



T.C.  
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA  
NANOTEKNOLOJİ VE BİYOTEKNOLOJİ  
ENSTİTÜSÜ



YÜKSEK LİSANS TEZİ

ZnO NANO PARÇACIK KATKILI İLETKEN POLİMERLERİN X-IŞINI  
ALGILANMASINDA ve DETEKTÖR GELİŞTİRİLMESİNDE KULLANILMASI

NEVİN NUR SELÇUK

DANIŞMAN  
Doç. Dr. ARİF KÖSEMEN

NANOTEKNOLOJİ ANABİLİM DALI

NANOTEKNOLOJİ, TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

MAYIS, 2025

## TEZ KABUL VE ONAYI

Nevin Nur SELÇUK tarafından, Doç. Dr. Arif KÖSEMEN danışmanlığında hazırlanan "ZnO Nano Parçacık Katkılı İletken Polimerlerin X-ışını Algılanmasında ve Detektör Geliştirilmesinde Kullanılması" başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından 16/05/2025 tarihinde yapılan sınav sonucunda **oy birliği** ile başarılı bulunarak **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

### Tez Jürisi

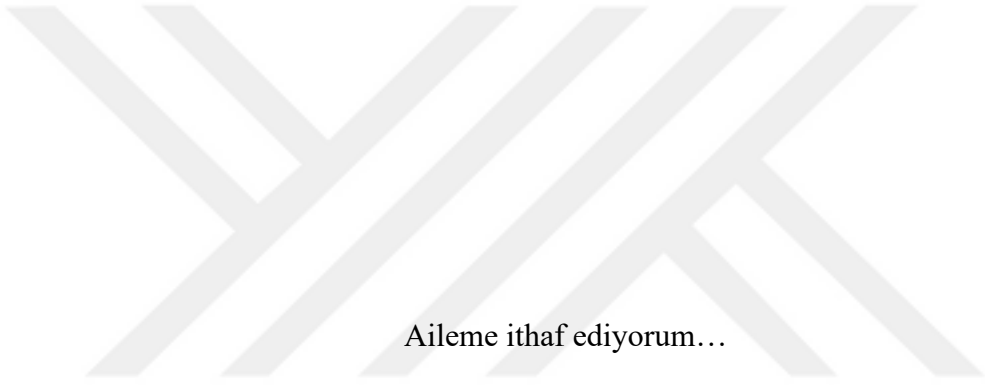
	İmza	Sonuç
	Doç. Dr. Arif KÖSEMEN	<input checked="" type="checkbox"/>
<b>DANIŞMAN</b>	İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Nanoteknoloji Anabilim Dalı	Kabul <input type="checkbox"/> Ret
	Prof. Dr. Sadullah ÖZTÜRK	<input checked="" type="checkbox"/>
<b>ÜYE</b>	İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Nanoteknoloji Anabilim Dalı	Kabul <input type="checkbox"/> Ret
	Dr. Öğr. Üyesi Yalçın KALKAN	<input checked="" type="checkbox"/>
<b>ÜYE</b>	Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü	Kabul <input type="checkbox"/> Ret

## BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve bilimsel etik kuralları içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını ve her türlü hukuki sorumluluğu aldığımı kabul ederim.

Nevin Nur SELÇUK

(İmza)



Aileme ithaf ediyorum...

## **BÜTÇE DESTEKLERİ**

### **ZnO Nano Parçacık Katkılı İletken Polimerlerin X-ışını Algılanmasında ve Detektör Geliştirilmesinde Kullanılması**

Bu tez çalışması, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'nun (TÜBİTAK) 123F131 numaralı projesi ve 2210-C Yurt İçi Öncelikli Alanlar Yüksek Lisans Burs Programı başvuru numarası: 1649B022315061 projesi kapsamında desteklenmiştir. Aynı zamanda Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu (TENMAK) tarafından 2025TENMAK(CERN)A5.H3.F2-06 numaralı, 2024 yılı CERN Projeleri Destek Programı kapsamında desteklenmiştir.

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının her aşamasında, akademik yolculuğumda bilgi ve tecrübeleriyle yolumu aydınlatan değerli danışmanım Doç. Dr. Arif KÖSEMEN'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Sadece akademik anlamda değil, bana inancınız, sabrınız ve yönlendirici desteğinizle bu süreci aşmamda en büyük yol göstericim oldunuz.

Akademik serüvenimin en başında, lisans yıllarımda derslerini hayranlıkla dinlediğim ve akademik kariyerime adım atmamda bana ilham kaynağı olan, ilerlemem için cesaretlendiren, bilgeliği ve yol göstericiliğiyle beni besleyen değerli hocam Prof. Dr. Sadullah ÖZTÜRK'e en derin ve samimi teşekkürlerimi sunmak isterim. Her zaman desteğinizi, yol göstericiliğinizi ve güveninizi hissettim. Bugün geldiğim noktada, bu yolda yürümeyi seçmemdeki en önemli figürlerden biri siz oldunuz; hayatımda yeriniz hep ayrı olacak. Ayrıca, bu süreçte ilerlememde vizyonlarıyla yolumu açan, katkılarını ve desteklerini her zaman yanımda hissettiğim Sayın Prof. Dr. Şahika Sena BAYAZİT'e gönülden teşekkür ederim.

Hayatta en büyük dayanaklarım olan, her anımda yanımda olan canım aileme; sevgili anneme, babama, abime ve her zaman desteğini hissettiğim Aslı teyzeme sonsuz teşekkür ederim. Varlığınız, sevginiz ve bana olan güveniniz benim en büyük motivasyon kaynağımdı.

Nanoteknoloji ve Biyoteknoloji Enstitüsü'nde birlikte çalıştığım tüm değerli ekip arkadaşlarıma, özellikle tüm süreçte yanımda olan, desteği ve varlığıyla değer katan kıymetli çalışma arkadaşım Arş. Gör. Furkan ÜLENGİN'e ve destekleriyle sürece pozitif bakış açısı ve motivasyon sağlayan Arş. Gör. Eray TABAK ve Ali Furkan ALBORA'ya çok teşekkür ederim. Ayrıca, yolculuğuma neşe ve renk katan can dostlarım Berfin GÜRBÜZ, Cansu MUŞ, Damla İnci ŞENÖNER ve Mihrace EFENDİOĞLU'na kalpten teşekkür ederim.

Ve son olarak, 2210-C Yurt İçi Öncelikli Alanlar Yüksek Lisans Burs Programı kapsamında sağladıkları maddi destekten dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Mayıs 2025

Nevin Nur SELÇUK

# İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ KABUL VE ONAYI.....	ii
BEYAN .....	iii
BÜTÇE DESTEKLERİ .....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ .....	ix
TABLO LİSTESİ.....	xii
DENKLEM LİSTESİ .....	xiii
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ .....	xiv
ÖZET .....	xvi
ABSTRACT .....	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE .....	7
2.1. İYONİZE RADYASYON .....	7
2.2. X-IŞINI DEDEKTÖRLERİ.....	11
2.2.1. Doğrudan ve Dolaylı Tip X-ışını Dedektörleri .....	14
2.2.2. İnorganik ve Organik X-ışını Dedektörleri .....	17
2.3. ORGANİK YARIİLETKEN MALZEMELER .....	18
2.4. METALOKSİT NANOYAPILAR .....	21
2.4.1. ZnO Nanopartiküller .....	24
2.5. ZnO NANOPARTİKÜL KATKILI ORGANİK YARIİLETKEN POLİMERLER .....	26
2.5.1. P3HT:ZnO Matrislerinde Yük Oluşumu ve Taşınması.....	28
3. YÖNTEM .....	33
3.1. MALZEMELER .....	33
3.2. SENTEZ VE KARAKTERİZASYON .....	33
3.3. CİHAZ MİMARİSİ .....	35
4. BULGULAR .....	40
5. TARTIŞMA.....	54

<b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>59</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>61</b>
<b>İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI .....</b>	<b>72</b>
<b>ETİK KURUL İZİN YAZISI .....</b>	<b>73</b>
<b>KURUM İZİN YAZILARI.....</b>	<b>74</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>75</b>



## ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1: ( $C_{38}H_{34}P_2$ )MnBr <sub>4</sub> tabanlı bir sintilatörün; a) karanlık ortamda ve b) X-ışını uyarımı altındaki sintilasyon performansı.....	4
Şekil 2.1.1: Görünür ışık, ultraviyole ışık, X-ışınları ve gama ışınlarının dalga boyu ve enerjisine sahip elektromanyetik spektrumun bir bölümü ve X-ışınlarının farklı uygulama alanları. ....	8
Şekil 2.1.2: Doğrudan ve dolaylı radyasyon etkileşimi [32]...Hata! Yer işareti tanımlanmamış.	
Şekil 2.2.1: X-ışını dedektörlerinin geliştirilmesiyle birlikte X-ışını radyografisinin evrimi [42]. ....	12
Şekil 2.2.2: İleri tıbbi görüntüleme sistemi.....	13
Şekil 2.2.1.1: Doğrudan ve dolaylı dedektörlerin şematik gösterimi.....	15
Şekil 2.2.1.2: Doğrudan X-ışını dedektörleri için dört tipik mimarinin şemaları; a) Dikey fotoiletken mimarisi; b) Eş-düzlemsel fotoiletken mimarisi; c) Fotodiyot mimarisi; d) Fototransistör mimarisi [49]. ....	16
Şekil 2.3.1: Organik elektronikte kullanılan bazı organik yarıiletken polimer ve küçük moleküller; sol tarafta verici (p-tipi) bileşikler, sağ tarafta ise alıcı (n-tipi) türevler yer almaktadır. ....	20
Şekil 2.4.1: Metal oksit nanoparçacıkların sentezinde yukarıdan aşağıya ve aşağıdan yukarıya yaklaşımın şematik gösterimi [69]. ....	23
Şekil 2.4.1.1: ZnO a) nanoparçacık, b) nanoçubuk, c) nanotabaka, d) nanoçiçek yapılarına ait SEM görüntüleri [70–73]. ....	24
Şekil 2.4.1.2: Çinko oksit'in (ZnO) wurtzite yapısı.....	25
Şekil 2.5.1.1: Eksiton oluşumu süreci ve enerji bandı içerisinde taşınan serbest yük taşıyıcıları. ....	29
Şekil 3.2.1: a) ZnO NP'lerin tavlama işleminin gerçekleştirildiği tüp fırını; b) İçerisinde ZnO NP örnekleri var iken yüksek sıcaklıktaki tüp fırının görüntüsü.....	34
Şekil 3.2.2: a) Klorobenzen içerisine eklenen P3HT; b) Ultrasonik banyoda bekletilen P3HT:ZnO nanokompozit çözeltisi. ....	34

<b>Şekil 3.3.1:</b> a) Desenlenmiş indiyum kalay oksit (ITO) yapısı, b) IDT elektrotlara sahip taban yapı. ....	<b>35</b>
<b>Şekil 3.3.2:</b> a) Desenli ITO substratlar; b) 40°C'de damlatma yöntemiyle ITO yüzeyine kaplanan.....	<b>36</b>
<b>Şekil 3.3.3:</b> İki farklı aygıt mimarisine (Cihaz 1 ve Cihaz 2) ait aygıt üretim süreçlerinin şematik gösterimi.....	<b>36</b>
<b>Şekil 3.3.4:</b> a) ITO/ZnO/P3HT:ZnO/Grafit (Cihaz 1); b) IDT/P3HT:ZnO (Cihaz 2). ....	<b>37</b>
<b>Şekil 3.3.5:</b> Geliştirilen cihazların yerleştirildiği ölçüm hücresi.....	<b>37</b>
<b>Şekil 3.3.6:</b> Süre takibi, X-ışını kaynağının kontrolü ve veri kaydının yapıldığı bilgisayar ortamı.....	<b>38</b>
<b>Şekil 3.3.7:</b> X-ışını ölçüm düzeneğinin ve elektriksel karakterizasyon sisteminin şematik gösterimi. ....	<b>39</b>
<b>Şekil 4.1:</b> Farklı sıcaklıklarda (200°C, 400°C ve 600°C) tavllanmış ZnO NP'lerinin XRD grafiklerinin gösterimi. ....	<b>41</b>
<b>Şekil 4.2:</b> SEM görüntülerinin kesitsel görünümü: a) Cihaz1/P3HT:ZnO(1:0.5); b) Cihaz1/P3HT:ZnO(1:0.5) üzerine grafit elektrot; c) Cihaz1/P3HT:ZnO(1:0.25)/Grafit'in SEM yüzey görüntüsü; d) Cihaz2/P3HT:ZnO(1:0.25) SEM görüntüsü.....	<b>42</b>
<b>Şekil 4.3:</b> a) P3HT:ZnO kompozitinin FTIR spektrumu, b) C-S, C=C ve C-H piklerinin büyütülmüş görünümü, c) FTIR spektrumundaki Zn-OH pikleri. ....	<b>43</b>
<b>Şekil 4.4:</b> a) Karanlık ortamda, farklı ZnO NP oranlarına göre Cihaz 1'in akım-gerilim eğrileri; X-ışını maruziyetinin Cihaz 1'in akım yoğunluğu-gerilim karakteristiklerine etkisi: b) P3HT:ZnO(1:0.25), c) P3HT:ZnO(1:0.5), d) P3HT:ZnO(1:0.75) aktif katmanları için. ....	<b>44</b>
<b>Şekil 4.5:</b> a) Karanlık ortamda farklı ZnO NP oranlarına göre Cihaz 2'nin akım-gerilim eğrileri; X-ışını maruziyetinin Cihaz 2'nin akım yoğunluğu-gerilim karakteristiklerine etkisi: b) P3HT:ZnO(1:0.25), c) P3HT:ZnO(1:0.5) ve d) P3HT:ZnO(1:0.75) aktif katmanları için. ....	<b>45</b>
<b>Şekil 4.6:</b> a) Akım-gerilim (I-V) karakteristiklerinin log-log grafiği, b) P3HT:ZnO oranına bağlı olarak delik hareketliliğindeki değişim. ....	<b>46</b>
<b>Şekil 4.7:</b> Cihaz1/P3HT:ZnO(1:0.75) yapısının fotoakım yoğunluğu: a) farklı doz oranlarında, b) farklı çalışma gerilimlerinde, c) aktif katmanda bulunan farklı ZnO NP miktarlarında elde edilen değerler. ....	<b>48</b>
<b>Şekil 4.8:</b> Cihaz2/P3HT:ZnO(1:0.75) yapısının fotoakım yoğunluğu: a) farklı doz oranlarında, b) farklı çalışma gerilimlerinde, c) aktif katmanda bulunan farklı ZnO NP miktarlarında elde edilen değerler. ....	<b>49</b>
<b>Şekil 4.9:</b> a) Cihaz 1 ve b) Cihaz 2 için aktif katmandaki farklı ZnO NP miktarlarında yanıt ve doz oranı ilişkisi; c) Yükselme ve düşme zaman sabitleri, d) Tüm cihazlar için 10 V bias altında hassasiyet ve gürültü eşdeğer doz oranı ilişkisi. ....	<b>51</b>

<b>Şekil 5.1:</b> Doğrudan X-ışını algılama süreçlerinin şemaları a) Fotodiyot mimarisinde yük toplama b) Fotoiletken mimarisinde fotoiletken kazanç ve c) Fototransistör mimarisinde fotoiletken kazanç [49]. .....	<b>55</b>
<b>Şekil 5.2:</b> a) ITO/ZnO/P3HT:ZnO/Grafit (Cihaz 1); b) IDT/P3HT:ZnO (Cihaz 2). .....	<b>55</b>
<b>Şekil 5.3:</b> P3HT:ZnO kompozit çözeltisi için enerji seviyeleri ve yük transfer mekanizması.	<b>56</b>



## TABLO LİSTESİ

	Sayfa No
<b>Tablo 2.1.1:</b> İyonize radyasyonla ilgili ölçüm birimleri ve SI karşılıkları. ....	9
<b>Tablo 4.1:</b> Farklı tavlama sıcaklıkları için ZnO NP'lerinin hesaplanan kristalit parametreleri. .....	41
<b>Tablo 4.2:</b> Cihaz 1'in dedektör performansı. ....	52
<b>Tablo 4.3:</b> Cihaz 2'nin dedektör performansı. ....	52
<b>Tablo 5.1:</b> Literatürde rapor edilen ve bu çalışmada değerlendirilen organik bazlı X-ışını dedektörlerine ait performans metrikleri. ....	58

## DENKLEM LİSTESİ

	Sayfa No
(4.1) .....	40
(4.2) .....	45
(4.3) .....	46
(4.4) .....	50
(4.5) .....	50
(4.6) .....	50
(4.7) .....	52
(4.8) .....	52
(5.1) .....	54

## SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
<b>Z</b>	: Atom Numarası
<b><math>\gamma</math></b>	: Gama
<b><math>\lambda</math></b>	: Dalga Boyu
<b><math>\pi</math></b>	: Pi
<b><math>\sigma</math></b>	: Sigma
<b><math>\Phi</math></b>	: Foton Soğurma Hızı

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
<b>Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	: Bizmut Oksit
<b>BHJ</b>	: Yığın Heteroeklem
<b>CB</b>	: Klorobenzen
<b>CdTe</b>	: Kadmiyum Tellür
<b>CdZnTe</b>	: Kadmiyum Çinko Tellür
<b>CF</b>	: Kloroform
<b>DNA</b>	: Deoksiribonükleik Asit
<b>FTIR</b>	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
<b>Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	: Gadolinyum Oksit
<b>Gy</b>	: Gray
<b>HOMO</b>	: En Yüksek Dolu Moleküler Orbital
<b>IDT</b>	: İnterdijital Elektrot
<b>ITO</b>	: İndiyum Kalay Oksit

<b>LoD</b>	: Tespit Sınırı
<b>LoQ</b>	: Miktar Belirleme Sınırı
<b>LUMO</b>	: En Düşük Boş Moleküler Orbital
<b>MEH-PPV</b>	: Poli[1-metoksi-4-(2-etilheksiloksi)-fenilenvinilen]
<b>NaOH</b>	: Sodyum Hidroksit
<b>NED</b>	: Gürültü Eşdeğer Doz Oranı
<b>NP</b>	: Nanopartikül
<b>P3HT</b>	: Poli(3-heksiltiofen-2,5-diyl)
<b>PCBM</b>	: Fenil-C61-bütirik asit metil ester
<b>PPV</b>	: Polifenilen Vinilen
<b>PTAA</b>	: Poli(triarilamin)
<b>SEM</b>	: Taramalı Elektron Mikroskobu
<b>SI</b>	: Uluslararası Birimler Sistemi
<b>UV</b>	: Ultraviyole
<b>XRD</b>	: X-ışını Kırınımı
<b>ZnAc</b>	: Çinko Asetat Dihidrat
<b>ZnO</b>	: Çinko Oksit

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ZnO NANO PARÇACIK KATKILI İLETKEN POLİMERLERİN X-IŞINI  
ALGILANMASINDA ve DETEKTÖR GELİŞTİRİLMESİNDE KULLANILMASI**

**NEVİN NUR SELÇUK**

**İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA**

**NANOTEKNOLOJİ VE BİYOTEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ**

**NANOTEKNOLOJİ ANABİLİM DALI**

**NANOTEKNOLOJİ, TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**DANIŞMAN: Doç. Dr. ARİF KÖSEMEN**

Bu çalışmada, X-ışını tespiti için organik yarı iletkenler ele alınarak poli(3-heksiltiofen) (P3HT) matrisi içine dahil edilen ZnO nanopartiküllerinin (ZnO NP'ler) potansiyeli incelenmiştir. Yüksek hareketlilik, geniş bant aralığı ve termal kararlılıkları nedeniyle seçilen ZnO NP'ler, sol-jel yöntemiyle sentezlenmiş ve farklı oranlarda (1:0.25, 1:0.5, 1:0.75) P3HT'ye entegre edilerek kompozit katmanlar oluşturulmuştur. Inter-dijital elektrot (IDT) tabanlı IDT/P3HT:ZnO dirençli cihazlar ve diyot tabanlı ITO/ZnO/P3HT/Grafit konfigürasyonlarına sahip cihazlar olmak üzere, iki farklı cihaz mimarisi üretilmiştir. Cihaz yapılarında ZnO NP konsantrasyonunun X-ışını tespit performansı üzerindeki etkisi sistematik bir şekilde değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, artan ZnO NP içeriğinin elektron taşınımını artırdığını ve cihazların X-ışınına duyarlılığını iyileştirdiğini göstermiştir. P3HT oranı (1:0.75) olan ITO/ZnO/P3HT/Grafit cihazı, en yüksek duyarlılığı (0.79  $\mu\text{Gy/s}$ ) ve en hızlı yanıt sürelerini sergileyerek IDT tabanlı cihazlardan daha iyi performans göstermiştir. Organik yarıiletken cihaz geliştirilmesi konusunda yapılan bu çalışma, ZnO NP ile katkılanmış organik yarı iletkenlerin uygun maliyetli, yüksek hassasiyet ve yüksek performanslı X-ışını dedektörleri için umut verici malzeme adayları olduğunu göstermektedir.

Mayıs 2025, 92 sayfa.

**Anahtar kelimeler:** X-ışını Dedektörü, Organik Yarıiletken, ZnO Nanopartikül, P3HT:ZnO

## **ABSTRACT**

### **M.Sc. THESIS**

#### **USING ZnO NANO PARTICLE DOPED CONDUCTIVE POLYMERS in X-RAY DETECTION and DETECTOR DEVELOPMENT**

**NEVİN NUR SELÇUK**

**ISTANBUL UNIVERSITY-CERRAHPASA**

**INSTITUTE OF NANOTECHNOLOGY AND BIOTECHNOLOGY**

**DEPARTMENT OF NANOTECHNOLOGY**

**NANOTECHNOLOGY, THESIS MASTER'S PROGRAM**

**SUPERVISOR: Assoc. Prof. Dr. ARİF KÖSEMEN**

In this thesis, the potential of ZnO nanoparticles (ZnO NPs) incorporated into a poly(3-hexylthiophene) (P3HT) matrix for X-ray detection was investigated by focusing on organic semiconductors. ZnO NPs were chosen due to their high mobility, wide bandgap, and thermal stability. They were synthesized using the sol-gel method and integrated into P3HT at various ratios (1:0.25, 1:0.5, 1:0.75) to form composite layers. Two different device architectures were fabricated: interdigitated electrode (IDT) based IDT/P3HT resistive devices and diode-based ITO/ZnO/P3HT/Graphite devices. The impact of ZnO NP concentration on X-ray detection performance was systematically evaluated in these device structures. The results showed that increasing ZnO NP content enhanced electron transport and improved the devices' sensitivity to X-rays. The ITO/ZnO/P3HT/Graphite device with a P3HT ratio of (1:0.75) exhibited the highest sensitivity (0.79  $\mu\text{Gy/s}$ ) and the fastest response times, outperforming the IDT-based devices. This study on the development of organic semiconductor devices demonstrates that ZnO NP-doped organic semiconductors are promising candidates for cost-effective, highly sensitive, and high-performance X-ray detectors.

May 2025, 92 pages.

**Keywords:** X-ray Detection, Organic Semiconductor, ZnO Nanoparticle, P3HT:ZnO

## 1. GİRİŞ

X-ışınları, önemli bir iyonlaştırıcı radyasyon türü olarak tıp, güvenlik ve izleme gibi endüstriyel ve tıbbi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle, iyonlaştırıcı X-ışını radyasyonu tespitine yönelik araştırmalar ve yeni nesil dedektör teknolojilerinin geliştirilmesi, araştırmacılar tarafından büyük ilgi görmektedir. Radyasyon tespiti, radyasyonun varlığının belirlenmesi, miktarının ölçülmesi ve enerji, tür veya konumunun tespit edilmesini kapsar. Tıbbi teşhis alanında, görüntüleme uygulamaları için radyasyonun uzaysal dağılımının yüksek çözünürlükte ölçülmesi büyük önem taşımaktadır [1].

Standart X-ışını dedektörleri tipik olarak silikon veya germanyum kristalleri gibi inorganik yarıiletken malzemelere dayanır. Ancak bu malzemeler esnek değildir ve yüksek performans elde edebilmek için yüksek saflıkta monokristal bileşenler gerektirir. Ayrıca, geniş alanlı dedektörlerin üretimi, artan üretim maliyetleri nedeniyle zorluk teşkil etmekte ve parçacık fiziği deneylerinde dedektörlerin ölçeklendirilmesini güçleştirmektedir. X-ışını dedektörleri için temel gereksinimler arasında yüksek spektroskopik çözünürlük, hızlı işleme süresi, kullanım kolaylığı, güvenilirlik, yüksek hassasiyet ve iyonlaştırıcı radyasyonu tespit etmede maliyet etkinliği yer almaktadır. Mevcut dedektör teknolojileri bu gereksinimleri kısmen karşılamış olsa da, yeni cihaz ve malzemelere yönelik araştırmalar, iyonlaştırıcı radyasyon tespiti alanında sınırları genişletmeye devam etmektedir.

İnorganik malzemelerin üretim zorlukları ve gelecekteki esnek tabanlı elektronik uygulamalar için sınırlamaları göz önünde bulundurulduğunda, uygun maliyetli, hafif ve üretimi kolay olması gibi avantajlar sunan organik yarıiletkenler, dedektör teknolojisinde giderek daha fazla ilgi görmektedir. X-ışını tespiti, doğrudan ve dolaylı dedektör sistemleri ile gerçekleştirilebilir. Doğrudan tespit sistemlerinde, X-ışınları aktif katmanda doğrudan yük taşıyıcılarına dönüştürülürken, dolaylı dedektörlerde X-ışınları önce bir sintilatör tabakası tarafından algılanıp görünür ışığa dönüştürülmekte ve böylece aktif katmanda elektriksel yüklerin oluşması sağlanmaktadır. Özellikle konjuge polimerler hem doğrudan hem de dolaylı dedektör sistemlerinde aktif katman olarak kullanılmaya uygun hale getirilebilmektedir [2,3]. Doğrudan radyasyon dedektörleri, genellikle dolaylı tespit sistemlerine kıyasla daha yüksek mekânsal çözünürlük sağlarken, tipik olarak düşük dönüşüm verimliliğine sahip olmaları nedeniyle daha düşük X-ışını hassasiyeti gösterebilmektedir.

Son yıllarda, küçük moleküller (örneğin 6,13-bis(triisopropilsilyletinil)pentasen (TIPS-pentasen)) ve konjuge polimerler (örneğin poli(3-heksiltiofen) (P3HT)) gibi organik yarıiletkenlere dayalı radyasyon dedektörlerinin umut verici potansiyeli birçok çalışmada vurgulanmıştır [4]. Ancak, bu dedektörler düşük radyasyon soğurma katsayısına bağlı olarak düşük yoğunluk nedeniyle bazı zorluklarla karşı karşıyadır. Bu sınırlamaların aşılması için konjuge polimer ve küçük molekül karışımlarına yüksek atom numarasına (Z) sahip nanoyapıların eklenmesi veya doğrudan organik küçük moleküllerin yüksek Z atomları ile modifiye edilmesi gibi çeşitli yaklaşımlar önerilmiştir. Bu çözümler arasında, organik yarıiletken tabanlı dedektör mimarilerinin aktif katmanının metal oksit nanoyapılar ile zenginleştirilmesi, mevcut sınırlamaların aşılmasında önemli faydalar sağlamaktadır. Aktif katmandaki metal oksit nanoparçacıklarının dağılımı, sönmeme katsayısını artırarak ve X-ışınları ile etkileşimi güçlendirerek dedektör verimliliğinde iyileşme sağlamaktadır. Son yıllarda, bizmut oksit ( $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ) nanoparçacıkları yaygın olarak dedektör mimarilerinde kullanılmaktadır. Ayrıca, metal oksit yarıiletkenler sınıfına ait gadolinyum oksit ( $\text{Gd}_2\text{O}_3$ ) son yıllarda araştırılan malzemelerden biri olmuştur. Genellikle organik yarıiletken malzemeler düşük atom numaralarına sahip elementlerden oluştuğu için yüksek enerjili radyasyonla etkileşimleri zayıftır. Ancak, son çalışmalar poli(triarylamin) (PTAA) polimerinden yaklaşık 10  $\mu\text{m}$  kalınlığında filmler kullanılarak  $0.3 \text{ nC.mGy}^{-1}.\text{s}^{-1}$  X-ışını algılama hassasiyetine ulaşılabileceğini göstermiştir. Yaklaşık 100 V gerilim uygulanarak başarılı bir X-ışını kaynaklı fotoyük akımı elde edilmiştir. Bu cihazlarda radyasyon hasarı gözlemlenmesine rağmen,  $60 \text{ mGy.s}^{-1}$  doz hızına kadar mükemmel dedektör yanıtları alınmıştır [5]. Bu cihazların geliştirilmesine yönelik başka bir çalışmada, yüksek hareketlilik değerlerine sahip TIPS-pentasen malzemesi PTAA ile birleştirilerek  $1.2 \text{ nC.mGy}^{-1}.\text{s}^{-1}$  hassasiyet değeri elde edilmiştir [6]. Son çalışmalar, nanoparçacık formundaki sintilasyon malzemesinin (terbiyum katkılı gadolinyum oksit (GOS:Tb)) organik yarıiletken aktif katmana (P3HT:PCBM) dahil edilmesiyle hassasiyetin önemli ölçüde arttığını ve  $6 \text{ nC.mGy}^{-1}$  seviyesine ulaşıldığını göstermektedir [7]. Bir başka çalışmada  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  nanoparçacıkları kullanılarak  $11.6 \text{ nC.mGy}^{-1}$  hassasiyet değeri elde edilmiştir [8,9].

Yarıiletken metal oksit ailesinin bir üyesi olan n-tipi çinko oksit (ZnO), kolay üretimi, düşük maliyeti, geniş bant aralığı, yüksek hareketliliği ve iyi termal kararlılığı nedeniyle araştırmacıların yoğun ilgisini çekmeye devam etmektedir [10–13]. ZnO nanoparçacıkları, konjuge polimer bazlı cihazlara entegre edilerek ultraviyole dedektörleri, fotovoltajlar, gaz sensörleri ve transistörler gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmıştır [14–17]. Literatürde, polimer

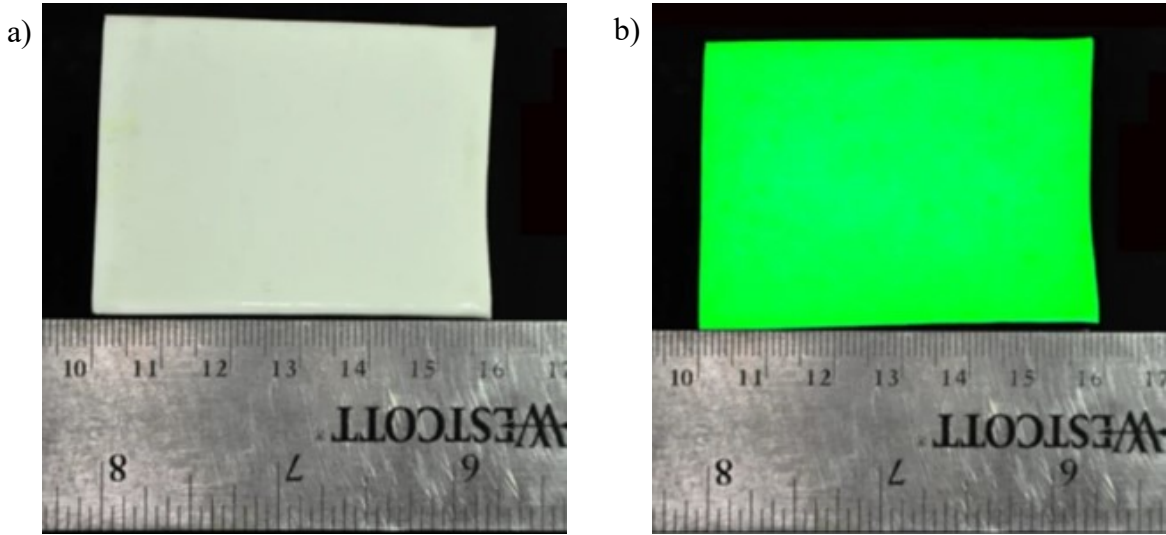
yarıiletken malzemeler ve çeşitli metal oksitlerle üretilmiş kompozit film yapılarının kullanıldığı X-ışını dedektörleri yer almakla birlikte, ZnO nanoparçacıkları ile üretilmiş kompozit yapılar hakkında herhangi bir çalışma bulunmamaktadır.

Son yıllarda teknolojik ilerlemeler ve elektronik cihaz kullanımındaki hızlı artış, iyonlaştırıcı radyasyonun hayatımıza her açıdan girdiği anlamına gelmektedir. Bu nedenle, iyonize radyasyonun tespiti için yenilikçi, ucuz ve kolayca üretilebilen elektronik malzemelere, cihazlara ve sistemlere olan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. Standart X-ışını dedektörleri, genellikle silikon veya germanyum kristallerini kullanılarak üretilen inorganik yarı iletken dedektörlerine dayanır, bu cihazlar esnek değildir ve yüksek performans için yüksek saflıkta monokristalin bileşenlere ihtiyaç duyarlar [18]. Ayrıca, cihaz üretiminde maliyetin artması nedeniyle büyük bir dedektör üretmek zordur, bu da parçacık fizik deneylerinin dedektörü büyütme ihtiyacı ile karşı karşıya olduğu bir zorluktur [19]. X-ışını dedektörlerinde, yüksek spektroskopik çözünürlük, hızlı işleme, kolay kullanım, güvenilirlik, yüksek duyarlılık ve uygun maliyetle iyonize radyasyonların tespiti talep edilir [20]. Bu talepleri, mevcut tespit teknolojileri kısmen karşılamış olsa da iyonize radyasyon tespitinde sınırları daha da genişletmek amacıyla yeni malzemelerle birlikte yeni cihaz arayışları devam etmektedir. İnorganik malzemelerin üretim zorlukları ve gelecek nesil esnek tabanlı elektronik uygulamalarına uygun olmamaları göz önüne alındığında, organik yarıiletkenler, ucuz, hafif ve kolay üretim sağladığından, dedektör teknolojisinin organik yarıiletkenlere yöneldiği görülmektedir [21].

