	43
4.1 :	Deney 1 Konfigürasyon-1 Cihaz Yapısı	47
4.2 :	Deney 1 Konfigürasyon-2 Cihaz Yapısı	47
4.3 :	Deney 1 Konfigürasyon-3 Cihaz Yapısı	47
4.4 :	Gümüş nano parçacıkların TEM görüntüsü	48
4.5 :	AnE-PVstat ve PCBM malzemelerinin kimyasal yapıları	48
4.6 :	a) AgNP içermeyen, b) 0.02 AgNP içeren, c) 0.01 AgNP içeren güneş hücresi için akım yoğunluğu- gerilim eğrileri	49
4.7 :	AnE-PVstat:PCBM ($2\mu\text{m} \times 2\mu\text{m}$)	49
4.8 :	AnE-PVstat:PCBM + %0,02 Ag NP ($2\mu\text{m} \times 2\mu\text{m}$)	50
4.9 :	AnE-PVstat:PCBM ($5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$)	50
4.10 :	AnE-PVstat:PCBM + %0,02 Ag NP ($5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$)	50
4.11 :	Deney-1 UV Vis absorbsiyon eğrileri	51
4.12 :	Deney-1 IPCE ölçüm sonuçları	52
4.13 :	Deney-1 AC Empedans ölçümleri	53
4.14 :	ISOS-L1 testi normalize a)Voc, b) Jsc, c)FF ve d)Verim ve zaman eğrileri	55
4.15 :	Deney 2 Konfigürasyon-1 Cihaz Yapısı	56
4.16 :	Deney 2 Konfigürasyon-2 Cihaz Yapısı	56
4.17 :	Deney 2 Konfigürasyon-3 Cihaz Yapısı	56
4.18 :	Deney 2 Konfigürasyon-4 Cihaz Yapısı	57
4.19 :	Deney 2 Konfigürasyon-5 Cihaz Yapısı	57
4.20 :	Deney 2 Konfigürasyon-6 Cihaz Yapısı	58
4.21 :	PCDTBT:PCBM karışımından oluşan filmin absorbsiyon eğrileri	59
4.22 :	Deney-2 AC Empedans ölçümleri	59
4.23 :	PCDTBT:PCBM ($5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$)	60
4.24 :	PCDTBT:PCBM + Ag NPs ($5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$)	61

4.25 :	PCDTBT:PCBM ($2\mu\text{m} \times 2\mu\text{m}$)	61
4.26 :	PCDTBT:PCBM + Ag NPs ($2\mu\text{m} \times 2\mu\text{m}$)	61
4.27 :	Deney 3 Konfigürasyon-1 Cihaz Yapısı	62
4.28 :	Deney 3 Konfigürasyon-2 Cihaz Yapısı	63
4.29 :	Deney 3 Konfigürasyon-3 Cihaz Yapısı	63
4.30 :	Deney 3 Konfigürasyon-4 Cihaz Yapısı	63
4.31 :	Altın nano parçacıkların TEM görüntüsü	64
4.32 :	Altın nano parçacıkların boyut histogramı	65
4.33 :	Altın nano parçacık katkılanmış güneş hücrelerinin akım yoğunluğu- gerilim karakteristiği	65
4.34 :	Hol iletken katmanına altın nano parçacık katkılanmış olan OPV cihazın IPCE grafikleri	66
4.35 :	PCBTDP ve PC61BM kimyasal yapıları	67
4.36 :	Deney 4 Konfigürasyon-1 Cihaz Yapısı	67
4.37 :	Deney 4 Konfigürasyon-2 Cihaz Yapısı	67
4.38 :	Deney 4 Konfigürasyon-3 Cihaz Yapısı	68
4.39 :	Deney 4 Konfigürasyon-4 Cihaz Yapısı	68
4.40 :	Deney-4 cihaz enerji diyagramı	69
4.41 :	Deney 4 J-V eğrisi a) referans, b) %0,5 AuNR katkılı, c) %1 AuNR katkılı, d) %2 AuNR katkılı hücre	69
4.42 :	Deney 4 IPCE eğrileri a) referans, b) %0,5 AuNR katkılı, c) %1 AuNR katkılı, d) %2 AuNR katkılı hücre	70
4.43 :	Hücre Modül ve Panel Yerleşimi	71
4.44 :	Hücre Modül ve Panel için teorik verim hesaplamaları	72
4.45 :	PV modül verim değerlerinin teorik, laboratuvar ve modül verim değerleri açısından kıyaslanması	72
4.46 :	Serilerin birbirine uymayan hücrelerinin kombine kısa devre akımı	73
4.47 :	Eşleşmeyen hücrelerin kombine açık devre voltajının (Voc) paralel olarak hesaplanması	74

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 : Fosil yakıtların tükenme ömürleri	4
3.1 : Organik Fotovoltaik Cihazlarda Nano Parçacık Katkılama Uygulamaları	44
4.1 : Deney 1 sonuçları	48
4.2 : ISOS Standart Testleri Tablosu	54
4.3 : ISOS-L-1 koşulları tablosu	54
4.4 : Deney 2 sonuçları	58
4.5 : Deney 3 sonuçları	64
4.6 : Deney 4 sonuçları	70
5.1 : Deneysel Sonuçlar Özet Tablosu	77

1. GİRİŞ

1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Tezin amacı, polimer tabanlı ve nano parçacıklar ile katkılanmış organik fotovoltaiik cihaz uygulamaları ile organik güneş hücreleri yapımıdır. Verimli organik fotovoltaiik cihaz üretimi için hangi alternatif nanomalzemelerin ve üretim yöntemlerin kullanılabileceği sorusuna cevap aranmış; bu maksatla gümüş/altın gibi nanoparçacıklar ile katkılanan güneş hücrelerinin performanslarındaki değişim gözlenmiş ve değişimin fiziksel gerekçeleri analiz edilerek yorumlanmıştır. Ayrıca organik güneş pillerinin modül halindeki performansları hakkında verim hesaplamasında izlenebilecek pratik bir yöntem önerilerek teorik hesaplamalar ve laboratuvar koşullarında elde edilen pratik sonuçlar kıyaslanmıştır.

Bu tez çalışmasında, öncelikli olarak üretilen fotovoltaiik cihazların verim değerlerinin artırılmasına yönelik çalışmalar yürütülmüştür. Bu kapsamda cihazların akım gerilim karakteristikleri, katmanlarına ait atomik kuvvet mikroskobu görüntüleri, ışık geçirgenlik değerleri ve empedans verileri toplanarak yorumlanmıştır. Ayrıca üretilmiş olan güneş hücrelerinin verim, kısa devre akımı, açık devre gerilimi ve dolum faktörü verileri alınarak yorumlanmıştır. Gümüş katkılanmış şekilde üretilen cihazların yaşlandırma koşullarına maruz bırakılmaları ile bu veriler periyodik olarak alınarak cihazların ömürlerine ilişkin yorum/öngörü yapılmıştır. Uzun ömürlü ve yüksek verimli fotovoltaiik cihazlar için üretilecek güneş hücrelerinin tasarım ve prototip üretim çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Bu tezin literatüre yapmış olduğu katkı:

- Gelişmekte olan bir teknoloji olarak değerlendirilen organik fotovoltaiik cihazların verim değerlerinin artırılması için bir yöntem önerilmesi,
- Elektrik üretiminde aktif olarak kullanılabilirliğinin değerlendirilmesi,
- Maliyet ve az enerji tüketimi açısından çevreye olan olumlu etkisinin incelenmesi,
- Organik güneş hücresi üretiminde kullanılabilecek olan metal nano yapıların hücre verimliliğine etkilerinin detaylı şekilde incelenmesidir.

Modül verim hesaplama çalışmaları ile elde edilen verilerin sanayileşmeye hazır bir prototip üründe (organik güneş pili modülü) kullanımı öncesi yapılan teorik hesaplamalar büyük önem taşımakta, ayrıca bu iki çalışmanın literatüre tümleşik olarak aktarılması özgün değer taşımaktadır.

Bu tez çalışmasının ikinci bölümünde güneş hücrelerinin gelişimi ve çeşitleri hakkında bilgi verilmiş, organik ve inorganik güneş hücrelerinin temel farkları ve çalışma prensipleri anlatılmıştır. Organik güneş hücrelerinin katmanlı yapılarına göre sınıflandırılması ve verilen yapılara göre çalışma prensipleri literatür araştırmaları kapsamında detaylı olarak incelenmiştir. Ayrıca organik güneş hücrelerinin çok katmanlı yapıları ve bu katmanların üretim süreçlerine dair bilgi verilmiş ve organik güneş hücrelerinin çalışma ilkesi kapsamlı olarak anlatılmıştır. Yine ikinci bölümde, üretilen organik güneş hücrelerinin bu tez çalışmasında uygulanan karakterizasyon teknikleri ve bu tekniklerin amaç ve içerikleri hakkında bilgi verilmiştir.

Üçüncü bölümde ise metal nano parçacıklar ve bu parçacıkların güneş hücrelerine olan etkilerinin fiziksel temelleri literatürde yer alan çalışmalar ışığında açıklanmıştır.

Tez çalışmasının dördüncü bölümünde ise gerçekleştirilmiş olan deneysel çalışmalar ve ölçüm/karakterizasyon çalışmaları hakkında detaylı bilgi verilmiştir.

Beşinci bölümde ise yapılan deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlara yer verilmiş ve bu sonuçlar analiz edilerek yorumlanmıştır.

2. GÜNEŞ HÜCRELERİ

2.1. Güneş Hücrelerinin Gelişimi ve Çeşitleri

Küresel enerjinin geleceği, bilimsel toplulukların ele almakta olduğu tartışmasız en önemli konudur. Enerji olmadan toplumumuz var olamaz. Enerji olmadan hastalıkları tedavi etmek için ilaçları bulamaz veya ilaçlar ilgililere ulaştırılamaz, sularımızı temizleyemez, araçlarımızı kullanamaz, bilgisayarlarımızı çalıştıramayız, hatta geceleri ışık ve enerji olmadığı için çalışamayız. Mevcut durumda enerji ihtiyacımız günde 15TW seviyesindedir ve dünya popülasyonu arttıkça bu seviye de artmaya devam edecektir. Nobel ödülü sahibi ve Rice Üniversitesi Fizik ve Astronomi kürsüsü Profesörü olan Richard E. Smalley gelecekte yaşanması muhtemel enerji kıtlığını ifade eden “Terawatt Challenge” teriminin isim babasıdır. Smalley “Terawatt Challenge” terimini enerji hedeflerimizi gerçekleştirmek için kullanılacak teknolojilerin meydan okuması olarak tanımlamıştır. Enerji hedeflerimizi ise 21. Yüzyılda enerji zenginliği için bir temel oluşturabilecek “en az 20. yüzyılda petrol ve doğalgazın etkili olabildiği seviyede etkin olarak kullanılabilir, alternatif enerji kaynakları teknolojilerinin geliştirilmesi” olarak tanımlamaktadır.

Bugün dünyada tüketilen enerjinin çok büyük bölümü fosil yakıtlardan karşılanmaktadır[1]. Fosil yakıt kaynakları enerji tüketimini uzun yıllardır karşılayabilmiş olsa bile alternatif kaynak arayışında olmak için pek çok sebep vardır. Kaynak kıtlığı ve CO₂ kirliliği fosil yakıtlara karşı savunulan en temel ve güçlü argümanlardır.

Uluslararası projeksiyonlara göre, bilinen rezervlerle dünyadaki petrole 46-50 yıl arasında ömür hesaplanırken, görünür doğalgaz rezervlerinin tükenme ömrünün de 63 ile 119 yıl arasında olacağı öngörülmektedir. Kömürün ise 119 ile 176 yılda tükeneceği hesaplanmıştır.

BP ve HSBC Bank’ın verilerinden derlenen bilgilere göre, talebin artmaması durumunda bile dünyada petrol rezervleri, 46 ile 50 yıl arasında tükenme riskiyle karşı karşıya bulunmaktadır.

Gelişmekte olan ülkelerin gelirlerindeki artış sonucu milyarlarca aracın daha yollara çıkacağı ve bu durumun, 2050’de küresel petrol talebinin yüzde 110 oranında

artmasına ve günlük ortalama 190 milyon varile yükselmesine neden olacağı tahmin edilmektedir.

BP'nin raporuna göre, fosil yakıtların tükenme ömürleri yıl bazında aşağıdaki gibidir:

Tablo 2.1 Fosil yakıtların tükenme ömürleri.

BÖLGE	PETROL	DOĞALGAZ	KÖMÜR
Kuzey Amerika	15,0 yıl	11,3 yıl	235,0 yıl
Orta ve Güney Amerika	80,6 yıl	53,2 yıl	181,0 yıl
Avrupa – Asya	21,2 yıl	64,8 yıl	236 yıl
Orta Doğu	84,8 yıl	-	-
Afrika	36,0 yıl	72,4 yıl	131,0 yıl
Asya - Pasifik	14,4 yıl	37,0 yıl	59,0 yıl
TOPLAM DÜNYA	45,7 yıl	62,8 yıl	119,0 yıl
Avrupa	8,2 yıl	14,1 yıl	55,0 yıl
OECD	13,5 yıl	14,4 yıl	174,0 yıl
Eski Sovyet Ülkeleri	25,5 yıl	84,2 yıl	474,0 yıl

Yenilenebilir kaynaklar, örneğin rüzgar, güneş hücreleri, güneş termal paneller, jeotermal, deniz ve gelgitler, mevcut enerji arz yöntemlerinin çok küçük bir kesitini oluşturmaktadırlar. Sadece Avrupa'da 2011 yılı sonunda 93,957 MW değerindeki kapasite ile rüzgar enerjisi başı çeken alternatif enerji arz yöntemidir [2]. Pek çok Avrupa ülkesi Danimarka %25,9, İspanya %15,6, Almanya %10,6 gibi enerji ihtiyaçlarını alternatif enerji kaynakları ile sağlamaktadır.

Gelecekte ise enerji kaynak dağılımında alternatif ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım payları çok daha yüksek olacaktır. Bu durumda güneş enerjisi, çevre dostu ve güvenilir bir enerji kaynağı olarak en mükemmel seçimlerden biri olacaktır. Yaşadığımız her gün Güneş tarafından Dünya'ya gelen enerji tam olarak $1,2 \times 10^5$ TW seviyesindedir. Günümüzdeki enerji ihtiyacı olarak açıklanan >20 TW seviyesine kıyasla çok daha yüksek seviyededir. Bu enerjiyi verimli bir şekilde kullanabilmek için güneşten aldığı foton enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren güneş hücrelerini kullanmamız ve geliştirmemiz gerekmektedir.

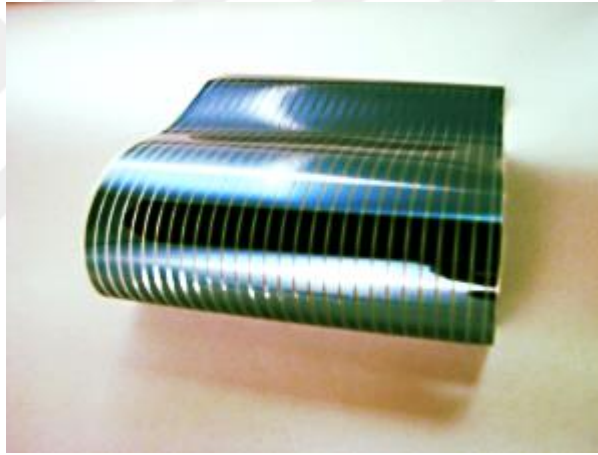
Güneş enerjisinin en direkt kullanım şekli gelen fotonların fotovoltaiik etki aracılığıyla elektrik enerjisine çevrilmesidir. Bu etki ile güneş hücreleri geliştirme serüveni 1839 yılında Becquerel'in çalışmaları ile başlamış, 1954 yılında Bell laboratuvarlarında geliştirilen %6'lık silisyum p-n eklem güneş hücresi ile devam etmiştir. 1958 yılında uzay çağına gelindiğinde Amerikan uydusu Vanguard 1 in üzerine 6 adet güneş hücresi yerleştirilmiştir. Uzay uygulamalarında güneş hücresi kullanımı son derece verimli sonuçlar ortaya koymuştur. Hikâyenin başlangıcında güneş enerjisinden elde edilen elektrik enerjisinin maliyeti silisyum alttaşların pahalı olması sebebiyle 1971 yılında watt başına 100\$ gibi bir seviyede başlamış ancak geçen zamanla silisyum endüstrisinde yaşanan gelişmeler sebebiyle bu seviye ciddi oranda azalmış, günümüzde de azalmaya devam etmektedir. Öyle ki üçüncü nesil güneş hücrelerinde kullanılan malzemelerin farklılıkları ile azalan maliyetler sayesinde hedef 1\$/watt şeklinde açıklanmaktadır.

Güneş hücresi teknolojileri geleneksel olarak 3 nesil şeklinde sınıflandırılmaktadır. Birinci nesil güneş hücreleri temelde silisyum yapılar üzerine p-n eklem yapıları oluşturulan hücrelerdir ve yaklaşık %15-20 verim seviyelerinde performans göstermektedirler. Birinci nesil güneş hücreleri ticarileşmiş olmaları sebebiyle marketin en çok tercih edilen ürünlerini oluşturdukları için evlerin çatılarında, fabrikalarda ve güneş tarlalarında kullanılmaktadırlar. Birinci nesil güneş hücrelerinin en önemli avantajı yüksek performans ve kararlılık (stabilite) özellikleridir. Ancak üretimleri sırasında, sertlikleri sebebiyle yaşanan kırılma kaynaklı kazalar ve üretiminde fazla enerjiye ihtiyaç duymaları, ayrıca üretiminde çevre dostu olmayan malzemeler kullanılması nedeniyle bilim insanları yeni nesil güneş hücreleri arayışını sürdürmektedir.

İkinci nesil güneş hücreleri amorf silisyum, CIGS ve CdTe vb. tabanlı güneş hücreleridir. Tipik performansları %10-15 mertebesinde. Bu yapılarda temel olarak pahalı kristal yapıları silisyumlardan kaçınmak ve üretim maliyetlerini düşürmek hedefi ile hareket edilmiştir. İkinci nesil amorf tabanlı yapılar belirli bir dereceye kadar esnek şekilde üretilmektedirler. Ancak ikinci nesil güneş hücrelerinde kullanılan vakum prosesleri ve yüksek sıcaklık işlemleri sebebiyle üretimdeki fazla enerji ihtiyacı etkinliğini korumakta, ayrıca katmanlı yapılarda kullanılan “doğada az bulunur elementler” bu nesil için sınırlayıcı faktörler olarak görülmektedir.

Üçüncü nesil güneş hücrelerinde temelde küçük-molekül veya polimer gibi organik malzemeler kullanılmaktadır. “Polimer Tabanlı Güneş Hücreleri” organik

güneş hücreleri sınıfının bir alt sınıfı olarak ele alınmaktadır. Polimer güneş hücrelerinde araştırma ilgisi son yıllarda muazzam seviyede artmış durumdadır [3]. Polimer güneş hücreleri diğer bir taraftan pek çok avantaja sahiptirler hızlı, ucuz, büyük ölçekli üretime uygun, kimyacılar tarafından ihtiyaca yönelik olarak sentezlenen özgün veya ticari hazır malzeme tabanlı olmaları sayesinde ticarileşmeleri çok daha kolaydır. Ayrıca polimer güneş hücreleri, gazete basımında kullanılan en bilinen endüstriyel araç olan rulodan ruloya (R2R) baskı teknolojisini kullanarak üretilmektedir. Performans ve kararlılık seviyeleri birinci ve ikinci nesil güneş hücrelerinden daha düşük olmasına rağmen rulodan ruloya kaplama ve malzemenin çeşitlenebilmesi, ve daha kolay bir yöntem olması sayesinde büyük umutlar vadetmektedir. Solarmer firmasının organik güneş pilleri ile ilgili ticarileşmiş ürünleri de bulunmaktadır.



Şekil 2.1: Solarmer tarafından üretilen ticari kıvrılabilen OPV.

Bunların dışında ince film güneş hücrelerinin yeni bir sınıfı olan ve çok küçük alanlarda %20 nin ötesinde performans göstermesi sebebiyle dikkat çeken perovskite tabanlı güneş hücreleri de çok büyük bir potansiyele sahiptir [3]. Üçüncü nesil güneş hücreleri ayrıca pahalı ve yüksek performanslı çoklu-eklem yapılı güneş hücresini de kapsamaktadır.

Organik güneş pilleri hakkında yapılan çalışmalar ilk olarak küçük organik moleküllerin [4,5,6,7] deneysel çalışmaları ile başlamış sonrasında ise yarıiletken organik polimerlerin [8-11] geliştirilmesi ile devam etmiştir. Yarıiletken organik malzemelerin elektrik akımını iletme potansiyelleri ve solar spektrumun UV-vis bölgesindeki foton absorpsiyon kapasiteleri yapılarında bulunan karbon atomlarının

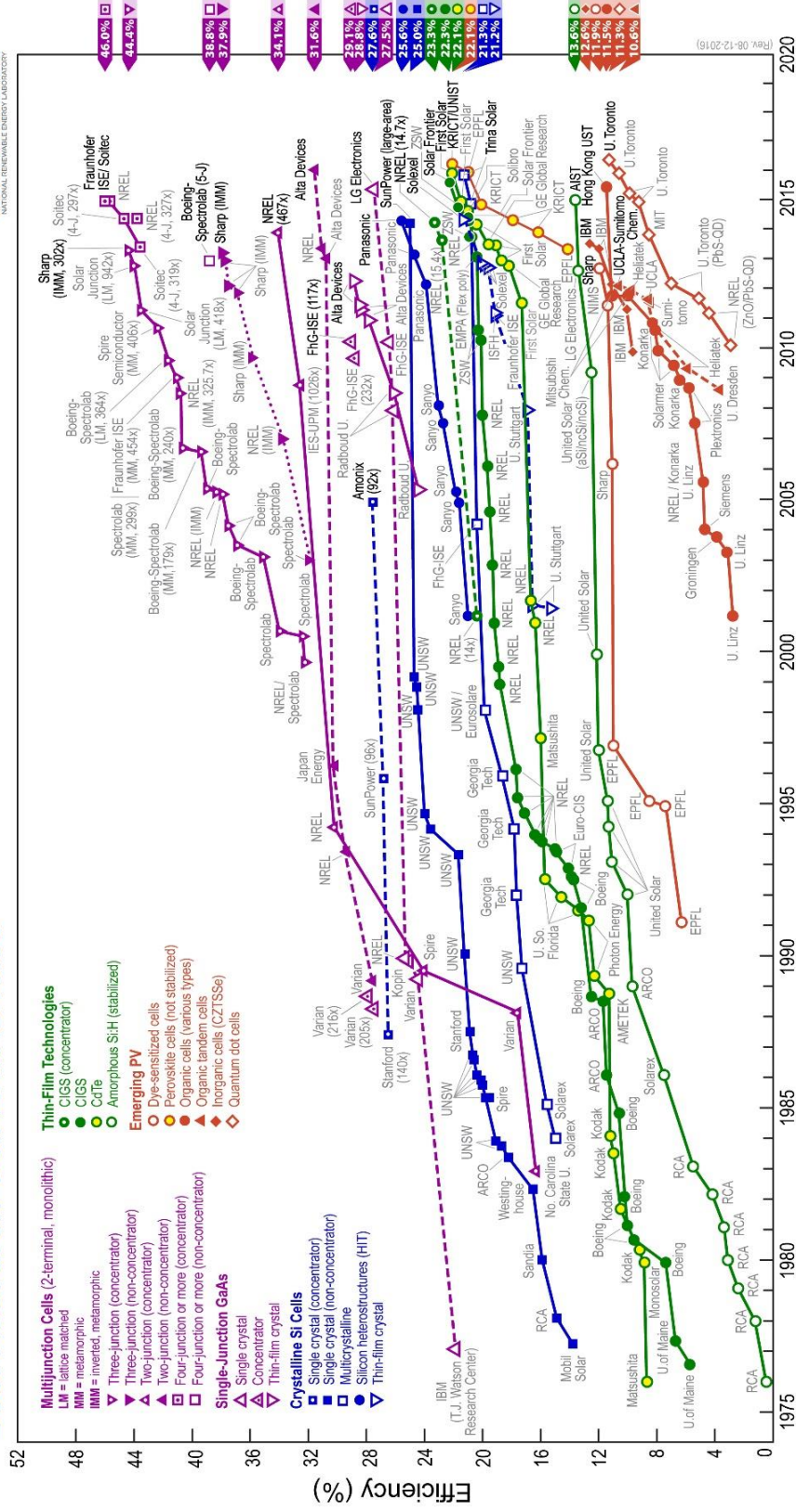
sp^2 -hibritleşmesinden kaynaklanmaktadır. İletken polimerlerde doğrusal zincir formundaki sp^2 -hibriti olan karbon atomları dizisinde her sp^2 - karbon atomu hibritinin pz-orbitalindeki elektronu, hemen yanındaki pz elektronları ile π -bağı oluşturur, bu durum dimerizasyona (tekli ve çiftli bağların sıralı düzenli yapısı, Peierls bükülmesi vb.) sebep olur. İzomerik etkilerden dolayı π elektronları lokal olmayan (delocalized) durumdadırlar. Bu sebeple yüksek elektronik kutuplanabilir özelliktedirler (polarizability).

Organik yarı iletken malzemelerin katı haldeki inorganik yarıiletken malzemelerden en önemli farkları, yük taşıyıcı mobilitelerinin görece düşük olmasıdır [12]. Bu özellik organik yarı iletken cihaz tasarımlarında ve verimlerinde büyük bir etkiye sahiptir. Fakat organik yarıiletkenlerin absorpsiyon sabitleri daha büyüktür (genelde $\geq 10^5 \text{ cm}^{-1}$), bu durum düşük mobilitenin 100nm’de bile erişilen yüksek absorpsiyon değerleri ile kıyaslanabilir olmasını sağlamaktadır. Amorf yapıdaki organik malzemelerin, kristal yapıdaki inorganik malzemelere göre diğer bir dezavantajı, eksiton oluşumundaki difüzyon uzunluğunun görece kısa olmasıdır [6, 13-21]. Eksitonlar güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürüldüğü süreçte önemli bir göreve sahiptirler. Eksitonların fotovoltaiik dönüşüm süreci sonunda oluşması beklenen serbest yüklere ayrışmaları için güçlü elektrik alanlara ihtiyaç vardır. Bu ihtiyaç eksitonun bağlanma enerjilerinin bir sonucudur ve organik yarı iletkenlerdeki eksiton bağlanma enerjileri inorganik yarıiletkenlerdekine kıyasla daha yüksektir [22-23]. Organik yarıiletkenlerin bu özellikleri, üretilen cihazların ince (genellikle 100nm mertebesinde) ve hafif olmasını mümkün kılmaktadır.

Organik yarıiletken malzemeler genellikle boşluk (hole) iletken özelliktedir ve optik bant aralıkları silisyuma kıyasla daha geniştir ($\sim 2\text{eV}$ civarındadır). Bu nedenle organik yarı iletkenlerin güneş ışınlarını soğurma miktarı silisyuma göre daha düşüktür. Bununla birlikte organik malzemelerin kimyasal sentez metotları yoluyla modifikasyonları sayesinde, bant aralıklarının ayarlanabilmesi ve düşük maliyetli, büyük ölçekli üretimlerin mümkün olması sağlanmaktadır. Bu özellikler akademik ve endüstriyel çevrelerin dikkatini çekmekte ve bu konu üzerindeki çalışmalar yoğun bir şekilde sürmektedir.

2016 yılı sonu itibarıyla güneş enerjisi sektöründe uygulanan güneş hücresi üretim tekniklerinin ve elde edilen maksimum sonuçların tümünün yer aldığı karşılaştırmalı grafik Şekil 2.2’de verilmiştir [24].

Best Research-Cell Efficiencies

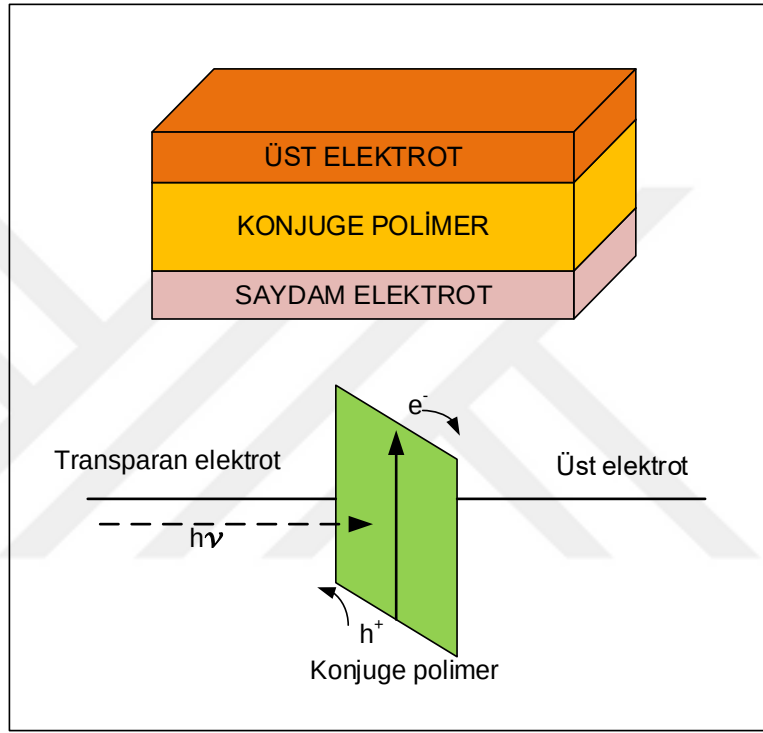


Şekil 2.2 Güneş hücresi sınıflarında maksimum verim değerleri.

2.2. Organik Güneş Hücrelerinin Sınıflandırılması

2.2.1. Tek Katmanlı Organik Güneş Pilleri

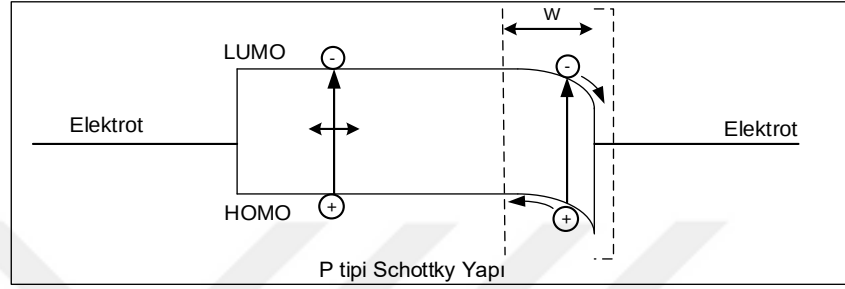
Tek katmanlı organik fotovoltaiik güneş pillerinin yapısı, bir tarafındaki saydam (ışık geçirgen) özellikte olmak üzere iki elektrot arasında sıkıştırılmış haldeki organik ve ışığa duyarlı yarıiletkenlerden oluşmaktadır.



Şekil 2.3: Tek katmanlı organik güneş hücresi yapısı.