Tıpta tanı ve teşhis amacıyla kullanılan, X-ışınları yardımıyla görüntüleme sağlayan sistemler, biyomedikal tabanlı X-ışını görüntüleme sistemleri yalnızca görüntüleme ile sınırlı kalmayıp aynı zamanda girişimsel tanı ve tedavi uygulamalarına da olanak sunmaktadır. X-ışını görüntüleme sistemlerinin temel bileşenlerinden biri, X-ışınlarını algılayarak bu enerjiyi dijital görüntülere dönüştürmeye olanak sağlayan dedektörlerdir. Bu dedektörler, elde edilen sinyalleri yazılımlar aracılığıyla analiz ederek anlamlı medikal görüntüler elde edilmesine katkı sağlar. Günümüzde en yaygın kullanılan dedektör tipleri arasında sintilasyon temelli dedektörler ve doğrudan algılama yapan yarıiletken dedektörler yer almaktadır. Ancak bu geleneksel dedektörlerin üretim süreçlerinin karmaşıklığı, yüksek maliyetleri ve esnek yüzeylere uygulanabilirliklerinin sınırlı oluşu, bu teknolojilerin kullanım alanlarını kısıtlayabilmektedir. Bu bağlamda, esnek, düşük maliyetli ve çözünürlüğü artırılabilir yapılar sunan organik yarıiletken malzemelere olan ilgi her geçen gün artmaktadır. Özellikle organik

yarıiletken tabanlı X-ışını dedektörleri hem üretim kolaylıkları hem de alternatif uygulama alanlarına uyum potansiyelleriyle dikkat çekmektedir.

Bu tezin temel amacı, organik yarıiletken malzemelerin kullanımıyla geliştirilebilecek X-ışını dedektör yapılarının performansını artırmak, üretim süreçlerini optimize etmek ve bu yeni nesil dedektörlerin biyomedikal görüntüleme sistemlerindeki uygulanabilirliğini araştırmaktır. Bu çalışmada, farklı kütle oranlarına sahip ZnO NP içeren P3HT kompozit matris, bir X-ışını dedektör cihazı mimarisinde aktif katman olarak kullanılmıştır. ZnO NP'ler, aktif katmanın sönümlenme katsayısını artırma yeteneği ve n-tipi özellikleri nedeniyle hacimsel heteroeklem yapısı oluşturma kabiliyeti göz önüne alınarak seçilmiştir. Bu çalışmada, çinko oksit (ZnO) nanoparçacıkların, organik yarıiletken tabanlı X-ışını dedektör sistemlerinde performans artırıcı bir bileşen olarak kullanılması hedeflenmiştir. Literatürde sınırlı sayıda örneği bulunan bu yaklaşım, ZnO nanoparçacıkların söz konusu sistemlerde ilk kez bu amaçla değerlendirilmesini içermektedir. ZnO'nun yapıya entegre edilmesiyle birlikte, malzemenin yüksek X-ışını soğurma katsayısından yararlanılarak dedektörün X-ışınlarını durdurma kapasitesinin artırılması hedeflenmiştir. Buna ek olarak, ZnO'nun X-ışını ışımaları altında gösterdiği sintilasyon (ışıldama) özelliği sayesinde, yapıda daha fazla serbest taşıyıcının oluşması sağlanarak dedektörün genel duyarlılığının artırılması amaçlanmaktadır. Şekil 1.1'de X-ışını altında bir sintilatörün ışıldama performansı gösterilmiştir.



**Şekil 1.1:**  $(C_{38}H_{34}P_2)MnBr_4$  tabanlı bir sintilatörün; a) karanlık ortamda ve b) X-ışını uyarımı altındaki sintilasyon performansı.

Bu doğrultuda yürütülen çalışma, ZnO nanoparçacıkların hem yapısal hem de elektronik katkılarını değerlendirerek, organik yarıiletken tabanlı dedektörlerin X-ışınına karşı verdiği tepkinin iyileştirilmesine yönelik yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır. Bu kapsamda;

IDT/P3HT:ZnO ve ITO/Zn/P3HT:ZnO/Grafit yapı konfigürasyonları oluşturularak, P3HT matrisi içerisine farklı oranlarda ZnO katkısı eklenmiş aktif katmanların X-ışınına verdiği yanıtların karşılaştırmalı olarak incelenmesi hedeflenmiştir. Elde edilecek bulgular doğrultusunda, en iyi performans sergileyen dedektör konfigürasyonunun belirlenmesi ve bu yapıların X-ışınına duyarlı organik elektronik cihazlar geliştirme sürecine katkı sunması amaçlanmıştır.

Konjuge yarıiletken polimerler çözelti temelli geniş alanlara ucuz ve kolay yöntemler ile uygulanabilme potansiyelleri ve canlı dokulara olan yapısal benzerlikleri nedeniyle dedektör malzemesi olarak bilimsel araştırmalara konu olmaktadır. Organik yarı iletken malzemeleri, çoğunlukla karbon, hidrojen ve oksijenden oluştuğu için, radyasyona karşı suyunkine benzer bir tepkiye sahiptirler. Bu özellikleri ile radyasyon dozimetresi için önemli bir avantaj sağlarlar. X-ışını tespiti amacıyla geliştirilen organik yarıiletken dedektörlerinin, üretim süreçlerindeki maliyeti düşürme ve geniş alanlarda işlenebilme potansiyelleri gibi özellikleri, üretimdeki kullanımlarını avantajlı hale getirmiştir [22,23]. Örneğin, inorganik tabanlı dedektörlerin üretimi esnasında kullanılan kaplama sistemlerinin zorladığı kısıtlamalardan dolayı dedektörlerin alanları sınırlı kalmaktadır. Oysa organik yarı iletkenlerin üretimindeki esneklik ve kolaylık geniş alanlı dedektörlerin üretimine olanak vermektedir.

Son çalışmalar, metal oksit nanopartikül olan ZnO'nun belirli kristal yüzeylerin yüzey reaktivitesini artırma yeteneğine sahip olduğunu göstermiştir [24]. Organik yarıiletken polimerler ise, ilk olarak 1980'lerin başında radyasyon dedektörleri için yeni bir malzeme olarak tanıtılmıştır [25]. Konjuge polimer olan poli(3-heksiltiofen) (P3HT), genellikle aktif tabakada yığın heteroeklem (BHJ) oluşturmak için donör ve akseptör malzeme olarak yaygın bir şekilde kullanılmıştır [26]. Bu tez kapsamında üretilen dedektör mimarisi için, yüksek bir kristallilik elde edilmek istendiğinden poli(3-heksiltiofen) (P3HT) fazı tercih edildi, böylece doğrudan yük taşıma özelliklerine etki eder [27]. Tez konusunun amacı, X ışını ile zayıf etkileşim gösteren polimerik malzemelerin etkileşim oranını arttırmak ve tepki sürelerini iyileştirmek için ZnO metal oksit nanopartikül yapıları polimer içine katkılanmak ve cihaz performansı üzerine etkilerini ortaya koymaktır. ZnO nanoparçacıkların aktif katman içerisindeki farklı katkı oranlarının, X-ışınının algılanmasına yönelik etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır. ZnO/P3HT hibrit X-ışını dedektörü, indiyum kalay oksit (ITO) cam substrat ve inter dijital elektrot (IDT) üzerinde üretilmiştir. ITO cihaz mimarisi, alt kontak ile çözülebilir grafit üst kontak arasında sandviç yapısı şeklinde oluşturulmuştur [28]. Bu bağlamda tez kapsamında IDT/P3HT:ZnO ve ITO/Zn/P3HT:ZnO/Grafit gibi farklı konfigürasyonlarda cihazlar ortaya

konarak, farklı ZnO NP katkı oranları ile en iyi karakterizasyon gösteren konfigürasyonun belirlenmesi hedeflenmiştir. ZnO nanoparçacıkların P3HT aktif katmanı içerisindeki farklı katkı oranlarının, X-ışınının algılanmasına yönelik etkileri araştırılmıştır. Bu hedefler doğrultusunda yapılan deneysel tasarım ve analizlerin sonucunda, elde edilen bulgular; ZnO katkılı organik yarıiletken dedektörlerin sadece akademik laboratuvar ortamında değil, aynı zamanda taşınabilir dozimetre sistemlerinden tıbbi görüntüleme teknolojilerine kadar pek çok alanda uygulanabilirliğini göstermeyi amaçlamaktadır.

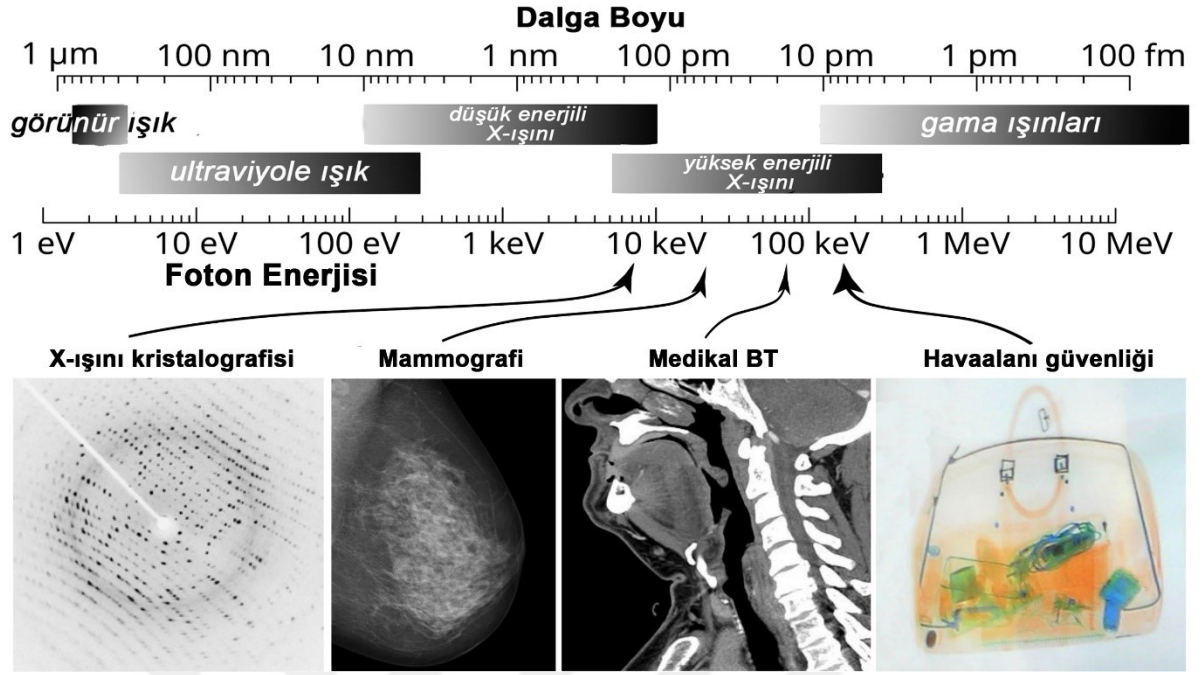
Özetle bu tez çalışması organik-inorganik hibrit yapıların bir arada kullanılması ile;

- X-ışını dedektörlerinin algılama hassasiyetinin iyileştirilmesi,
- İki farklı mimaride üretilen cihazların X-ışının gösterdiği elektriksel tepki hızlarının artırılması ve yapıların karşılaştırılması,
- Polimer içerisindeki farklı oranlardaki ZnO nanoparçacık katkısının, aktif tabaka içindeki yük taşıma yollarını ve taşıyıcı hareketliliğini nasıl etkilediği araştırılması,
- Metal oksit katkısının morfolojik ve elektriksel özellikler üzerindeki etkilerinin detaylı olarak incelenmesi,
- Elde edilen bulguların ileriye dönük uygulamalarda, özellikle tıbbi ve endüstriyel alanlarda kullanılabilirliğine katkı sağlanması hedeflenmiştir.

## 2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

### 2.1. İYONİZE RADYASYON

İyonlaştırıcı radyasyon, yeterli enerjiye sahip elektromanyetik dalgalar veya parçacıklar aracılığıyla atomlardan elektron kopararak iyon oluşumuna neden olan radyasyon türüdür. Bu radyasyon türü, özellikle X-ışınları ve gama ( $\gamma$ ) ışınlarını kapsayan elektromanyetik dalgaları içermektedir. X-ışınları ve gama ışınları, elektromanyetik spektrumun yüksek enerjili bölgelerinde yer alan ve iyonlaştırıcı özellik gösteren dalga formlarıdır. Gama ışınları, elektromanyetik spektrumda en kısa dalga boyuna ve en yüksek foton enerjisine sahip olup genellikle birkaç kiloelektronvolt (keV) ile yaklaşık 8 megaelektronvolt (MeV) arasında değişen enerji aralığında bulunurlar. Bu yüksek enerjileri sayesinde, uzay araştırmalarında, temassız endüstriyel sensör sistemlerinde ve bazı kanser türlerinin tedavisinde yaygın şekilde kullanılmaktadırlar. X-ışınları ise, dalga boyu açısından ultraviyole ışıklardan daha kısa ve gama ışınlarından daha uzun olan, genellikle 0.01 ila 10 nanometre aralığında bulunan yüksek enerjili elektromanyetik radyasyon türüdür. Bu ışınlar, yüksek hızlı iç yörünge elektronlarının hedef anot materyaline çarpması sonucu ani yavaşlamalarıyla ortaya çıkan enerji dönüşümleri sonucunda oluşur. X-ışınları, keşfedildikleri günden bu yana; tıbbi görüntüleme (röntgen ve bilgisayarlı tomografi), endüstriyel muayene sistemleri, güvenlik tarayıcıları, kristalografi çalışmaları ve mikroskobik analizler gibi çok çeşitli alanlarda önemli uygulamalara sahip olmuştur. Enerjilerine bağlı olarak yumuşak (soft) ve sert (hard) X-ışınları şeklinde sınıflandırılır. Bu iyonize özellikleri sayesinde X-ışınları; atomik yapıları etkileyebilir, elektronları yörüngelerinden kopararak iyonlaşmaya neden olabilir. Şekil 2.1.1’de X-ışınlarının elektromanyetik spektrum içindeki konumu ile birlikte farklı uygulama alanlarına yönelik örnekler sunulmaktadır. Soldan sağa doğru sırasıyla; kristal yapılar üzerinde X-ışını kırınım desenlerine dayalı X-ışını kristalografisi, meme dokusunun X-ışınları ile görüntülenmesini sağlayan mammografi, çok kesitli yüksek çözünürlüklü görüntülemeye imkân tanıyan bilgisayarlı tomografi (BT) ve materyallerin içerik analizine yönelik havaalanı güvenlik tarama sistemleri yer almaktadır. Bu örnekler, X-ışınlarının iyonlaştırıcı etkisinin sadece tıbbi görüntüleme alanında değil, aynı zamanda malzeme karakterizasyonu ve güvenlik teknolojileri gibi çok disiplinli alanlarda da kritik işlevler üstlendiğini göstermektedir.



**Şekil 2.1.1:** Görünür ışık, ultraviyole ışık, X-ışınları ve gama ışınlarının dalga boyu ve enerjisine sahip elektromanyetik spektrumun bir bölümü ve X-ışınlarının farklı uygulama alanları.

İyonlaştırıcı radyasyon, sıkı bir şekilde bağlı elektronları atomlardan çıkaracak kadar güçlü bir kuvvetle maddeye enerji yükleme kapasitesine sahiptir, bu da iyonlaşmaya yol açar. Bu temel etkileşim, özellikle radyasyon enerjisi canlı dokular tarafından emildiğinde, geniş bir yelpazede fiziksel ve biyolojik etkilere yol açabilir. İyonlaştırıcı radyasyonun malzemeler üzerindeki etkileri, malzeme tarafından soğurulan enerji miktarına bağlı olarak değerlendirilmekte olup, bu etki miktarı Uluslararası Birimler Sistemi (SI)'ne göre Gray (Gy) birimiyle tanımlanmaktadır. Tablo 2.1.1, bu etkileşimleri farklı boyutlarda radyoaktif bozunma, radyasyona maruz kalma, enerji emilimi ve biyolojik etki nicelendirilirken kullanılan standart birimleri özetlemektedir. Bu ölçütler, doz-etki ilişkilerini anlamının kritik olduğu hem malzeme bilimlerinde hem de radyobiyojide vazgeçilmezdir.

Bir Gray, hedeflenen maddenin bir kilogramı başına 1 Joule enerji soğurulması anlamına gelir. Bu tanım, dozimetri çalışmalarında malzeme dayanıklılığı ve yapısal değişimlerin incelenmesi açısından temel bir ölçüm standardı oluşturmaktadır. Biyolojik sistemlerde, emilen doz, deoksiribonükleik asit (DNA) gibi kritik hücrel hedeflere zarar verilmesi de dahil olmak üzere moleküler bozulmanın derecesiyle doğrudan ilişkilidir [29].

Verilen bir emilen dozun biyolojik önemini değerlendirmek için, sievert (Sv) cinsinden ölçülen eşdeğer doz kullanılır. Bu birim, Uluslararası Radyolojik Koruma Komisyonu (ICRP) tarafından önerildiği gibi, radyasyon türleri (örneğin, fotonlar, nötronlar, alfa parçacıkları)

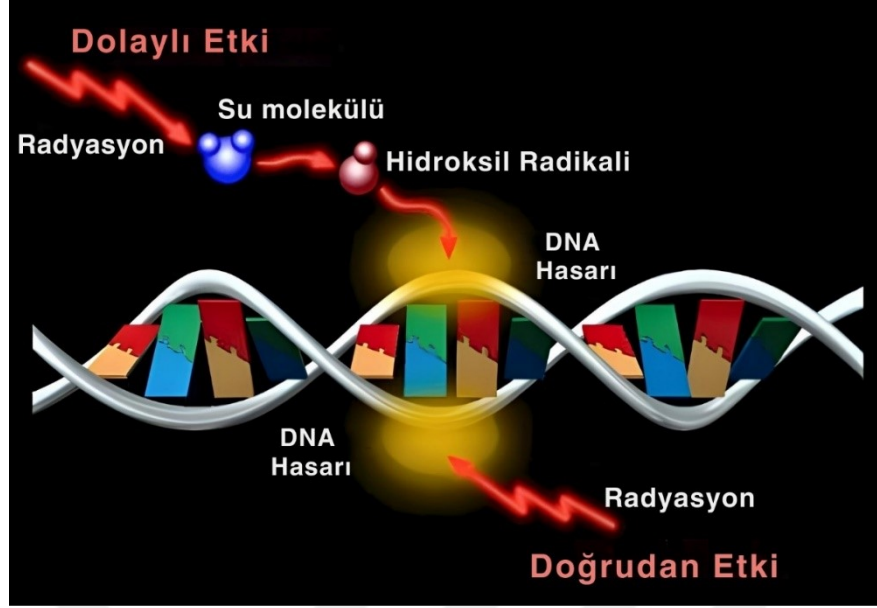
arasındaki biyolojik etkinlik farklılıklarını dikkate alan radyasyon ağırlık faktörlerini içerir [30]. Sievert, radyasyona maruz kalma sonrasında kanserojenlik veya doku hasarı gibi potansiyel biyolojik sonuçların daha doğru bir şekilde değerlendirilmesini sağlar.

Ayrıca, röntgen (R) veya SI eşdeğeri kilogram başına coulomb (C/kg) cinsinden ölçülen maruz kalma, havadaki iyonlaşmanın bir ölçüsünü sağlar ve genellikle çevresel izleme ve güvenlik değerlendirmelerinde kullanılır. Radyoaktif bir kaynağın aktivitesi, bekerel (Bq) cinsinden ölçülür ve nükleer parçalanmaların oranını gösterir; bu hem kontrollü laboratuvar ortamlarında hem de gerçek dünya maruziyet senaryolarında kaynak terimini nicelendirmenin temelidir.

**Tablo 2.1.1:** İyonize radyasyonla ilgili ölçüm birimleri ve SI karşılıkları.

<b>Ölçülen Büyüklük</b>	<b>İfade Ettiği Kavram</b>	<b>Geleneksel Birim</b>	<b>SI Birimi</b>
Radyoaktif madde miktarı	Aktivite	Küri (Ci)	Bekerel (Bq)
Havadaki iyonizasyon	Maruz kalma	Röntgen (R)	C/kg
Birim kütle başına emilen enerji	Absorbe edilen doz	rad	Gray (Gy)
Radyasyon türüne göre insanda emilen miktar	Doz eşdeğeri	rem	Sievert (Sv)

Bununla birlikte, bu birimler radyasyon koruma, biyolojik etki değerlendirmesi ve deneysel dozimetri için temel dili oluşturur. Radyasyon biyolojisinde, dozun doğru bir şekilde miktarlandırılması özellikle kritiktir, çünkü DNA hasarının eşiği ve şiddeti doza bağlıdır. Yüksek dozlar hücrel onarım sistemlerini aşabilirken, düşük dozlar bile zamanla mutasyonlar ve genomik instabilite gibi stokastik etkiler oluşturabilir [31].



Şekil 2.1.2: Doğrudan ve dolaylı radyasyon etkileşimi [32].

Radyasyon kaynaklı DNA hasarı doğrudan ve dolaylı mekanizmalarla meydana gelebilir (Bkz. Şekil 2.1.2) [32]. Doğrudan etkiyle, radyasyon DNA molekülüyle etkileşime girer, iplik kırılmaları, baz modifikasyonları veya çapraz bağlanmalara neden olur. Dolaylı etkiyle, radyasyon hücre ortamında su moleküllerini iyonize ederek, hidroksil radikalleri ( $\bullet\text{OH}$ ) gibi reaktif oksijen türleri (ROS) oluşturur, bu da DNA'ya saldırarak potansiyel olarak mutajenik veya öldürücü lezyonlara yol açar [33]. Her iki mekanizma da tek iplik kırılmaları (SSB'ler), çift iplik kırılmaları (DSB'ler) ve karmaşık kümeleşmiş hasarlara katkıda bulunur, bu da genotoksisite ve hücre stresin ana göstergeleridir [34].

İyonlaştırıcı radyasyonun yüksek enerjili fotonlar (X ve gama ışınları) ya da parçacıklar (örneğin nötronlar ve elektronlar) yoluyla tespit edilmesi hem bilimsel hem de toplumsal açıdan büyük önem taşıyan disiplinler arası bir araştırma alanıdır. İyonize radyasyonun algılanması ve ölçülmesi; mikroelektronik uygulamalardan endüstriyel kalite kontrol süreçlerine, dezenfeksiyon ve sterilizasyon teknolojilerinden petrol arama ve üretim faaliyetlerine, nükleer atık yönetiminden tıbbi görüntüleme ve tedavi yöntemlerine kadar geniş bir uygulama yelpazesinde kritik bir rol üstlenmektedir [35]. X-ışınları (0.01–10 nm) ve  $\gamma$ -ışınları (<0.01 nm), yüksek penetrasyon kapasiteleri sayesinde yoğun yapı malzemelerin iç kısımlarının tahribatsız biçimde incelenmesine olanak tanır [36]. Bu özellikleri nedeniyle özellikle güvenlik taramaları ve tıbbi görüntüleme sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Tıbbi görüntüleme uygulamalarında maruz kalınan dozlar genellikle çok düşük seviyelerdedir. Örneğin, mamografi ve röntgen gibi işlemler sırasında hastaların aldığı

radyasyon dozları genellikle 0.1 ila 1 miliGray (mGy) aralığında olmaktadır [37]. Bu tür düşük doz seviyeleri, iyonlaştırıcı radyasyonun hücresel düzeyde meydana getirebileceği minimal biyolojik etkilerin yanı sıra, kullanılan dedektör malzemelerinin radyasyon dayanıklılığı açısından da önemli bir araştırma konusu oluşturur.

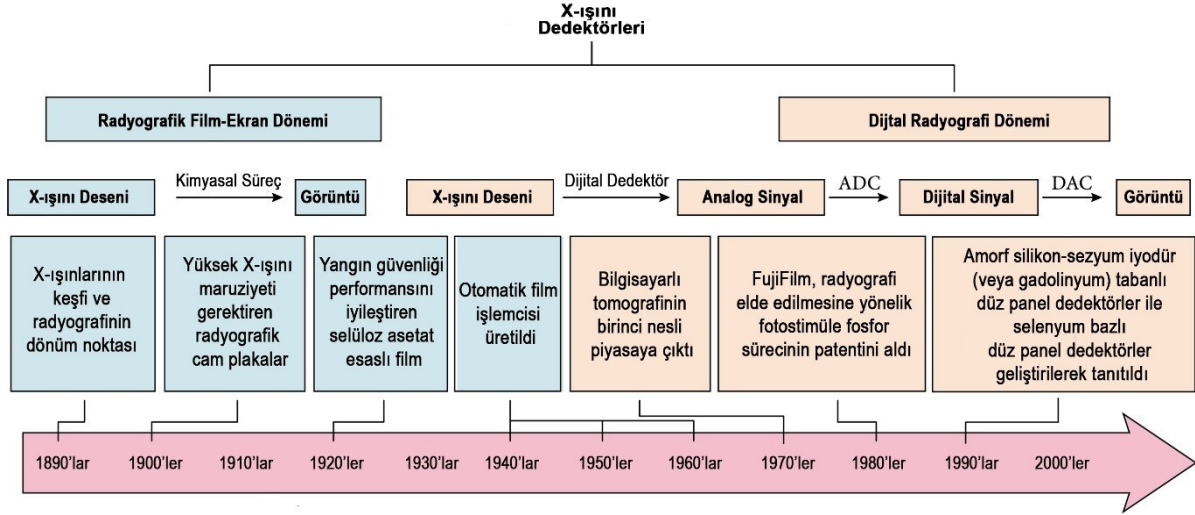
Radyasyonun malzemelerde oluşturduğu temel fiziksel değişimler arasında atomik yer değiştirmeler, serbest taşıyıcı üretimi, kusur merkezlerinin oluşumu ve yapısal bozulmalar sayılabilir. Bu etkiler, özellikle yarı iletken temelli dedektörlerde ve görüntüleme sensörlerinde cihaz performansının zamanla bozulmasına neden olabilmektedir [38]. Bu bağlamda, düşük dozlu radyasyon etkilerini anlamak ve minimize etmek için geliştirilen çalışmalar, görüntüleme sistemlerinin güvenilirliğini artırmak ve daha uzun ömürlü dedektör teknolojileri tasarlamak açısından kritik bir öneme sahiptir [39,40]. Buna ek olarak, iyonlaştırıcı radyasyonun etkileri sadece fiziksel yapısal değişimlerle sınırlı kalmamakta, aynı zamanda malzemenin elektronik özelliklerini de etkilemektedir. Örneğin, silikon temelli dedektörlerde radyasyon kaynaklı tuzak seviyeleri, taşıyıcı ömrünü kısaltarak cihazların duyarlılığını azaltabilir [41]. Bu tür değişimler, özellikle düşük dozlu uzun süreli maruziyet senaryoları için kritik bir araştırma alanı oluşturmaktadır.

Sonuç olarak, tıbbi görüntüleme uygulamalarındaki düşük doz seviyeleri göz önüne alındığında hem biyolojik etkilerin hem de dedektör malzemelerinin radyasyon dayanıklılığının detaylı bir şekilde anlaşılması ve optimize edilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu tür iyonlaştırıcı radyasyonlar, atomların yörüngelerindeki elektronlarla etkileşime girerek iyonlaşmaya neden olur. Bu etkileşimler sonucunda, radyasyonun fiziksel karakteristiklerine bağlı olarak (örneğin faz, yön, doz oranı/foton yoğunluğu ve dalga boyu gibi) incelenen materyalin iç yapısına dair önemli bilgiler elde edilebilir. Radyasyonun numune içerisinden geçişi sırasında karşılaştığı zayıflama dedektörler aracılığıyla algılanmakta ve analiz edilmektedir. Elde edilen görüntü kontrastı ise, farklı dokuların ya da malzeme bileşenlerinin radyasyonu soğurma düzeylerindeki değişkenliklerden kaynaklanmakta olup, bu farklılıklar algılanan sinyallerde belirgin kontrastlar oluşturur.

## 2.2. X-IŞINI DEDEKTÖRLERİ

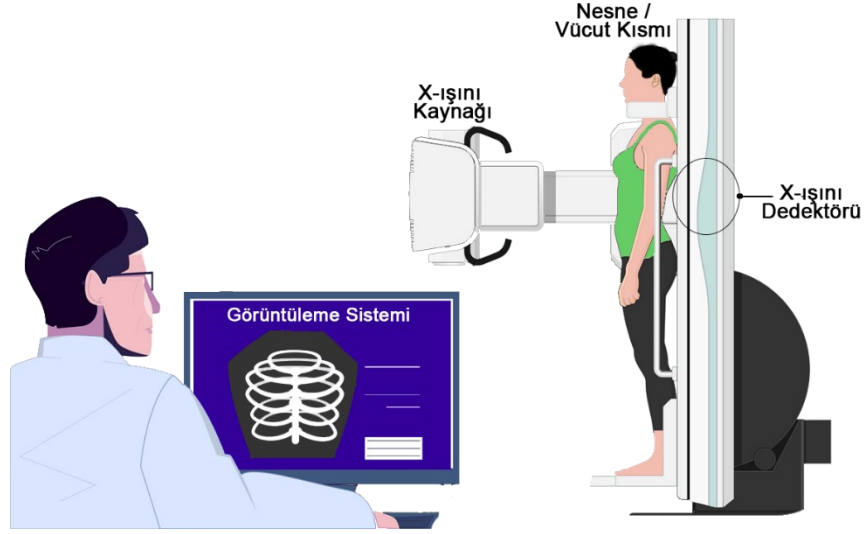
Sağlık sektöründe, özellikle tanısal ve terapötik amaçlı uygulamalarda iyonlaştırıcı radyasyonun kullanımı oldukça yaygındır. Bu bağlamda, radyoloji birimleri, modern tıbbın en kritik ve vazgeçilmez alanlarından biri haline gelmiştir. Hasta anatomisinin ve fizyolojik işleyişinin görüntülenmesine olanak sağlayan bu birimler, tanı sürecinde hekimlere önemli

bilgiler sunar. Özellikle X-ışınları gibi iyonlaştırıcı radyasyon kaynakları, bu görüntüleme tekniklerinin temelinde yer almaktadır. Medikal görüntüleme sistemleri, 1895 yılında Wilhelm Conrad Röntgen'in X-ışınlarını keşfetmesiyle bilimsel ve klinik uygulamalarda yerini almaya başlamış, geçen süreçte teknolojik gelişmeler sayesinde önemli ölçüde ilerleme kaydetmiştir (Bkz. Şekil 2.2.1) [42].



**Şekil 2.2.1:** X-ışını dedektörlerinin geliştirilmesiyle birlikte X-ışını radyografisinin evrimi [42].

Başlangıçta sadece basit yapıları gözlemlemeye yarayan bu teknikler, günümüzde yüksek çözünürlüklü, üç boyutlu ve gerçek zamanlı görüntülemeye olanak tanıyan ileri tıbbi görüntüleme sistemlerine dönüşmüştür (Bkz. Şekil 2.2.2). Bilgisayarlı tomografi (BT), dijital radyografi ve mamografi gibi modern uygulamalar, X-ışını teknolojisinin sağlık alanındaki kullanımının sadece tanıyla sınırlı olmadığını, aynı zamanda tedavi süreçlerine de entegre olduğunu göstermektedir. Özellikle radyoterapi alanında, yüksek enerjili X-ışınları kanserli hücrelerin hedeflenerek yok edilmesinde kritik bir rol oynamaktadır [43]. Bu tür tedavilerde, sağlıklı dokuların korunması ve tedavi etkinliğinin artırılması için uygulanan X-ışını dozunun hassas şekilde kontrol edilmesi büyük önem taşır.



**Şekil 2.2.2:** İleri tıbbi görüntüleme sistemi.

Tüm bu tanısal ve tedavi süreçlerinde, X-ışınlarının doğru ve etkili bir şekilde algılanabilmesi için X-ışını dedektörleri temel bileşenler arasında yer alır. Bu dedektörler, X-ışını fotonlarını elektriksel sinyallere dönüştürerek görüntü veya doz ölçüm verisi elde edilmesini sağlar. Görüntüleme sistemlerinin başarısı; dedektörün hassasiyeti, çözünürlüğü, yanıt süresi ve enerji dönüşüm verimliliği gibi parametrelerle doğrudan ilişkilidir. Ayrıca, X-ışını dedektörleri yalnızca görüntü üretmekle kalmaz, aynı zamanda hastaya uygulanan radyasyon dozunun belirlenmesinde de kullanılır. Bu yönüyle dedektörler, hasta güvenliği açısından da büyük önem taşır. Gereğinden fazla radyasyon maruziyeti, kısa veya uzun vadede zararlı biyolojik etkiler oluşturabileceğinden, dedektör sistemleri aracılığıyla doz optimizasyonu yapılması gereklidir. Bu, hem yüksek kaliteli görüntü elde edilmesini hem de hastanın minimum düzeyde radyasyona maruz kalmasını sağlar.

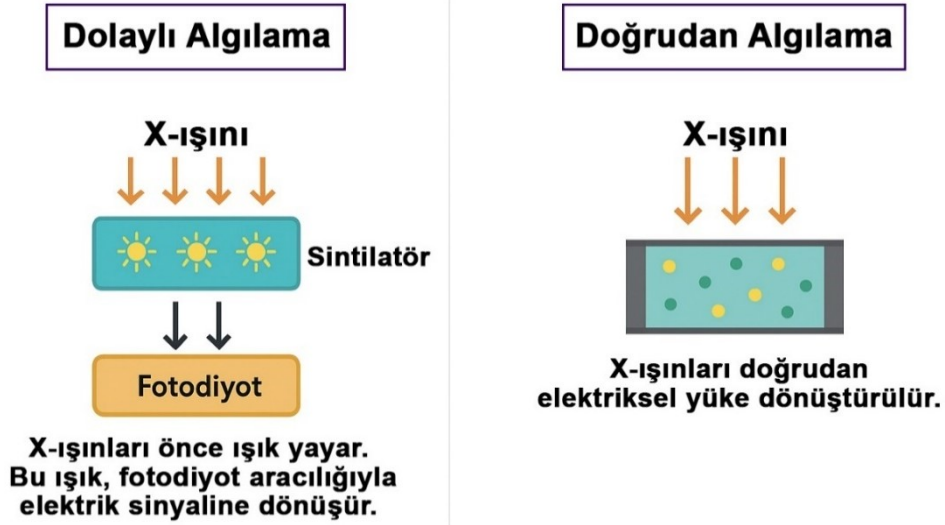
Günümüzde X-ışını dedektör teknolojileri, inorganik yarı iletkenler, organik malzemeler, sintilasyon tabanlı sistemler ve doğrudan dönüşüm prensibine dayalı gelişmiş yapılar gibi farklı tasarımlarla karşımıza çıkmaktadır. Bu teknolojiler, görüntüleme cihazlarının hassasiyetini ve çözünürlüğünü artırmakta, aynı zamanda cihazların kompakt hale getirilmesine ve mobil kullanımına da olanak tanımaktadır. Sonuç olarak, tıbbi görüntüleme ve tedavi uygulamalarında X-ışını dedektörleri, sistemlerin hem işlevselliğini hem de hasta güvenliğini doğrudan etkileyen kilit bileşenlerdir. Bu nedenle dedektör teknolojilerindeki ilerlemeler, sağlık alanında daha hızlı, güvenilir ve düşük dozla çalışan sistemlerin geliştirilmesini mümkün kılmaktadır.