İlk organik fotovoltaiik güneş pilleri, farklı iş fonksiyonları olan metal elektrotlar arasında sandviç yapıda birleştirilen tek katmanlı organik tabakalar kullanılarak üretilen piller olmuştur [4],[5]. Tek katmanlı cihazların, elektron ve boşluğun sırasıyla moleküler π^* ve π -orbitallerine enjeksiyonundaki asimetriden [26] ve p-tipi (boşluk iletken) olan organik katman ve düşük iş fonksiyonlu metalin oluşturdukları Schottky bariyerden kaynaklandığı değerlendirilmiştir [5], [27]-[29]. Kayıt altına alınmış olan güç dönüşüm verimlilik değerleri genellikle 10^{-3} - $10^{-2}\%$ mertebelerindedir. Fakat ilk zamanlar için kayda değer olarak merocyanine boya ile 0,7% verime ulaşılmıştır [30],[31]. Gerçekleştirilen çalışma kapsamında organik katman metal/metal oksit tabaka ve metal elektrot arasında sandviç yapılmış ve Schottky bariyer etkisi

(metal/insulator/semiconductor (MIS) cihaz yapısı [32]) beklenmiştir. Şekil 2.3’de verilen tek katmanlı yapı 1994 yılında R. N. Marks ve arkadaşları tarafından 50-320 nm kalınlıklarda poly (p- phenylene vinylene) (PPV) in ITO ve düşük iş fonksiyonlu bir katot arasında sandviç yapıda katmanlı olarak birleştirilmesi şeklinde geliştirilmiştir. Bu cihaz için $0,1 \text{ mW/cm}^2$ ’lik ışık şiddeti altında elde edilen kuantum verim değeri 0,1 % olarak kayıt altına alınmıştır [33].



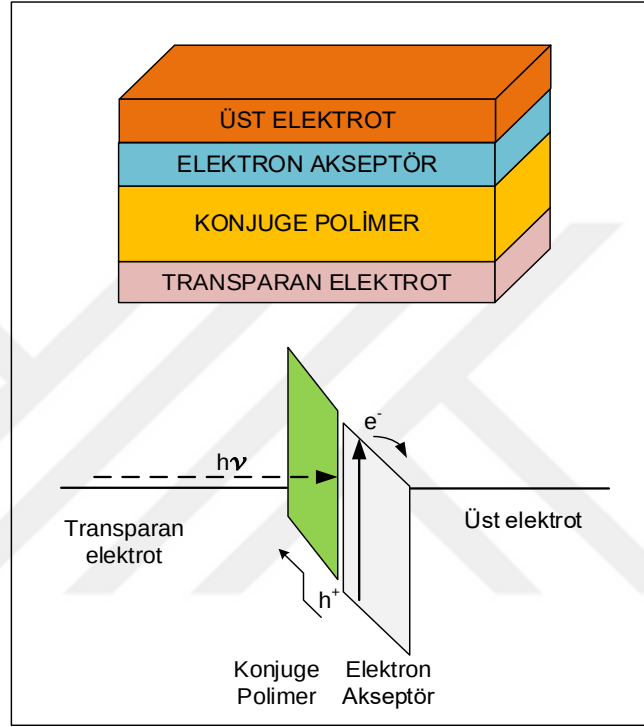
Şekil 2.4: P tipi Schottky cihaz yapısı.

Elde edilen düşük verim değerinin sebebi organik yarıiletkenlerde yük taşıyıcılarının düşük mobiliteli olmalarıdır. Taşıyıcı mobiliteleri organik malzemelerde $10^{-3} \text{ cm}^2/\text{V.s}$ iken kristal silisyum için bu değer $103 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ dir. Yani organik yarı iletkenlerde oluşan yükler elektrotlar tarafından daha uzun sürelerde toplanabilmektedir. Yük transferinin daha yavaş olması verimi düşürmekte ve aynı oranda rekombinasyon (ayrışan yük taşıyıcılarının yeniden birleşmesi) olasılığını artırmaktadır. Diğer bir sorun da oluşan eksitonların ayrışmasıdır, tek katmanlı yapıda eksitonların serbest yüklere ayrışması sadece metal/organik katman ara yüzeylerinde gerçekleşmektedir. Daha sonra bu ayrışmanın donör ve akseptör tipli iki farklı organik yarı iletken oluşturulan eklem yapısında çok daha etkin olarak gerçekleşeceği değerlendirilmiş ve çift katmanlı organik güneş pili yapısı kurgulanmıştır.

2.2.2. Çift Katmanlı Organik Güneş Pilleri

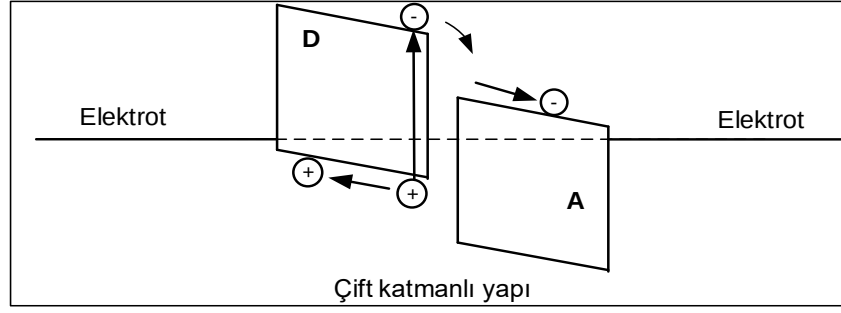
Yaşanan bir diğer önemli gelişme çift katmanlı heteroeklem yapıdaki güneş hücrelerinin tasarlanmasıdır. Çift katmanlı yapıda elektron iletken ve hole iletken özellikteki iki farklı organik katman, metal elektrotlar arasına sıralı şekilde büyütülerek oluşturulan yeni bir tasarım geliştirilmiştir (Şekil 2.5). Tang 1986 yılında yaptığı çalışmada, iki farklı organik yarı iletkeni (p-tipi yarıiletken olan bir

fitalosiyenin türevi ve n-tipi yarıiletken olan bir perilen türevi) transparan iletken oksit bir elektrot ve yarı geçirgen metal bir elektrot arasına koyarak yaklaşık 1% lik bir güç dönüşüm verimi değerini kayıt altına almıştır [34]. ITO/CuPc/PV/Ag yapısı kullanılarak hazırlanan bu güneş hücresi, AM 2 standardındaki solar simülatör altında ölçülmüştür. Bu sonuç uzun yıllar boyunca göz önüne alınan bir referans noktası niteliği kazanmıştır. Ancak yeni bin yılın başlarında bu limit de aşılmıştır [35],[36].



Şekil 2.5: Çift katmanlı organik güneş hücresi yapısı.

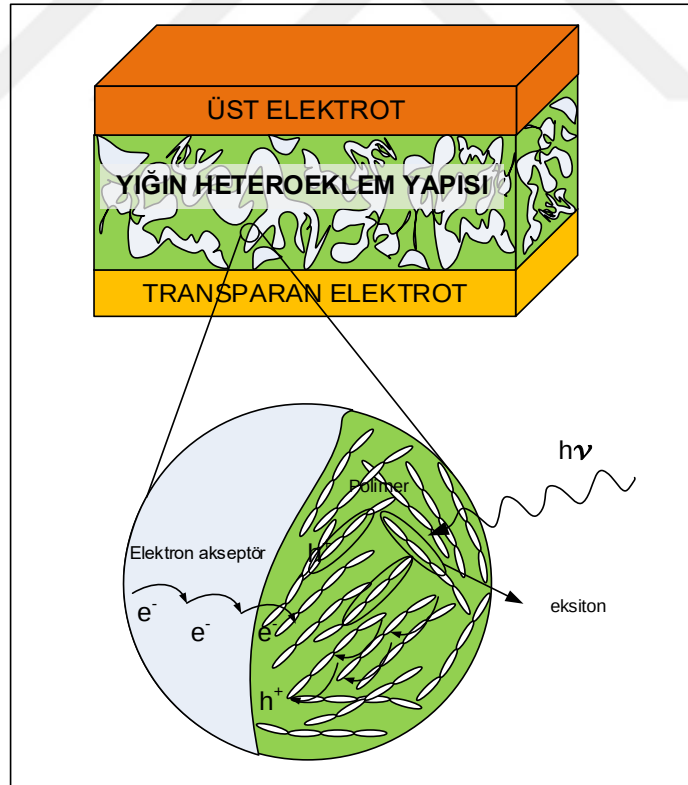
Çift katmanlı yapı için elde edilen verim değerleri inorganik malzeme tabanlı güneş pillerinden daha düşük durumdadır. Bunun nedeni ilk olarak, organik yarıiletkenlerde eksiton difüzyon uzunluğunun çok kısa oluşudur (yaklaşık 10-20 nm civarında). Çift katmanlı yapıdaki yük geçişleri Şekil 2.6'da gösterilmektedir. Bu sorunu gidermek için eksiton difüzyon uzunluğu 20 nm olan buckminsterfullerene C_{60} kullanılmaya başlanmıştır. P. Peumans ve arkadaşları yaptıkları cihazlarında akseptör olarak C_{60} kullandıklarında elde ettikleri güç dönüşüm verimi 3,5 % olmuştur [6].



Şekil 2.6: Çift katmanlı yapıda yük geçişleri.

2.2.3. Yığın Heteroeklem Yapıdaki Organik Güneş Pilleri

Çift katmanlı organik güneş pili yapısında bulunan donör-akseptör ara yüzü kenarlarında oluşan eksitonların çok küçük bir kısmı elektrotlara sürüklenerek ulaşabilmektedir. Yığın heteroeklem yapıda ise donör ve akseptör malzemenin karışımı şeklinde hazırlanan aktif tabaka içerisinde oluşan genişletilmiş ara yüzey sayesinde daha çok miktarda yük taşıyıcısının elektrotlara ulaşması sağlanır.

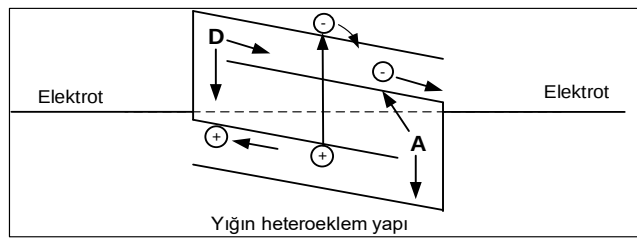


Şekil 2.7: Yığın heteroeklem güneş hücresi yapısı.

Optik olarak uyarılmış konjuge polimerlerden C_{60} molekülüne, fotoindüklenmiş elektron transferinin gözlemlenmesi [37],[38] ve konjuge polimerlere C_{60} molekülü eklenmesinden sonra oldukça yüksek fotoiletkenlik değerlerinin gözlemlenmesi, [39]-[41] polimer fullerene çift katmanlı heteroeklem yapısının [13],[42],[43] ve yığın heteroeklem yapısının [44],[45] geliştirilmesine sebep olmuştur. C_{60} ve C_{60} 'ın türevlerinin kullanılarak çözünürlüğünün artırılması ile önemli bir gelişme sağlanmıştır [46].

Fotoindüklenmiş yük transferinin gerçekleşmesi için polimerin S-uyarılmış seviyesindeki elektronun elektronegatifliği daha yüksek olan C_{60} molekülüne transferinin enerji açısından müsait olması gerekmektedir. Aksi takdirde bu yükseklik polimerin eksiton kaynaklı fotoluminesans miktarında ciddi miktarlarda azalmaya sebep olmaktadır [37]. Elektron p-tipi, yani boşluk iletken polimerden daha çok n-tipi yani elektron iletken C_{60} molekülüne transfer edildikten sonra adlandırmaları elektron geçişine göre sırasıyla donör (D) ve akseptör (A) olarak yapılabilir.

Yığın heteroeklem yapısının içeriği Hiramoto'nun eş zamanlı buharlaştırılmış moleküler yapısına benzemektedir [47],[48]. Yığın heteroeklemde de donör (D) ve akseptör (A) tipinde iki polimer karıştırılarak hazırlanan çözeltiler kullanılmaktadır [49]-[51]. Spin kaplama yöntemi ile kaplanan çözeltili halindeki yapı, ısı işlemler sonunda bu iki farklı polimerin katı yapıdaki ikili karışımı şeklini almaktadır. Diğer bir yaklaşım da iki polimer tabakayı ayrı katmanlar halinde kaplayarak D ve A katmanların ara yüzeyinde aktif bir yapı oluşturmak olmuştur. Bu şekilde hazırlanmış pillerde 2% seviyesinde verim değerleri kayıt altına alınmıştır [52]. Organik güneş pillerindeki hızla gelişmekte olan güç dönüşüm verimleri (PCE) 1.5% ve 10% arasındaki değerlerdedir. Buharlaştırılarak kaplanmış iki katmanlı yapılarda [53],[54] yığın heteroeklem polimer-fullerene yapılarda [55]-[62], eş zamanlı buharlaştırılan moleküler yapılarda [7], [63]-[65] ve organik-anorganik melez cihazlarda [66]-[68] bu aralıktaki verim değerlerine ulaşılmıştır.



Şekil 2.8: Yığın heteroeklem yapıda yük geçişleri.

İçerik olarak yığın heteroekleme benzer şekilde, boyayla duyarlaştırılmış elektrokimyasal güneş pilleri de büyük ölçekte gelişmekte olan bir alandır. İlk adımları Graetzel grubu tarafından atılmış ve büyük ilerleme kat edilmiştir [69]-[75]. Bu alanda merak edilenlere ışık tutacak yayınlar literatürde mevcuttur [76]-[78]. Fakat son yıllarda elektrokimyasal güneş pillerindeki sıvı elektrotların yerini almaya başlayan organik boşluk iletkenleri ile organik heteroeklem yapılarıdaki elektron iletken akseptör anorganik nanomalzemelerin kullanımı, bu iki araştırma dalının beraber gelişmelerini sağlamaktadır. Pratikteki uygulamalar için ise sadece verimlerdeki iyileştirmeler değil organik güneş pillerinin uzun ömürlü hale gelmesini sağlayacak iyileştirmeler de büyük önem arz etmektedir. Organik güneş pillerinin dayanıklılıkları temelde, kullanılan aktif malzemelerin ışıkla bozulmalarından dolayı oldukça düşük seviyededir [56],[79],[90]. Fakat organik LED lere uygulandığı gibi enkapsülasyon teknikleri ile kaplanarak etkin şekilde oksitlenmeye karşı korunabiliyor olsa da daha kesin şekilde ve uzun süreliğine dayanıklılıklarının artırılması arzu edilmektedir. Organik güneş pillerinin kararlılıklarının incelendiği çalışmalarda [81],[82], 10 000 saatin üzerindeki ömür değerlerine ulaşıldığı görülmektedir.

2.2.4. Hibrit Yapılı ve Tersine Çevrilmiş Geometrideki Güneş Pilleri

Yapısında hem organik hem de anorganik yarıiletkenler bulunan güneş pilleri hibrit güneş pilleri olarak adlandırılır. Anorganik yarıiletkenlerin eşsiz özellikleri ile konjuge polimerlerin üstün film yapma özellikleri hibrit güneş pillerinde bir araya gelmiştir. Organik malzemeler genellikle ucuz ve kolay uygulanabilir olmalarının yanı sıra bant genişlikleri ve fonksiyonel özellikleri moleküler yapılarının mimarisi ile değiştirilebilmektedir. Diğer tarafta anorganik yarı iletkenler de farklı formlarda işlenebilir nano-parçacıklar halinde üretilebilirler. Nano-parçacıkların boyutları değiştirilerek bant genişlikleri, ışım ve soğurma spektrumları ayarlanabilmektedir [83].

Hibrit yapılı güneş pilleri üretiminde normal güneş pili yapısından farklı olarak tersine çevrilmiş yapı da kullanılabilmektedir. Burada ITO tabakası anodik katman değil katodik katman olarak görev yapmaktadır. Üst elektrot metali ise anodik kontak olarak çalışır. Ara katmanlar ise bant genişlikleri, iş fonksiyonları ve soğurma spektrumları göz önünde bulundurularak seçilir ve cihaz mimarisi tanımlanır. Tersine

çevrilmiş yapıdaki güneş pillerinde kullanılan malzemeler Cs_2CO_3 , ZnO , CdTe , PbS , TiO_2 dir [84]-[89].

Tersine çevrilmiş yapıdaki güneş pillerinin ömür çalışmaları bu pillerin daha dayanıklı olduklarını göstermiştir [90]. Her ne kadar verim değerleri normal yapıdaki güneş pillerinden düşük olsa da dayanıklıları ve rulodan ruloya seri üretim koşullarında uygulanabilir oluşları sebebiyle tersine çevrilmiş yapıdaki güneş pilleri büyük bir önem arz etmektedir.

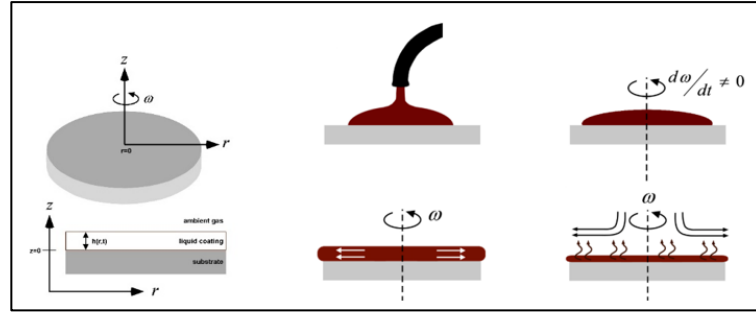
2.3. Organik Güneş Hücrelerinin Çok Katmanlı Yapısı

Organik güneş pilleri, farklı organik ve anorganik malzemelerin, metallerin, çözelti formundaki yarı iletkenlerin farklı kaplama yöntemleri ile katmanlar halinde kaplanması ile çalışır duruma gelen sanatsal ve yaratıcı zekâ ürünleridir. Elektriksel ve optik özellikleri farklı olan her bir katmanın kaplanması için farklı ince film kaplama teknikleri kullanılarak cihaz yapısı oluşturulmaktadır. Dolayısıyla organik güneş pillerinin üretilmesinde ince film teknolojisi büyük rol oynamaktadır.

2.3.1. Film Kaplama Teknikleri

2.3.1.1. Döndürerek Kaplama

Döndürerek kaplama, kalınlıkları 20 nm ile 300 nm arasında değişen düzgün bir film elde etmek için kullanılabilen basit ve güvenilir bir kaplama yöntemidir (Şekil 2.9). Kaplama işlemi esnasındaki değişkenler, çözelti konsantrasyonu, dönüş hızı ve dönme süresidir. Film kalınlıkları, çözelti konsantrasyonu ve dönüş hızı değiştirilerek kontrol edilebilmektedir. Organik güneş pili üretiminde, organik katmanın kalınlığı yaklaşık 100 nm ile 200 nm mertebesinde olmaktadır. Dönme süresi ise filmin kuruması için gereken süre ile ilgilidir. Kaplama sırasında çözücünün bir miktar buharlaşması beklenir ve kaplama genel olarak 10 saniyeden 1 dakikaya değişen sürelerde yapılır. Döndürerek kaplamanın en büyük dezavantajı çözeltinin çok büyük bir kısmının saçılma sırasında kaybolmasıdır.



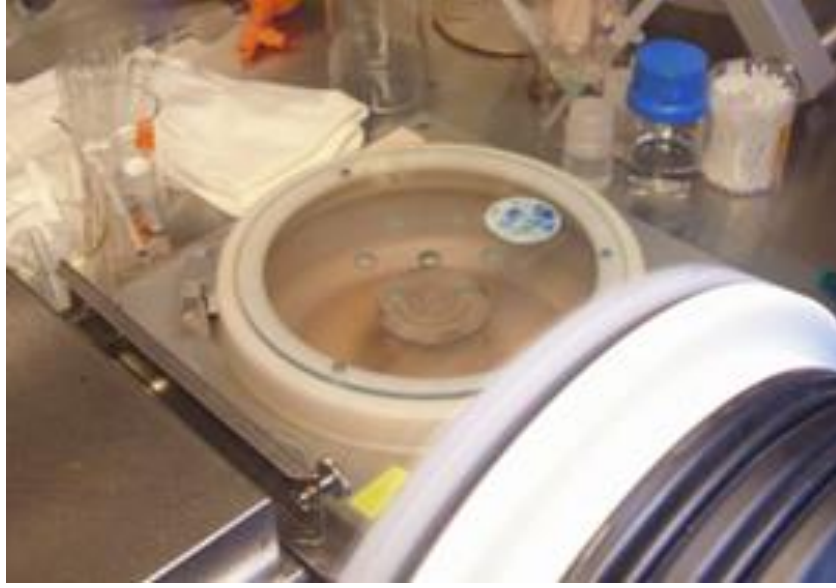
Şekil 2.9: Döndürerek kaplamanın şematik gösterimi.

Su bazlı çözeltiler dışında kalan oksijen ve nem ile etkileşime giren filmlerin tamamı eldivenli kutu (glovebox) içerisinde kaplanmaktadır. Deneylerin icra edildiği eldivenli kutu ortamı Şekil 2.10’da verilmiştir.



Şekil 2.10: Eldivenli kutu sistemi.

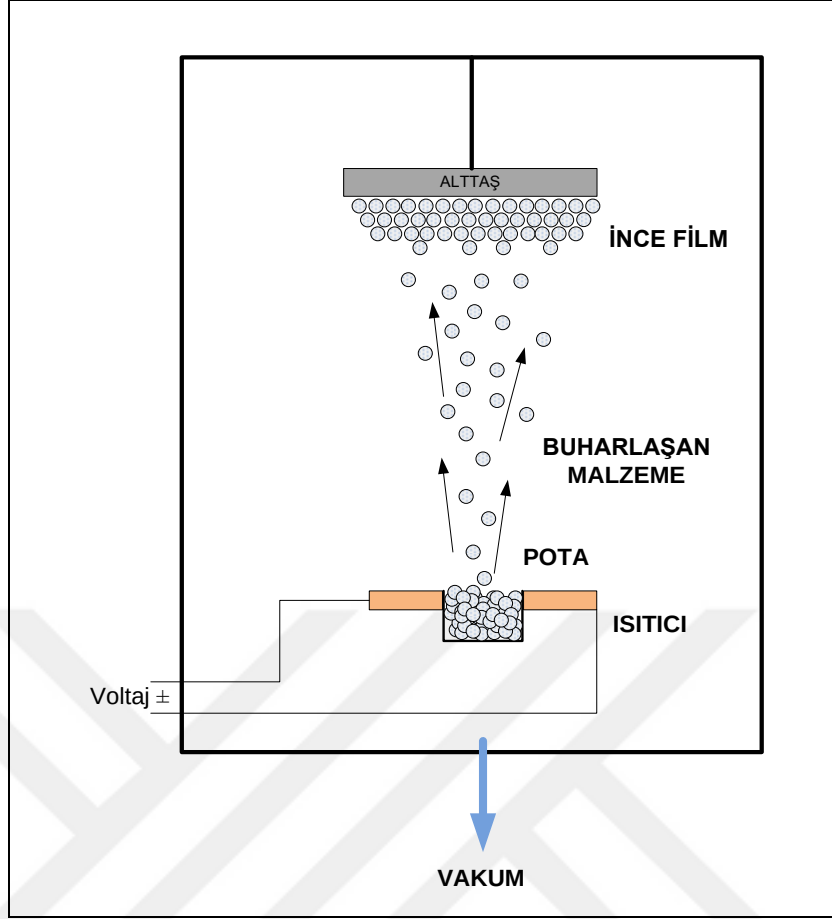
Eldivenli kutu içerisinde yer alan döndürerek kaplama cihazına ait görsel Şekil 2.11’de yer almaktadır.



Şekil 2.11: Döndürerek kaplama (Spin Coating) cihazı.

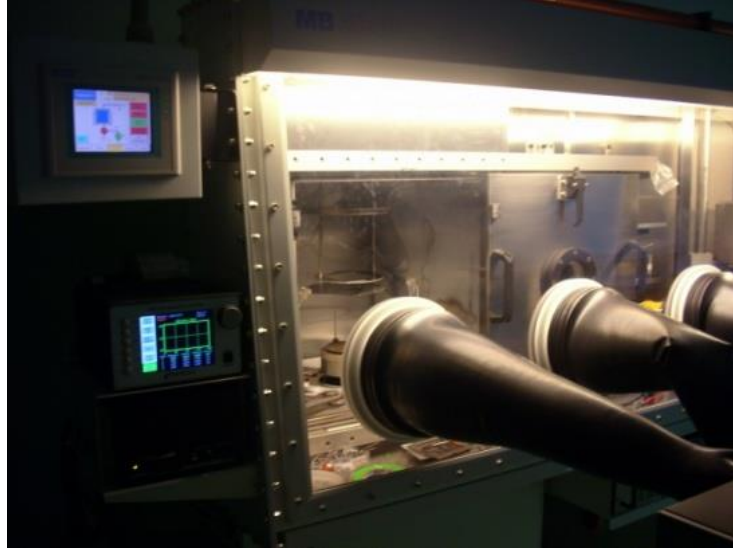
2.3.1.2. Termal Buharlaştırma Sistemi

Termal buharlaştırma, metal veya küçük molekül organik yarıiletkenlerin ince filmlerinin büyütülmesi için kullanılan bir tekniktir. Metal kaplama esnasında kontrol edilen değişkenler vakum odası basıncı, kaplanacak malzemenin saflık değeri ve buharlaştırmanın hızıdır. İyi kalitede bir büyütme yapabilmek için vakum kazanının basıncı yaklaşık 5×10^{-7} torr mertebesinde tutulmalıdır. Eğer büyütme yeteri kadar düşük basınç seviyesine inilmeden başlatılırsa, örneğin 1×10^{-6} torr'dan yüksek bir basınç değerinde yapılırsa, buharlaşmış olan sıcak metal parçaları ortamdaki oksijen ile etkileşime geçerek kaplanır ve metal-oksit tabaka oluştururlar. Bu şekilde kaplanan katmanların elektriksel özelliklerinde farklılıklar ve optik yansıtma değerlerinde azalmalar olur. Yüksek kalitede bir ince film için kullanılacak olan malzemenin saflığı 99.99% olmalıdır. Yüksek saflıktaki malzemeler, diğer malzemeler ile etkileşme riskini en aza indirir ve safsızlıkların yaratacağı kusurların oluşmasını engeller. Buharlaştırma hızları 1 Å/s ile 10 Å/s arasında değişiklikler gösterse de alt tabakanın sıcak buhardan korunması açısından düşük kaplama hızları tercih edilmelidir.



Şekil 2.12: Vakum buharlaştırma sistemi temsili görünümü.

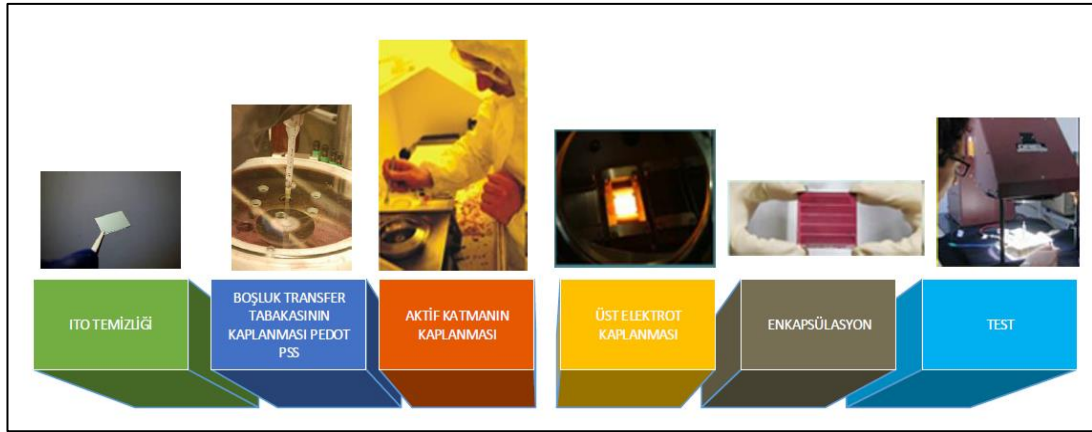
Deneylerde kullanılan, TÜBİTAK Fotonik ve Elektronik Sensörler Laboratuvarı altyapısına ait eldivenli kutu içerisindeki termal buharlaştırma cihazına ait görsel Şekil 2.13’de verilmiştir.



Şekil 2.13: Termal buharlaştırma sistemi görüntüsü.

2.3.2. Organik Güneş Hücreleri Üretim Süreci

Tez çalışması kapsamında kullanılan normal yapıdaki yığın heteroeklem güneş hücrelerinin üretim süreçleri temelde altı ana işlem den oluşmaktadır. Tersine çevrilmiş yapıdaki güneş hücrelerinin üretim sürecinde ek işlem adımları yer almaktadır.



Şekil 2.14: Organik güneş hücresi üretim süreçleri.

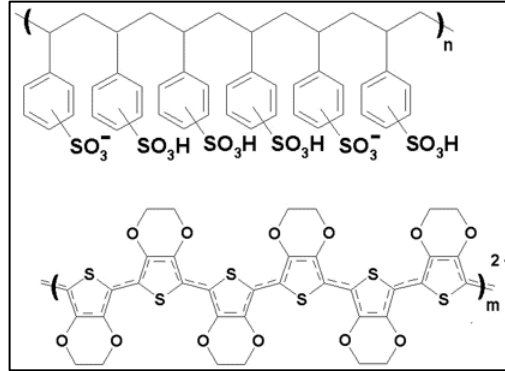
Deneyler sırasında kullanılan işlem adımları ve örnek görseller aşağıda yer almaktadır.

- ITO alttaş temizliği

ITO temizlik işlemi sırasında saf su, aseton ve izopropil alkol içerisinde ultrasonik banyoda yıkama işlemi gerçekleştirilmektedir.

- Hol transfer tabakası kaplama işlemi

Hol transfer tabakası (PEDOT:PSS) su bazlı bir çözeltidir. Kaplama işlemi laboratuvar atmosfer koşullarında spin kaplama cihazı ile gerçekleştirilmektedir. Kimyasal formülü Şekil 2.15'te gösterilen ve en bilinen iletken polimerlerden biri olan PEDOT:PSS (poly[3,4-(ethylenedioxy) thiophene] : poly(styrene sulfonate)) normal geometrideki cihazların boşluk ileten tabaka malzemesi olarak kullanılmıştır. Çözelti formunda bulunan ve deney koşulları doğrultusunda su ile seyreltilebilir halde bulunan PEDOT:PSS, döndürerek kaplama ile kaplanmaktadır. Kaplama işleminin ardından 100-150 °C civarındaki sıcaklıklarda tavlamanın kalan çözücünün uzaklaştırılması sağlanmaktadır. Sulu çözeltisi sebebiyle tavlama sonrası içerisine bir miktar nem hapsedebildiğinden ve kimyasal asidik özelliğinden ötürü diğer katmanlara da zarar verebilmektedir. Yapılan deneylerin tümünde Baytron'dan alınmış olan PH500 adlı PEDOT:PSS çözeltisi kullanılmıştır.



Şekil 2.15: PEDOT (altta) ve PSS (üstte)'in kimyasal yapıları.

- Aktif tabaka kaplama işlemi

Aktif tabaka kaplama işlemi eldivenli kutu içerisinde bulunan spin kaplama cihazı ile gerçekleştirilmektedir. Döndürerek kaplama işlemi sonrasında polimerin yapısal, morfolojik, fiziksel ve mekanik özelliklerinin düzenlenmesi, film kusurlarının azalması ve kristalleşme sürecini sağlayan ısıtma işlemi ısıtıcı yüzeyinde gerçekleştirilmektedir.



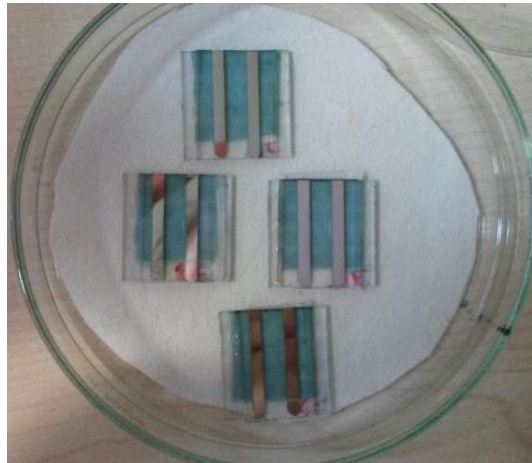
Şekil 2.16: Isıtıcı yüzey üzerinde çözücü buharlaştırma işlemi.

- Üst elektrot kaplama işlemi

Termal buharlaştırma sistemi ile üst elektrot olarak kullanılması uygun görülen metal (Al, Ag, vb.) filmler kaplanmaktadır.

- Enkapsülasyon

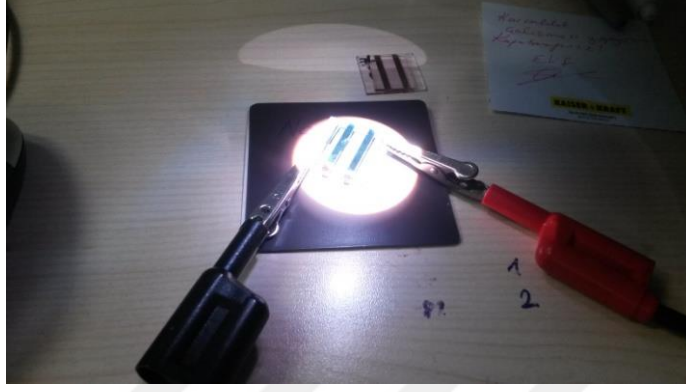
Üretilen cihazın nem ve oksijenden etkilenmesini engellemek amacıyla epoksi bazlı bir reçine ve cam ile enkapsüle edilme sürecidir.



Şekil 2.17: Deneylerde elde edilen organik güneş hücresi numune örnekleri.

- Test ve karakterizasyon

Üretilen güneş hücreleri akım gerilim ölçümleri, atomik kuvvet mikroskobu ölçümleri, UV-Vis absorbans ölçümleri, IPCE ölçümleri, vb. testler ile karakterize edilmektedir.



Şekil 2.18: Solar simülatör altında test edilen örnek görünümü.

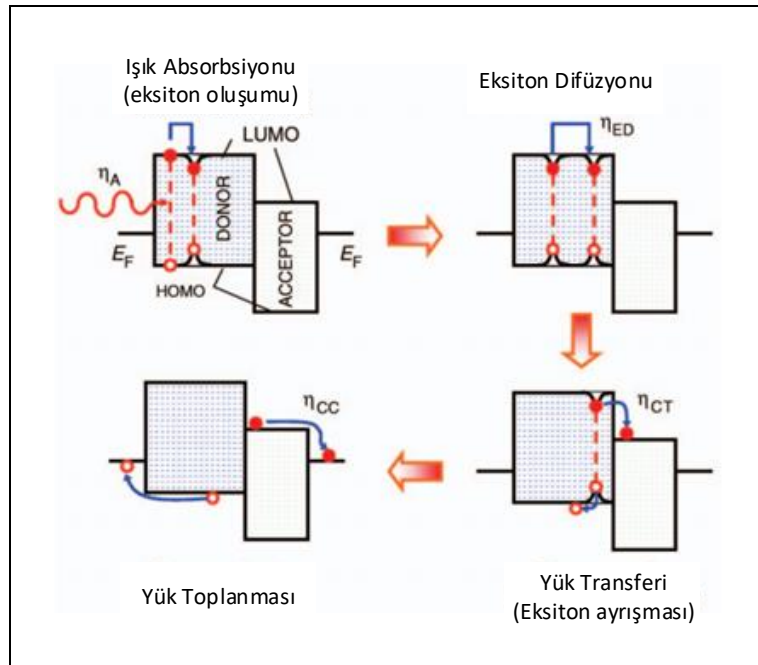
2.4. Organik Güneş Hücrelerinin Çalışma İlkesi

Organik güneş pillerinde ışığın elektriğe dönüştürülmesi sırasında dört etkin olay gerçekleşmektedir. Kuantum veriminin değeri bu dört işlemin verimlerinin bir çarpımı şeklinde ifade edilebilir [91].

$$\eta_{\text{eff}} = \eta_{\text{abs}} \times \eta_{\text{diff}} \times \eta_{\text{trans}} \times \eta_{\text{col}} \quad (2.1)$$

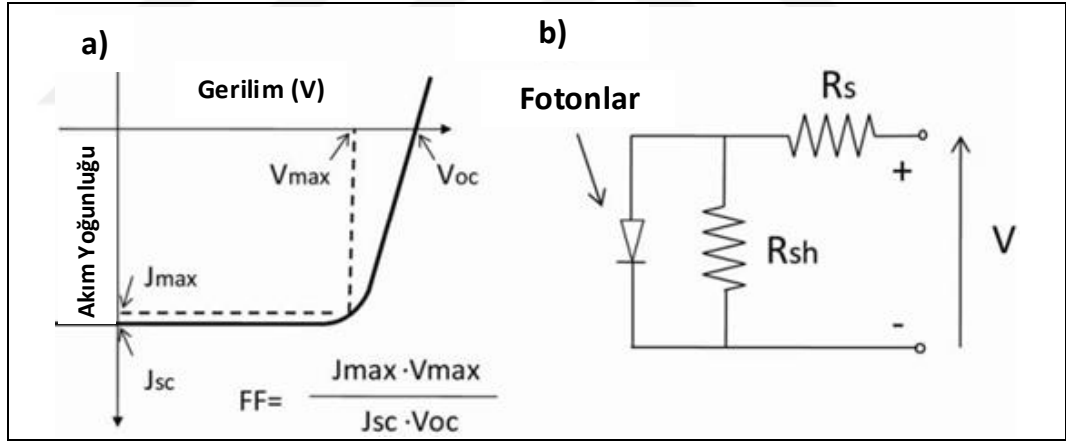
- η_{abs} : ışık absorsiyonu verimi
- η_{diff} : eksiton difüzyon verimi
- η_{trans} : yük transferi verimi
- η_{col} : yük toplanması verimi

Işık, organik ve ışığa duyarlı haldeki yarıiletken üzerine düştüğünde, yarı iletkenin en yüksek doldurulmuş moleküler yörüngesinde (HOMO seviyesinde) bulunan elektronlar en düşük doldurulmamış moleküler yörüngesine (LUMO seviyesine) yükselirler.



Şekil 2.19: Cihazın çalışma aşamaları, ışığın absorbe oluşundan yüklerin toplanmasına kadar.

Üst enerji seviyesine çıkan elektron ardında bir boşluk (hole) bırakır. Farklı enerji seviyelerindeki bu iki yük kuvvetli bir etkileşme olan Coulomb kuvveti ile birbirlerine bağlı halde bulunan elektron-boşluk çiftini yani eksitonu oluştururlar. Eksitonun serbest yüklere ayrılarak elektrotlara taşınması sayesinde cihazda bir güç birikmesi oluşmaya başlar. Anorganik yarıiletkenlerde serbest yükler ışığın emiliminden hemen sonra oluşmaktadır, fakat organik yarı iletkenlerde serbest yüklerin oluşması için farklı adımlara ihtiyaç vardır. İlk olarak organik yarı iletkende birbirine elektrostatik olarak sıkıca bağlı halde bulunan elektron-boşluk çifti, yani eksiton oluşur. İkinci adımı ise, oluşan eksitonun uygulanan elektrik alandan bağımsız olarak organik malzemeye difüzyonu oluşturmaktadır. Eksiton difüzyon mesafesi organik yarıiletkenlerde genellikle 10-20 nm civarındadır. Eksitonların serbest yüklere ayrışması ise sadece donör-akseptör ara yüzeyinde gerçekleşmektedir. Eğer ki eksitonlar ara faza erişemezlerse tekrar birleşirler ve gelen foton sayesinde alınan enerji, fotoakımı oluşturmamadan israf edilmiş olur. Bundan dolayı ayrılan yükler tekrar birleşmeden elektrotlarda toplanmalıdırlar.



Şekil 2.20: a) Organik fotovoltaik cihazların ideal J-V eğrileri, b) Organik fotovoltaik cihazların eşdeğer elektrik devreleri.

Organik fotovoltaik cihazların performansları *akım yoğunluğu-gerilim* eğrileri ile karakterize edilir. Akım-gerilim eksenlerinin oluşturduğu iki boyutlu uzayın dördüncü bölgesinde tanımlı olan alanda okunan maksimum akım yoğunluğu ve maksimum gerilim değerlerinin yanısıra kısa devre akımı ve açık devre gerilimi de bu bölgede yer alır.

Işık altındaki genel akım yoğunluğu-voltaj karakteristiği Şekil 2.20a'da gösterilmektedir. Fotovoltaik cihazların eşdeğer elektrik devresi ise yanda Şekil 2.20b'de gösterilmektedir. Karanlık koşullar altında, kısa devre akımı oluşmaz ve cihazda sadece diyot karakteristiği gözlenir. Aydınlıkta ise gelen fotonlar akım üretirler ve J-V eğrisinin dördüncü bölgesindeki negatif akım yoğunluğu, foto indüklenmiş akım oluştuğunu gösterir.

İdeal bir diyot için karanlık akımı $J_{dark}(V)$;

$$J_{dark}(V) = J_0 \left(e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1 \right) \quad (2.2)$$

İle gösterilebilir. J_0 doyum akımı, k_B Boltzmann sabiti ve T Kelvin cinsinden sıcaklıktır. Cihazın toplam akım değeri karanlık akımı ile aydınlıktaki akım değerinin (fotoakımın) toplamı şeklinde ifade edilebilir. Fotoakım değeri negatif olduğundan net akım yoğunluğu ifadesi;

$$J(V) = J_{dark}(V) - J_{sc} \quad (2.3)$$

Olur. Bu durumda ideal diyot akım yoğunluğu aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$J(V) = J_0 \left(e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1 \right) - J_{sc} \quad (2.4)$$

Elektrotlar birbirinden tamamen ayrıldığında potansiyel farkı maksimum değerini alır. Bu şekilde açık devre gerilimi V_{oc} ölçülmüş olur. Bu durumda karanlık akımı ve kısa devre akımı birbirlerini yok etmiş olurlar ve devredeki net akım sıfır olur. İdeal bir diyot için;

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{J_{sc}}{J_0} + 1 \right) \quad (2.5)$$

Olarak bulunur. Bu denklem V_{oc} nin ışık şiddeti ile logaritmik olarak arttığının göstergesidir.

Şekil 2.21’de görüldüğü gibi akım gerilim çarpımı negatiftir ve cihaz 0 ile Voc aralığındaki değerlerde güç üretmektedir. $V < 0$ bölgesinde aydınlatılmış olan cihaz bir fotodetektör gibi davranır, fotoakım oluşturmak için güç tüketir ve bu akım, uygulanan gerilimden bağımsız yalnızca ışığa bağımlıdır. $V > V_{oc}$ olduğunda ise cihaz yine güç tüketir. Bu bölge ışık yayan diyotların (LED) çalıştıkları bölgedir.

Dolum faktörü FF aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$FF = \frac{J_m \times V_m}{J_{sc} \times V_{oc}} \quad (2.6)$$

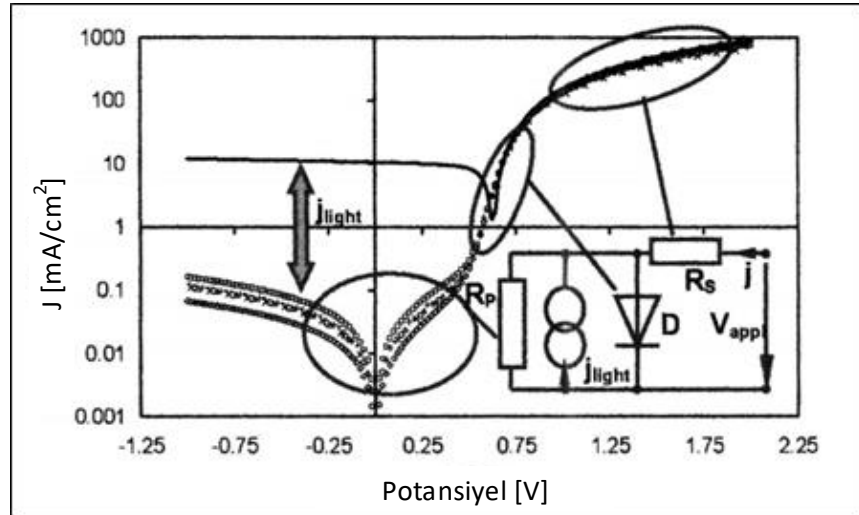
Bununla birlikte Güç Dönüşüm Verimi (PCE: Power Conversion Efficiency) aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$PCE = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{J_{max} \times V_{max}}{P_{in}} = \frac{FF \times J_{sc} \times V_{oc}}{P_{in}} \quad (2.7)$$

Dirençlerin etkileri de göz önüne alındığında, seri direnç (R_s) ve paralel direnç (R_p) ile $J(V)$ denklemini aşağıdaki şekilde ifade etmek mümkündür:

$$J(V) = J_0 \left(e^{\frac{q(V - R_s J A)}{n k_B T}} - 1 \right) + \frac{V - R_s J A}{A R_p} - J_{sc} \quad (2.8)$$

Denklemdaki n ideallik faktörünü (ideality factor), J_0 doyum akımını, A cihazın alanını, k_B Boltzmann sabitini, q yükü tanımlamak için kullanılmıştır. J - V karakteristik eğrisi y eksenini logaritmik skalada olmak üzere Şekil 2.21’deki gibi gösterilmektedir [91].



Şekil 2.21: Logaritmik skalada çizilmiş olan J-V eğrisi ve farklı bölgelerin eşdeğer devredeki karşılıkları.

Eşdeğer devrede belirtilmiş olan R_s seri direnci güneş pilinin akımının üzerinden aktığı malzemeden ileri gelen direnci olarak nitelenebilir. Paralel veya Shunt direnci olarak belirtilen tanımlanan R_p ise hücrede oluşan kaçak akımlardan ileri gelen dirençtir. Bu seri ve paralel dirençlerin dolum faktörü (FF) üzerindeki negatif etkilerinden ötürü düşük R_s ve yüksek R_p dirençleri organik fotovoltaik cihazların üretimi için aranan özellikler olmuşlardır. Yukarıda türetilen $J(V)$ denklemi J-V eğrisini açıklamada yardımcı olacak üç unsuru barındırmaktadır. Birinci bölge R_p bölgesi, ikinci bölge p-n eklemının ekspanansiyel davranışının gözlemlendiği kısım, üçüncü bölge ise R_s bölgesi olarak açıklanmaktadır;

- Negatif gerilimin ve az miktarda pozitif gerilimin R_p ile sınırlanmış olan akım değeri ile doğrusal davranış gösterdiği bölgedir.
- Ekspanansiyel olarak artan diyot eğrisi, diyot tarafından kontrollü olarak akan akımın gözlemlendiği bölgedir.
- Yüksek gerilim değerlerinde R_s direncinin sınırlandırdığı akımın gözlemlendiği diğer doğrusal davranış gösteren bölgedir.

Waldauf ve arkadaşlarının yaptıkları bir çalışmada “geliştirilmiş p-n eklemi” adını verdikleri bir model kullanılarak yığın heteroeklem yapı içindeki davranışlar için matematiksel bir yaklaşım geliştirilmiştir. Bu çalışmada MDMO-PPV/PCBM veya

P3HT/PCBM karışımları kullanılarak deneysel çalışmalar yorumlanmıştır. Modeldeki eşitlikler yukarıda sözü edilen matematiksel ifadeler temel alınarak oluşturulmuştur.

Daha önce açıklanmış olan düzlemsel çift katmanlı organik güneş pili yapısı klasik p-n eklemi olarak düşünülebilir. Bu çift katmanlı cihazda yükler donör-akseptör ara yüzeyinde ayrılan, sürüklenmiş eksitonlar tarafından oluşturulmaktadır. Daha sonra boşluklar ve elektronlar, donör ve akseptör katmanları içerisinde elektrotlara doğru sürüklenmektedirler. Bu basit yapı organik yığın tabakaları için de kullanılabilir. Buradaki tek fark, yığın heteroeklem yapısında pek çok küçük p-n eklemün üç boyutta birleşmiş etkilerinin söz konusu olmasıdır.

Temelde organik fotovoltaiik cihazlarında kullanılan denklem yığın heteroeklem için de geçerlidir

$$J(V) = J_0 \left(e^{\frac{q(V-R_s JA)}{nk_B T}} - 1 \right) + \frac{V - R_s JA}{AR_p} - J_{sc} \quad (2.9)$$

Denklemin birinci kısmında belirtilen doyum akımı J_0 , ters yöndeki enerji engelini aşabilen yüklerin sayısı ile nitelenmektedir. Klasik p-n eklemindeki gibi yük yoğunluğu, sıcaklıktan bağımsız olan ve malzemenin saflığı ile ilgili olan yapı içi (intrinsic) kısım J_i ve sıcaklıkla ve enerji ile ilgili olan kısmın çarpımı olarak ifade edilebilir;

$$J_0 = J_i e^{\frac{q\phi}{nkT}} \quad (2.10)$$

ϕ , içsel kimyasal potansiyellerin farkıdır, ters yöndeki enerji engelini değeridir ve $E_{HOMO}-E_{LUMO}$ ile uyumlu bir değerdir.

Işık ile oluşan akım yoğunluğu (J_{sc}) yük üretim oranı olan G ile detaylı olarak açıklanabilir. Oluşturulan modelde türetmeler yapılırken bazı kabuller kullanılmıştır;

- Karışım tabakası, büyük bir ara yüzey alanına sahiptir ki bu durum yük ayrışma verimliliğini yükseltmektedir.
- Eksiton oluşmasından sonra, yük ayrışması, yük birleşmesi olayından çok daha baskın miktarda gerçekleşmektedir.

- Yük ayrışmasından sonra, yükler, transfer esnasında ara yüzeyde tekrar birleşebilmektedir, bu da üretilen yüklerin azalması demektir.

Yük üretim oranı G , A alanındaki cihazda saniyede üretilen yük sayısı ile tanımlanabilmektedir. Bu da saniyede absorbe edilen foton sayısı demektir ve bu sayı düşen foton akısının Φ_{foton} bir fonksiyonudur.

$$G = \nu_{cs} \Phi_{foton} A (1 - e^{-\alpha d}) \quad (2.11)$$

Denklemden Φ_{foton} : saniyede birim alan başına düşen foton sayısını, α : absorpsiyon sabitini, d : katmanın kalınlığını, ν_{cs} : üretilen eksitonların serbest yüklere ayrışma olasılığını ifade etmektedir. Karışım katmanındaki birim hacimde oluşan yükleri ifade etmek için denklem aşağıdaki forma getirilir:

$$g = \frac{G}{V} = \frac{\nu_{cs} \Phi_{foton} A (1 - e^{-\alpha d})}{d} \quad (2.12)$$

Oluşturulan serbest yükler tekrar birleşmeden akıma katılmalıdırlar. Bunun için elektrotlara olan uzaklıkları l nin alabileceği maksimum değer aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$l_{max} = \tau \mu E_i = \tau \mu \frac{(V_{app} - V_{bi})}{d} \quad (2.13)$$

İfadedeki τ : yük taşıyıcılarının ömrünü, μ : yüklerin mobilitelerini, E_i : içsel potansiyellerini tanımlamaktadır. V_{app} uygulanan gerilim ve V_{bi} ise HOMO-LUMO enerji seviyeleri arasındaki fark gibi yerleşik (built in) potansiyeli ifade etmektedir. Bu büyüklük ışık ile üretilmiş olan akımın yoğunluğu J_{sc} için iki farklı durum anlamına gelmektedir.

$d < |l_{max}|$ için;

$$J_{sc} = \text{sgn}(V_{app} - V_{bi}) \nu_{cs} \Phi_{foton} A (1 - e^{-\alpha d}) q \quad (2.14)$$

$d > |l_{max}|$ için sadece l_{max} içerisinde kalan yük taşıyıcılarının katkısı hesaba katılmalıdır. Bu durumda elde edilen denklem

$$J_{sc} = \frac{l_{max}}{d} (V_{app} - V_{bi}) \nu_{cs} \Phi_{foton} A (1 - e^{-\alpha d}) q \quad (2.15)$$

$$J_{sc} = \tau \mu \frac{(V_{app} - V_{bi})}{d^2} (V_{app} - V_{bi}) \nu_{cs} \Phi_{foton} A (1 - e^{-\alpha d}) q \quad (2.16)$$

Geliştirilmiş p-n eklemi modelinde eksiton ayrışması sadece iyi tanımlanmış olan donör-akseptör ara yüzeyinde gerçekleşmektedir. Deneysel olarak politiyofenler, polivinilenler ve polifulerenler ile yapılan güneş pilleri için kullanışlı bir yaklaşım olsa da kayıp mekanizmalarını açıklayamadığı için daha da geliştirilmesi gerekmektedir.

2.5. Organik Güneş Hücrelerinin Karakterizasyon Teknikleri

2.5.1. Akım Gerilim Karakterizasyonu

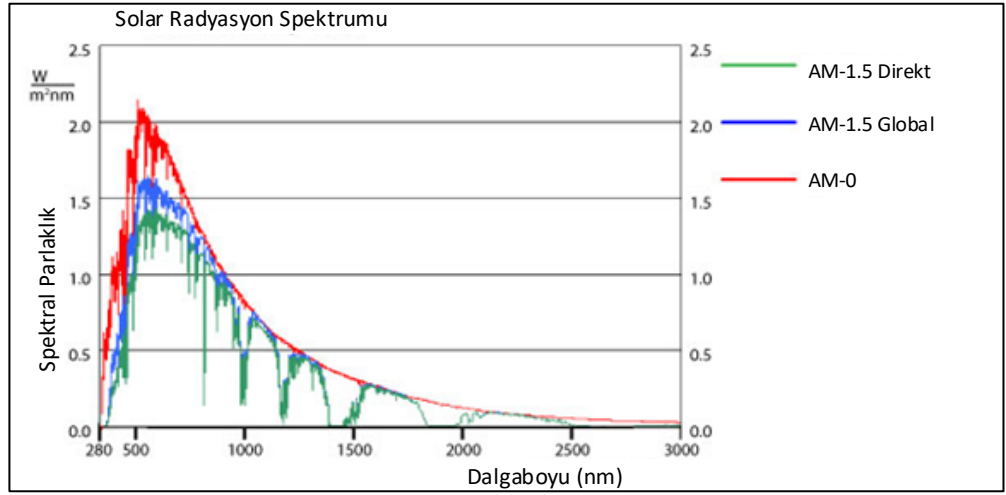
Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen tüm deneylerde Organik Fotovoltaik Cihazların Akım-Gerilim (I-V) karakteristik eğrileri Keithley markalı model 2602 SMU (Source Measure Unit) kullanılarak alınmıştır. Veriler, LabTracer adı verilen programda ölçüm anında çizilmiş olan grafikler değerlendirilerek toplanmaktadır. Daha sonra alınan veriler grafik programları ile tekrar analiz edilerek pilin açık devre gerilimi, dolum faktörü, kısa devre akımı ve verimleri hesaplanmaktadır.

Güneş pillerinin karanlıktaki ve güneş altındaki davranışının farkını gözlemleyebilmek ve güneş ile toplanabilecek güç miktarını doğru ifade edebilmek için ölçümler güneş ışığı gibi davranabilecek olan bir güneş simülatörü kullanılarak alınmalıdır.

2.5.2. Solar Spektrum ve Solar Simülatör

Güneş gama ışınları ile radyo dalgaları arasındaki bölgede ışıma yapan ve maksimum piki yaklaşık 500 nm dalga boyunda olan bir spektrum verir. Güneşten dünyaya bir günde gelen ışık enerjisi, dünyada tüketilen günlük enerjinin on- on beş bin katı kadardır. Güneş merkezindeki sıcaklık milyonlarca dereceye ulaşırken, yayımlanan ışınımın spektrumunu belirleyen yüzey tabakasının (fotoser) sıcaklığı 6000 °K'dir. Işınım, elektromagnetik özelliğe sahip olup gücün spektral dağılımı (birim dalga boyunda birim alana, birim zamanda gelen enerji) sıcaklığın bir fonksiyonudur. Diğer yıldızlardan yeryüzüne elektromagnetik spektrumun değişik aralıklarında enerji gelmektedir ancak, yerkürenin temel enerji kaynağı güneş olup, yerküreye gelen ışınımın büyükçe bir bölümü görünür bölgededir. Enerji taşıyan birimler gibi düşünülebilecek “fotonlar”, spektrumun görünür bölgesinin kırmızı yanında daha küçük enerji, mavi-mor yanında daha büyük enerji taşırlar. Seçilen bir dalga boyundaki fotonun taşıdığı enerji ve o dalga boyunda birim yüzeye birim zamanda gelen foton sayısı, seçilen dalga boyundaki gücü tanımlar. Dünyamıza güneşten gelen spektrumun, kırmızının ötesinde kalan kızılötesi ve morun ötesinde kalan morötesi bölgelerinde bulunan ışınımında toplam enerjiye önemli bir katkısı

vardır. Güneşin gücü, yani bir saniyede güneş sistemine verdiği enerji çok büyük olmasına rağmen yerküre atmosferinin dışına ulaşan tutar, yalnızca küçük bir bölümdür. Güneş ışıınımı atmosferi geçerken uğradığı değişimin bağlı olduğu değişkenlerin sayısı oldukça çok olmasına karşın en önemli değişken, ışığın atmosferde aldığı yolun uzunluğudur. Genellikle güneş ışıınımı değerlendirilirken atmosfer dışındaki seçilen nokta olarak ele alınıp buna hava kütle sıfırı (air mass 0) adı verilir. Havaküre dışında birim yüzeye gelen toplam güç, tüm spektrumun üzerinden entegre edilirse, ulaşılan değer 13267 W/m^2 olup bu değer “güneş değişmezi” olarak kullanılır, güneş ışıınları havaküreyi geçerken spektrumları önemli ölçüde değişikliğe uğrar. Bulutsuz ve güneşli bir havada bile güneş ışıınları havaküreyi geçerken su buharı, oksijen, karbondioksit, ozon, azot, metan gibi gaz moleküllerinin yanında aerosol ve toz zerreciklerine saçılarak yeryüzüne ancak havaküre dışındaki enerjinin %70’i ulaşır. Deniz seviyesinde açık bir havada optiksel hava-kütle; güneş ışıınlarının aldığı gerçek yolun, güneş tam tepedeyken aldıkları yola oranı olarak tanımlanır. Örneğin güneş tam tepedeyken bu değer, hava-kütle (air mass) olarak adlandırılır. Yeryüzüne düşen güneş ışıınları, doğrudan güneşten gelen ve havakürede saçıldıktan sonra difüzyona uğramış ışıınların toplamıdır. Hava koşullarına bağlı olarak doğrudan güneşten gelen ışıınların, saçılmış ışıına oranı değişir. Örneğin bulutlu bir günde güneş ışıınlarının büyük bir bölümü, saçılmış ışıınlardan oluşurken, bulutsuz güneşli bir günde güneş enerjisinin büyük bir bölümü doğrudan ışıınlardan oluşacaktır. Doğrudan ve yayılmış ışıınım toplamı, küresel ışıınım olarak adlandırılır. Fotovoltaik sistemlerin seçiminde, güneş ışıınım verileri çok büyük önem taşır. Güneş enerjisinden en iyi şekilde yararlanabilmek için, “Güneş Kuşağı” adı verilen, 45° kuzey-güney enlemleri arasında kalan bölgede yer almak gerekmektedir.

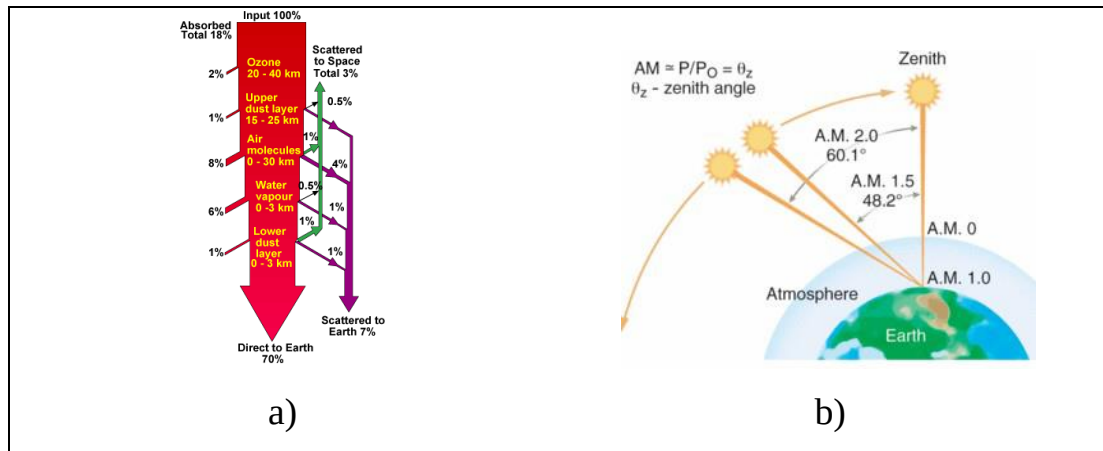


Şekil 2.22: Solar spektrum grafiği.

Güneşten gelen radyasyon çeşitli nedenlerle azalmaktadır. Gelen fotonların bir kısmı bulutlara çarpıp yansiyarak uzaya geri döner. Işık atmosferi geçerken kızıl ötesi kısmının çoğu karbondioksit, su buharı ve tozlar tarafından saçılır ya da absorbe edilir. Ultraviyole bölgesi için ozon tabakasının absorpsiyonu ve Rayleigh saçılması güç azalmasının en önemli nedenleridir.

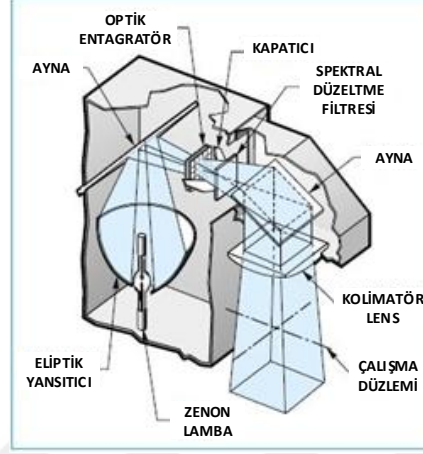
Işın radyasyonunun atmosferden geçerken izlediği yolun, güneşin dik olduğu durumda izleyeceği yola oranına hava kütlesi denir. Solar radyasyon atmosfer dışında AM0'dır. Dünya yüzeyine dik gelen radyasyon için AM1'dir. Yeryüzüne dik gelen radyasyonun yoluna zenith çizgisi denir. Bu çizgi yardımıyla radyasyonun hava kutlesi;

$$AM (sayı) = \frac{1}{\cos\theta} \quad (2.17)$$



Şekil 2.23: a) Işın radyasyonunun atmosferdeki katmanlardan saçılma miktarı, b) zenith açısı tanımı.

Şeklinde ifade edilir. θ açısı ışığın geliş yolu ile zenith çizgisi arasındaki açıdır. $\theta=48^\circ$ için AM 1,5 değeri güneş pili performanslarının değerlendirilmesinde standart kabul edilir. Bu sebeple solar simülatörde AM 1,5 luk filtre kullanılarak ölçüm yapılır.