### 2.2.1. Doğrudan ve Dolaylı Tip X-ışını Dedektörleri

X-ışını dedektörleri, temel çalışma prensiplerine göre doğrudan ve dolaylı dönüşüm temelli olmak üzere iki ana grupta sınıflandırılmaktadır. Günümüzde özellikle medikal görüntüleme alanında yaygın olarak kullanılan sistemler, X-ışını fotonlarını önce görünür ışığa dönüştüren sintilatör tabakaları ile bu ışığı elektrik sinyaline çeviren amorf silikon bazlı fotodedektör dizilerinden oluşmaktadır [44]. Bu tür yapılar, dolaylı dönüşüm esasına göre çalışan dedektörler olarak tanımlanır.

Dolaylı sistemlerde kullanılan sintilasyon malzemeleri, X-ışını fotonlarını absorbe ederek izotropik şekilde ışık yayar. Bu ışığın yönsüz yayılması, piksel tabanlı dedektör yapılarında optik çapraz konuşmaya neden olur ve görüntü çözünürlüğünü olumsuz yönde etkileyebilir. Ayrıca çözünürlük; dedektördeki piksel boyutları ve malzeme içerisindeki tuzak seviyeleri gibi diğer yapısal faktörlerden de etkilenmektedir [45]. Dedektör sistemlerinin uzaysal çözünürlük kapasitesi, modülasyon transfer fonksiyonu (MTF) ile değerlendirilmekte olup, bu fonksiyon belirli bir uzamsal frekansta giriş sinyalinin çıkış sinyaline ne derece taşındığını ifade eder. Gelişmiş sintilasyon malzemelerinden biri olan talyum katkılı sezyum iyodür (CsI:TI), iğne benzeri morfolojik yapısıyla dalga kılavuzu işlevi görerek optik yayılmayı sınırlar ve çözünürlük kaybını azaltır. Ancak bu malzemenin kaplanma işlemi oldukça maliyetlidir ve ayrıca nemli ortamlarda yapısal bozulmalara uğrayarak performans kaybına neden olabilir [46].

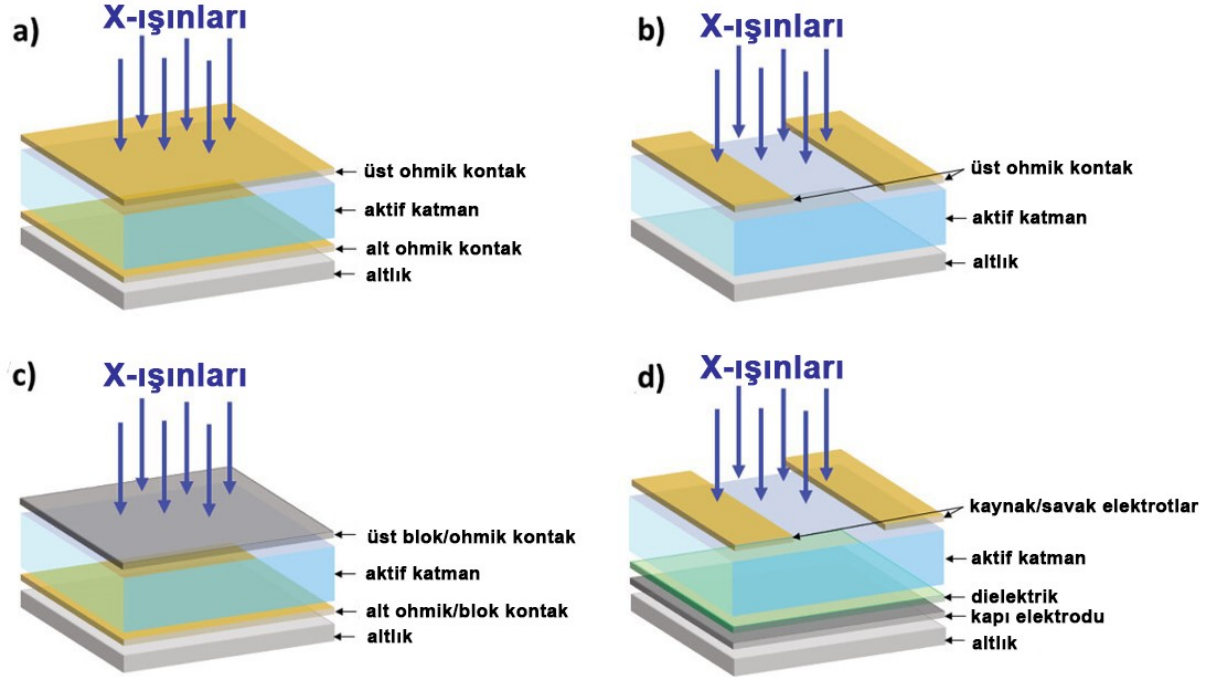
Doğrudan dönüşümle çalışan dedektörlerde ise, X-ışını fotonları sintilasyon basamağı olmadan doğrudan yarı iletken tabakada elektron-delik çiftleri oluşturur. Bu tür dedektörlerde genellikle yüksek X-ışını absorpsiyon katsayısına sahip amorf selenyum (a-Se) gibi malzemeler kullanılır. Sintilatörsüz doğrudan dönüşüm mekanizması sayesinde optik çapraz konuşma en aza indirilmiş olur. Her ne kadar doğrudan dönüşümlü dedektörler yüksek çözünürlük potansiyeli sunsa da, çözünürlük; piksel geometrisi, pikseller arası elektriksel etkileşimler ve uygulanan elektrik alanın homojenliği gibi nedenlerle sınırlanabilir. Ayrıca bu sistemlerde iyonizasyon enerjisinin elektrik alanla olan bağımlılığı ve düşük X-ışını absorpsiyon katsayısı, yeterli yük ayrışmasının sağlanabilmesi için yüksek voltajlara ve dolayısıyla kalın dedektör katmanlarına ihtiyaç doğurur [47,48]. Dolaylı ve doğrudan dönüşümlü dedektör sistemlerine ilişkin şematik gösterim Şekil 2.2.1.1'de sunulmaktadır.



Şekil 2.2.1.1: Doğrudan ve dolaylı dedektörlerin şematik gösterimi.

Literatürde bildirilen organik ve hibrit doğrudan iyonlaştırıcı radyasyon dedektörleri, temel olarak üç ana cihaz mimarisi altında sınıflandırılmaktadır; bu sınıflandırma görünür bölgedeki fotodedektörlerde yaygın olarak benimsenen yapılarla benzerlik göstermektedir. Bu mimariler sırasıyla fotoiletkenler, fotodiyotlar ve fototransistörlerdir (Bkz. Şekil 2.2.1.2) [49]. Fotoiletken ve fotodiyot türündeki aygıtlar, iki elektrot arasında yer alan bir fotoaktif katman içeren iki terminalli yapılar şeklindedir. Bu yapılar ya dikey konfigürasyonda olup aktif katmanın üst ve alt elektrotlar arasında yer aldığı türdedir ya da eş-düzlemsel olup algılayıcı yüzeyin doğrudan radyasyona maruz kaldığı ve elektrotlarla yatay düzlemde temas ettiği bir geometriye sahiptir. Dikey yapı mimarisi, pikseli dedektör matrisleriyle entegrasyon kolaylığı sunduğu için yaygın şekilde tercih edilmektedir [50]. Eş-düzlemsel fotoiletken yapılar ise düşük çalışma voltajı ve üretim kolaylığı gibi avantajlar sunar; çünkü bu yapıdaki elektrik alan şiddeti yalnızca elektrotlar arasındaki mesafeye bağlı olup, katman kalınlığından etkilenmez [51].

Bu tez çalışması kapsamında, dikey geometriye sahip fotodiyot (ITO/Zn/P3HT:ZnO/Grafit) yapısı ve fotoiletken (IDT/P3HT:ZnO) yapısı temel alınarak iki farklı mimaride dedektörler üretilmiş olup bu iki farklı yapının karşılaştırması yapılmıştır. Aynı zamanda P3HT içerisindeki ZnO NP katkı miktarları değiştirilerek, ZnO NP katkısının bu cihaz yapılarındaki etkisi araştırılmıştır.



**Şekil 2.2.1.2:** Doğrudan X-ışını dedektörleri için dört tipik mimarinin şemaları; a) Dikey fotoiletken mimarisi; b) Eş-düzlemsel fotoiletken mimarisi; c) Fotodiyot mimarisi; d) Fototransistör mimarisi [49].

Fotodiyot mimarileri, son yıllarda organik ve hibrit fotovoltaik teknolojiler üzerine gerçekleştirilen yoğun araştırmalardan edinilen bilgi birikimini kullanarak geliştirilmiştir. Ters kutuplama altında çalıştırılmaları sayesinde karanlık akımın bastırılması mümkün hale gelir ve bu da genel olarak sinyal-gürültü oranının yükseltilmesi ile algılama sınırının iyileştirilmesine katkı sağlar. Fototransistörler ise daha sınırlı sayıda çalışmada ele alınan ve genellikle ince film organik yapılara özgü olarak geliştirilen mimarilerdendir [52–54]. Bu yapılarda, kaynak ve savak elektrotları arasında gerçekleşen yük taşıması, üçüncü bir elektrot olan kapı (gate) aracılığıyla kontrol edilir; bu durum, klasik alan etkili transistörlerde olduğu gibi cihazın çalışma parametrelerinin ayarlanmasını sağlar. Radyasyonun yol açtığı yüklenme, kanal taşıyıcılarının hareketliliğinde değişim meydana getirerek dedektörün elektriksel özelliklerinde ölçülebilir bir farklılığa neden olur; böylece hassas dedeksiyon mümkün olur. Bu tür aygıtların en büyük avantajı, geniş alanlı doğrudan dönüşüm sağlayan X-ışını görüntüleme sistemlerinde, piksel başına bir TFT (ince film transistör) gereksinimini ortadan kaldırarak sinyalin kapı voltajı üzerinden doğrudan kontrol edilebilmesine olanak sağlamasıdır [55]. Ancak, bu mimaride kullanılan aktif katmanın kalınlığı, dedektör performansı üzerinde doğrudan belirleyici bir etkidir. Organik yarıiletken katmanın X-ışınlarını etkin biçimde soğurabilmesi için oldukça kalın olması gerekir ki bu, fototransistörlerin çalışma verimliliğini sınırlayan bir durumdur.

### 2.2.2. İnorganik ve Organik X-ışını Dedektörleri

İnorganik X-ışını dedektörleri, genellikle yüksek atom numarasına (Z) sahip materyallerin yarı iletken özelliklerinden faydalanılarak tasarlanır. Bu tip dedektörlerde kullanılan malzemeler arasında silisyum (Si), germanyum (Ge), kadmiyum tellür (CdTe), kadmiyum çinko tellür (CdZnTe) gibi bileşikler yer almaktadır. Bu malzemeler, yüksek radyasyon absorpsiyon katsayıları ve geniş bant aralıkları sayesinde fotonların enerjisini doğrudan elektriksel sinyale dönüştürmede yüksek performans sergilerler. Özellikle CdTe ve CdZnTe gibi bileşikler, tıbbi görüntüleme ve güvenlik taramaları gibi alanlarda yüksek enerji çözünürlüğü gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir. Ancak, bu tip inorganik dedektörlerin büyük ölçekli üretimi genellikle yüksek maliyetli olup, yapısal kırılma gibi çeşitli dezavantajlara sahiptir [21]. Organik polimerlerin radyasyon dedektörlerinde alternatif bir malzeme olarak kullanımı ise ilk kez 1980'li yılların başında gündeme gelmiştir [25]. Organik yarı iletkenlerin en dikkat çekici yönü; düşük maliyetli üretim süreçleri, esnek yapıları sayesinde geniş yüzeylere kolaylıkla uygulanabilmeleri ve bu sayede X-ışını dedektör teknolojilerine önemli katkılar sunabilmeleridir.

İnorganik dedektörlerde yaygın olarak kullanılan kaplama teknikleri, dedektör boyutlarını sınırlayan faktörlerden biri iken, organik yarı iletken malzemelerin üretimindeki esneklik bu sınırlamaların büyük ölçüde aşılmasını mümkün kılar. Ayrıca bu malzemelerin optoelektronik özellikleri, moleküler yapılarının kontrolüyle kolayca ayarlanabilir; böylece foton üretimi ve yük taşıma performansı optimize edilebilir. Organik dedektörlerin üretiminde kullanılan başlıca aktif katmanlar, politriarilamin (PTAA), polifenilen vinilen (PPV), polianilin, poli(3-hekziltiofen) (P3HT) ve fullerene türevleri (örneğin PCBM) gibi konjuge sistemlerden oluşur. Bu malzemeler, X-ışınlarının neden olduğu iyonlaştırıcı radyasyonu elektriksel sinyallere dönüştürebilecek yapılar oluşturmaktadır. Organik malzemelerin düşük atom numaralarına sahip olması, X-ışınlarıyla etkileşim kabiliyetlerini sınırlandırır da, bu sınırlılık metal oksit nanoparçacıklarının katılanmasıyla aşılabilmektedir. Düşük sıcaklıklarda işlenebilmeleri sayesinde, biyomedikal görüntüleme uygulamalarında kullanılacak, büyük yüzeyli ya da eğimli yüzeylere sahip dedektörlerin üretimi mümkün hale gelmektedir. Organik bileşikler, yüksek foton soğurma yetenekleri, etkili foton-yük dönüşüm oranları ve taşıyıcı yük mobiliteleri sayesinde X-ışını dedektörlerinde kullanılmaya elverişlidir [22]. Bu tür dedektörlerin performansını doğrudan etkileyen temel yapısal faktörlerden biri de kullanılan organik yarı iletkenlerin kristalin yapısıdır. Yüksek kristallilik düzeyine sahip konjuge polimerler, taşıyıcı yüklerin daha düzenli yollarla hareket etmesini sağlar ve bu durum cihazın

hem duyarlılığına hem de zaman yanıtına olumlu etki eder. Bu çalışmada tercih edilen dedektör mimarisi için yüksek kristallilik seviyeleri hedeflendiğinden, doğrudan yük taşıma kapasitesine olumlu etkisi nedeniyle P3HT fazı kullanılmıştır [27]. Bununla birlikte, organik dedektörlerin bazı sınırlamaları da mevcuttur. Düşük sıcaklıklarda işlem görmeleri uzun ömürlü stabilite açısından dezavantaj oluşturabilir. Ayrıca, yüksek ışın dozu altında yapısal bozulmalar veya fotodegradasyon görülebilmektedir.

Organik X-ışını dedektörleri, özellikle biyomedikal görüntüleme, güvenlik taramaları, taşınabilir radyasyon izleme cihazları ve giyilebilir elektronik sistemler gibi alanlarda büyük bir potansiyele sahiptir. Esneklik ve düşük maliyet gibi yapısal avantajları, onları büyük alanlı ve kişiye özel dedeksiyon sistemlerinin geliştirilmesinde önemli adaylar haline getirmektedir. Özellikle düşük doz tespiti gereken uygulamalarda, tespit sınırı (LoD) değerlerinin  $1 \mu\text{Gy/s}$  altına inebilmesi, bu sistemlerin hassasiyet açısından inorganik sistemlerle yarışabileceğini ortaya koymaktadır. Bu çalışmada ele alınan P3HT:ZnO temelli dedektörler, literatürdeki birçok geleneksel yapıya kıyasla daha düşük LoD ve daha yüksek duyarlılık sergilemiştir. Bu durum hem organik malzemelerin gelişen potansiyelini hem de ZnO gibi çevresel açıdan daha az toksik, sürdürülebilir katkı malzemelerinin önemini vurgulamaktadır. Organik-inorganik hibrit dedektör teknolojilerinin, gelecekte hem tıbbi teşhis sistemlerinde hem de taşınabilir güvenlik çözümlerinde kritik rol üstlenmesi beklenmektedir.

### 2.3. ORGANİK YARIİLETKEN MALZEMELER

Organik yarıiletkenler, karbon temelli molekül yapıları içerisinde yer alan konjuge  $\pi$ -bağ sistemleri sayesinde elektriksel iletkenlik özelliği kazanabilen bileşiklerdir. Bu malzemelerin temel özelliği, molekül boyunca alternatif tekli ve çiftli bağlardan oluşan konjuge yapıya sahip olmalarıdır. Her bir karbon-karbon bağında bir sigma ( $\sigma$ ) bağı bulunurken, çift bağların bir parçası olarak aynı zamanda bir pi ( $\pi$ ) bağı da mevcuttur. Pi bağları daha az lokalize olmuş ve daha hareketli elektron bulutlarıyla karakterizedir. Bu delokalize  $\pi$ -elektronları, organik molekülün elektronik özelliklerini belirlerken, aynı zamanda yarıiletken davranış sergilemesine neden olur. Konjugasyon özelliğine sahip organik oligomerler ve konjuge polimerler, organik elektronik ve fotonik alanında sıklıkla araştırılan materyallerdir. Bu malzemeler, taşıdıkları elektriksel yük türüne göre p-tipi (delik taşıyıcı) veya n-tipi (elektron taşıyıcı) yarıiletken olarak sınıflandırılır. P-tipi organik yarıiletkenlerde çoğunluk taşıyıcıları boşluklarken, n-tipi yapılarda bu görev serbest elektronlar tarafından üstlenilir. Bu

sınıflandırma, malzemenin iyonlaşma potansiyeli ve elektron ilgisi gibi temel enerji parametrelerine bağlı olarak yapılır.

Organik yarıiletken araştırmalarında p-tipi materyaller genellikle daha ön planda yer almıştır. Bunun temel sebeplerinden biri, p-tipi organik yarıiletkenlerin n-tipi muadillerine kıyasla oksijen ve neme karşı daha yüksek çevresel stabilite sunmalarındır. Ayrıca, yük taşıma mobilitelerinin de n-tipi malzemelere oranla daha yüksek olduğu bilinmektedir [56]. N-tipi organik yarıiletkenlerin sınırlı kullanılabilirliğinin sebepleri arasında, moleküllerindeki aktif grupların oksijen ve suyla kolayca etkileşime girmesi ve bunun sonucunda malzemenin elektriksel özelliklerinin bozulması yer almaktadır [57]. Ayrıca, bu tür malzemelerin alan etkili yük taşıma mobiliteleri genellikle düşük seviyededir.

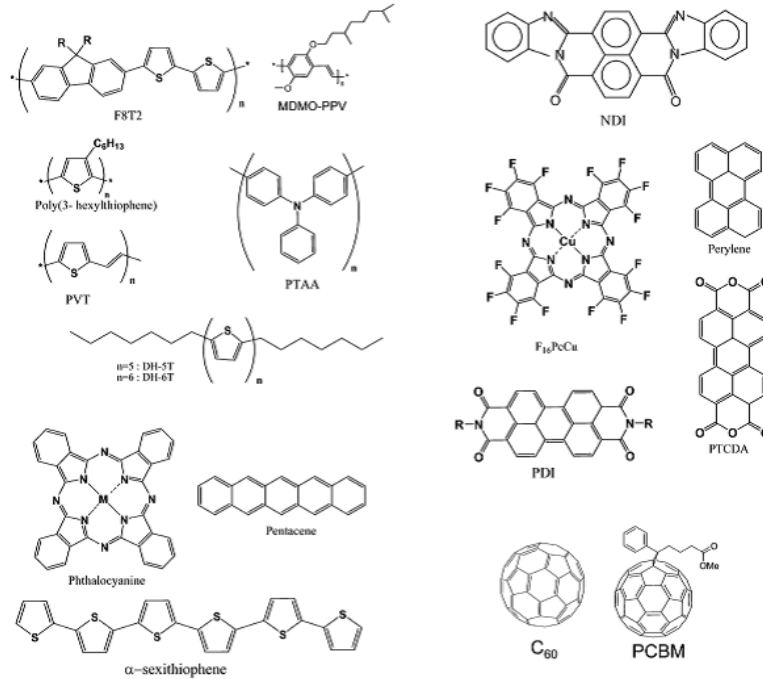
Son yıllarda yapılan çalışmalar, medikal görüntüleme sistemlerinde X-ışını dedektörü olarak organik yarı iletken malzemelerin önemli avantajlar sunabileceğini göstermektedir [58,59]. Bu malzemelerin giderek artan şekilde ilgi görmesinin temel sebepleri arasında; düşük üretim maliyetleri, mekanik esneklikleri, geniş yüzey alanlarına uygulanabilir olmaları ve yüksek işlenebilirlikleri yer almaktadır. Bu özellikler sayesinde, özellikle taşınabilir, esnek ve kavisli yüzeylere uyarlanabilir dedektör sistemlerinin geliştirilmesi mümkün hale gelmiştir. Geleneksel inorganik X-ışını dedektörleri, genellikle vakum altında yüksek sıcaklıklarda işlenen karmaşık kaplama sistemleriyle üretilmektedir. Bu durum, üretim süreçlerini hem maliyetli hem de ölçeklenebilirlik açısından kısıtlayıcı hale getirmektedir. Ayrıca bu sistemlerde kullanılan sert ve kırılğan malzemeler, özellikle giyilebilir veya taşınabilir cihazlara entegrasyon açısından ciddi sınırlamalar oluşturmaktadır. Organik yarı iletkenler ise, düşük sıcaklıklarda ve çözelti temelli işlemlerle üretilebildikleri için büyük yüzeyli, esnek ve düşük maliyetli dedektörler oluşturulmasına olanak tanımaktadır.

Organik X-ışını dedektörlerinin çalışma prensibi genellikle yığın heteroeklem (BHJ) yapılar üzerine kuruludur. Bu yapılarda yaygın olarak kullanılan malzeme kombinasyonlarından biri, elektron taşıyıcı (akseptör) görevini üstlenen fenil-C61-bütirik asit metil ester (PCBM) ve delik taşıyıcı (donör) özellik gösteren poli(3-heksiltiofen-2,5-diyl) (P3HT)'tir. Bu iki bileşen karıştırılarak oluşturulan BHJ yapısı, geniş bir ara yüzey alanı sağlayarak etkin eksiton ayrışmasını mümkün kılar. X-ışını fotonları bu yapıya çarptığında, sistem içinde eksiton olarak adlandırılan bağlı elektron-delik çiftleri oluşur. Bu eksitonlar, donör-akseptör ara yüzeyinde ayrışarak serbest yük taşıyıcılarına dönüşürler. Oluşan serbest elektronlar ve delikler, bir elektrik alan yardımıyla ilgili elektrotlara taşınarak elektrik sinyaline

dönüştürülür. Bu mekanizma sayesinde, X-ışını dedektörü olarak görev yapan organik cihaz, radyasyonun algılanmasını ve işlenmesini sağlar [60,61].

Organik yarı iletkenlerde foton algılama verimliliğini doğrudan etkileyen önemli parametrelerden biri, malzemenin kristallilik düzeyidir. Kristalin yapı, yük taşıyıcılarının mobilitelerini artırarak cihaz performansını olumlu yönde etkiler. Bu bağlamda, çalışmalarda sıklıkla tercih edilen P3HT polimeri, yüksek kristallilik sağlayan bir faza sahip olması nedeniyle özellikle yük taşıma kapasitesini artırma potansiyeli bakımından avantajlıdır [27]. Ayrıca, organik yarı iletkenlerin kimyasal yapıları kolaylıkla modifiye edilebilir. Bu özellik sayesinde; enerji seviyeleri, foton absorpsiyon aralığı, taşıyıcı mobiliteleri gibi özellikler uygulamaya göre ayarlanabilir. Bu durum, dedektör tasarımlarında büyük esneklik sağlar ve hedeflenen spektral aralıkta çalışabilecek sistemlerin geliştirilmesini mümkün kılar. Aynı zamanda, bazı organik küçük moleküller ve konjuge polimerler, belirli katkı maddeleriyle fonksiyonlandırılarak dedektör performansı daha da artırılabilir.

Şekil 2.3.1'de, yaygın olarak kullanılan bazı organik yarı iletkenlerin ve küçük moleküllerin kimyasal yapıları gösterilmektedir. Bu yapılar, dedektörün temel bileşenlerinin seçiminde kritik rol oynar. Doğru malzeme kombinasyonları, cihazın duyarlılığını, çözünürlüğünü ve kararlılığını önemli ölçüde etkileyebilmektedir.



**Şekil 2.3.1:** Organik elektronikte kullanılan bazı organik yarıiletken polimer ve küçük moleküller; sol tarafta verici (p-tipi) bileşikler, sağ tarafta ise alıcı (n-tipi) türevler yer almaktadır.

Organik yarıiletken malzemelerde fotoduyarlılık, gelen ışınının (örneğin X-ışını, görünür ışık, UV) malzeme içinde eksiton (elektron-hole çifti) oluşumuna neden olması ile başlar. Bu süreç, foton enerjisinin malzemenin elektronlarını daha yüksek enerji seviyelerine taşınması ile gerçekleşir. Ancak, organik yarıiletkenlerde düşük dielektrik sabiti ( $\sim 3$ ) ve düşük kristalin yapı düzeni nedeniyle eksitonlar, inorganik malzemelerdeki gibi kolayca ayrılmazlar. Eksitonlar, Coulomb kuvveti ile birbirine sıkı bağlı olduğundan, ayrışmaları için yüksek lokal elektrik alanlarına ihtiyaç duyulur. Bu tür eksitonlara Frenkel eksitonları adı verilir ve bağ enerjileri tipik olarak 500 meV seviyesindedir.

Buna karşın, geleneksel inorganik yarıiletkenlerde (örneğin silikon) daha yüksek dielektrik sabitleri ( $\sim 12$ ) ve düzenli kristal yapılar mevcuttur. Bu sayede oluşan Wannier-Mott tipi eksitonlar düşük bağ enerjilerine ( $\sim 10$  meV) sahiptir ve termal enerji ile kolayca serbest yük taşıyıcılarına dönüşebilirler. Organik malzemelerde ise bu süreç oldukça zordur ve verim düşüktür. Bu problemi aşmak amacıyla organik yarıiletkenlerde donör (p-tipi) ve akseptör (n-tipi) malzemelerin karışımıyla oluşturulan BHJ yapılar geliştirilmiştir [60]. BHJ mimarisi, aktif katman boyunca nanometre ölçeğinde homojen olarak dağılmış p-n arayüzleri oluşturarak eksitonların difüzyon mesafesinden daha kısa bir yol katederek ayrışmasını sağlar. Bu sayede foto-uyarılmış eksitonlar, verimli biçimde serbest elektron ve deliklere dönüşebilir. Böylece foton algılamada yüksek kuantum verimliliği elde edilir. Bu proje kapsamında geliştirilecek X-ışını dedektöründe aktif katman olarak BHJ yapısı kullanılacaktır. Donör (p-tipi) malzeme olarak ticari temin edilebilen P3HT polimeri tercih edilmiştir. Bu malzeme, yüksek delik taşıma mobilitesi ve kararlılık özellikleri nedeniyle fotovoltaiik ve dedektör uygulamalarında yaygın şekilde kullanılmaktadır.

#### 2.4. METALOKSİT NANOYAPILAR

Nanoteknoloji ve nanomalzemeler, günümüzde fiziksel, kimyasal ve biyolojik sistemlerde geniş uygulama alanları bulmuş ve teknolojik ilerlemelerin temel taşlarından biri haline gelmiştir. Bu alanın önemi ilk olarak 1959 yılında Richard Feynman tarafından dile getirilmiş ve özellikle son yıllarda nano ölçekli malzemelerin üretimi ve kullanımı konusunda çok sayıda yenilikçi yaklaşım geliştirilmiştir [62]. Nanomalzemelerin geliştirilmesi sayesinde, günümüzde kullanılan birçok elektronik cihaz daha küçük boyutlara indirgenmiş, üretim maliyetleri azaltılmış ve performans açısından daha verimli hale getirilmiştir.

1991 yılında Iijima ve arkadaşları tarafından karbon nanotüplerin keşfiyle birlikte, özellikle inorganik nano yapıları malzemelere olan ilgi hızla artmış, bu malzemelerin sentezi,

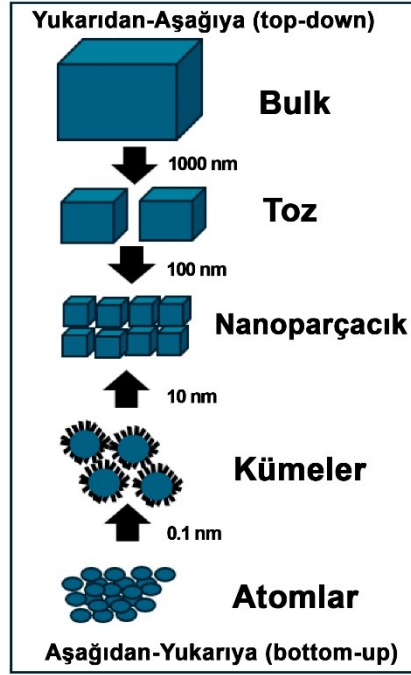
karakterizasyonu ve uygulamaları araştırma dünyasında önemli bir yer edinmiştir [63,64]. Aynı bileşiğin hacimsel (bulk) yapısı ile nano boyuttaki yapısı arasında ciddi farklar ortaya çıkmaktadır. Bu farkların temelinde, boyut küçüldükçe ortaya çıkan kuantum etkileri ve yüzey/hacim oranındaki artış yer alır. Malzemenin boyutları nano ölçeğe indirildiğinde, onun kimyasal, elektriksel, optik, mekanik ve yapısal özelliklerinde köklü değişiklikler meydana gelir [65].

Metal oksit nanomalzemeler, gösterdikleri özgün özellikler sayesinde çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Parçacık boyutunun küçülmesiyle birlikte kristal örgü parametrelerinde ve simetrisinde değişiklikler gözlemlenmekte; yüzey atomları, kenar yapıları veya oksijen boşlukları gibi mikro düzeydeki yapısal farklılıklar malzemenin kimyasal aktivitesini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu özellikler sayesinde metal oksit nano yapılar; enerji depolama sistemlerinden (bataryalar, yakıt hücreleri), yenilenebilir enerji uygulamalarına (güneş hücreleri, hidrojen üretimi), çevresel arıtma sistemlerine (hava ve su arıtımı), elektronik bileşenlere (alan etkili transistörler, sensörler, fotodetektörler) kadar geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir [66]. Ayrıca, biyomedikal alanda ilaç taşıma, kanser tedavisi, floresan görüntüleme, biyoişaretleme gibi çeşitli uygulamalarda da önemli rol oynamaktadır. Bununla birlikte geçiş metal oksitleri, manyetik okuma sistemlerinde, yazıcı kafalarında ve veri depolama teknolojilerinde de yaygın olarak kullanılmaktadır.

Metal oksit nanoyapıların gelişmiş fiziksel ve kimyasal özelliklerinden faydalanmak ve yeni uygulama alanları oluşturmak amacıyla, bu yapıların kontrollü ve tekrarlanabilir bir şekilde sentezlenmesi büyük önem taşımaktadır. Genellikle iki ana üretim stratejisi benimsenmiştir [67,68]:

- i. Yukarıdan-Aşağıya (top-down) Yaklaşımı
- ii. Aşağıdan-Yukarıya (bottom-up) Yaklaşımı

Yukarıdan aşağıya ve aşağıdan yukarıya yaklaşım ile nanoyapıların üretimi konusunda şematik gösterim aşağıda Şekil 2.4.1'de sunulmuştur.



**Şekil 2.4.1:** Metal oksit nanoparçacıkların sentezinde yukarıdan aşağıya ve aşağıdan yukarıya yaklaşımın şematik gösterimi [69].

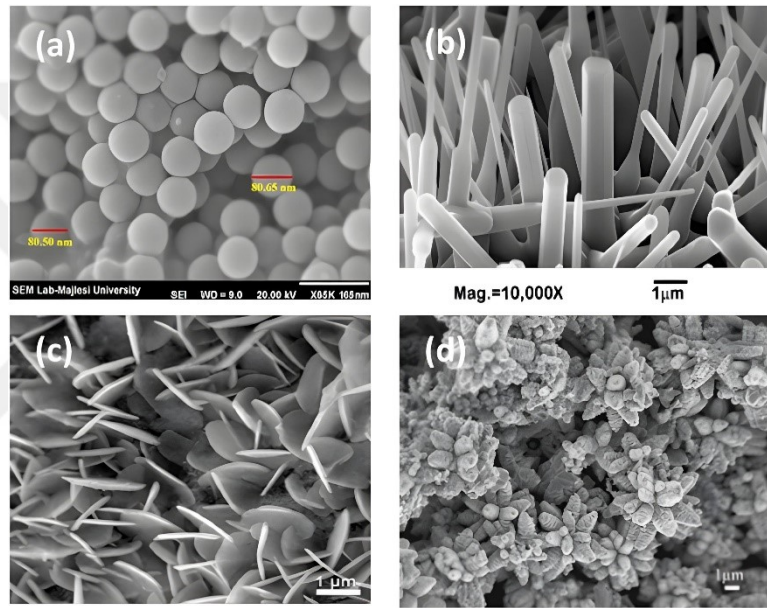
Yukarıdan-aşağıya yöntemi, hacimsel yapıdaki bir malzemenin fiziksel veya kimyasal işlemlerle parçalanarak nano boyuta indirilmesi esasına dayanır. Bu yöntemle nano boyuta ulaşmak için litografi, frezeleme ya da aşındırma gibi teknikler kullanılır. Diğer yandan, aşağıdan-yukarıya yaklaşımı ise atom, molekül veya küçük kümelerin birleşerek yapı oluşturmasını prensibine dayanır. Bu yöntem, nano yapıların sentezini daha kontrollü ve homojen şekilde gerçekleştirme olanağı sunar. Her iki yaklaşım da büyütme ortamına göre farklı teknik gruplarına ayrılmaktadır. Yaygın olarak kullanılan yöntemler arasında:

- Buhar fazı temelli büyütme yöntemleri: Atomik katman kaplama (ALD), kimyasal buhar biriktirme (CVD), lazerle indüklenen piroliz gibi teknikleri içerir.
- Sıvı faz temelli yöntemler: Hidrotermal sentez, sol-jel yöntemleri, elektro kimyasal çöktürme gibi tekniklerle malzemeler sıvı ortamda büyütülür.
- Katı faz büyütme: Katı öncüllerden başlayan ve termal işlemlerle nano yapıların oluştuğu yöntemdir.
- Hibrit yöntemler: Gaz-sıvı-katı fazların bir arada kullanıldığı, karmaşık ve fonksiyonel yapıların elde edilmesini sağlayan yöntemlerdir.

Bu sentez tekniklerinin seçimi, hedeflenen uygulama, istenilen boyut ve morfoloji gibi kriterlere göre belirlenir. Bu sayede, metal oksit nanomalzemelerin özellikleri istenilen doğrultuda optimize edilebilir.

### 2.4.1. ZnO Nanopartiküller

Çinko oksit (ZnO), katı formda toz, ince film ya da koloidal yapı şeklinde sentezlenebilen, çok yönlü bir metal oksit yarıiletken malzemedir. ZnO nanoyapılarının üretimi için çeşitli fiziksel ve kimyasal yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler genel olarak iki ana gruba ayrılabilir: çözelti bazlı ve gaz fazı bazlı sentez teknikleri. Çözelti fazlı yöntemler arasında çöktürme, hidrotermal ve solvotermal yöntemler, sol-jel tekniği, mikro-emülsiyon, yanma sentezi ve elektrokimyasal yaklaşımlar yer alır. Gaz fazı temelli teknikler ise kimyasal buhar biriktirme (CVD), fiziksel buhar biriktirme (PVD) ve püskürtme pirolizi gibi yöntemleri kapsar.



**Şekil 2.4.1.1:** ZnO a) nanoparçacık, b) nanoçubuk, c) nanotabaka, d) nanoçiçek yapılarına ait SEM görüntüleri [70–73].

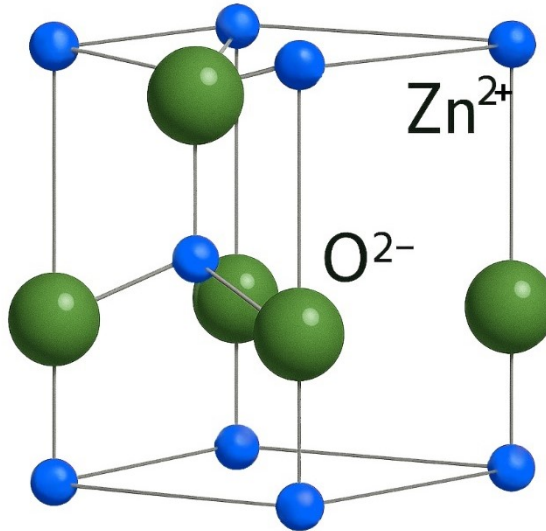
Deneysel koşulların (sıcaklık, pH, çözücü türü, katkı maddeleri gibi) kontrol edilmesiyle ZnO nanoyapıları; parçacık, çubuk, tel, sarmal, çiçeksi veya tabaka (nanosheet) gibi farklı morfolojilerde üretilmektedir (Bkz. Şekil 2.4.1.1). Bu çeşitli morfolojik yapıların elde edilebilmesi, uygulama alanlarına özel yapı tasarımı yapılmasını mümkün kılmaktadır. Her üretim yönteminin kendine özgü avantajları ve sınırlamaları mevcuttur. Bu çalışmada, özellikle elektrokimyasal büyütme yöntemiyle ZnO nanoyapılarının sentezine odaklanılmıştır.

Geniş bant aralığı (3.4 eV) ve doğası gereği n-tipi iletkenliği ile ZnO, gelecek vadeden bir yarıiletken olarak dikkat çekmektedir. 1930’lu yıllardan bu yana araştırmalara konu olan bu malzeme, son yıllarda nanoyapılı formlarının geliştirilmesiyle birlikte elektronik ve optoelektronik uygulamalarda çok daha yaygın kullanılmaya başlanmıştır [74]. Geliştirilen yeni üretim teknikleri sayesinde, ZnO tabanlı cihazların fonksiyonelliği artırılmış ve bu malzeme

silikon (Si) ve galyum nitrid (GaN) gibi geleneksel yarıiletkenlere potansiyel alternatif olarak değerlendirilmeye başlanmıştır.

ZnO'nun doğrudan bant geçişli bir yarıiletken olması, onu UV ışık dedektörleri, optoelektronik bileşenler, şeffaf elektronikler, sensör sistemleri ve spintronik uygulamaları gibi birçok alanda tercih edilen bir malzeme haline getirmiştir [75–77]. Bununla birlikte, ZnO aynı zamanda katalizör, güneş kremi, boya pigmenti gibi kimyasal ve kozmetik uygulamalarda da yer bulmuştur. Yüksek eksiton bağlanma enerjisi (yaklaşık 60 meV) sayesinde, özellikle lüminesans (ışıldama) temelli uygulamalarda yüksek verimlilik sağlar. Bu özellikleri doğrultusunda ZnO; alan etkili transistörler, ışık yayan diyotlar (LED), boya bazlı güneş hücreleri, hibrit güneş hücreleri ve kuantum noktalı güneş hücreleri gibi fotovoltaiik ve elektronik cihazlarda yaygın şekilde kullanılmaktadır [78–82].

Kristal yapısı itibariyle ZnO, oda sıcaklığında ve atmosferik basınç altında wurtzite tipi altıgen yapıya sahiptir (bkz. Şekil 2.4.1.2). Bu yapı, çinko ve oksijen atomlarının dört yüzlü bir koordinasyona sahip olacak şekilde dizilmesiyle oluşur. Zn atomları, oksijen atomları ile çevrilidir ve bu dizilim altıgen kristal yapının c-ekseni boyunca bir kutuplaşmaya (polarizasyona) neden olur. Wurtzite yapının karakteristik yüzeylerinden (0 0 0 1) ve (0 0 0 1) yüzeylerinde çinko ve oksijen atomları karşılıklı olarak konumlanır; bu durum kristal boyunca bir dipol moment oluşturur.



Şekil 2.4.1.2: Çinko oksit'in (ZnO) wurtzite yapısı.

ZnO üretimi sırasında kristal yapıda kaçınılmaz olarak bazı noktasal kusurlar oluşur. Bu kusurlar, çinko oksidin doğal olarak n-tipi iletkenlik göstermesine neden olur. Kusurlar arasında çinko ya da oksijen boşlukları, yer değiştirme atomları, ara bölge atomları ve safsızlık iyonları

yer alabilir. Bu kusurlar, bant aralığı içinde çeşitli ara enerji seviyeleri oluşturarak malzemenin elektriksel özelliklerini etkiler. Sentez yöntemleri arasında özellikle sol-jel tekniği dikkat çeken bir yöntemdir. Bu yöntem; yüksek saflıkta, homojen yapılar üretmeye olanak sağlaması, geniş katkı aralıklarında doping yapılabilmesi, düşük sıcaklıklarda uygulanabilirliği ve esnek yüzeylere uygunluğu gibi avantajlara sahiptir [83,84]. Sol-jel yöntemiyle ZnO sentezinde genellikle metal tuzları ya da metal alkoksitler kullanılarak çözelti ortamında hidroliz ve polimerizasyon reaksiyonları gerçekleştirilir. Reaksiyon sürecinin sonunda çözücü uzaklaştırılarak jelleşmiş bir yapı elde edilir. Bu jel yapı, kurutma ve ısıl işlem süreçleriyle ZnO nanopartikül yapısına dönüştürülür [85].

## 2.5. ZnO NANOPARTİKÜL KATKILI ORGANİK YARIİLETKEN POLİMERLER

Gelişen malzeme bilimi ve nanoteknoloji sayesinde, organik ve inorganik yapıların hibrit formda bir araya getirilmesiyle oluşturulan nanokompozitler, özellikle optoelektronik cihaz teknolojilerinde yüksek performans ve fonksiyonellik vadeden sistemler haline gelmiştir. Yarı iletken malzemeler arasında önemli bir yere sahip olan nanoboyuttaki çinko oksit (ZnO), geniş bir morfolojik çeşitliliğe, yüksek redoks potansiyeline, üstün fizikokimyasal kararlılığa, yüksek elektron hareketliliğine, toksik olmama avantajına ve n-tipi taşıyıcılık özelliklerine sahiptir. ZnO, doğada yaygın olarak bulunan ve toksik olmayan bir metal oksit olarak çevresel açıdan sürdürülebilir bir malzeme niteliği taşımaktadır. Geniş bant aralığına (~3.3 eV) sahip olan ZnO, ultraviyole (UV) bölgesinde güçlü ışık soğurumu ve yüksek redoks potansiyeli göstermektedir. N-tipi yarıiletken özellik sergileyen ZnO nanoparçacıkları, yüksek elektron mobilitesi ve düşük üretim maliyeti gibi nedenlerle fotovoltaiik, fotodedektör, LED, sensör ve X-ışını dedektörü gibi birçok optoelektronik uygulama alanında kullanılmaktadır. Ayrıca, ZnO'nun kristal yapısı morfolojik olarak kolayca kontrol edilebilir ve bu da özelleştirilmiş fonksiyonel yüzeylerin tasarımına olanak sağlar. Nanoteller, nanorodlar, küresel veya çubuk şeklindeki morfolojiler, ZnO'nun yüzey alanını ve etkileşim kapasitesini artırarak, polimer matris ile daha etkin bir yüzey etkileşimi kurmasına imkân tanır. Geleneksel polimerler yüksek optik geçirgenliğe sahip olmalarına rağmen, genellikle düşük kırılma indisi ve sınırlı UV ışık koruma kapasitesi gibi dezavantajlara sahiptir. Bu eksikliklerin giderilmesi amacıyla, inorganik dolguların polimer matris içerisine dahil edilmesi yaygın olarak başvurulan etkili bir yöntemdir. Polimer nanokompozitlerin hedeflenen özelliklere ulaşabilmesi için, dolgu maddeleri ile polimer matrisi arasındaki ara yüzey etkileşiminin güçlendirilmesi ve dolayısıyla dolgu maddelerinin homojen bir şekilde dağılması kritik öneme sahiptir.

Bu bağlamda, ZnO'nun sahip olduğu üstün entegre özellikler sayesinde, optoelektronik cihazlarda kullanılmak üzere polimer esaslı nanokompozitlerin geliştirilmesinde uygun bir malzeme olarak öne çıktığı bildirilmektedir. Organik polimerler, özellikle konjuge yapıya sahip olanlar (örneğin P3HT, MEH-PPV, PTAA), ışık soğurma ve taşıyıcı üretimi açısından işlevsel materyallerdir. Ancak bu malzemeler, genellikle düşük yük taşıma kabiliyeti, UV dayanımı eksikliği ve sınırlı mekanik stabilite gibi dezavantajlara sahiptir. Bu eksikliklerin giderilmesi amacıyla ZnO gibi inorganik nanoparçacıkların polimer matrise dahil edilmesi, sistemin elektriksel ve optik özelliklerinde kayda değer iyileşmeler sağlamaktadır. Bu katkılama, yalnızca ışık emilimini değil; aynı zamanda yük taşıma yollarının etkinliğini ve tuzak durumlarının azalmasını da mümkün kılar.

Polimer-nanoparçacık arayüzünde oluşan etkileşim, yük taşıyıcılarının ayrılması ve taşınması açısından kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda ZnO'nun yüksek elektron afinitesi, P3HT gibi donör polimerlerle birlikte kullanıldığında, elektronları etkin biçimde kabul ederek deliklerin serbest kalmasını sağlar. Bu da sistemin taşıyıcı mobilitesini artırır. Ayrıca, ZnO'nun amorf yapıdaki polimer matris içerisinde homojen olarak dağılması, optik geçirgenlik ve film homojenliği gibi parametreleri doğrudan etkiler. Nitekim, in-situ sol-jel polimerizasyon yöntemi kullanılarak yüksek şeffaflığa sahip ZnO/PMMA hibrit filmlerinin başarıyla üretildiği literatürde yer almaktadır [86]. ZnO/PMMA hibrit filmleri, bu yöntemle elde edildiğinde yüksek şeffaflık, düzgün yüzey morfolojisi ve uzun süreli kararlılık özellikleri göstermiştir. ZnO'nun polimer matris içerisindeki dağılımı ve parçacık boyutu, nanokompozitin optoelektronik performansı açısından belirleyicidir. Yetersiz dağılmış veya kümelenmiş ZnO yapıları, yük taşıyıcılarının geçişini engelleyerek tuzak noktalarının oluşmasına neden olabilir. Bu nedenle, polimer matris ve nanoparçacıklar arasındaki interaktif bağ kuvveti ve yüzey fonksiyonelleştirme çalışmaları, ZnO'nun homojen dağılımını ve matrise entegrasyonunu artıran faktörlerdir.

Sonuç olarak, ZnO nanoparçacıklarının organik polimer matrislerle birlikte kullanımı, yalnızca performans artışı değil; aynı zamanda malzeme bilimi açısından fonksiyonel hibrit sistemlerin geliştirilmesine de olanak tanımaktadır. Yüksek mobilite, düşük tuzak yoğunluğu, optik geçirgenlik ve termal kararlılık gibi pek çok avantajı beraberinde getiren bu yapılar, modern optoelektronik cihaz teknolojilerinde kritik bir rol üstlenmeye adaydır.

### 2.5.1. P3HT:ZnO Matrislerinde Yük Oluşumu ve Taşınması

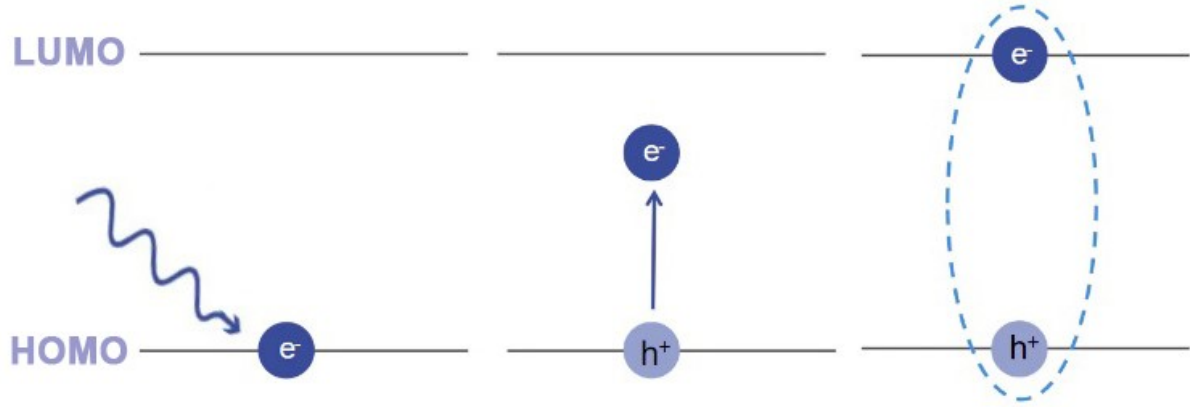
X-ışını dedektörleri, X-ışınlarının elektrik sinyaline dönüştürülme mekanizmasına göre doğrudan ve dolaylı tip dedektörler olarak ikiye ayrılır. Doğrudan tip dedektörlerde, gelen X ışınları doğrudan dedektörün organik aktif tabakasında yük taşıyıcılara dönüştürülür [22]. Dolaylı tip radyasyon dedektörleri ise, gelen radyasyonu önce bir sintilatör tarafından absorbe ederek optik fotonlara dönüştürür, ardından bu absorpsiyonun tespitiyle çalışan ikincil bir fotodedektöre iletir [87]. Doğrudan tip tespit dedektörleri, dolaylı tip dedektör sistemlerine göre üstün bir uzaysal çözünürlüğe sahiptir; ancak genellikle düşük dönüşüm verimliliğine sahip olduğu için X-ışını hassasiyeti düşüktür [88]. Ayrıca dolaylı tip dedektörler tasarım esnekliği açısından daha fazla seçenek sunar. Organik yarıiletken malzemeler dolaylı tip dedektörlere uygulanabilir olup, özellikle görünür aralıktaki etkileyici emilim verimliliği, foton-şarj dönüşüm verimliliği ve şarj taşıma kapasiteleri sayesinde algılama sistemlerinin aktif tabakaları için oldukça umut verici yenilikçi malzemelerdir [89].

Organik yarı iletkenlerde ışığın emilimi ve yayılması, en yüksek dolu moleküler orbital (HOMO) ile en düşük boş moleküler orbital (LUMO) arasında elektron transferi ile bir eksitonun (bağlı elektron-delik çifti) oluşumu ve yok olması ile gerçekleşir [90]. Dedektör mekanizması temel olarak şu aşamalara ayrılabilir [91]:

- Enerji absorpsiyonu ve eksiton oluşumu,
- Eksitonun HOMO ve LUMO seviyelerine taşınması,
- Elektron-delik çifti ayrılması,
- Yük taşınımı ve elektron-delik çiftlerinin toplanması,
- Rekombinasyon; elektron ve deliklerin yeniden birleşerek foton yayma süreci.

HOMO seviyesi (bir molekülden bir elektronun koparılması için gereken minimum enerji) organik yarıiletken malzemenin iyonlaşma potansiyeline bağlı iken, LUMO seviyesi (bir moleküle bir elektron eklenmesi için gereken minimum enerji) elektron afinitesi ile ilgilidir. Organik yarıiletkenin elektriksel özelliklerini ise HOMO-LUMO seviyeleri arasındaki band gap (enerji farkı) belirler. X-ışını fotonları, dedektör malzemesine çarptığında enerjisini malzemeye aktararak organik yarıiletken tarafından absorbe edildiğinde elektron-delik çifti oluşur. HOMO seviyesindeki elektron LUMO seviyesine taşınırken elektron-delik çiftlerinin ayrılmasıyla serbest elektron ve delikler ortaya çıkar (Bkz. Şekil 2.5.1.1) [92]. Serbest

elektronlar ve delikler, malzeme içinde hareket etmeye başlar ve elektrotlara ulaşır. Elektronlar HOMO seviyesine, delikler LUMO seviyesine taşınırken, malzeme içindeki kristal kusurları veya safsızlıklar, elektronların ve deliklerin hareketini engelleyebilir. Bu durum, elektronların ve deliklerin tuzağa düşmesine veya radyasyon yaymadan tekrar birleşmesine neden olabilir, bu da sintilasyon verimliliğini azaltır. Tüm bu özellikler organik yarı iletken malzemenin kristal kalitesine oldukça bağlıdır [93].



**Şekil 2.5.1.1:** Eksiton oluşumu süreci ve enerji bandı içerisinde taşınan serbest yük taşıyıcıları.

Yeni nesil iyonlaştırıcı radyasyon dedektörlerinin tasarlanması için işleme kolaylığı, düşük güç tüketimi ve mekanik esneklik ideal olarak bir araya getirilmelidir. Son on yılda, radyasyon tespiti için organik yarı iletken malzemelerin aktif katman olarak kullanılmasıyla ilgili yapılan çalışmalar, mekanik esneklikleri, düşük maliyetli olmaları ve basit üretim yöntemlerinin getirdiği avantajlar ile hız kazanmıştır. Son zamanlarda yapılan birçok araştırma, 6,13-bis(triisopropylsilyletinil)pentasen (TIPS-pentasen) gibi küçük moleküller ve poli(3-heksiltiofen) (P3HT) gibi konjuge polimerler içeren organik yarı iletkenlere dayalı radyasyon dedektörlerinin umut verici potansiyelini vurgulamaktadır [94,95]. Bu dedektörler düşük yoğunlukları nedeniyle radyasyon emilim katsayılarının sınırlanması gibi zorluklarla karşı karşıyadır. Bu sınırlamayı aşmak için, konjuge polimerler ve küçük moleküller karışımlarına yüksek atom numaralı (Z) nanoyapılar eklemekten, organik küçük molekülleri doğrudan yüksek Z atomları ile modifiye etmeye kadar çeşitli çözümler önerilmiştir [96]. Ancak ağır metallerin (örneğin, talyum) toksisitesi, yüksek maliyet ve esnek alt tabakalara işlenmesindeki zorluklar, bu malzemelerin ileri teknoloji ve tıbbi alanlarda kullanımını sınırlamaktadır [97]. Organik yarı iletken radyasyon dedektörlerinin algılama özelliklerini iyileştirmek için en önemli çalışmalardan biri, dedektör mimarisinde inorganik yarı iletken metal oksit nanoyapıların kullanımını içermektedir. Aktif katmanda dağıtılan metal oksit nanoparçacıkları, zayıflatma katsayısını ve X-ışınları ile etkileşimi artırarak daha verimli dedektör üretimine

katkıda bulunur. Özellikle bizmut oksit ( $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ) nanoparçacıkları son zamanlarda dedektör mimarilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [98]. Ek olarak, metal oksit yarı iletkenler sınıfına ait olan gadolinyum oksit ( $\text{Gd}_2\text{O}_3$ ), son yıllarda araştırılan materyallerden biri olmuştur [99]. ZnO, birçok optoelektronik uygulama için kapsamlı olarak araştırılmış iyi bilinen bir n-tipi yarı iletken metal oksittir [10,11,13]. Özellikle, ZnO nanoparçacıkları, cihaz performansını iyileştirmek amacıyla UV dedektörleri, fotovoltailer, gaz sensörleri ve transistörler gibi konjuge polimer tabanlı cihazlara entegre edilmiştir [100]. ZnO, yüksek mobilitesi, geniş bant aralığı ve iyi termal kararlılığı yanı sıra kolay üretimi ve düşük maliyeti nedeniyle araştırmacıların dikkatini çekmiştir [15–17,101]. C. Shalu ve arkadaşları, ZnO/P3HT hibrit bir fotodetektör üretmişlerdir ve P3HT ince filmleri, doğası gereği kloroformdan (CF) daha az uçucu olan klorobenzen (CB) çözücüsü ile döküldüğünde, karanlık doğrultma oranı ve fotosensitivitede daha fazla iyileşme gözlemlenmiştir. Bu sayede karanlık doğrultma oranı yaklaşık 9 kat arttırıldı ve fotosensitivite de CB çözücüsünün kullanılmasıyla hemen hemen iki katına çıktı. Fotodetektörün fotosensitivitesinde gözlemlenen bu iyileşme, CB'nin dökme çözücüsü olarak kullanılmasıyla elde edilen P3HT ince filminin gelişmiş morfolojisine bağlanmıştır. Bu son etki, ZnO nanotüpleri ile P3HT arasındaki arayüz temas alanının artmasına bağlanmıştır [102]. Jiawen Zhou ve arkadaşları, farklı yarı iletken malzemelerin arayüzünde çalışma fonksiyonlarındaki farklılıklardan dolayı yerel elektrik alanlar oluşabildiğini göstermiştir. Yaptıkları çalışmada, p-P3HT ve n-ZnO arayüzünde yerleşik bir elektrik alan oluştu ve yerleşik alanın yönü, n-ZnO katmanından p-P3HT katmanına doğruydur. Termal denge koşulları altında taşıyıcı difüzyonu, yerleşik alanı artırabilir ve bu da elektron-hole çiftlerinin ayrılmasını desteklemeye ve eksitonların rekombinasyonunu engellemeye yardımcı olur [12].

Tipik olarak, organik yarı iletken teknolojilerinde kullanılan malzemeleri oluşturan düşük atom numaralı elementler, yüksek enerjili radyasyonla etkileşimlerini zayıflatır [103]. Ancak, son çalışmalar, aktif katman olarak poli(triarilamin) (PTAA) polimerinin kalın filmlerini ( $\sim 10 \mu\text{m}$ ) kullanarak  $0.3 \text{ nC.mGy.s}^{-1}$  X-ışını algılama duyarlılığına ulaşabileceğini göstermiştir. Yaklaşık 100V potansiyel uygulanarak başarılı X-ışını indüklemeli fotokurunu elde edilmiştir. Bu cihazlarda radyasyon hasarı gözlemlenmiş olsa da  $60 \text{ mGy.s}^{-1}$  doz hızına kadar mükemmel dedektör yanıtları elde edilmiştir [5]. Bu cihazları geliştirmeye yönelik bir başka çalışmada, yüksek mobilite değerlerine sahip tri-izopropilsililetinil (TIPS-pentasen) malzemesi poli(triarilamin) (PTAA) içine eklenmiş ve  $1.2 \text{ nC.mGy.s}^{-1}$  duyarlılık değeri elde edilmiştir [6]. Son çalışmalar, duyarlılıkta önemli ilerlemeler kaydetmiştir. Organik yarı iletken

aktif katman (P3HT) içine nanoparçacık formunda sintilasyon malzemesi (terbiyum katkılı gadolinyum oksit (GOS)) eklenerek  $6 \text{ nC.mGy}^{-1}$  yüksek duyarlılık değeri elde edilmiştir [7]. Bir başka çalışmada  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  nanoparçacıkları kullanılarak  $11.6 \text{ nC.mGy}^{-1}$  duyarlılık değeri elde edilmiştir [8,9]. 2007 yılında Boroumand ve arkadaşları, doğrudan X-ışını organik dedektör olarak konjuge polimerleri incelemeye başladı [104]. İlk çalışmalarda, büyük band aralığına sahip yarı iletken polimerlerin kalın filmlerine dayalı fotodiyot cihazları kullanıldı; örneğin poli[1-metoksi-4-(2-etilheksiloksi)-fenilenvinilen] (MEH-PPV), poli(9,9-dicyluorene) (PFO) ve PTAA. Bu ön çalışmalar, orta düzeyde performans elde etmelerine rağmen, sonraki yıllarda rapor edilen son derece hassas organik/hibrit doğrudan X-ışını dedektörlerine yol açtı [105]. Ayrıca, organik moleküllerin yoğunluğunun insan dokusuyla benzerliği, tıbbi X-ışını dozimetrisi açısından büyük ilgi çekmiştir. Organik yarı iletken (OSC) malzemelere yönelik ilgi, son yıllarda giderek artmaktadır. Bu malzemeler, plastik türevi organik bileşenlerin kimyasal ve mekanik avantajları ile yarı iletkenlerin elektronik özelliklerini bir araya getiren özgün bir malzeme sınıfını oluşturmaktadır. Organik yarı iletkenlerin kimyasal, fiziksel ve elektronik özelliklerinin kolaylıkla modifiye edilebilmesi ve çözelti bazlı yöntemlerle ince film üretimine imkân tanınması, bu malzemeleri çeşitli uygulamalar için cazip hale getirmektedir [106]. Ayrıca, çoğunlukla karbon, hidrojen ve oksijen elementlerinden oluşmaları, bu malzemelerin radyasyona karşı suya benzer şekilde tepki vermelerini sağlar; bu da onları radyasyon dozimetrisi açısından önemli bir seçenek haline getirir [58,106].

Bununla birlikte, organik yarı iletkenlerin geleneksel inorganik malzemelere kıyasla düşük maliyetli çözücü bazlı mürekkeplerle hazırlanabilmesi ve esnek yüzeylere doğrudan baskıya olanak tanıyan rulodan ruloya (R2R) üretim gibi yüksek verimli tekniklere uyumlu olmaları, geniş alan uygulamaları için önemli avantajlar sunar [107]. Ancak, bu teknolojilerin yaygın olarak benimsenebilmesi için iki temel alanda ilerleme gereklidir: ilki, daha çevreci, daha ucuz ve daha hızlı üretim yöntemlerinin geliştirilmesidir; ikincisi ise bu yöntemlerle uyumlu, çok katmanlı yapıların üretimine olanak tanıyan ve uzun ömürlü elektronik performans sergileyen yeni malzemelerin geliştirilmesidir.

Konjuge yarı iletken polimerler, çözelti tabanlı yöntemlerle geniş yüzeylere uygulanabilmeleri ve biyolojik dokularla yapısal benzerlikleri nedeniyle dedektör uygulamalarında ilgi görmektedir [108]. Ancak, düşük yük taşıma mobiliteleri ( $10^{-3}$ – $10^{-5} \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) ve sınırlı radyasyon dayanımları, bu malzemelerin pratik radyasyon dedektörü uygulamalarında kullanımını kısıtlamaktadır [109]. Bu sınırlamaların aşılabilmesi için, katkı

malzemeleri ile mobilite değerlerinin artırılması ve yeni nesil, radyasyona daha dayanıklı malzeme sentezlerinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Ticari olarak yaygın kullanılan fenil-C61-bütirik asit metil ester (PCBM) ve onun C71 türevi gibi fulleren türevleri ile birlikte kullanılan  $\pi$ -konjuge polimer donörlerinin oluşturduğu toplu heteroeklem (BHJ) yapılar, yüksek verimlilikleri ile öne çıkmaktadır. Özellikle P3HT ile PC71BM veya indene-C60 bisadduct (ICBA) gibi alıcıların kullanıldığı geleneksel tek hücreli BHJ cihazlarının yüksek performans sunduğu literatürde sıklıkla rapor edilmiştir [110,111]. Son dönemde, flor atomlarıyla ikame edilmiş düşük bant aralıklı sistemlerin, flor içermeyen benzerlerine kıyasla daha umut verici olduğu belirtilmektedir. F-ikame edilmiş benzotriazol, tieno[3,4-b]-tiyofen, benzo[1,2-b:4,5-b']ditiyofen, kuinoksalin, benzotriazol, izoindigo ve tiyofen motiflerinin, düşük bant aralıklı polimerlerin iskeletine entegre edildiği görülmektedir. Bu gelişmeler, F-ikame edilmiş yapısal birimlerin polimer donörlerdeki önemini vurgulamakta ve P3HT gibi yaygın polimerlerin ötesinde, yeni nesil yüksek performanslı malzemelere olan ilgiyi artırmaktadır [110].

Bu çalışmada, çeşitli miktarlarda ZnO NP içeren P3HT kompozit matrisi, bir X-ışını dedektör cihaz mimarisi için aktif katman olarak kullanılmıştır. ZnO NP, aktif katmanın zayıflatma katsayısını artırma ve n-tipi özellikleri nedeniyle aktif katmanda kütle hetero eklem yapısı oluşturma yeteneği nedeniyle seçilmiştir. Sonuç olarak, PCBM içermeyen cihazlar üretilmiş ve X-ışını dedektör performansları incelenmiştir. Ayrıca, iki farklı cihaz mimarisi geliştirilmiştir: interdijital elektrot (IDT) tabanlı dirençli (IDT/P3HT) ve diyot tabanlı (ITO/ZnO/P3HT/Grafit) cihaz konfigürasyonu. Cihaz yapısının X-ışını algılama parametreleri üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

### 3. YÖNTEM

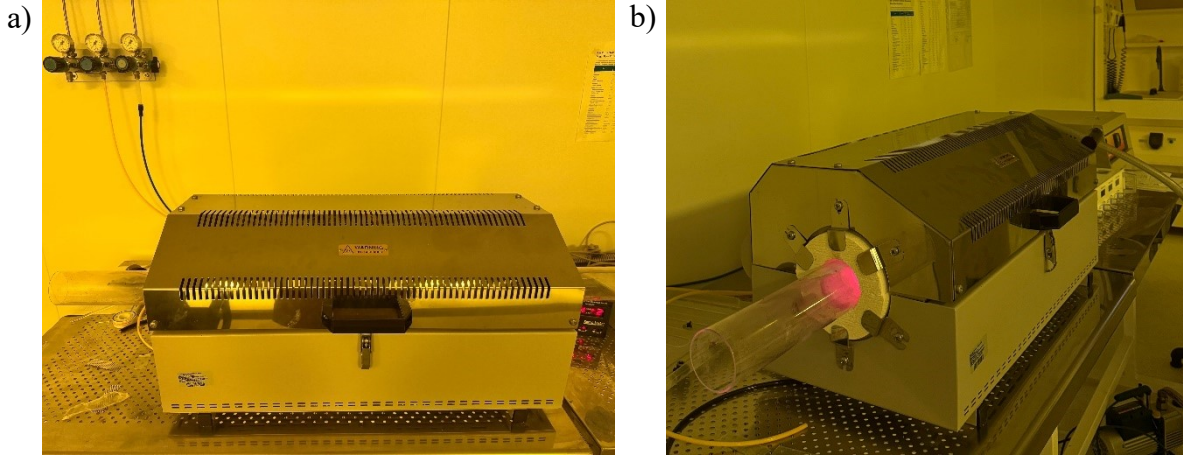
#### 3.1. MALZEMELER

Poli(3-heksiltiofen-2,5-diyl) (P3HT), Sigma-Aldrich firmasından temin edilmiş olup ek bir saflaştırma işlemine tabi tutulmadan kullanılmıştır. P3HT, organik yarı iletken özellikleri nedeniyle aktif katmanın temel bileşeni olarak tercih edilmiştir. Çinko asetat dihidrat (ZnAc) ve sodyum hidroksit (NaOH) de Sigma-Aldrich firmasından temin edilmiştir ve ZnO nanoparçacıklarının sentezinde kullanılmıştır. ZnAc, ZnO nanoparçacıklarının öncül maddesi olarak işlev görürken, NaOH çözeltileri ZnO çökeltilerinin oluşumunu sağlamak için kullanılmıştır.

Grafit çözeltisi olarak, Kontakt Chemie firmasına ait Graphit 33 iletken sprej kullanılmıştır. Bu iletken kaplama, cihazlarda alt ve üst elektrotların oluşturulmasında kullanılmış ve elektrotların düşük dirençli bir temas sağlamasına katkıda bulunmuştur. IDT elektrot kaplı altlıklar ise PCBWay firmasından temin edilmiştir. IDT elektrotlar, yanal yapıdaki dedektörlerde (Cihaz 2) aktif katman ile temas sağlayarak yük taşınım mekanizmasını desteklemek amacıyla kullanılmıştır. Tüm kimyasallar ve malzemeler, deneylerin tekrarlanabilirliğini sağlamak için yüksek saflıkta temin edilmiş ve üretim sürecinde herhangi bir ek saflaştırma veya değişiklik yapılmadan kullanılmıştır.