Şekil 2.24: Solar simülatör (Güneş benzeştiricisi).

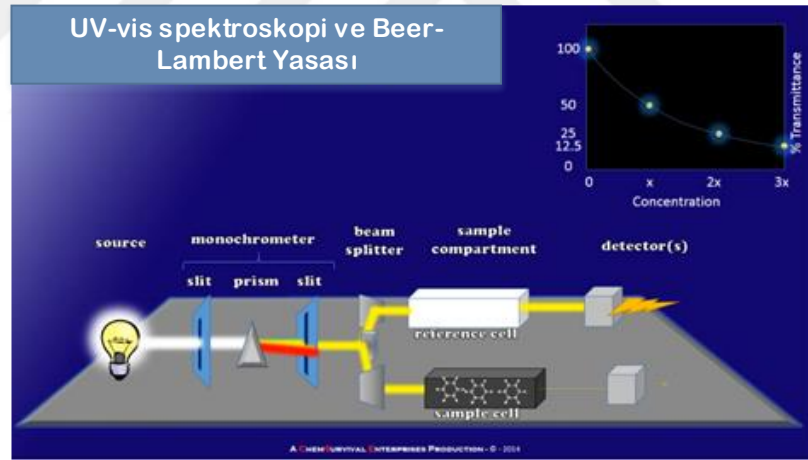
Deneyler kapsamında kullanılan solar simülatör aşağıdaki görselde yer almaktadır.



Şekil 2.25: Solar simülatör.

2.5.3. UV-Vis spektroskopisi

Cihazın ilk olarak ilgili dalga boyunda UV-Visible ışın vermesi ve bu ışının numuneden geçtikten sonra ne kadarının soğurulduğunun ölçülmesi gerekir. Şekil 2.26'da cihazın temel kısımlarını basit olarak göstermektedir [92]. İlk kısım ışın kaynağıdır. İlk ışın kaynağı olarak tungsten fitilli lambalar (aydınlatma ampulleri) kullanılmıştır. Fakat bu lambaların yerini zamanla tungsten-halojen lambalar almıştır. Bu gibi ışın kaynakları 320 nm' ye kadar olan dalga boylarında ışıma yapabilirler. 400 nm' nin altında ise sürekli spektrum verebilen döteryum lambası gibi lambalar kullanılır. İkinci kısım monokromatördür. Monokromatör ("tek renk"), bir soğurum ölçümünün yapılabilmesi için dalga boyunun seçilmesinde kullanılır. Gerçekte bir tek dalga boyunu pratik olarak elde etmek mümkün değildir fakat bunun yerine dalga boylarının dar bir aralığı seçilir ki buna bant genişliği adı verilir. İki temel monokromatör tipi vardır. Bunlar prizma ve optik ağılardır. Günümüz modern cihazlarında en çok kullanılan monokromatör türü ise yansıtmalı optik ağıdır.



Şekil 2.26: UV Vis cihazının çalışma ilkesi.

Gelen ışın prizmaya girer ve farklı dalga boylarında ışınlara ayrılmış olarak çıkar. Mavi ışık en az yansıtılırken kırmızı ışık en çok yansıtılandır (Bundan dolayı gökyüzü mavi görünür. Çünkü kırmızı ışık yansıtılmaz). Prizma veya yansıtmalı optik ağı yavaşça döndürülürse ışığın değişik dalga boyları elde edilir ve bu ışık çıkış yarığından çıkarak doğrudan numune üzerine gönderilir. Monokromatör döndürüldükçe spektrum elde edilir ve dedektörden geçen ışının şiddeti ölçülür. Yansıtmalı optik ağıların prizmalara göre birincil avantajı daha küçük bant genişliğine sahip olmalarıdır.

Son kısım ise dedektördür. Işın enerjisini elektriksel sinyale dönüştüren cihazlara dedektör adı verilir. Dedektörlerin en önemli özelliklerinden birisi üzerine düşen ışın şiddetiyle elektriksel çıkışın doğrudan orantılı olmasıdır. Buna ilaveten iyi bir dedektör üzerine düşen çok az sayıda foton içeren ışın demetini elektriksel sinyale dönüştürebilmelidir. Birçok dedektör tasarımı kullanılmasına rağmen bunlardan en çok kabul gören ve en yaygın olanı fotoçoğaltıcı tüp 'tür. Bunun nedeni ise bu dedektörün çok duyarlı olması ve geniş dalga boyu aralığında kullanıma imkân vermesidir. En büyük dezavantajı ise şiddetli ışına maruz kaldığında hemen bozulmasıdır. Bu tür cihazlar sodyum, potasyum gibi kolay iyonlaşabilen elementlerden imal edilmiş katot ve anottan yapılmıştır. Katota gönderilen ışın elektronları koparır ve bu kopan elektronlar anot tarafından çekilir.

UV-Vis ışını bağ elektronlarının uyarılabilmesi için yeterli enerjiye sahiptir ve yapıyla bir bağıntı söz konusudur. Farklı bağlardaki elektronlar uyarılmış düzeye çıkabilmek için farklı miktarlarda enerjiye gereksinim duyarlar. Burada organik-anorganik anyonlarla d- & f-elektronları (geçiş metalleri, lantanitler ve aktinitler) ve yük-aktarım elektronları üzerindeki geçişler irdelenecektir. Absorpsiyon bantlarının yeri (dalga boyu/enerji) ile yapı arasında bir bağıntı olmasına rağmen bu bantlar IR spektroskopisindeki gibi kalitatif analizde bantların çok geniş olmasından dolayı kullanılamazlar. Bundan dolayı UV-Vis spektroskopide hangi türlerin kantitatif olarak analiz edilip edilemeyeceğine dair yararlı olabilecek yapılar tartışılacaktır.

Tüm organik türler UV-Vis radyasyonu absorplayabilir. Herşeyden önce hepsi bağ elektronlarına sahiptir. Fakat tekli bağlarda (sigma elektronları) elektronların yönlendirilmesi bağıl olarak yüksek enerji gerektirir ve bu bağlar 185 nm dalga boyunun altında olur ve bu bölgeye vakum ultraviyole denir. Bazı bantların belirlenmesinde özel cihazlara ihtiyaç vardır ve çoğu ticari cihazla bu yapılabilir. Daha uzun dalga boylu UV-Vis ışığın absorplanması kromofor olarak bilinen sınırlı sayıda fonksiyonel gruplara bağlıdır.

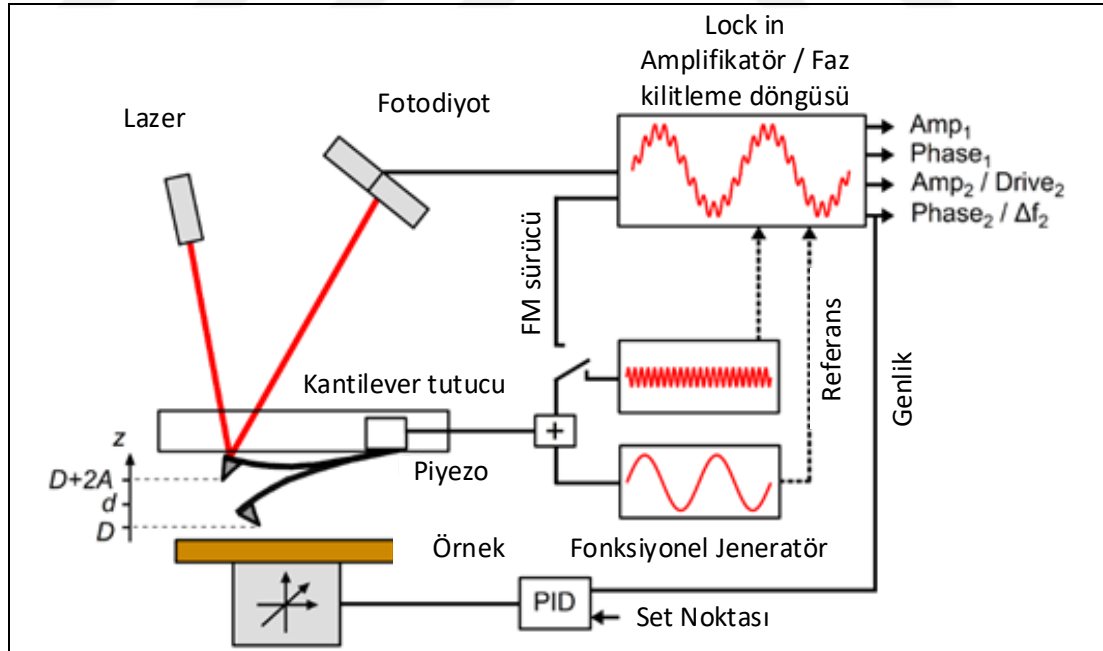
Moleküler orbitaller, herbiri birer elektron içeren iki atomik orbitalin örtüşmesi sonucu oluşur. Normal olarak bir çift bağ elektronu en düşük enerjili moleküler orbitalde bulunur. Fakat bu elektronlar ışığın soğurulmasıyla daha yüksek enerjili antibağ orbitaline çıkar. Böyle bir geçiş moleküldeki tüm valans elektronları için mümkündür. Metanol gibi sigma-, pi- bağ yapmamış elektronlar içeren bir molekül için değişik elektron geçişi olasılığı vardır.

Sigma-sigma' ve n-sigma' geçişleri en yüksek enerjiyi, pi-pi' ve n-pi' geçişleri ise en düşük enerjiyi gerektirir [93].

2.5.4. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) Ölçümleri

Atomik Kuvvet Mikroskobu (Atomic Force Microscope, AFM) ilk olarak 1986 yılında Binning, Quate ve Gerber tarafından yapılan çalışmalar sonucu bulunmuştur [189]. Temelleri ise 1982 yılında geliştirilen ve 1986 yılında Nobel fizik ödülü kazanan Taramalı Tünelleme Mikroskobuna (Scanning Tunnelling Microscope, STM) dayanmaktadır. Bu mikroskoplar örneklerin nanometre ve altı ölçekte yüzey topografya resimlerini almak için kullanılmaktadır. STM de kullanılan çok ince bir tip ve örnek arasındaki tünelleme akımının kontrolü için iletken örneklere ihtiyaç vardır. Fakat AFM de böyle bir zorunluluk yoktur. Burada tip-örnek etkileşimleri mekanik ve uzun menzilli kuvvetlere dayalı etkileşimlerdir.

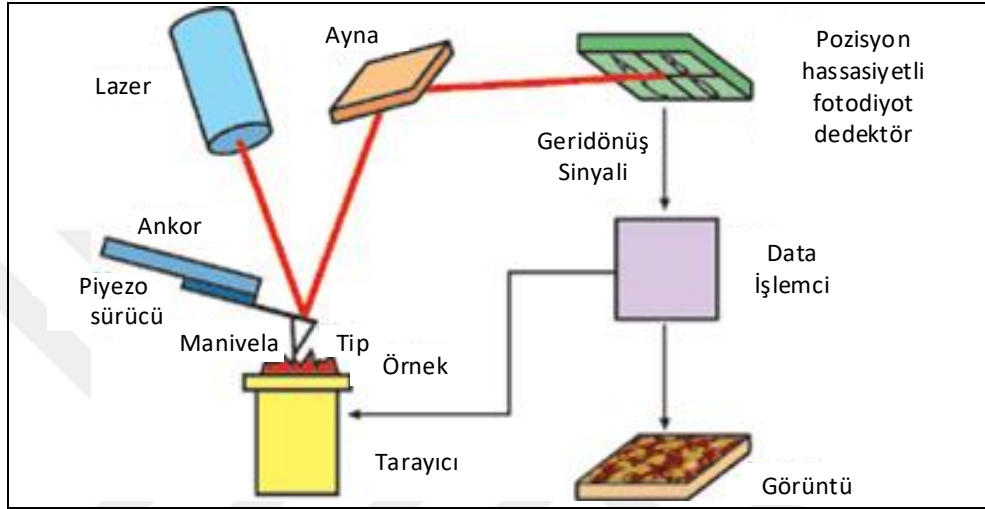
AFM cihazında, bir ölçüm ünitesi, bir kontrolcü ve verileri toplayıcı bir bilgisayar olmak üzere üç ana bölüm olmalıdır. Tam bir görüntü elde etmek için örnek üzerindeki kare şeklinde bir alan çizgiler halinde taranmaktadır [94].



Şekil 2.27: AFM sistemi temsili çalışma prensibi.

AFM'de üç temel ölçüm yöntemi vardır; Contact mode, Non-Contact mode, Tapping mode. Bu üç yöntem aralarındaki fark, her birinin tip-örnek arasındaki

uzaklık ve etkileşimlerinin farklı olmasından ileri gelmektedir. Contact mode'da tip örneğe belli bir basınç ile dokunmaktadır. Böylece ucunda tipin takılı olduğu manivela (cantilever) bükülmektedir. Non-Contact ve Tapping mode da ise tip-örnek arasındaki birkaç nm uzaklıkta, geliştirilmiş van Der Waals uzun menzilli kuvvetleri kullanılmaktadır. Tapping mode da tip seyrek aralıklarla örnek yüzeyine hafifçe dokunmaktadır.



Şekil 2.28: Manivela çalışması temsili şematik gösterimi.

Yumuşak organik malzemeler için filme zarara vermemek amacıyla Tapping mode da yüksek çözünürlükte ölçüm alınmaktadır. Temazsız (Non-Contact) ve Tapping mode da manivelanın titreşim hareketi yapması için kuvarstan yapılmış bir piezoelektrik kullanılmaktadır. Bu titreşim hareketinin genliği, örnek yüzeyi ile olan etkileşimlere bağlı olmaktadır. Tip yüzeye yaklaştıkça genlikte artacaktır. Yüzeye olan mesafenin sabit kalması için geri beslemeli bir sistem kullanılmaktadır. Tapping mode için genliğin 20-100 nm civarında kalmasını sağlamaktadır non-contact için bu değer çok daha düşüktür. Genlik, yansıyan lazer demetinin split fotodiyot dedektörünün üzerine düşmesi aracılığı ile bulunur.

3. METAL NANO PARÇACIKLAR

Organik güneş hücrelerinde ışığın emilimini (absorption değerini) artırmak güneş hücresinin verimini artırmaya yönelik olarak ilk düşünülen yöntemlerden biridir. Bu kapsamda inorganik güneş hücrelerinde uygulanan, nano yapıların saçılma etkileri ve yerleşmiş yüzey plazmon rezonansı ve yüzey plazmon polariton oluşumları vb. etkilerin organik güneş hücrelerinde de kullanılabilmesi amacıyla metalik nano parçacıklar organik güneş hücresi katmanlarına eklenmiştir. Bu fenomenin etkileri fiziksel, kimyasal ve elektriksel olarak analiz edilmektedir.

Bu çerçevede literatüre eklenen her yeni çalışma, daha yüksek verimli organik güneş hücreleri elde etme yolunda birer kilometre taşı görevi görmektedir.

Özellikle nanoparçacık tabanlı plazmonik fotovoltaiik cihazlar organik fotovoltaiik cihazların verimlerinin artırılmasında bir atılım yöntemi olarak tanımlanmaktadır [95].

Organik fotovoltaiik cihazların geliştirilmesindeki en önemli engel ışık absorpsiyonu ve ışıkla oluşturulmuş eksitonların temel uyuşmazlığıdır. Yığın heteroeklem yapılı güneş hücrelerindeki etkili yük transferi her iki yük taşıyıcısı için de sürekliliği olan yolların sağlanması sayesinde mümkün olmuştur. Doğal olarak bu sürekli yolların kalın aktif tabakalarda var olması daha az olası bir durumdur. Ek olarak taşıyıcılar organik yarı iletkenlerde var olan sınırlanmış atlama (hopping) transfer özellikleri sebebiyle azaltılmış eksiton difüzyon uzunlukları sergilemektedir [96]. Sonuç olarak, optimize edilen organik fotovoltaiik cihazlarda aktif katman kalınlıkları oldukça düşüktür, yaklaşık 200 nm civarındadır. Bu çok ince aktif tabaka kalınlıkları sebebiyle düşük yük taşıyıcı rekombinasyon özellikleri göstermelerine rağmen son derece zayıf ışık emebilme özelliğine sahiptirler. Bu durum teorik olarak 19 mA/cm^2 kısa devre akımı (J_{sc}) değerine ulaşabileceği hesaplanan en bilinen P3HT:PCBM aktif tabakasında, pratikte sadece 12 mA/cm^2 değerinin elde edilebilmesine sebep olmaktadır [97]. Bu yüzden bir polimer filmin absorbans değerini sınırlandırılmış bir kalınlık içerisinde arttırmak oldukça zorlayıcı bir hedeftir. Bu alandaki araştırmalar göstermiştir ki etkili ışık toplama ve etkili yük toplama arasındaki ihtilaf organik katman kalınlığı ile çözümlenmiştir ayrıca gelen ışığı aktif tabaka içerisine “tuzaklayarak” yeniden çözülebilir, geliştirilebilir.

Bu bağlamda plazmonla artırılmış ışık-tuzaklama yaklaşımı, plazmonik metalik nano-parçacıkların organik güneş hücrelerinin ya ara yüzeylerinde ya da buffer veya aktif tabakaların içerisinde absorpsiyonu yükseltmek amacıyla kullanılmasını, böylelikle cihazın optik kalınlığının artırılmasını sağlamaktadır [98], [99].

En bilinen metalik nano parçacıklar UV-vis bölgede, organik fotovoltaiik cihazların aktif tabakalarında kullanılan konjuge polimerlerin optik absorpsiyon bandının hemen altında, güçlü absorpsiyon bandı özellikleri sergilemektedirler.

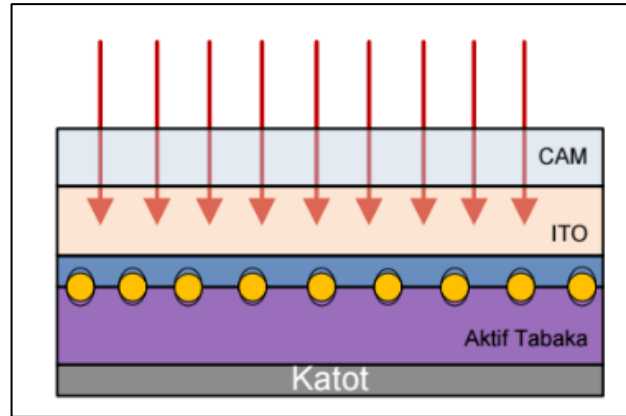
Artırılmış absorpsiyonun fiziksel temeli uyaran/yükleyen elektromanyetik alan tarafından uyarılmış serbest elektronların plazmon dalgası olarak isimlendirilen koherent osilasyonudur [100]. Elektron bulutu çekirdeğe göre bir derece yer değiştirdiğinde elektron ve çekirdek arasındaki Coulomb çekiminden kaynaklanan onarıcı kuvvet ortaya çıkmaktadır. Bu da çekirdek yapı iskeletine göre elektron bulutunun osilasyonuna sebep olmaktadır. Quazi-statik limitin altında ışığın dalga boyundan oldukça küçük boyutlardaki nano parçacıklar için saçılma ve absorpsiyon kesitleri denklem 3.1 ve 3.2'deki şekilde ifade edilir.

$$\sigma_{sc} = \frac{1}{6\pi} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^4 |a|^2 \quad (3.1)$$

$$\sigma_{abs} = \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}[a] \quad (3.2)$$

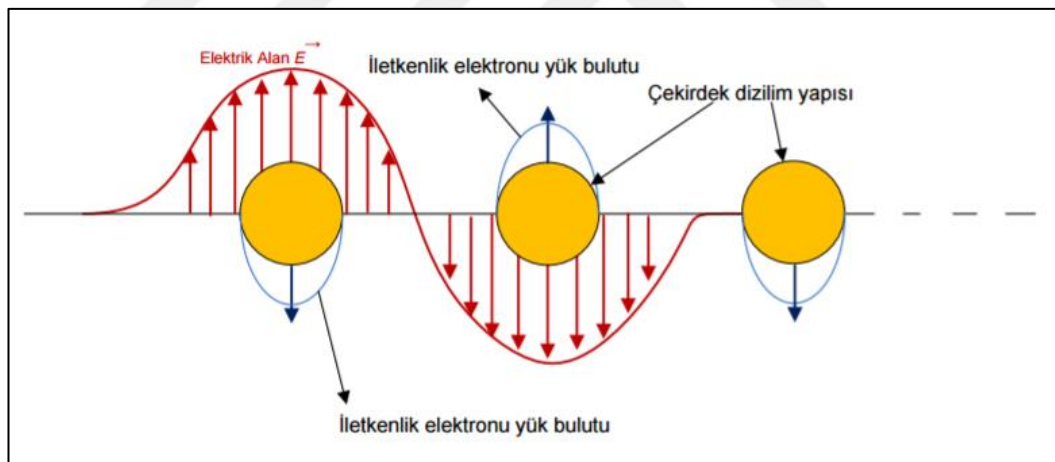
Burada $a = 3V((\epsilon_p/\epsilon_m)+1)/((\epsilon_p/\epsilon_m)+2)$ parçacığın polarize edilebilirliğidir. V parçacığın hacmi, ϵ_p parçacığın dielektrik fonksiyonu, ϵ_m ise gömüldüğü ortamın dielektrik fonksiyonunu ifade etmektedir. Saçılma verimi $Q_{sc} = \sigma_{sc} / (\sigma_{sc} + \sigma_{abs})$ şeklinde ifade edilir [101].

Görüldüğü gibi ışık frekansı için $\epsilon_p = -2\epsilon_m$ sağlandığında parçacık polarize edilebilirliği ve absorpsiyon kesiti maksimum seviyeye ulaşır (rezonans koşulu sağlanır), bu durum yerleşik yüzey plazmon rezonans (Localized Surface Plasmon Resonance-LSPR) olarak adlandırılmaktadır. LSPR frekansı nano parçacığın boyutuna, şekline, nano parçacığın malzemesine ve nano parçacığı saran ortamın optik sabitlerine bağlıdır [102].



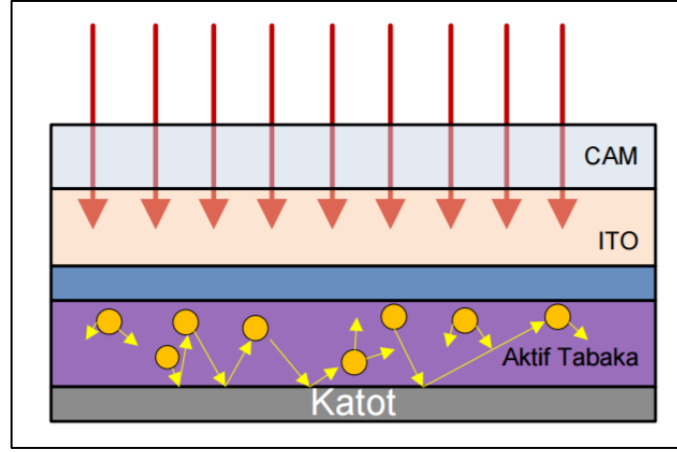
Şekil 3.1: Yerleşik Yüzel Plazmon Rezonansı Etkisi.

Yukarıdaki denklemlerde de açıkça görüldüğü gibi, Nano parçacıklar parçacık boyutlarına bağlı şekilde alan artırıcı olarak ve/veya ışık saçılma merkezi olarak görev yapmaktadırlar. Absorpsiyon yaklaşık 5-20 nm gibi küçük çaptaki nano parçacıklarda baskındır. Bu durumda nano parçacıklar LSPR uyarılmaları sebebiyle dalga boyu altı antenleri gibi davranmaktadır.



Şekil 3.2: Yerleşik Yüzey Plazmon Rezonansı (LSPR) etkisi.

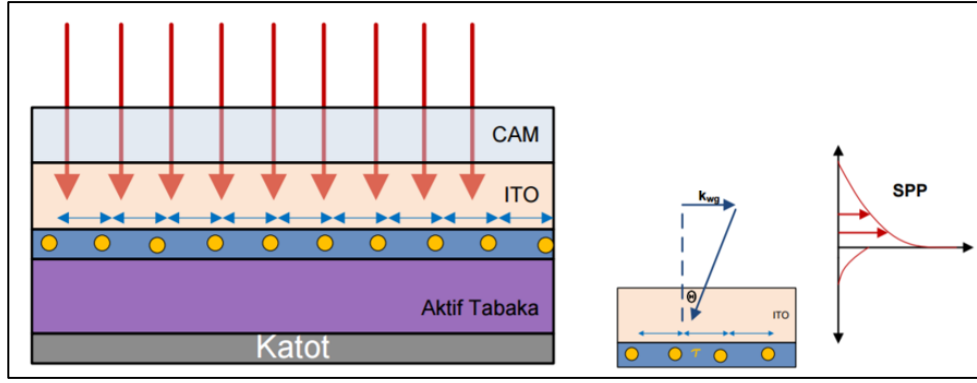
Diğer yandan daha yüksek boyutlu nano parçacıkların (>50 nm) efektif dalga boyu altı saçılma elemanları gibi davranarak uyarıcı ışık içerisindeki düzlem dalgaları fotoaktif bölgeye doğru yayarak tuzakladığı ve bağladığı düşünülmektedir.



Şekil 3.3: Saçılma etkisinin şematik gösterimi.

LSPR de bazı nano parçacıkların geometrik kesitlerinden çok daha büyük saçılma kesitleri olabilir. Bu durumda artan absorpsiyon ışığın aldığı optiksel yol uzunluğunun artışı sebebiyle gerçekleşir, çünkü ışık cihaz içerisinde farklı yönelimlerde yansıyıp saçılarak yeniden yayılacaktır.

Son olarak, nano parçacıklar periyodik şekilde dizilerek hizalanmış nano diziler halinde alt veya üst kontak öncesine konumlandırılabilirler. Bu koşulda, uyarıcı ışık her bir nano parçacık- aktif katman ara yüzünde ayrı ayrı, yüzey plazmon polariton (Surface Plasmon Polariton-SPP) olarak isimlendirilen rezonant saçılma modlarını uyarabilmektedir. Nano parçacığın şekline göre nano parçacık katman ara yüzünde SPPlerin geometrik rezonanslarına atfedilen pek çok çeşitli mod uyarılabilmektedir [103]. Buna ek olarak 2 boyutlu bir nano parçacık dizisi saçıcıları, düzlem içi yönde, saçılan ışığın yayılma modu veya dalga kılavuzu modları içinde çiftlenmesi için gereken momentumu sağlayabilmektedir [104,105]. Nano parçacık-aktif tabak arayüzüne doğru yayılan bu gibi modlar ikincil bir absorpsiyon artışı ile sonuçlanmaktadır.



Şekil 3.4: Yüzey Plazmon Polariton Etkileri şematik gösterimi.

Parçacık dizisinden kolektif saçılma, her bir saçılmanın başka bir açıda farklı kırınım düzenlerine sahip olmasına sebep olmaktadır. Diziden q ile seçtiğimiz bir parçacık için hesaplama yapılırsa, ızgara şeklindeki τ boşluklarına sahip yapı ile üretilen düzlem içi momentum, $q = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$, için $q2\pi/\tau$ şeklinde ifade edilebilir. Dalga kılavuzu (waveguide) modunda k_{wg} momentumu, gelen ışığın düzlem içi momentumu, $k \sin \vartheta$, ile ızgara-dizi yapısından gelen, $q2\pi/\tau$, momentumun toplamı kuplaj gereksinimidir.

$$k_{wg} = k \sin \vartheta + q \frac{2\pi}{\tau} \quad (3.3)$$

Momentum eşleştirmesinin temel prensibi, yukarıdaki denklemde verilen dalga kılavuzu modu koşullarındaki durumlarda ışığın kuple edebilmesidir.

Dalga kılavuzunda pek çok mod desteklenmektedir (farklı modlar NP geometrisi ve dalga kılavuzu kalınlığı ile belirlenmektedir) ve yapıdaki çoklu dizi yapıları momentum eşleştirmesine katkı sağlarlar, pratikte $k-\theta$ nın pek çok kombinasyonu denklemi yerine getirmektedir. Bu sebeple, nano yapıların geometrik dizilimleri, periyot, NP yüksekliği ve genişliği vb. de dahil olmak üzere yapının tüm parametreleri, optimum momentum transferini sağlayabilmek ve absorpsiyonu artırmak amacıyla son derece dikkatle tasarlanmalıdır.

Aynı zamanda, son araştırmalar göstermiştir ki foto-aktif tabakaya katkılanan nano parçacık yapılar uzun süreli aydınlatma koşullarında cihaz yaşlanma hızını yavaşlatmaktadır [106]. Bu nedenle cihaz performanslarındaki artış, foto-aktif karışımın gelişimine, nano parçacıkların varlığı sebebiyle elektrot/foto-aktif karışım ara yüzündeki morfolojideki gelişme atfedilebilmektedir. Genel olarak, metalik nano

parçacıkların aktif katmana katkılanması ve performansın artırılması, 2 temel prosese dayandırılabilir: başlangıç hücre verimliliğinin artırılmasını sağlayan gelişmiş-iyileştirilmiş “Işık Toplama Etkisi” ve tümleşik cihaz dayanıklılığının artmasını sağlayan geliştirilmiş “Stabil-Dengeli Yapı Etkisi”.

Nano parçacıkların Organik Fotovoltaik Cihazlarda kullanılması güneş hücresi yapısındaki pozisyonuna göre sınıflandırılırsa üç temel başlığa ayırmak mümkündür.

- i) Foto-aktif tabakaya dağıtılmış nano parçacıklar
- ii) Tampon tabakaya (Hol transfer tabakası, elektron transfer tabakası, vb.) dağıtılmış nano parçacıklar
- iii) Farklı ara yüzlere sıralanan nano parçacık yapıları.

Tablo 3.1: Organik Fotovoltaik Cihazlarda Nano Parçacık Katkılama Uygulamaları.

S/N	KATKILAMA BÖLGESİ	CİHAZ YAPISI ŞEMATİK GÖSTERİMİ
1	FOTO-AKTİF TABAKA	
2	TAMPON TABAKA	
3	ARAYÜZ-BÖLGELERİ	

Bu üç uygulamada da absorpsiyon ve verimi artırmada rol oynayan etkiler temel olarak farklıdır.

Bu tez çalışmasında nano yapıların “Foto-aktif tabaka” ve “Hol transfer tabaka” içine dağıtılması ile gözlemlenen verim artışının temel sebepleri irdelenmiştir.



4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLAR

4.1. Foto-Aktif Tabakadaki Gümüş Nano Parçacıkların Güneş Hücrelerindeki Etkileri

4.1.1. PPE-PPV Tabanlı Güneş Hücreleri ile Gerçekleştirilen Çalışmalar (Deney-1)

Gümüş nano parçacıkların güneş pillerinde kullanımının etkilerini gözlemlemek için öncelikle yüksek lisans tez çalışmasında karışım oranı optimizasyon çalışmaları tarafımda gerçekleştirilmiş olan poli fenilen vinilen ve poli fenilen etilen (PPV_Poly-Phenylene Vinylene/ PPE_Poly-Phenylene Ethylene):PCBM donör akseptör tipli kopolimer karışımı tabanlı güneş hücreleri üzerinde deneysel çalışma yapılmıştır.

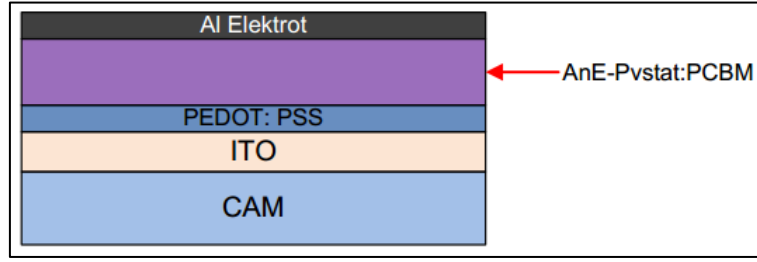
PPE-PPV tabanlı güneş hücrelerinin yığın heteroeklem yapılı güneş hücrelerinde kullanılması ile ilgili pek çok çalışma mevcuttur [106-107]. Bu malzeme ile geliştirilen organik güneş hücrelerinde açık devre gerilim değerleri 1,50 V, kısa devre akımı değerleri 950 mV değerlerine kadar ulaşabilmektedir. Bu bağlamda üretilen güneş hücresi veriminin yüksek ve cihazların seri ve paralel olarak bağlanmasından elde edilebilecek çoklu yapılarının kararlı ve yüksek verimli olması beklenmektedir.

Bu doğrultuda literatürde yer alan fiziksel etkilerin tarif edildiği şekilde [108] nano parçacıkların foto-aktif bölgeye katkılanmasının cihaz performansına etkilerini gözlemlemek için yığın hetero eklem cihaz yapısı ile “Gümüş Nano Parçacıklar ile Katkılanmış Organik Güneş Hücreleri” hazırlanmıştır.

Güneş hücresi yapısında ITO kaplı cam alttaşlar üzerine spin kaplama yöntemi ile büyütülen hol iletim tabakası PEDOT:PSS ve foto-aktif polimer malzeme karışımı 1:3 oranında AnE-PVstat:PCBM üzerine alüminyum elektrot malzeme termal buharlaştırma yöntemi ile kaplanarak oluşturulan cihazlar karakterize edilmiştir.

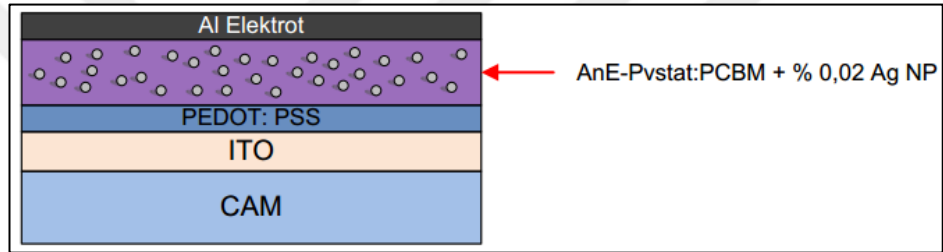
Gümüş nano parçacıkların foto-aktif bölgeye katkı oranlarının güneş hücresi performans değerlerine etkilerinin irdelenmesi amacıyla aşağıdaki üç farklı konfigürasyonda organik güneş hücresi üretimi gerçekleştirilmiştir.

i) Gümüş nano parçacık ihtiva etmeyen konfigürasyon-1



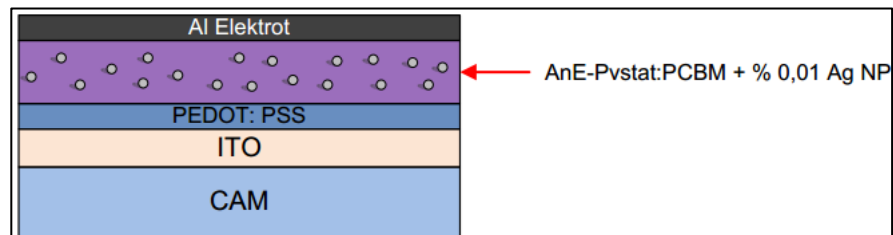
Şekil 4.1: Deney 1 Konfigürasyon-1 Cihaz Yapısı.

ii) Foto- aktif katman olarak kullanılan AnE-PVstat:PCBM karışımına hacmen %0,02 oranında gümüş nano parçacık ilave edilmiş olan konfigürasyon-2



Şekil 4.2: Deney 1 Konfigürasyon-2 Cihaz Yapısı.

iii) Foto- aktif katman olarak kullanılan AnE-PVstat:PCBM karışımına hacmen %0,01 oranında gümüş nano parçacık ilave edilmiş olan konfigürasyon-3



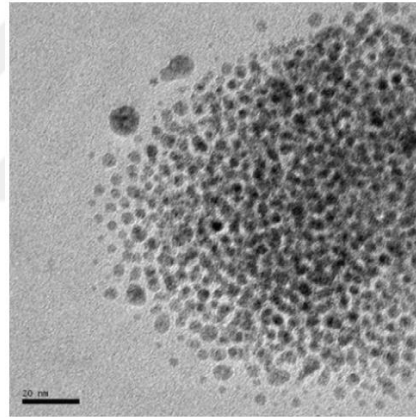
Şekil 4.3: Deney 1 Konfigürasyon-3 Cihaz Yapısı.

Deney 1 kapsamında gerçekleştirilen çalışma ile elde edilen sonucun özetlendiği Tablo 4.1 aşağıda verilmiştir.

Tablo 4.1: Deney 1 sonuçları.

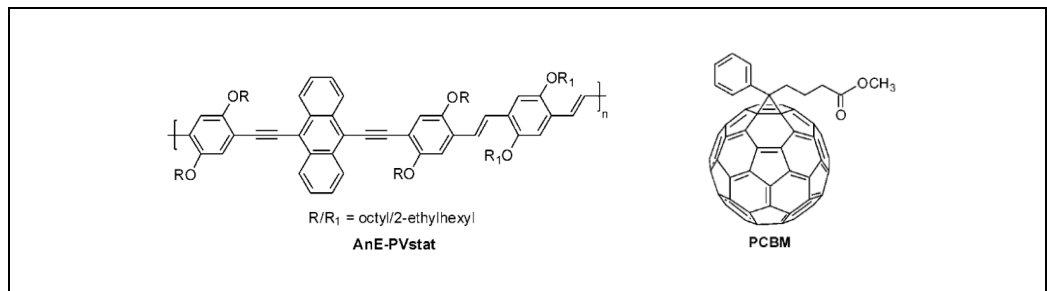
SIRA NO	CİHAZ AKTİF KATMAN İÇERİĞİ	CİHAZ KODU	VERİM (%)	FF	V _{oc} (mV)	J _{sc}
1	AnE-PVstat:PCBM	D1K1	2,46	0,58	825 mV	5,13 mA/cm ²
2	AnE-PVstat:PCBM+0,02	D1K2	2,92	0,62	832 mV	5,66 mA/cm ²
3	AnE-PVstat:PCBM+0,01	D1K3	3,10	0,48	764 mV	8,46 mA/cm ²

Bu çalışmada kullanılan gümüş nano parçacıklar yaklaşık 6 nm boyutundadır, bu nano yapıların karakterleri ve organik led cihaz uygulamaları ile ilgili çalışmalar literatürde mevcuttur [109]. Nano parçacıkların TEM görüntüleri Şekil 4.4'te verilmiştir.



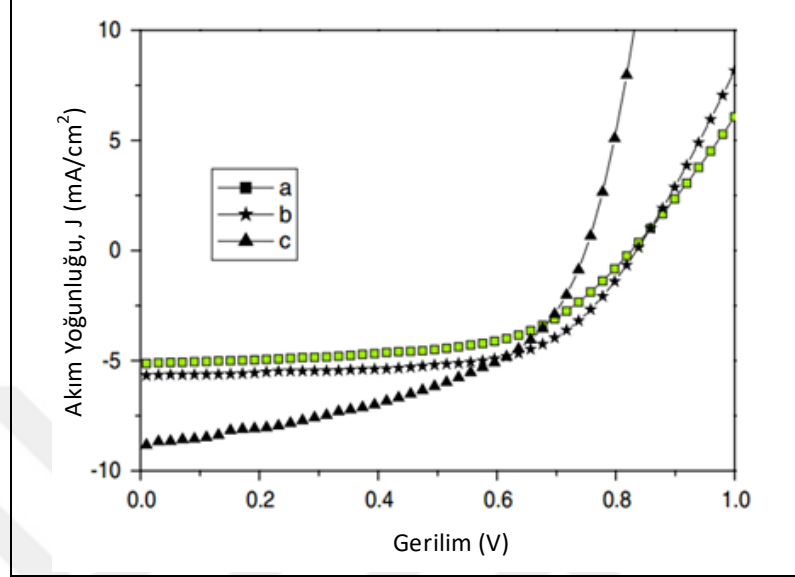
Şekil 4.4: Gümüş nano parçacıkların TEM görüntüsü.

AnE-PVstat:PCBM karışımında kullanılan malzemenin kimyasal yapıları aşağıda gösterilmektedir.



Şekil 4.5: AnE-PVstat ve PCBM malzemelerinin kimyasal yapıları.

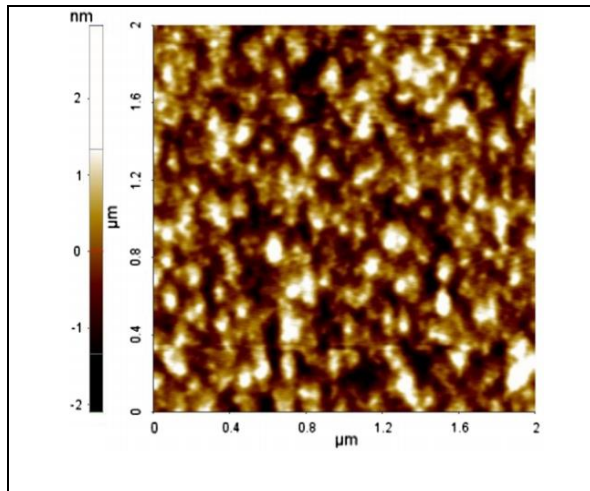
Referans hücrenin ve gümüş katkılanmış hücrelerin güneş simülatörü altında ölçülen akım yoğunluğuna karşılık gerilim karakteristik eğrileri aşağıda yer almaktadır.



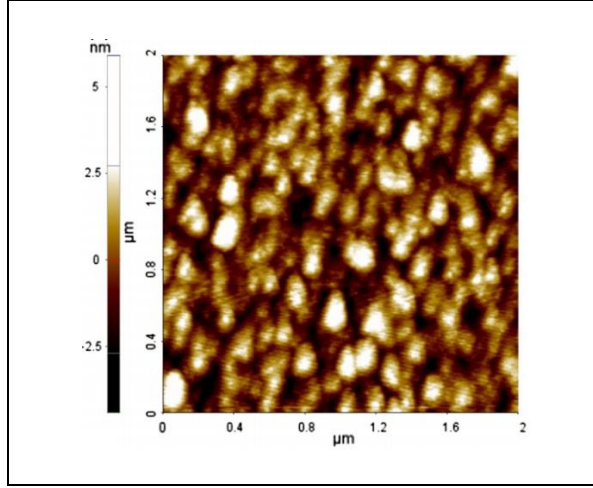
Şekil 4.6: a) AgNP içermeyen, b) 0.02 AgNP içeren, c) 0.01 AgNP içeren güneş hücresi için akım yoğunluğu- gerilim eğrileri.

En yüksek verim değeri %3,10 ile aktif katmanında %0,01 oranında gümüş nano parçacık içeren güneş hücresine aittir.

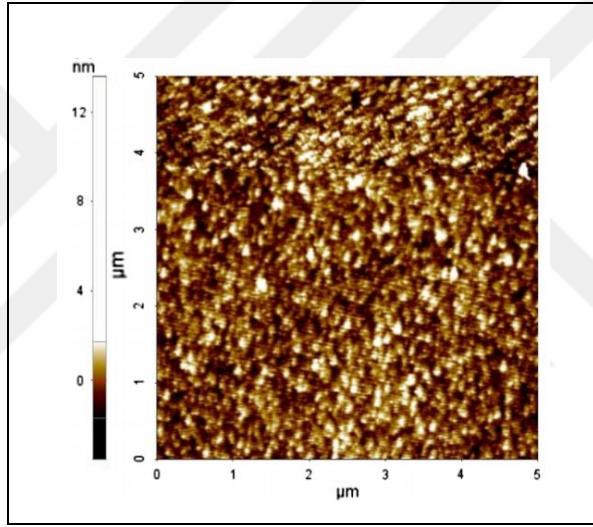
Film morfolojisi ve cihaz performansı arasındaki ilişkiyi daha derin şekilde incelemek amacıyla aktif katman filmlerine ait AFM görüntüleri alınmıştır.



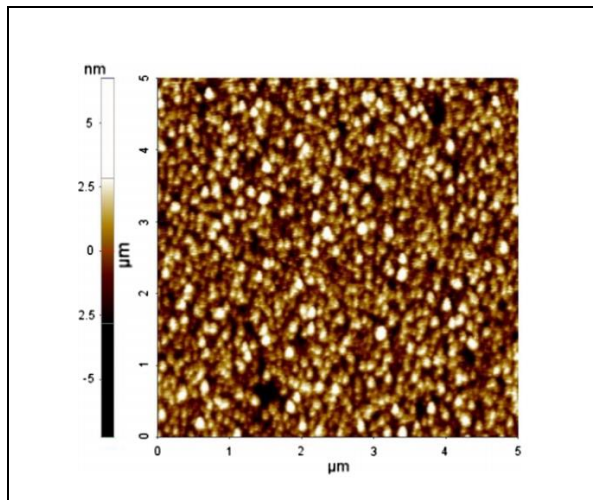
Şekil 4.7: AnE-PVstat:PCBM (2µmx2µm).



Şekil 4.8: AnE-PVstat:PCBM + %0,02 Ag NP (2µmx2µm).



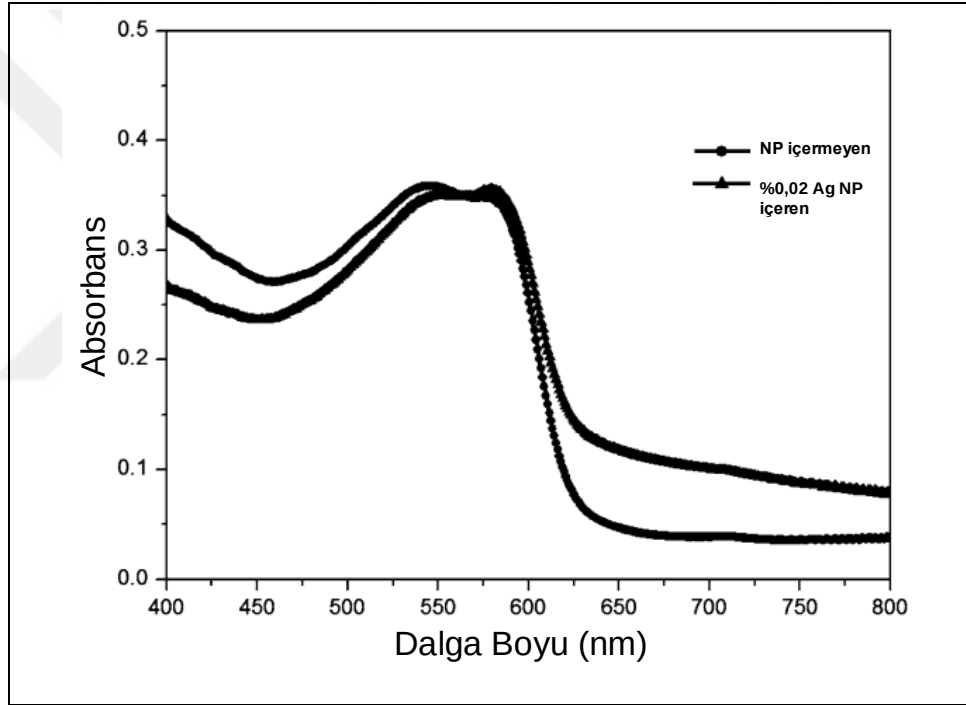
Şekil 4.9: AnE-PVstat:PCBM (5µmx5µm).



Şekil 4.10: AnE-PVstat:PCBM + %0,02 Ag NP (5µmx5µm).

%0,02 oranında gümüş nano parçacık ile katkılanmış olan aktif tabakanın atomik kuvvet mikroskobu ölçümleri bu filmlerin morfolojilerinin daha düzgün olduğunu göstermektedir. Gümüş nano yapıların bulunduğu filmin pürüzlülük değerleri (2 nm) gümüş içermeyen filmin pürüzlülük değerlerinden (0,8 nm) daha yüksektir. Fakat nano yapılı filmin yüzeyi çok daha homojendir, bu durum üzerinde büyüyen filmin homojenliğini artırmakta verimi pozitif yönde etkilemektedir.

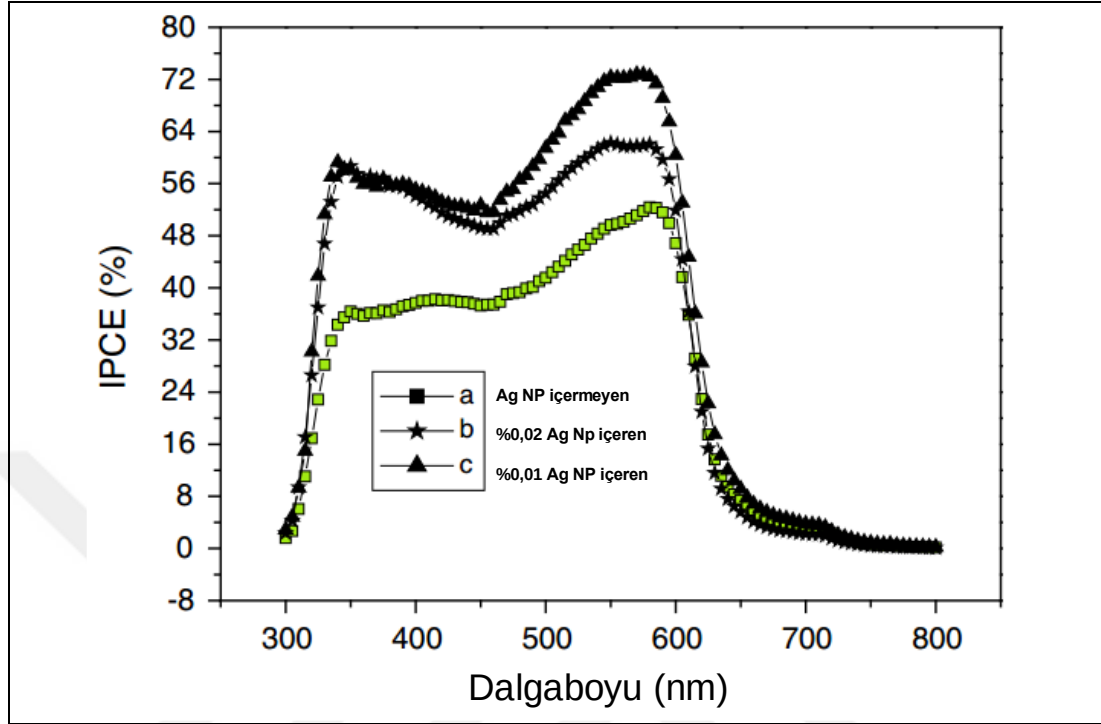
%0,02 gümüş nano parçacık katkılanmış aktif katman içeren güneş hücresi örneği ve referans örnek ile alınan UV-Vis Spektrofotometre ölçümleri aşağıda yer almaktadır.



Şekil 4.11: Deney-1 UV Vis absorpsiyon eğrileri.

Gümüş nano parçacık içermeyen referans AnE-PVstat:PCBM karışımında 544 nm ve 580 nm değerlerinde olmak üzere iki farklı noktada absorbans pikleri gözlenmiştir. Gümüş nano parçacıkları ile katkılanmış olan AnE-PVstat:PCBM karışımında ise maksimum pik değerler 548 nm ve 580 nm bölgelerinde yer almaktadır. Ayrıca genel olarak bakıldığında yüksek enerji bölgesinde nano parçacık içeren güneş hücresi için 650-800 nm bölgesinde daha yüksek bir absorbans değeri gözlemlenmektedir. Bu durum bu bölgede daha güçlü saçılma etkilerinin gözlemlendiğini ve verim artışının temel sebebinin bu absorbans artışı olabileceğini göstermektedir.

%0,01 ve %0,02 gümüş nano parçacık katkılanmış aktif katman içeren güneş hücresi örnekleri ve referans örnek ile alınan IPCE ölçümleri aşağıda yer almaktadır.



Şekil 4.12: Deney-1 IPCE ölçüm sonuçları.

Deney 1 kapsamında üretilen %0,02 gümüş nano parçacık içeren ve nano parçacık içermeyen güneş hücrelerinin empedans ölçümleri aşağıda yer almaktadır.

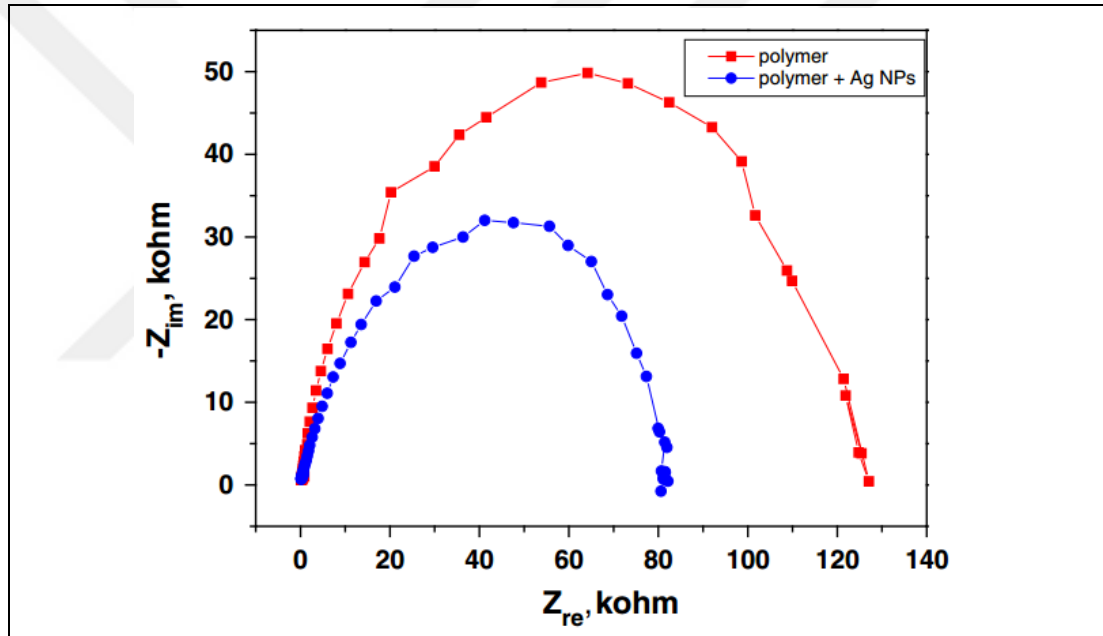
Alternatif akım empedans spektrokopi ölçümleri sonucunda elde edilen Nyquist Eğrilerinin düşük frekans tarafı elektron-hol rekombinasyon zamanının efektif ömür süresinin (τ_n) hesaplanması için kullanılmaktadır. τ_n süresi aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\tau_n = \frac{1}{2\pi f} \quad (4.1)$$

Denklemden f Nyquist eğrinin orta noktasındaki frekans değeridir. Karanlıkta elektron ve hol rekombinasyon zamanı (τ_n) gümüş nano parçacık içeren güneş hücresinde 0,4 ms, gümüş nano parçacık bulunmayan güneş hücresinde ise 0,5 ms olarak gözlemlenmektedir. Diğer taraftan, Nyquist eğrinin yüksek frekans bölgesindeki karakteristik frekans değeri ile elektronların ve global mobilitelerin difüzyon süreleri (τ_d) hakkında bilgi sahibi olabilmekteyiz.

$$\mu = \frac{eL^2}{k_b \tau_d} \quad (4.2)$$

Verilen formülde e elektronik yük, L aktif katmanın kalınlığı, k_b Boltzmann sabiti, T ölçüm anındaki gerçek sıcaklıktır (karanlıkta 21 °C). Daha küçük efektif ömür süreleri yüksek verimlerin sebebi olan yüksek mobiliteler anlamına gelmektedir. Gümüş katkılanmış sistem için yük transfer direnci (R_{ct}) değeri 81 k Ω , gümüş içermeyen sistem için 127 k Ω olarak hesaplanmıştır. Gümüş nano parçacık içermeyen sistemde R_{ct} ve τ değerleri daha küçüktür, bu da yüksek verim değerinin gerekçesi olarak nitelendirilmektedir.



Şekil 4.13: Deney-1 AC Empedans ölçümleri.

Deney 1 kapsamında üretilen güneş hücreleri ISOS-L1 olarak sınıflandırılan laboratuvar iklimlendirme [110] testlerine tabi tutulmuş ve %50 bağıl nem ve 23°C sıcaklık ve ışık altındaki performanslarının zamanla değişimi gözlemlenmiştir.

ISOS “International Summit on OPV Stability (ISOS)” olarak kısaltılan uluslararası OPV stabilite zirvesinde yer alan konsorsiyum tarafından tarif edilen bir ölçüm standardıdır. ISOS kapsamında aşağıdaki tabloda yer alan ölçümler standart olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.2: ISOS standart testleri tablosu.

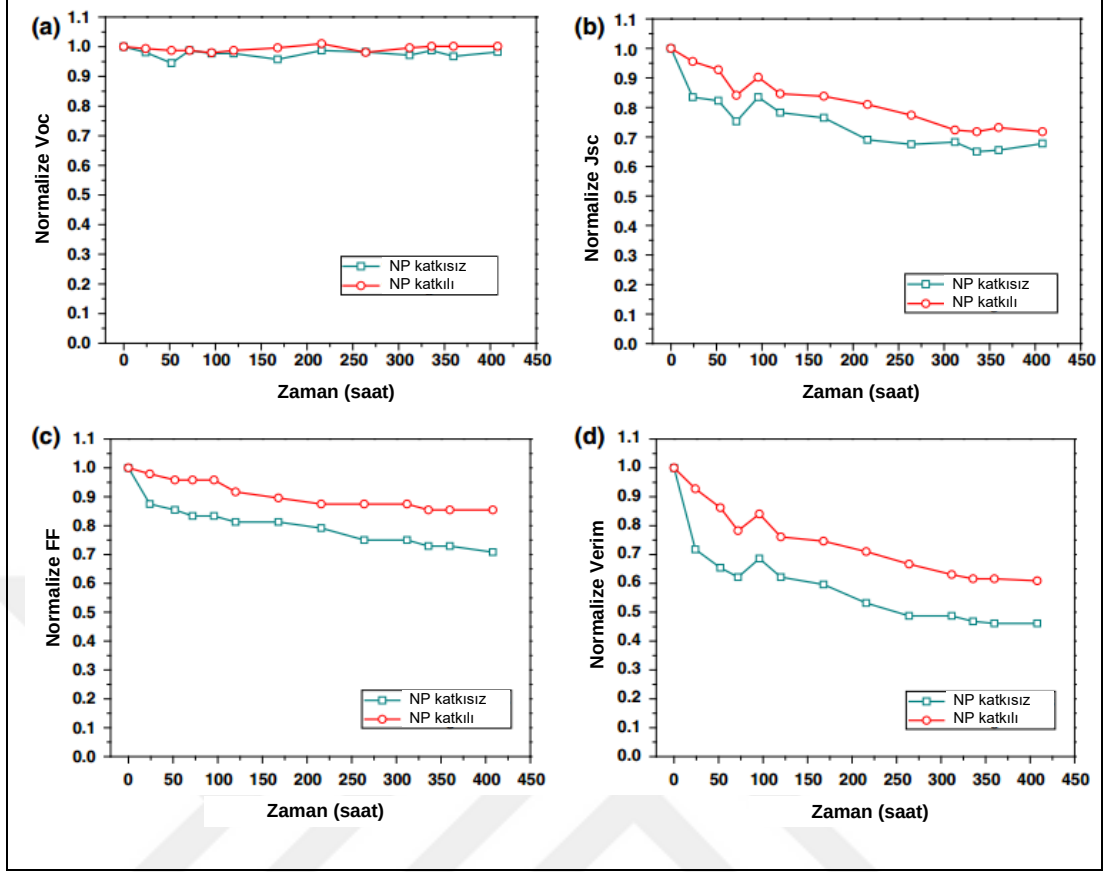
KARANLIK (Dark)	DIŞ ORTAM (Outdoor)	LABORATUAR İKLİMLENİDRME (Lab.Weathering)	TERMAL ÇEVİRİM (ThermalCycling)	GÜNEŞ TERMAL NEM (SolarThermalHumidity)
ISOS-D-1	ISOS-O-1	ISOS-L-1	ISOS-T-1	ISOS-LT-1
ISOS-D-2	ISOS-O-2	ISOS-L-2	ISOS-T-2	ISOS-LT-2
ISOS-D-3	ISOS-O-3	ISOS-L-3	ISOS-T-3	ISOS-LT-3

ISOS-L-1 kapsamında aşağıda yer alan koşulları sağlayan testler geçerlidir.

Tablo 4.3: ISOS-L-1 koşulları tablosu.

Işık Kaynağı	: Simülatör
Sıcaklık	: Ortam Sıcaklığı 23 °C
Görelî Nem (Relative Humidity)	: Ortam Nemi 50%RH
Çevresel	: Sadece Işık
Karakterizasyon ışık Kaynağı	: Solar Simülatör
Yük	: Maksimum pik noktası (MPP) veya açık devre

Nano parçacıkların güneş hücresi performansına yaptığı bir diğer katkı olan ömür uzunluğundaki iyileşme, yapılan test ile açık şekilde ortaya konmuştur. Nano parçacık içeren güneş hücrelerinin ölçülen parametreleri aynı süre içinde nano parçacık içermeyen güneş hücrelerinden daha yüksek değerdedir.



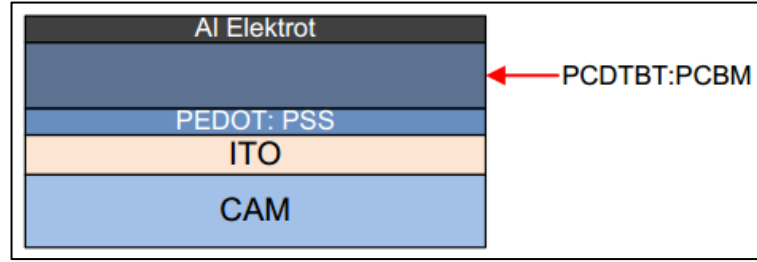
Şekil 4.14: ISOS-L1 testi normalize a)Voc, b) Jsc, c)FF ve d)Verim ve zaman eğrileri.

4.1.2. PCDTBT Tabanlı Güneş Hücreleri ile Gerçekleştirilen Çalışmalar (Deney-2)

Organik güneş hücrelerinde optik absorpsiyon değerini artırmak amacıyla metal nano parçacıkların plazmonik etkilerini kullanmak, umut vadeden yöntemlerden biri olarak değerlendirilmektedir. Metal nano parçacıklar sadece saçılma ve eşlenim etkileri sebebiyle değil aynı zamanda çevrelerindeki ışığı hapsedme özellikleri sayesinde ışık absorpsiyon değerini artırmaktadırlar. Bu deneyde saçılma ve plazmonik etkilerin hem normal hücre yapısında hem de tersine çevrilmiş güneş pili yapısındaki etkileri irdelenmiştir.