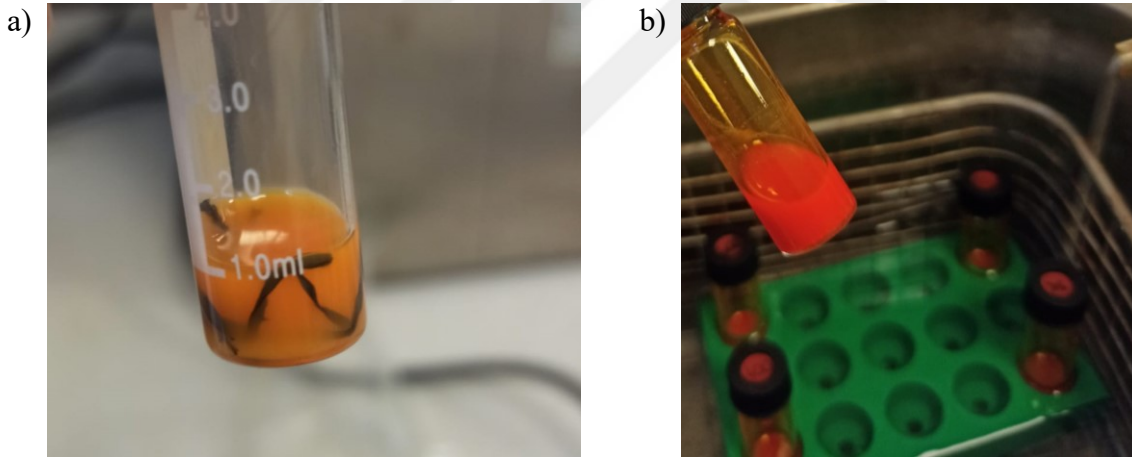
#### 3.2. SENTEZ VE KARAKTERİZASYON

Çinko oksit nanoparçacıkları (ZnO NP'ler), sol-jel yöntemi kullanılarak sentezlenmiştir. Bunun için, 10 ml saf su içerisinde 0.5 M ZnAc (çinko asetat dihidrat) ve ek olarak 10 ml ultra saf su içerisinde 1 M NaOH (sodyum hidroksit) çözülmüştür. Daha sonra, sodyum hidroksit çözeltisi, 45°C'de çinko asetat çözeltisine damla damla eklenerek karıştırılmıştır. Çözeltinin süt benzeri bir kıvama ulaşmasının ardından, 90°C'de 2 saat boyunca etüve yerleştirilmiştir. Elde edilen nanoparçacıklar, 6000 rpm'de 10 dakika süresince santrifüjlenerek çöktürülmüştür. ZnO NP'ler, etanol ve saf su ile yıkandıktan sonra 80°C'de bir gece boyunca kurutulmuş, ardından ince partiküller elde etmek amacıyla havanda öğütülmüştür.



**Şekil 3.2.1:** a) ZnO NP'lerin tavlama işleminin gerçekleştirildiği tüp fırını; b) İçerisinde ZnO NP örnekleri var iken yüksek sıcaklıktaki tüp fırının görüntüsü.

Kristal yapının cihaz parametreleri üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla, ZnO NP'ler sırasıyla Şekil 3.2.1'deki tüp fırında 200°C, 400°C ve 600°C'de 1 saat süreyle tavlannmıştır. Sentezlenen ZnO NP'lerin yapısal karakterizasyonu, X-ışını kırınımı (XRD) yöntemiyle gerçekleştirilmiştir.



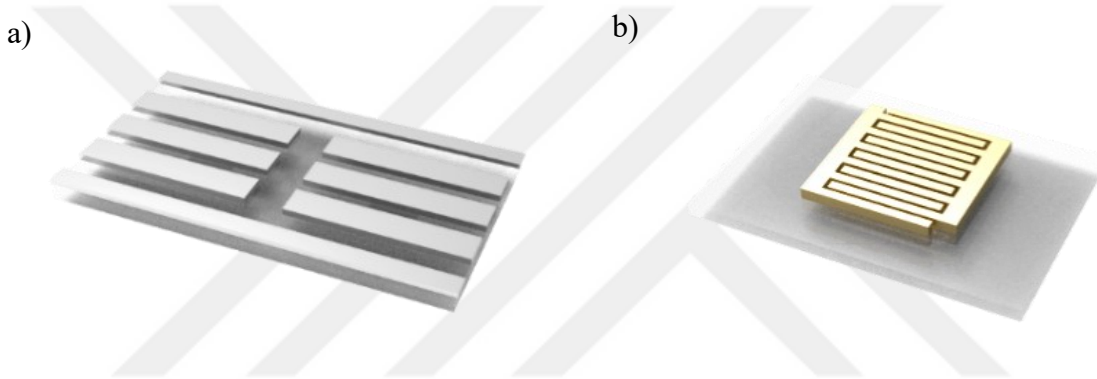
**Şekil 3.2.2:** a) Klorobenzen içerisine eklenen P3HT; b) Ultrasonik banyoda bekletilen P3HT:ZnO nanokompozit çözeltisi.

P3HT:ZnO nanokompozit çözeltisi, farklı ZnO kütle oranlarında hazırlanmıştır. İlk olarak, 20 mg P3HT, 1 ml klorobenzen içerisnde çözülmüştür (Bkz. Şekil 3.2.2a). Ardından, P3HT ve klorobenzenden oluşan çözeltiliye farklı miktarlarda ZnO NP'ler (5, 10 ve 15 mg) eklenerek kompozit matrisler oluşturulmuştur. P3HT ve ZnO NP çözeltileri, Şekil 3.2.2b'de görüldüğü üzere homojen bir P3HT:ZnO nanokompozit çözeltisi elde etmek amacıyla 50°C'de ultrasonik banyoda 2 saat bekletilmiştir. Sonuç olarak, P3HT:ZnO nanokompozit çözeltileri, ağırlık oranları (1:0.25), (1:0.5) ve (1:0.75) olacak şekilde hazırlanmıştır.

### 3.3. CİHAZ MİMARİSİ

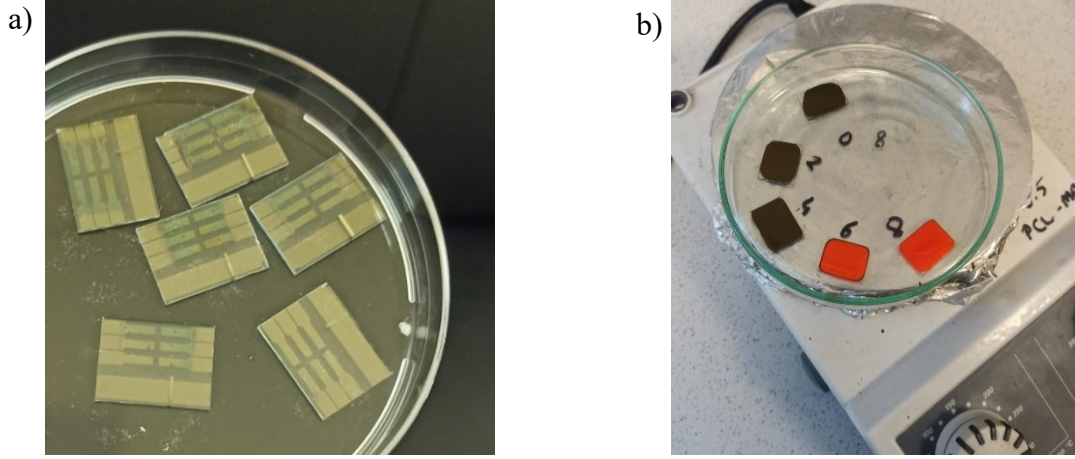
Bu çalışmada, iki farklı cihaz mimarisi kullanılmıştır: biri desenlenmiş ITO cam alt tabanı üzerine kurulu sandviç tipi yapısı (Cihaz 1) (Bkz. Şekil 3.3.1a), diğeri ise IDT elektrot kaplı esnek alt taban üzerine kurulu direnç tipi yapısıdır (Cihaz 2) (Bkz. Şekil 3.3.1b).

IDT elektrotları, EasyEDA yazılımı kullanılarak tasarlanmış ve ardından esnek baskılı devre kartı (PCB) olarak üretilmiştir. Elektrotlar, 127  $\mu\text{m}$  genişliğinde olup, bir sonraki parmak elektrottan 127  $\mu\text{m}$  uzaklıkta olacak şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca, iç içe geçmiş IDT elektrotlarının örtüşme uzunluğu 5 mm olarak belirlenmiştir [112]. Bunun yanı sıra, IDT elektrotları ince altın filmlerle kaplanmış olup, altın katman kalınlığı 50 nm olarak ölçülmüştür.



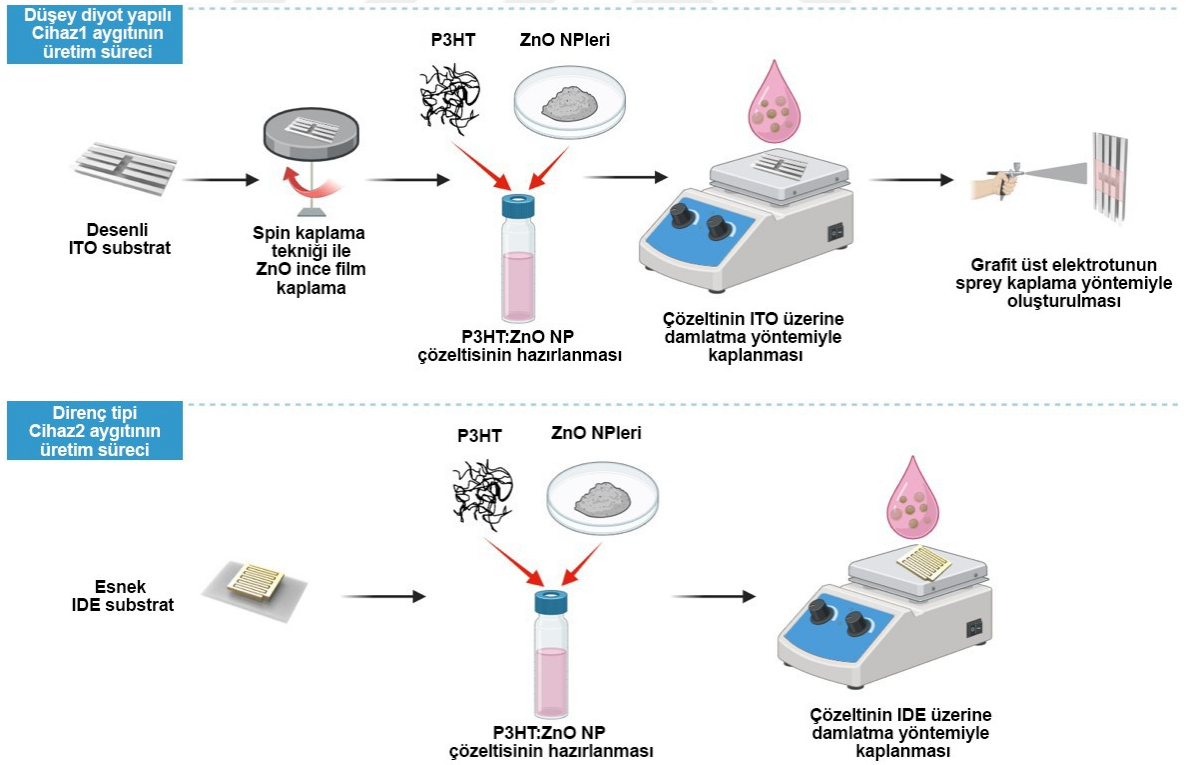
Şekil 3.3.1: a) Desenlenmiş indiyum kalay oksit (ITO) yapısı, b) IDT elektrotlara sahip taban yapı.

Cihaz 1, ITO/ZnO/P3HT:ZnO/Grafit yapısında üretilmiştir. Cihaz 1 mimarisi, Şekil 3.3.2a'da görülen alt kontak (ITO) ile çözünür grafit üst kontak arasında bir sandviç yapı oluşturacak şekilde tasarlanmıştır. Önceden desenlenmiş ve temizlenmiş ITO elektrot alt tabakaları üzerine, ZnO nanoparçacıklarının metanol içindeki dispersiyonundan (5 mg/ml) elde edilen çözelti kullanılarak spin kaplama yöntemiyle ZnO ince filmleri kaplanmıştır. Daha sonra, kaplanan ZnO tabakalarının kalıntı çözücülerin buharlaştırılması amacıyla 150°C'de 10 dakika süreyle tavlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu yapılandırmada ZnO tabakası, bir elektron taşıma katmanı olarak işlev görmektedir. P3HT:ZnO karışım çözeltisi, ZnO katmanı üzerine 40°C'de damlatma yöntemiyle kaplanmıştır (Bkz. Şekil 3.3.2b). Kesit alınmış SEM görüntülerinin analizi sonucunda P3HT:ZnO katmanlarının yaklaşık ~22  $\mu\text{m}$  kalınlığında olduğu gözlemlenmiştir. Aktif katmanların üzerine spreylendirme yöntemiyle grafit elektrot uygulanmış, böylece aktif katmanın üst kısmında ince bir film oluşturulmuştur. İstenilen iletkenliği sağlamak amacıyla 90°C'de tavlama işlemi gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 3.3.2:** a) Desenli ITO substratlar; b) 40°C’de aktif katmanın ITO yüzeyine damlatma yöntemiyle kaplanması.

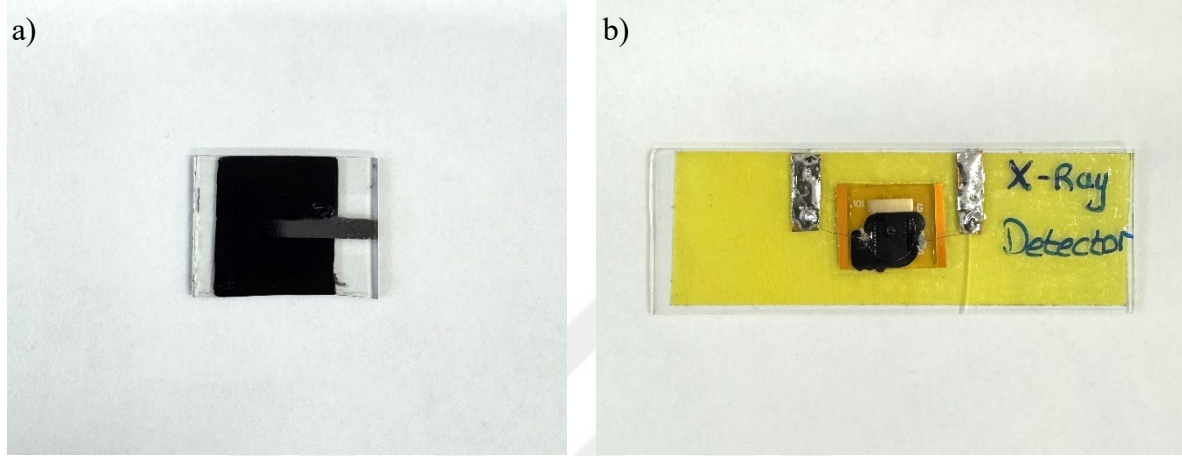
İki farklı cihaz yapılandırmasına ait üretim süreçleri Şekil 3.3.3’te gösterilmektedir. Cihaz 2, IDT/P3HT:ZnO yapısında üretilmiş olup, temizlenmiş IDT kaplı alt tabakalar üzerine P3HT:ZnO aktif polimer çözeltisinin 40°C’de damlatma yöntemiyle kaplanmasıyla oluşturulmuştur. Bu işlem, sandviç yapıdaki cihazlarla aynı yöntemi kullanmaktadır.



**Şekil 3.3.3:** İki farklı aygıt mimarisine (Cihaz 1 ve Cihaz 2) ait aygıt üretim süreçlerinin şematik gösterimi.

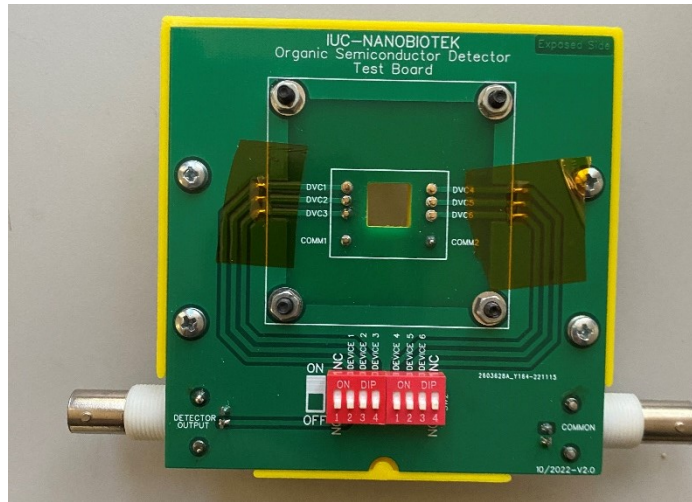
Son olarak, istenilen cihaz konfigürasyonları elde edilerek, Cihaz 1 ve Cihaz 2’ye ait nihai yapı Şekil 3.3.4’te gösterilmiştir. ZnO nanoparçacıklarının kristal özelliklerini incelemek

için Rigaku SmartLab 3kW X-ışını Kırınımı (XRD) sistemi kullanılmıştır. Aktif katmanların yüzey ve kesit özellikleri, Hitachi SU3500 T2 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile incelenmiş ve aktif katman kalınlığı ölçülmüştür. P3HT:ZnO aktif katmanının element analizi, Thermo Scientific Nicolet 6700 Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



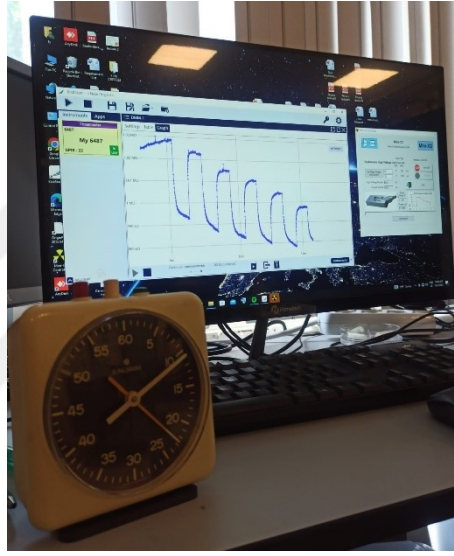
Şekil 3.3.4: a) ITO/ZnO/P3HT:ZnO/Grafit (Cihaz 1); b) IDT/P3HT:ZnO (Cihaz 2).

Üretilen cihazların elektriksel ölçüm işlemleri için pogo pinler ve BNC kablo bağlantılarının olduğu devre kartı tasarımı EASYEDA yazılımı ile online ortamda tasarlanıp daha sonra Çin Halk Cumhuriyeti'nde yerleşik olan JLCPCB firmasında üretilmiştir. Devre kartı temin edildikten sonra ilgili komponentler lehimleme yolu ile sabitlenmiştir. Bu ölçüm hücresinde Şekil 3.3.5'te görüldüğü üzere her bir kontakın ayrı ayrı ölçülmesi için switch kullanılmıştır.



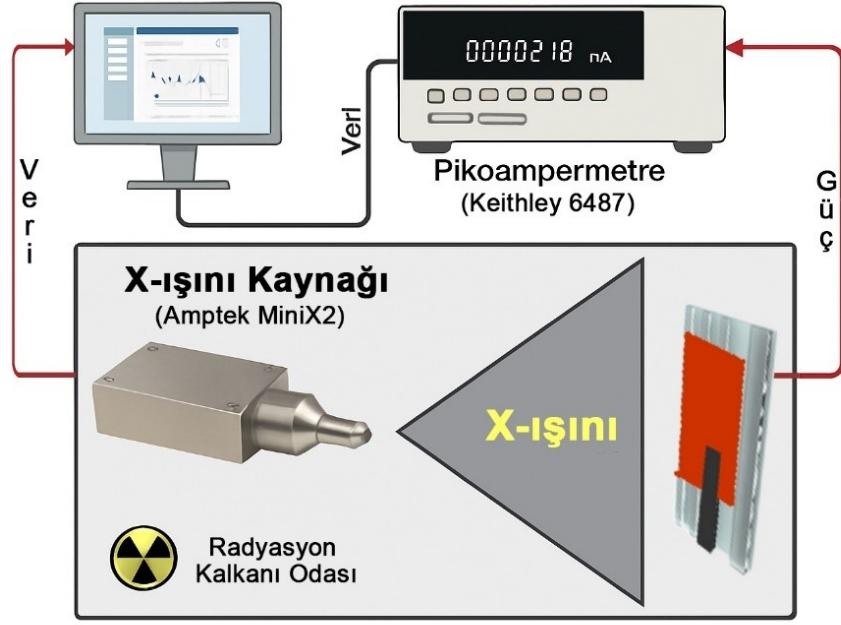
Şekil 3.3.5: Geliştirilen cihazların yerleştirildiği ölçüm hücresi.

Akım-zaman ( $I-t$ ) ölçümleri, oda sıcaklığı ve çevresel koşullar altında Keithley 6487 Pikoampermetre/Voltaj Kaynağı ile yapılmıştır. Üretilen cihazların akım-gerilim ( $I-V$ ) karakteristikleri ise Keithley 4200 yarı iletken karakterizasyon sistemi kullanılarak ölçülmüştür. Dedektörlerin X-ışınına verdiği yanıtın ölçülmesi, cihazlara 10 V'luk bir gerilim uygulanarak ve X-ışını radyasyonu ile karanlık koşullar altında bir ölçüm sistemi oluşturularak gerçekleştirilmiştir. Farklı ZnO NP oranlarıyla üretilen Cihaz 1 ve Cihaz 2 örnekleri, 1.06 ile 8.6 mGy/s arasında değişen X-ışını doz oranlarına 60 sn boyunca maruz bırakılmıştır. Şekil 3.3.6'da ölçüm sırasında süre takibi yapılarak X-ışını kaynağına ait programda cihaz kontrollerinin gerçekleştirildiği ve veri kaydının yapıldığı bilgisayar ortamı gösterilmektedir.



**Şekil 3.3.6:** Süre takibi, X-ışını kaynağının kontrolü ve veri kaydının yapıldığı bilgisayar ortamı.

X-ışını kaynağı olarak Amptek MiniX2 cihazı kullanılmıştır ve bu kaynak, radyasyon kalkanı odası içerisinde yer alan örneğe yönlendirilmiştir. Düzenliğin güvenli çalışmasını sağlamak amacıyla X-ışını kaynağı ve örnek, metal bir kalkan kutusu içinde muhafaza edilmiştir. Şekil 3.3.7'de, üretilen X-ışını dedektörlerinin elektriksel karakterizasyonunda kullanılan ölçüm düzeneğinin şematik gösterimi sunulmuştur. Sistemde, veri kaydı ve cihaz kontrolü bir bilgisayar aracılığıyla sağlanmakta olup, Keithley 6487 model pikoampermetre ile örnek üzerinden geçen akım değerleri ölçülmektedir. Ölçüm sırasında, güç ve veri iletimi için kullanılan bağlantılar, şemada renkli oklarla gösterilmiştir. Numune, alt ve üst elektrotlarla temas halinde olacak şekilde yerleştirilmiş olup, ışınlama altında oluşan akım değişimleri pikoampermetre ile anlık olarak kaydedilmiştir.



Şekil 3.3.7: X-ışını ölçüm düzeneğinin ve elektriksel karakterizasyon sisteminin şematik gösterimi.

## 4. BULGULAR

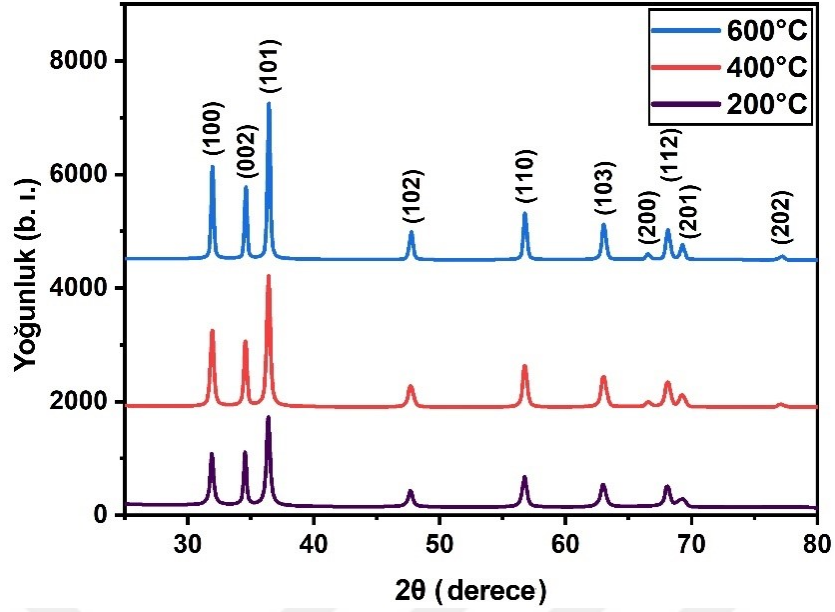
Sol-jel yöntemi ile üretilen ZnO nanoparçacıklarının XRD ölçümleri Şekil 4'te sunulmuştur. XRD grafiğindeki yoğun ve keskin zirveler, ZnO nanoparçacıklarının yüksek kristallliğini doğrulamaktadır. XRD verilerinden elde edilen sonuçlar, Toz Kırınım Standartları Ortak Komitesi (JCPDS) kart no 36-1451 ile karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçların uyumlu olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, farklı sıcaklıklarda tavllanmış ZnO nanoparçacıklarının kafes parametreleri XRD verilerinden hesaplanmış olup,  $a = b = 3.235 \text{ \AA}$ ,  $c = 5.188 \text{ \AA}$  olarak bulunmuştur (Bkz. Tablo 4.1). Bu değerlerin varlığı, sentez aşamasında veya sonrasında herhangi bir kontaminasyonun meydana gelmediğini göstermektedir. Karşılaştırmaya tabi tutulan tüm örneklerde, en yoğun tepe noktalarının (1 0 1) düzleminden kaynaklandığı gözlemlenmiştir (Bkz. Şekil 4.1) [15].

Şekil 4.1'den de görüldüğü üzere, tavlama sıcaklığının artırılmasıyla birlikte kırınım zirveleri daralmakta ve daha yoğun hale gelmektedir. ZnO nanoparçacıklarının kristalit boyutları, XRD desenlerinde (1 0 1) ve (0 0 2) tepe noktalarının konumları kullanılarak Scherrer formülü ile hesaplanmıştır. Scherrer denklemi, X-ışını kırınım verilerine dayanarak kristalit boyutunu tahmin etmek için kullanılan yaygın bir yöntem olup, polikristal malzemelerdeki koherent saçılma alanlarının ortalama boyutuna ilişkin bilgiler sunmaktadır [113]:

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (4.1)$$

Burada D kristalit boyutunu, X-ışını dalga boyunu ( $\lambda$ ),  $\beta$  kırınım tepe noktasının tam genişlik-yarım maksimum (FWHM) değerini ve  $\theta$  Bragg kırınım açısını temsil etmektedir. K şekil faktörüdür ve parçacıkların küresel olduğu varsayımıyla 0.9 olarak alınmıştır [114].

Farklı sıcaklıklarda tavllanmış ZnO nanoparçacıklarının hesaplanan kristalit boyutları, d-mesafesi ve kafes parametreleri Tablo 4.1'de sunulmuştur. Tavlama sıcaklığı  $200^\circ\text{C}$  olan parçacıkların kristalit boyutu 20 nm olarak hesaplanmış olup, sıcaklığın  $400^\circ\text{C}$ 'ye yükseltilmesiyle 22 nm'ye,  $600^\circ\text{C}$ 'ye çıkarılmasıyla ise 30 nm'ye ulaşmıştır. Böylece, ZnO nanoparçacıklarının morfolojik yapısının ve boyutunun tavlama sıcaklığı değiştirilerek kontrol edilebileceği gösterilmiştir [115].

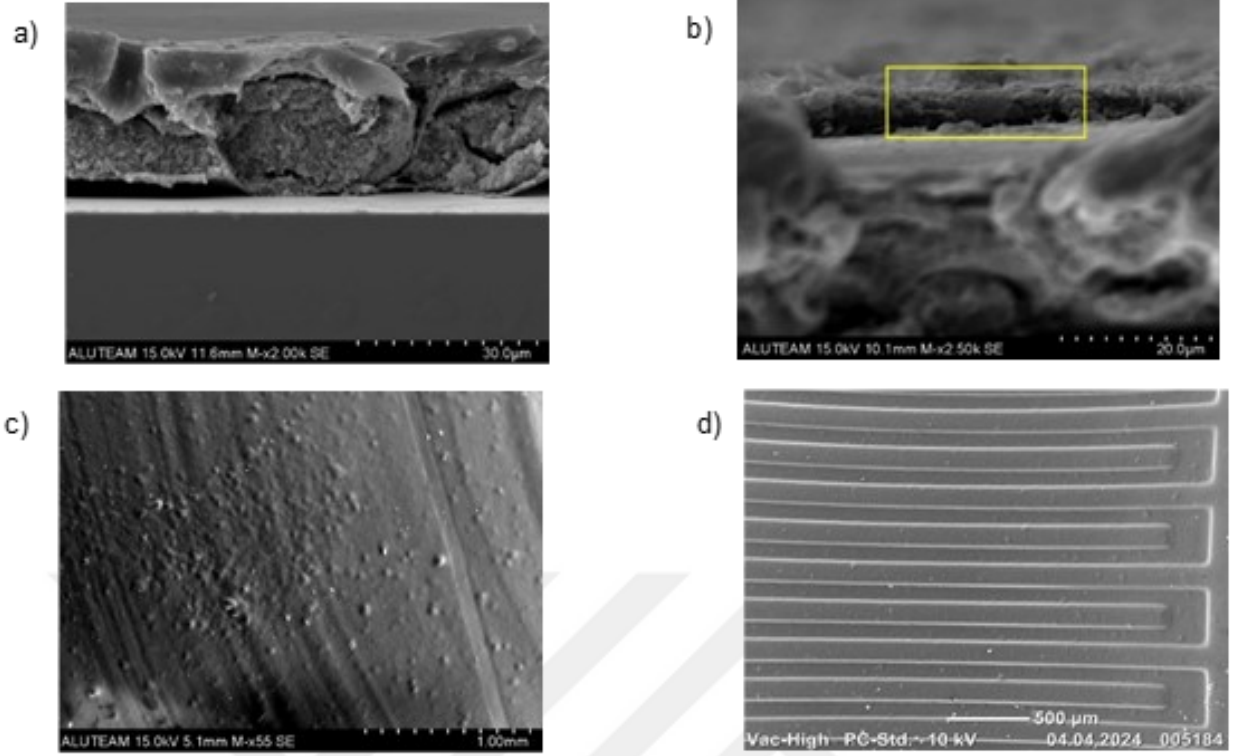


**Şekil 4.1:** Farklı sıcaklıklarda (200°C, 400°C ve 600°C) tavlınmış ZnO NP'lerinin XRD grafiklerinin gösterimi.

**Tablo 4.1:** Farklı tavlama sıcaklıkları için ZnO NP'lerinin hesaplanan kristalit parametreleri.

Sıcaklık (°C)	h k l	D (nm)	d (Å)	Örgü Sabiti (Å)
				a = b, c
200	1 0 1	20	2.8	a = 3.235
	0 0 2	26	2.594	c = 5.188
400	1 0 1	22	2.8	a = 3.233
	0 0 2	26	2.592	c = 5.184
600	1 0 1	30	2.798	a = 3.231
	0 0 2	31	2.589	c = 5.179

Üretilen cihazların yüzey ve kesit SEM görüntüleri, aktif katmanların ve grafit elektrotun kalınlığını analiz etmek ve ZnO NP'lerinin P3HT hacim yapısındaki dağılımını gözlemlemek amacıyla kullanılmıştır. SEM görüntülerinden yapılan ölçümlere göre, Cihaz 1 ve Cihaz 2 için P3HT:ZnO aktif katman kalınlığı ~22 µm, grafit elektrot kalınlığı ise ~5.4 µm olarak belirlenmiştir (Şekil 4.2a-b). Şekil 4.2c-d'de sunulan yüzey görüntülerinde, nanokompozit filmin çözeltiyle kaplanmış yüzeyi gözlemlenmiştir.



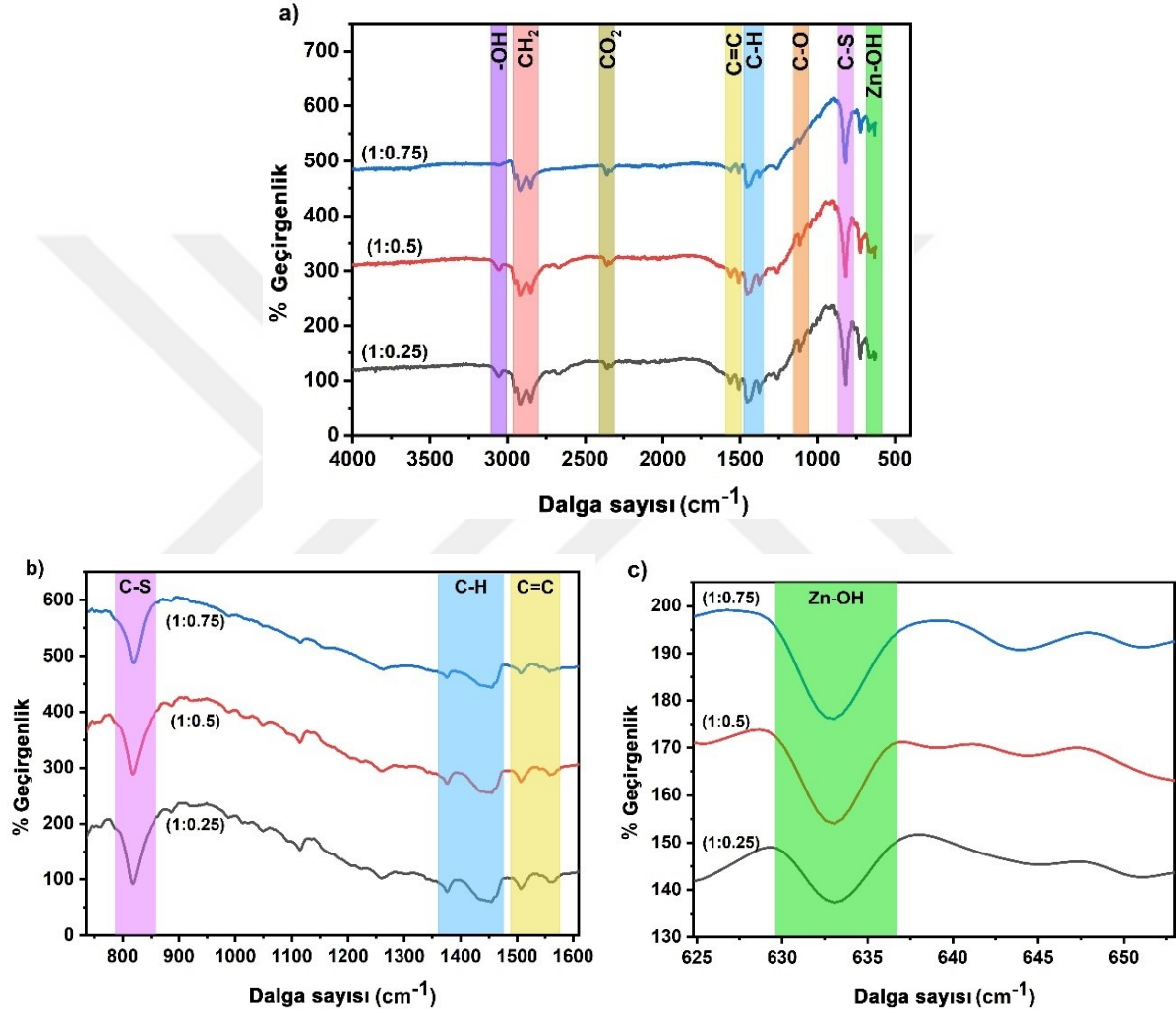
**Şekil 4.2:** SEM görüntülerinin kesitsel görünümü: a) Cihaz1/P3HT:ZnO(1:0.5); b) Cihaz1/P3HT:ZnO(1:0.5) üzerine grafit elektrot; c) Cihaz1/P3HT:ZnO(1:0.25)/Grafit'in SEM yüzey görüntüsü; d) Cihaz2/P3HT:ZnO(1:0.25) SEM görüntüsü.