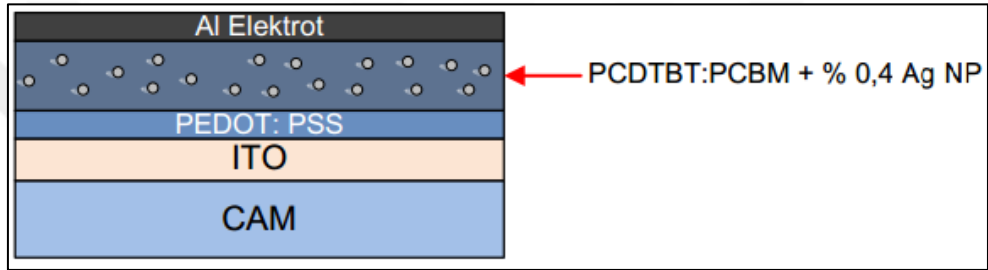
Gümüş nano parçacıkların foto-aktif bölgeye katkı oranlarının güneş hücresi performans değerlerine etkilerinin irdelenmesi amacıyla PCDTBT malzemesi ile aşağıdaki altı farklı konfigürasyonda organik güneş hücresi üretimi gerçekleştirilmiştir.

i) Gümüş nano parçacık ihtiva etmeyen konfigürasyon-1 Şekil 4.15’de verilmiştir.



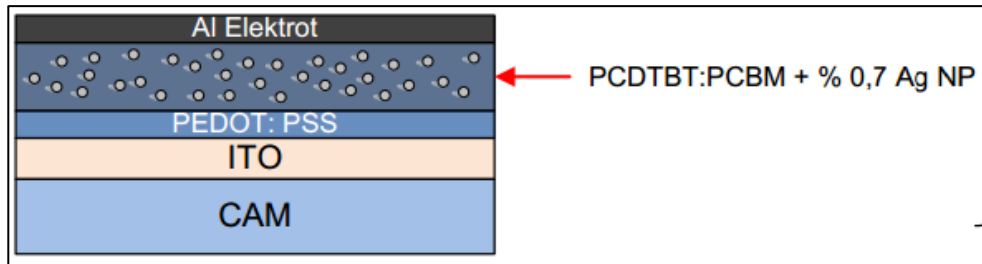
Şekil 4.15: Deney 2 Konfigürasyon-1 Cihaz Yapısı.

ii) Foto-aktif tabakasında %0,4 Gümüş nano parçacık ihtiva eden konfigürasyon-2



Şekil 4.16: Deney 2 Konfigürasyon-2 Cihaz Yapısı.

iii) Foto-aktif tabakasında %0,7 Gümüş nano parçacık ihtiva eden konfigürasyon-3



Şekil 4.17: Deney 2 Konfigürasyon-3 Cihaz Yapısı.

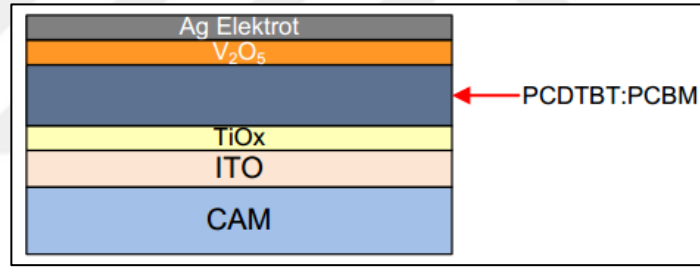
İlk üç cihaz yapısı TÜBİTAK -UME Laboratuvarlarında birlikte çalıştığımız Sayın Dr. Elif PARLAK ve ekibi tarafından üretilerek karakterize edilmiş, tersine çevrilmiş yapıdaki son üç konfigürasyon cihaz mevcut tez çalışması kapsamında üretilmiştir.

Tersine çevrilmiş yapıdaki güneş hücrelerinde de ışığın girdiği nokta cam yüzey olmaktadır fakat ITO tabakası elektronların toplandığı katot, Gümüş Elektrot bölgesi

hollerin toplandığı anot işlevi görmektedir. Bu yapıdaki güneş hücrelerinde hol iletim tabakası olarak PEDOT:PSS yerine Vanadyum Oksit (V_2O_5) film kullanılmaktadır. Vanadyum Oksit tabakasının kalınlığı ve yüzey yapısı hol iletim kabiliyetini ve dolayısıyla verimi doğrudan etkilemektedir. Bunun yanı sıra elektron iletken tabaka Titanyum Dioksit için de kalınlık ve yüzey etkinliği optimizasyon çalışmaları cihaz verimini doğrudan etkileyen faktörlerdir. Tersine çevrilmiş yapıdaki güneş hücrelerinin verim değerlerinin normal yapıdaki güneş hücrelerine kıyasla daha düşük olmasının temel sebepleri bunlardır.

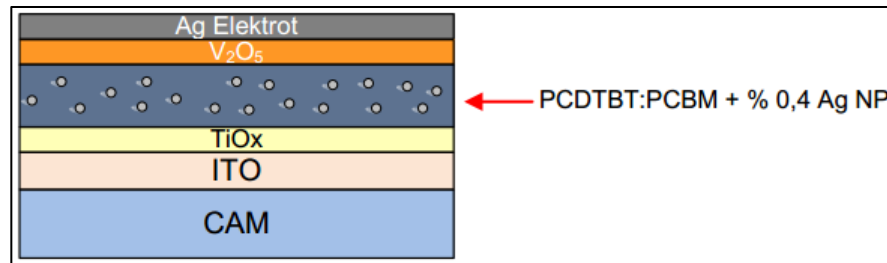
Fakat verim değerleri düşük olmasına rağmen gümüş nano parçacıklar ile katkılanmış güneş hücrelerinde gözle görülür düzeyde bir pozitif etki gözlenmiştir. Verim değerlerindeki bu artış absorpsiyon değerindeki artıştan kaynaklanmaktadır.

iv) Gümüş nano parçacık ihtiva etmeyen tersine çevrilmiş yapıdaki cihaz konfigürasyon-4



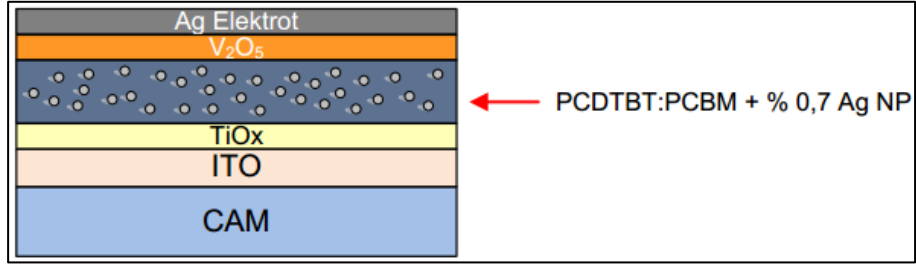
Şekil 4.18: Deney 2 Konfigürasyon-4 Cihaz Yapısı.

v) Fotoaktif tabakasında %0,4 Gümüş nano parçacık ihtiva eden tersine çevrilmiş yapıdaki cihaz konfigürasyon-5



Şekil 4.19: Deney 2 Konfigürasyon-5 Cihaz Yapısı.

vi) Fotoaktif tabakasında %0,7 Gümüş nano parçacık ihtiva eden tersine çevrilmiş yapıdaki cihaz konfigürasyon-6



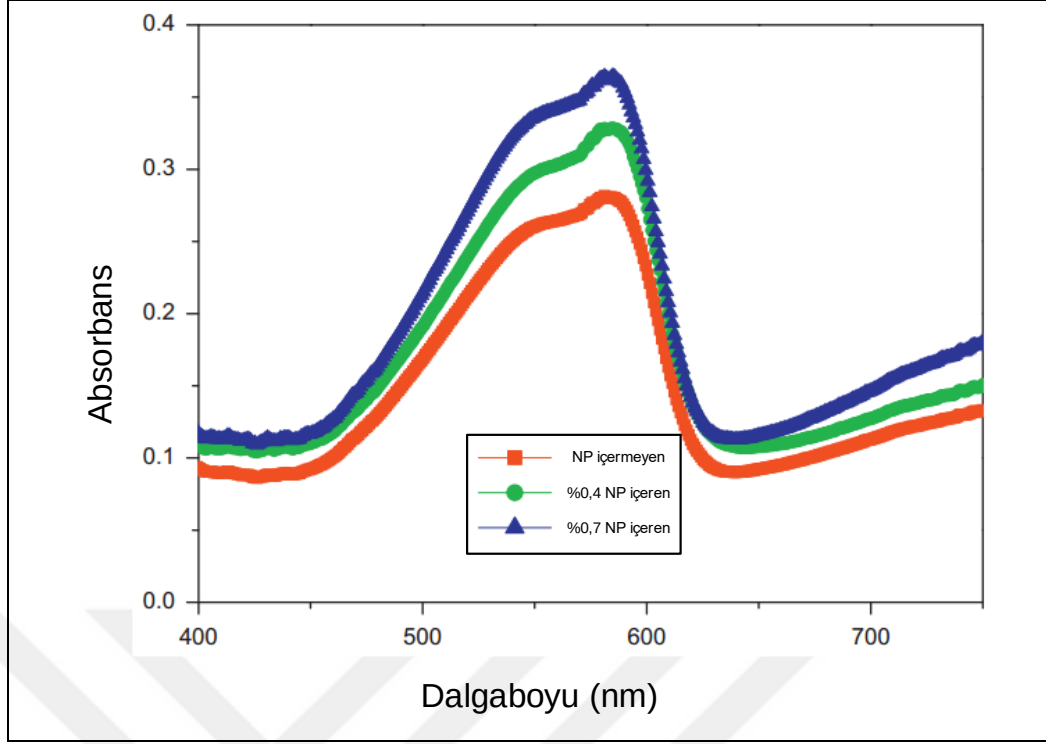
Şekil 4.20: Deney 2 Konfigürasyon-6 Cihaz Yapısı.

Deney 2 kapsamında gerçekleştirilen çalışmada elde edilen sonuçların özetlendiği tablo aşağıda verilmiştir.

Tablo 4.4: Deney 2 sonuçları.

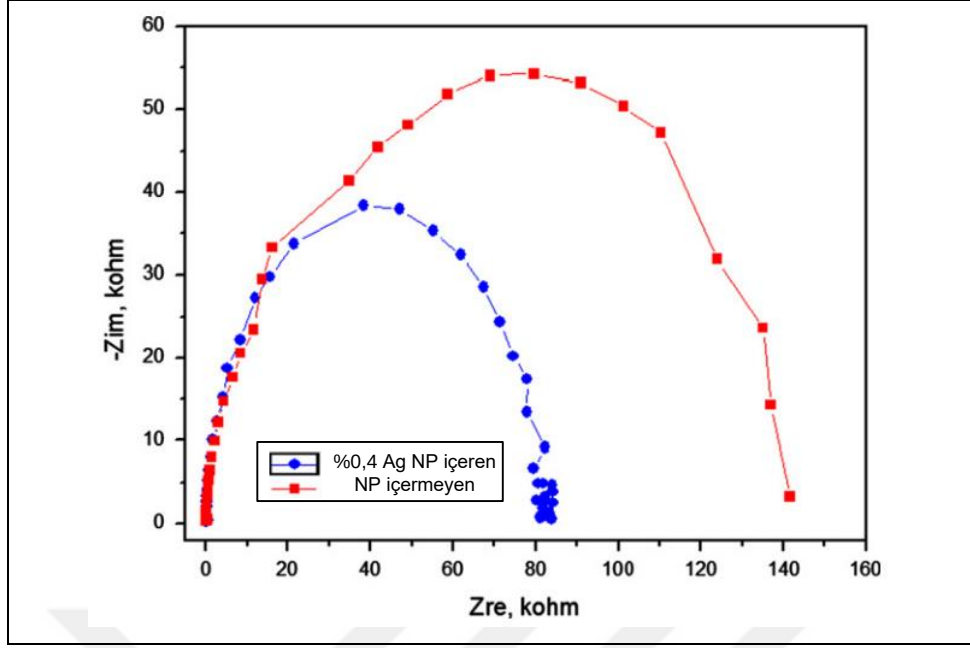
SIRA NO	CİHAZ AKTİF KATMAN İÇERİĞİ	CİHAZ TİPİ	CİHAZ KODU	VERİM (%)	FF	VOC (mV)	JSC
1	PCDTBT:PCBM	Normal	D2K1	0,65	0,38	670 mV	2,54 mA/cm ²
2	PCDTBT:PCBM+%0,4 AgNP	Normal	D2K2	1,25	0,44	740 mV	3,79 mA/cm ²
3	PCDTBT:PCBM+%0,7 AgNP	Normal	D2K3	1,72	0,44	840 mV	4,64 mA/cm ²
4	PCDTBT:PCBM	Ters	D2K4	0,12	0,21	790 mV	0,71 mA/cm ²
5	PCDTBT:PCBM+%0,4 AgNP	Ters	D2K5	0,18	0,21	820 mV	0,96 mA/cm ²
6	PCDTBT:PCBM+%0,7 AgNP	Ters	D2K6	0,24	0,23	830 mV	1,31 mA/cm ²

PCDTBT:PCBM karışımından oluşan filmin absorbsiyon eğrileri Şekil 4.21' de verilmiştir. Nano parçacıkların absorbens değerlerini doğrudan etkilediği ve saçılma etkilerinin artışı sebebiyle aktif katman filmlerinin absorbens değerlerinin katkılanan nano parçacık konsantrasyonu ile doğru orantılı olarak artmakta olduğu açık şekilde görülmektedir.



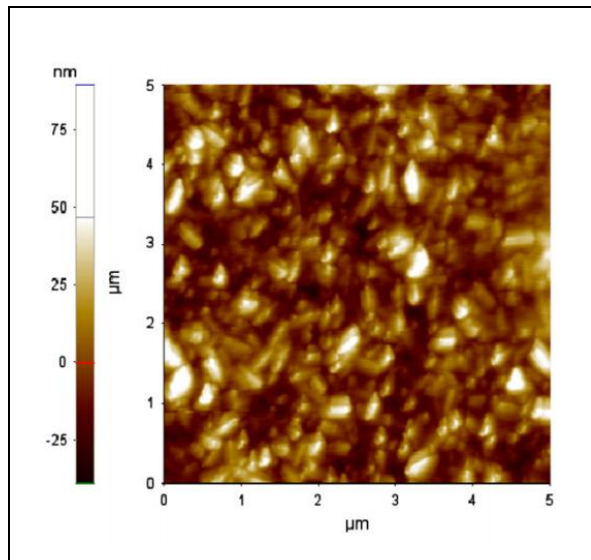
Şekil 4.21: PCDTBT:PCBM karışımından oluşan filmin absorpsiyon eğrileri.

Güneş hücrelerinin alternatif akım empedans spektroskopi ölçüm sonuçları aşağıda verilmiştir. Karanlıkta alınan ölçümler sonucunda gümüş nano parçacıklar içeren PCDTBT güneş hücrelerinin τ_n değeri 0,4 ms, gümüş içermeyen referans güneş hücresinin τ_n değeri 1,26 ms olarak hesaplanmıştır. Eksiton oluşumu için öncelikle hol ve elektron rekombinasyonu gereklidir. Rekombinasyonun hızlı olduğu durumda yük taşıyıcılarının yüksek mobiliteye sahip olduğu düşünülmektedir, bu da yüksek verim anlamına gelmektedir. Reel empedans değerleri ise gümüş nano parçacık içeren hücre için 83 k Ω , gümüş içermeyen referans hücre için ise 143 k Ω değerindedir. Yük transfer direnci, R_{ct} ve τ_n gümüş nano parçacık içeren güneş hücresi için daha düşüktür ve bu da yüksek verim değerlerinin gerekçesi olarak nitelendirilebilir.

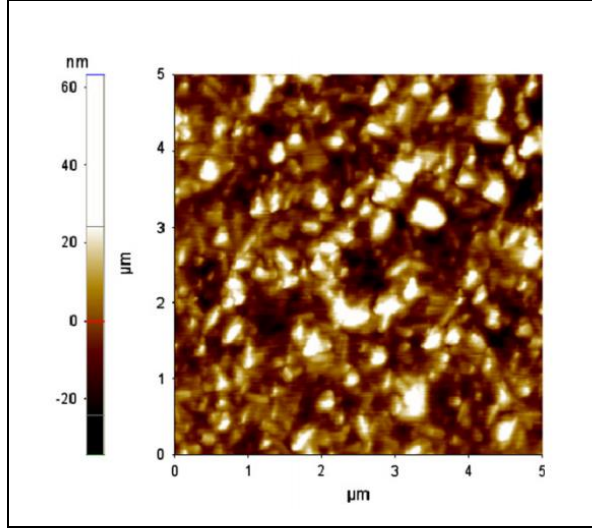


Şekil 4.22: Deney-2 AC Empedans ölçümleri.

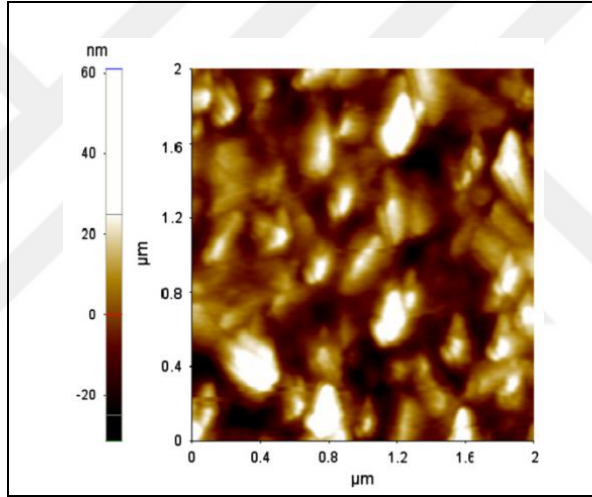
Karışım filmlerinin morfolojik özellikleri atomik kuvvet mikroskopu ölçümleri ile incelenmiştir. Filmlerin morfolojik özelliklerinin gümüş nano yapıların eklenmesi ile dikkat çekici şekilde değiştiği gözlemlenmektedir. Gümüş içermeyen filmin pürüzlülük değeri 13 nm mertebesinde iken gümüş katkılı yapıda pürüzlülük değerinin 15 nm mertebesine yükseldiği görülmektedir. Film yüzeyinde gözlenen parçacık boyutları ise gümüş ihtiva eden film için 350 nm mertebesinde iken gümüş içermeyen filmde 210 nm civarındaki boyutlarda kaldığı gözlemlenmektedir.



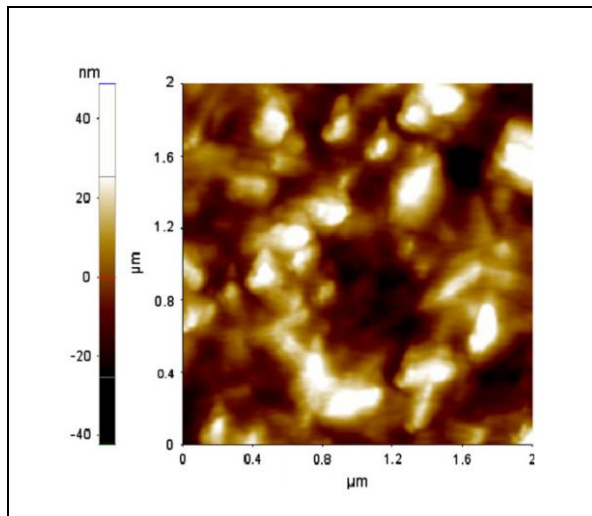
Şekil 4.23: PCDTBT:PCBM (5µmx5µm).



Şekil 4.24: PCDTBT:PCBM + Ag NPs (5μmx5μm).



Şekil 4.25: PCDTBT:PCBM (2μmx2μm).



Şekil 4.26PCBM + Ag NPs ($2\mu\text{m} \times 2\mu\text{m}$).

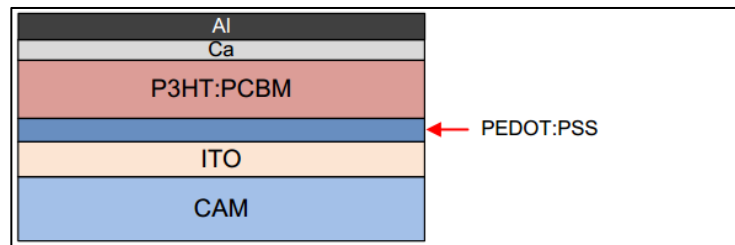
Nano parçacıkların eklenmesi ile asında film yüzey alanının arttığı ve bu sayede yüzey özelliklerinin verimin artması ile ilişkili olduğu düşünülebilir. Işık tuzaklama fenomeni bize verim artışının sebebinin ağırlıklı olarak saçılma etkileri ile gerçekleştiğini göstermektedir. Tuzaklanan ışık aktif katman ortamında birden çok kez saçılarak absorpsiyon miktarını artırmakta ve sonuç olarak güneş hücresinin daha yüksek verimde çalışmasını sağlamaktadır. Gümüş katkılanmış güneş hücresinin yüzey pürüzlülük değeri gümüş içermeyen hücreden daha yüksektir, dolayısıyla foto-tuzaklama fenomeni sayesinde hapsedilen ışığın absorpsiyon değeri ve dolayısıyla güneş hücresi verimliliği artmaktadır.

4.2. Hol İletken Tabakadaki Altın Nano Parçacıkların Güneş Hücrelerindeki Etkisi

4.2.1. P3HT tabanlı güneş hücreleri ile gerçekleştirilen çalışmalar (Deney-3)

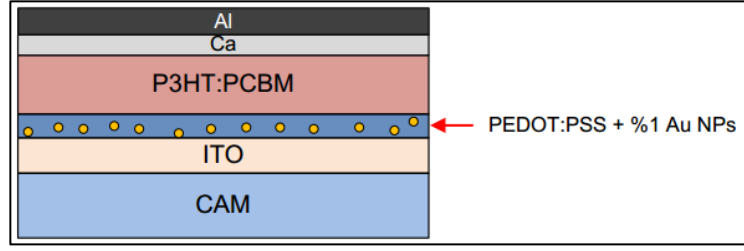
Altın nano parçacıkların hol iletken tabaka (PEDOT:PSS) içerisine katkılanmasının cihaz performansına etkilerini incelemek amacıyla aşağıdaki 4 farklı cihaz yapısında organik güneş hücresi üretimi yapılarak, cihazlar karakterize edilmiş ve altın nano parçacıkların etkileri gözlemlenmiştir. İlgili konfigürasyonlar aşağıda sıralanmıştır.

i) Altın nano parçacık ihtiva etmeyen konfigürasyon-1



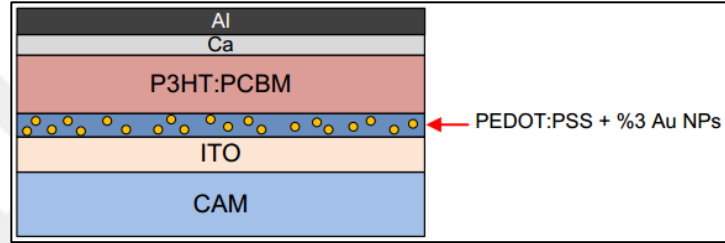
Şekil 4.27: Deney 3 Konfigürasyon-1 Cihaz Yapısı.

ii) Hol iletken katman olarak kullanılan PEDOT:PSS karışımına hacmen %1 oranında altın nano parçacık ilave edilmiş olan konfigürasyon-2.



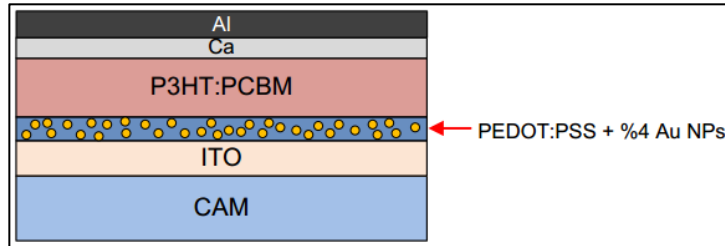
Şekil 4.28: Deney 3 Konfigürasyon-2 Cihaz Yapısı.

iii) Hol iletken katman olarak kullanılan PEDOT:PSS karışımına hacmen %3 oranında altın nano parçacık ilave edilmiş olan konfigürasyon-3.



Şekil 4.29: Deney 3 Konfigürasyon-3 Cihaz Yapısı.

iv) Hol iletken katman olarak kullanılan PEDOT:PSS karışımına hacmen %4 oranında altın nano parçacık ilave edilmiş olan konfigürasyon-4.



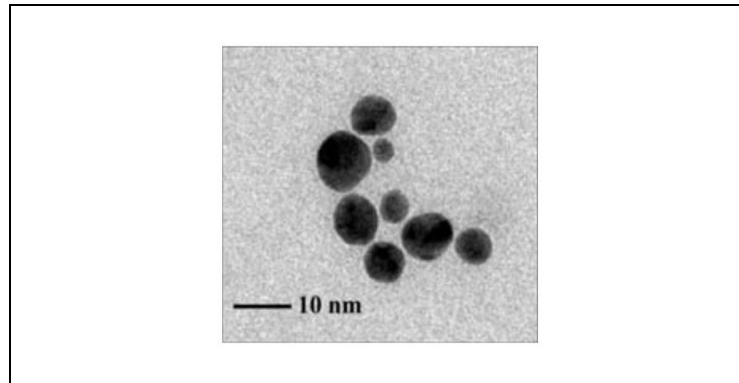
Şekil 4.30: Deney 3 Konfigürasyon-4 Cihaz Yapısı.

Deney 3 kapsamında gerçekleştirilen çalışma ile elde edilen sonuçların özetlendiği tablo aşağıda verilmiştir.

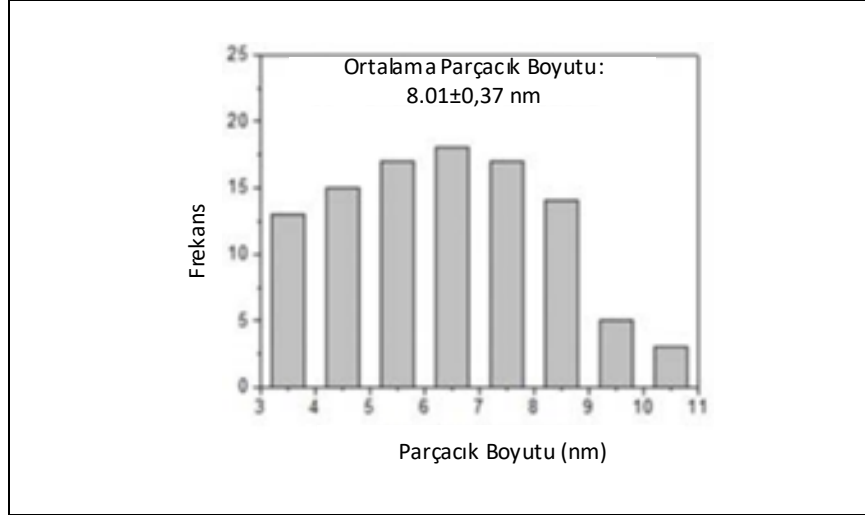
Tablo 4.5: Deney 3 sonuçları.

SIRA NO	CİHAZ HOL TRANSFER KATMAN İÇERİĞİ	CİHAZ KODU	VERİM (%)	FF	VOC	JSC
1	PEDOT:PSS	D1K1	2,98	0,56	600 mV	8,92 mA/cm ²
2	PEDOT:PSS +%1 AuNP	D1K2	3,39	0,57	610 mV	9,68 mA/cm ²
3	PEDOT:PSS +%2 AuNP	D1K3	3,23	0,57	610 mV	9,11 mA/cm ²
4	PEDOT:PSS +%3 AuNP	D1K4	3,21	0,54	600 mV	9,67 mA/cm ²

Organik fotovoltaiik cihaz üretiminde kullanılan altın nano parçacıklar yaklaşık 8 nm parçacık boyutlarına sahiptirler. Kullanılan nano parçacıkların sentez aşaması sonunda alınan TEM görüntüleri ve parçacık boyut dağılım histogramı Şekil 4.31 ve Şekil 4.32’de verilmiştir. Ortalama nano parçacık boyutu $8,01 \pm 0,37$ nm olarak ölçülmüştür. Bu boyutta hol iletken tabaka içerisine katkılanmış olan nano parçacıkların saçılma ve yüzey plazmon rezonans etkilerinin verim artışına katkı sağlaması beklenmiştir. Alınan sonuçlar %1 oranında katkılanan PDOT:PSS çözeltisi ile üretilen güneş hücrelerinin veriminin %3,39 mertebesine yükseldiğini göstermektedir.

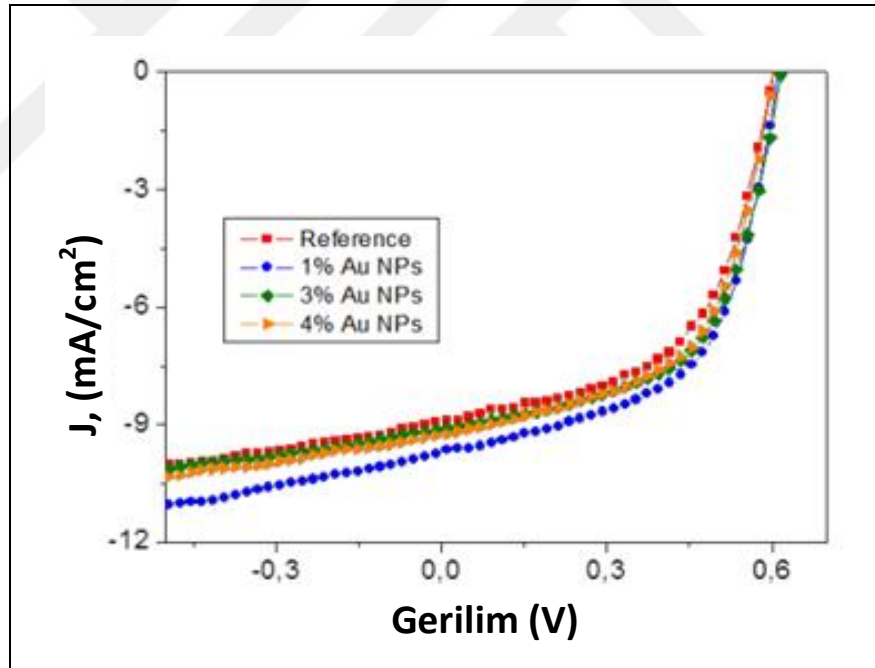


Şekil 4.31: Altın nano parçacıkların TEM görüntüsü.



Şekil 4.32: Altın nano parçacıkların boyut histogramı.

Elde edilen güneş hücrelerinin akım yoğunluğu gerilim karakteristik eğrileri Şekil 4.33'de verilmiştir.