Fourier dönüşümlü kızılötesi spektrum (FTIR) analizi, kompozit matris yapısında ZnO NP'lerin varlığını belirlemek ve organik tabanlı aktif katmanda inorganik malzemelerin etkilerini araştırmak amacıyla gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.3a). Elde edilen sonuçlar, saf ZnO NP'ler ve saf P3HT'nin FTIR spektrumlarıyla karşılaştırılarak doğrulanmıştır [116,117].

Yaklaşık  $819\text{ cm}^{-1}$  civarında karbon-kükürt (C-S) tek bağ deformasyon titreşimleri tespit edilmiştir. Alifatik  $\text{CH}_2$  bağlarının güçlü gerilme titreşimleri  $2916$  ve  $2852\text{ cm}^{-1}$  civarında gözlemlenmiştir. C-H bağının bükülme titreşimleri ise  $1455$  ve  $1375\text{ cm}^{-1}$  civarında tespit edilmiş olup, bu değerler aktif katmandaki tiyofen halkasına işaret etmektedir. Bu moleküllerin varlığı, P3HT'nin kimyasal yapısıyla uyumlu olup, P3HT:ZnO NP karışımı içinde konjuge polimer bütünlüğünün korunduğunu doğrulamaktadır.

ZnO NP içeriği arttıkça, P3HT'ye ait piklerin şiddetinde bir azalma gözlenmiştir, bu da matris içinde P3HT varlığının azaldığını göstermektedir. Bu gözlem Şekil 4.3b'de detaylandırılmış olup, büyütülmüş C-S, C=C ve C-H pikleri incelendiğinde P3HT'nin temel yapısının belirgin olduğu ve ZnO NP içeriği arttıkça P3HT piklerinin şiddetinde düşüş olduğu açıkça görülmektedir. ZnO NP'lerin karakteristik geniş absorpsiyon pikleri,  $3055\text{ cm}^{-1}$  civarında tespit edilmiş olup, bu pik O-H gerilme titreşimlerine bağlı intramoleküler hidrojen

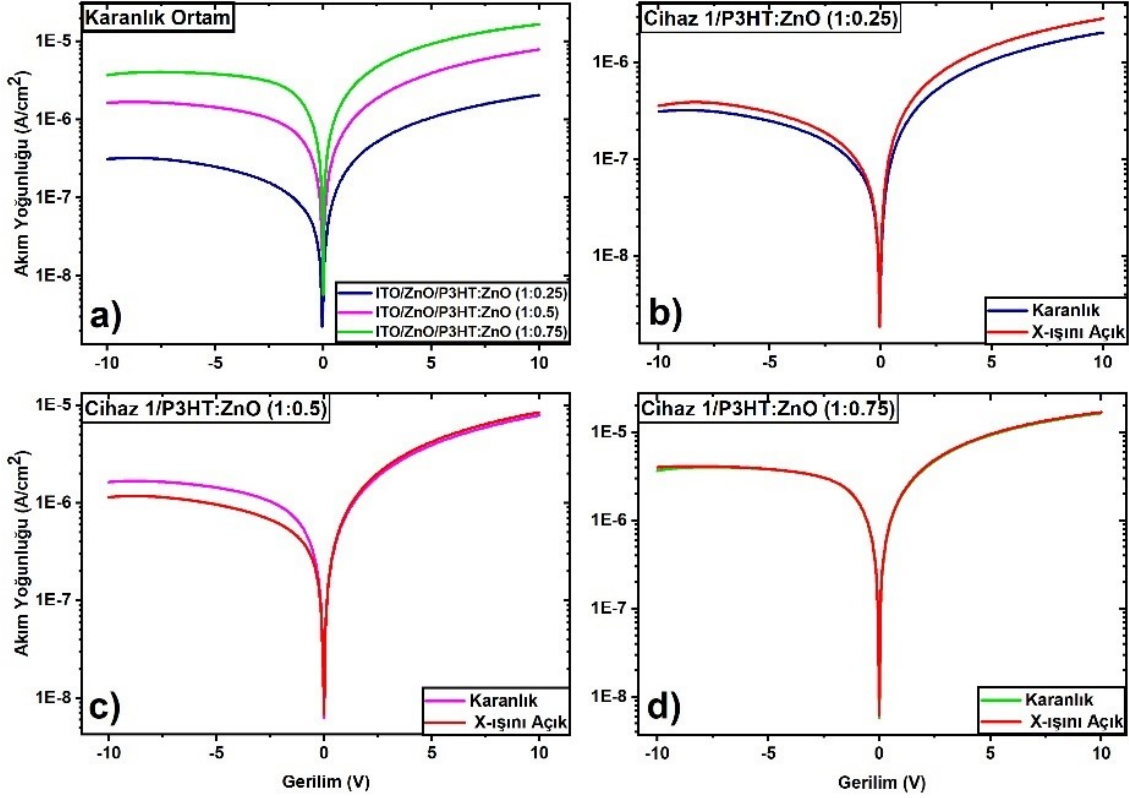
bağlarını temsil etmektedir. P3HT içerisindeki ZnO NP içeriği arttıkça, O-H bağlarına ait piklerin şiddetinde azalma gözlenmiştir. Yaklaşık  $633\text{ cm}^{-1}$  civarında gözlemlenen Zn-OH pikinde, ZnO NP içeriğinin artmasıyla birlikte pik yoğunluğunun arttığı belirlenmiştir (Şekil 4.3c). Ayrıca  $1507\text{ cm}^{-1}$  civarındaki pikler, her aktif katmanda alken grubunun C=C çift bağlarının gerilme titreşimlerine işaret etmektedir. Analiz sırasında cihazın atmosferik  $\text{CO}_2$  içermesi,  $2360\text{ cm}^{-1}$  civarında  $\text{CO}_2$  pikinin gözlemlenmesini açıklayabilir.



**Şekil 4.3:** a) P3HT:ZnO kompozitinin FTIR spektrumu, b) C-S, C=C ve C-H piklerinin büyütülmüş görünümü, c) FTIR spektrumundaki Zn-OH pikleri.

Cihaz 1 ve Cihaz 2'nin akım yoğunluğu-gerilim (J-V) karakteristikleri, -10 V ile +10 V arasında gerçekleştirilen I-V ölçümleri ile hem karanlık koşullarda hem de X-ışını açık ( $8.6\text{ mGy/s}$ ) durumunda elde edilmiştir (Şekil 4.4 ve Şekil 4.5). Şekil 4.4a ve Şekil 4.5a incelendiğinde, her iki cihaz için de aktif katmandaki ZnO NP miktarının artışıyla birlikte karanlık koşullarda akım yoğunluğu seviyelerinin arttığı açıkça gözlemlenmektedir.

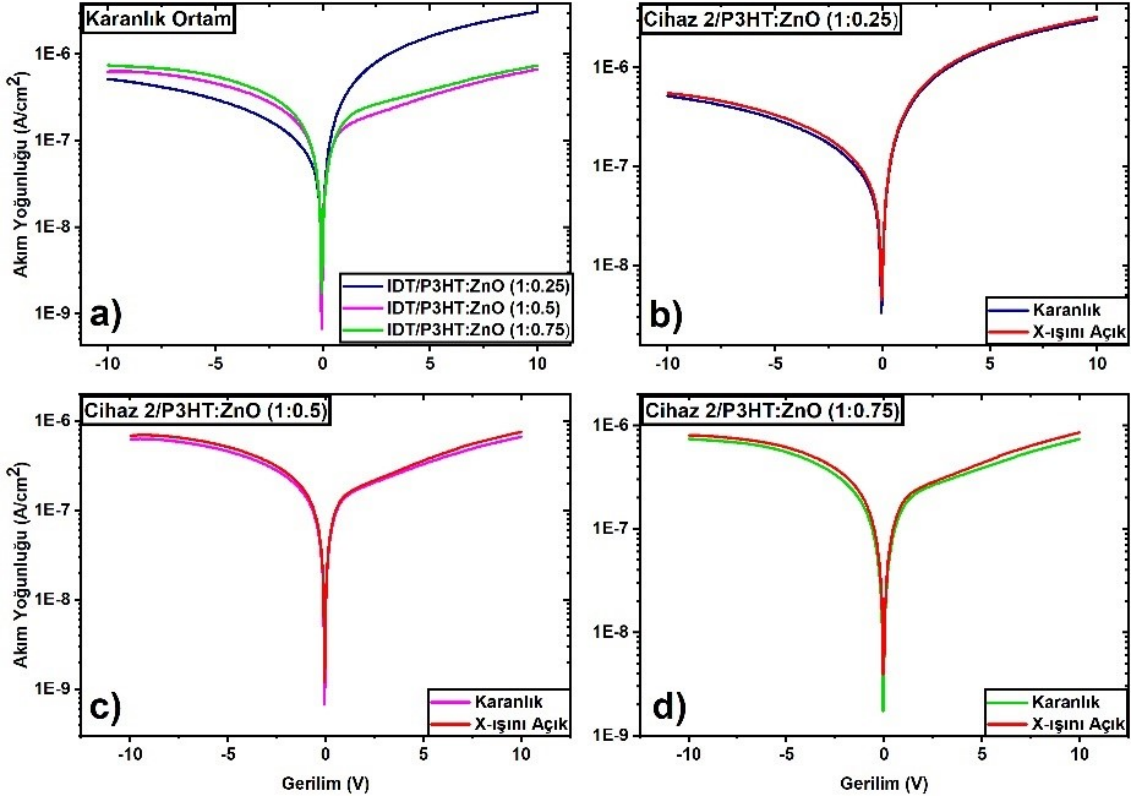
Bu durum, aktif katmandaki n-tipi yarı iletken özellik gösteren ZnO nanoparçacıklarının varlığına bağlı olarak gelişen iyileşmiş elektron taşınımına atfedilmektedir. Ayrıca, ZnO nanoparçacıklarının dahil edilmesiyle P3HT zincirlerinin daha düzenli bir şekilde paketlenmesi,  $\pi$  orbitalleri arasındaki örtüşmeyi artırarak yük taşınım sürecini iyileştirmektedir [118].



**Şekil 4.4:** a) Karanlık ortamda, farklı ZnO NP oranlarına göre Cihaz 1'in akım-gerilim eğrileri; X-ışını maruziyetinin Cihaz 1'in akım yoğunluğu-gerilim karakteristiklerine etkisi: b) P3HT:ZnO(1:0.25), c) P3HT:ZnO(1:0.5), d) P3HT:ZnO(1:0.75) aktif katmanları için.

ZnO ve P3HT arasındaki enerji bant hizalanması, ara yüzeydeki yük transfer verimliliğini doğrudan etkilemektedir. Optimum ZnO konsantrasyonu, ZnO'ya etkin elektron transferini kolaylaştırarak uygun bir bant hizalanmasını sağlamaktadır ve bu durum, X-ışını dedektörünün genel performansını artırmaktadır [119]. Ayrıca, temas malzemeleri arasındaki iş fonksiyonu farkının, elektron hareketliliğini etkileyen önemli bir faktör olduğu göz önüne alındığında, Cihaz 1 için gözlemlenen diyot benzeri davranış beklentilerle tutarlıdır [120]. Bu elektron hareketliliği, elektrik akımında doğrusal olmayan bir artışa neden olarak ohmik olmayan (non-ohmic) bir davranış sergilemesine yol açmaktadır. Dolayısıyla, Cihaz 1'de gözlemlenen non-ohmic I-V karakteristiği, ZnO ince filmi ile grafit elektrot arasındaki iş fonksiyonu farkına atfedilmektedir (Şekil 4.4a,b,c ve d).

Öte yandan, Cihaz 2 yapısı için doğrusal I-V karakteristiği (ohmik davranış) gözlemlenmiştir (Şekil 4.5a,b,c ve d). Bu durum, Cihaz 2'nin yapısal özelliklerinin temas dirençlerini azaltarak yük taşıyıcılarının doğrusal şekilde taşınmasına olanak sağladığını göstermektedir.



**Şekil 4.5:** a) Karanlık ortamda farklı ZnO NP oranlarına göre Cihaz 2'nin akım-gerilim eğrileri; X-ışını maruziyetinin Cihaz 2'nin akım yoğunluğu-gerilim karakteristiklerine etkisi: b) P3HT:ZnO(1:0.25), c) P3HT:ZnO(1:0.5) ve d) P3HT:ZnO(1:0.75) aktif katmanları için.

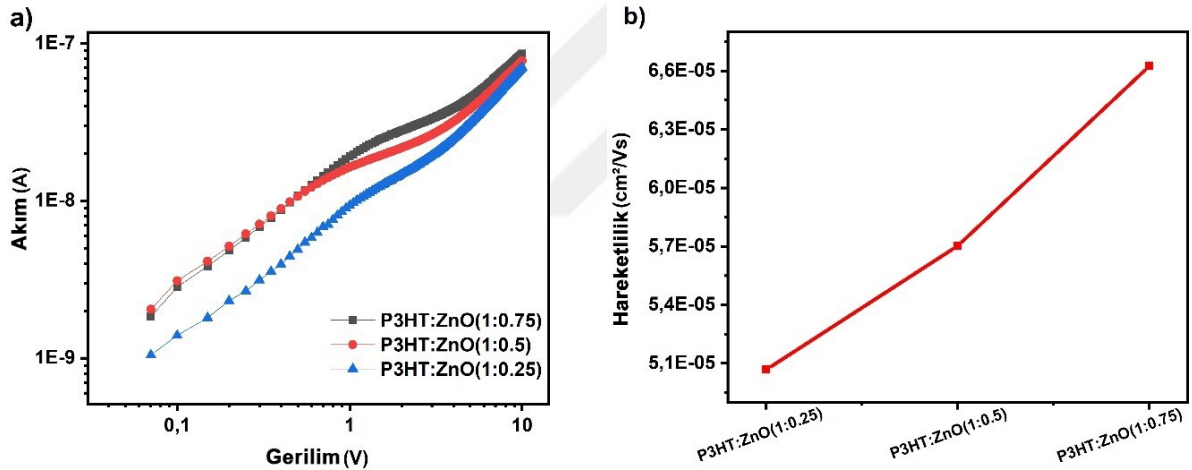
P3HT:ZnO kompozit çözeltilerinde delik taşınım mekanizmasını incelemek amacıyla, alan yükü sınırlı akım (SCLC - Space Charge Limited Current) yöntemi kullanılmış ve cihazlardaki delik hareketliliği doğrudan ölçülmüştür [121].

Bu ölçüm için yalnızca delik taşıyan bir cihaz yapısı kullanılmış ve delikler Au elektrotu üzerinden enjekte edilmiştir. Au elektrotunun iş fonksiyonu, verimli delik enjeksiyonunu kolaylaştıran uygun bir temas sağlayarak yük taşıma sürecini desteklemiştir.

$$J = \frac{9}{8} \epsilon \epsilon_0 \mu_h \frac{V^2}{L^3} \quad (4.2)$$

$$V_{TFL} = \frac{eN_t d^2}{2\epsilon\epsilon_0} \quad (4.3)$$

Şekil 4.6a'da, ölçülen I-V karakteristikleri, SCLC modeli ile uyumlu hale getirilmesini sağlamak amacıyla log-log ölçeğine dönüştürülmüştür. Yaklaşık eğimi 2 olan SCLC bölgesi belirlenmiş ve bu bölgedeki veriler üzerinden taşıyıcı hareketliliği ve tuzak yoğunluğu değerleri hesaplanmıştır. Şekil 4.6b, SCLC protokolü kullanılarak hesaplanan P3HT:ZnO nanokompozit yapılarındaki delik hareketliliği ( $\mu$ ) değerlerini göstermektedir [122]. ZnO katkılama konsantrasyonuna bağlı olarak, delik hareketliliği değerlerinin  $5.1 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  ile  $6.6 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  arasında değiştiği belirlenmiştir. SCLC analizleri, ZnO nanoparçacık katkı oranlarına bağlı olarak aktif tabakanın taşıyıcı taşıma dinamiklerindeki değişimlerin kantitatif olarak değerlendirilmesine olanak sağlamıştır. Bu sayede ZnO katkısının taşıyıcı hareketliliği artırıcı ve tuzak yoğunluğunu azaltıcı etkileri sistematik olarak incelenmiştir.



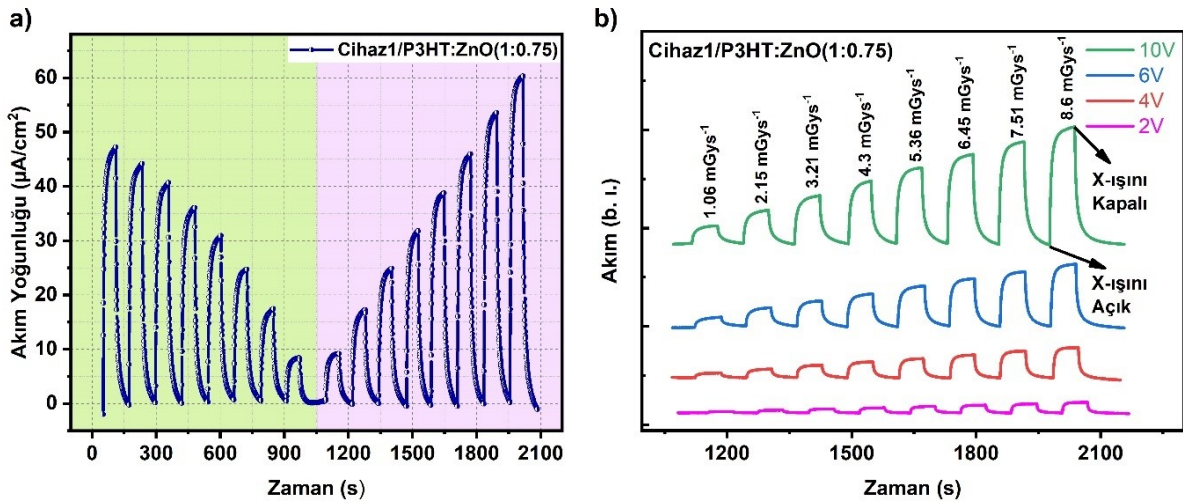
**Şekil 4.6:** a) Akım-gerilim (I-V) karakteristiklerinin log-log grafiği, b) P3HT:ZnO oranına bağlı olarak delik hareketliliğindeki değişim.

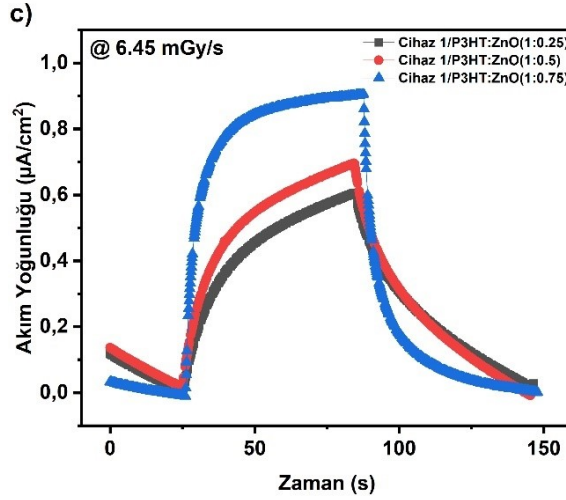
ZnO'nun P3HT bazlı sistemlere dahil edilmesi, deneysel sonuçların da ortaya koyduğu üzere, delik hareketliliği ve tuzak yoğunluğu üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. 1:0.25, 1:0.5 ve 1:0.75 ZnO içerikleri için hesaplanan tuzak yoğunluğu ( $N_t$ ) değerleri sırasıyla  $2.82 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ ,  $2.97 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$  ve  $3.05 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$  olarak bulunmuş olup, ZnO içeriğinin artmasıyla birlikte hafif bir artış gösterdiği gözlemlenmiştir.  $N_t$  değerindeki bu artış daha fazla tuzak durumunun varlığını işaret etse de, delik hareketliliğini olumsuz etkilememektedir. Aksine, P3HT içindeki 1:0.75 ZnO katkılama oranında maksimum delik hareketliliğine ulaşılmıştır. Bu durum, ZnO nanoparçacıklarının P3HT matrisinin morfolojik yapısını iyileştirme yeteneğiyle açıklanmaktadır. ZnO'nun varlığı, daha düzgün yük taşıma yolları oluşturarak enerji

düzensizliği azaltmaktadır. Erouel ve ark. (2023), ZnO nanoparçacıklarının geniş bant aralığı nedeniyle enerji seviyelerini ve mikro yapıyı optimize etmedeki rolünü vurgulayarak, verimli yük taşınımını sağladığını belirtmiştir [123]. Deneysel bulgulara göre, 1:0.75 ZnO nanoparçacık konsantrasyonu, morfolojik iyileştirmelerin, tuzak pasivasyonunun ve yük taşıma yollarının maksimuma ulaştığı bir denge noktasını temsil etmektedir. Böylece, ZnO yalnızca yenilenme (recombination) kayıplarını azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda hibrit filmin enerji yapısını da modifiye ederek yüksek tuzak yoğunluklarına rağmen etkin yük taşınımını sağlamaktadır. Bu özellik kombinasyonu, yüksek performanslı hibrit malzemelerin oluşturulmasında ZnO nanoparçacıklarının önemini açıkça ortaya koymaktadır. ZnO nanoparçacıklarının tuzak pasivasyonu ve morfolojik iyileştirme olmak üzere çift fonksiyonelliği, dedektörlerin X-ışını algılama performansını artırmaktadır.

Farklı ZnO NP oranlarıyla üretilen Cihaz 1 ve Cihaz 2 örnekleri, 1.06 ile 8.6 mGy/s arasında değişen X-ışını doz oranlarına maruz bırakılmıştır. Cihaz 1 ve Cihaz 2'nin X-ışınına bağlı fotoyanıtları sırasıyla Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de sunulmuştur. Bu çalışmada, X-ışını açık ve kapalı zamanları, cihazların yanıt karakteristiğine bağlı olarak her iki durumda da 60 saniye olarak belirlenmiştir. Şekil 4.7a ve Şekil 4.8a'da gösterildiği gibi, cihazların akım yoğunluğu, X-ışınına maruz kalma ile artmakta ve X-ışını kapatıldığında azalmaktadır. Ayrıca, cihazların akım yoğunluğu-zaman karakteristiğinin testere dişi (saw-tooth) benzeri bir şekil sergilediği gözlemlenmiştir.

Bununla birlikte, zamanla değişen akım yoğunluğunun, uygulanan X-ışını doz oranının artışıyla birlikte yükseldiği belirlenmiştir.



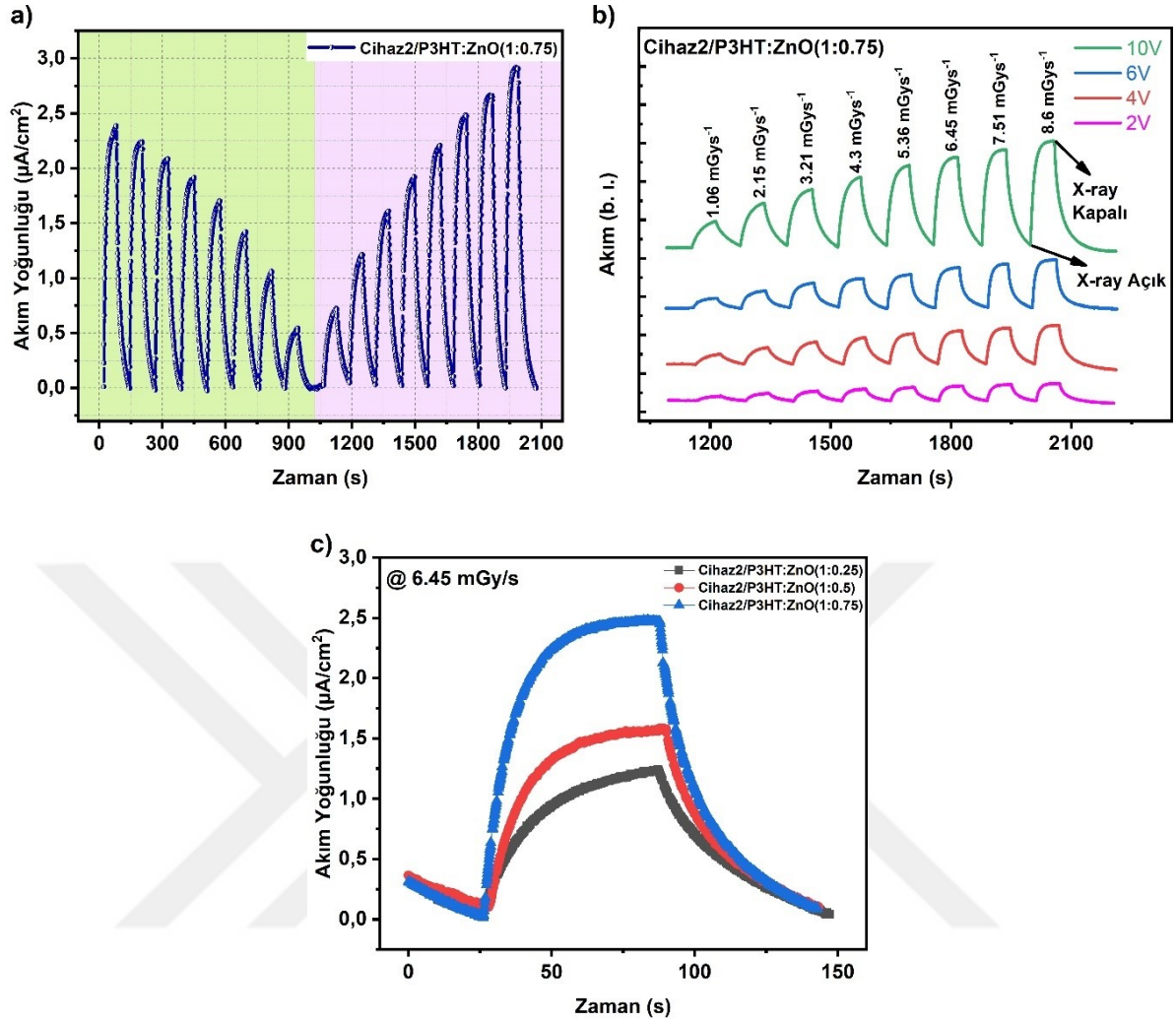


**Şekil 4.7:** Cihaz1/P3HT:ZnO(1:0.75) yapısının fotoakım yoğunluğu: a) farklı doz oranlarında, b) farklı çalışma gerilimlerinde, c) aktif katmanda bulunan farklı ZnO NP miktarlarında elde edilen değerler.

Şekil 4.7b ve Şekil 4.8b, üretilen cihazların X-ışını açık ve kapalı koşulları altında çalışma geriliminin yanıt akımı üzerindeki etkisini göstermektedir. Şekil 4.7b ve Şekil 4.8b'den açıkça görülebileceği üzere, 1.06 mGy/s ile 8.6 mGy/s arasındaki farklı doz oranları için operasyonel gerilimin artmasıyla yanıt akım değerleri de artmaktadır.

Dedektörlerin, 2V gibi düşük bir çalışma geriliminde bile kararlı bir testere dişi (saw-tooth) şeklindeki yanıt akımı karakteristiği sergilediği gözlemlenmiştir. Dedektöre uygulanan X-ışını dozu, P3HT yarı iletkeni içinde eksitonların oluşumuna neden olarak, bağlı elektron-delik çiftlerinin ayrışmasını kolaylaştırmaktadır.

Şekil 4.7c ve Şekil 4.8c, 6.45 mGy/s doz oranında aktif katmandaki ZnO NP oranının artmasıyla yanıt akımlarının yükseldiğini göstermektedir. Bu artış, daha yüksek ZnO içeriğinin neden olduğu artan X-ışını soğurulmasına atfedilmektedir. ZnO konsantrasyonunun artması, daha fazla X-ışını absorpsiyonuna yol açarak, daha yüksek yanıt akımları elde edilmesini sağlamak ve böylece dedektörün X-ışınına karşı duyarlılığını artırmaktadır.



**Şekil 4.8:** Cihaz2/P3HT:ZnO(1:0.75) yapısının fotoakım yoğunluğu: a) farklı doz oranlarında, b) farklı çalışma gerilimlerinde, c) aktif katmanda bulunan farklı ZnO NP miktarlarında elde edilen değerler.

Şekil 4.9a, Cihaz 1'in yanıtlarını, Şekil 4.9b ise Cihaz 2'nin yanıtlarını, X-ışını doz oranlarına bağlı olarak değişen ZnO NP seviyeleri açısından göstermektedir. Tüm üretilen cihazlarda, artan doz oranlarıyla neredeyse üstel bir yanıt artışı gözlemlenmiştir. Şekil 4.9c, tüm dedektörlerin 10 V bias altında tepki sürelerini göstermektedir. Şekil 4.9c'den elde edilen verilere göre, Cihaz 1'in yükselme ve düşme süreleri sırasıyla 5 s ve 7 s olarak belirlenmiştir. Aynı şekilde, Cihaz 2'nin yükselme ve düşme süreleri ise sırasıyla 9 s ve 16 s olarak ölçülmüş olup, Cihaz 1'in daha hızlı bir yanıt süresine sahip olduğu görülmüştür.

Cihaz 2'de, ZnO NP oranının aktif katman içindeki artışı ile başlangıçta yükselme ve düşme sürelerinin azaldığı, ancak daha sonra tekrar arttığı gözlemlenmiştir. Öte yandan, Cihaz 1'de ZnO NP miktarı arttıkça yükselme ve düşme süreleri azalmıştır. En hızlı yanıt süreleri,

P3HT:ZnO(1:0.75) oranına sahip Cihaz 1’de elde edilmiş olup, yükselme süresi 5 s ve düşme süresi 7 s olarak ölçülmüştür. Bu sonuç, cihazın X-ışını akımı trendiyle tutarlıdır.

P3HT:ZnO aktif katmanında bulunan ZnO NP’ler, belirli bir enerji seviyesinde X-ışınları ile uyarıldığında spesifik bir lüminesans yanıtı sergilemektedir [124,125]. ZnO nanopartiküllerinin X-ışını ışınlaması altında belirgin lüminesans özellikleri sergilemesi, X-ışını dedektörlerinin performansını artırma açısından önemli bir potansiyel taşımaktadır [126]. Aktif katman X-ışınlarına maruz kaldığında daha güçlü bir sinyal elde edilmesine yardımcı olabilir ve bu da cihazların hassasiyet değerlerini artırabilir.

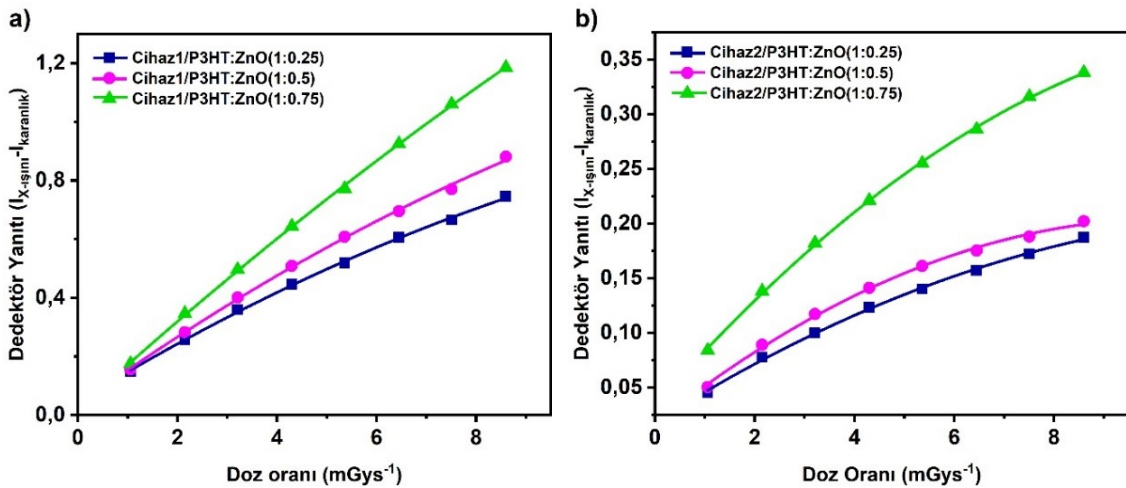
X-ışını hassasiyeti (S), ortalama hassasiyet ( $S_m$ ) ve gürültü eşdeğer doz oranı (NED) değerleri, aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır [127,128]:

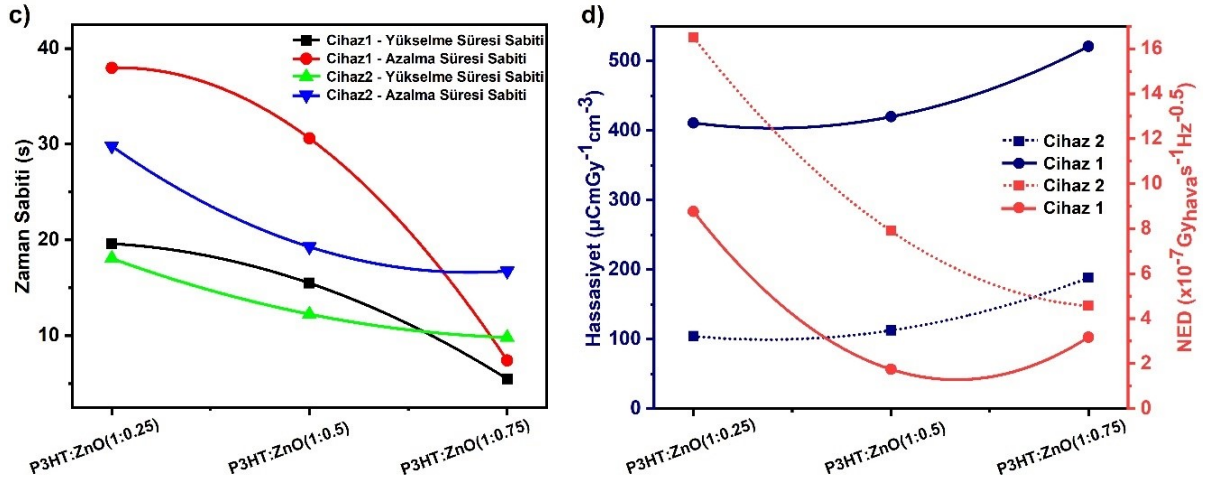
$$S = \frac{I_{X\text{-ışını}} - I_{\text{karanlık}}}{D \times V} \quad (4.4)$$

$$S_m = \frac{1}{n \times V} \sum_{i=1}^n \frac{I_i}{D_i} \quad (4.5)$$

$$NED = \frac{D\sqrt{2eI_{\text{karanlık}}}}{I_{X\text{-ışını}} - I_{\text{karanlık}}} \quad (4.6)$$

Burada,  $I_{X\text{-ray}}$  yanıt akımını,  $I_{\text{dark}}$  ise karanlık akımını ifade etmektedir. V, aktif bölgenin hacmini temsil ederken, n, X-ışını doz oranı maruziyetlerinin sayısını belirtmektedir. D, doz oranını ifade ederken, e, birim yükü ( $1.6 \times 10^{-19}$  C) temsil etmektedir.





**Şekil 4.9:** a) Cihaz 1 ve b) Cihaz 2 için aktif katmandaki farklı ZnO NP miktarlarında yanıt ve doz oranı ilişkisi; c) Yükselme ve düşme zaman sabitleri, d) Tüm cihazlar için 10 V bias altında hassasiyet ve gürültü eşdeğer doz oranı ilişkisi.

Gürültü Eşdeğer Doz (NED), ölçüm sırasında meydana gelen gürültü veya dalgalanmaların kalite ve performans üzerindeki etkisini belirler. Şekil 4.9d, dedektörlerin hassasiyet ve NED arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Tüm cihaz yapılarında, ZnO NP konsantrasyonunun artışıyla birlikte hassasiyetin arttığı gözlemlenmiştir. Cihaz 1/P3HT:ZnO(1:0.75),  $521 \mu\text{C mGy}^{-1}\text{cm}^{-3}$  hassasiyet değerine sahipken, Cihaz 2/P3HT:ZnO(1:0.75)  $188.229 \mu\text{C mGy}^{-1}\text{cm}^{-3}$  hassasiyet değeri sağlamıştır. Bu durum, ITO elektrot sistemine sahip yapının, IDT yapısına kıyasla yaklaşık üç kat daha fazla hassasiyet gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Doz-tepki eğrilerinin doğrusal olmaması nedeniyle, hassasiyetin değerlendirilmesini kolaylaştırmak amacıyla ortalama hassasiyet hesaplamaları uygulanmıştır. Bu yaklaşım, farklı analit konsantrasyonları ve türleri arasındaki sensör yanıtlarındaki değişkenliği göz önünde bulundurarak daha kapsamlı bir ölçüm sağlar. Ortalama hassasiyet, doz-tepki ilişkisinin doğrusal olmadığı durumlarda özellikle avantajlıdır, çünkü hassasiyet değerlerini tek bir temsil edici metrikte birleştirerek karşılaştırmalı analizleri kolaylaştırır.

Bu çalışmada, ortalama hassasiyet değerleri Cihaz 1/P3HT:ZnO(1:0.75) için  $566.7 \mu\text{C mGy}^{-1}\text{cm}^{-3}$ , Cihaz 2/P3HT:ZnO(1:0.75) için ise  $254.2 \mu\text{C mGy}^{-1}\text{cm}^{-3}$  olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, Cihaz 1'in X-ışını tespiti konusundaki üstün performansını vurgulamakta olup, hassasiyetin artırılmasında optimize edilmiş cihaz tasarımı ve malzeme bileşiminin kritik rolünü ortaya koymaktadır.

Buna bağılı olarak, NED değerleri hassasiyete ters orantılı olarak azalmıştır. Yüksek hassasiyet, düşük NED ile sonuçlanırken; düşük NED değerleri, dedektörlerin daha az gürültüye sahip olduğunu ve daha hassas ölçümler yapabileceğini göstermektedir.

Ayrıca, tespit sınırı (LoD) ve miktar belirleme sınırı (LoQ), X-ışını dedektörlerinin hassasiyetinin belirlenmesinde kritik parametrelerdir. Bu değerler, dedektörün minimum tespit edilebilir seviyesini ifade etmekte olup, gürültü seviyesinin üzerindeki sinyallerin algılanabilirliğini göstermektedir. LoD ve LoQ değerleri, dedektörün farklı X-ışını dozlarındaki yanıtlarının standart sapması (Sy) ve kalibrasyon eğrisinin LoD'a yaklaşan bölgesindeki eğimi (S) baz alınarak aşağıdaki formüle göre hesaplanmaktadır [129]:

$$\text{LoD} = 3.3 \cdot (\text{Sy}/\text{S}) \quad (4.7)$$

$$\text{LoQ} = 10 \cdot (\text{Sy}/\text{S}) \quad (4.8)$$

**Tablo 4.2:** Cihaz 1'in dedektör performansı.

Aktif Katman	Zaman Sabiti (s)	Ortalama Hassasiyet ( $\mu\text{CmGy}^{-1}\text{cm}^{-3}$ )	LoD ( $\mu\text{Gy/s}$ )	LoQ ( $\mu\text{Gy/s}$ )
P3HT:ZnO(1:0.25)	19	498.41	1.349	4.088
P3HT:ZnO(1:0.5)	15	491.59	1.579	4.785
P3HT:ZnO(1:0.75)	5	566.68	0.944	2.861

**Tablo 4.3:** Cihaz 2'nin dedektör performansı.

Aktif Katman	Zaman Sabiti (s)	Ortalama Hassasiyet ( $\mu\text{CmGy}^{-1}\text{cm}^{-3}$ )	LoD ( $\mu\text{Gy/s}$ )	LoQ ( $\mu\text{Gy/s}$ )
P3HT:ZnO(1:0.25)	18	139.82	0.971	2.944
P3HT:ZnO(1:0.5)	12	157.97	2.545	7.712
P3HT:ZnO(1:0.75)	9	254.21	2.186	6.627

LoD hesaplaması, Şekil 4.9a ve 4.9b'de sunulan doz-tepki eğrilerinden elde edilen verilere dayanmaktadır. Doz-tepki eğrisinin lineer davrandığı 4.3–8.6 mGy/s doz aralığına

karşılık gelen tepki değerleri, LoD analizine dahil edilmiştir. LoD hesaplamasında daha güvenilir sonuçlar elde etmek ve yöntemsel tutarlılığı artırmak amacıyla doz-tepki eğrisinin bu lineer bölgesine odaklanılmıştır.

Cihaz 1/P3HT:ZnO(1:0.75) yapısı için uygun LoD değeri 0.94  $\mu\text{Gy/s}$  olarak hesaplanırken (Tablo 4.2'de gösterildiği gibi), Cihaz 2/P3HT:ZnO(1:0.75) yapısı için uygun LoD değeri 2.19  $\mu\text{Gy/s}$  olarak belirlenmiştir (Tablo 4.3'te gösterildiği gibi). P3HT:ZnO(1:0.75) oranı ile üretilen her iki cihaz için de oldukça düşük LoD ve LoQ değerleri elde edilmiştir.

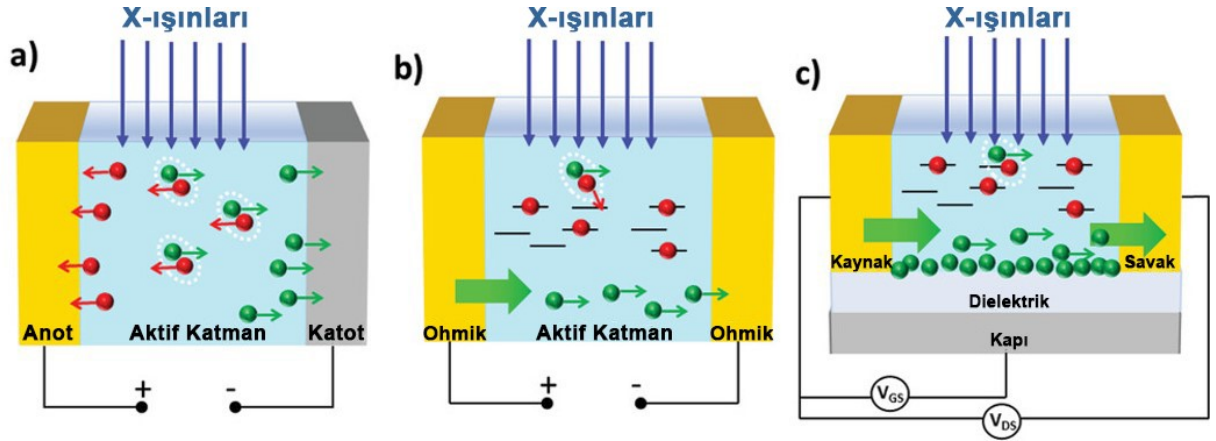


## 5. TARTIŞMA

Radyasyon, bir enerji formudur. İyonlaştırıcı radyasyon, nötr atomların veya moleküllerin pozitif ya da negatif elektrik yükü kazanmasına yol açar. Alfa, beta, gama, X ve nötron ışınları en yaygın bilinen iyonlaştırıcı radyasyon türlerindedir. X, gama ve nötron ışınları gibi nötr radyasyon türleri, dolaylı iyonlaştırıcı etkiye sahiptir; bu tür radyasyonlar önce yüklü parçacıklar oluşturur ve bu parçacıklar daha sonra iyonlaştırıcı etkiye neden olur [130]. Tipik bir X-ışını dedektörünün çalışma prensibi, X-ışını fotonu bir yarı iletken malzeme ile etkileşime girmesine dayanır. X-ışını fotonu bir yarı iletken malzeme ile etkileşime girdiğinde, yüksek enerjili bir elektron ortaya çıkar. Ardından, fotoelektrik etki ve Compton saçılma süreciyle fazla enerjisini çevreye bırakarak elektron-hole(delik) çiftlerinin oluşumuna yol açar [131]. Bu süreçler sonucunda enerjisini kademeli olarak çevresine yayan elektronlar, hem elektron-delik çiftlerinin hem de kristal örgü titreşimleri oluşumuna neden olur (Knoll, 2011). Sisteme harici bir elektrik alan uygulanırsa, elektron-hole çiftleri serbest yüklere ayrılır ve bu serbest yükler toplanır bu da gelen fotonların doğrudan bir elektrik akımına dönüştürülmesine yol açar (Bkz. Şekil 5.1). Bu serbest yükler, elektrik alanın etkisiyle elektrotlara doğru yönlendirilerek sistem dışına taşınır. Kontaklar aracılığıyla bir gerilim uygulandığında, yarı iletken tabakasında serbest taşıyıcı yoğunluğundan kaynaklanan bir içsel akım meydana gelir. X-ışınları cihaza çarptığında taşıyıcı yoğunluğu artar, bu da yarı iletken iletkenliğinde bir artışa neden olur ve fotodetektör tarafından algılanan ışığın şiddeti, radyasyon doz hızına orantılı olacaktır [132]. Bu mekanizma, gelen X-ışını fotonlarının elektriksel sinyale dönüştürülmesini sağlar ve özellikle dozimetreler ve medikal görüntüleme sistemleri gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bir işletim modunu oluşturur. Bu bağlamda, sistemde elde edilebilecek maksimum fotoakım ( $I_{cc}$ ), aşağıdaki eşitlikle tanımlanır (Knoll, 2011):

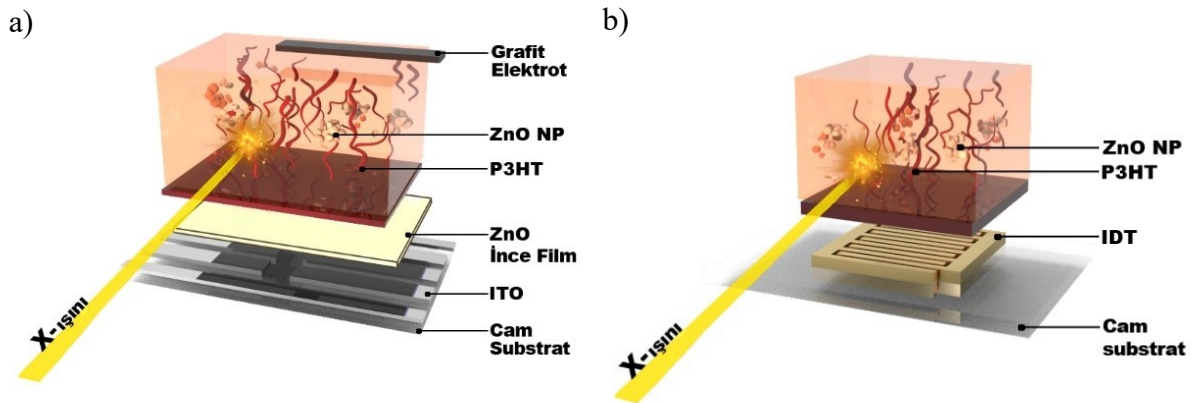
$$I_{cc} = \Phi \cdot n \cdot q \quad (5.1)$$

Bu ifadede  $q$  temel yüküdür,  $\Phi$  foton soğurma hızıdır,  $n$  soğurulan foton başına üretilen elektron-boşluk çiftlerinin sayısıdır. Bu eşitlik, dedektör malzemesinin foton enerjisini ne derece verimli bir şekilde serbest yük taşıyıcılarına dönüştürebileceğini göstermesi açısından kritik öneme sahiptir. Foton enerjisi yükseldikçe, tek bir foton tarafından yaratılan taşıyıcı sayısı artar; bu da genel olarak elde edilen sinyalin büyüklüğünü artırır.



**Şekil 5.1:** Doğrudan X-ışını algılama süreçlerinin şemaları a) Fotodiyot mimarisinde yük toplama b) Fotoiletken mimarisinde fotoiletken kazanç ve c) Fototransistör mimarisinde fotoiletken kazanç [49].

Bu çalışmada, dedektörler iki farklı konfigürasyonda tasarlanmıştır (Bkz. Şekil 5.2). Dikey fotodiyot tabanlı cihazlar (Cihaz 1) ve yanal dirençli interdijital elektrot (IDT) fotoiletken tabanlı cihazlar (Cihaz 2). Cihaz 1, aktif katman (P3HT:ZnO) ile çinko oksit (ZnO) ince film kaplı indiyum kalay oksit (ITO) altlık ve grafit elektrot arasında sandviç tipi bir cihaz yapısı oluşturularak üretilmiştir. Cihaz 2 ise aktif katmanın interdijital (IDT) elektrot kaplı altlık üzerine damlatma yöntemiyle basit bir işlem kullanılarak gerçekleştirilmiştir. P3HT:ZnO nanoparçacık oranı her iki cihaz mimarisi için 1:0.25, 1:0.5 ve 1:0.75 (ağırlık/ağırlık) olacak şekilde üç farklı oranda ayarlanmıştır. Bu sayede, ZnO nanoparçacıklarının etkisi, cihaz yapısının dedektör parametreleri üzerindeki etkisi ile birlikte değerlendirilmiştir.

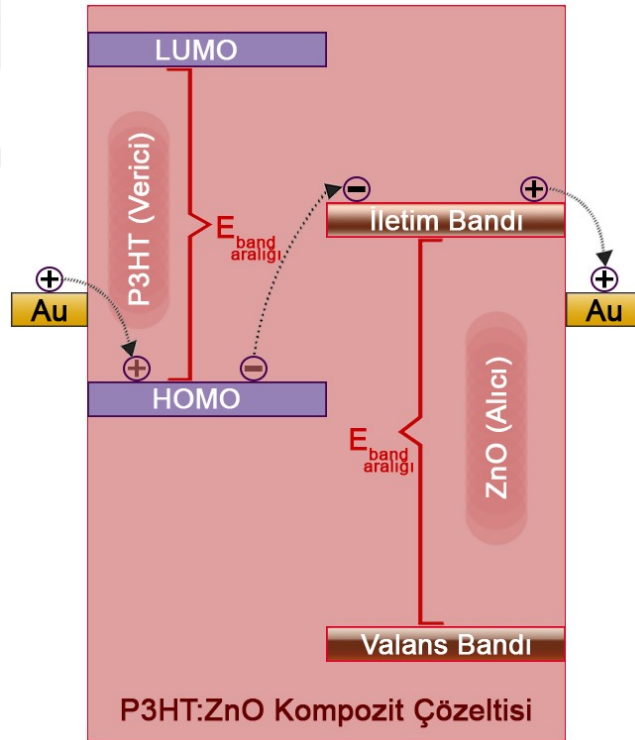


**Şekil 5.2:** a) ITO/ZnO/P3HT:ZnO/Grafit (Cihaz 1); b) IDT/P3HT:ZnO (Cihaz 2).

ITO/ZnO/P3HT:PCBM/Grafit sisteminin, hassas enerji seviyesi hizalaması aracılığıyla yük ayrımı ve taşınımını optimize ettiği belirlenmiştir. Grafit, delik toplayıcı olarak görev yaparken, P3HT'nin en yüksek dolu moleküler orbital (HOMO) seviyesi ile uyumlu bir hizalanma sergilemektedir. ZnO katmanı ise elektronların verimli bir şekilde çekilmesini

sağlamaktadır. Bu mimari konfigürasyon, yeniden birleşme kayıplarını minimize etmekte, yük taşınımını artırmakta ve yüksek düzeyde X-ışını algılama verimliliği sağlamaktadır.

Şekil 5.3, P3HT:ZnO kompozitinde P3HT ve ZnO arasındaki enerji seviyelerini ve yük transfer mekanizmasını açıkça göstermektedir. Verici (donör) malzeme olarak işlev gören P3HT, Au elektrotundan delik enjeksiyonunu kolaylaştırmak amacıyla HOMO seviyesini hizalamaktadır [133]. ZnO nanoparçacıkları kompozite dahil edildiğinde, iletim bandı, P3HT'nin HOMO seviyesinden elektron transferi için uygun bir enerji seviyesine sahip olduğundan, elektron alıcı (akseptör) olarak işlev görmektedir. ZnO nanoparçacıkları, P3HT'nin HOMO seviyesinden elektron çekme eğiliminde olup, malzeme içinde artan bir delik yoğunluğu bırakmaktadır. Bu süreç, p-tipi katkılama etkisine neden olarak P3HT'de delik taşıyıcı konsantrasyonunu artırmakta ve gözlemlenen kanal hareketliliğindeki artışın temel sebebini oluşturmaktadır. Sonuç olarak, bu yük transfer mekanizması elektron taşınımını kolaylaştırarak taşıyıcı hareketliliğini artırmakta, aynı zamanda P3HT'deki tuzak durumlarını azaltarak cihaz performansını iyileştirmektedir.



**Şekil 5.3:** P3HT:ZnO kompozit çözeltisi için enerji seviyeleri ve yük transfer mekanizması.

Aktif katman (P3HT:ZnO NP) içindeki ZnO nanoparçacıklarının (NP'ler) miktarındaki artış, elektron taşınımı ve delik hareketliliğinde kayda değer bir iyileşme ile ilişkilidir. Bu iyileşme, öncelikli olarak ZnO nanoparçacıklarının tuzak durumlarını pasifleştirme ve yük

transfer süreçlerini kolaylaştırma rolüne atfedilmektedir [134]. ZnO'nun, P3HT'nin HOMO seviyesinden elektron çekme yeteneği, malzemede daha fazla delik bırakarak delik taşıyıcı yoğunluğunu artırmakta ve kanal hareketliliğini iyileştirmektedir [123]. Bu mekanizma, ZnO'nun kompozit malzemeye dahil edilmesiyle P3HT'nin hareketliliğinde gözlemlenen iyileşmeyi desteklemektedir.

Bunun yanı sıra, ZnO nanoparçacıkları, kompozit malzemede yük taşınımı ve yük toplama verimliliğini artırmaktadır. ZnO konsantrasyonu arttığında, elektron taşınım yolları iyileşmekte ve X-ışını fotonları tarafından üretilen elektron-delik çiftlerinin daha etkin ayrışmasına olanak sağlamaktadır. Bu durum, rekombinasyon kayıplarını azaltarak X-ışını dedektörünün genel verimliliğini artırmaktadır [135].

Kompozit malzemenin morfolojisi, ZnO konsantrasyonundan etkilenmektedir. ZnO miktarının artması, malzemenin X-ışınlarını emme kapasitesini yükselterek daha fazla yük taşıyıcısının üretilmesine katkıda bulunmaktadır. Bu etki, doğrudan dedektörün duyarlılığı ve algılama sınırını iyileştirmektedir. Optimum ZnO konsantrasyonu, P3HT matrisi içinde iyi dağılmış bir nanoparçacık ağı sağlayarak etkili yük ayrışması için daha geniş bir ara yüzey alanı oluşturur [136]. Ancak, ZnO'nun aşırı yüksek konsantrasyonu, nanoparçacıkların birikmesine neden olarak yük taşıyıcısı tuzakları oluşturabilir ve yük taşınımını engelleyebilir [137]. Sonuç olarak, P3HT matrisi içindeki ZnO NP miktarındaki artışın, katkılama ve uygulanan voltaj ile birlikte, P3HT'nin hareketliliğini artırdığı ve tuzak durumlarını pasifleştirdiği öne sürülebilir [138].

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, söz konusu cihazların literatürdeki benzer dedektörlere kıyasla daha düşük radyasyon dozlarını algılama yeteneğine sahip olduğunu göstermektedir ve Tablo 5.1'de özetlenmiştir. Bu tez kapsamında üretilen X-ışını dedektörlerinin performans analizinde, tüm cihazlarda ZnO NP katkı miktarının artmasıyla iyileşme gözlemlenmiştir. Yapılan analizler sonucunda, sandviç konfigürasyonunda oluşturulan dikey yapıya sahip Cihaz 1 dedektörünün, en yüksek konsantrasyona sahip P3HT:ZnO(1:0.75) ile en iyi performans etkisini gösterdiği belirlenmiştir. Bu dikey yapıdaki dedektörde kullanılan grafit elektrot sisteminin olumlu etkisi elde edilen sonuçlara yansımıştır. Daha önceki çalışmalarımızda 50, grafit elektrot sisteminin 4.5–4.7 eV aralığında yüksek iş fonksiyonuna sahip anot elektrot olarak kullanıldığı gösterilmiştir.

Analizler belirli aralıklarla tekrarlandığında, ZnO NP'lerin kararlı kristal yapısının, dedektörlerin çevresel etkilere karşı daha dirençli hale gelmesini sağlayarak uzun vadeli cihaz performansı sunduğu gözlemlenmiştir. Aktif katmanda doğal kaynaklardan türetilmiş ZnO

NP'lerin kullanımı, literatürde organik aktif katmanda n-tipi fulleren olarak kullanılan PCBM gibi sentetik malzemelerin uygulanmasına kıyasla üretim maliyetlerini düşürmüştür. Doğal kaynaklardan elde edilen ZnO NP kullanılarak üretilen, PCBM içermeyen dedektörler, düşük toksisite, minimal çevresel etki ve potansiyel biyoyumluluk avantajları sunmaktadır.

**Tablo 5.1:** Literatürde rapor edilen ve bu çalışmada değerlendirilen organik bazlı X-ışını dedektörlerine ait performans metrikleri.

Aktif Katman	Çalışma Gerilimi	Doz Oranı	Hassasiyet	Yanıt Süresi	LoD	Referans
P3HT	100 V	100 cGy/min to 600 cGy/min	14–25 nC/Gy	-	-	[139]
P3HT:PCBM	10 V	8.74 mGys <sup>-1</sup> to 0.35 mGys <sup>-1</sup>	655.47 $\mu\text{CmGy}^{-1}\text{cm}^{-3}$	15-35 s	-	[95]
P3HT:PCBM	-	100–600 cGy/min	4.1 pC/cGy	-	-	[140]
P3HT:PCBM	2 V	0.2 to 3.37 mGys <sup>-1</sup>	83.53 $\mu\text{CGys}^{-1}$	35-90 ms	1.16 $\mu\text{Gys}^{-1}$	[141]
P3HT:PCBM: Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	200 V	20 $\mu\text{Gys}^{-1}$ to ~1 mGys <sup>-1</sup>	160 $\mu\text{CmGy}^{-1}\text{cm}^{-3}$	5-10 s	-	[27]
P3HT:PC <sub>70</sub> BM: Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-10V	454 $\mu\text{Gys}^{-1}$	30.8 $\mu\text{CGy}^{-1}\text{cm}^{-2}$	-	-	[142]
$\omega$ - Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20 V	56.95 $\mu\text{Gys}^{-1}$	3.077 $\mu\text{CGy}^{-1}\text{cm}^{-2}$	-	56.95 $\mu\text{Gys}^{-1}$	[143]
P3HT:PCBM:GO S:Tb	-10 V	1.5 mGys <sup>-1</sup>	360 $e^{-}\text{nGy}^{-1}\text{mm}^{-2}$	100 ms	-	[44]
P3HT:PCBM: GOS:Tb NP	-10V	10 mGys <sup>-1</sup>	459 $e^{-}\text{nGy}^{-1}\text{mm}^{-2}$	-	-	[7]
P3HT:PCBM:Cd Se	-1.0 V	-	220.08 $\text{nC/mR} \cdot e^{-}\text{nG cm}^{-2}$	1.57 s	-	[89]
P3HT:PC <sub>70</sub> BM:In P QDs	-1.4 V	3.44 mGy	2.26 $\text{mA/Gy} \cdot \text{cm}^{-2}$	-	-	[144]
P3HT:PC <sub>61</sub> BM: CsPbBr <sub>3</sub> QDs	-3 V	58 mGys <sup>-1</sup>	229.6 $e^{-}\text{nGy}^{-1}\text{mm}^{-2}$	-	-	[145]
P3HT:ZnO	10 V	1.06 to 8.6 mGys <sup>-1</sup>	566.68 $\mu\text{CmGy}^{-1}\text{cm}^{-3}$	5 s	0.944 $\mu\text{Gys}^{-1}$	Bu çalışma [84]

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, ZnO nanoparçacıkları (NP) ile zenginleştirilmiş P3HT bazlı organik yarı iletken kompozit yapılar kullanılarak geliştirilen X-ışını dedektörlerinin yapısal, morfolojik, elektriksel ve dedeksiyon performansları detaylı biçimde incelenmiştir. Organik elektroniklerin esneklik, düşük maliyet ve büyük alanlara uygulanabilirlik gibi avantajlarının yanı sıra; ZnO gibi inorganik, geniş bant aralıklı, yüksek mobiliteli ve termal olarak kararlı metal oksit nanoparçacıklarının katkısı ile performans iyileştirmesi hedeflenmiştir. Bu bağlamda, farklı ZnO içeriklerine (1:0.25, 1:0.5, 1:0.75) sahip P3HT:ZnO hibrit nano kompozitleri aktif katman olarak kullanılarak, iki farklı cihaz mimarisi (dikey sandviç tip - Cihaz 1 ve IDT tabanlı yüzeysel tip - Cihaz 2) üretilmiş ve karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Dedektörlerin foto yük akım yoğunluğu ölçümleri, artan ve azalan X-ışını doz hızlarına karşı gerçekleştirilmiştir. Cihaz yapısının X-ışını tespiti üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Aktif katmandaki ZnO NP oranının artışı ile X-ışınlarıyla etkileşim oranının arttığı ve bunun sonucunda dedektör performansında iyileşme sağlandığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca, dedektörün foto yük akımında, artan gerilim öngerilimleri ve uygulanan X-ışını dozlarıyla birlikte bir artış gözlemlenmiştir.

ZnO nanoparçacıkları (NP) ile katkılanmış P3HT kompozit filmlerinin, polimer tabanlı X-ışını dedektörlerinin performansını artırmada önemli bir potansiyele sahip olduğu gösterilmiştir. Farklı ZnO NP konsantrasyonlarının ve çeşitli cihaz mimarilerinin etkilerini sistematik olarak inceleyerek, bu faktörlerin X-ışını algılama duyarlılığı ve verimliliği üzerindeki etkilerine dair kapsamlı bir anlayış geliştirilmiştir. Hem Cihaz 1 hem de Cihaz 2'de artan ZnO oranı ile fotoyanıt akımında ciddi artışlar tespit edilmiş, bunun da X-ışınları ile güçlü etkileşimi sayesinde olduğu anlaşılmıştır. Özellikle Cihaz 1/P3HT:ZnO(1:0.75) yapısında duyarlılık değeri  $566.7 \mu\text{CmGy}^{-1}\text{cm}^{-3}$  seviyesine ulaşmış ve bu değer literatürde bildirilen birçok organik dedektörden daha yüksek çıkmıştır. Aynı cihazda yükselme ve düşme süreleri sırasıyla 5 s ve 7 s olarak ölçülmüş, bu da hızlı ve kararlı bir dedeksiyon performansını işaret etmektedir.

Gürültü eşdeğer doz oranı (NED) ve tespit sınırı (LoD) analizleri de cihazların duyarlılık potansiyellerini nicel olarak ortaya koymuştur. Cihaz 1/P3HT:ZnO(1:0.75) için hesaplanan LoD değeri yalnızca  $0.94 \mu\text{Gy/s}$  olup, bu değer birçok ticari ve akademik dedektör

performansının altında kalan bir alt sınır tespit yeteneğini göstermektedir. Cihaz 2, daha düşük duyarlılık ( $254.2 \mu\text{CmGy}^{-1}\text{cm}^{-3}$ ) ve daha yüksek LoD ( $2.19 \mu\text{Gy/s}$ ) sergilemiş, bu da yapısal farklılığın performansa olan doğrudan etkisini vurgulamıştır. İki farklı cihaz mimarisiyle gerçekleştirilen karşılaştırmalı analizler, cihaz performansının yalnızca aktif malzeme kompozisyonuna değil, aynı zamanda cihaz mimarisine de yüksek derecede bağımlı olduğunu ortaya koymuştur. Cihaz 1'in (ITO/ZnO/P3HT:ZnO/Grafit) dikey sandviç yapısı, taşıyıcıların daha etkin yönlendirilmesini ve ayrılmasını sağlarken, Cihaz 2'nin (IDT/P3HT:ZnO) yüzeysel ve ohmik davranışı daha düşük taşıyıcı mobilitesi ile sonuçlanmıştır. Bu çalışmanın dikkat çeken yönlerinden biri de, PCBm gibi toksik ve pahalı katkı maddelerinin yerine ZnO nanoparçacıklarının tercih edilmesidir. ZnO, hem doğadan elde edilebilmesi hem de düşük maliyetli sentez prosedürleri sayesinde çevresel sürdürülebilirlik açısından avantajlıdır. Bu bağlamda geliştirilen dedektörler yalnızca teknik değil, aynı zamanda çevresel ve ekonomik sürdürülebilirlik açısından da önemli katkılar sunmaktadır. Ayrıca ZnO'nun yüksek termal stabilitesi, cihazların uzun süreli kullanımda yapısal bütünlüğünü koruyarak kararlı performans göstermesine katkı sunmuştur.

Sandviç tipi grafit elektrot sistemiyle oluşturulan dikey yapıdaki dedektör (Cihaz 1), yüksek performans, X-ışınlarına karşı daha yüksek duyarlılık ve hızlı yanıt süreleri sergilemiştir. Dikey yapıdaki Cihaz 1/P3HT:ZnO(1:0.75),  $566.7 \mu\text{C mGy}^{-1}\text{cm}^{-3}$  duyarlılık, 5 s yükselme ve 7 s azalma hızlı yanıt süreleri, iyi kararlılık ve  $0.94 \mu\text{Gy/s}$  LoD (algılama sınırı) değeri ile üstün performans göstermiştir. Zamana bağlı duyarlılık ölçümleri, haftalık ve aylık periyotlarda gerçekleştirilmiş olup, dedektörlerin uzun süreli X-ışını maruziyeti altında duyarlılıklarında önemli bir azalma olmadığı gözlemlenmiştir. Bu bulgu, radyasyon hasarına karşı yüksek dayanıklılık gösteren, uzun ömürlü ve tekrar edilebilir performansa sahip dedektörlerin üretildiğini ortaya koymaktadır. Elde edilen bu yüksek performans göz önüne alındığında, aktif katman olarak P3HT:ZnO kullanan bu yenilikçi organik yarı iletken X-ışını dedektörleri, X-ışını algılama alanında yeni araştırmalara ışık tutabilecek potansiyele sahiptir. Bu tez kapsamında elde edilen sonuçlar, P3HT:ZnO hibrit yapıli aktif katmanların organik X-ışını dedektörleri için büyük bir potansiyel taşıdığını, yüksek duyarlılık, hızlı yanıt ve uzun süreli kararlı çalışma gibi kritik performans kriterlerini başarıyla sağladığını göstermiştir. Ayrıca, bu sonuçlar organik yarı iletken tabanlı dedektörlerin gelecekteki düşük maliyetli, esnek ve taşınabilir X-ışını algılama uygulamaları için umut vadeden bir alternatif oluşturabileceğini göstermektedir.

## KAYNAKLAR

- [1]. Milbrath, B.D., Peurrung, ) A J, Bliss, M., and Weber, W.J., n.d., Radiation detector materials: An overview.
- [2]. Beckerle, P. and Strok, H., 2000, Charged particle detection in organic semiconductors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*. 449 302–310.
- [3]. Lee, J. and Kang, J., 2019, Characteristics of a Flexible Radiation Detector Fabricated with Non-Fullerene Acceptor for an Indirect-type X-ray Imaging. *Journal of Instrumentation*. 14 (03), C03008.
- [4]. Tamayo, A., Fratelli, I., Ciavatti, A., Martínez-Domingo, C., Branchini, P., Colantoni, E., et al., 2022, X-ray Detectors With Ultrahigh Sensitivity Employing High Performance Transistors Based on a Fully Organic Small Molecule Semiconductor/Polymer Blend Active Layer. *Advanced Electronic Materials*. 8 (10), 2200293.
- [5]. Intaniwet, A., Mills, C.A., Shkunov, M., Thiem, H., Keddie, J.L., and Sellin, P.J., 2009, Characterization of thick film poly(triarylamine) semiconductor diodes for direct x-ray detection. *Journal of Applied Physics*. 106 (6),.
- [6]. Intaniwet, A., Keddie, J.L., Shkunov, M., and Sellin, P.J., 2011, High charge-carrier mobilities in blends of poly(triarylamine) and TIPS-pentacene leading to better performing X-ray sensors. *Organic Electronics*. 12 (11), 1903–1908.
- [7]. Büchele, P., Richter, M., Tedde, S.F., Matt, G.J., Ankah, G.N., Fischer, R., et al., 2015, X-ray imaging with scintillator-sensitized hybrid organic photodetectors. *Nature Photonics 2015 9:12*. 9 (12), 843–848.
- [8]. Thirimanne, H.M., Jayawardena, K.D.G.I., Parnell, A.J., Bandara, R.M.I., Karalasingam, A., Pani, S., et al., 2018, High sensitivity organic inorganic hybrid X-ray detectors with direct transduction and broadband response. *Nature Communications 2018 9:1*. 9 (1), 1–10.
- [9]. Griffith, M.J., Cottam, S., Stamenkovic, J., Posar, J.A., and Petasecca, M., 2020, Printable Organic Semiconductors for Radiation Detection: From Fundamentals to Fabrication and Functionality. *Frontiers in Physics*. 8 505410.
- [10]. Muchuweni, E., Sathiaraj, T.S., and Nyakoty, H., 2017, Synthesis and characterization of zinc oxide thin films for optoelectronic applications. *Heliyon*. 3 285.
- [11]. Bilgaiyan, A., Dixit, T., Palani, I.A., and Singh, V., n.d., Improved Photoresponse of Hybrid ZnO/P3HT Bilayered Photodetector Obtained Through Oriented Growth of ZnO Nanorod Arrays and the Use of Hole Injection Layer.