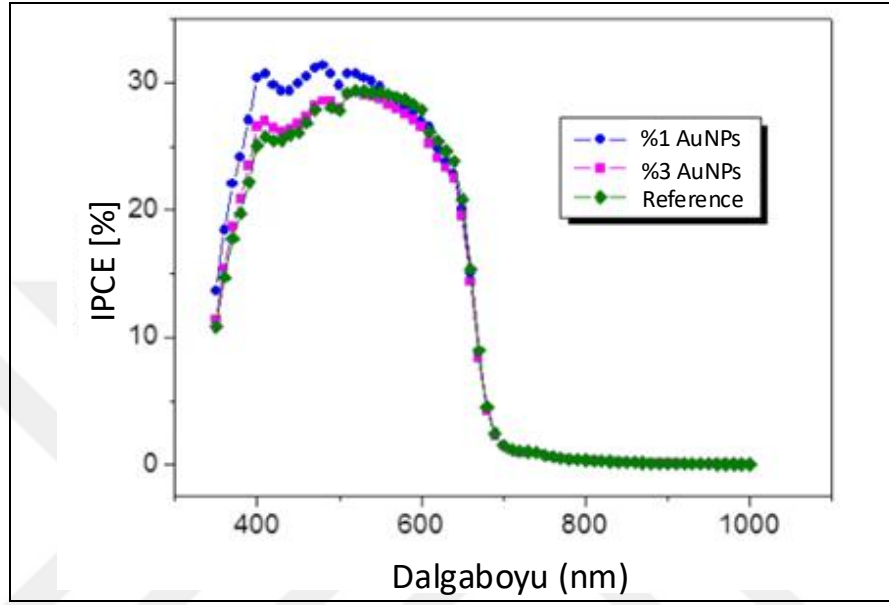


Şekil 4.33: Altın nano parçacık katkılanmış güneş hücrelerinin akım yoğunluğu- gerilim karakteristiği.

Hol iletken katmanına %1 oranında nano parçacık katkılanmış olan güneş hücresinin verim değeri %2,98'den %3,39'a yükselmiştir. Fakat nano parçacık oranı daha fazla artırıldıkça akım yoğunluğu ve dolayısıyla verim değerinin azaldığı gözlenmektedir. Verim değerinin %13 oranında artmasının altın nano parçacıkların yarattığı saçılma

etkileri ve parçacıkların arayüzeyde yarattığı yüzey plazmon etkileri olduğu değerlendirilmiştir.

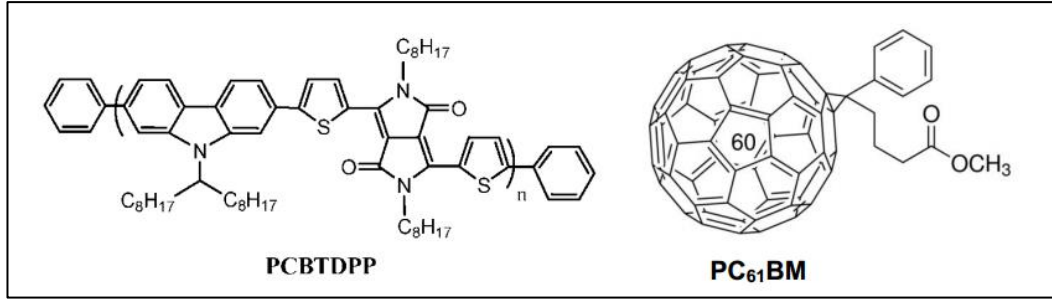
Ayrıca alınan IPCE (Gelen fotonun akıma dönüşüm verimliliği) ölçümleri (Şekil 4.34) hol iletken tabakası %1 ve %3 oranında altın nano parçacık çözeltisi ile katkılanmış olan güneş hücrelerinin akım dönüşüm verimlerini göstermektedir.



Şekil 4.34: Hol iletken katmanına altın nano parçacık katkılanmış olan OPV cihazın IPCE grafikleri.

4.2.2. PCBTDPD tabanlı güneş hücreleri ile gerçekleştirilen çalışmalar (Deney-4)

Altın nanorod yapıların hol iletken tabaka (PEDOT:PSS) içerisine katkılanmasının cihaz performansına etkilerini incelemek amacıyla PCBTDPD tabanlı güneş hücrelerinden oluşan dört farklı konfigürasyonda güneş hücresi üretilerek karakterize edilmiştir. Diğer üç deneyden farklı olarak PCBTDPD malzemesinin yanı sıra aktif katmanda bu malzemeye uygun olarak PC₆₀BM yerine PC₆₁BM malzemesi kullanılmıştır. Kullanılan malzemelerin kimyasal yapıları aşağıda verilmiştir.

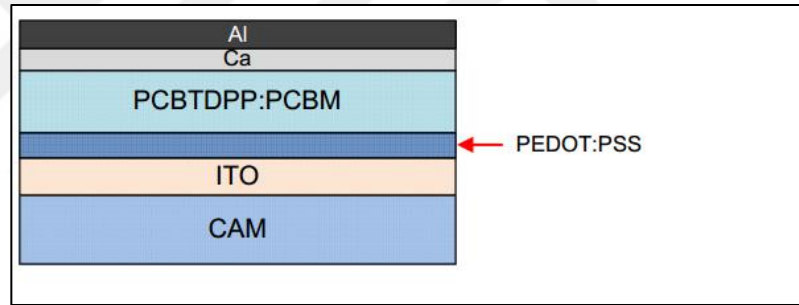


Şekil 4.35: PCBTDP ve PC₆₁BM kimyasal yapıları.

Mevcut yapıda deionize su içerisinde çözünmüş 6x10¹⁰ nanorod/mL konsantrasyon değerindeki nanorod çözeltisi ile farklı yüzdelerde katkılanmış olan PEDOT:PSS katmanının hücre verimliliğine etkisi incelenmiştir.

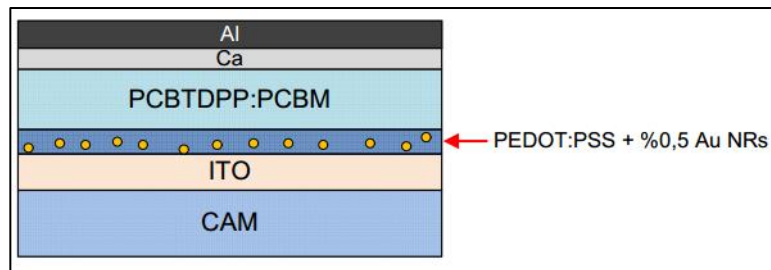
Deney-4 kapsamında üretilen cihaz konfigürasyonları aşağıda sıralanmıştır.

i) Altın nanorod ihtiva etmeyen konfigürasyon-1



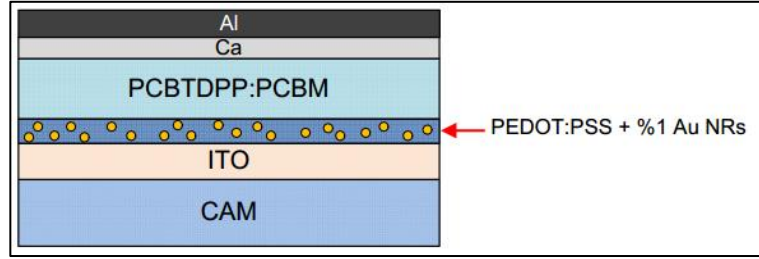
Şekil 4.36: Deney 4 Konfigürasyon-1 Cihaz Yapısı.

ii) Hol iletken katman olarak kullanılan PEDOT:PSS karışımına hacmen %0,5 oranında altın nanorod ilave edilmiş olan konfigürasyon-2



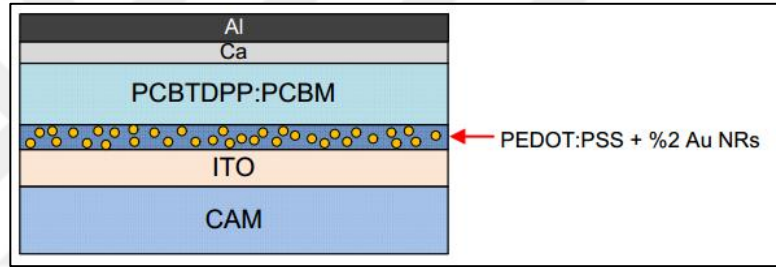
Şekil 4.37: Deney 4 Konfigürasyon-2 Cihaz Yapısı.

- iii) Hol iletken katman olarak kullanılan PEDOT:PSS karışımına hacmen %1 oranında altın nanorod ilave edilmiş olan konfigürasyon-3



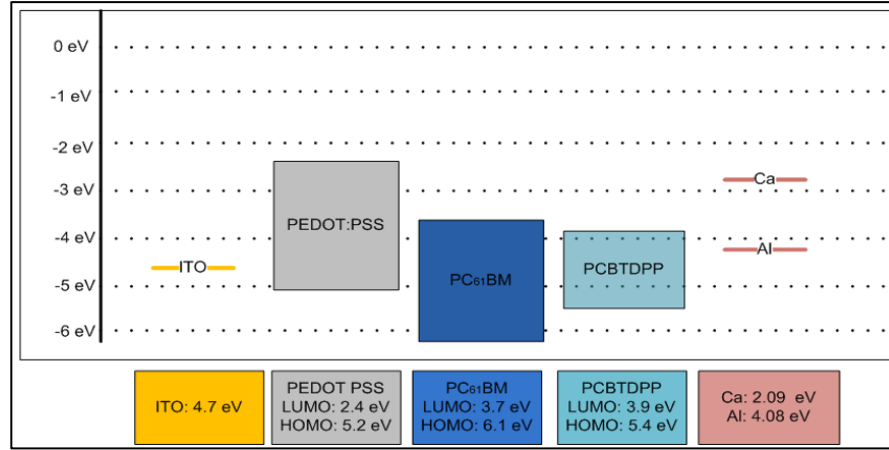
Şekil 4.38: Deney 4 Konfigürasyon-3 Cihaz Yapısı.

- iv) Hol iletken katman olarak kullanılan PEDOT:PSS karışımına hacmen %2 oranında altın nanorod ilave edilmiş olan konfigürasyon-4



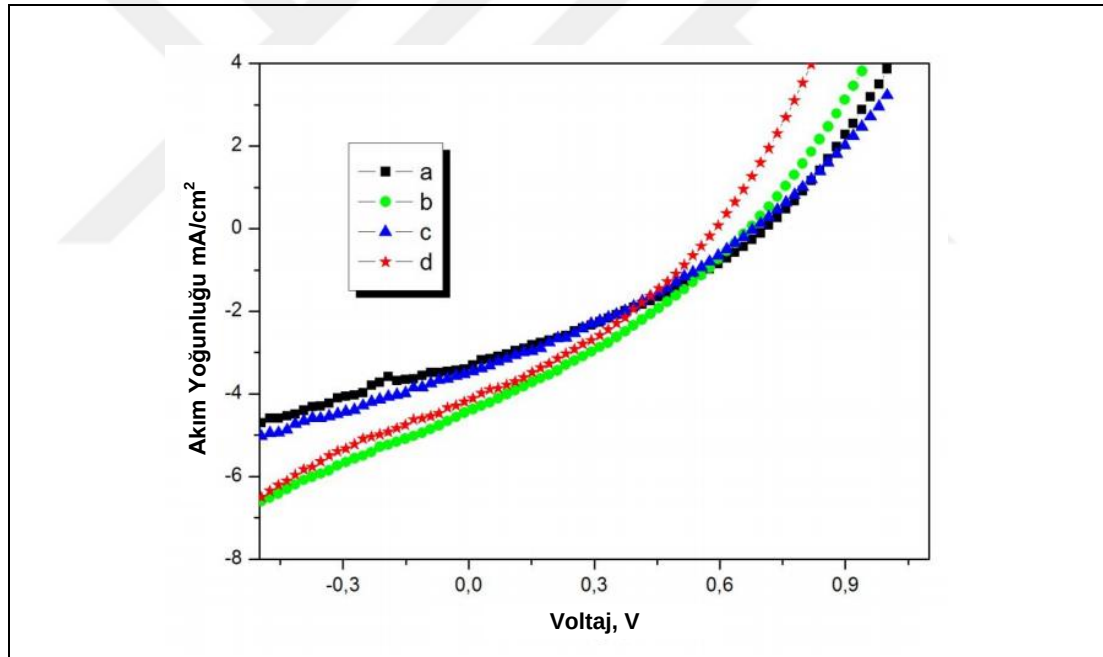
Şekil 4.39: Deney 4 Konfigürasyon-4 Cihaz Yapısı.

Oluşturulan cihaz yapısında kullanılan malzemelerin bant aralıkları aşağıdaki enerji diyagramında gösterilmiştir. Cihaz yapısında bulunan elektron ve hollerin elektrotlara taşınması aşamasında bu enerji seviyelerinin birbiri ile olan ilişkisi önem taşımaktadır. Özellikle PCBTDP ve PCBM karışımında oluşan eksitonların gelen foton enerjisi ile elektron ve hollere ayrılarak elektrotlara doğru hareket etmeleri için anot ve katot malzemelerinin enerji seviyeleri yapıya uygun olmalıdır. Bu doğrultuda cihaz yapısı ile uyum içinde olacağı öngörülen kalsiyum alüminyum malzemeleri katot malzemesi olarak seçilmiştir.



Şekil 4.40: Deney-4 cihaz enerji diyagramı.

Deney 4 kapsamında elde edilen cihazların akım yoğunluğu-gerilim grafiği Şekil 4.41’de verilmiştir.



Şekil 4.41: Deney 4 J-V eğrisi a) referans, b) %0,5 AuNR katkılı, c) %1 AuNR katkılı, d) %2 AuNR katkılı hücre.

Üretilen cihazların elektriksel ölçümleri yapılmış ve Tablo 4.6’da yer alan sonuçlar elde edilmiştir.

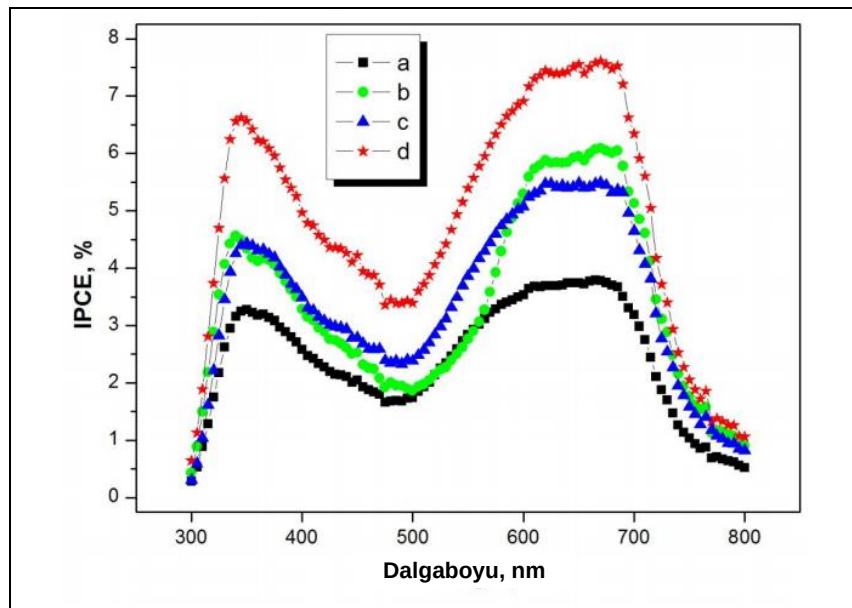
Tablo 4.6: Deney 4 sonuçları.

SIRA NO	CİHAZ HOL TRANSFER KATMAN İÇERİĞİ	CİHAZ KODU	VERİM (%)	FF	VOC	JSC
1	PEDOT:PSS	D4K1	1,70	0,32	730 mV	7,28 mA/cm ²
2	PEDOT:PSS +%0,5 AuNR	D4K2	2,05	0,31	720 mV	9,20 mA/cm ²
3	PEDOT:PSS +%1 AuNR	D4K3	1,92	0,33	710 mV	8,23 mA/cm ²
4	PEDOT:PSS +%2 AuNR	D4K4	2,25	0,32	740 mV	9,61 mA/cm ²

Hol transfer tabakasına eklenen altın nanorod parçacıkların aktif katman ve hol transfer katman arasındaki yüzeyde oluşan yerelleşmiş yüzey plazmon rezonans ve saçılma etkileri ile cihaz verim değerlerini artırdığı gözlemlenmiştir.

Altın nanorod yapıların diğer metalik nano parçacıklarda olduğu gibi cihaz performansını yükselen absorbands değerleri sayesinde artırdığı değerlendirilmektedir.

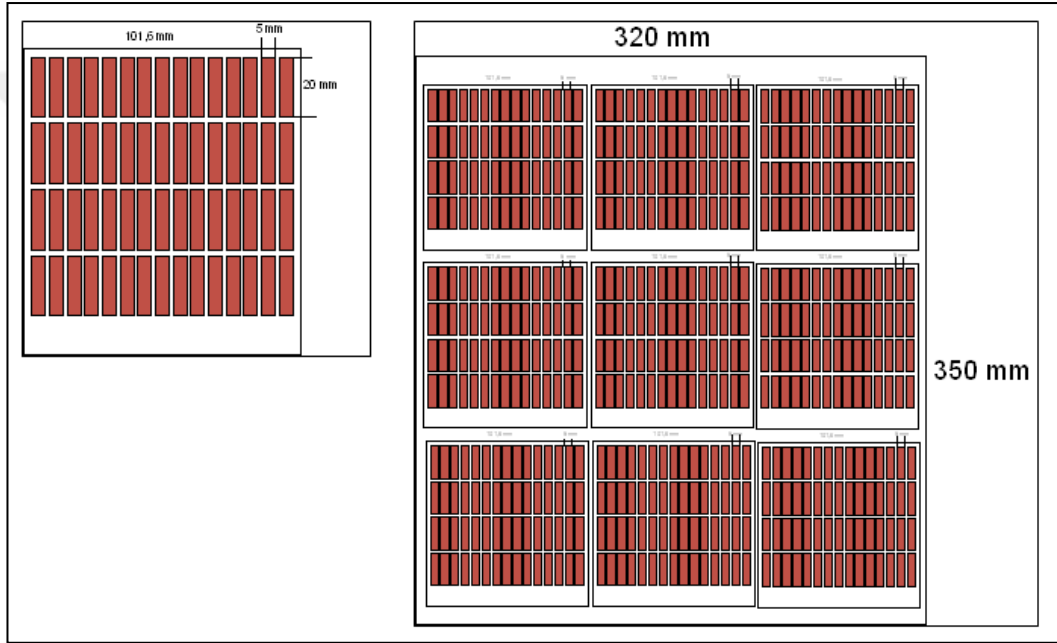
Bu kapsamda alınan IPCE ölçüm sonuçları gelen fotonun güç dönüşüm verimlilik değerlerinin altın nanorod yapıların kullanılması ile artmakta olduğunu açık şekilde göstermektedir.



Şekil 4.42: Deney 4 IPCE eğrileri a) referans, b) %0,5 AuNR katkılı, c) %1 AuNR katkılı, d) %2 AuNR katkılı hücre.

4.3. Organik Güneş Hücresi Modülü Teorik Güç Hesaplaması

Organik güneş hücrelerinin seri ve paralel olarak bağlanması ile oluşturulan kollektif yapılara organik güneş hücresi modülü adı verilmektedir. Birden fazla modülün bir araya gelmesi ile elde edilen yapılar ise güneş panelleri olarak adlandırılmaktadır. Organik güneş hücrelerinin sanayileşmesindeki en önemli engellerden biri de üretilen modül veya panellerin ürettikleri güç değerlerinin miktarıdır.



Şekil 4.43: Hücre Modül ve Panel Yerleşimi.

Örnek olarak %2,13 verimli ve %54 dolum faktörü değerine sahip (oldukça verimli sayılabilecek) hücre için alınan Voc değeri 0,78 V, Jsc değeri 5,04mA seviyesindedir. Fakat elde edilecek maksimum güç hesaplanırken nominal çalışma bölgesi baz alınmalıdır. (V_{max} ve J_{max} değerleri). Yani bu hücrenin bir cm^2 'sinden elde edilecek güç değeri $0,590V \times 3,62mA = 21,368mW$ olacaktır.

Elde edilecek maksimum güç hesabı tablosu 32x35 cm panel						HÜCRE			MODÜL			PANEL		
4 inch modüller ile						Vmax (V)	Imax (mA)	Power (mW)	Vmodül (V)	Imodül (mA)*	Power (mW)	Vpanel (V)**	Ipanel (mA)	Power (W)
Satır sayısı /modül	Sütun sayısı /modül	Modüldeki hücre sayısı	32x35 cm Paneldeki modül sayısı	Paneldeki toplam hücre sayısı										
Teorik değer	4	15	60	9	540	0,96	12	11,52	0,96	720	691,2	8,64	691,2	5,971968
Reel değer	4	15	60	9	540	0,6	6	3,6	0,6	360	216	5,4	216	1,1664

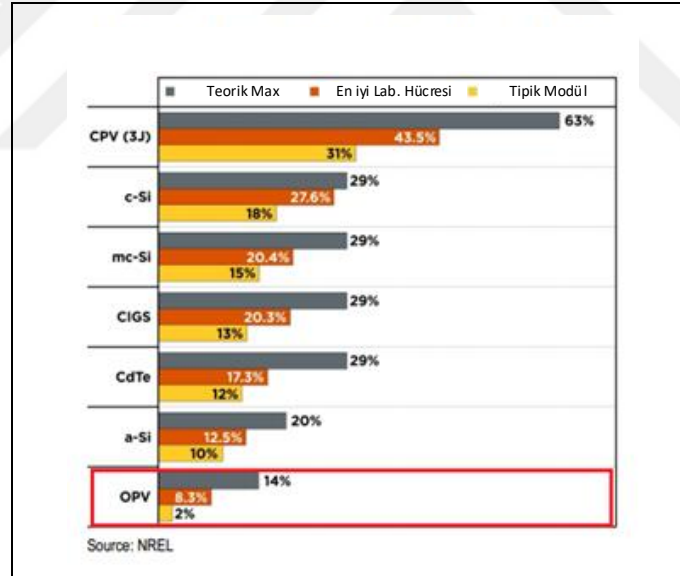
*Modüle yer alan tüm hücrelerin paralel bağlandığı düşünülmüştür.
**Panelde yer alan tüm modüllerin seri bağlandığı düşünülmüştür.

Elde edilecek maksimum güç hesabı tablosu 150x80 cm panel						HÜCRE			MODÜL			PANEL		
4 inch modüller ile						Vmax (V)	Imax (mA)	Power (mW)	Vmodül (V)	Imodül (mA)*	Power (mW)	Vpanel (V)**	Ipanel (mA)	Power (W)
Satır sayısı /modül	Sütun sayısı /modül	Modüldeki hücre sayısı	150x80 cm Paneldeki modül sayısı	Paneldeki toplam hücre sayısı										
Teorik değer	4	15	60	84	5040	0,96	12	11,52	0,96	720	691,2	80,64	691,2	55,73837
Reel değer	4	15	60	84	5040	0,6	6	3,6	0,6	360	216	50,4	216	10,8864

*Modüle yer alan tüm hücrelerin paralel bağlandığı düşünülmüştür.
**Panelde yer alan tüm modüllerin seri bağlandığı düşünülmüştür.

Şekil 4.44: Hücre Modül ve Panel için teorik verim hesaplamaları.

Aşağıdaki grafikte PV modül verim değerlerinin teorik, laboratuvar ve modül verim değerleri açısından kıyaslanması yer almaktadır.



Şekil 4.45: PV modül verim değerlerinin teorik, laboratuvar ve modül verim değerleri açısından kıyaslanması.

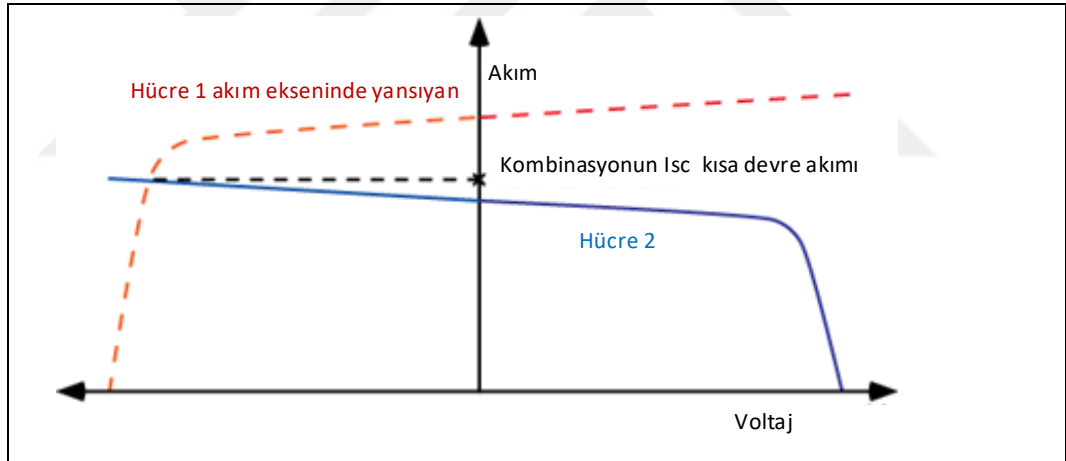
Görüldüğü üzere dünyada %8,3 değerinde laboratuvar verimi elde edildiği dönemde modül verim değerleri %2 mertebesinde. Hesaplamalarda bu değer temel alınması uygun olacaktır.

Yapılan deneysel çalışmaların tümünde gözlemlenen şey yüksek verim elde etmek isteniyor ise hücrelerin mümkün olan en küçük alanlarda oluşturulması

gerektiğidir. Tez kapsamında 3mmx3mm alanlarda çalışmalarda en iyi sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca alanı artırdıkça hücrede oluşan eşdeğer seri indüktans değerinin artması sebebiyle dolum faktörünün düştüğü gözlemlenmiştir. (%30 lara kadar inmektedir) Bu da güç hesabında kullanılan V_{max} J_{max} değerlerinin azalması anlamına gelmektedir.

Bir diğer husus toplam güç hesabı ile ilgilidir. Hücreler birbirine seri (voltajı yükseltmek için) ve paralel (akımı artırmak için) bağlantılarla birleştirildiklerinde akım/voltaj seviyelerinin lineer olarak artması mümkün değildir.

Aşağıdaki şekilde I_{sc} değerleri birbirinden farklı iki hücrenin seri bağlanması durumunda elde edilecek kısa devre akım değerinin, düşük I_{sc} değerli hücrenin akım değerine yakın olacağı net şekilde görülmektedir. Serilerin birbirine uymayan hücrelerinin kombine kısa devre akımını hesaplamanın kolay bir yöntemi Şekil 4.46'da verilmiştir. Kesişme noktasındaki akım, seri kombinasyonunun kısa devre akımını temsil etmektedir.

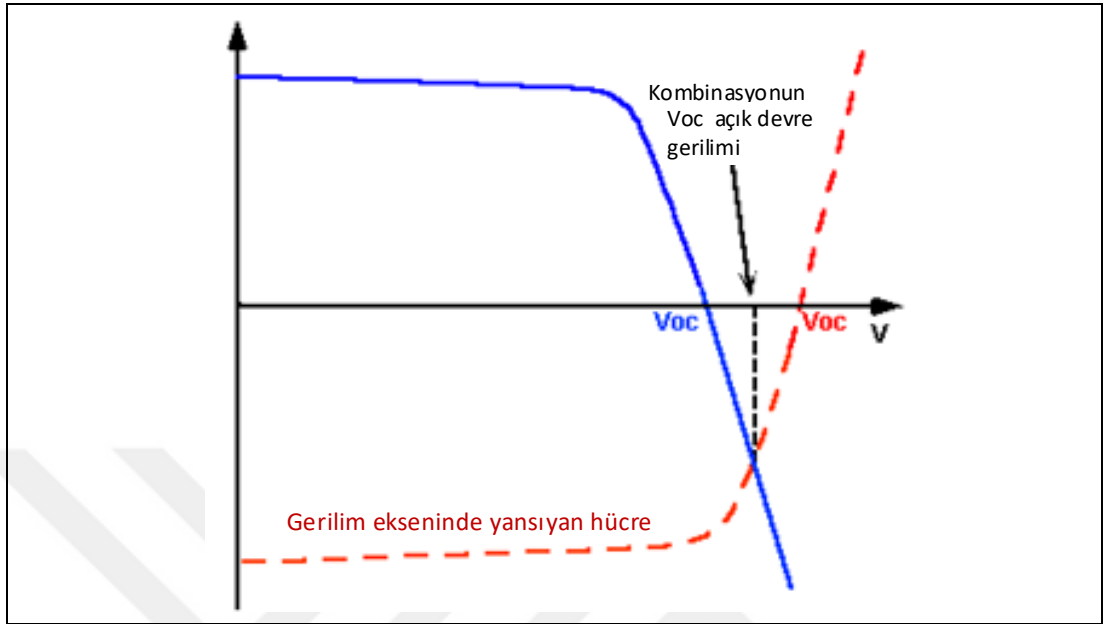


Şekil 4.46: Serilerin birbirine uymayan hücrelerinin kombine kısa devre akımı.

Bu demektir ki; eğer seri bağlantı yapılan 30 hücreli bir modülde sadece bir hücre bile düşük akım üretiyor ise bütün modülün üreteceği akımın sadece bu hücre yüzünden düşeceğinin öngörülmesi gerekmektedir.

Aşağıdaki şekilde V_{oc} değerleri birbirinden farklı iki hücrenin paralel bağlanması durumunda elde edilecek açık devre voltajı değerinin düşük V_{oc} değerli hücrenin gerilim değerine yakın olacağı görülmektedir. Eşleşmeyen hücrelerin kombine açık devre voltajını (V_{oc}) paralel olarak hesaplamak için bir yöntem (Şekil

4.47). Hücrelerden biri için eğri voltaj eksenine yansıtılır, böylece kesişme noktası ($I_1 + I_2 = 0$) paralel konfigürasyonun V_{oc} değeri olur.



Şekil 4.47: Eşleşmeyen hücrelerin kombine açık devre voltajını (V_{oc}) paralel olarak hesaplanması.

Literatürde bu kavram “mismatch effect” olarak tanımlanmaktadır ve seri bağlantılarda akımın düşmesine, paralel bağlantılarda da gerilimin düşmesine sebep olmaktadır. Modül yapısında da çok miktarda seri ve paralel bağlantı söz konusudur.

Sonuç olarak modülden elde edilecek güç hesabı yapılırken mismatch faktörleri de hesaba katılmalıdır.

Bu etki ile modül durumunda karşılaşmak her zaman mümkündür. Modülde yer alan hücrelerin üretimi muazzam şekilde özdeş (identical) yapılmış olsa bile modül hücrelerinden sadece biri üzerinde bir miktar verim düşüklüğü söz konusu olduğunda mismatch etkisi devreye girecek ve modülün ürettiği güç düşecektir. Hatta bu hücre üzerine akmaya çalışan ters akım sebebiyle hücre yanabilir (açık devre olabilir) ve tüm modül yapısı hasar görebilir. Kristal silisyum güneş panellerinde bu etkiyi ortadan kaldırmak için bypass diyotları kullanılmaktadır. Organik güneş hücrelerinde de bu uygulama mümkündür.

5. SONUÇ VE YORUM

Tez kapsamında metal nano parçacıklar ile katkılanmış güneş hücrelerinin performans verileri ve karakterize edilen fiziksel özellikleri doğrultusunda verimlilik değerlerindeki değişimler ve bu değişimlerin gerekçeleri detaylı olarak incelenmiş ve nano yapıların, hücrelerin verimlilik ve dayanıklılık özelliklerini pozitif yönde etkilediği görülmüştür.