- [12]. Zhou, J., Qiao, Q., Tan, Y., Wu, C., Hu, J., Qiu, X., et al., 2023, The improvement of polymer photodetector based on 1D-ZnO nanorod arrays/0D-ZnO quantum dots composite film. *Optical Materials*. 142 114086.
- [13]. Janotti, A. and Van De Walle, C.G., 2009, Fundamentals of zinc oxide as a semiconductor. *ON PROGRESS IN PHYSICS Rep. Prog. Phys.* 72 29.
- [14]. Lee, S., Kim, E.H., Yu, S., Kim, H., Park, C., Lee, S.W., et al., 2021, Polymer-Laminated Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>TXMXene Electrodes for Transparent and Flexible Field-Driven Electronics. *ACS Nano*. 15 (5), 8940–8952.
- [15]. Sánchez Zeferino, R., Barboza Flores, M., and Pal, U., 2011, Photoluminescence and raman scattering in ag-doped zno nanoparticles. *Journal of Applied Physics*. 109 (1),.
- [16]. Khezami, L., Ismail, M.A., Taha, K.K., and Modwi, A., 2018, ZnO NANOPARTICLES: SURFACE AND X-RAY PROFILE ANALYSIS. *Article in Journal of Ovonic Research*. 14 (5), 381–393.
- [17]. Khorsand Zak, A., Abd Majid, W., Abrishami, M., and Yousefi, R., 2010, X-ray analysis of ZnO nanoparticles by WilliamsoneHall and sizestrain plot methods.
- [18]. Basiricò, L., Ciavatti, A., Fraboni, B., Basiricò, L., Ciavatti, A., and Fraboni, B., 2021, Solution-Grown Organic and Perovskite X-Ray Detectors: A New Paradigm for the Direct Detection of Ionizing Radiation. *Advanced Materials Technologies*. 6 (1), 2000475.
- [19]. Miyata, E., Miyata, H., Fukasawa, E., Kakizaki, K., Abe, H., Katsumata, M., et al., 2020, Hybrid semiconductor radiation detectors using conductive polymers. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 955 163156.
- [20]. Chen, Q., Hajagos, T., and Pei, Q., 2011, Conjugated polymers for radiation detection. *Annu. Rep. Prog. Chem., Sect. C*. 107 298–318.
- [21]. Ayesh, A.I., Salah, B., Nawwas, R., Alyafei, A., AlMansouri, S., and Al-Sulaiti, L., 2020, Production of flexible nanocomposite membranes for x-ray detectors. *Applied Surface Science*. 528 146958.
- [22]. Seon, H., Ban, D., and Kang, J., 2018, Improvement of the sensitivity of organic polymer-based photodetector fabricated with p-type conjugated polymers for indirect X-ray detection. *Journal of Instrumentation*. 13 (11), C11009.
- [23]. Intaniwet, A., Mills, C.A., Shkunov, M., Sellin, P.J., and Keddie, J.L., 2012, High-Z nanoparticles for enhanced sensitivity in semiconducting polymer X-ray detectors. *Nanotechnology*. 23 235502.
- [24]. Han, K.X., Wu, C.C., Hsu, W.F., Chien, W., and Yang, C.F., 2023, Preparation of ultrafast ammonia sensor based on cross-linked ZnO nanorods coated with poly(3-hexylthiophene). *Synthetic Metals*. 299 117449.
- [25]. Yoshino, K., Hayashi, S., Ishii, G., and Inuishi, Y., 1983, Electrical transport in electron beam irradiated polyacetylene. *Solid State Communications*. 46 (5), 405–408.

- [26]. Chen, D., Nakahara, A., Wei, D., Nordlund, D., and Russell, T.P., 2011, P3HT/PCBM bulk heterojunction organic photovoltaics: Correlating efficiency and morphology. *Nano Letters*. 11 (2), 561–567.
- [27]. Jayawardena, K.D.G.I., Thirimanne, H.M., Tedde, S.F., Huerdler, J.E., Parnell, A.J., Bandara, R.M.I., et al., 2019, Millimeter-Scale Unipolar Transport in High Sensitivity Organic/Inorganic Semiconductor X-ray Detectors. *ACS Nano*. 13 (6), 6973–6981.
- [28]. Jiang, Y., Liu, Z., Yin, Z., and Zheng, Q., 2020, Sandwich structured dielectrics for air-stable and flexible low-voltage organic transistors in ultrasensitive pressure sensing †. *Cite This: Mater. Chem. Front.* 4 1459.
- [29]. AGENCY, I.A.E., 2005, Radiation Oncology Physics. *Radiation Oncology Physics*. 6 1–657.
- [30]. Icrp, n.d., Annals of the ICRP Published on behalf of the International Commission on Radiological Protection.
- [31]. Little, J.B., 2000, Radiation carcinogenesis. *Carcinogenesis*. 21 (3), 397–404.
- [32]. Hill, C.K. and Kumar, P., 2011, Radiation Carcinogenesis. *Encyclopedia of Cancer*. 3134–3137.
- [33]. Ward, J.F., 2000, Complexity of Damage Produced by Ionizing Radiation. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*. 65 377–382.
- [34]. Azzam, E.I., Jay-Gerin, J.P., and Pain, D., 2012, Ionizing radiation-induced metabolic oxidative stress and prolonged cell injury. *Cancer Letters*. 327 (1–2), 48–60.
- [35]. Fraboni, B., Fraleoni-Morgera, A., and Zaitseva, N., 2016, Ionizing Radiation Detectors Based on Solution-Grown Organic Single Crystals. *Advanced Functional Materials*. 26 (14), 2276–2291.
- [36]. Lu, L., Sun, M., Lu, Q., Wu, T., and Huang, B., 2021, High energy X-ray radiation sensitive scintillating materials for medical imaging, cancer diagnosis and therapy. *Nano Energy*. 79 105437.
- [37]. Moy, J.P., 1999, Large area X-ray detectors based on amorphous silicon technology. *Thin Solid Films*. 337 (1–2), 213–221.
- [38]. Srour, J.R. and McGarrity, J.M., 1988, Radiation Effects on Microelectronics in Space. *Proceedings of the IEEE*. 76 (11), 1443–1469.
- [39]. Agostinelli, T., Campoy-Quiles, M., Blakesley, J.C., Speller, R., Bradley, D.D.C., and Nelson, J., 2008, A polymer/fullerene based photodetector with extremely low dark current for x-ray medical imaging applications. *Applied Physics Letters*. 93 (20),
- [40]. Keivanidis, P.E., Greenham, N.C., Sirringhaus, H., Friend, R.H., Blakesley, J.C., Speller, R., et al., 2008, X-ray stability and response of polymeric photodiodes for imaging applications. *Applied Physics Letters*. 92 (2),
- [41]. Lutz, G., 2007, Semiconductor Radiation Detectors. *Semiconductor Radiation Detectors*.

- [42]. Ou, X., Chen, X., Xu, X., Xie, L., Chen, X., Hong, Z., et al., 2021, Recent Development in X-Ray Imaging Technology: Future and Challenges. *Research*. 2021.
- [43]. Liu, T., Yang, K., and Liu, Z., 2020, Recent advances in functional nanomaterials for X-ray triggered cancer therapy. *Progress in Natural Science: Materials International*. 30 (5), 567–576.
- [44]. Spahn, M., 2005, Flat detectors and their clinical applications. *Eur. Radiol.* 15 (9), 1934–1947.
- [45]. Kabir, M.Z. and Kasap, S.O., 2003, Modulation transfer function of photoconductive x-ray image detectors: effects of charge carrier trapping. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 36 (19), 2352.
- [46]. Pin, P. and Pérot, B., 2014, Characterization of uranium in bituminized radioactive waste drums by self-induced X-Ray fluorescence. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 61 (4), 2131–2136.
- [47]. Mahmood, S.A., Kabir, M.Z., Tousignant, O., Greenspan, J., and Mokam, M.F., 2010, Investigation of ghosting recovery techniques and mechanisms in multilayer selenium x-ray detector structures under low bias. <https://doi.org/10.1117/12.844034>. 7622 394–401.
- [48]. Kasap, S.O. and Rowlands, J.A., 2000, X-ray photoconductors and stabilized a-Se for direct conversion digital flat-panel X-ray image-detectors. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 11 (3), 179–198.
- [49]. Basiricò, L., Ciavatti, A., and Fraboni, B., 2021, Solution-Grown Organic and Perovskite X-Ray Detectors: A New Paradigm for the Direct Detection of Ionizing Radiation. *Advanced Materials Technologies*. 6 (1),.
- [50]. Benthien, S., Lulé, T., Schneider, B., Wagner, M., Verhoeven, M., and Böhm, M., 2000, Vertically integrated sensors for advanced imaging applications. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 35 (7), 939–945.
- [51]. Chen, E. and Chou, S.Y., 1997, Characteristics of coplanar transmission lines on multilayer substrates: modeling and experiments. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 45 (6), 939–945.
- [52]. Hamilton, M.C., Martin, S., and Kanicki, J., 2004, Thin-film organic polymer phototransistors. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 51 (6), 877–885.
- [53]. Yu, F., Wu, S., Wang, X., Zhang, G., Lu, H., and Qiu, L., 2017, Flexible and low-voltage organic phototransistors. *RSC Advances*. 7 (19), 11572–11577.
- [54]. Hamilton, M.C. and Kanicki, J., 2004, Organic polymer thin-film transistor photosensors. *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*. 10 (4), 840–848.
- [55]. Gao, Y., Ge, Y., Wang, X., Liu, J., Liu, W., Cao, Y., et al., 2021, Ultrathin and Ultrasensitive Direct X-ray Detector Based on Heterojunction Phototransistors. *Advanced Materials*. 33 (32), 2101717.

- [56]. Schwoerer, M. and Wolf, H.C., 2007, Organic molecular solids. 427.
- [57]. Brütting, W., 2006, Physics of Organic Semiconductors. *Physics of Organic Semiconductors*. 1–536.
- [58]. Basiricò, L., Ciavatti, A., Cramer, T., Cosseddu, P., Bonfiglio, A., and Fraboni, B., 2016, Direct X-ray photoconversion in flexible organic thin film devices operated below 1 V. *Nature Communications 2016 7:1*. 7 (1), 1–9.
- [59]. Kumar, A., Devine, R., Mayberry, C., Lei, B., Li, G., and Yang, 2010, Origin of radiation-induced degradation in polymer solar cells. *Advanced Functional Materials*. 20 (16), 2729–2736.
- [60]. Brabec, C.J., Zerza, G., Cerullo, G., De Silvestri, S., Luzzati, S., Hummelen, J.C., et al., 2001, Tracing photoinduced electron transfer process in conjugated polymer/fullerene bulk heterojunctions in real time. *Chemical Physics Letters*. 340 (3–4), 232–236.
- [61]. Heeger, A.J., 2014, 25th Anniversary Article: Bulk Heterojunction Solar Cells: Understanding the Mechanism of Operation. *Advanced Materials*. 26 (1), 10–28.
- [62]. Toumey, C.P., 2008, Reading Feynman Into Nanotechnology: A Text for a New Science. *Techné: Research in Philosophy and Technology*. 12 (3), 133–168.
- [63]. Harper, S., Wohlleben, W., Doa, M., Nowack, B., Clancy, S., Canady, R., et al., 2015, Measuring Nanomaterial Release from Carbon Nanotube Composites: Review of the State of the Science. *Journal of Physics: Conference Series*. 617 (1), 012026.
- [64]. Iijima, S., 1991, Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature*. 354 (6348), 56–58.
- [65]. Comini, E. and Sberveglieri, G., 2010, Metal oxide nanowires as chemical sensors. *Materials Today*. 13 (7–8), 36–44.
- [66]. Hobbs, R.G., Petkov, N., and Holmes, J.D., 2012, Semiconductor nanowire fabrication by bottom-up and top-down paradigms. *Chemistry of Materials*. 24 (11), 1975–1991.
- [67]. Arole, V.M. and Munde, S. V, 2014, FABRICATION OF NANOMATERIALS BY TOP-DOWN AND BOTTOM-UP APPROACHES-AN OVERVIEW. *JAAST:Material Science (Special Issue)*. 1 2–89.
- [68]. Ashik, U.P.M., Kudo, S., and Hayashi, J.I., 2018, An Overview of Metal Oxide Nanostructures. *Synthesis of Inorganic Nanomaterials: Advances and Key Technologies*. 19–57.
- [69]. Bandas, C., Orha, C., Nicolaescu, M., Morariu, M.I., and Lăzău, C., 2024, 2D and 3D Nanostructured Metal Oxide Composites as Promising Materials for Electrochemical Energy Storage Techniques: Synthesis Methods and Properties. *International Journal of Molecular Sciences 2024, Vol. 25, Page 12521*. 25 (23), 12521.
- [70]. Zavar, S., 2017, A novel three component synthesis of 2-amino-4H-chromenes derivatives using nano ZnO catalyst. *Arabian Journal of Chemistry*. 10 S67–S70.

- [71]. Hassan, N.K., Hashim, M.R., and Bououdina, M., 2013, One-dimensional ZnO nanostructure growth prepared by thermal evaporation on different substrates: Ultraviolet emission as a function of size and dimensionality. *Ceramics International*. 39 (7), 7439–7444.
- [72]. Ju, D., Xu, H., Zhang, J., Guo, J., and Cao, B., 2014, Direct hydrothermal growth of ZnO nanosheets on electrode for ethanol sensing. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 201 444–451.
- [73]. Yue, S., Lu, J., and Zhang, J., 2009, Synthesis of three-dimensional ZnO superstructures by a one-pot solution process. *Materials Chemistry and Physics*. 117 (1), 4–8.
- [74]. Finch, G.I. and Quarrell, A.G., 1934, Crystal structure and orientation in zinc-oxide films. *Proceedings of the Physical Society*. 46 (2), 148.
- [75]. Öztürk, S., Kiliç, N., and Öztürk, Z.Z., 2013, Fabrication of ZnO nanorods for NO<sub>2</sub> sensor applications: Effect of dimensions and electrode position. *Journal of Alloys and Compounds*. 581 196–201.
- [76]. Djuriić, A.B., Ng, A.M.C., and Chen, X.Y., 2010, ZnO nanostructures for optoelectronics: Material properties and device applications. *Progress in Quantum Electronics*. 34 (4), 191–259.
- [77]. Sharma, P., Gupta, A., Owens, F.J., Inoue, A., and Rao, K. V., 2004, Room temperature spintronic material—Mn-doped ZnO revisited. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 282 (1–3), 115–121.
- [78]. Fleischhaker, F., Wloka, V., and Hennig, I., 2010, ZnO based field-effect transistors (FETs): solution-processable at low temperatures on flexible substrates. *Journal of Materials Chemistry*. 20 (32), 6622–6625.
- [79]. Wei, Z.P., Lu, Y.M., Shen, D.Z., Zhang, Z.Z., Yao, B., Li, B.H., et al., 2007, Room temperature p-n ZnO blue-violet light-emitting diodes. *Applied Physics Letters*. 90 (4),.
- [80]. Ranga Rao, A. and Dutta, V., 2008, Achievement of 4.7% conversion efficiency in ZnO dye-sensitized solar cells fabricated by spray deposition using hydrothermally synthesized nanoparticles. *Nanotechnology*. 19 (44), 445712.
- [81]. Hames, Y., Alpaslan, Z., Kösemen, A., San, S.E., and Yerli, Y., 2010, Electrochemically grown ZnO nanorods for hybrid solar cell applications. *Solar Energy*. 84 (3), 426–431.
- [82]. 2010, ().
- [83]. You, H.C. and Lin, Y.H., 2012, Investigation of the Sol-Gel Method on the Flexible ZnO Device. *International Journal of Electrochemical Science*. 7 (10), 9085–9094.
- [84]. Selçuk, N.N., Öztürk, S., Kalkan, Y., Demir, A., Gegin, K., and Kösemen, A., 2025, Development of Sol-Gel Synthesized ZnO Nanoparticle-Incorporated Polymer-Based X-Ray Detectors: A Comparative Investigation of Device Architectures. *ACS Applied Electronic Materials*.

- [85]. Hasnidawani, J.N., Azlina, H.N., Norita, H., Bonnia, N.N., Ratim, S., and Ali, E.S., 2016, Synthesis of ZnO Nanostructures Using Sol-Gel Method. *Procedia Chemistry*. 19 211–216.
- [86]. Chen, X., Xu, T., Lei, H., Tan, L., and Yang, L., 2019, Multifunctional nano-ZnO/PMMA composites with high transparency prepared by one-step in situ polymerization. *Polymer Composites*. 40 (2), 657–663.
- [87]. Posar, J.A., Davis, J., Alnaghy, S., Wilkinson, D., Cottam, S., Lee, D.M., et al., 2021, Polymer Photodetectors for Printable, Flexible, and Fully Tissue Equivalent X-Ray Detection with Zero-Bias Operation and Ultrafast Temporal Responses. *Advanced Materials Technologies*. 6 (9),.
- [88]. Kang, S., Jung, B., Noh, S., Cho, C., Yoon, I., and Park, J., 2012, Feasibility study of direct-conversion x-ray detection using cadmium zinc telluride films. *Journal of Instrumentation*. 7 (01), C01010.
- [89]. Kim, B., Lee, J., and Kang, J., 2017, Improving the sensitivity of indirect-type organic X-ray detector by blending with CdSe quantum dots. *Journal of Instrumentation*. 12 (01), C01009.
- [90]. Zhang, X., Dong, H., and Hu, W., 2018, Organic Semiconductor Single Crystals for Electronics and Photonics. *Advanced Materials*. 30 (44), 1801048.
- [91]. Shafique, U., 2014, Organic Semiconductor Detector for Large Area Digital Imaging.
- [92]. Iacchetti, A., Binda, M., Natali, D., Giussani, M., Beverina, L., Fiorini, C., et al., 2012, Multi-layer organic squaraine-based photodiode for indirect X-ray detection. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 59 (5 PART 1), 1862–1867.
- [93]. Pennicard, D., Pirard, B., Tolbanov, O., and Iniewski, K., 2017, Semiconductor materials for X-ray detectors. *MRS Bulletin*. 42 (6), 445–450.
- [94]. Lakshmi Vineela, V., Praveen, P.A., Kanagasekaran, T., Kumar C, N., and Narasimha Murthy, N.V.L., 2022, Direct x-ray detection using thin-film pentacene Schottky diodes. *Journal of Instrumentation*. 17 (02), P02024.
- [95]. Kalkan, Y., Öztürk, S., and Kösemen, A., 2022, Effects of PCBM loading on high sensitive P3HT based vertical bulk resistive X-ray detector. *Organic Electronics*. 111 106665.
- [96]. Makvandi, P., Iftekhhar, S., Pizzetti, F., Zarepour, A., Zare, E.N., Ashrafizadeh, M., et al., 2020, Functionalization of polymers and nanomaterials for water treatment, food packaging, textile and biomedical applications: a review. *Environmental Chemistry Letters 2020 19:1*. 19 (1), 583–611.
- [97]. Chen, M., Wang, C., and Hu, W., 2021, Organic photoelectric materials for X-ray and gamma ray detection: mechanism, material preparation and application. *Journal of Materials Chemistry C*. 9 (14), 4709–4729.

- [98]. More, C. V., Alsayed, Z., Badawi, M.S., Thabet, A.A., and Pawar, P.P., 2021, Polymeric composite materials for radiation shielding: a review. *Environmental Chemistry Letters* 2021 19:3. 19 (3), 2057–2090.
- [99]. Jin, C., Liu, J., and Sun, J., 2019, Near-infrared electroluminescence from metal-oxide-semiconductor devices with erbium-doped gadolinium oxide on silicon. *Applied Physics Letters*. 114 (21),.
- [100]. Das, N.C. and Sokol, P.E., 2010, Hybrid photovoltaic devices from regioregular polythiophene and ZnO nanoparticles composites. *Renewable Energy*. 35 (12), 2683–2688.
- [101]. Lee, Y.H., Yeh, P.S., Hsu, Y.T., Tong, Z.H., and Chiang, C.H., 2021, Effective control of solution self-assembly of P3HT/zinc salt complex for in situ template synthesis of P3HT/ZnO nanohybrids. *Polymer*. 215 123385.
- [102]. Shalu, C., Shukla, M., Tiwari, A., Agrawal, J., Bilgaiyan, A., and Singh, V., 2020, Role of solvent used to cast P3HT thin films on the performance of ZnO/P3HT hybrid photo detector. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*. 115 113694.
- [103]. Nambiar, S. and Yeow, J.T.W., 2012, Polymer-composite materials for radiation protection. *ACS Applied Materials and Interfaces*. 4 (11), 5717–5726.
- [104]. Boroumand, F.A., Zhu, M., Dalton, A.B., Keddie, J.L., Sellin, P.J., and Gutierrez, J.J., 2007, Direct x-ray detection with conjugated polymer devices. *Applied Physics Letters*. 91 (3),.
- [105]. Tamayo, A., Fratelli, I., Ciavatti, A., Martínez-Domingo, C., Branchini, P., Colantoni, E., et al., 2022, X-ray Detectors With Ultrahigh Sensitivity Employing High Performance Transistors Based on a Fully Organic Small Molecule Semiconductor/Polymer Blend Active Layer.
- [106]. Neuhold, A., Novák, J., Flesch, H.G., Moser, A., Djuric, T., Grodd, L., et al., 2012, X-ray radiation damage of organic semiconductor thin films during grazing incidence diffraction experiments. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 284 64–68.
- [107]. Basiricò, L., Ciavatti, A., Fratelli, I., Dreossi, D., Tromba, G., Lai, S., et al., 2020, Medical Applications of Tissue-Equivalent, Organic-Based Flexible Direct X-Ray Detectors. *Frontiers in Physics*. 8 498981.
- [108]. Higgins, S.G., Lo Fiego, A., Patrick, I., Creamer, A., and Stevens, M.M., 2020, Organic Bioelectronics: Using Highly Conjugated Polymers to Interface with Biomolecules, Cells, and Tissues in the Human Body. *Advanced Materials Technologies*. 5 (11), 2000384.
- [109]. Beckerle, P. and Ströbele, H., 2000, Charged particle detection in organic semiconductors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 449 (1–2), 302–310.

- [110]. Wolf, J., Cruciani, F., El Labban, A., and Beaujuge, P.M., 2015, Wide Band-Gap 3,4-Difluorothiophene-Based Polymer with 7% Solar Cell Efficiency: An Alternative to P3HT. *Chemistry of Materials*. 27 (12), 4184–4187.
- [111]. He, R., Ren, S., Chen, C., Yi, Z., Luo, Y., Lai, H., et al., 2021, Wide-bandgap organic–inorganic hybrid and all-inorganic perovskite solar cells and their application in all-perovskite tandem solar cells. *Energy & Environmental Science*. 14 (11), 5723–5759.
- [112]. n.d., EasyEDA - Online PCB design & circuit simulator.
- [113]. Gegin, K., Demir, A., Öztürk, S., Erkovan, M., and Kösemen, A., 2023, Boosting inverted type organic solar cell efficiency through the use of spray coated Y and Sn co-doped zinc oxide nanoparticles as an electron transport layers. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 34 (18), 1–12.
- [114]. Navale, S.C., Ravi, V., and Mulla, I.S., 2009, Investigations on Ru doped ZnO: Strain calculations and gas sensing study. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 139 (2), 466–470.
- [115]. Ebin, B., Arig, E., Özkal, B., and Gürmen, S., 2012, Production and characterization of ZnO nanoparticles and porous particles by ultrasonic spray pyrolysis using a zinc nitrate precursor. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 19 (7), 651–656.
- [116]. Kaningini, A.G., Azizi, S., Sintwa, N., Mokalane, K., Mohale, K.C., Mudau, F.N., et al., 2022, Effect of Optimized Precursor Concentration, Temperature, and Doping on Optical Properties of ZnO Nanoparticles Synthesized via a Green Route Using Bush Tea (*Athrixia phylicoides* DC.) Leaf Extracts. *ACS Omega*. 7 (36), 31658–31666.
- [117]. Kalonga, G., 2013, Characterization and optimization of poly (3-hexylthiophene-2, 5-diyl) (P3HT) and [6, 6] phenyl-C61-butyric acid methyl ester (PCBM) blends for optical absorption. *Journal of Chemical Engineering and Materials Science*. 4 (7), 93–102.
- [118]. Hammer, M.S., Deibel, C., Pflaum, J., and Dyakonov, V., 2010, Effect of doping of zinc oxide on the hole mobility of poly(3-hexylthiophene) in hybrid transistors. *Organic Electronics*. 11 (9), 1569–1577.
- [119]. Wang, M. and Wang, X., 2008, P3HT/ZnO bulk-heterojunction solar cell sensitized by a perylene derivative. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 92 (7), 766–771.
- [120]. Patel, M., Pataniya, P.M., and Sumesh, C.K., 2022, ZnO-WS 2 Nano-heterojunction/ITO photodetector for detection of visible light.
- [121]. Lan, F. and Li, G., 2013, Direct observation of hole transfer from semiconducting polymer to carbon nanotubes. *Nano Letters*. 13 (5), 2086–2091.
- [122]. Ashraf, A., Dissanayake, D.M.N.M., and Eisaman, M.D., 2015, Measuring charge carrier mobility in photovoltaic devices with micron-scale resolution. *Applied Physics Letters*. 106 (11),.

- [123]. Erouel, M., Mansouri, S., Ba, M., Romero, A., Jiménez-Tejada, J.A., and El Mir, L., 2023, Modeling of Electrical Characteristics of Thin-Film Transistors Based P3HT:ZnO Blend: Channel Length Layer Effect. *Journal of Electronic Materials*. 52 (8), 5315–5326.
- [124]. Kamkaew, A., Chen, F., Zhan, Y., Majewski, R.L., and Cai, W., 2016, Scintillating Nanoparticles as Energy Mediators for Enhanced Photodynamic Therapy. *ACS Nano*. 10 (4), 3918.
- [125]. Ji, J., Colosimo, A.M., Anwand, W., Boatner, L.A., Wagner, A., Stepanov, P.S., et al., 2016, ZnO Luminescence and scintillation studied via photoexcitation, X-ray excitation and gamma-induced positron spectroscopy. *Scientific Reports* 2016 6:1. 6 (1), 1–9.
- [126]. Sahi, S. and Chen, W., 2013, Luminescence enhancement in CeF<sub>3</sub>/ZnO nanocomposites for radiation detection. *Radiation Measurements*. 59 139–143.
- [127]. Karthiika, R.R., Devanand Venkatasubbu, · G, Prakash, · T, and Prakash, T., 2022, Crystallite Size Effect on X-ray-instigated Photocurrent Properties of PbWO<sub>4</sub> Thick Film. *Electronic Materials Letters*. 18 304–312.
- [128]. Öztürk, S., Kösemen, A., Şen, Z., Kılınc, N., and Harbeck, M., 2016, Poly(3-Methylthiophene) Thin Films Deposited Electrochemically on QCMs for the Sensing of Volatile Organic Compounds. *Sensors (Basel, Switzerland)*. 16 (4),.
- [129]. Taleuzzaman, M. and Journal, I., 2018, Organic & Medicinal Chem IJ Limit of Blank (LOB), Limit of Detection (LOD), and Limit of Quantification (LOQ) Organic and Medicinal Chemistry. *Organic & Medicinal Chem IJ*. 7 (5),.
- [130]. Flakus, F.N., n.d., Radiation detection Detecting and measuring ionizing radiation-a short history.
- [131]. Lee, S., Cao, Y.J., and Kim, C.Y., 2015, Evolution of Ionizing Radiation Research : Physical and Radiobiological Evaluation of Radiotherapy Treatment Plan. *Evolution of Ionizing Radiation Research*. 109–149.
- [132]. Basiricò, L., Ciavatti, A., Fratelli, I., Dreossi, D., Tromba, G., Lai, S., et al., 2020, Medical Applications of Tissue-Equivalent, Organic-Based Flexible Direct X-Ray Detectors. *Frontiers in Physics*. 8 498981.
- [133]. Ba, M., Mansouri, · S, Jouili, · A, Yousfi, · Y, Chouiref, · L, Jdir, · M, et al., 2023, Controlling of Hysteresis by Varying ZnO-Nanoparticles Amount in P3HT:ZnO Hybrid Thin-Film Transistor: Modeling. 52 1203–1215.
- [134]. Das, N.C. and Sokol, P.E., 2010, Hybrid photovoltaic devices from regioregular polythiophene and ZnO nanoparticles composites. *Renewable Energy*. 35 (12), 2683–2688.
- [135]. Bilgaiyan, A., Dixit, T., Palani, I.A., and Singh, V., 2017, Performance improvement of ZnO/P3HT hybrid UV photo-detector by interfacial Au nanolayer. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*. 86 136–141.

- [136]. Nam, S., Seo, J., Park, S., Lee, S., Jeong, J., Lee, H., et al., 2013, Hybrid phototransistors based on bulk heterojunction films of poly(3-hexylthiophene) and zinc oxide nanoparticle. *ACS Applied Materials and Interfaces*. 5 (4), 1385–1392.
- [137]. Li, F., Du, Y., and Chen, Y., 2012, Hybrid bulk heterojunction solar cells based on poly(3-hexylthiophene) and ZnO nanoparticles modified by side-chain functional polythiophenes. *Thin Solid Films*. 526 120–126.
- [138]. Chin, Y.M., Lin, Y.J., and Liu, D.S., 2013, Enhancement of carrier mobility in poly(3-hexylthiophene) by incorporating ZnO nanoparticles. *Thin Solid Films*. 548 453–455.
- [139]. Valitova, I., Hupman, A., Hill, I.G., and Syme, A., 2021, Poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl) based diodes for ionizing radiation dosimetry applications. *Organic Electronics*. 88 105981.
- [140]. Hupman, M.A., Valitova, I., Hill, I.G., and Syme, A., 2020, Radiation induced photocurrent in the active volume of P3HT/PCBM BHJ photodiodes. *Organic Electronics*. 85 105890.
- [141]. Li, Y., Chen, H., Hao, Z., Wang, Z., Wu, X., Lu, X., et al., 2024, Toward Low-Voltage and High-Sensitivity Direct X-ray Detectors Based on Thick Bulk Heterojunction Organic Device. *ACS Applied Materials and Interfaces*. 16 (8), 10417–10426.
- [142]. Thirimanne, H.M., Jayawardena, K.D.G.I., Nisbet, A., Shen, Y., Bandara, R.M.I., Mills, C.A., et al., 2020, Hybrid Multipixel Array X-Ray Detectors for Real-Time Direct Detection of Hard X-Rays. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 67 (10), 2238–2245.
- [143]. Mao, L., Li, Y., Yu, L., Li, X., and Zhang, J., 2021, Stable and printable direct X-ray detectors based on micropylamid  $\omega$ -Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> with low detection limit. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 68 (7), 3411–3416.
- [144]. Lee, J., Liu, H., and Kang, J., 2020, A Study on an Organic Semiconductor-Based Indirect X-ray Detector with Cd-Free QDs for Sensitivity Improvement. *Sensors 2020*, Vol. 20, Page 6562. 20 (22), 6562.
- [145]. Xiang, L., Huang, X., Wang, Y., Xin, Z., Chai, G., Xu, Y., et al., 2021, X-ray Sensitive hybrid organic photodetectors with embedded CsPbBr<sub>3</sub> perovskite quantum dots. *Organic Electronics*. 98 106306.

## İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI

10719489

ORJİNALLİK RAPORU

%**4**

BENZERLİK ENDEKSİ

%**2**

İNTERNET KAYNAKLARI

%**2**

YAYINLAR

%**2**

ÖĞRENCİ ÖDEVLERİ

BİRİNCİL KAYNAKLAR

**1**

Submitted to The Scientific & Technological  
Research Council of Turkey (TUBITAK)

Öğrenci Ödevi

%**1**

**2**

Nevin Nur Selçuk, Sadullah Öztürk, Yalçın  
Kalkan, Ahmet Demir, Keziban Gegin, Arif  
Kösemen. "Development of Sol-Gel  
Synthesized ZnO Nanoparticle-Incorporated  
Polymer-Based X-Ray Detectors: A  
Comparative Investigation of Device  
Architectures", ACS Applied Electronic  
Materials, 2025

Yayın

%**1**

**3**

[acikbilim.yok.gov.tr](http://acikbilim.yok.gov.tr)

İnternet Kaynağı

<%**1**

**4**

Yu-Ping Lee, Chi-Ju Chiang, Pin-Chia Jen, Bo-  
Ting Chou et al. "Synergistic In Situ Hybrid  
Synthesis of Highly Crystalline P3HT/ZnO  
Nanowires at Elevated Pressures", ACS  
Applied Energy Materials, 2018

Yayın

<%**1**

**5**

Aydin, Hakan. "Lazer Kaynagi Ile Birlestirilmis  
Farkli Turdeki Yuksek/Ultra Yuksek  
Mukavemetli celiklerde Mekanik ve Mikroyapi

<%**1**

## ETİK KURUL İZİN YAZISI

**Uyarı:** Canlı denekler üzerinde yapılan tüm araştırmalar için Etik Kurul Belgesi alınması zorunludur.

- Etik Kurul izni gerekmektedir.
- Etik Kurul izni gerekmemektedir.

Nevin Nur SELÇUK  
(İmza)



## KURUM İZİNİ YAZILARI

**Uyarı:** Canlı ve cansız deneklerle yapılan tüm çalışmalar için kurum izin belgelerinin eklenmesi zorunludur. Gizlilik ve mahremiyet içeren durumlarda kurum adı kapatılmalıdır.

- Kurum izni gerekmektedir.
- Kurum izni gerekmemektedir.

Nevin Nur SELÇUK  
(İmza)