Yığın heteroeklem yapıları güneş hücrelerindeki etkili yük transferi her iki yük taşıyıcısı için de sürekliliği olan yolların sağlanması sayesinde mümkün hale gelmektedir. Doğal olarak bu sürekli yolların kalın aktif tabakalarda var olması daha az olası bir durumdur. Bunun yanında yük taşıyıcılar organik yarı iletkenlerde var olan sınırlanmış atlama (hopping) transfer özellikleri sebebiyle azaltılmış eksiton difüzyon uzunlukları sergilemeleri ve yaklaşık 200 nm boyutundaki çok ince aktif tabaka kalınlıkları sebebiyle düşük yük taşıyıcı rekombinasyon özellikleri göstermelerine rağmen son derece zayıf ışık emebilme özelliğine sahiptirler. Bu yüzden bir polimer filmin absorptans değerini sınırlandırılmış bir kalınlık içerisinde arttırmak oldukça önemli bir hedeftir. Bu alandaki araştırmalar göstermiştir ki etkili ışık toplama ve etkili yük toplama arasındaki uyum sorunu, gelen ışığı aktif tabaka içerisine “tuzaklayarak” yeniden çözülebilir.

Bu doğrultuda öncelikle deney 1 ve deney 2 kapsamında gümüş nano parçacıkların organik güneş hücresi aktif katmanına katkılандığı çalışmalar ile hücrelerin verim değerlerinin arttığı elektriksel ölçümler ve IPCE ölçümleri aracılığıyla kanıtlanmıştır. Bu artışın temel sebebinin aktif katman bölgesinde oluşan metal nano parçacıkların saçılma ve yüzey plazmon polariton etkileri aracılığıyla artırdığı absorptans değeri sayesinde olduğu değerlendirilmektedir. Bu sebep-sonuç ilişkisi alınan absorptans ölçümleri ve verim artış değerlerindeki uyum ile kurulmaktadır. Ayrıca nano yapıları aktif katman filmlerinin atomik kuvvet mikroskobu ölçümleri, yüzey özelliklerinin ve pürüzlülük değerlerinin nano parçacık konsantrasyonu ile değiştiğini ve bu özelliklerin saçılma etkileri sayesinde gelen ışığın eksitonların oluştuğu ortam içerisinde birden çok kez saçılarak ışığın absorptans özelliklerini artırmakta olduğunu göstermektedir.

Deney 3 ve deney 4 kapsamında gerçekleştirilen çalışmalarda ise sentezlendikleri de-iyonize su ortamındaki altın nano yapıların yine su bazlı

PEDOT:PSS (hol iletken) katman içerisinde katkılanmasının verim değerlerinde artışa sebep olduğu görülmektedir. Bu durumda da yine gelen ışığın metal nano parçacıkların bulunduğu ortamda birden çok kez saçılarak aktif alan içerisine girmesi ayrıca hol iletim tabakası ve aktif tabaka arasındaki yüzeyde oluşan yerelleşmiş yüzey plazmon rezonans etkileri ile artan absorban değerleri sayesinde güneş hücrelerinin verim değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu etkiler sayesinde artan güneş hücresi verim değerlerinin tutarlılığı IPCE verileri ile doğrulanmıştır.

Sistemik olarak gerçekleştirilen bu dört farklı deney çalışmasının her birinde farklı aktif polimer malzemeler kullanılmıştır. Ancak her deney setinde metal nano parçacıkların hücre performansını etkilediği gözlemlenmiştir. Bu sayede irdelenmekte olan fiziksel olgunun farklı yapıdaki güneş hücrelerinde de benzer özellikler göstermekte olduğu ve temel anlamda gerçekleştirilen çalışmaların tekrarlanabilir ve güvenilir sonuçlar ortaya koyduğu değerlendirilmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında üretilen tüm cihazların yapıları ve elde edilen verim değerleri aşağıdaki tabloda özetlenmiştir.

Tablo 5.1: Deneysel sonuçları özet tablosu.

NO	DENEY NO	KATKILANAN KATMAN İÇERİĞİ	CİHAZ KODU	VERİM (%)	FF	VOC	JSC
1	Deney 1	AnE-PVstat:PCBM	D1K1	2,46	0,58	825 mV	5,13 mA/cm ²
2	Deney 1	AnE-PVstat:PCBM+0,02 AgNP	D1K2	2,92	0,62	832 mV	5,66 mA/cm ²
3	Deney 1	AnE-PVstat:PCBM+0,01 AgNP	D1K3	3,10	0,48	764 mV	8,46 mA/cm ²
4	Deney 2	PCDTBT:PCBM	D2K1	0,65	0,38	670 mV	2,54 mA/cm ²
5	Deney 2	PCDTBT:PCBM+%0,4 AgNP	D2K2	1,25	0,44	740 mV	3,79 mA/cm ²
6	Deney 2	PCDTBT:PCBM+%0,7 AgNP	D2K3	1,72	0,44	840 mV	4,64 mA/cm ²
7	Deney 2	PCDTBT:PCBM	D2K4	0,12	0,21	790 mV	0,71 mA/cm ²
8	Deney 2	PCDTBT:PCBM+%0,4 AgNP	D2K5	0,18	0,21	820 mV	0,96 mA/cm ²
9	Deney 2	PCDTBT:PCBM+%0,7 AgNP	D2K6	0,24	0,23	830 mV	1,31 mA/cm ²
10	Deney 3	PEDOT:PSS	D3K1	2,98	0,56	600 mV	8,92 mA/cm ²
11	Deney 3	PEDOT:PSS +%1 AuNP	D3K2	3,39	0,57	610 mV	9,68 mA/cm ²
12	Deney 3	PEDOT:PSS +%2 AuNP	D3K3	3,23	0,57	610 mV	9,11 mA/cm ²
13	Deney 3	PEDOT:PSS +%3 AuNP	D3K4	3,21	0,54	600 mV	9,67 mA/cm ²
14	Deney 4	PEDOT:PSS	D4K1	1,70	0,32	730 mV	7,28 mA/cm ²
15	Deney 4	PEDOT:PSS +%0,5 AuNR	D4K2	2,05	0,31	720 mV	9,20 mA/cm ²
16	Deney 4	PEDOT:PSS +%1 AuNR	D4K3	1,92	0,33	710 mV	8,23 mA/cm ²
17	Deney 4	PEDOT:PSS +%2 AuNR	D4K4	2,25	0,32	740 mV	9,61 mA/cm ²

KAYNAKLAR

- [1] Smalley R. E., (June 2005). "Future Global Energy Prosperity: The Terrawatt Challenge" MRS Bulletin, 30, 412-417.
- [2] Wilkes J., Moccia J., Dragan M., (2012), "Wind in power. 2011 European Statistics", 1, 1-11.
- [3] Krebs F., (2013), "Freely available OPV—The fast way to progress", Energy Technology, 1, 378–381.
- [4] Chamberlain G. A., (1983), "Organic Solar Cells: A Review, Solar Cells", 8, 47.
- [5] Wöhrle D., Meissner D., (1991), "Organic Solar Cells", Advanced Materials, 3, 129.
- [6] Peumans P., Yakimov A, Forrest S. R., (2003), "Small molecular weight organic thin-film photodetectors and solar cells", Journal of Applied Physics, 93, 3693.
- [7] Maennig B., Drechsel J., Gebeyehu D., Simon P., Kozłowski F., Werner A., Li F., Grundmann S., Sonntag S., Koch M., Leo K., Pfeiffer M., Hoppe H., Meissner D., Sarıciǧci N.S., Riedel S., Dyakonov V., Parisi J., (2004) "Organic p-i-n solar cells", Applied Physics, 79, (1), 1-14.
- [8] Skotheim T. A., Reynolds J. R., (1986), "Handbook of Conducting Polymers", 3rd Edition, (2), CRC Press.
- [9] Nalwa H. S., (1997), "Handbook of Organic Conductive Molecules and Polymers", 1-4, 3334 , John Wiley & Sons Ltd.
- [10] Skotheim T. A., Elsenbaumer R. L., Reynolds J. R., (1998), "Handbook of Conducting Polymers"; 4th Edition, (1), Marcel Dekker, Inc.
- [11] Hadziioannou G., van Hutten P. F., (2000), "Semiconducting Polymers: Chemistry, Physics and Engineering", 1st Edition, WILEY-VCH, Weinheim.
- [12] Dimitrakopoulos C. D., Mascaro D. J. , (2001), "Organic thin-film transistors: A review of recent advances", IBM Journal of Research and Development, 45, 11-27.
- [13] Halls J. J. M., Pichler K., Friend R. H., Moratti S. C., Holmes A. B., (1996), "Exciton diffusion and dissociation in a poly(p-phenylenevinylene)/C60 heterojunction photovoltaic cell", Applied Physics Letters, 68, 3120.
- [14] Halls J. J. M., Friend R. H., (1997), "The Photovoltaic Effect in a Poly(p-phenylenevinylene) / Perylene Heterojunction", Synthetic Metals, 85, 1307.

- [15] Kerp H. R, Donker H., Koehorst R. B. M., Schaafsma T. J., van Faassen E. E., (1998), “Exciton transport in organic dye layers for photovoltaic applications”, Chemical Physics Letters, 298, 302.
- [16] Savanije T. J., Warman J. M., Goossens A., (1998), “Visible light sensitisation of titanium dioxide using a phenylene vinylene polymer”, Chemical Physics Letters, 287, 148.
- [17] Haugeneder A., Neges M., Kallinger C., Spirkel W., Lemmer U., Feldmann J., Scherf U., Harth E., Gügel A., Müllen K., (1999), “Exciton diffusion and dissociation in conjugated polymer/fullerene blends and heterostructures”, Physics Review, B 59, 15346.
- [18] Pettersson L. A. A., Roman L. S., Inganäs O., (1999) , “Modeling photocurrent action spectra of photovoltaic devices based on organic thin films”, Journal of Applied Physics, 86, 487.
- [19] Stoessel M., Wittmann G., Staudigel J., Steuber F., Blässing J., Roth W., Klausmann H., Rogler W., Simmerer J., Winnacker A., Inbasekaran M., Woo E. P., (2000) “Cathode-induced luminescence quenching in polyfluorenes”, Journal of Applied Physics, 87, 4467.
- [20] Stübinger T., Brütting W., (2001), “Exciton diffusion and optical interference in organic donor–acceptor photovoltaic cells”, Journal of Applied Physics, 90, 3632.
- [21] Kroeze J. E., Savanije T. J., Vermeulen M. J. W., Warman J. M., (2003), “Contactless Determination of the Photoconductivity Action Spectrum, Exciton Diffusion Length, and Charge Separation Efficiency in Polythiophene-Sensitized TiO₂ Bilayers”, Journal of Physical Chemistry, B 107, 7696.
- [22] Sariciftci N. S. , (1997) “Primary Photoexcitations in Conjugated Polymers: Molecular Exciton versus Semiconductor Band Model”, World Scientific, 1st Edition.
- [23] Gregg B. A., Hanna M. C., (2003), “Comparing organic to inorganic photovoltaic cells: Theory, experiment, and simulation”, Journal of Applied Physics, 93, 3605.
- [24] Web 1, (2017), <https://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart.png> (Erişim Tarihi: 15.07.2017)
- [25] Parker I. D., (1994), “Carrier tunneling and device characteristics in polymer light-emitting diodes”, Journal of Applied Physics, 75, 1656.
- [26] Gosh A. K., Morel D. L., Feng T., Shaw R. F., Rowe(Jr.) C. A., (1974), “Photovoltaic and rectification properties of Al/Mg phthalocyanine/Ag Schottky-barrier cells”, Journal of Applied Physics, 45, 230.

- [27] Meissner D., Siebentritt S., Günster S., (1992), "Charge carrier photogeneration in organic solar cells", International Symposium on Optical Materials Technol. for Energy Efficiency and Solar Energy Conversion XI: Photovoltaics, Photochemistry and Photoelectrochemistry, Toulouse FRANCE, Aralık 1992.
- [28] Karg S., Riess W., Dyakonov V., Schwoerer M., (1993), "Electrical and optical characterization of poly(phenylene-vinylene) light emitting diodes", *Synthetic Metals*, 54, 427.
- [29] Morel D. L., Gosh A. K., Feng T., Stogryn E. L., Purwin P. E., Shaw R. F., Fishman C., (1978), "High-efficiency organic solar cells", *Applied Physics Letters*, 32, 495.
- [30] Gosh A. K. Feng T., (1978) "Merocyanine organic solar cells", *Journal of Applied Physics*, 49, 5982.
- [31] Sze S. M., (1981), "Physics of semiconductor devices", J. Wiley & Sons, New York.
- [32] Marks R. N., Halls J. J. M., Bradley D. D. C., Friend R. H., Holmes A. B., (1994), "The photovoltaic response in poly(p-phenylene vinylene) thin-film devices", *Journal of Physics: Condensed Matter*, 6, 1379.
- [33] Tang C. W., (1986). "Two-layer organic photovoltaic cell", *Applied Physics Letters*, 48, 183,
- [34] Rostalski J. Meissner D., (2000), "Monochromatic versus solar efficiencies of organic solar cells", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 61, 87.
- [35] Peumanns P., Bulovic V., Forrest S. R., (2000), "Efficient photon harvesting at high optical intensities in ultrathin organic double-heterostructure photovoltaic diodes", *Applied Physics Letters*, 76, 2650.
- [36] Sariciftci N. S., Smilowitz L., Heeger A. J., Wudl F., (1992), "Photoinduced electron transfer from a conducting polymer to buckminsterfullerene", *Science*, 258, 1474.
- [37] Smilowitz L., Sariciftci N. S., Wu R., Gettinger C., Heeger A. J., Wudl F., (1993), "Photoexcitation spectroscopy of conducting-polymer-C60 composites: Photoinduced electron transfer", *Physics Review*, B 47, 13835.
- [38] Lee C. H., Yu G., Moses D., Pakbaz K., Zhang C., Sariciftci N. S., Heeger A. J., Wudl F., (1993), "Sensitization of the photoconductivity of conducting polymers by C60: Photoinduced electron transfer", *Physics Review*, B 48, 15425.
- [39] Morita S., Zakhidov A. A., Yoshino K., (1992), "Doping effect of buckminsterfullerene in conducting polymer: Change of absorption spectrum and quenching of luminescence", *Solid State Communications*, 82, 249.

- [40] Morita S., Kiyomatsu S., Yin X. H., Zakhidov AA, Noguchi T, Ohnishi T, Yoshino K, (1993), "Doping effect of buckminsterfullerene in poly(2,5-dialkoxy-p-phenylene vinylene)", *Journal of Applied Physics*, 74, 2860.
- [41] Sariciftci N. S., Braun D., Zhang C., Srdanov V. I., Heeger A. J., Stucky G., Wudl F., (1993), "Semiconducting polymer-buckminsterfullerene heterojunctions: Diodes, photodiodes, and photovoltaic cells", *Applied Physics Letters*, 62, 585.
- [42] Roman L. S., Mammo W., Petterson L. A. A., Andersson M. R., Inganäs O., (1998), "High Quantum Efficiency Polythiophene/C60 Photodiodes", *Advanced Materials*, 10, 774.
- [43] Yu G., Gao J., Hummelen J. C., Wudl F., Heeger A. J., (1995), "Polymer Photovoltaic Cells: Enhanced Efficiencies via a Network of Internal Donor-Acceptor Heterojunctions", *Science*, 270, 1789.
- [44] Yang C. Y., Heeger A. J., (1996), "Morphology of composites of semiconducting polymers mixed with C60", *Synthetic Metals*, 83, 85.
- [45] Hummelen J. C., Knight B. W., LePeq F., Wudl F., Yao J., Wilkins C. L., (1995), "Preparation and Characterization of Fulleroid and Methanofullerene Derivatives", *Journal of Organic Chemistry*. 60, 532.
- [46] Hiramoto M., Fujiwara H., Yokoyama M., (1991) "Three-layered organic solar cell with a photoactive interlayer of codeposited pigments", *Applied Physics Letters*, 58, 1062.
- [47] Hiramoto M., Fujiwara H., Yokoyama M., (1992), "p-i-n like behavior in three-layered organic solar cells having a co-deposited interlayer of pigments", *Journal of Applied Physics*, 72, 3781.
- [48] Yu G, Heeger A. J., (1995), "Charge separation and photovoltaic conversion in polymer composites with internal donor/acceptor heterojunctions", *Journal of Applied Physics*, 78, 4510.
- [49] Halls J. J. M., Walsh C. A., Greenham N. C., Marseglia E. A., Friend RH, Moratti S. C., Holmes A. B., (1995), "Efficient photodiodes from interpenetrating polymer networks", *Nature*, 376, 498.
- [50] Tada K., Hosada K., Hirohata M., Hidayat R., Kawai T., Onoda M., Teraguchi M., Masuda T., Zakhidov A. A., Yoshino K., (1997), "Donor polymer (PAT6) - acceptor polymer (CNPPV) fractal network photocells", *Synthetic Metals*, 85, 1305.
- [51] Granström M., Petritsch K., Arias A. C., Lux A., Andersson M. R., Friend R. H., (1998), "Laminated fabrication of polymeric photovoltaic diodes", *Nature*, 395, 257.

- [52] Peumans P., Forrest S.R., (2001), Very-high-efficiency double-heterostructure copper phthalocyanine/C60C60 photovoltaic cells”, Applied Physics Letters, 79, 126.
- [53] Peumans P., Forrest S.R., Erratum, (2002), "Very-high-efficiency double-heterostructure copper phthalocyanine/C60 photovoltaic cells" , Applied Physics Letters, 80, 338.
- [54] Shaheen S.E., Brabec C.J., Sariciftci N.S., Padinger F., Fromherz T., Hummelen J.C., (2001), “2.5% efficient organic plastic solar cells”, Applied Physics Letters, 78, 841.
- [55] Kroon J.M., Wienk M.M., Verhees W.J.H., Hummelen J.C., (2002), “Accurate efficiency determination and stability studies of conjugated polymer/fullerene solar cells”, Thin Solid Films, 403-404, 223.
- [56] Munters T., Martens T., Goris L., Vrindts V., Manca J., Lutsen L., Ceunick W. D., Vanderzande D., Schepper L.D., Gelan J., Sariciftci N.S., Brabec C.J., (2002), “A comparison between state-of-the-art 'gilch' and 'sulphanyl' synthesised MDMO-PPV / PCBM bulk hetero-junction solar cells”, Thin Solid Films, 403-404, 247.
- [57] Aernouts T., Geens W., Portmans J., Heremans P., Borghs S., Mertens R., (2002), “Extraction of bulk and contact components of the series resistance in organic bulk donor-acceptor-heterojunctions”, Thin Solid Films, 403-404, 297.
- [58] Schilinsky P., Waldauf C., Brabec C.J., (2002), “Recombination and loss analysis in polythiophene based bulk heterojunction photodetectors”, Applied Physics Letters, 81, 3885.
- [59] Padinger F., Rittberger R.S., Sariciftci N.S., (2003), “Effects of Postproduction Treatment on Plastic Solar Cells”, Advanced Functional Materials, 13, 1.
- [60] Svensson M., Zhang F., Veenstra S.C., Verhees W. J. H., Hummelen J. C., Kroon J. M., Inganäs O., Andersson M. R., (2003), “High-Performance Polymer Solar Cells of an Alternating Polyfluorene Copolymer and a Fullerene Derivative”, Advanced Materials, 15, 988.
- [61] Wienk M.M., Kroon J.M., Verhees W. J. H., Knol J., Hummelen J. C., van Hall P. A., Janssen R. A. J., (2003), “Efficient Methano[70]fullerene/MDMO-PPV Bulk Heterojunction Photovoltaic Cells”, Angewandte Chemie International Edition, 42, 3371.
- [62] Huynh W.U., Dittmer J.J., Alivisato A.P., (2002), “Hybrid Nanorod-Polymer Solar Cells”, Science, 295, 2425.
- [63] Tributsch H., Calvin M., (1971), “Electrochemistry of excited molecules. Photoelectrochemical reactions of chlorophylls”, Photochemistry and Photobiology, 14, 95.

- [64] Tributsch H., (1972), "Reaction of excited chlorophyll molecules at electrodes and in photosynthesis", *Photochemistry and Photobiology*, 16, 261.
- [65] Osa T., Fujihira M., (1976), "Photocell using covalently-bound dyes on semiconductor surfaces", *Nature*, 264, 349.
- [66] Fujihira M., Ohishi N., Osa T., (1977), "Photocell using covalently-bound dyes on semiconductor surfaces", *Nature*, 268, 226.
- [67] Tsubomura H., Matsumura M., Nakatani K., Yamamoto K., Maeda K., (1978), "'Wet-type' solar cells with semiconductor electrodes", *Solar Energy*, 21, 93.
- [68] Matsumura M., Matsudaira S., Tsubomura H., Takata M., Yanagida H., (1979), "Sintered ZnO electrode for dye-sensitized photocell", *Yogyo Kyokai Shi*, 87, 167.
- [69] O'Regan B., Grätzel M., (1991), "A low cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films", *Nature*, 353, 737.
- [70] Kalyanasundaram K., Grätzel M., (1998), "Applications of functionalized transition metal complexes in photonic and optoelectronic devices", *Coordination Chemistry Reviews*, 77, 347.
- [71] Grätzel M., (2001), "Photoelectrochemical Cells", *Nature*, 414, 338.
- [72] Grätzel M., (2003), "Dye-sensitized solar cells", *Journal of Photochemistry and Photobiology, C* 4, 145.
- [73] Neugebauer H., Brabec C., Hummelen J.C., Sariciftci N.S., (2000), "Stability and photodegradation mechanisms of conjugated polymer/fullerene plastic solar cells", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 61, 35.
- [74] Padinger F., Fromherz T., Denk P., Brabec C.J., Zettner J., Hierl T., Sariciftci N.S., (2001), "Degradation of Bulk Heterojunction Solar Cells Operated in an Inert Gas Atmosphere: A Systematic Study", *Synthetic Metals*, 121, 1605.
- [75] Jorgensen M., Norrman K. Krebs C., (2008), "Stability/degradation of polymer solar cells" *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92, 686-714.
- [76] Krebs, F. C., Norrman, K., (2007), "Analysis of the failure mechanism for a stable organic photovoltaic during 10 000 h of testing", *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 15: 697–712.
- [77] Günes S., Neugebauer H., Sariciftci N. S., (2007), "Conjugated Polymer-Based Organic Solar Cells" *Chemical Reviews*, 107, 1324-1338.

- [78] Hames Y., Alpaslan Z., Kösemen A., San S. E., Yerli Y., (2010), “Electrochemically grown ZnO nanorods for hybrid solar cell applications”, *Solar Energy*, 84 426–43.1
- [79] Kang Y., Park N.G., Kim D., (2005), “Hybrid solar cells with vertically aligned CdTe nanorods and a conjugated polymer”, *Applied Physics Letters*, 86, 113101.
- [80] Günes S., Fritz K. P., Neugebauer H., Sariciftci N. S., Kumar S., Scholes G. D., (2007), “Hybrid solar cells using PbS nanoparticles”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 91, 420–423.
- [81] Qiao Q., Xie Y., McLeskey Jr.J.T., (2008), “Organic/inorganic polymer solar cells using a buffer layer from all-water-solution processing”, *Journal of Physical Chemistry, C* 112, pp. 9912–9916.
- [82] Shen L., Zhang X.D., Guo W.B., Liu C.X., Dong W., Ruan S.P., (2011), “Performance improvement of polymer solar cells using V₂O₅ as an anode buffer layer” *Material Science Forum*, 663-665, 865-868.
- [83] Alparslan Z., Kösemen A., Örnek O., Yerli Y., San S. E., (2011), “TiO₂-Based Organic Hybrid Solar Cells with Mn⁺² Doping”, *International Journal of Photoenergy*, Article ID 734618.
- [84] Hau S. K., Yip H. L., Baek N. S., Zou J., O'Malley K., Jen A. K. Y., (2008), “Air-stable inverted flexible polymer solar cells using zinc oxide nanoparticles as an electron selective layer”, *Applied Physics Letters*, 92, 253301.
- [85] Brizius G., Pschirer G. N., Steffen W., Stitzer K., Zur Loye H.C., Bunz U. H. F., (2000), “Alkyne Metathesis with Simple Catalyst Systems: Efficient Synthesis of Conjugated Polymers Containing Vinyl Groups in Main or Side Chain”, *Journal of the American Chemical Society*, 122, 12435.
- [86] Egbe D. A. M., Tillmann H., Birckner E., Klemm Macromol E., (2001), “Synthesis and Properties of Novel Well-Defined Alternating PPE/PPV Copolymers”, *Chemical Physics*, 202, 2712.
- [87] A. M. Ramos, M. T. Rispens, J. K. J. van Duren, J. C. Hummelen, R. A. J. Janssen, (2001), “Photoinduced Electron Transfer and Photovoltaic Devices of a Conjugated Polymer with Pendant Fullerenes” *Journal of the American Chemical Society*, 123, 6714.
- [88] Schenning A. P. H. J., Tsipis A. C., Meskers S. C. J., Beljonne Meijer D., E. W., Bre´das J. L., (2002), “Electronic Structure and Optical Properties of Mixed Phenylene Vinylene/Phenylene Ethynylene Conjugated Oligomers”, *Chemistry of Materials*, 14, 1362.
- [89] Chu Q., Pang Y., Ding L., Karasz F. E., (2003), “Green-Emitting PPE-PPV Hybrid Polymers: Efficient Energy Transfer across the m-Phenylene Bridge”, *Macromolecules*, 36, 3848.

- [90] Krebs F.J., (2012) “Stability and Degradation of Organic and Polymer Solar Cells”, John Wiley & Sons Ltd.
- [91] Forrest S. R., (2005), “The Limits to Organic Photovoltaic Cell Efficiency”, MRS Bulletin, 30, 28.
- [92] Web 2, (2017), <https://www.youtube.com/watch?v=wxrAELeXlek>, (Erişim Tarihi: 15.07.2017)
- [93] Web 3, (2017), <http://www.parkafm.com/index.php/medias/nano-academy/how-afm-works> , (Erişim Tarihi: 15.07.2017)
- [94] Stratakis E. Kiyamakis E., (2013) Nanoparticle-based plasmonic organic photovoltaic devices”, Materials Today, 16, 133.
- [95] Shrotriya V., Li G., Yao Y., Moriarty T., Emery K., Yang Y., (2006), “Accurate Measurement and Characterization of Organic Solar Cells”, Applied Physics Letters, 88,064104.
- [96] G. Dennler, Sharber M. C., Brabec C. J., (2009), “Polymer-Fullerene Bulk-Heterojunction Solar Cells”, Advanced Materials, 21, 1323.
- [97] Yu E.T., de Lagemaat J., (2011), “Photon management for photovoltaics”, MRS Bulletin, 36, 424.
- [98] Atwater H. A., Polman A., (2010), “Plasmonics for improved photovoltaic devices”, Nature Materials, 9,205.
- [99] Barnes W.L., Dereux A., Ebbesen T. W., (2003), “Surface plasmon subwavelength optics” Nature, 6950, 424:824-30.
- [100] Pillai S., Green M.A., (2010), “Plasmonics for photovoltaic applications”, Solar Energy Materials and Solar Cells, 94,1481
- [101] Kelly K.L., Coronado E. Zhao L. L., Schatz, G. C., (2003), “The Optical Properties of Metal Nanoparticles: The Influence of Size, Shape, and Dielectric Environment”, Journal. Of Physical Chemistry, 107,668
- [102] Beck F. J., Verhagen E., Mokkaapati S., Polman A., Catchpole K. R., (2011), “Resonant SPP modes supported by discrete metal nanoparticles on high-index substrates”, Optics Express, 19,A146- 156.
- [103] Weickert J., Dunbar R. B., Hesse H. C., Wiedemann W., Schmidt-Mende L., (2011), “Nanostructured Organic and Hybrid Solar Cells”, Advanced Materials, 23,1810.
- [104] Sha W. E. I., Wallace C. H. Choy, Chew W. C., (2011), “Angular response of thin-film organic solar cells with periodic metal back nanostrips”, Optics Letters, 36,478.
- [105] Paci B., Spyropoulos G. D., Generosi A., Bailo D., Albertini V.R., Stratakis E., Kymakis E., (2011), “Enhanced Structural Stability and Performance

Durability of Bulk Heterojunction Photovoltaic Devices Incorporating Metallic Nanoparticles”, *Advanced Functional Materials*, 3573.

- [106] Tekin E., Wijlaars H., Holder E, Egbe D.A.M., Schubert U.S., (2006), “Film Thickness dependency of the emission colors of PPE-PPVs in inkjet printed libraries”, *Journal of Materials Chemistry*, 16:4294.
- [107] Töre N, Parlak E, (2012), “Effect of blend ratio on poly(p-phenylene-ethynylene)-alt-poly(p-phenylene-vinylene) polymer solar cell”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 104:39–44.
- [108] Lu L., Luo Z., Xu T., Yu L., (2012), “Cooperative plasmonic effect of Ag and Au nanoparticles on enhancing performance of polymer solar cells”, *Nano Letters*, 13:19.
- [109] Mucur S. P., Tumay T. A., San S. E., Tekin E., (2012), “Enhancing effects of nanoparticles on polymer - OLED performances”, *Journal of Nanoparticle Research*, 14:1214.
- [110] Reese M. O., Suren Gevorgyan, Morten Vesterager Madsen, (2011), “Consensus stability testing protocols for organic photovoltaic materials and devices”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95-5, 1253-1267.

ÖZGEÇMİŞ

Nesrin TÖRE ŞEN 07.09.1986 yılında Eskişehir’de doğdu. 2009 yılında Hacettepe Üniversitesi Fizik Mühendisliği Bölümünde lisans eğitimini tamamladı. 2010 - 2012 tarihleri arasında yüksek lisans eğitimini, 2012 - 2017 tarihleri arasında doktora eğitimini Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında tamamladı.

2010-2013 yılları arasında TÜBİTAK-UME bünyesinde yürütülmüş olan “Yeni Donör Akseptör Tipli Kopolimerlerin Güneş Pili Uygulamalarında Kullanılması” isimli 110-T-617 numaralı projede Proje Asistanı olarak görev almıştır. Proje kapsamında, Marmara Araştırma Merkezi - Kimya Bölümünde sentezlenen polimerlerin kullanıldığı organik güneş pillerinin üretiminde ve karakterizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda ince film kaplama teknikleri ve glovebox sistemi hakkında çalışmış, güneş pillerinin, elektro-optik ölçüm sistemlerini kurmuş ve standart ömür testlerini gerçekleştirmiştir.

17 Nisan 2013 tarihinden itibaren SAVRONİK ELEKTRONİK A.Ş.’de Sistem Mühendisi olarak görev yapmaktadır. Çeşitli savunma sanayii projelerinde proje yönetimi, konfigürasyon yönetimi, sistem mühendisliği, dokümantasyon ve süreç koordinasyonu gibi aşamalarda aktif görev almıştır. Geliştirilen askerî ürünler kapsamında, ilgili projelerin, tasarım, doğrulama ve kalifikasyon aşamalarında çevre koşulu ve emniyet gereksinimlerinin karşılanmasına yönelik test/analiz faaliyetlerine katılmış, söz konusu proje aşamalarının ve test/analiz faaliyetlerinin uluslararası askeri standartlar çerçevesinde icra edilmesi kapsamında çalışmıştır.

EKLER

Ek A: Tez Çalışması Kapsamında Yapılan Yayınlar

Tore N., Parlak E.A., Tumay T.A., Kavak P., Sarıdoğan Ş., Bozar S., Gunes S., Ulbricht C., Egbe D.A.M., (2014) “Improvement in photovoltaic performance of anthracene-containing PPE–PPV polymer-based bulk heterojunction solar cells with silver nanoparticles”, Journal of Nanoparticle Research, 16(3)

Parlek E.A., Tumay T.A., Tore N., Sarıdoğan Ş., Kavak P., Türksoy F., (2013), “Efficiency improvement of PCDTBT solar cells with silver nanoparticles”, Solar Energy Materials and Solar Cells, 110:58-62